

滑动速度影响摩擦力主要取决于温度状况。滑动速度引起的发热和温度变化,改变了表面层的性质以及摩擦过程中表面的相互作用和破坏条件,因而摩擦系数必将随之变化。而对于在很宽的温度范围内机械性质保持不变的材料例如石墨,摩擦系数几乎不受滑动速度影响。

为了全面描述摩擦过程中表面温度的状况,通常采用表面瞬现温度、表面平均温度、体积平均温度、温度梯度、热量分布函数等参数来进行研究。总的说来,摩擦热对摩擦性能的影响表现在两方面:一是发生润滑状态转化,如从油膜润滑转化为边界润滑甚至干摩擦;另一是引起摩擦过程表面层组织的变化,即摩擦表面与周围介质的作用改变,如表面原子或分子间的扩散、吸附或解附、表层结构变化和相变等。

温度对于摩擦系数的影响与表面层的变化密切相关。大多数实验结果表明:随着温度的升高,摩擦系数增加,而当表面温度很高使材料软化时,摩擦系数将降低。

10.5.3 表面膜的影响

金属表面上的原子通常处于不平衡状态,易与周围介质作用形成表面膜。而摩擦中的表面变形和温升促进表面膜的形成。有时为了降低摩擦,常常人为地在摩擦表面生成薄的表面膜,例如铟、镉、铅等软金属或者硫化物、氯化物、磷化物的表面膜。

表面膜的减摩作用与润滑膜相似,它使摩擦副之间的原子结合力或离子结合力被较弱的范德华(Van-der-Waals)力所代替,因而降低了表面分子力作用。另外表面膜的机械强度低于基体材料,滑动时剪切阻力较小。

表面膜厚度对摩擦系数有很大影响。图 10-11 是 Bowden 得到的实验结果,图中给出工具钢表面上铟膜厚度与摩擦系数的关系。当表面膜厚度为 10^{-3} mm 时,摩擦系数为极小值。如果表面膜太薄,其作用不能充分发挥,而厚度太大时,又因表面层较软使实际接触面积增大,摩擦系数相应增加。

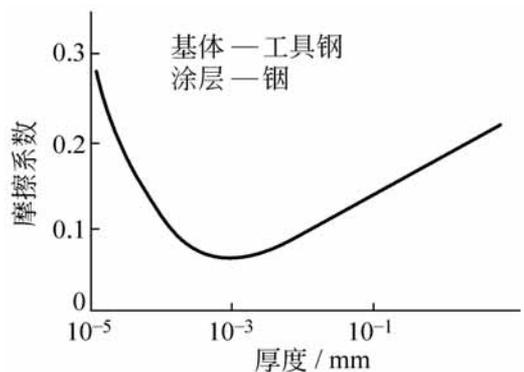


图 10-11 表面膜厚度的影响

表 10-4 说明了表面膜的减摩作用,在干摩擦状态下效果十分显著。

表 10-4 氧化膜和硫化膜的减摩作用

| 摩擦条件 | 摩擦副 | 摩擦系数 | | |
|-------|-----|------|------|------|
| | | 纯净表面 | 氧化膜 | 硫化膜 |
| 干摩擦 | 钢-钢 | 0.78 | 0.27 | 0.39 |
| | 铜-铜 | 1.21 | 0.76 | 0.74 |
| 硬脂酸润滑 | 钢-钢 | 0.11 | 0.19 | 0.16 |

表面膜破坏以后摩擦系数将急剧增加。破坏的原因可以是载荷引起的机械损坏,它取决于表面膜的硬度和与基体的连接强度。对于铅、钢等易熔金属的表面膜,当温度升高到熔点时也发生破坏。

当形成比较坚硬的表面膜例如氧化铝,往往因脆性高而使连接强度很低。减摩效果很好的镉膜与基体的连接强度较弱,容易从表面擦掉。金属与石墨摩擦所产生的石墨膜能获得稳定的摩擦系数。

10.6 滚动摩擦

虽然人们很早就利用滚动摩擦,然而有关滚动摩擦的机理研究和实验数据却很不够。

如图 10-12 所示。当圆柱沿平面滚动时,由于接触区的变形使得以接触点 C 为中心的接触压力分布不对称,因而支承面的反力产生偏移。此反力对于接触点的矩称为滚动摩擦力矩。

滚动摩擦系数 k 定义为滚动摩擦力矩与法向载荷之比,即

$$k = \frac{FR}{W} = e \quad (10-18)$$

由此可知:滚动摩擦系数与滑动摩擦系数不同,它是有量纲的量,常用单位为 mm。

另外,也可以用无量纲量即滚动阻力系数 f_r 来表征滚动摩擦的大小。它在数值上等于滚动驱动力产生单位距离所做的功与法向载荷之比。若圆柱滚过角度为 α ,滚过的距离为 R ,而驱动力做功为 FR ,则滚动阻力系

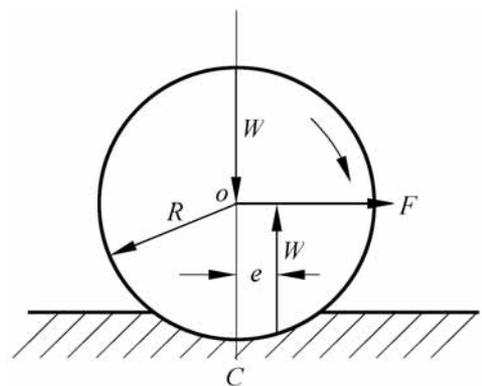


图 10-12 滚动摩擦

数为

$$f_r = \frac{FR / R}{W} = \frac{F}{W} = \frac{k}{R} \quad (10-19)$$

Coulomb(1785年)最早用实验方法得出滚动摩擦定律:滚动阻力系数 f_r 与滚动体半径 R 的乘积是一个常量,也就是滚动摩擦系数 k 或者偏心距 e 为常量。它们的数值取决于摩擦副材料性质,而与载荷大小无关。随后, Dupuit(1837年)提出了修正公式,通常称为 Dupuit 定律,即

$$f_r = \frac{k}{D} \quad (10-20)$$

式中, D 为滚动体直径。滚动摩擦系数 k 为由材料和表面状况确定的常量,不随速度和载荷而变化。

显然,上述的滚动摩擦定律未涉及滚动摩擦机理,它可以近似地应用于工程计算。

通常各种滚动运动都可以视为以下三种基本滚动形式的组合,这三种滚动形式的表面作用和摩擦机理各不相同。

1) 自由滚动

圆柱体或球体沿着平面而无约束地作直线滚动,这是最简单的滚动形式。

2) 具有牵引力的滚动

在接触区内同时受到法向载荷和切向牵引力的作用,例如摩擦轮传动。

3) 伴随滑动的滚动

当两个滚动体的几何形状造成接触面上的切向速度不相等时,滚动中必将伴随滑动,例如向心推力球轴承中球与滚道之间的滚动。

滚动摩擦机理显然与滑动摩擦不同。除非接触面存在很大的滑动,滚动摩擦通常不存在犁沟效应,而粘着结点的剪切阻力也不是滚动摩擦的主要原因。滚动摩擦阻力主要由以下四种因素组成:

1) 微观滑动

微观滑动是滚动过程中普遍存在的现象。当两个弹性模量不同的物体作自由滚动时,由于接触表面产生不相等的切向位移,就将产生微观滑动出现。用以传递机械功的滚动接触表面有切向牵引力作用,也将产生较大的微观滑动。当几何形状使得接触面上两表面的切向速度不同时,将导致更大的微观滑动。

微观滑动所产生的摩擦阻力占滚动摩擦的较大部分,它的机理与滑动

摩擦相同。

2) 塑性变形

在滚动过程中,当表面接触应力达到一定值时,首先在距表面一定深度处产生塑性变形。随着载荷增加塑性变形区域扩大。塑性变形消耗的能量表现为滚动摩擦阻力,可以根据弹塑性力学计算。例如球体沿平面自由滚动时,由于球体运动前方的材料塑性变形所产生的滚动摩擦阻力 F 可以表达为

$$F = \frac{W^{2/3}}{R}$$

式中, W 为法向载荷; R 为球体半径。

3) 弹性滞后

滚动过程中产生弹性变形需要一定能量,而弹性变形能的主要部分在接触消除后得到回复,其中小部分消耗于材料的弹性滞后现象。粘弹性材料的弹性滞后能量消耗远大于金属材料,它往往是滚动摩擦阻力的主要组成。

4) 粘着效应

滚动表面相互紧压形成的粘着结点在滚动中将沿垂直接触面的方向分离。因为结点分离是受拉力作用,没有结点面积扩大现象,所以粘着力很小。通常由粘着效应引起的阻力只占滚动摩擦阻力的很小部分。应当指出,对于铁道运输中的轮轨摩擦还必须保证一定的粘着性能,以防止滚动中打滑而加剧磨损。研究表明^[4],轮轨间的粘着效应与材料性能、接触状况以及环境污染等密切相关。

综上所述,滚动摩擦过程十分复杂,在通常情况下,上述各种因素同时影响滚动摩擦阻力,根据滚动形式和工况条件不同,各种因素所起的作用也不同。

10.7 滑动摩擦的其他问题

10.7.1 特殊工况的摩擦

现代机械装备中许多摩擦副处于高速、高温、低温、真空等特殊工况下工作,它们的摩擦特性不同于一般工况下的摩擦。

1. 高速摩擦

在航空、化工和透平机械中,摩擦表面的相对滑动速度常超过 50m/s ,甚至达到 600m/s 以上。此时接触表面产生大量的摩擦热,而又因滑动速度高,接触点的持续接触时间短,瞬间产生的大量摩擦热来不及向内部扩散。因此摩擦热集中在表面很薄的区间,使表面温度高,温度梯度大而容易发生胶合。

高速摩擦的表面温度可达到材料的熔点,有时在接触区产生很薄的熔化层。熔化金属液起着滑润剂的作用而形成液体润滑膜,使摩擦系数随着速度的增加而降低,如表 10-5 所示。

表 10-5 高速摩擦的摩擦系数

| 材 料 | 铜 | | | 铁 | | 3 号钢 | | |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 滑动速度/ m/s | 135 | 250 | 350 | 140 | 330 | 150 | 250 | 350 |
| 摩擦系数 | 0.056 | 0.040 | 0.035 | 0.063 | 0.027 | 0.052 | 0.024 | 0.023 |

注:对摩件为含碳量 0.7% 的钢环,硬度 HB250; 单位面积载荷为 8MPa 。

2. 高温摩擦

高温摩擦出现在各种发动机、原子反应堆和宇航设备中。用作高温工作的摩擦材料为难熔金属化合物或陶瓷,例如钢、钛、钨金属化合物和碳化硅陶瓷等等。

研究表明:高温摩擦时,各种材料的摩擦系数随温度的变化趋势相同,即随着温度的增加,摩擦系数先缓慢降低,然后迅速升高。在这个过程中摩擦系数出现一个最小值。对于通常的高温摩擦材料,最小的摩擦系数出现在 $600 \sim 700$ 左右。

3. 低温摩擦

在低温下或者各种冷却介质中工作的摩擦副,其环境温度常在 0 以下。此时摩擦热的影响甚小,而摩擦材料的冷脆性和组织结构对摩擦影响较大。低温摩擦材料主要的有铝、镍、铅、铜、锌、钛等合金,以及石墨、氟塑料等。

4. 真空摩擦

在宇航和真空环境中工作的摩擦副具有许多特点。如:由于周围介质稀

薄, 摩擦表面的吸附膜和氧化膜经一段时间后发生破裂, 而且难以再生, 这就造成金属直接接触, 产生强烈的粘着效应, 所以真空度越高, 摩擦系数越大。在真空中无对流散热现象, 摩擦热难以排出, 使表面温度高。此外, 由于真空中的蒸发作用, 使得液体润滑剂失效, 因而固体润滑剂和自润滑材料得到有效的应用。为了在摩擦表面上生成稳定的保护膜, 真空摩擦副可以采用含二硫化物和二硒化物的自润滑材料以及锡、银、镉、金、铅等金属涂层。

10.7.2 摩擦振动

由于摩擦副的支承弹性影响, 滑动摩擦过程常出现摩擦振动。发生宏观的摩擦振动的先决条件是存在下降的摩擦系数速度特性曲线, 如图 10-13 所示。

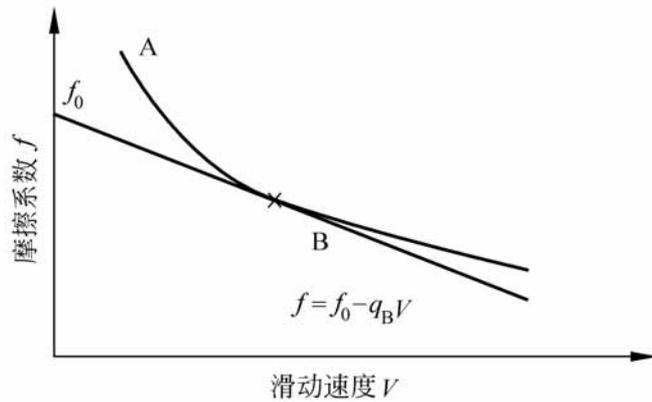


图 10-13 下降的摩擦系数与速度曲线

摩擦过程的宏观振动可以通过实验来分析。如图 10-14(a) 所示, 一个重量为 W 的滑块在一粗糙的水平基面上滑动。

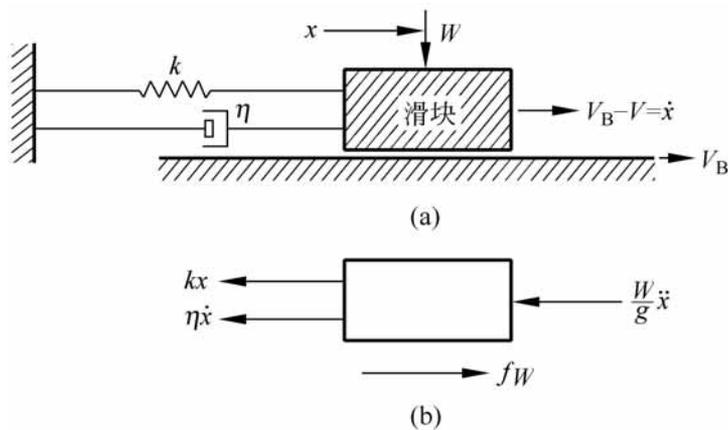


图 10-14 摩擦振动物理模型

我们将滑块的支承等效为受到固定在支座上的弹簧 k 和粘滞阻尼器的约束。如果基面向右的运动速度是 V_B , 则滑块对基面的相对速度是沿 x

的负方向,即在某一瞬时,滑块以相对速度 V 向左运动,设相当于图 10-13 中的 B 点,此时的滑动摩擦系数可由下式表示:

$$f = f_0 - \varphi_B V$$

其中, φ_B 为 B 点位置的摩擦系数与速度曲线的斜率,而 f_0 是一常数。图 10-14(b)表示了作用于滑块上的瞬时的力,由此可以写出以下的方程式:

$$\frac{W}{g} \ddot{x} + \dot{x} + kx = fW \quad (10-21)$$

将 f 值代入式(10-21),并令 $V = V_B - \dot{x}$,则得到

$$\ddot{x} + K_3 \dot{x} + K_4 x = K_5 \quad (10-22)$$

其中, $K_3 = -[\varphi_B - (f_0/W)]g$; $K_4 = k g / W$; $K_5 = (f_0 - \varphi_B V_B) g$ 。

对于这一运动,可以认为 φ_B 是常数。假定摩擦曲线的斜率 φ_B 满足关系: $\varphi_B > f_0/W$ 。则可以证明公式(10-22)中的负阻尼系数 K_3 将给出一以指数形式增加的振动振幅。这种自激振动,在机械工程中有许多实例。例如发生在机车的驱动轮上的噪声,又如粉笔在黑板上的尖啸声。

公式(10-22)的解是正弦形式的。而负阻尼系数给系统提供能量是产生振动现象的最重要原因。假如我们考虑到速度减少时摩擦系数与速度曲线的斜率增加(如图 10-13 中的 A 点斜率 φ_A),则 K_3 甚至会变成更大的负值,这会使振动的振幅出现急剧的增加。铁道车辆铸铁刹车块与车轮的摩擦振动就是一个典型的例子。在较高的滑动速度下,斜率实际上为零,所以,刹车开始时较平滑。但是,因为随着速度的减小,铸铁的摩擦系数与速度曲线的斜率迅速增加,所以在车辆接近停止时,振动会变得极为剧烈。如果采用摩擦系数随速度的变化比铸铁的小得多的非金属刹车块,振动的剧烈程度会大大降低,在所有的速度段引起一些较小的振动。

10.7.3 地面摩擦

除了前面已经分析的车轮滚动摩擦之外,还有其他的一些地面摩擦方式,如拖拉机行驶或滑雪的摩擦情况,将在这里简单地加以介绍。

1. 松软土壤(例如软土或砂)上车轮滚动摩擦

在农用拖拉机中,土壤的性能决定了牵引能力和承托车轮的能力。通常土壤同时具有塑性和摩擦性能。而土壤中的切应力 τ 与土壤的粘结系数 c 、摩擦角 ϕ 以及作用在车轮与土壤界面处的平均加载压力 p 之间的关系如下:

$$\tau = c + p \tan \phi \quad (10-23)$$

塑性物质(如水含量饱和的泥土或某种形式融化的雪)的摩擦角 可以认为是零,于是 $\mu = c$ 。对于更普遍的粒状土壤,没有粘结或没有内部粘合力时,则有 $c=0$,因而, $\mu = \tan \phi$ 。但是对于实际土壤来说,由于 c 和 $\tan \phi$ 对含水量十分敏感,而且土壤通常缺乏那种作为其他易变形材料特征的均匀性,因此问题比较复杂。

现在来研究带肋状轮胎在软土中的牵引力,如图 10-15 中所示。理论和经验指出:弹性轮胎面上的链挡和肋条,当与地面接触时立即粘住土壤,因而它们在产生牵引力中只起次要的作用。这与汽车轮胎上胎面花纹的作用是不同的。这种肋条的主要作用是使车轮的有效直径从 D 增大到 $D + 2t$,这里 D 是未挠曲的平滑轮胎的直径,而 t 为肋条的深度,如图 10-15 所示。

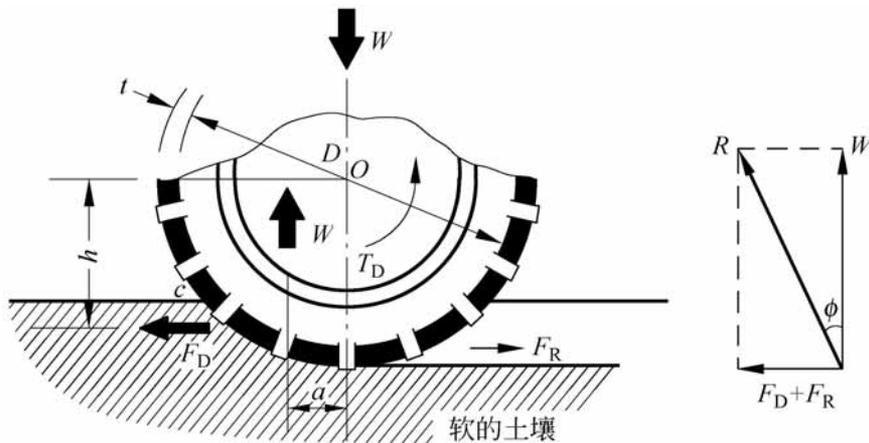


图 10-15 带肋状轮胎在软土上行动

令 T_D 为加在车轮上的驱动力矩,而 F_D 为在车轮中心以下距离 h 处产生的牵引力的平均值。根据力矩平衡有

$$T_D = F_D h + W a$$

这里, a 为车轮中心到土壤表面上的载荷反力 W 的距离。公式两侧都除以 h , 则得

$$T_D / h = F_D + F_R \quad (10-24)$$

式中 $F_R = W(a/h)$ 为车轮的滚动阻力。在软土中行驶时比值 a/h 比通常的轮胎在硬路面上行驶的数值大得多,这是因为载荷仅有效地支承在由初始接触到最大压入位置的那一段软土上。

由于 F_D 和 F_R 各自按图 10-15 中所指的方向取为正的,因此,在公式(10-24)右端,它们在数量上是相减的。把公式(10-24)的每一项除以接触面积 A , 于是得到

$$\frac{T_D}{hA} = \mu - \mu f_R = \mu (\tan \alpha - f_R) \quad (10-25)$$

推导上式引用了对粒状土壤 $c=0$, 土壤在剪切边界处的剪切强度 $= F_D/A$, $\mu = W/A$, 以及滚动阻力系数 $f_R = F_R/W$ 。公式(10-25)清楚地表明:对车轮施加的驱动力 T_D 是土壤摩擦性能和法向载荷的一个函数。这一公式通常用来评价软土和土壤的承载能力。

2. 雪橇在冰上的滑动摩擦

下面研究雪橇在冰上和雪上的摩擦问题。记录到的最低系数发生在冰和雪的融点附近(在大气压力下为 0°)。表 10-6 列出充气轮胎在不同的冰和雪的条件下滑动摩擦系数 f_A 的典型数值。我们看到,从压紧的雪到湿冰,摩擦系数有 10 倍的变化。对于雪橇滑动,系数 f_A 的数值可能与表 10-6 中所列的有差异,但其相对关系将保持不变。

表 10-6 冰或雪在 0° 时的典型摩擦系数

| 冰-雪状态 | f_A | 速度范围/ km/h |
|-------|-------|------------|
| 压紧的雪 | 0.20 | 8 ~ 65 |
| 粗糙的冰 | 0.12 | 8 ~ 32 |
| 光滑的冰 | 0.057 | 0 ~ 32 |
| 湿冰 | 0.02 | — |

现在来研究上蜡的雪橇在压紧的雪上滑动的情况,如图 10-16 所示。

上蜡的作用是在雪橇上建立疏水性的表面,产生一种排斥由压力融化而产生的水珠的倾向。如图 10-16 所示,运动的上蜡表面与单个水珠间的接触角约为 84° 和 66° 。在速度大于 0.4mm/s 时,接触角的数值与速度无关。显然,因为前后端的接触角数值不同,由于表面张力效应,将产生一个毛细管阻力作用在雪橇上。这个力 F_{ST} 的大小可按下述方法计算。

在水珠周边单位长度上的表面张力 γ_L 与水珠内部压力 p_w 的关系,可用下列熟知的公式表示

$$p_w = 4\gamma_L / d \quad (10-26)$$

这里 d 为水珠直径,通常认为水珠直径约为 $30\mu\text{m}$ 。如果我们现在研究图 10-16 中表面张力的水平分量,我们得到水珠周边单位长度上的毛细管阻力 F ,于是

$$F = \gamma_L (\cos 66^\circ - \cos 84^\circ) = 0.302 \gamma_L \quad (10-27)$$

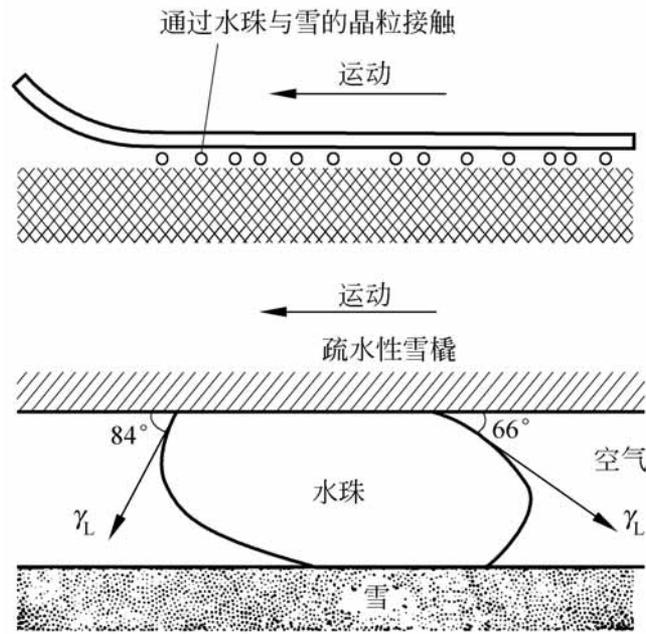


图 10-16 疏水性的雪橇在雪上的接触状态

则每个水珠总的水平毛细管阻力 F 为

$$F = F d = 0.302 \gamma_L d$$

设在雪橇表面的单位面积上有 N_0 个水珠, 并设一个水珠的接触面积为 $d^2/4$ 。于是单位面积上水珠接触面积为

$$k = (d^2/4) N_0$$

这里 k 可以作为雪橇表面温度的量度。于是雪橇单位面积上的总毛细管阻力可从上两式得出, 即

$$F_{ST} = N_0 F = 0.386 k \gamma_L / d \quad (10-28)$$

把公式(10-26)中的 γ_L 代入公式(10-28), 得

$$F_{ST} = 0.096 p_w k \quad (10-29)$$

最后由于雪橇单位面积上的载荷 $\Phi = k p_w$, 我们可从公式(10-29)求出由毛细管阻力引起的切应力 τ_{ST} :

$$\tau_{ST} = F_{ST} / \Phi = 0.096 = f_{ST} \quad (10-30)$$

事实上, 水珠的尺寸和数量以及毛细管阻力, 并不单由 Φ 决定。在雪橇与雪界面上的含水量主要决定于温度和雪橇与雪的表面摩擦状态。式(10-30)中的切应力 τ_{ST} 也可看作是一个摩擦系数 f_{ST} 。随着水珠直径 d 的增大, 毛细管阻力 F_{ST} 将按照式(10-28)降到可以忽略的数值。

雪橇滑动的另一项阻力即粘性阻力, 通常比由表面张力效应引起的毛细管阻力大得多。从牛顿的粘性定律, 我们可写出由粘性阻力形成的切应力 τ_v

$$\nu = (V/d)$$

这里 V 为雪橇的前进速度, ν 为水的动力粘度。我们可把前面公式 (10-27) 中的 d 代入这个公式, 这样, 粘性摩擦系数成为

$$f_v = \frac{\nu}{p_w} = \frac{V}{4L} \quad (10-31)$$

如果取 $V = 25 \text{ m/s}$, $L = 70 \text{ N/mm}$, $\nu = 1.83 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 得 $f_v = 0.163$ 。

雪橇的材料性能对摩擦的改善比增加平均压力效果更大, 后者的作用是使摩擦界面上产生更多的水量, 从而改善润滑条件。由图 10-17 可以看出: 把雪橇的材料由硬铝改为酚醛塑料, 可使滑动摩擦力降低到仅为原来的 $1/4$ 。其他影响雪橇摩擦的因素还有表面粗糙度和雪橇材料的硬度。硬钢的滑橇比软钢滑橇产生较大的融化效应。光滑表面与粗糙表面相比, 在接近 0°C 时可能使摩擦降低, 但在更低的温度下显出相反的效果。这是由于在很低的温度下, 粗糙的雪橇支承雪橇上载荷的实际压力增大, 因而促使雪的压力融化形成水珠。

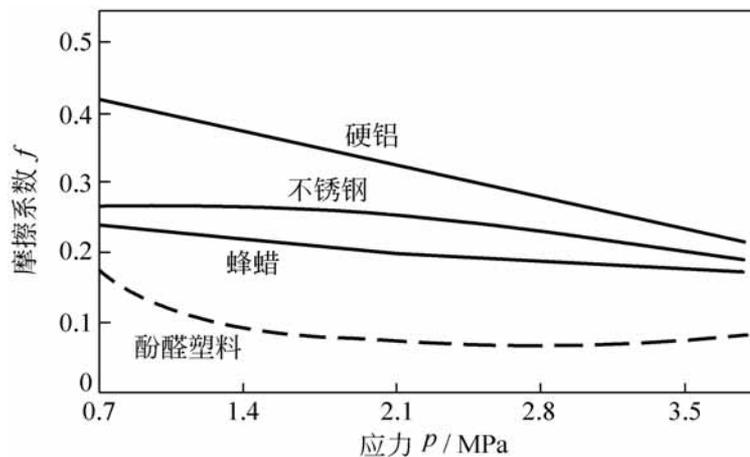


图 10-17 压力和雪橇材料对摩擦的影响

以上对于雪橇滑动摩擦的分析, 对于在雪和冰上行动的其他工具也是适用的。

10.7.4 摩擦控制

有效地实时控制摩擦是工程技术界追求和向往的目标。长期以来人们主要通过选择润滑剂和摩擦副材料来减小或增大摩擦系数, 并取得了一定的进展。由于摩擦系数依赖于载荷、速度、温度等因素, 人们就无法精确地预测摩擦系数随运行工况和运行时间的变化, 因此, 要准确调整摩擦系数十

分困难。这里对近年发展起来的电控摩擦技术作简要介绍。电控摩擦是通过施加外部电压来改变某些材料摩擦特性的一种方法。

1. 电压的施加方式

外部电压的施加方式是实现电控摩擦的重要手段,目前实验了三种方式,即:

(1) 直接的方法是将摩擦副作为两电极分别连结在电源的两端,如图 10-18(a)。但这种方法有很大的局限性,它要求摩擦副必须是由导体(如金属)构成,同时,因为接触电阻很小,所以除非使用大电流源,一般所能施加的电压较低,对金属摩擦副来说只有毫伏量级,因此所能产生的电控摩擦效果也不显著。

(2) 镀膜方法是在其中一个摩擦副表面生成一层绝缘涂层,如图 10-18(b)。此方法要保证涂层在摩擦过程中不发生击穿和磨损也是困难的。如果用导体做摩擦副的一方,用半导体或导电硅橡胶作为摩擦副的另一方,可以使所施加的电压达到伏的量级。

(3) 不直接用摩擦副作为电极,而是在接触区附近引入辅助电极,如图 10-18(c)所示。这样做的优点是可以施加较高的电压,同时摩擦副的一方既可以是导体也可以是绝缘体。其次,可以把辅助电极作为阳极,以避免摩擦副遭受电化学腐蚀。另外,该辅助电极可以不必随摩擦副一起运动,这样对于旋转摩擦副来说施加电压也十分方便。其缺点是在接触区内电场的方向、大小及其分布都很复杂,使分析外加电压与摩擦系数之间的关系变得十分困难。

蒋洪军等人^{[5][6]}采用如图 10-18(c)的方式对电控摩擦进行了研究,下面介绍他们的部分实验和结果。

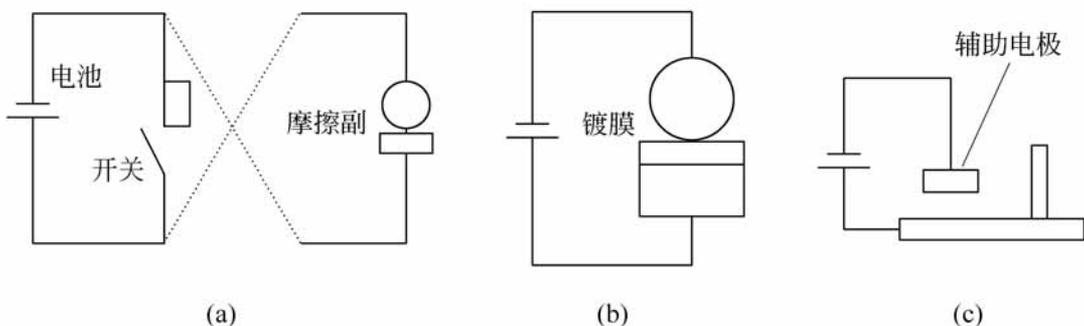


图 10-18 外部电压的施加方式

2. 研究方法与实验结果

实验采用了两类电控摩擦的润滑材料：一类是以润滑油为介质在其中添加一些二硫化钼微粉、巴基球、金刚石粉或油性添加剂；另一类是以去离子水为介质在其中添加硬脂酸锌，硬脂酸锌与水的质量比为 1 : 99。由于硬脂酸锌不溶于水，还需要添加微量表面活性剂使其在水中达到均匀分散。在实验中润滑剂是充满在试样池内以保证与阳极和阴极都相通。

实验是在销盘实验机上进行的，摩擦副材料为工程陶瓷与黄铜。工程陶瓷中 $\text{-Al}_2\text{O}_3$ 含量为 99.7wt%，MgO 含量为 0.25wt%，其余为杂质。陶瓷试样烧结成 16×8 圆柱，端面经磨削，粗糙度为 $R_a = 0.4 \mu\text{m}$ 。黄铜块试样的牌号为 H68，尺寸为 $60 \text{mm} \times 20 \text{mm} \times 12 \text{mm}$ ，表面粗糙度 $R_a = 1.6 \mu\text{m}$ 。图 10-19 至图 10-22 给出外加电压为 0 和 20V 时，不同条件下得到的摩擦系数。从图中可以得到以下一些结论：(1) 在外加电压为 0 时，摩擦系数约为 0.2，如图 10-19；(2) 无论加上正或负电压后，摩擦系数都有明显的增加，如图 10-19；(3) 电压去除后，摩擦系数不断回复到原值，如图 10-20；(4) 当摩擦系数基本上与电压同步变化，如图 10-21，电压线性增加，摩擦系数基本上是跟随线性增加；(5) 载荷对摩擦系数的变化影响不大，如图 10-22。

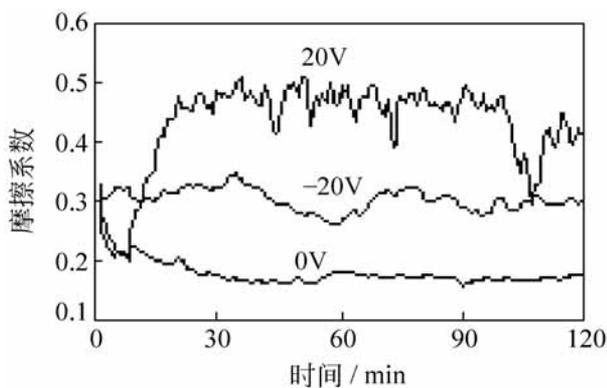


图 10-19 恒定电压条件下的摩擦系数

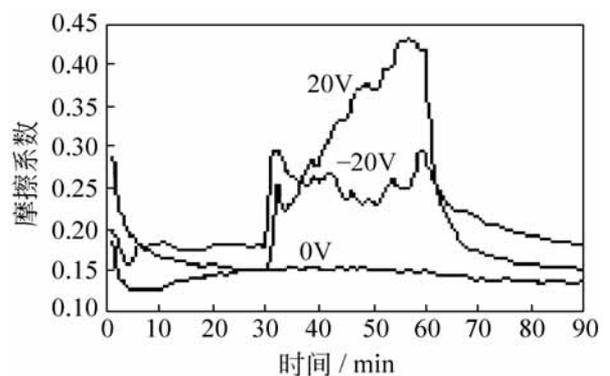


图 10-20 通断电压条件下的摩擦系数

3. 摩擦实时控制

图 10-23 是利用电压控制摩擦系数变化的一个例子，目标是通过控制电压的变化产生按给定曲线(这里是正弦曲线)变化的摩擦系数。实验仍然是按图 10-18(c)的施加电压方式进行的，实验条件与图 10-19 至图 10-22

相同。首先,将理论摩擦系数的中值设定为 0.3,令其以 0.1 为幅值,以 60 min 为周期按正弦变化。然后,将理论摩擦系数曲线的一个周期分解为 12 步,每步步长为 5 min。取每一段的摩擦系数理论值作为该段时间的目标值,通过前面的实验结果确定要达到该目标值所需的电压。实验结果列于图 10-23 中,直方图就是设计要达到的正弦摩擦系数的目标曲线,点线是通过控制电压在实验中实际得到摩擦系数。结果表明电控摩擦系数能够较好地按预设的曲线变化。

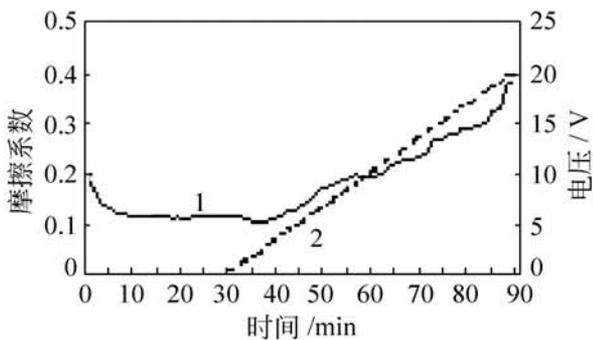


图 10-21 电压线性增长时的摩擦系数

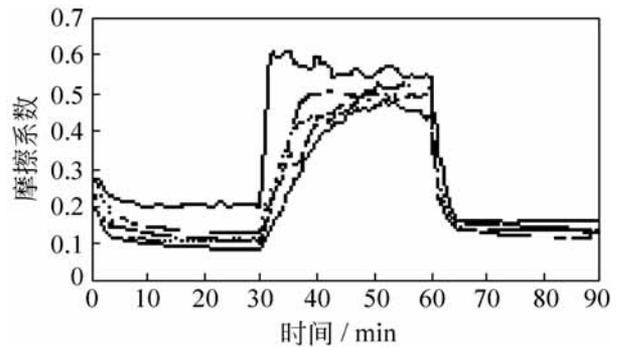


图 10-22 不同载荷下的摩擦系数

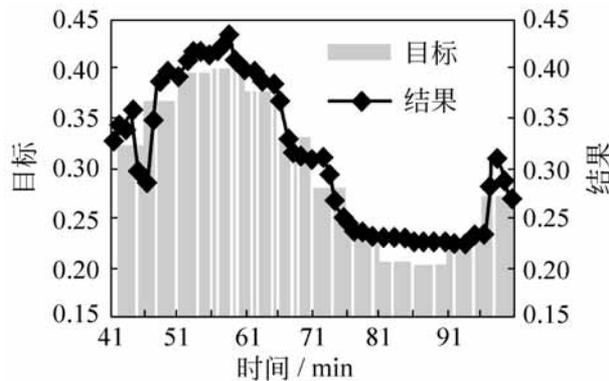


图 10-23 电控摩擦系数实验

应当指出:电控摩擦技术尚处在实验室研究阶段,达到工程应用还需要解决许多实际问题。但是随着研究的深入,控制摩擦系数按一定规律变化是可能实现的。

参 考 文 献

- [1] Bowden F P, Tabor D. The Friction and Lubrication of Solid. Oxford: Clarendon Press, 1964
- [2] 克拉盖尔斯基 N B 等著.汪一麟等译.摩擦磨损原理.北京:机械工业出版社,1982

- [3] 摩尔著 黄文治等译 摩擦学原理及应用 北京:机械工业出版社,1982
- [4] 斐有福,金元生,温诗铸 轮轨粘着的影响因素及其控制措施 国外铁道车辆, 1995, (2):5~7
- [5] 蒋洪军,孟永钢,温诗铸 外加电压对三氧化二铝/黄铜摩擦副摩擦的主动控制试验研究 摩擦学学报,1999,19(3):244~249
- [6] Jiang Hongyun, Meng Yonggang, Wen Shizhu . Effect of external D.C. electric fields on friction and wear behavior of alumina/brass sliding pairs . Science in China (Series E.) 1998, 41(6): 617~625

第 11 章

磨损特征与机理

磨损是 互接触的物体在相对运动中表层材料不断损伤的过程,它是伴随摩擦而产生的必然结果。磨损问题引起人们极大的重视,这是由于磨损所造成的损失十分惊人。根据统计,机械零件的失效主要有磨损、断裂和腐蚀等三种方式,而磨损失效却占 60% ~ 80%。因而研究磨损机理和提高耐磨性的措施,将有效地节约材料和能量,提高机械装备的使用性能和寿命,减少维修费用,这对于国民经济具有重大的意义。

由于科学技术的迅速发展,20 世纪 30 年代以后,磨损问题已成为保证机械装备正常工作的薄弱环节。特别是在高速、重载、精密和特殊工况下工作的机械,对磨损研究提出了迫切的要求。同时,60 年代以来其他科学技术例如材料科学、表面物理与化学、表面测试技术等的发展,也促进了对磨损机理进行更深入的研究。

研究磨损的目的在于通过对各种磨损现象的考察和特征分析,找出它们的变化规律和影响因素,从而寻求控制磨损和提高耐磨性的措施。一般说来,磨损研究的主要内容有:

- (1) 主要磨损类型的发生条件、特征和变化规律;
- (2) 影响磨损的因素,包括摩擦副材料、表面形态、润滑状况、环境条件,以及滑动速度、载荷、工作温度等工况参数;
- (3) 磨损的物理模型与磨损计算;
- (4) 提高耐磨性的措施;
- (5) 磨损研究的测试技术与实验分析方法。

11.1 磨损的分类

分类的目的是为了将实际存在的各式各样的磨损现象归纳为几个基本类型。合理的分类能够使研究工作简化,更好地分析磨损的实质。磨损分类方法表达了人们对磨损机理的认识,不同的学者提出了不同的分类观点,至今还没有普遍公认的统一的磨损分类方法。

11.1.1 磨损分类

早期人们根据摩擦表面的作用将磨损分为以下三大类:

1. 机械类

由摩擦过程中表面的机械作用产生的磨损,包括磨粒磨损、表面塑性变形、脆性剥落等。其中磨粒磨损是最普遍的机械磨损形式。

2. 分子-机械类

由于分子力作用形成表面粘着结点,再经机械作用使粘着结点剪切所产生的磨损,即粘着磨损。

3. 腐蚀-机械类

这类磨损是由介质的化学作用引起表面腐蚀,而摩擦中的机械作用加速腐蚀过程。它包括氧化磨损和化学腐蚀磨损。

显然,上述分类虽然在一定程度上阐明了各类磨损产生的原因,但却过于笼统。

11.1.2 磨损过程

(1962年)提出了较全面的磨损分类方法。他将磨损划分为三个过程,根据每一过程的分类来说明相互关系,如图 11-1 所示。

磨损现象的三个过程依次为:

1. 表面的相互作用

两个摩擦表面的相互作用可以是机械的或分子的两类。机械作用包括弹性变形、塑性变形和犁沟效应。它可以是由两个表面的粗糙峰直接啮合

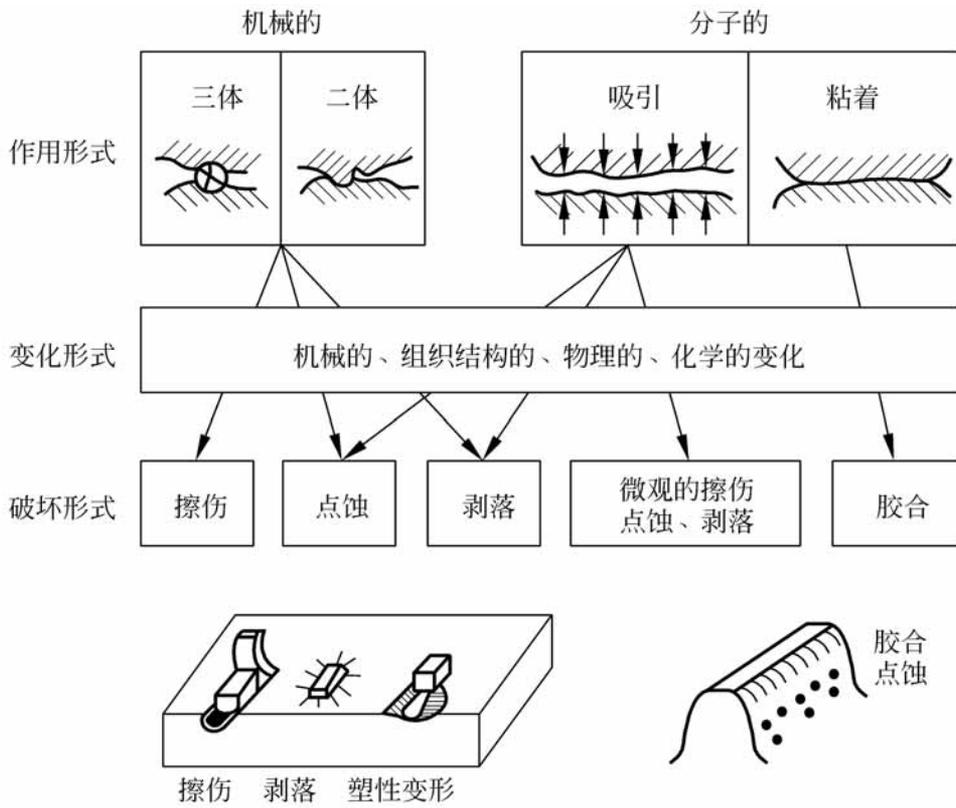


图 11-1 磨损分类图

引起的,也可以是三体摩擦中夹在两表面间的外界磨粒造成的。而表面分子作用包括相互吸引和粘着效应两种,前者作用力小而后者的作用力较大。

2. 表面层的变化

图 11-2 说明在摩擦磨损过程中各种因素的相互关系及其复杂性。在



图 11-2 摩擦磨损过程图

摩擦表面的相互作用下,表面层将发生机械性质、组织结构、物理和化学变化,这是由于表面变形、摩擦温度和环境介质等因素的影响所造成的。

表面层的塑性变形使金属冷作硬化而变脆。如果表面经受反复的弹性变形,则将产生疲劳破坏。摩擦热引起的表面接触高温可以使表层金属退火软化,接触以后的急剧冷却将导致再结晶或固溶体分解。外界环境的影响主要是介质在表层中的扩散,包括氧化和其他化学腐蚀作用,因而改变了金属表面层的组织结构。

3. 表面层的破坏形式

图 11-1 提出的磨损形式有

(1) 擦伤: 由于犁沟作用在摩擦表面产生沿摩擦方向的沟痕和磨粒。

(2) 点蚀: 在接触应力反复作用下,使金属疲劳破坏而形成的表面凹坑。

(3) 剥落: 金属表面由于变形强化而变脆,在载荷作用下产生微裂纹随后剥落。

(4) 胶合: 由粘着效应形成的表面粘结点具有较高的连接强度时,使剪切破坏发生在层内一定深度,因而导致严重磨损。

(5) 微观磨损: 以上各种表层破坏的微观形式。

根据研究,人们普遍认为按照不同的磨损机理来分类是比较恰当的,通常将磨损划分为四个基本类型:磨粒磨损、粘着磨损、表面疲劳磨损和腐蚀磨损。虽然这种分类还不十分完善,但它概括了各种常见的磨损形式。例如:侵蚀磨损是表面和含有固体颗粒的液体相摩擦而形成的磨损,它可以归入磨粒磨损。微动磨损的主要原因是接触表面的氧化作用,可以将它归纳在腐蚀磨损之内。

应当指出:在实际的磨损现象中,通常是几种形式的磨损同时存在,而且一种磨损发生后往往诱发其他形式的磨损。例如,疲劳磨损的磨屑会导致磨粒磨损,而磨粒磨损所形成的洁净表面又将引起腐蚀或粘着磨损。微动磨损就是一种典型的复合磨损。在微动磨损过程中,可能出现粘着磨损、氧化磨损、磨粒磨损和疲劳磨损等多种磨损形式。随着工况条件的变化,不同形式磨损的主次不同。

11.1.3 磨损的转化

磨损形式还随工况条件的变化而转化。图 11-3(a)是在载荷一定时改

变滑动速度得到的钢对钢磨损量的变化和磨损形式的转化。当滑动速度很低时,摩擦是在表面氧化膜之间进行,所以产生的磨损为氧化磨损,磨损量较小。随着滑动速度增加,磨屑增大,表面出现金属光泽且变得粗糙,此时已转化为粘着磨损,磨损量也增大。当滑动速度再增高,由于温度升高,表面重新生成氧化膜,又转化为氧化磨损,磨损量又变小。若滑动速度继续增加,再次转化为粘着磨损,磨损剧烈而导致失效。

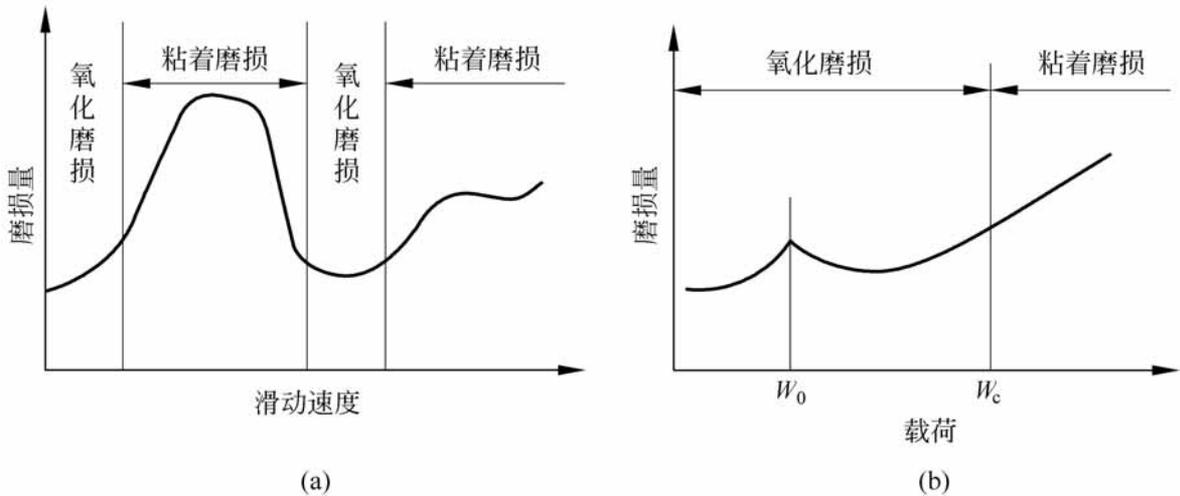


图 11-3 磨损形式的转化

图 11-3(b)是滑动速度保持一定而改变载荷所得到的钢对钢磨损实验结果。载荷小产生氧化磨损,磨屑主要是 Fe_2O_3 。当载荷达到 W_0 后,磨屑是 FeO 、 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 的混合物。载荷超过 W_c 以后,便转入危害性的粘着磨损。

11 2 磨粒磨损

外界硬颗粒或者对磨表面上的硬突起物或粗糙峰在摩擦过程中引起表面材料脱落的现象,称为磨粒磨损。例如掘土机铲齿、犁耙、球磨机衬板等的磨损都是典型的磨粒磨损。机床导轨面由于切屑的存在也会引起磨粒磨损。水轮机叶片和船舶螺旋桨等与含泥沙的水之间的侵蚀磨损也属于磨粒磨损。

11 2.1 磨粒磨损的种类

磨粒磨损有以下三种形式:

(1) 磨粒沿一个固体表面相对运动产生的磨损称为二体磨粒磨损。当

磨粒运动方向与固体表面接近平行时,磨粒与表面接触处的应力较低,固体表面产生擦伤或微小的犁沟痕迹。如果磨粒运动方向与固体表面接近垂直时,常称为冲击磨损。此时,磨粒与表面产生高应力碰撞,在表面上磨出较深的沟槽,并有大颗粒材料从表面脱落。冲击磨损量与冲击能量有关。

(2) 在一对摩擦副中,硬表面的粗糙峰对软表面起着磨粒作用,这也是一种二体磨损,它通常是低应力磨粒磨损。

(3) 外界磨粒移动于两摩擦表面之间,类似于研磨作用,称为三体磨粒磨损。通常三体磨损的磨粒与金属表面产生极高的接触应力,往往超过磨粒的压溃强度。这种压应力使韧性金属的摩擦表面产生塑性变形或疲劳,而脆性金属表面则发生脆裂或剥落。

磨粒磨损是最普遍的磨损形式。据统计,在生产中因磨粒磨损所造成的损失占整个磨损损失的一半左右,因而研究磨粒磨损有着重要的意义。一般说来,磨粒磨损的机理是磨粒的犁沟作用,即微观切削过程。显然,材料相对于磨粒的硬度和载荷以及滑动速度起着重要的作用。

11.2.2 影响磨粒磨损的因素

在实验室中研究磨粒磨损通常是将试件材料在磨料纸上相互摩擦。虽然由于略去了冲击、腐蚀和温度等因素的影响,使实验室中得到的数据与实际存在差别,但它反映了磨粒磨损的基本现象和规律,所得的结论仍十分有用。

首先,磨料硬度 H_0 与试件材料硬度 H 之间的相对值影响磨粒磨损的特性,如图 11-4 所示。当磨料硬度低于试件材料硬度,即 $H_0 < (0.7 \sim 1) H$ 不产生磨粒磨损或产生轻微磨损。而当磨料硬度超过材料硬度以后,磨损量随磨料硬度而增加。如果磨料硬度更高将产生严重磨损,但磨损量不再随磨料硬度变化。由此可见:为了防止磨粒磨损,材料硬度应高于磨料硬度,通常认为 $H = 1.3 H_0$ 时只发生轻微的磨粒磨损。

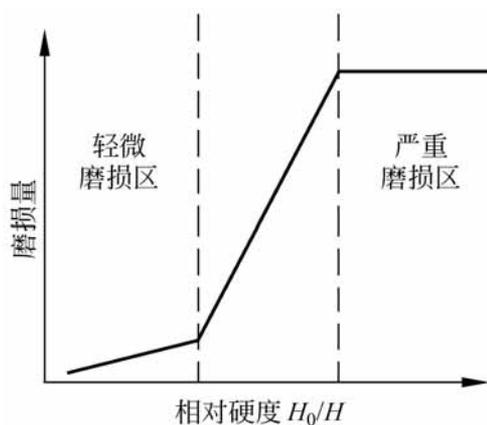


图 11-4 相对硬度的影响

磨损量可以用体积或厚度的变化来

表示。在滑动位移 s 中,如果垂直表面的磨损厚度为 h ,则单位位移的磨损

厚度 $\frac{dh}{ds}$ 称为线磨损度。耐磨性 E 可表示为磨损度的倒数

$$E = \frac{ds}{dh}$$

通常采用相对耐磨性来说明材料的抗磨粒磨损能力, 相对耐磨性 R 的定义为

$$R = \frac{E_s}{E_t} \quad (11-1)$$

这里, E_s 为试件材料的耐磨性; E_t 为基准耐磨性, 它是以硬度为 $H_0 = 22457 \text{ MPa}$ (2290 kgf/mm^2) 的钢玉为磨料时含锡的铅锡合金材料的耐磨性。

前苏联学者 等人^[2] 对磨粒磨损进行了系统的研究, 指出硬度是表征材料抗磨粒磨损性能的主要参数, 并得出以下结论:

(1) 对于纯金属和各种成分未经热处理的钢材, 耐磨性与材料硬度成正比关系, 如图 11-5 所示。通常认为退火状态钢的硬度与含碳量成正比, 由此可知: 钢在磨粒磨损下的耐磨性与含碳量按线性关系增加。

图 11-5 中的直线可用下式表示

$$R = 13.74 \times 10^{-2} H \quad (11-2)$$

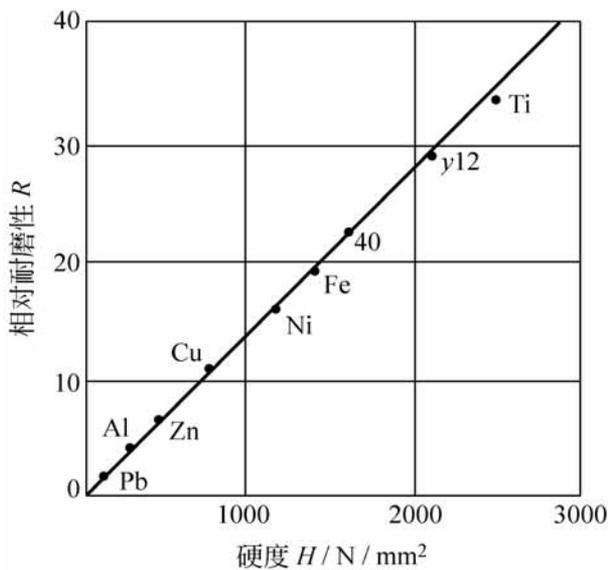


图 11-5 相对耐磨性与材料硬度的关系

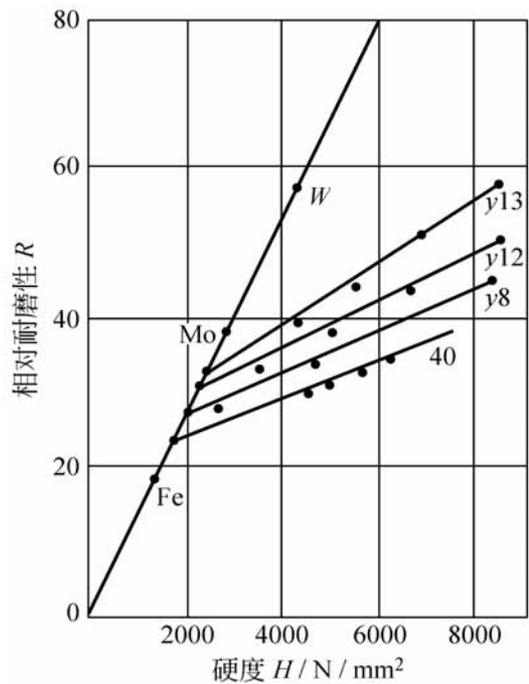


图 11-6 热处理对耐磨性的影响

(2) 如图 11-6 所示, 用热处理方法提高钢的硬度也可使它的耐磨性沿直线缓慢增加, 但变化的斜率降低。图中每条直线代表一种钢材, 含碳量越高, 直线的斜率越大, 而交点表示该钢材未经热处理时的耐磨性。

热处理对钢材耐磨性 影响可以表示为

$$E = E_p + C(H - H_p) \quad (11-3)$$

式中, H_p 和 E_p 为退火状态下钢材的硬度和耐磨性; H 和 E 是热处理后的硬度和耐磨性; C 为热处理效应系数, 其值随含碳量的增加而增加。

(3) 通过塑性变形使钢材冷作硬化能够提高钢的硬度, 但不能改善其抗磨粒磨损的能力。

等人对以上实验结果的分析认为: 磨粒磨损的耐磨性与冷作硬化的硬度无关是因为磨粒磨损中的犁沟作用本身就是强烈的冷作硬化过程。磨损中的硬化程度要比原始硬化大得多, 而金属耐磨性实际上取决于材料在最大硬化状态下的性质, 所以原始的冷作硬化对磨粒磨损无影响。此外, 用热处理方法提高材料硬度一部分是因冷作硬化得来的, 这部分硬度的提高对改善耐磨性作用不大, 因此用热处理提高耐磨性的效果不很显著。

综上所述, 提高钢材硬度的方法有改善合金成分、热处理或冷作硬化等三种。而材料抗磨粒磨损的能力与硬化方法有关, 所以必须根据各种提高硬度的方法来考虑耐磨性与硬度的关系。

应当指出: 当金属硬度大于磨料硬度时也会被磨损, 这是由于磨料压入金属的能力不仅取决于相对硬度, 同时与磨粒的形状有关。例如固体平面可以被材料相同而具有球形、尖锥形或其他尖刃形的颗粒压入形成压痕。所以讨论磨粒磨损性能时, 除相对硬度之外, 还应考虑以下因素的影响:

(1) 磨粒磨损与磨料的硬度、强度、形状、尖锐程度和颗粒大小等因素有关。磨损量与材料的颗粒大小成正比, 但颗粒大到一定值以后, 磨粒磨损量不再与颗粒大小有关。

(2) 载荷显著地影响各种材料的磨粒磨损。图 11-7 说明线磨损度与表面压力成正比。当压力达到转折值 p_c 时, 线磨损度随压力的增加变得平缓, 这是由于磨粒磨损形式转变的结果。各种材料的转折压力值不同。

(3) 图 11-8 给出重复摩擦次数与线磨损的关系。在磨损开始时期, 由于磨合作用使线磨损度随摩擦次数而下降, 同时表面粗糙度得到改善, 随后磨损趋于平缓。

(4) 如果滑动速度不大, 不至于使金属发生退火回火效应时, 线磨损度将与滑动速度无关。

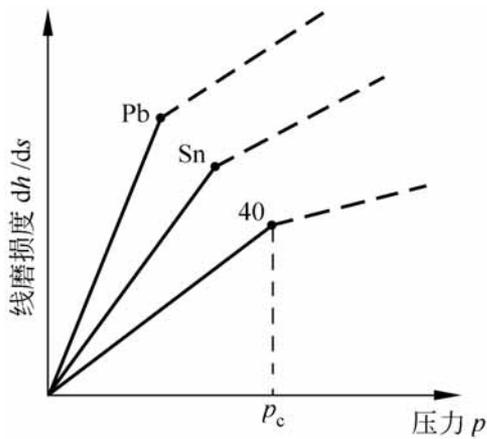


图 11-7 线磨损度与表面压力的关系

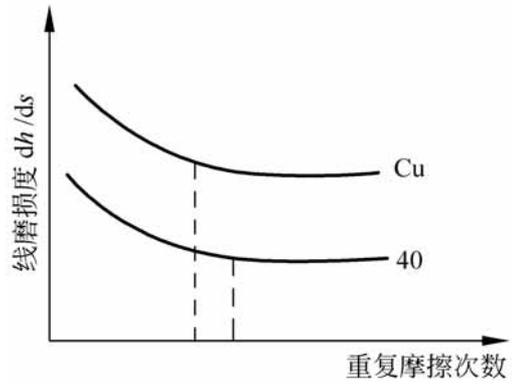


图 11-8 线磨损度与重复摩擦次数的关系

11.2.3 磨粒磨损机理

主要有三种磨粒磨损机理,即:

1. 微观切削

法向载荷将磨料压入摩擦表面,而滑动时的摩擦力通过磨料的犁沟作用使表面剪切、犁皱和切削,产生槽状磨痕。

2. 挤压剥落

磨料在载荷作用下压入摩擦表面而产生压痕,将塑性材料的表面挤压出层状或鳞片状的剥落碎屑。

3. 疲劳破坏

摩擦表面在磨料产生的循环接触应力作用下,使表面材料因疲劳而剥落。

最简单的磨粒磨损计算方法是根据微观切削机理得出的。图 11-9 为磨粒磨损模型。

假设磨粒为形状相同的圆锥体,半角为 θ ,压入深度为 h ,则压入部分的投影面积 A 为

$$A = h^2 \tan^2 \theta$$

如果被磨材料的受压屈服极限为 σ_s ,每个磨粒承受的载荷为 W ,则

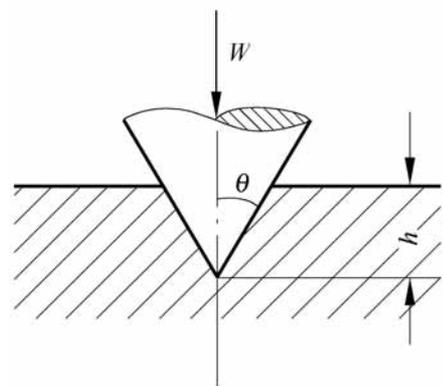


图 11-9 圆锥体磨粒磨损模型

$$W = s A = s h^2 \tan^2$$

当圆锥体滑动距离为 s 时, 被磨材料移去的体积为 $V = s h^2 \tan$ 。若定义单位位移产生的磨损体积为体积磨损度 $\frac{dV}{ds}$, 则磨粒磨损的体积磨损度为

$$\frac{dV}{ds} = h^2 \tan = \frac{W}{s \tan} \quad (11-4)$$

由于受压屈服极限 s 与硬度 H 有关, 故

$$\frac{dV}{ds} = k_a \frac{W}{H} \quad (11-5)$$

式中, k_a 为磨粒磨损常数, 根据磨粒硬度、形状和起切削作用的磨粒数量等因素决定。

应当指出, 上述分析忽略了许多实际因素, 例如磨粒的分布情况、材料弹性变形和滑动前方材料堆积产生的接触面积变化等等, 因此式(11-5)近似地适用于二体磨粒磨损。在三体磨损中, 一部分磨粒的运动是沿表面滚动, 它们不产生切削作用, 因而式(11-5)中的 k_a 值应当降低。

总之, 为了提高磨粒磨损的耐磨性, 必须减少微观切削作用。例如: 降低磨粒对表面的作用力并使载荷均匀分布; 提高材料表面硬度; 降低表面粗糙度; 增加润滑膜厚度; 以及采用防尘或过滤装置保证摩擦表面清洁等等。

11.3 粘着磨损

当摩擦副表面相对滑动时, 由于粘着效应所形成的粘着结点发生剪切断裂, 被剪切的材料或脱落成磨屑, 或由一个表面迁移到另一个表面, 此类磨损统称为粘着磨损。

根据粘结点的强度和破坏位置不同, 粘着磨损有几种不同的形式, 从轻微磨损到破坏性严重的胶合磨损。它们的磨损形式、摩擦系数和磨损度虽然不同, 但共同的特征是出现材料迁移, 以及沿滑动方向形成程度不同的划痕。

11.3.1 粘着磨损的种类

按照磨损的严重程度, 粘着磨损可分为:

1. 轻微粘着磨损

当粘结点的强度低于摩擦副两金属的强度时, 剪切发生在结合面上。

此时虽然摩擦系数增大,但是磨损却很小,材料迁移也不显著。通常在金属表面具有氧化膜、硫化膜或其他涂层时发生此种粘着磨损。

2. 一般粘着磨损

粘结点的强度高于摩擦副中较软金属的剪切强度时,破坏将发生在离结合面不远处软金属表层内,因而软金属粘附在硬金属表面上。这种磨损的摩擦系数与轻微磨损差不多,但磨损程度加剧。

3. 擦伤磨损

当粘结强度高于两金属材料强度时,剪切破坏主要发生在软金属表层内,有时也发生在硬金属表层内。迁移到硬金属上的粘着物又使软表面出现划痕,所以擦伤主要发生在软金属表面。

4. 胶合磨损

如果粘结点强度比两金属的剪切强度高得多,而且粘结点面积较大时,剪切破坏发生在一个或两个金属表层深的地方。此时,两表面都出现严重磨损,甚至使摩擦副之间咬死而不能相对滑动。

高速重载摩擦副中,由于接触峰点的塑性变形大和表面温度高,使粘着结点的强度和面积增大,通常产生胶合磨损。相同金属材料组成的摩擦副中,因为粘着结点附近的材料塑性变形和冷作硬化程度相同,剪切破坏发生在很深的表层,胶合磨损更为剧烈。

11.3.2 影响粘着磨损的因素

除润滑条件和摩擦副材料性能之外,影响粘着磨损的主要因素是载荷和表面温度。然而,关于载荷或温度谁是决定性的因素迄今尚未取得统一认识。

1. 表面载荷

前苏联学者系统地研究了载荷对胶合磨损的影响,她认为当表面压力达到一定的临界值,并经过一段时间后才会计发生胶合。因此,载荷是胶合磨损的决定性因素。几种材料的临界压力值列于表 11-1。

表 11-1 胶合磨损的临界载荷

| 摩擦副材料 | 临界载荷/ $N \text{ mm}^2$ | 胶合发生时间/ min |
|------------|------------------------|-------------|
| 3号钢-青铜 | 170 | 1.5 |
| 3号钢-GCr15钢 | 180 | 2.0 |
| 3号钢-铸铁 | 467 | 0.5 |

观察各种材料的试件在四球机实验中磨痕直径的变化,也表明当载荷达到一定值时,磨痕直径骤然增大,这个载荷称为胶合载荷,如图 11-10 所示。

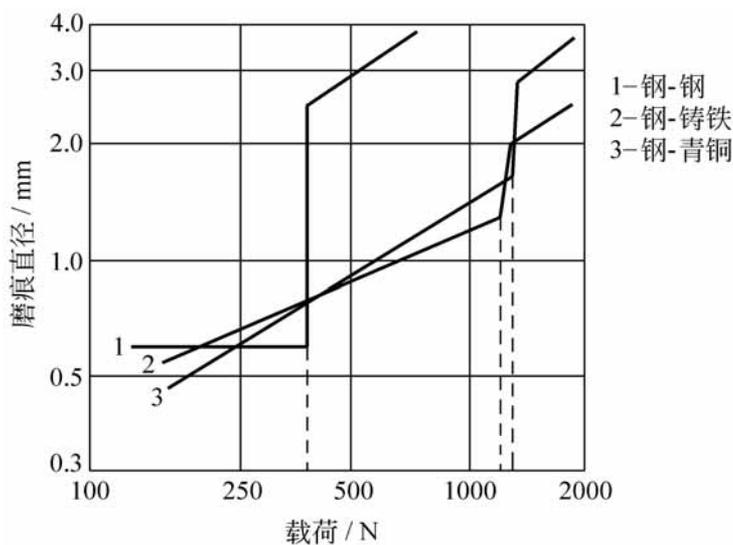


图 11-10 四球机实验曲线

实验还证明:如果将试件浸入油中加热,当载荷低于临界值而使油温升高,并不能发生胶合。这说明温度升高不会产生胶合。

然而,载荷引起表面弹塑性变形必然伴随高温的出现。而且根据实验发现各种材料的临界载荷值随滑动速度增加而降低。这说明温度对胶合的发生起着重要作用。

2. 表面温度

摩擦过程中产生的热量使表面温度升高,在表面接触点附近形成半球形的等温面,在表层内一定深度处各接触点的等温面将汇合成共同的等温面,如图 11-11 所示。

图 11-12 是温度沿表面深度方向的分布。摩擦热产生于最外层的变形区,因此表面温度 t_s 最高,又因热传导作用造成变形区非常大的温度梯度。变形区以内为基体温度 t_v ,变化平缓。

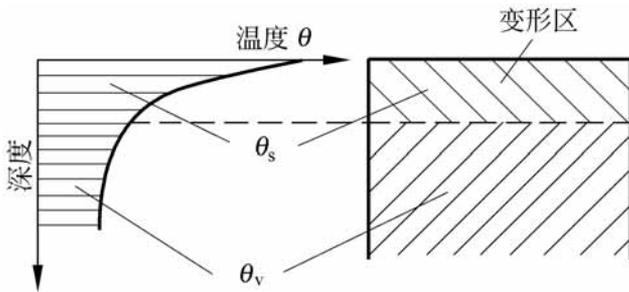


图 11-11 表层内的等温线

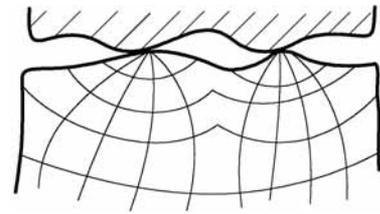


图 11-12 温度沿深度的分布

表层温度特性对于摩擦表面的相互作用和破坏影响很大。表面温度可使润滑膜失效,而温度梯度引起材料性质和破坏形式沿深度方向变化。

图 11-13 是 Rabinowicz(1965 年)提出的实验结果,他采用放射性同位素方法测量金属迁移量。可以看出:当表面温度达到临界值(约 80)时,磨损量和摩擦系数都急剧增加。

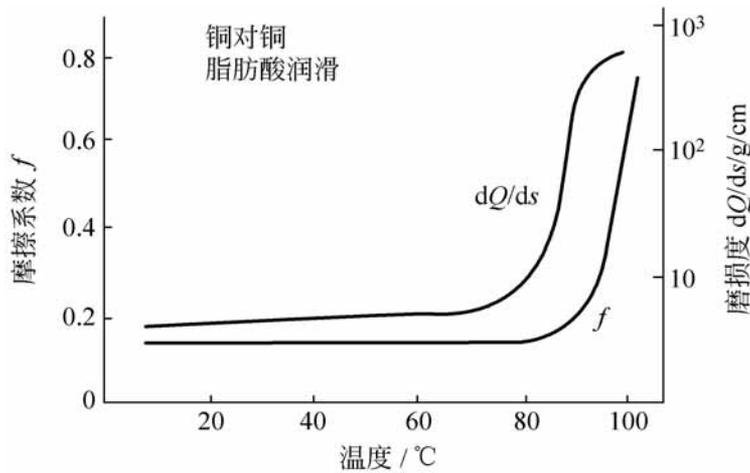


图 11-13 温度对胶合磨损的影响

影响温度特性的主要因素是表面压力 p 和滑动速度 v , 其中速度的影响更大, 因此限制 pv 值是减少粘着磨损和防止胶合发生的有效方法。根据实验和计算分析得出的表面温度场与速度和压力的关系见表 11-2。

表 11-2 表面温度场与速度和压力的关系

| 温度场 | 接触状态 | | | |
|-----------------|--------|----------|--------|----------|
| | 塑性接触 | | 弹性接触 | |
| | 压力 p | 滑动速度 v | 压力 p | 滑动速度 v |
| 表面温度 θ_s | — | v | p^n | v |
| 温度梯度 | — | v | p^n | v |
| 基体温度 θ_v | p | v | p | v |

说明: 表中, $n < 1$ 。

3. 摩擦副材料

脆性材料的抗粘着磨损的能力比塑性材料高。塑性材料形成的粘着结点的破坏以塑性流动为主,它发生在离表面一定的深度处,磨屑较大,有时长达 3mm,深达 0.2mm。而脆性材料粘结点的破坏主要是剥落,损伤深度较浅,同时磨屑容易脱落,不堆积在表面上。根据强度理论:脆性材料的破坏由正应力引起,而塑性材料的破坏决定于切应力。而表面接触中的最大正应力作用在表面,最大切应力却出现在离表面一定深度,所以材料塑性越高,粘着磨损越严重。

相同金属或者互溶性大的材料组成的摩擦副粘着效应较强,容易发生粘着磨损。异种金属或者互溶性小的材料组成的摩擦副抗粘着磨损的能力较高。而金属和非金属材料组成的摩擦副的抗粘着磨损能力高于异种金属组成的摩擦副。从材料的组织结构而论,多相金属比单相金属的抗粘着磨损能力高。

通过表面处理方法在金属表面上生成硫化物、磷化物或氯化物等的薄膜将减少粘着效应,同时表面膜也限制了破坏深度,从而提高抗粘着磨损能力。

此外,改善润滑条件,在润滑油或脂中加入油性和极压添加剂;选用热传导性高的摩擦副材料或加强冷却以降低表面温度;改善表面形貌以减小接触压力等都可以提高抗粘着磨损的能力。

11.3.3 粘着磨损机理

通常摩擦表面的实际接触面积只有表观面积的 0.01% ~ 0.1%。对于重载高速摩擦副,接触峰点的表面压力有时可达 5000MPa,并产生 1000 以上的瞬现温度。而由于摩擦副体积远大于接触峰点,一旦脱离接触,峰点温度便迅速下降,一般局部高温持续时间只有几个毫秒。摩擦表面处于这种状态下,润滑油膜、吸附膜或其他表面膜将发生破裂,使接触峰点产生粘着,随后在滑动中粘着结点破坏。这种粘着、破坏、再粘着的交替过程就构成粘着磨损。

有关粘着结点形成的原因存在着不同的观点。Bowdon 等人认为粘着是接触峰点的塑性变形和瞬现高温使材料熔化或软化而产生的焊合。也有人提出:温度升高后,由于物质离解所产生的类似焊接的作用而形成粘结点。然而非金属材料也能发生粘着现象,用高温熔焊的观点不能解释非金

属粘结点的形成。

等人认为粘着是冷焊作用,不必达到熔化温度即可形成粘结点。有人提出粘着是由于摩擦副表面分子作用。也有人试图用金属价电子的运动或者同类金属原子在彼此结晶格架之间的运动和互相填充来解释粘着现象。但是这些观点尚未取得充足的实验数据。

虽然有关粘着机理目前还没有比较统一的观点,但是粘着现象必须在一定的压力和温度条件下才会发生这一认识是相当一致的。

粘着结点的破坏位置决定了粘着磨损的严重程度,而破坏力的大小表现为摩擦力,所以磨损量与摩擦力之间没有确定的关系。粘着结点的破坏情况十分复杂,它与摩擦副材料和粘结点的相对强度以及粘结点的分布有关。

简单的粘着磨损计算可以根据如图 11-14 所示的模型求得,它是由 Archard(1953 年)提出的。

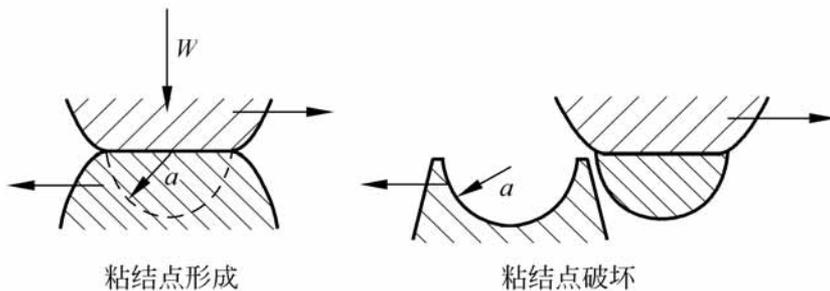


图 11-14 简单的粘着磨损模型

选取摩擦副之间的粘着结点面积为以 a 为半径的圆,每一个粘着结点的接触面积为 a^2 。如果表面处于塑性接触状态,则每个粘结点支承的载荷为

$$W = a^2 s$$

这里, s 为软材料的受压屈服极限。

假设粘结点沿球面破坏,即迁移的磨屑为半球形。于是,当滑动位移为 $2a$ 时的磨损体积为 $\frac{2}{3} a^3$ 。因此体积磨损度可写为

$$\frac{dV}{ds} = \frac{\frac{2}{3} a^3}{2a} = \frac{W}{3s} \quad (11-6)$$

考虑到并非所有的粘结点都形成半球形的磨屑,引入粘着磨损常数 k_s ,且 $k_s \leq 1$,则 Archard 公式为

$$\frac{dV}{ds} = k_s \frac{W}{3s} \quad (11-7)$$

式(11-7)与磨粒磨损计算公式(11-5)的形式基本相同。

Archard 计算模型虽然是近似的,但可以用来估算粘着磨损寿命。Fein(1971年)用四球机测得几种润滑剂的抗粘着磨损性能,如表 11-3。表 11-4 列出 Tabor(1972年)用销盘磨损机测定的几种材料在干摩擦条件下 k_s 的值。

表 11-3 几种润滑剂的 k_s 值 (四球机实验, 载荷 400N, 滑动速度 0.5min/s)

| 润滑剂 | 摩擦系数 f | 磨损常数 k_s | 当量齿轮寿命 |
|-------------|-------------|---------------|-----------|
| | | | 总转数 |
| 干燥氩气 | 0.5 | 10^{-2} | 10^2 |
| 干燥空气 | 0.4 | 10^{-3} | 10^3 |
| 汽油 | 0.3 | 10^{-5} | 10^5 |
| 润滑剂 | 0.12 | 10^{-7} | 10^7 |
| 润滑油加硬脂酸(冷却) | 0.08 | 10^{-9} | 10^9 |
| 标准发动机油 | 0.7 | 10^{-10} | 10^{10} |

表 11-4 几种材料的粘着磨损常数 k_s 值 (销盘磨损机实验, 空气中干摩擦, 载荷 4000N, 滑动速度 1.8min/s)

| 摩擦副材料 | 摩擦系数 f | 磨损常数 k_s |
|----------|----------|--------------------|
| 软钢-软钢 | 0.6 | 10^{-2} |
| 硬质合金-淬火钢 | 0.6 | 5×10^{-5} |
| 聚乙烯-淬火钢 | 0.65 | 10^{-7} |

表中粘着磨损常数 k_s 值远小于 1, 这说明在所有的粘着结点中只有极少数发生磨损, 而大部分粘结点不产生磨屑。对于这种现象还没有十分满意的解释。

11.3.4 胶合计算准则

胶合是破坏性最大的磨损形式, 被磨损表面凹凸不平, 有时磨痕深达 0.2mm, 表面材料堆积, 使摩擦系数很高而且不稳定。胶合磨损一旦发生就很严重, 往往在百分之几秒内导致摩擦副完全失效, 所以应力图避免胶合的发生。

目前尚无统一的判断胶合发生的观点。有人用表面形貌来判断,即在磨损过程中当垂直于滑动方向的粗糙度剧烈增加时表示胶合磨损发生。也有人提出以摩擦温度达到临界值作为判据。但是通常都采用摩擦系数突然增加并出现大幅度变化来判断胶合发生。

胶合磨损的发生不仅取决于润滑油膜的破裂,而且与摩擦表面上化学反应膜的形成情况有关。樊瑜瑾等人^[3]通过测量摩擦过程中表面温度、摩擦力和油膜的变化以及表面反应膜的形成情况,探讨了油润滑下 GCr15 与 45 号钢发生胶合的条件。实验表明:滑动速度对胶合的发生有很大影响。在较低的速度下,油膜破裂后能够生成化学反应膜防止胶合发生,只有当表面温度过高,使反应膜失效后才会发生胶合。而在较高的速度下,一旦油膜破裂很难形成反应膜,立即发生胶合,胶合前的温度和摩擦力都较低。在中等速度下,油膜破裂后能够生成反应膜,此时胶合发生是由于反应膜的磨损率大于它的生成速率引起的。

通常胶合磨损出现在高速重载和润滑不良的诸如齿轮-蜗轮传动、滚动轴承和滑动轴承等摩擦副。为了防止胶合的发生,近年来对胶合计算准则进行了广泛的研究,其中以对齿轮胶合的研究最多。然而,目前提出的各种胶合计算准则尚属半经验计算,缺少足够而准确的数据,因此还不能有效地普遍应用。

早期采用的胶合计算是从静载荷出发,以提高材料的表面硬度作为抗胶合的主要措施。随后的研究表明摩擦副温度对胶合发生起着重要作用,因此提出了以热负荷为基础的胶合计算准则。

以下介绍几种常用的胶合计算准则。

1. $p_0 U_s \leq c$ 准则

Almen(1953年)统计了美国通用汽车公司生产的汽车后桥圆锥齿轮的胶合失效情况,提出防止胶合磨损的准则为

$$p_0 U_s \leq c \quad (11-8)$$

式中, p_0 为 Hertz 最大应力; U_s 为相对滑动速度; c 为实验常数,根据工况条件 $c = 32 \times 10^2 \sim 15 \times 10^4 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$ 之间变化。

式(11-8)的计算结果比较粗略,数据离散范围达到 50%。但由于它形式简单,常用作初步计算作为选择抗胶合材料的依据。

Blok 根据实验分析提出:以 $p_0^3 U_s$ 作为胶合计算准则更切合实际,又因为它与接触瞬现温升成正比,实际上在胶合计算中引入了温度因素。

2. $WU_s^n = c$ 准则

Borsoff 等人(1963 年)对齿轮胶合的研究得出图 11-15 的结果,即胶合发生点的载荷 W 与滑动速度 U_s 满足指数关系。近年来提出的几种指数型准则都可以归纳为以下公式

$$WU_s^n = c \quad (11-9)$$

为了确定指数 n 的数值,人们从不同角度研究,所得的数据变化范围很宽,从 -1 到 +2,造成选用时的困难。如果能够针对实际工况用实验测定 n 的数值,这一准则可以得到满意的结果。

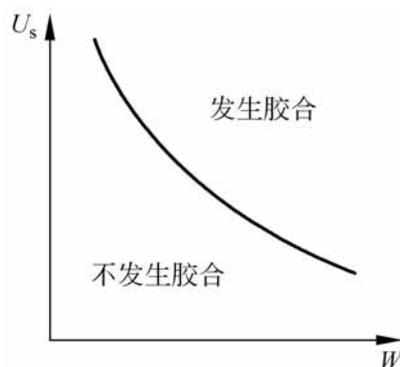


图 11-15 $WU_s^n = c$ 准则曲线

3. 瞬现温度准则

图 11-16 是 Wilson(1980 年)提出的齿轮胶合磨损过程中齿面温度的分布和变化,它显示了胶合与温度的密切关系。

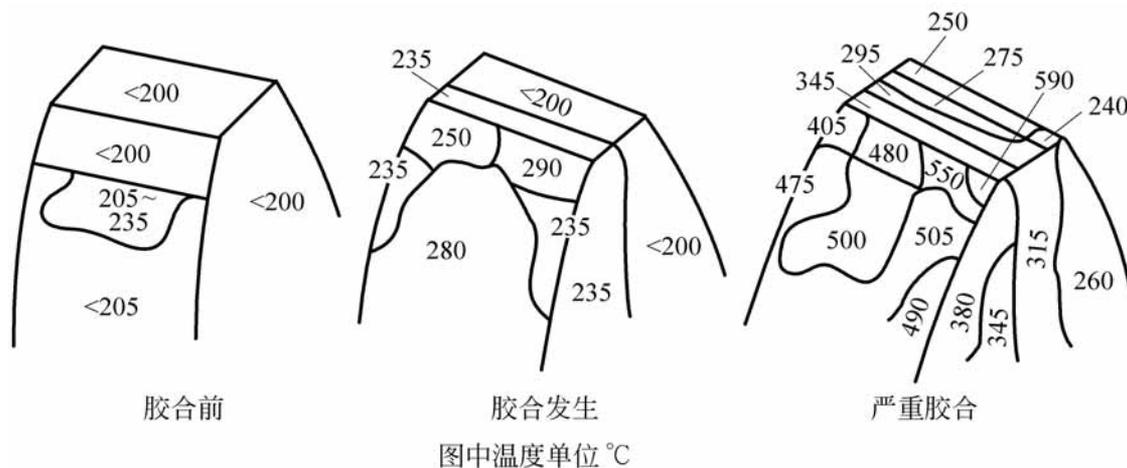


图 11-16 胶合过程中齿面温度

Blok 认为胶合的产生是由于表面局部瞬现温度达到临界值引起的,他提出的瞬现温度准则得到广泛的采用。

设胶合临界温度为 t_{sc} , 摩擦表面本体温度 t_b , 而局部瞬现温升 t_{fm} , 则

$$t_b + t_{fm} = t_{sc} \quad (11-10)$$

有关瞬现温升的计算和表面最大温度的确定可参考文献[1]。

胶合临界温度 t_{sc} 应根据摩擦副材料、润滑油品种和润滑状态等因素来确定。例如对于一般润滑条件下的淬火齿轮可选取 $t_{sc} = 150 \sim 250$; 未

淬火钢齿 取 $s_c = 60 \sim 150$ 。采用普通矿物油润滑时,胶合温度通常接近润滑油从金属表面蒸发的温度。

实践证明:瞬现温度准则与指数型准则所得的计算结果十分相近。在高速滑动条件下,瞬现温度准则相当于 $n = 2/3$ 时的指数型准则。

应当指出:迄今为止还不能准确地决定胶合发生时表面瞬现温度的数值,无论是用测量还是计算方法都是十分困难的。

4. 胶合因子准则

胶合因子 t_f 定义为齿轮表面上的点通过齿面接触区所需的时间,单位为 s。若 Hertz 接触区半宽为 b , 则 t_f 的数值为

$$t_f = \frac{2b}{U_s} \quad (11-11)$$

胶合发生时的临界载荷 W_c 与胶合因子的关系表达式为

$$W_c = a t_f + c \quad (11-12)$$

式中, a 和 c 为实验常数。

当 $W_c \gg c$ 时,可以略去 c 值,则式(11-12)的计算结果与式(11-9)指数型准则的相近似。

综上所述,由于胶合现象的复杂性,目前各种计算准则都有待于进一步完善,为此必须对胶合机理进行更深入的研究。

11.4 疲劳磨损

两个相互滚动或滚动兼滑动的摩擦表面,在循环变化的接触应力作用下,由于材料疲劳剥落而形成凹坑,称为表面疲劳磨损或接触疲劳磨损。除齿轮传动、滚动轴承等以这种磨损为主要失效方式之外,摩擦表面粗糙峰周围应力场变化所引起的微观疲劳现象也属于此类磨损。不过,表面微观疲劳往往只发生在磨合阶段,因而是非发展性的磨损。

一般说来,表面疲劳磨损是不可避免的,即便是在良好的油膜润滑条件下也将发生。对于发展性的疲劳磨损,应保证在正常工作时间以内不致因表面疲劳凹坑的恶性发展而失效。

11.4.1 表面疲劳磨损的种类

1. 表层萌生与表面萌生疲劳磨损

表层萌生的疲劳磨损主要发生在一般质量的钢材以滚动为主的摩擦副。在循环接触应力作用下,这种磨损的疲劳裂纹发源在材料表层内部的应力集中源,例如非金属夹杂物或空穴处。通常裂纹萌生点局限在一狭窄区域,典型深度为0.3mm左右。与表层内最大切应力的位置相符合。裂纹萌生以后,首先顺滚动方向平行于表面扩展,然后又延伸到表面。磨屑剥落后形成凹坑,其断口比较光滑。这种疲劳磨损的裂纹萌生所需时间较短,但裂纹扩展速度缓慢。表层萌生疲劳磨损通常是滚动轴承的主要破坏形式。

近年来,由于真空冶炼技术和退氧钢的发展,钢材内部质量明显提高,大大减少了疲劳裂纹在表层内萌生的可能性,使表面产生疲劳磨损的可能性增加。

表面萌生的疲劳磨损主要发生在高质量钢材以滑动为主的摩擦副。裂纹发源在摩擦表面上的应力集中源,例如切削痕、碰伤痕、腐蚀或其他磨损的痕迹等。此时,裂纹由表面出发以与滑动方向成 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 夹角向表层内部扩展。到一定深度后,分叉形成脱落凹坑,其断口比较粗糙。这种磨损的裂纹形成时间很长,但扩展速度十分迅速。

由于表层萌生疲劳破坏坑的边缘可以构成表面萌生裂纹的发源点,所以通常这两种疲劳磨损是同时存在的。

2. 鳞剥与点蚀磨损

按照磨屑和疲劳坑的形状,通常将表面疲劳磨损分为鳞剥和点蚀两种。前者磨屑是片状,凹坑浅而面积大;后者磨屑多为扇形颗粒,凹坑为许多小而深的麻点。

日本学者 Fujita 和 Yoshida(1979年)在双圆盘实验机上采用不同热处理状态的钢进行实验时发现:对于退火钢和调质钢,疲劳磨损以点蚀形式出现,而渗碳钢和淬火钢的疲劳磨损将产生鳞剥。这两种磨损的疲劳坑形状如图 11-17 所示。

实验表明:无论是退火钢或调质钢,纯滚动或滚动兼滑动的摩擦副的点蚀疲劳裂纹都起源于表面,再顺滚动方向向表层内扩展,并形成扇形的疲劳坑。鳞剥疲劳裂纹始于表层内,随后裂纹与表面平行向两端扩展,最后在两

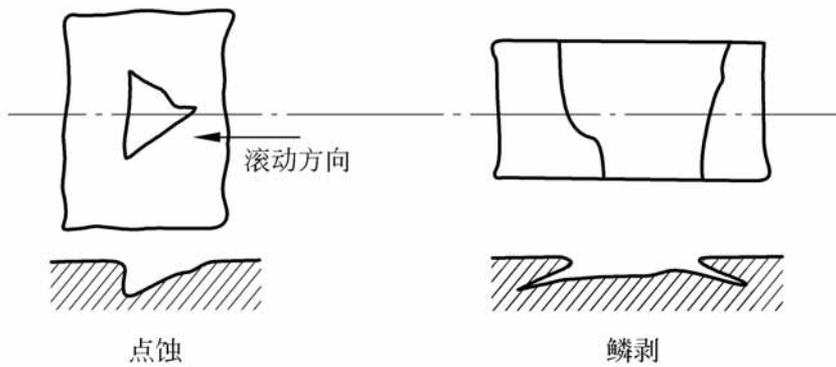


图 11-17 点蚀与鳞剥

端断裂,形成沿整个试件宽度上的浅坑。

Fujita 等人提出以应力和硬度的比值作为疲劳发生的准则,认为裂纹萌生在 $\sqrt{3}H$ 或 \sqrt{H} 最大值处。根据测定的沿深度方向硬度值和计算的应力值,他们提出:对于发生点蚀的软材料而言,作用在表面的 $\sqrt{3}H$ 值最大,因而可以用它作为发生点蚀的决定应力。而硬材料的最大应力和硬度比值是作用在表层内的 \sqrt{H} 值,所以用它来判断鳞剥的发生。

Martin 和 Cameron(1966 年)对疲劳磨损的分析表明:磨屑有椭圆形和扇形两类。椭圆形磨屑是片状的,数量很少,而扇形磨屑的裂纹从表面上一点开始辐射状向表层内扩展,与表面夹角为 $30^\circ \sim 40^\circ$ 。图 11-18 为沿深度方向微硬度分布。可以看出:表层内存在硬度峰,其位置与最大切应力深度相吻合。这一结果支持了 Crook 和 Welsh 的论点,即在循环应力作用下,表层内部由于塑性变形而形成硬化带。较深的疲劳坑的形成通常是裂纹从表面开始,以 40° 角向下扩展,而达到硬化带后改变成与表面平行的方向扩展。硬化带构成屏障,阻止裂纹穿过。

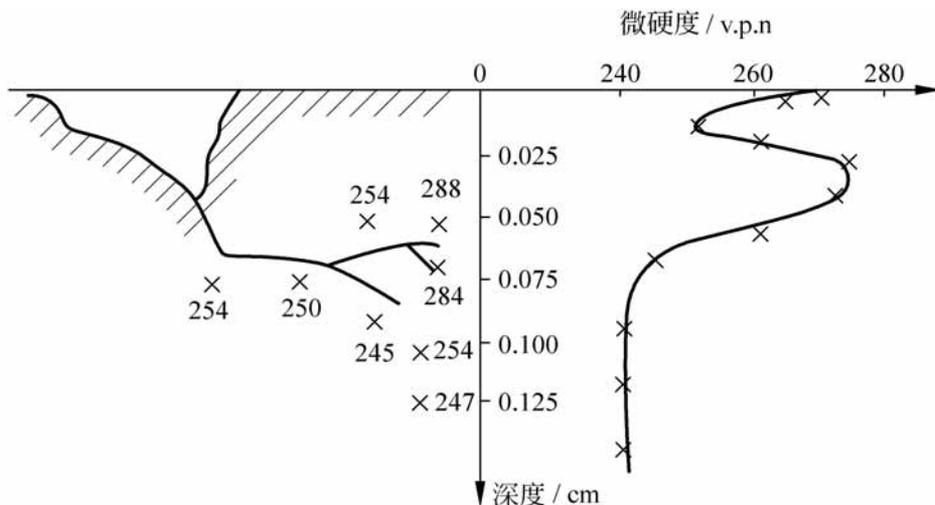


图 11-18 微硬度分布与裂纹扩展

应当指出,就目前的研究状况而论,还不能认为表面萌生或表层萌生与点蚀或鳞剥之间存在对应联系。在实际的表面疲劳磨损中,不同形式的磨屑同时发生。此外,各种疲劳磨损虽然在宏观上不同,但材料在疲劳过程中的微观结构变化却是相同的。

11.4.2 影响疲劳磨损的因素

接触疲劳磨损过程十分复杂,影响因素繁多,长期以来进行了大量的实验研究,但仍然存在不少争论的问题。

总的说来,影响表面疲劳的因素可以归纳为以下 4 个方面,即:

- (1) 在干摩擦或润滑条件下的宏观应力场;
- (2) 摩擦副材料的机械性质和强度;
- (3) 材料内部缺陷的几何形状和分布密度;
- (4) 润滑剂或介质与摩擦副材料的作用。

这里仅介绍几个主要因素的影响。

1. 载荷性质

首先载荷大小决定了摩擦副的宏观应力场,直接影响疲劳裂纹的萌生和扩展,通常认为是决定疲劳磨损寿命的基本因素。此外,载荷性质也有着巨大的影响。

在封闭式齿轮实验机上,就周期性高峰载荷对于接触疲劳的影响进行了系统的研究。他首先将未经淬火的齿轮在不变的接触应力 850MPa 作用下,一直工作到疲劳破坏。然后用同样的试件,以 850MPa 为基本载荷,每隔 10×10^4 转将载荷分别提高到 950MPa、1050MPa 或 1150MPa,持续工作 2×10^4 转,结果发现试件附加周期性高峰载荷以后破坏前的总工作转数都有所增加,如图 11-19 所示。

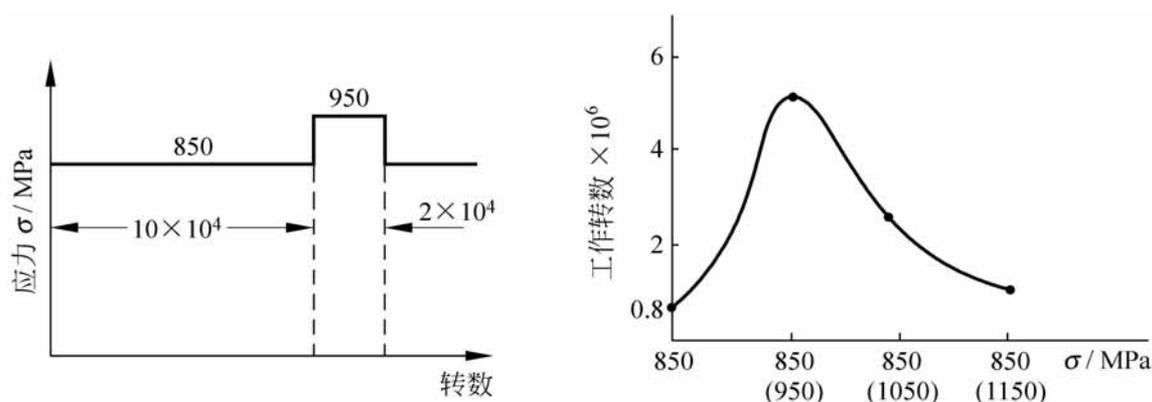


图 11-19 高峰载荷对接触疲劳的影响

实验 明:短期的高峰载荷周期性地附加在基本载荷上,不仅不降低反而提高了接触疲劳寿命。只有当高峰载荷作用时间接近于循环周期时间一半时,高峰载荷才开始降低接触疲劳寿命。

作者^[4]研究了复合应力对接触疲劳的影响。采用钢球与圆柱试件相挤压,产生最大接触应力 2954MPa。在此基础上,附加大小低于 6% 的轴向弯曲应力。实验结果表明:附加拉伸弯曲应力显著地缩短接触疲劳寿命,而压缩弯曲应力的影响取决于它的数值大小。较小的附加压缩应力能够增加疲劳寿命,而大的压缩应力将降低疲劳寿命存在一个临界压缩弯曲应力值,此时疲劳寿命最大,如图 11-20 所示。

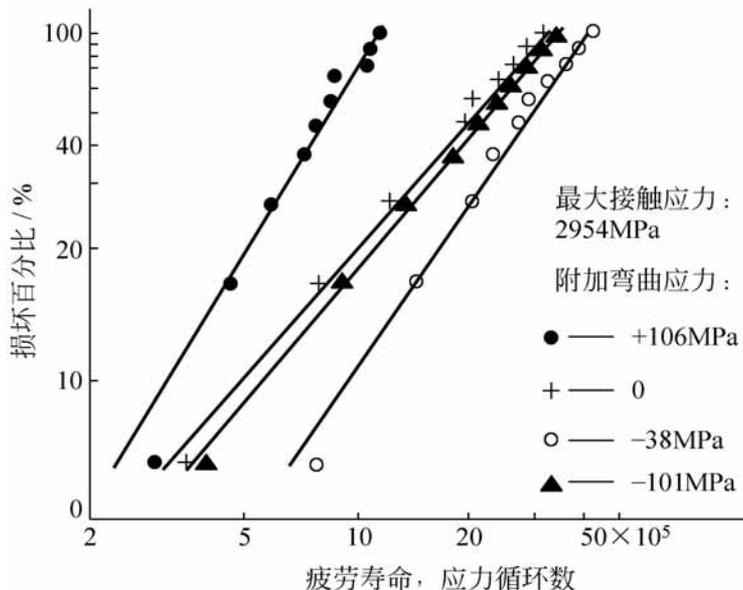


图 11-20 复合应力下的疲劳寿命

接触表面的摩擦力对于疲劳磨损有着重要影响。图 11-21 表明,少量的滑动将显著地降低接触疲劳磨损寿命。通常纯滚动的切向摩擦力只有法向载荷的 1% ~ 2%, 而存在滑动时,切向摩擦力可增加到法向载荷的 10%。摩擦力促进接触疲劳过程的原因是:摩擦力作用使最大切应力位置趋于表面,增加了裂纹萌生的可能性。此外,摩擦力所引起的拉应力促使裂纹扩展加速。

应力循环速度也影响接触疲劳。由于摩擦表面在每次接触中都要产生热量,应力循环速度越大,表面积聚热量和温度就越高,使金属软化而降低机械性能,因此加速表面疲劳磨损。

应当指出:在全膜弹流润滑下,油膜压力分布与 Hertz 应力不同,改变了表层内部应力场。尤其是二次压力 的大小和位置,以及颈缩造成的应

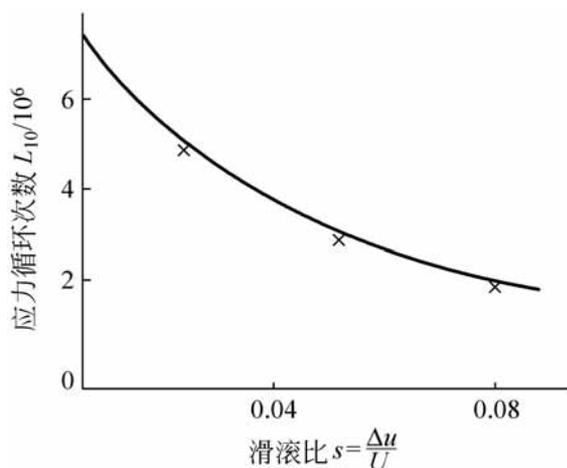


图 11-21 滑滚比对疲劳寿命的影响

力集中都影响疲劳磨损。有关弹流润滑条件下的接触疲劳问题至今尚研究不够。

2. 材料性能

钢材中的非金属夹杂物破坏了基体的连续性,严重降低了接触疲劳寿命。特别是脆性夹杂物,在循环应力作用下与基体材料脱离形成空穴,构成应力集中源,从而导致疲劳裂纹的早期出现。

渗碳钢或其他表面硬化钢的硬化层厚度影响抗疲劳磨损能力。硬化层太薄时,疲劳裂纹将出现在硬化层与基体的连接处,容易形成表层剥落。选择硬化层厚度应使疲劳裂纹产生在硬化层内。此外,合理地提高硬化钢基体的硬度可以改善表面抗疲劳磨损性能。

通常增加材料硬度可以提高抗疲劳磨损能力,但硬度过高,材料脆性增加,反而会降低接触疲劳寿命。

摩擦表面的粗糙度与疲劳寿命密切相关。资料表明,滚动轴承的粗糙度为 $R_a 0.2$ 的接触疲劳寿命比 $R_a 0.4$ 的高 2~3 倍; $R_a 0.1$ 的比 $R_a 0.2$ 的高 1 倍; $R_a 0.05$ 比 $R_a 0.1$ 高 0.4 倍;粗糙度低于 $R_a 0.05$ 对寿命影响甚微。此外,在部分膜弹流润滑状态下,由油膜厚度和表面粗糙度所确定的膜厚比是影响表面疲劳的重要参数。

3. 润滑剂的物理与化学作用

实验表明,增加润滑油的粘度将提高抗接触疲劳能力。表 11-5 列出在相同的疲劳寿命下的实验数据。

表 11-5 粘度对齿轮接触疲劳磨损的影响

| 油 品 | 供油温度/ | 粘度/ m^2/s | 接触疲劳应力/ MPa | 传递功率/ kW |
|--------|-------|---------------------------|-------------|----------|
| 3 号锭子油 | 20 | 116×10^{-6} | 450 | 4.9 |
| 机械油 | 20 | 757×10^{-6} | 600 | 8.8 |
| 6 号汽缸油 | 82 | 84×10^{-6} | 430 | 4.5 |
| | 57 | 303×10^{-6} | 490 | 5.0 |
| | 45 | 757×10^{-6} | 550 | 7.4 |

然而,关于粘度影响疲劳磨损的机理人们提出了不同的观点。通常认为:增加润滑剂粘度可以提高疲劳寿命是由于弹流油膜增厚,从而减轻粗糙峰互相作用的结果。但这种观点不能解释某些无油滚动时不出现接触疲劳,而加入润滑油后迅速发生接触疲劳磨损的现象。

Way(1935年)提出疲劳裂纹油压机理。如图 11-22 所示,在摩擦过程中,摩擦力促使表面金属流动,因而疲劳裂纹往往有方向性,即与摩擦力方向一致。如图 11-22 所示,主动轮裂纹中的润滑油在对滚中被挤出,而从动轮上的裂纹口在通过接触区时受到油膜压力作用促

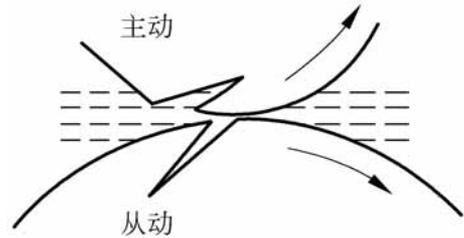


图 11-22 疲劳裂纹的油压机理

使裂纹扩展。由于油的压缩性和金属的弹性,油压传递到裂纹尖端将产生压力降。而粘度越大的润滑油所产生的压力降越大,即裂纹尖端的油压越低,故裂纹扩展缓慢。

随后 Culp 和 Stover(1976年)的实验报告指出:采用在相同温度下具有相等粘度的合成油和天然油分别进行接触疲劳实验,得出合成油的接触疲劳寿命较高。原因是合成油的粘压系数值较大,因而油膜厚度较大。这说明油膜厚度对阻止裂纹形成具有一定的影响。

综上所述,接触疲劳磨损机理可以归纳如下:在疲劳磨损的初期阶段是形成微裂纹,无论有无润滑油存在,循环应力起着主要作用。裂纹萌生在表面或表层,但很快扩展到表面,此后,润滑油的粘度对于裂纹扩展起重要影响。

润滑剂的化学作用是近年来研究接触疲劳磨损所关注的问题。研究表明,改变润滑剂的粘度数值可使接触疲劳寿命相差 2 倍,而润滑剂的化学成分不同可以影响接触疲劳寿命变化 10 倍。一般说来,润滑剂中含氧和水分

将剧烈地降低接触疲劳寿命。当含有对裂纹尖端有腐蚀作用的化学成分时,也显著降低接触疲劳寿命。如果添加剂能够生成较强的表面膜并减少摩擦时,对提高抗疲劳磨损能力有利。

11.4.3 接触疲劳强度准则与疲劳寿命

1. 接触应力状态

严格地说, Hertz 接触理论的应用条件应是无润滑条件下完全弹性体的静态接触。而实际的接触摩擦副都是相互运动的,往往还施加有润滑剂。因此,应用 Hertz 接触理论来分析接触疲劳磨损问题是近似的。

弹性体接触的一般情况是椭圆接触问题,它的应力状态如图 11-23 所示,接触区形状为椭圆,其长短轴之半分别为 a 和 b 。接触区上的压力按椭圆体分布,最大接触应力为 p_0 。

根据接触力学的分析,接触体的应力状态可归纳如下:

(1) 正应力 σ_x , σ_y 和 σ_z 为负值即压应力。在 Z 轴上各点没有切应力作用,因而 Z 轴上的正应力为主应力。在离接触中心较远处(理论上是无穷远处) σ_x , σ_y 和 σ_z 的数值为零,在 Z 轴上它们的数值为最大值。由此可知:在滚动过程中材料受到的正应力是脉动变化应力。

(2) 正交切应力 τ_{xy} 的正负符号取决于各点位置坐标 x 和 y 乘积的符号。在远离接触中心以及 $x=0$ 或者 $y=0$ 处,它的数值为零,因此在滚动过程中,这两个应力为交变应力。

(3) 正交切应力 τ_{zx} 的正负符号取决于位置坐标 x 的符号,在远离接触中心和 $x=0$ 处,其数值为零。而 τ_{yz} 的符号取决于位置坐标 y 的符号,在远离接触中心和 $y=0$ 处数值为零。这样,在滚动过程中,这两个切应力分量也是交变应力。

接触表面上的应力状态比较复杂。由于接触疲劳裂纹萌生于表面的可能性增加,近年来接触表面的应力状态的分析受到重视。这里仅介绍接触椭圆对称轴端点的应力状态。如图 11-23,在端点 N 和 M 处所受的径向应力和切向应力数值相等而符号相反,即

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_x}{x} &= - \frac{\sigma_y}{y} \\ \frac{\tau_{xz}}{x} &= - \frac{\tau_{yz}}{y} \end{aligned} \quad (11-13)$$

所以椭圆端点处于纯剪切状态。计算得出,在椭圆接触中,当 $1 - b^2/a^2 < 0.89$ 时,最大的表面切应力作用在椭圆对称轴的端点 N 或者 M 点。

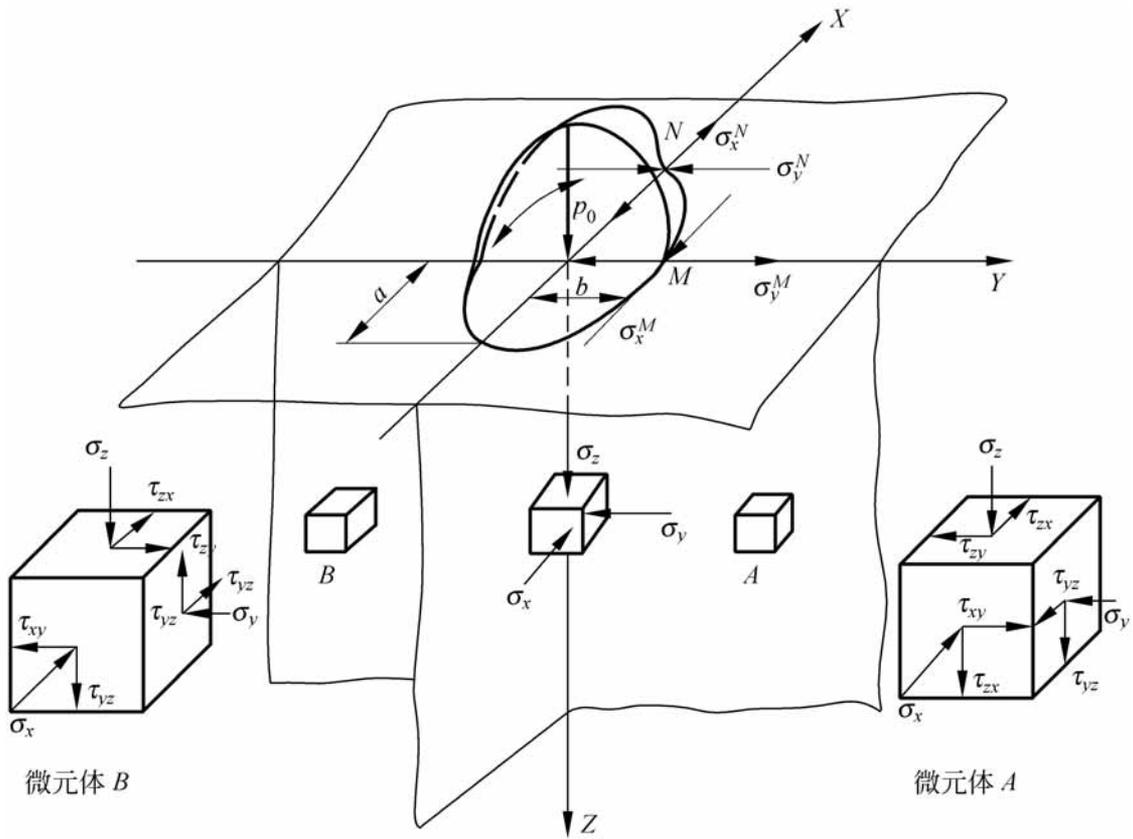


图 11-23 接触应力状态

以上表明:在滚动过程中,接触体各应力分量的变化性质不同,有的是交变应力,有的是脉动应力。同时,正应力和切应力的变化不同相位。所以,要建立接触疲劳强度准则与所有应力分量的关系十分困难,因而提出了各种强度假设,以个别的应力分量作为判断接触疲劳发生的准则。

2. 接触疲劳强度准则

通常采用的接触疲劳强度准则有以下几种:

1) 最大切应力准则

根据 Z 轴上的主应力可以计算出 45° 方向切应力。分析证明:在这些 45° 切应力中的最大值作用在 Z 轴上一定的深度。它是接触体受到的最大切应力 τ_{\max} , 所以最先被用作接触疲劳准则, 即认为当最大切应力达到一定值时将产生接触疲劳磨损。在滚动过程中, 最大切应力是脉动应力, 应力变化量为 τ_{\max} 。

2) 最大正交切应力准则

分析表明:正交切应力 τ_{yz} 的最大值作用在 $x=0$ 而 y 和 z 为一定数值的点; 同样, τ_{zx} 最大值的位置坐标为 $y=0$ 而 x 和 z 等于一定值。这样, 当

滚动平面与坐标轴之一重合时,正交切应力将是交变应力。例如,当滚动平面包含椭圆短轴时,在滚动过程中正交切应力 τ_{yz} 的变化是:从远离接触中心处的零值增加到接近 Z 轴处的最大值 $+\tau_{yz\max}$,再降低到 Z 轴上的零值。随后应力反向,再逐步达到负的最大值 $-\tau_{yz\max}$,而后又变化到零。所以每滚过一次,正交切应力 τ_{yz} 的最大变化量为 $2\tau_{yz\max}$ 。

应当指出,虽然正交切应力的数值通常小于最大切应力,然而滚动过程中正交切应力的变化量却大于最大切应力的变化量,即 $2\tau_{yz\max} > \tau_{\max}$ 。由于材料疲劳现象直接与应力变化量有关,所以 ISO(国际标准化组织)和 AFBMA(美国减摩轴承制造商协会)提出的滚动轴承接触疲劳计算都采用最大正交切应力准则。

3) 最大表面切应力准则

通常接触表面上最大切应力作用在椭圆对称轴的端点。例如,当滚动方向与椭圆短轴一致时,最大表面切应力作用在长轴的端点,在滚动过程中它按脉动应力变化。

虽然表面切应力的数值小于最大切应力和正交切应力,但由于表面缺陷和滚动中的表面相互作用,使疲劳裂纹出现于表面和表面切应力的影响大大加强。

4) 等效应力准则

滚动过程中材料储存的能量有两种作用,即改变体积和改变形状。后者是决定疲劳破坏的因素,按照产生相同的形状变化的原则,将复杂的应力状态用一个等效的脉动拉伸应力来代替。等效应力 σ_e 的表达式为

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)] \quad (11-14)$$

等效应力准则考虑了全部应力分量的影响,但由于计算复杂和缺乏数据,目前还难以普遍应用。值得注意的是近年来弹塑性接触理论有了很大的发展,在此基础上 Johnson(1963 年)提出了如下的塑性剪切准则。

Crook(1957 年)发现:圆盘在滚动过程中,表层内存在塑性剪切层。由于塑性流动局限在很薄的一层金属,所以形成弹性的表面层相对于弹性的内核沿滚动方向转动。Hamilton(1963 年)进一步实验证明:塑性剪切随着应力循环不断积累,直至出现疲劳裂纹。Johnson 从弹塑性理论出发分析了上述现象,并根据不产生连续塑性剪切的条件提出接触疲劳的塑性剪切准则:

$$p_0 = 4k \quad (11-15)$$

式中, p_0 为大 Hertz 应力; k 为剪切屈服极限。根据 Tabor 的经验公式: $k=6HV$, HV 为维氏硬度值。

当接触表面 Hertz 最大应力超过式(11-15)以后, 表层内的正交切应力引起与表面平行方向的塑性剪切变形。当滚动中伴随滑动时, 如果摩擦力为法向载荷的 10%, 则式(11-15)中 $4k$ 应降低为 $3.6k$ 。

多年来对于各种接触疲劳强度准则的适用性进行了大量的实验研究。例如, 观察疲劳裂纹萌生位置和微观组织结构变化; 研究表面层初应力状态、接触椭圆形状和滚动方向等因素对疲劳寿命的影响等等。这些实验研究表明, 任何一个准则都不能完全符合实验结果。各种准则都只能部分地解释疲劳磨损现象, 而对另一些现象却不能解释, 甚至相互抵触。例如, 正交切应力准则完全符合增加椭圆率 b/a 可使疲劳寿命提高, 以及沿椭圆长轴滚动的寿命比沿短轴滚动的寿命长等现象。但它却不能解释表层压缩初应力能成倍地提高接触疲劳寿命, 而拉伸初应力降低疲劳寿命的现象, 因为初应力存在不改变正交切应力的数值。

作者^[5]对于各种接触疲劳准则进行了研究。其方法是: 在接触应力之上附加一个数量很小的轴向弯曲应力以改变应力场, 并对这种复合应力作用下的接触疲劳进行实验, 结果如图 11-20 所示^[4]。在这些实验中, 疲劳寿命的变化仅仅由于不同轴向应力作用的结果, 因而提供了评价接触疲劳准则的依据。计算分析表明: 最大切应力准则和正交切应力准则都不能解释实验结果, 等效应力准则只能部分地说明附加弯曲应力的影响。而最大表面切应力的位置和大小随附加弯曲应力而改变。同时, 接触疲劳寿命随最大表面切应力的增加而降低, 即弯曲应力是通过改变最大表面切应力来影响疲劳寿命。所以, 在该实验条件下, 最大表面切应力准则与实验结果相吻合, 而疲劳裂纹萌生于金属表面。

此外, 工程实际中广泛存在的变载荷作用下的接触疲劳磨损, 情况更加复杂。刘健海等人^[6]对变载荷接触疲劳的设计准则进行了实验研究。

3. 接触疲劳寿命

接触疲劳现象具有很强的随机性质, 在相同条件下同一批试件的疲劳

寿命之间相差很大。为了保证数据的可靠性,相同条件下的实验批量通常应大于 10,并须按照统计学方法处理数据。

接触疲劳寿命符合 Weibull 分布规律,即

$$\lg \lg \frac{1}{S} = \lg L + \lg A \quad (11-16)$$

式中, S 为不损坏概率; L 为实际寿命,通常以应力循环次数 N 表示; A 为常数; 称为 Weibull 斜率,对于钢材, $m = 1.1 \sim 1.5$, 纯净钢取高值。对于滚动轴承:球轴承 $m = 10/9$, 滚子轴承 $m = 9/8$ 。

采用专用的 Weibull 坐标纸,即纵坐标为双对数和横坐标为单对数,式(11-16)应为一斜直线,如图 11-24 所示。

当取得一批实验数据以后,通过统计学计算可以绘制 Weibull 分布图,从而求得接触疲劳寿命分布斜率、特征寿命 L_{10} 和 L_{50} 的数值。 L_{10} 和 L_{50} 分别是损坏百分比为 10% 和 50% 的寿命值。严格地说,只有在 L_7 到 L_{60} 之间的接触疲劳寿命才符合 Weibull 分布直线。

斜率 m 表示同一批实验数据的分散程度。如图 11-25 所示,当载荷增加时,分布斜率 m 增大,因而寿命的变化范围缩小,即分散程度减小。

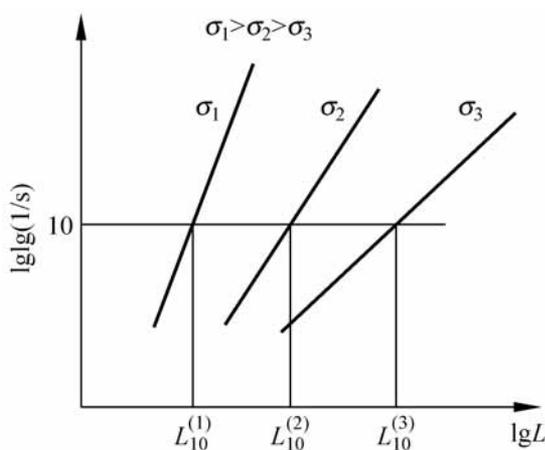


图 11-24 Weibull 分布图

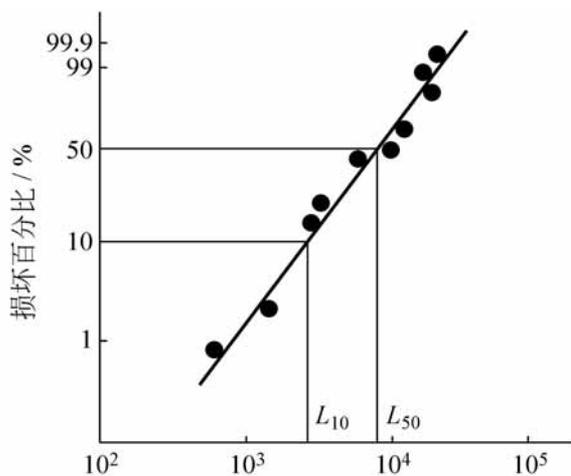


图 11-25 不同载荷下的分布

如果接触疲劳寿命 L_{10} 或 L_{50} 用应力循环次数 N 表示,通常认为应力循环次数与载荷的三次方成反比。根据这一近似关系可以求得 $\sigma - N$ 曲线,如图 11-26 所示,这里, σ 为接触应力。这样,从 $\sigma - N$ 曲线就能够推算出任何应力条件下的寿命值。

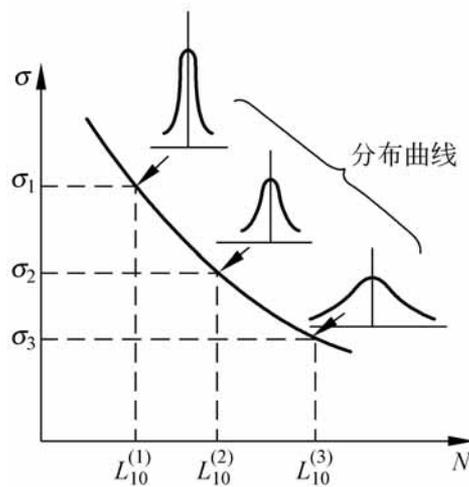


图 11-26 $-N$ 曲线

11.5 腐蚀磨损

摩擦过程中,金属与周围介质发生化学或电化学反应而产生的表面损伤称为腐蚀磨损。常见的有氧化磨损和特殊介质腐蚀磨损。

11.5.1 氧化磨损

当金属摩擦副在氧化性介质中工作时,表面所生成的氧化膜被磨掉以后,又很快地形成新的氧化膜,所以氧化磨损是化学氧化和机械磨损两种作用相继进行的过程。

氧化磨损的大小取决于氧化膜连结强度和氧化速度。脆性氧化膜与基体连结的抗剪切强度较差,或者氧化膜的生成速度低于磨损率时,它们的磨损量较大。而当氧化膜韧性高,与基体连结处的抗剪切强度较高,或者氧化速度高于磨损率时,氧化膜能起减摩耐磨作用,所以氧化磨损量较小。

对于钢材摩擦副而言,氧化反应与表面接触变形状态有关。表面塑性变形促使空气中的氧扩散到变形层,而氧化扩散又增进塑性变形。首先,氧在表面达到饱和,再逐次向表层内扩散,因而由外向内氧的含量逐渐降低。根据载荷、速度和温度的不同,可以形成氧和铁的固溶体、粒状氧化物和固溶体的共晶或者不同形式的氧化物,如 FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 等。这些氧化物硬而脆。

氧化磨损的磨屑是暗色的片状或丝状。片状磨屑是红褐色的 Fe_2O_3 。而丝状磨屑是灰黑色的 Fe_3O_4 。有时用磨屑的这些特征来判断氧化

磨损的过程。

载荷对氧化磨损的影响表现为:轻载荷下氧化磨损磨屑的主要成分是 Fe 和 FeO,而重载荷条件下,磨屑主要是 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 。

滑动速度对氧化磨损影响的研究指出:低速摩擦时,钢表面主要成分是氧铁固溶体以及粒状氧化物和固溶体的共晶,其磨损量随滑动速度升高而增加。当滑动速度较高时,表面主要成分各种氧化物,磨损量略有降低。而当滑动速度更高时,由于摩擦热的影响,将由氧化磨损转变为粘着磨损,磨损量剧增。

干摩擦状态下容易产生氧化磨损。加入润滑油可以减小表面氧化作用,使氧化层变薄,因而提高抗氧化磨损能力。但有些润滑油能促使氧化膜从表面脱落。

11 5 2 特殊介质腐蚀磨损

对于在化工设备中工作的摩擦副,由于金属表面与酸、碱、盐等介质作用而形成腐蚀磨损。腐蚀磨损的机理与氧化磨损相类似,但磨损痕迹较深,磨损量也较大。磨屑呈颗粒状和丝状,它们是表面金属与周围介质的化合物。

由于润滑油中含有腐蚀性化学成分,滑动轴承材料也会发生腐蚀磨损,它包括酸蚀和硫蚀两种。除了合理选择润滑油和限制油中含酸和含硫量外,轴承材料是影响腐蚀磨损的重要因素。表 11-6 给出常用轴承材料的抗腐蚀能力。

表 11-6 轴承材料的腐蚀量

g/h

| 轴承材料 | 锡基巴氏合金 | 铅锑合金 | 铅基巴氏合金 | 铜铅合金 | 锡铝合金 |
|------|--------|-------|--------|-------|-------|
| 腐蚀量 | 0.001 | 0.002 | 0.004 | 0.453 | 1.724 |

11 5 3 微动磨损

早在 1937 年前后,美国 Chrysler 汽车厂的产品在运输过程中发现一些相互配合的光洁表面出现严重的损伤。这种两个表面间由于振幅很小的相对运动而产生的磨损称为微动磨损或微动腐蚀磨损。

在载荷作用下,相互配合表面的接触峰点形成粘着结点。当接触表面受到外界微小振动,虽然相对滑移量很小,通常为 0.05mm,不超过

0.25 mm, 粘着结点将被剪切, 随后剪切面逐渐被氧化并发生氧化磨损, 产生红褐色 Fe_2O_3 的磨屑堆积在表面之间。此后, 氧化磨屑起着磨料作用, 使接触表面产生磨粒磨损。

由此可见, 微小振动和氧化作用是促进微动磨损的主要因素。而微动磨损是粘着磨损、氧化磨损和磨粒磨损等多种磨损形式的组合。

摩擦副材料配对是影响微动磨损的重要因素。一般来说, 抗粘着磨损性能好的材料也具有有良好的抗微动磨损性能。提高硬度可以降低微动磨损, 而表面粗糙度与微动磨损性能无关。

适当的润滑可以有效地改善抗微动磨损能力, 因为润滑膜保护表面防止氧化。采用极压添加剂或涂抹二硫化钼都可以减少微动磨损。郭强等人^[7] 针对桥梁用钢索中钢丝表面的微动损伤问题, 研究了高分子材料表面膜的抗微动磨损的机理。

微动磨损量随载荷增加而加剧, 但当超过一定载荷以后, 磨损量将随着载荷的增加而减少。通常微小振幅的振动频率对于钢的微动磨损没有影响, 而在大振幅振动条件下, 微动磨损量随振动频率的增加而降低。

11.5.4 气蚀

气蚀是固体表面与液体相对运动所产生的表面损伤, 通常发生在水泵零件、水轮机叶片和船舶螺旋桨等表面。

当液体在与固体表面接触处的压力低于它的蒸发压力时, 将在固体表面附近形成气泡。另外, 溶解在液体中的气体也可能析出而形成气泡。随后, 当气泡流动到液体压力超过气泡压力的地方时, 气泡便溃灭, 在溃灭瞬间产生极大的冲击力和高温。固体表面经受这种冲击力的多次反复作用, 材料发生疲劳脱落, 使表面出现小凹坑, 进而发展成海绵状。严重的气蚀可在表面形成大片的凹坑, 深度可达 20mm。

气蚀的机理是由于冲击应力造成的表面疲劳破坏, 但液体的化学和电化学反应加速了气蚀的破坏过程。

减少气蚀的有效措施是防止气泡的产生。首先应使在液体中运动的表面具有流线形, 避免在局部地方出现涡流, 因为涡流区压力低, 容易产生气泡。此外, 应当减少液体中的含气量和液体流动中的扰动, 也将限制气泡的形成。

选择适当的材料能够提高抗气蚀能力。通常强度和韧性高的金属材料具有较好的抗气蚀性能, 提高材料的抗腐蚀性也将减少气蚀破坏。

应当指出,上述 氧化磨损、特殊介质腐蚀磨损、微动磨损和气蚀等的共同特点是表面与周围介质的化学反应起着重要作用。所以可将这几种磨损统称为腐蚀性磨损。

在多数情况下,腐蚀性磨损首先产生化学反应,然后由于摩擦中的机械作用使化学生成物从表面脱落。由此可见,腐蚀性磨损过程与润滑油添加剂在表面生成化学反应膜的润滑过程基本相同,其差别在于化学生成物是起保护表面防止磨损的作用,还是促进表面脱落。

表面化学生成物的形成速度与被磨掉速度之间存在相对平衡关系,两者相对大小不同产生不同的效果。这里以防止胶合磨损的极压添加剂为例来说明它的不同效果。

通常化学反应膜的生成速度遵循 Arrhenius 定律,即

$$V = KCe^{E/RT} \quad (11-17)$$

式中, V 为化学反应速度即膜的生成速度; C 为润滑油中极压添加剂的浓度; E 为表征极压添加剂活性的常数; T 为热力学温度; R 为气体常数; K 为比例常数。

显然,在稳定工况条件下,腐蚀性磨损的磨损率取决于表面化学生成物的生成速度。由式(11-17)可知:磨损率与腐蚀介质的浓度成正比,而与温度按指数关系变化。

在前面曾经指出:采用极压添加剂降低粘着磨损时,应选择合适的化学活性,即添加剂成分和浓度。图 11-27 给出了粘着磨损和由极压添加剂引起的腐蚀磨损与添加剂化学活性的关系。粘着磨损的磨损率随化学活性的增加而降低。而腐蚀磨损的磨损率随化学活性按线性增加。因而图中 A 点是最佳活性,此处磨损率最低。

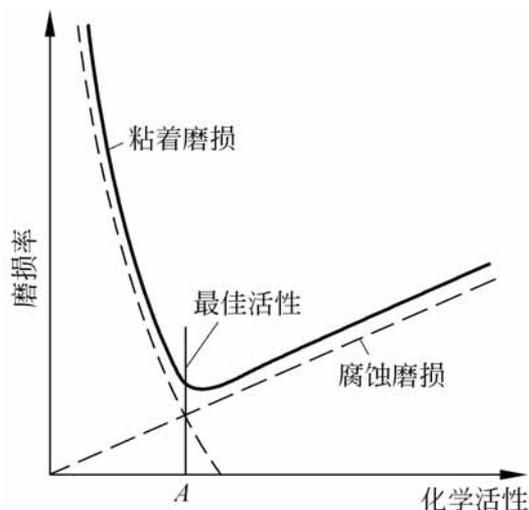


图 11-27 最佳活性位置

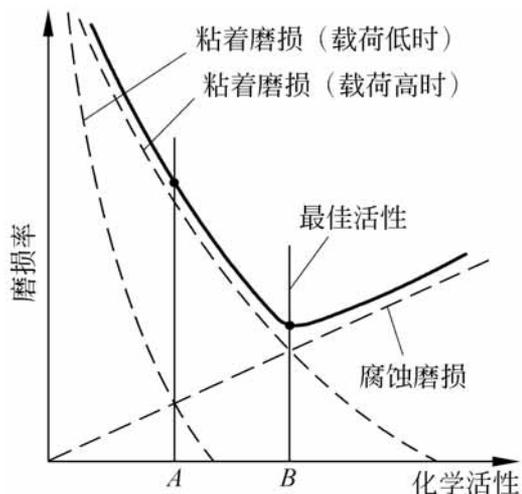


图 11-28 最佳活性选择

如图 11-28,当 擦副的载荷较大或者油膜厚度较薄时,粘着磨损曲线的位置改变。此时应选择较高的化学活性,最佳活性为 B 点。增加添加剂的化学活性可以是提高润滑油中添加剂的浓度,或者选用活性更强的添加剂组成。

由此可见,极压添加剂的效果和腐蚀作用是同一现象的两个方面。图 11-29 是两种磨损实验机对极压添加剂的实验曲线。结果表明,极压添加剂的抗胶合能力随其浓度而增加,同时添加剂引起的腐蚀磨损也相应增加。

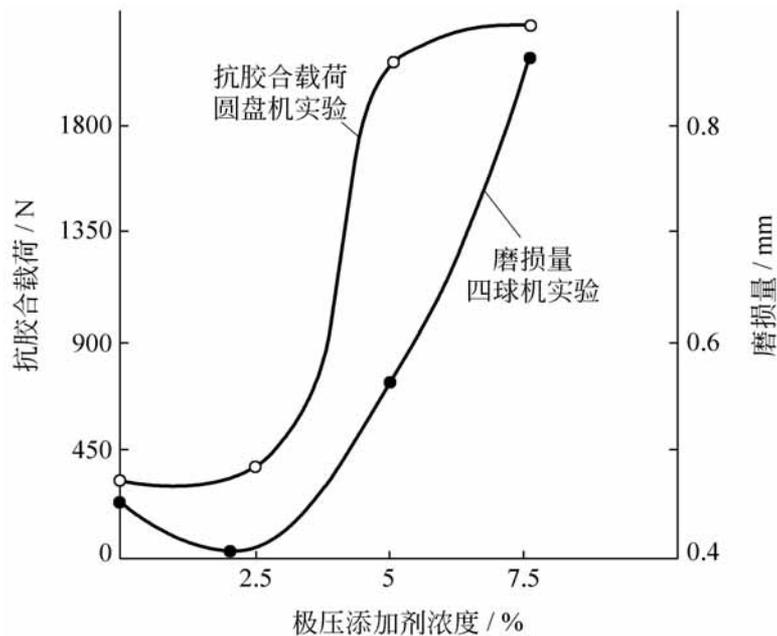


图 11-29 极压添加剂浓度的影响

参 考 文 献

- [1] 温诗铸. 摩擦学原理. 北京:清华大学出版社,1990
- [2] M.M.赫鲁晓夫等著 胡绍农等译. 金属的磨损. 北京:机械工业出版社,1966
- [3] 樊瑜瑾,苏振武,温诗铸. 滑动速度对油润滑表面胶合的影响. 机械工程学报, 1988, 24(1): 78 ~ 87
- [4] 温诗铸. 复合应力对接触疲劳的影响. 机械工程学报, 1982, 18(4): 1 ~ 7
- [5] 温诗铸. 对于接触疲劳各种强度准则的评价. 清华大学学报, 1982, 22(4): 9 ~ 18
- [6] 刘健海,王慧,温诗铸. 变载荷条件下接触疲劳设计准则的实验研究. 全国第一次摩擦学设计学术会议论文集,沈阳,1991,406 ~ 414
- [7] Guo Qiang, Wen Shizhu, Luo Weili. Fretting wear resistance mechanism of transferred film from organic high molecular materials. Progress in Natural Science. 1996, 6(5): 593 ~ 601
- [8] 周仲荣. 微动磨损. 北京:科学出版社,2001

第 12 章

宏观磨损规律与磨损理论

对于摩擦学中的磨损问题通常从微观和宏观两个角度进行研究。微观研究是从物理、化学、材料科学等方面研究各种磨损的形成、变化和破坏机理,建立物理模型,探索各种磨损的本质和基本规律。而宏观研究则是把各种磨损形式作为一种共同的表面损伤现象,研究它的形态变化、影响因素和提高耐磨性的措施,为工程应用提供依据。这两方面的研究工作都是重要的,将机理研究和应用研究结合起来将能有效地分析和处理实际磨损问题。

第 11 章讨论的各种磨损形式有着不同的作用机理:磨粒磨损主要是犁沟和微观切削作用;粘着磨损过程与表面间分子作用力和摩擦热密切相关;接触疲劳磨损是在循环应力作用下表面疲劳裂纹萌生和扩展的结果;而氧化和腐蚀磨损则由环境介质的化学作用产生。

实际的磨损现象通常不是以单一形式出现,而是以一两种为主,几种不同机理磨损形式的综合表现。例如,犁耙的磨损主要是磨粒磨损,但由于水和泥土中某些物质的化学作用,也会产生氧化磨损和腐蚀磨损。

随着工况条件的变化,实际机械零件的主要磨损形式也会相应改变。图 12-1 给出了齿轮失效方式随着载荷和速度的变化情况。在这一章中,磨损被视作综合的表面损伤现象,讨论磨损宏观变化规律、影响因素和抗磨措施。

为了设计具有足够抗磨能力的机械零件和估算其磨损寿命,必须建立适合于工程应用的磨损计算方法。近年来通过对磨损状态和磨屑分析以及对磨损过程的深入研究,提出了一些磨损理论,它们是磨损计算的基础。

磨损计算方法的建立必须考虑磨损现象的特征。而这些特征与通常的强度破坏很不相同。例如摩擦副的实际接触点是离散的和变化的,因而摩擦副承载材料的体积很小并在磨损过程中不断变化。又如摩擦表面的材料

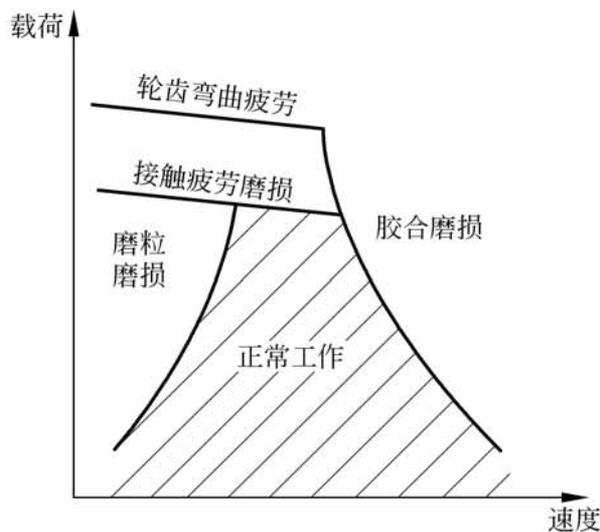


图 12-1 齿轮失效方式

性能在磨损过程中不断改变,因而材料的破坏形式也将不断改变。此外,在磨损过程中的热效应和物理化学作用使磨损理论的建立造成困难。

由此可知,考虑表层材料在磨损过程中的动态特性和破坏特点,以及材料与周围介质的作用等,对于建立磨损理论及其计算方法具有十分重要的意义,而这一任务的复杂性使得磨损计算至今还不能满足应用的要求。

12.1 摩擦副材料

根据使用要求不同,摩擦学中的材料可分为:摩阻材料和摩擦副材料两类。摩阻材料用于各种机器设备的制动器、离合器和摩擦传动装置中。对材料主要要求具有较高和热稳定的摩擦系数。而摩擦副材料又分为减摩材料和耐磨材料。一般情况下,材料的减摩性与耐磨性是统一的,即摩擦系数低的材料通常也具有耐磨损性能。然而,并非所有的摩擦副材料都兼有这两种性能。有些减摩材料并不耐磨,而某些耐磨材料可能摩擦系数很高。

摩擦副材料的选择依据主要是摩擦表面的压力、滑动速度和工作温度。例如对于以面接触的滑动轴承,由于其表面压力较低,粘着磨损为主要失效形式,通常采用软硬配合的材料配对。而对于以点线接触如齿轮或滚动轴承等摩擦副,由于是载荷集中作用,主要发生接触疲劳磨损,则应使用硬材料配对。

12.1.1 摩擦副材料性能

通常对于摩擦副材料的主要技术要求有:

1. 机械性能

由于摩擦表面的载荷作用和运动中的冲击,材料应具有足够的强度和韧性,特别是抗压能力。此外,疲劳强度也很重要,例如滑动轴承的轴瓦约有60%是由于表面疲劳剥落而失效。

金属材料硬度越高,其耐磨性越好。而良好的塑性使摩擦表面能迅速地磨合,塑性低的耐磨材料在受到冲击载荷时容易脆裂。

2. 减摩耐磨性能

良好的耐磨材料应具有较低的摩擦系数,它不但本身耐磨,同时也不应使配对表面的磨损过大。所以减摩耐磨性能实质上是相互配对材料的组合性能。

磨合性能是评价材料的技术指标。良好的磨合性能表现为:在较短的时间内以较小的磨损量获得品质优良的磨合表面。

3. 热学性能

为了保持稳定的润滑条件,特别是在边界润滑状态下摩擦副材料应具有良好的热传导性能,以降低摩擦表面的工作温度。同时,材料的热膨胀系数不宜过大,否则会使间隙变化而导致润滑性能改变。

4. 润滑性能

摩擦副材料与所使用的润滑油应具有良好的油性,即能够形成连接牢固的吸附膜。此外,摩擦副材料与润滑油的润湿性能要好,从而润滑油容易覆盖摩擦表面。

12.1.2 材料的减摩耐磨机理

应当指出:材料的摩擦学性能除与成分相关之外,还取决于材料的组织结构。为了开发优良的摩擦副材料,人们提出了各种材料减摩耐磨机理。主要的减摩耐磨机理有:

1. 软基体中硬相承载机理

通常认为减摩耐磨材料的组织应当是在软的塑性基体上分布着许多硬颗粒的异质结构,例如,锡基巴氏合金的组织是以含锑与锡固溶体为塑性基

体,在该软基体上面分布着许多硬的 Sn-Sb 立方晶体和 Cu-Sn 针状晶体。在正常载荷作用下,主要由突出在摩擦表面的硬相直接承受载荷,而软相起着支持硬相的作用。由于是硬相发生接触和相对滑动,所以摩擦系数和磨损都很小。又由于硬相被支持在软基体之上,易于变形而不至于擦伤相互摩擦的表面。同时,软基体还可以使硬相上压力分布均匀。当载荷增加时,承受压力增大的硬相颗粒陷入软基体中,将使更多的硬颗粒承载而达到载荷均匀分布。

2. 软相承载机理

与上述观点相反,有人认为材料的减摩耐磨机理在于软相承受载荷。在这类材料中,各种组织的热膨胀系数不同,软相的膨胀系数大于硬相。在摩擦过程中,由于摩擦热引起的热膨胀使软相突起几个油分子的高度而承受载荷。由于软相的塑性高,因而减摩性能良好。

3. 多孔性存油机理

现代机械装备中广泛应用的粉末冶金材料是典型的多孔性组织。这种材料是将金属粉末与非金属粉末混合,并渗入各种固体润滑剂,如石墨、铅、硫及硫化物等,以改善材料的减摩性能,再经过成型烧结等工艺而制成。

粉末冶金材料的孔隙约占 10% ~ 35%。将它放在热油中浸渍数小时后,孔隙中即充满润滑油。当摩擦副相对滑动时,摩擦热使金属颗粒膨胀,孔隙容积减小。而润滑油也膨胀,其膨胀系数比金属大,因而润滑油被溢出表面起润滑作用。

在巴氏合金和铅青铜等轴承材料组织结构中,各相的热膨胀系数不同,经过工艺过程中的热胀冷缩而形成许多小孔隙。因此也具有与粉末冶金孔隙相同的润滑效果。

4. 塑性涂层机理

近年来,多层材料日益广泛地应用于轴瓦和其他摩擦副。在硬基体材料表面覆盖一层或多层软金属涂层。常用的涂层材料有铅、锡、铟和镉等。由于表面涂层很薄,并具有良好塑性,因而容易磨合和降低摩擦系数。

12 2 磨损过程曲线

12 2 .1 磨损过程曲线

图 12-2 给出了典型的磨损曲线,它表示磨损量 Q 随时间 T 的变化关系。各种磨损曲线通常由表示三种不同的磨损变化过程的阶段组成。

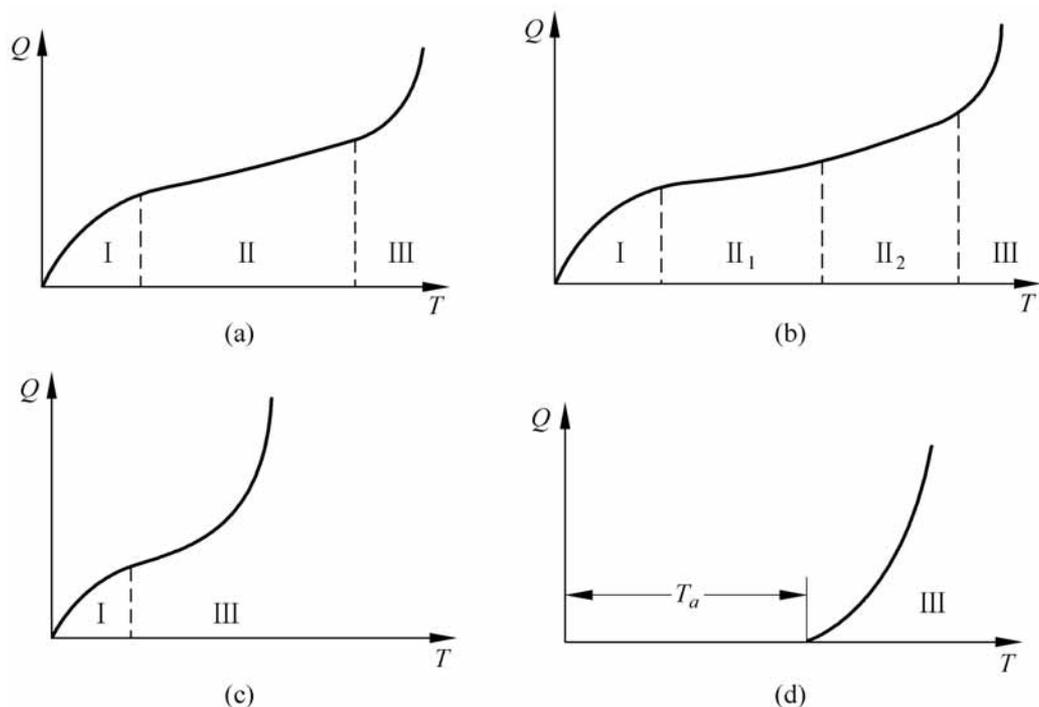


图 12-2 磨损过程曲线

组成磨损曲线的三种磨损阶段为:

() 磨合磨损阶段: 磨损率随时间增加而逐渐降低。它出现在摩擦副开始运行时期。

() 稳定磨损阶段: 摩擦表面经磨合以后达到稳定状态, 磨损率保持不变。这是摩擦副正常工作时期。

() 剧烈磨损阶段: 磨损率随时间而迅速增加, 使工作条件急剧恶化, 而导致零件完全失效。

图 12-2(a) 是典型的磨损过程曲线。在工况条件不变的情况下, 整个磨损过程由三个阶段组成。

图 12-2(b) 的曲线表示磨合期以后, 摩擦副经历两个磨损工况条件, 因此有两个稳定磨损阶段。在这两个阶段中, 虽然磨损率不同, 但却属于正常工作状态。

图 12-2(c)是恶劣工况条件的磨损曲线。在磨合磨损之后直接发生剧烈磨损,不能建立正常工作阶段。

图 12-2(d)属于接触疲劳磨损的过程曲线。当零件正常工作到接触疲劳寿命时,随即开始出现疲劳磨损,并迅速发展导致失效。

12.2.2 磨合磨损

加工装配后的摩擦副表面具有微观和宏观几何缺陷,使配合面在开始摩擦时的实际接触峰点压力很高,因而磨损剧烈。为此,在新机器正常运行之前,通常要采用合适的规范进行磨合。在磨合过程中,通过接触峰点磨损和塑性变形,使摩擦副接触表面的形态逐渐改善,而表面压力、摩擦系数和磨损率也随之降低,从而达到稳定的磨损率进入正常磨损阶段。

由于磨合期表面形态发生急剧变化,通常的磨损率较正常工作时大 50 ~ 100 倍,磨去最大粗糙峰高度 h_{\max} 的 65% ~ 75%。

通过磨合磨损不仅使摩擦副在几何上相互贴服,同时还使表面层的组织结构发生变化,获得适应工况条件的稳定的表面品质。

图 12-3 表示磨合前后表面形貌变化。磨合使接触面积显著地增加和峰顶半径增大。图 12-4 是塑性指数曲线。随磨合时间的延续,经过磨合磨损表面由塑性接触过渡到弹塑性接触,甚至弹性接触状态。

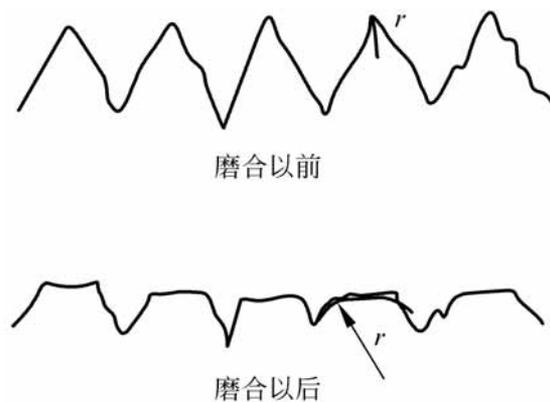


图 12-3 磨合前后的表面形貌变化

1. 磨合与磨损寿命

采用不同的磨合规范可以使磨合时间、磨合磨损量以及磨合后的磨损率有很大的不同。实践证明,良好的磨合能够使摩擦副的正常工作寿命提高 1 ~ 2 倍。

在图 12-5 中,以下标 0 表示的是磨合磨损的物理量;而以下标 a 表示

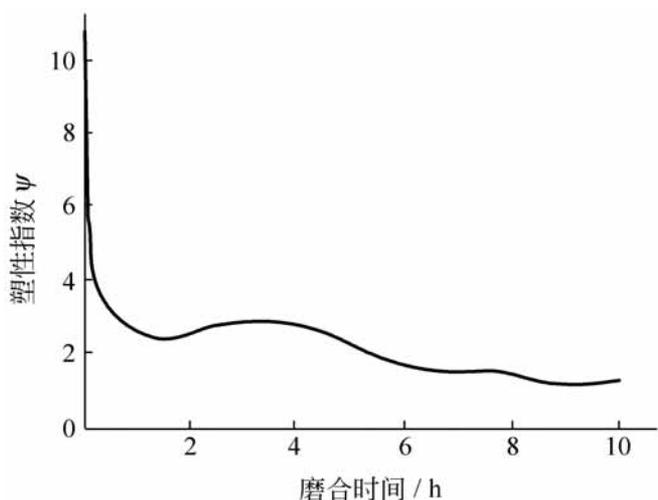


图 12-4 塑性指数随磨合时间的变化

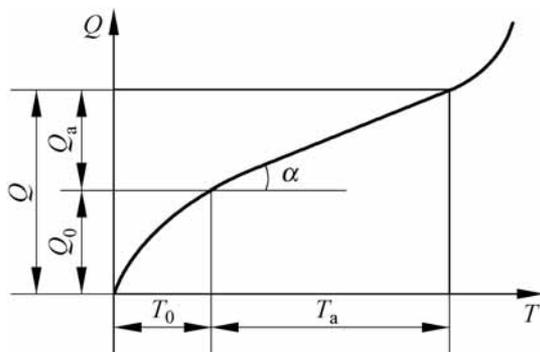


图 12-5 磨合磨损

的为稳定磨损的物理量。令磨损率 a 为单位时间的磨损量,则有:

$$a = \frac{dQ}{dT} \quad a = \tan \alpha \tag{12-1}$$

总磨损量 $Q = Q_0 + Q_a$, 而稳定磨损量 $Q_a = a T_a$ 。因此, 正常磨损寿命为

$$T_a = \frac{1}{a} (Q - Q_0) \tag{12-2}$$

由此可知: 正常磨损寿命 T_a 随着 Q_0 和 a 的减小而增加。

图 12-6 表示同一型号的三部发动机采用三种磨合规范所得的磨损曲线。如果三者允许的总磨损量相同, 则它们的磨损寿命不同。由图可知, 2 号机组的磨合规范比 1 号机组的合理。虽然它们磨合后的表面品质相同, 因而稳定磨损率相同, 但是 2 号机组的磨合期磨损量较小, 即 $Q_0 < Q_0'$, 所以它的磨损寿命将比 1 号机组的大, 即 $T_{a2} > T_{a1}$ 。3 号机组的磨合最为有利, 不仅磨合磨损小, 而它获得较低的稳定磨损率, 即 $a_3 < a_1$, 所以它的磨

损寿命 T_{a3} 最长。

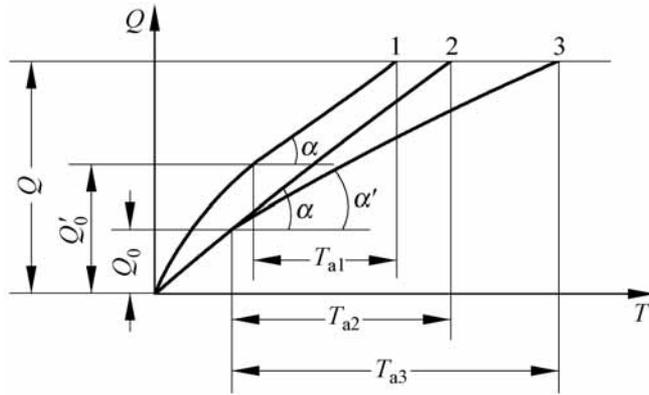


图 12-6 三种磨合规范的磨合曲线

此外,良好的磨合还能够有效地改善摩擦副其他性能。如图 12-7 所示,滑动轴承经磨合后可以改善表面形貌,使轴承临界特性数降低,更利于建立流体动压润滑膜。又如发动机的合理磨合提高了缸套活塞环的表面品质,减少擦伤痕迹,提高密合性,可使发动机的耗油量较一般情况下下降达 50%。

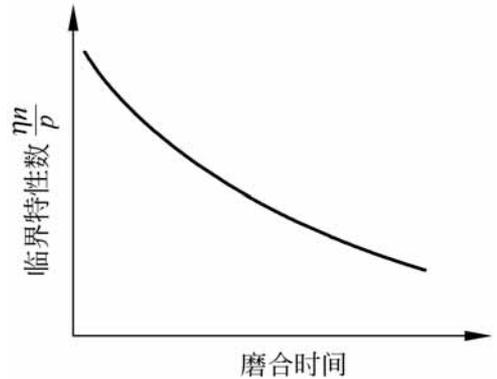


图 12-7 滑动轴承的磨合

2. 提高磨合性能的措施

良好的磨合性能表现为磨合时间短,磨合磨损量小,以及磨合后的表面耐磨性高。为提高磨合性能一般可采取以下措施:

1) 选用合理的磨合规范

新机器开始工作时载荷不可过大,否则将严重损伤表面,造成早期磨损失效。合理的磨合规范应当是逐步地增加载荷和摩擦速度,使表面品质得到相应改善。而磨合最后阶段的工作条件要接近使用工况。

2) 选择适当的润滑油和添加剂

润滑油性质对磨合表面有显著影响。观察采用不同润滑油时磨合前后摩擦表面的形貌发现,随着润滑油粘度增加,磨合过程中粘着磨损所形成的擦痕也较深和较宽,使表面耐磨性降低。而低粘度的润滑油导热性好,容易维持表面吸附膜,磨合过程中粘着磨损较轻,使表面品质得到改善。

如果在磨合用润滑油中加入适当的油性添加剂,一方面可以加速磨合过程,另一方面由于加强了吸附膜,可以避免严重的粘着磨损痕迹,因而提

高了表面品质。

3) 采用合适的材料配对

摩擦副的磨合性能是配对材料的组合性质。磨合性能良好的材料不仅本身易于磨合,而且又能够对互配件的磨合起促进作用。

以滑动轴承材料为例,通常轴颈材料为钢,轴承材料采用巴氏合金时,磨合性能较好。因为巴氏合金塑性好本身易于磨合,而组织中又含有 SnSb 硬颗粒对轴颈表面起磨合作用。铅青铜整个组织质地较软,本身容易磨合,但对轴颈的磨合作用不大,故磨合时间较长。而铁铝青铜中含有 FeAl₃ 颗粒,硬度很高,因而本身难以磨合又容易伤轴,与它相配的轴颈表面必须淬火硬化。

为了改善材料本身的磨合性能,可以在表面镀一层薄塑性金属,例如铸铁活塞环表面镀锡。如果要加速配对表面的磨合过程,有时在摩擦表面间加入适当的磨料,但是应当选择恰当。

4) 控制制造精度和表面粗糙度

显然,提高摩擦副表面的制造和装配精度将显著地减少磨合阶段的磨损量。而表面粗糙度的选择应根据磨损工况条件来确定。

(1946年)研究轴颈与轴承表面的磨合指出:不同加工方法得到的不同粗糙度的表面磨合后的粗糙度相同,但磨合时间不同。许多实验都证明:磨合结束后形成的表面粗糙度与机械加工得到的原始粗糙度无关,而取决于磨合工况条件。磨合后粗糙度是与给定工况条件相适应的最佳粗糙度,它保证磨损率最低。如果磨合前的粗糙度接近最佳粗糙度,可以使磨合磨损量成倍地降低。

12.3 表面品质与磨损

摩擦表面经过加工成型工艺以后具有不同的几何品质即表面形貌,如粗糙度、波纹度、宏观几何偏差和加工痕迹方向等,以及不同的物理品质,如冷作硬化、微硬度和残余应力等。这些都对磨损有重要的影响。

12.3.1 几何品质的影响

加工表面的特征是外形轮廓的起伏变化,表面几何品质可以用表面形貌参数来描述。设峰高为 H ,两峰之间距离为 L ,根据 L/H 的大小可分为粗糙度、波纹度和宏观偏差,如图 12-8 所示。

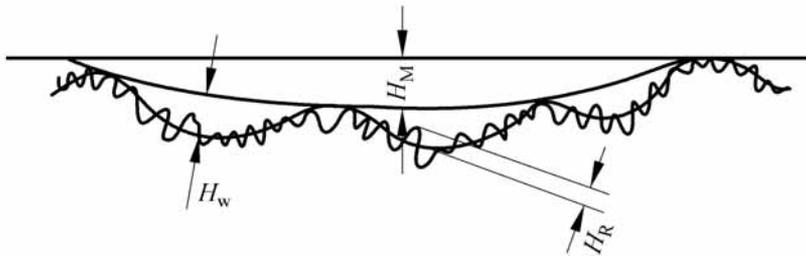


图 12-8 加工表面外形轮廓

通常表面波纹度是周期性重复的起伏,峰距较长,一般在 $1 \sim 10\text{mm}$ 范围。表面粗糙度无明显的周期性,峰距为 $2 \sim 800\mu\text{m}$,峰高为 $0.03 \sim 400\mu\text{m}$ 。

关于粗糙度与磨损的关系曾有着不同的认识。1938 年美国 Chrysler 汽车厂提出:粗糙度越小即表面越光滑,则磨损量越小。因此,其主要零件表面都采用超精密加工。这实际上反映了摩擦磨损是表面粗糙峰机械作用的认识。1941 年美国 Buick 工厂认为,表面分子作用是摩擦磨损的基本原因,因此提出摩擦表面要有足够的粗糙度才耐磨,因而主张对零件表面进行腐蚀加工。前苏联科学院机械研究所的学者对表面品质对磨损的影响进行了系统的研究,下面介绍他们得出并得到普遍认可的主要结论。

实验研究得出:对于不同的磨损工况条件,表面粗糙度都具有一个最优值 H_{R0} ,此时磨损量最小,如图 12-9 所示。这一结论已为许多实验所证实。

最优粗糙度的存在表明:磨损过程是摩擦副表面之间机械的和分子的联合作用。当表面粗糙度小于最优粗糙度时,磨损加剧是由表面分子作用造成的。而当表面粗糙度大于最优值时,磨损主要是由表面机械作用产生的。

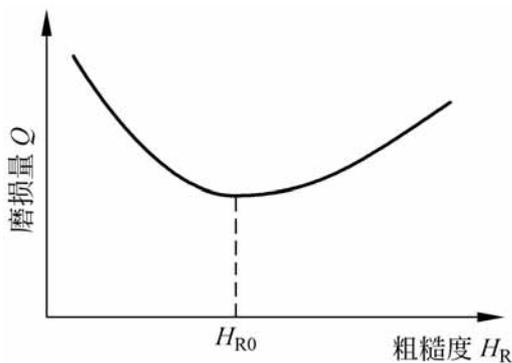
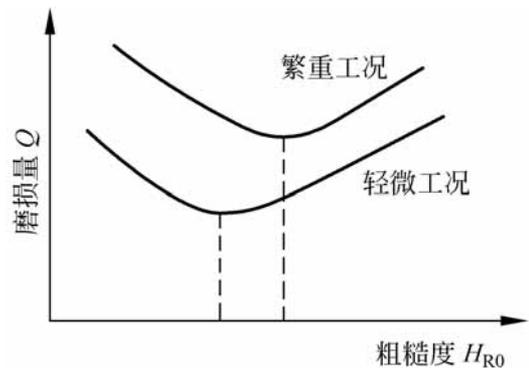


图 12-9 粗糙度与磨损量

图 12-10 不同工况的 H_{R0} 值

实验还得出:摩擦副所处的工况条件不同,最优粗糙度也不同。在繁重工况条件下,由于摩擦副的磨损严重,因而最优粗糙度也相应增大,如

图 12-10 所示。工况条件包含摩擦副的载荷、滑动速度、环境温度和润滑状况等。

图 12-11 说明,不同粗糙度的表面在磨合过程中粗糙度的变化。在一定的工况条件下,不论原有的粗糙度如何,经磨合后都会达到与工况相适应的最优粗糙度。此后,表面粗糙度稳定在最优粗糙度下持续工作。如图所示,当 $H_R > H_{R0}$ 时,由于剧烈的机械磨损使 H_R 下降而趋于 H_{R0} 值。而当 $H_R < H_{R0}$ 时,表面分子作用使 H_R 增加到最优值 H_{R0} 。所以,只有在表面具有最优粗糙度的情况下磨损量才会最小。

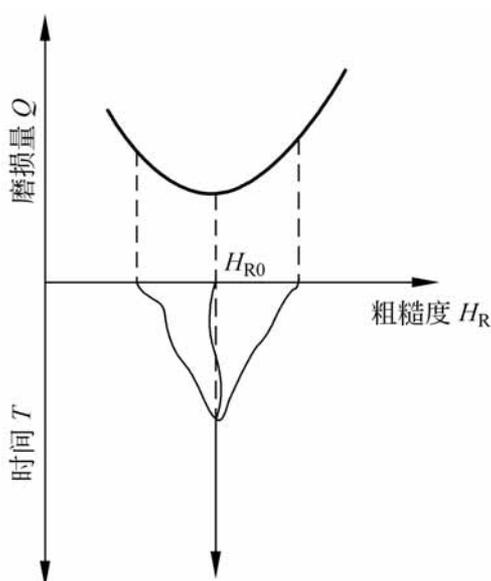


图 12-11 磨合中的 H_R 变化与最优粗糙度

表面波纹度对于磨损的影响与粗糙度相类似。此外,波纹度大的表面将使相配合表面的磨合磨损量增加,而磨合后的稳定磨损率却趋于一致。图 12-12 为巴氏合金试件与不同波纹度钢表面磨合时的磨损曲线。

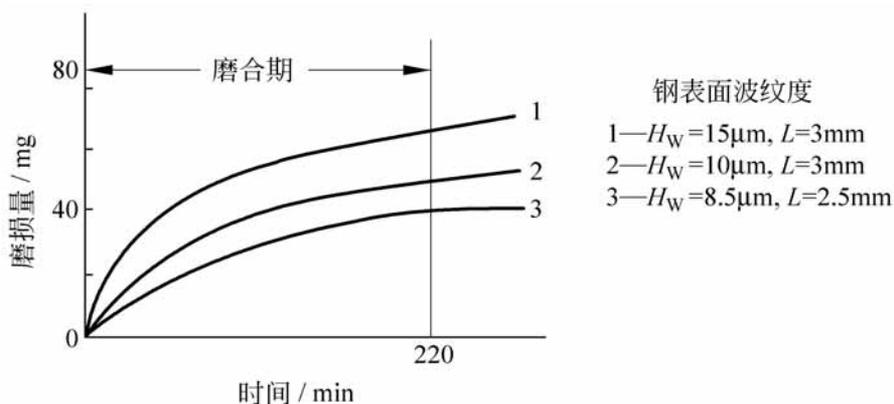


图 12-12 巴氏合金与钢对磨损的磨合曲线

摩擦表面的加工痕迹方向影响磨合时间和磨合磨损量,而磨合以后的痕迹方向总是顺着摩擦方向,此后的磨损率与原来的痕迹方向无关。

图 12-13 和图 12-14 是表面加工痕迹方向对磨损的影响。图中轻微工况是指摩擦表面压力 $p = 14.2\text{MPa}$ 和润滑良好的工作状况;繁重工况为 $p = 66\text{MPa}$ 和润滑不良的工作状况。

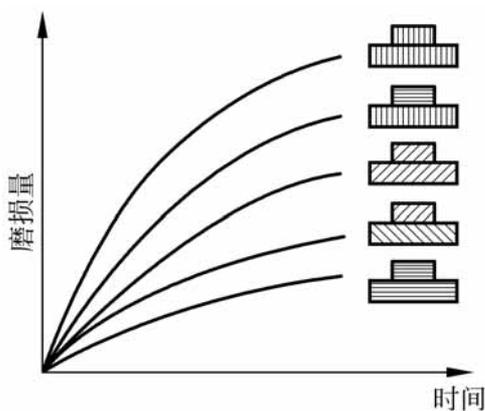


图 12-13 轻微工况下的磨损

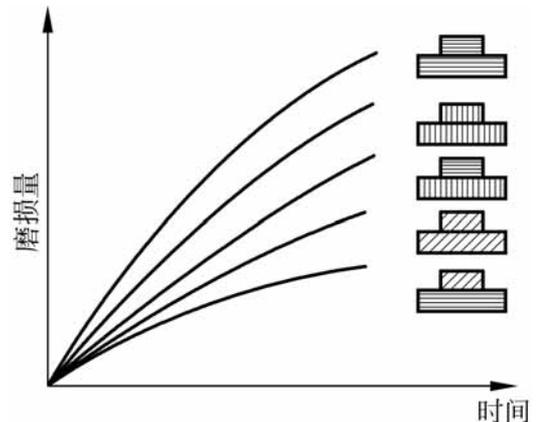


图 12-14 繁重工况下的磨损

由图可知:在轻微工况条件下,摩擦副表面的痕迹方向相互平行并与摩擦方向一致时,磨合磨损量最小。这是因为轻微工况下表面压力不高而润滑充足,润滑膜易于形成,磨损主要由于粗糙峰的机械作用引起。但是,对于繁重的工作条件,粘着磨损出现的可能性增加,相互交叉的痕迹方向将避免大面积的接触点,从而提高抗磨损性能。通常,机床导轨属于繁重磨损工况,宜采用交叉的痕迹方向。

12.3.2 物理品质的影响

加工的表面由于切削过程中变形和热的急剧变化而形成表面层特定的物理品质,包含冷作硬化、微硬度和残余应力的分布。表面层物理品质的不同,其磨损性能将有显著的变化。然而,物理品质对磨损的影响往往被人们所忽视,因此研究得还很不充分。

在加工冷作硬化过程中,表面的塑性变形促进氧在金属中扩散,形成连接牢固的氧化膜,因而使抗氧化磨损性能提高。表面经冷作硬化后塑性降低,硬度提高,从而减少了粘着磨损,并提高了抗胶合能力。接触疲劳裂纹在表面硬化层中的萌生和扩展必须在较高的应力和更多次应力循环下才能发生,因而冷作硬化可以提高表面疲劳磨损寿命。总的说来,经过冷作硬化的表面对于各类磨损的耐磨性都有一定程度的提高。一般粗加工表面硬化

层深度为 0.3 ~ 1mm; 精车、精铣的硬化层为 0.1 ~ 0.2mm; 而磨削加工的硬化层只有 0.05 ~ 0.1mm。

表面层的应力状态对磨损性能有很大的影响。在切削过程中, 由于切削变形, 刀具与表面的摩擦、切削热引起的相变和体积变化等原因形成表面残余应力。而残余应力的分布状态受各种因素综合的影响, 情况比较复杂。残余应力对于磨损的影响有着不同的实验结论。有人认为: 表面拉伸残余应力和压缩残余应力都能提高耐磨性, 应力越大磨损越小。这是因为残余应力是体积应力, 能减小金属原子的活动性, 因而磨损进行缓慢。也有人提出只有拉伸残余应力能提高耐磨性。因为在磨损过程中表面出现的塑性变形将产生压缩应力, 当表面压缩应力达到一定数值时, 出现裂纹而加速磨损。这样, 摩擦表面原来的拉伸应力越大, 则表面达到临界压缩应力的时间就越长, 所以耐磨性越高。多数实验结果证明: 表面压缩残余应力能提高材料的抗接触疲劳磨损能力, 相反地拉伸残余应力将降低疲劳磨损寿命。这一结论可以由接触应力分析中得到解释, 即压缩残余应力可以降低表面最大切应力和等效应力, 有时也能降低表层内的最大切应力。

综上所述, 表面品质包括几何品质和物理品质对磨损性能有着重要的影响。由于表面品质是由加工制造条件所确定的, 研究表面品质与磨损的关系, 目的在于根据最优的表面品质来选择合适的表面制造方法。

12.4 粘着磨损理论

近年来由于磨损表层微观分析技术的发展, 推动了对各种磨损现象本质的深入研究, 从而提出了许多有关材料磨损的理论。以下简要介绍几种重要的磨损理论。

在早期研究中, Tonn(1937年)试图建立磨损与材料机械性质的关系, 曾提出磨粒磨损的经验公式。以后 Holm(1940年)根据磨损过程中原子之间的作用推导出单位滑动位移中的磨损体积为

$$\frac{dV}{ds} = P \frac{W}{H} \quad (12-3)$$

式中, V 为磨损体积; s 为滑动位移; W 为载荷; H 为材料硬度; P 为原子与原子接触后脱离表面的概率。

Achard(1953年)在其建立的粘着磨损理论中, 提出的磨损计算公式(11-8)与 Holm 公式(12-3)在形式上相同。Rowe 在 1966 年对 Archard 公

式进行修正,他考虑表面膜的影响以及切向应力和边界膜解附使接触峰点尺寸的增加,得出体积磨损度公式为

$$\frac{dV}{ds} = k_m (1 + f^2)^{\frac{1}{2}} \frac{W}{s} \quad (12-4)$$

式中, k_m 为与材料性质有关的系数; W 为常数; f 为摩擦系数; s 为与表面膜有关的系数; s_s 为受压屈服极限。

从 Holm 和 Achard 公式可以得出:磨损量与滑动距离和载荷成正比,而与摩擦副中软材料的屈服极限或硬度成反比。

实验研究表明:磨损量与滑动距离成正比的结论基本上适合于各种磨损条件。而磨损量与载荷的正比关系只适合于一定的载荷范围。例如,钢对钢的摩擦时,当载荷超过 $H/3$ 时,磨损量将随载荷以指数形式增加。磨损量与材料硬度成反比的关系也已被许多实验所证实,特别适合于磨粒磨损。当然摩擦副材料的其他性质对于磨损过程的影响也不可忽视。

Rabinowicz(1965年)从能量的观点来分析粘着磨损中磨屑的形成。他指出:磨屑的形成条件应是分离前所储存的变形能必须大于分离后新生表面的表面能。据此 Rabinowicz 分析了 Achard 模型中半球形磨屑在塑性变形和形成粘着结点所储存的能量,得出单位体积的储存能量 e 为

$$e = \frac{p_s^2}{2E}$$

这里, p_s 为材料产生塑性变形时的表面压应力, E 为弹性模量。

如果磨屑沿接触圆半径 a 的平面分离,分离后单位面积的表面能为 γ , 则磨屑形成条件为

$$\frac{2}{3} a^3 \frac{p_s^2}{2E} > 2 a^2 \gamma \quad (12-5)$$

由弹性接触理论可知,对于金属材料而言, $p_s = \frac{1}{3} H$, 其中 H 为硬度, 所以得

$$a > \frac{54E\gamma}{H^2} \quad \text{或} \quad a > \frac{KE}{H^2} \quad (12-6)$$

系数 K 应根据磨屑的形状来确定。

事实上,在摩擦过程中表面还存在其他形式的能量,因而磨屑的尺寸在未达式(12-6)之前就已经与表面分离。所以,式(12-6)中的 a 值应当作为磨屑的最大尺寸,即

$$\frac{KE}{H^2} \quad (12-7)$$

12.5 能量磨损理论

Fleisher(1973年)提出能量磨损理论,其依据是摩擦过程中由于能量消耗而产生磨损。能量磨损理论的基本观点是:摩擦过程中所作的功虽然大部分以摩擦热的形式散失,但是其中约9%~16%的部分以势能的形式储存在摩擦材料中。当一定体积的材料积累的能量达到临界数值时,便以磨屑的形式从表面剥落。所以,磨损是能量转化和消耗的过程。

在Fleisher分析过程中,引入了能量密度的概念。它表示材料单位体积内吸收或消耗的能量。假设 E_c 为表面摩擦一次时材料所吸收的能量密度, E_k 为每次摩擦中转化为形成磨屑的能量密度,则

$$E_k = E_c$$

这里系数 η 用以考虑并非全部吸收的能量转化为形成磨屑。

如果经 n 次摩擦才产生磨屑,那么在磨屑产生前的 $(n-1)$ 次摩擦中转化为磨损的全部能量为 $E_k(n-1)$ 。而最后一次摩擦中所吸收的能量 E_c 全部消耗于磨屑脱离表面。所以磨屑形成所需全部能量密度 E_b 为

$$E_b = E_k(n-1) + E_c$$

即

$$E_b = E_c[(n-1) + 1] \quad (12-8)$$

式(12-8)给出的能量密度是根据每次摩擦吸收相同能量的条件得出的,因而是平均的能量密度。实际上各次摩擦中所吸收的能量并不相同。

根据Tross的研究,磨屑的实际断裂能量密度为平均能量密度的 K 倍,且 $K > 1$ 。于是实际的形成磨屑的能量为 $E_b = KE_b$,所以

$$E_c = \frac{E_b}{K[(n-1) + 1]} \quad (12-9)$$

如果令 E_R 为磨损的能量密度,即磨损单位体积所消耗的能量,则

$$E_R = \frac{\text{摩擦功}}{\text{磨损体积}} = \frac{\gamma s}{h}$$

从而得

$$\frac{dh}{ds} = \frac{h}{s} = \frac{\gamma}{E_R} \quad (12-10)$$

式中, γ 为单位面积上的摩擦力; s 为滑动距离; h 为磨损厚度; dh/ds 称为线磨损度。

由于 E_R 是磨损单位体积所需要的能量,而 E_c 是摩擦一次材料单位体

积所吸收的能量,需经过 n 次才形成磨屑,于是

$$E_R = nE_e$$

考虑到接触峰点处产生变形的体积即储存能量的体积 V_d 比被磨掉的体积 V_w 大,若令

$$= \frac{V_w}{V_d}$$

因而可得

$$E_R = \frac{nE_e}{K} \quad (12-11)$$

将式(12-9)代入式(12-11),则得

$$E_R = \frac{nE_b}{K[(n-1)+1]}$$

由于形成磨屑需要很多次摩擦,即 $n \gg 1$, 上式可改写为

$$E_R = \frac{nE_b}{K(n+1)} \quad (12-12)$$

式(12-12)建立了摩擦次数 n 和磨损所需的能量密度 E_R 与形成磨屑的能量密度 E_b 之间的关系。

为了计算线磨损度可将式(12-11)代入式(12-10),这样

$$\frac{dh}{ds} = \frac{v}{nE_e} \quad (12-13)$$

或将式(12-12)代入式(12-10),得

$$\frac{dh}{ds} = \frac{vK(n+1)}{nE_b} \quad (12-14)$$

以上各系数 K , γ 和 β 都与摩擦材料的物理性质和组织结构有关,临界摩擦次数受载荷大小和材料吸收与储存能量能力的影响。此外,摩擦中能量积累能力还取决于储存体积,后者又与接触峰点的微观几何形状有关。

12.6 剥层理论与疲劳磨损理论

12.6.1 剥层磨损理论

通常认为,磨粒磨损和腐蚀磨损的机理比较成熟,而粘着磨损、微动磨损和表面疲劳磨损有许多共同的特征,却还没有一种理论来解释这三种磨损的机理。金属剥层磨损理论是由 Suh(1973年)^[2]提出的。这一理论建立在弹塑性力学分析和实验基础之上,并总结了以往大量的研究成果,因而

是较完整的一种磨损理论,它能够解释许多磨损现象。实践证明,剥层理论促进了对磨损的共同本质更深入的研究。

通过扫描电子显微镜照片分析表明:磨屑形状为薄而长的层状结构,它是由于表层内裂纹生成和扩展的结果。剥层磨损理论是以位错理论以及靠近表面金属的断裂和塑性变形为基础来解释片状磨屑的形成机理。

其基本论点是:当摩擦副相互滑动时,软表面的粗糙峰容易变形,同时在循环载荷作用下软粗糙峰首先断裂,从而形成较光滑的表面。这样,接触状态不再是粗糙峰对粗糙峰,而是硬表面的粗糙峰在相对光滑的软表面上滑动。硬表面粗糙峰在软表面上滑动时,软表面上各点经受一次循环载荷,在表层产生剪切塑性变形并不断积累,这就在金属表层内出现周期的位错。由于映像力(Image force)的作用,距离表面深度约为几十微米的表层位错消失。这样靠近表面的位错密度小于内部的位错密度,即最大的剪切变形发生在一定深度以内。在摩擦过程中,剪切变形不断积累,使表面下一定深度处出现位错堆积,进而导致形成裂纹或空穴。当裂纹在一定深度形成后,根据应力场分析,平行表面的正应力阻止裂纹向深度方向扩展,所以裂纹在一定深度沿平行于表面的方向延伸。当裂纹扩展到临界长度后,在裂纹与表面之间的材料将以片状磨屑的形式剥落下来。

剥层磨损理论能够较完善地说明许多实验观察到的磨损现象。例如,表面层的变形、裂纹的形成与扩展、贝氏(Beilby)层的形成,以及润滑剂、滑动速度和复合载荷对磨损的影响等。

根据剥层磨损理论可以得出简单的磨损计算公式。硬表面对软表面滑动时的总磨损量可以用下式表示

$$Q = k_0 W s \quad (12-15)$$

式中, k_0 为磨损系数; W 为载荷; s 为滑动距离。

片状磨屑厚度 h 可以根据低位错密度区的厚度来确定,即

$$h = \frac{Gb}{4(1-\mu)_j} \quad (12-16)$$

式中, G 为剪切弹性模量; μ 为材料的泊松比; j 为表面摩擦应力; b 称为Burger 矢量。

磨损体积 V 与滑动距离 s 和临界滑动距离 s_0 有关。临界滑动距离是指与空穴和裂纹形成时间和裂纹扩展到临界尺寸的速度有关的滑动距离。磨损体积 V 为

$$V = \frac{s}{s_0} A h$$

片状磨屑的面积 A 与载荷和材料屈服极限有关, 即 $A = \frac{W}{s}$ 。将 A 和 h 代入上式, 则得

$$V = \frac{W_s G b}{4 s_s (1 - \mu)_j} \quad (12-17)$$

若令

$$K = \frac{G b}{4 s_s (1 - \mu)_j}$$

最后得

$$\frac{dV}{ds} = \frac{V}{s} = K \frac{W}{s} \quad (12-18)$$

由此可知: 剥层理论得出的式(12-18)表明: 磨损量与载荷、滑动距离成正比, 而不直接与材料的硬度相关, 这点不同于粘着磨损的计算公式。

12.6.2 疲劳磨损理论

前苏联学者从材料疲劳的角度研究磨损过程,^[3] 提出的固体疲劳磨损理论受到广泛的重视。疲劳磨损理论的基本观点是: (1) 由于表面粗糙度和波纹度的存在, 摩擦副的表面接触是不连续的, 因此摩擦时表面受到周期性载荷的作用; (2) 材料磨损是由于接触峰点的局部变形和应力而产生的表面机械破坏过程; (3) 摩擦表面局部材料的疲劳破坏取决于接触峰点的应力状态。

在磨损过程中, 接触峰点受到很大的周期性变化的应力作用, 当应力循环次数达到一定时产生疲劳裂纹, 进而扩展形成磨屑。表面接触峰点疲劳破坏的形式与接触状态有关。在弹性接触状态下, 达到破坏的应力循环次数通常在千次以上, 而塑性接触的疲劳过程, 达到破坏的应力循环次数可只有十几次, 即低循环次数的疲劳破坏。

表面磨损属于材料疲劳破坏, 必须施加多次反复摩擦作用。引起磨损的摩擦次数可根据接触峰点的破坏形式来决定, 而接触峰点的破坏形式与应力状态有关。这样, 根据摩擦副的载荷和运动状况, 以及表面形貌和材料性质确定接触峰点的应力状态, 进而建立磨损计算的关系式。

等人建立的疲劳磨损理论已由金属和非金属材料的实验所验证, 包括橡胶、聚合物塑料和自润滑材料等。根据这一理论还建立了一些机械零件的磨损计算方法, 但是疲劳磨损理论的计算公式相当复杂, 许多参数也缺乏准确的数据, 应用上存在局限性。

12.7 磨损计算

12.7.1 IBM 磨损计算方法

美国 际商用机器公司 IBM 的 Bayer 等人(1962 年)提出了磨损计算模型,并通过实验方法取得数据,提出了能直接用于预测机械零件磨损寿命的计算方法。

首先将磨损划分为零磨损和可测磨损两类。零磨损的厚度不超过表面原始粗糙度高度,而可测磨损是指厚度超过表面粗糙度的磨损。

通过大量的实验表明:为了保证摩擦副在一定的时间内处于零磨损状态,必须满足以下条件

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_s \quad (12-19)$$

这里, σ_{\max} 为机械零件所受的最大切应力; σ_s 为剪切屈服极限; σ_0 为系数,它与材料、润滑状态和工作期限等有关。

在 IBM 计算方法中以行程次数表示磨损寿命。一个行程表示的滑动距离等于沿滑动方向摩擦副相接触的长度。通常选定行程次数 $N = 2000$ 来确定零磨损系数。此时, σ_0 系数以 σ_0 表示,因为在这段时间以内将能较稳定地显示出磨损的特性。

实验得出:当行程次数 $N = 2000$ 时,对于流体润滑状态 $\sigma_0 = 1$;干摩擦状态 $\sigma_0 = 0.2$;边界润滑时, $\sigma_0 = 0.2$ 或 0.54 ;润滑油中含有活性添加剂时,可采用 $\sigma_0 = 0.54$ 。

参照金属材料疲劳曲线的关系,可以建立保证零磨损条件下行程次数与最大切应力之间的关系式

$$\begin{aligned} \sigma_{\max}^9 N &= (\sigma_0 \sigma_s)^9 \times 2000 \\ \sigma_{\max} &= \frac{2000^{\frac{1}{9}}}{N^{\frac{1}{9}}} \sigma_0 \sigma_s \end{aligned} \quad (12-20)$$

采用式(12-20)预测摩擦副保证零磨损的寿命时,需将工作时间折算成行程次数。式中剪切屈服极限 σ_s 可以由图 12-15 的经验关系曲线来确定。

对于可测磨损,IBM 的科技人员提出的计算模型是:磨损量是每次行程内磨损所消耗的能量和行程次数这两个变量的函数。这种磨损中变量之

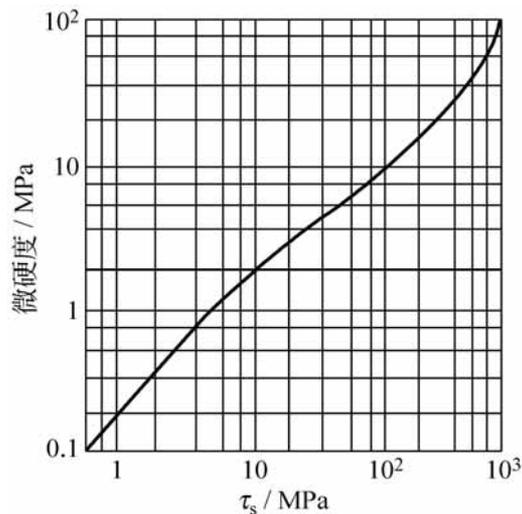


图 12-15 剪切屈服极限

间的关系可用下列微分方程式表示：

$$dQ = \frac{Q}{E} dE + \frac{Q}{N} dN \quad (12-21)$$

式中, Q 为可测磨损量; E 为每次行程中磨损所消耗的能量; N 为行程次数。

可测磨损可以按照两种类型来进行计算：

1. A 型磨损

这种磨损的能量消耗量在磨损过程中维持不变。它主要出现在干摩擦和重载荷条件下的磨损, 或者存在严重的材料转移和擦伤磨损。

对于 A 型磨损, 可以将式 (12-21) 简化为

$$dQ = c dN \quad (12-22)$$

这里, c 为该磨损系统的常数, 其数值通过实验测定。

2. B 型磨损

此种磨损每改变一次行程, 消耗于磨损的能量也随之改变, 它出现在有润滑或者轻载荷条件下的磨损, 通常属于疲劳型的磨损。

对于这种磨损, 式 (12-21) 可写为

$$d \frac{Q}{(s_{\max})^2} = c dN \quad (12-23)$$

这里, s 为每一行程中的滑动距离。

将式 (12-22) 或式 (12-23) 积分后即可求得磨损量与行程次数的关系。

IBM 的科技人员在一系列的文献中介绍了应用零磨损和可测磨损计

算解决实际设计问题的方法。

12.7.2 组合磨损计算方法

^[4] (1957年)提出了相互滑动摩擦副的磨损计算。他把磨损分为表面磨损和组合磨损。表面磨损是摩擦表面在垂直表面方向的尺寸变化,在通常情况下表面磨损厚度分布不均匀。组合磨损是由于互相配合表面在摩擦过程中的磨损所造成两个表面相互位置的变化。显然,组合磨损改变了摩擦副配合性质,进而影响机械零件的工作性能。

组合磨损计算的基本原则就是根据机械零件工作性能确定相配合表面所允许的位置变化量,即组合磨损量,然后由组合磨损量计算机械零件的磨损寿命。

下面扼要地介绍组合磨损计算的要点:

(1) 首先按照实际工况条件确定摩擦副的磨损曲线和相应的磨损率,如图 12-2 所示。通常的磨损计算只考虑图 12-2 中(a)和(b)两种情况。对于正常工作的机械零件而言,稳定磨损所占的时间最长,因此以稳定磨损的时间作为零件的实际磨损寿命。

如前所述,稳定磨损中的磨损率保持不变。若以磨损厚度 h 表示磨损量, t 表示时间,则线磨损率定义为

$$= \frac{dh}{dt} = \tan = \text{常数} \quad (12-24)$$

实验表明,式(12-24)对以磨粒磨损为主的摩擦副是适用的,对于除接触疲劳磨损之外的其他磨损形式也可以近似地采用。

(2) 根据实验方法确定线磨损率与工况参数之间的关系。通常认为磨损率主要取决于表面压力 p 和滑动速度 v ,即

$$= Kp^m v^n \quad (12-25)$$

其中, K 为工况条件系数,与材料、表面品质和润滑状态等因素有关。例如在一般润滑条件下青铜与钢摩擦时,选取青铜 $K=3.35$,钢 $K=0.92$; m 和 n 分别为表面压力和滑动速度对磨损率的影响指数,它们的数值根据工况条件不同将在 $0.6 \sim 1$ 之间变化。

实验证明,磨粒磨损的线磨损度与表面压力成正比,而与滑动速度无关,即

$$\frac{dh}{ds} = Kp$$

于是

$$\frac{dh}{dt} = \frac{dh}{ds} \frac{ds}{dt} = Kpv$$

所以磨粒磨损的指数 $m = n = 1$, 线磨损率可简化写成

$$= Kpv \quad (12-26)$$

(3) 确定组合磨损与两个配合表面磨损量之间的关系。由于摩擦表面的磨损通常以垂直表面的磨损厚度表示, 而组合磨损则以两个配合表面因磨损后的位置变化来度量, 因此必须根据机械零件的几何结构来确定两种磨损之间的关系。

如图 12-16 所示圆锥推力轴承。轴颈 1 和轴承 2 表面的磨损厚度分别为 h_1 和 h_2 , 而磨损以后引起的相对位置变化是轴向位移, 该轴向位移量即是组合磨损量 H 。

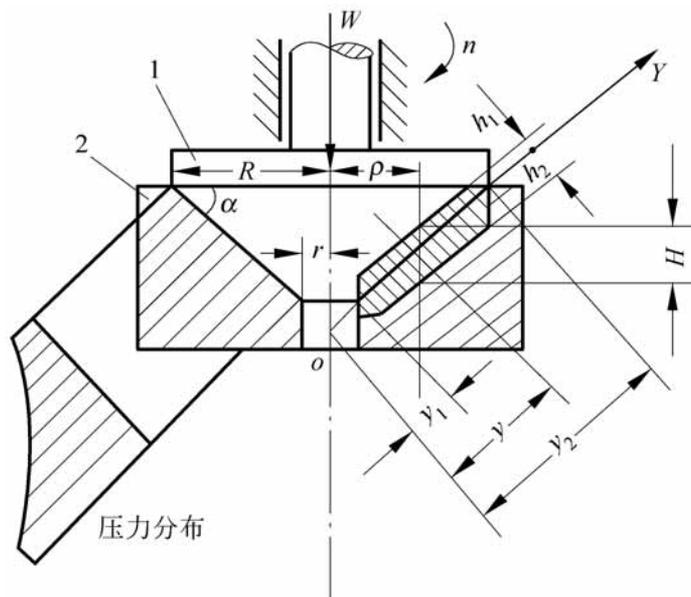


图 12-16 圆锥推力轴承磨损

根据几何形状可以推出表面磨损与组合磨损之间的关系式

$$H = \frac{h_1 + h_2}{\cos \alpha} \quad (12-27)$$

应该指出: 对于轴颈或轴承表面来说, 各处的磨损厚度可能不同, 即表面磨损分布不均匀。然而根据两表面保持接触的条件, 各处的组合磨损量 H 必定相等。

图 12-17 是块式制动器的磨损情况。两个配合表面磨损以后也产生轴向位移, 造成瓦块与圆盘之间的松动, 从而影响制动力矩。此时的组合磨损量 H 与表面磨损量 h_1 和 h_2 的关系式与式(12-27)相同, 不过 的数值随各

点位置而变化。

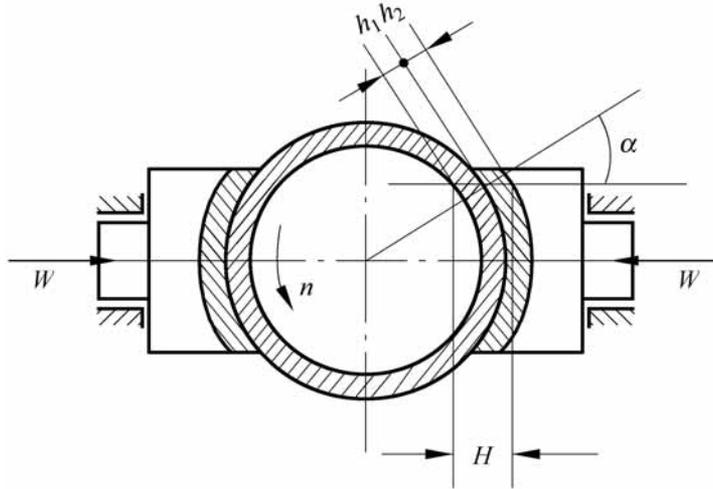


图 12-17 块式制动器磨损

(4) 根据机械零件的工作性能和使用要求, 选定组合磨损的极限数值。例如, 凸轮与挺柱机构的最大组合磨损量应由所允许的最大运动误差来决定; 传动螺旋与螺母之间的组合磨损极限值决定于传动精度或反转空程的大小; 而齿轮传动的组合磨损量应考虑分度精度或限制轮齿冲击载荷和平稳性等因素。

(5) 磨损寿命计算。以图 12-18 所示的平面推力轴承为例说明磨损寿命的计算方法。

在轴向载荷 W 作用下, 轴颈以转速 n 转动。若以磨粒磨损为主要磨损形式, 由式 (12-26) 半径为 r 的任意点处的线磨损率为

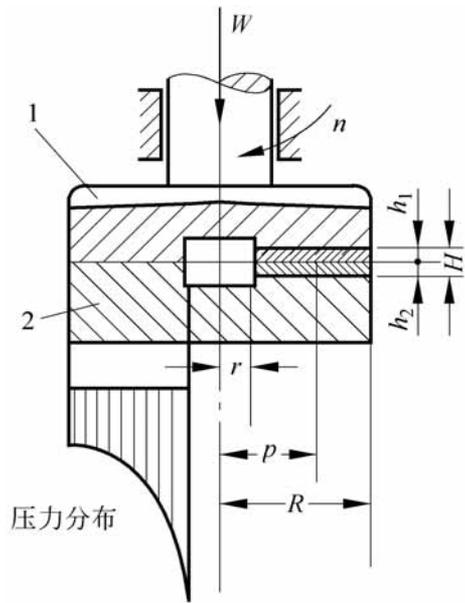


图 12-18 平面推力轴承磨损

$$h_1 = K_1 p \times 2 n$$

$$h_2 = K_2 p \times 2 n$$

由于组合磨损量 $H = h_1 + h_2$, 因而组合磨损率 为

$$= h_1 + h_2 = 2 n (K_1 + K_2) p$$

即

$$p = \frac{1}{2 n (K_1 + K_2)}$$

上式说明:当轴颈旋转时,平面推力轴承的表面压力沿半径方向按双曲线规律分布。

轴承总承载量 W 为

$$W = \int_r^R 2 p d = \frac{2}{n(K_1 + K_2)} \int_r^R \frac{p}{r} d$$

$$= \frac{(R - r)}{n(K_1 + K_2)}$$

所以

$$= \frac{Wn(K_1 + K_2)}{(R - r)}$$

组合磨损量 H 与磨损时间 T 之间的表达式为

$$H = T = \frac{Wn(K_1 + K_2)}{R - r} T \quad (12-28)$$

此外,不难得出轴颈和轴承表面的磨损厚度分别为

$$h_1 = \frac{WnK_1}{R - r} T$$

$$h_2 = \frac{WnK_2}{R - r} T$$

由上式知 h_1 和 h_2 与 r 无关,所以平面推力轴承的表面磨损分布是均匀的。在式(12-28)中,若 H 以极限数值代入,则求得的 T 表示该推力轴承的磨损寿命。

对于图 12-16 所示的圆锥推力轴承,可以采用类似的方法进行分析。由于 μ 为常数,由式(12-27)可以推得

$$= \frac{1 + \mu^2}{\cos \alpha}$$

如图 12-16 所示,选定 oY 为坐标轴,则摩擦表面上任意点的滑动速度为

$$v = 2 r n = 2 r n y \cos \alpha$$

轴颈和轴承表面的线磨损率分别为

$$\dot{h}_1 = 2 K_1 n p y \cos \alpha$$

$$\dot{h}_2 = 2 K_2 n p y \cos \alpha$$

$$= \frac{1 + \mu^2}{\cos \alpha} = 2 n p y (K_1 + K_2)$$

所以

$$p = \frac{1}{2 n (K_1 + K_2) y}$$

由上式可知:圆锥推力轴承的表面压力沿母线方向按双曲线规律分布。为了确定 θ 值,需求得载荷 W 与表面压力 p 之间的关系,即

$$W = \int_{y_1}^{y_2} 2 p \cos \theta dy = 2 \cos^2 \theta \int_{y_1}^{y_2} p y dy$$

其中

$$y_1 = \frac{r}{\cos \theta}, \quad y_2 = \frac{R}{\cos \theta}, \quad \theta = \arccos \frac{r}{y}$$

将 p 代入上式,积分得

$$= \frac{Wn(K_1 + K_2)}{(R - r)\cos \theta}$$

于是组合磨损量与磨损时间的关系式为

$$H = T = \frac{Wn(K_1 + K_2)}{(R - r)\cos \theta} T \quad (12-29)$$

最后,必须强调指出,磨损现象是表面层微观动态过程,而材料的磨损性能不仅与材料固有特性有关,而且主要地表现为摩擦学系统的综合性能,影响因素非常复杂。因此,磨损问题在摩擦学中是理论和实践上都不够完善的领域。据报道^[5],近40年来,发表过300多个对于各种磨损的计算公式,涉及磨损过程有关材料、力学、热物理、化学等参数最基本的有100多个。而这些公式的适用性却有很大限制。显然,对于复杂而多变的磨损要建立统一的量化关系是十分困难的。

参 考 文 献

- [1] 温诗铸. 摩擦学原理. 北京:清华大学出版社,1990
- [2] Suh N P. The delamination theory of wear. Wear, 1973, 25(1):111~124
- [3] 克拉盖尔斯基 等. 摩擦磨损计算原理. 汪一麟等译. 北京:机械工业出版社,1982
- [4] . . . , 1957
- [5] Ludema K C. Mechanism-based modeling of friction and wear. Wear, 1996, (200):1~7

第 13 章

抗磨损设计与表面涂层

随着工业技术的发展,对各种机械装备的表面性能要求越来越高,一些在高速、高温、重载或腐蚀介质下工作的零件,往往因其表面局部损伤最终导致整个设备失效。为此,通过抗磨设计方法以达到提高零件的耐磨性、延长使用寿命的目的,受到工程技术部门的广泛重视。

机械零件抗磨损设计最有效的方法是在摩擦表面之间建立一层润滑膜,包括流体润滑膜、表面吸附膜和化学反应膜等。为此,必须根据摩擦副的工况条件正确地选择润滑油脂,有时还需要选用适当的添加剂以使润滑膜具有特殊性能。抗磨损设计中另一个重要问题是对摩擦副材料的配对、表面强化措施的合理选择。此外,润滑油供应系统的过滤与摩擦表面的密封等也是抗磨损设计的重要环节^[1]。

表面涂层是新发展起来的能有效提高机械零件使用寿命的重要技术。通过堆焊、热喷涂、刷镀及其物理化学方法,使材料表面具有了耐磨损、耐高温、抗腐蚀等特殊性能,从而获得显著的经济效益。

13.1 润滑油脂与添加剂选择

润滑膜应有适当的厚度才能保护摩擦表面达到防止或减轻磨损的目的。实践证明:在多数情况下油膜厚度无需完全覆盖住表面的粗糙峰就可以有效地润滑,而油膜过厚也有不良影响,例如刚性较差。通常利用膜厚比 $= h_{\min}/\lambda$ 作为衡量润滑状态的参数。一般认为, $\lambda > 1.5$ 就可把各种类型的磨损控制在轻微的程度内而获得合理的寿命。还可以进一步地划分:对于较低的速度或较低的表面粗糙度,要求 $\lambda = 0.5 \sim 1$;对于较高的速度或粗糙的表面,则应使 $\lambda > 2$;对于磨合过的表面,取 $\lambda = 0.5 \sim 1$;而对于未磨合的表

面则应取 2;如果是平面或圆柱面接触,要求 大些,例如 $\lambda = 2 \sim 5$,甚至更大,以补偿表面的波纹度和形状误差;在载荷不稳定的情况下,也应提高值。

13.1.1 润滑油的选择

润滑油的选择应当根据使用条件对润滑油的主要特性进行综合分析,表 13-1 列出基础油的各种特性。

表 13-1 选择各种基础油时考虑的特性

| 基 油 特 性 | 二元酸 酯油 | 新茂基 多元醇 酯(复 合酯) | 典型磷 酸酯 | 典型聚 甲基硅 油 | 典型苯 基甲基 硅油 | 氯化苯 基甲基 硅油 | 聚乙二 醇(防腐 蚀的) | 聚苯醚 | 矿物油 |
|------------------|-----------|--------------------------|-----------|-----------------|------------------|------------------|--------------------|------|--------------|
| 无氧最高 温度/ | 250 | 300 | 120 | 220 | 320 | 305 | 200 | 450 | 200 |
| 有氧最高 温度/ | 210 | 240 | 120 | 180 | 250 | 230 | 200 | 320 | 150 |
| 最低 温度/ | - 35 | - 65 | - 55 | - 50 | - 30 | - 65 | - 20 | 0 | - 50 ~ 0 |
| 密度/ g/cm^3 | 0.91 | 1.01 | 1.12 | 0.97 | 1.06 | 1.04 | 1.02 | 1.19 | 0.88 |
| 粘度指数 | 145 | 140 | 0 | 200 | 175 | 195 | 160 | - 60 | 0 ~ 140 |
| 闪点/ | 230 | 250 | 200 | 310 | 290 | 270 | 180 | 275 | 150 ~ 200 |
| 自燃发火点 | 低 | 中 | 很高 | 高 | 高 | 很高 | 中 | 高 | 低 |
| 边界润滑性 | 好 | 好 | 很好 | 尚好 | 尚好 | 好 | 很好 | 尚好 | 好 |
| 毒性 | 微 | 微 | 有一些 | 无 | 无 | 无 | 低 | 低 | 微 |
| 相对价格 | 5 | 10 | 10 | 25 | 50 | 60 | 5 | 250 | 1 |

对润滑油的一般要求如下：

1. 粘度、粘度指数及粘压系数

适当的粘度可以保证达到油膜厚度的要求,但粘度值太高则摩擦阻力增加并引起发热。粘度值受温度影响很大,当工作温度和环境温度变化较大时,除润滑油粘度之外,还需要选择合适的粘度指数,它是衡量润滑油热稳定性的重要指标,粘度指数越高即温度影响越小。如果粘度低或粘温特性不够好,可以加入增粘添加剂加以改进。常用的增粘剂有:聚乙烯基正丁基醚、聚甲基丙烯酸酯和聚异丁烯等。这些高分子聚合物不仅可以使油的粘度增大,而且其分子链能随温度改变形态。低温时卷曲成小球状,增粘作用小,而高温时舒展成线状,增粘作用加强,从而改善粘温特性。如前所述,润滑油的粘压系数对于弹流润滑的油膜厚度有显著的影响。

2. 稳定性

在润滑油使用过程中,由于氧化变质会丧失润滑性能,大大降低工作寿命。因此润滑油需要有较好的稳定性。图 13-1 给出了几种常用合成油的使用温度界限,如超出允许温度上限,则会加速氧化。

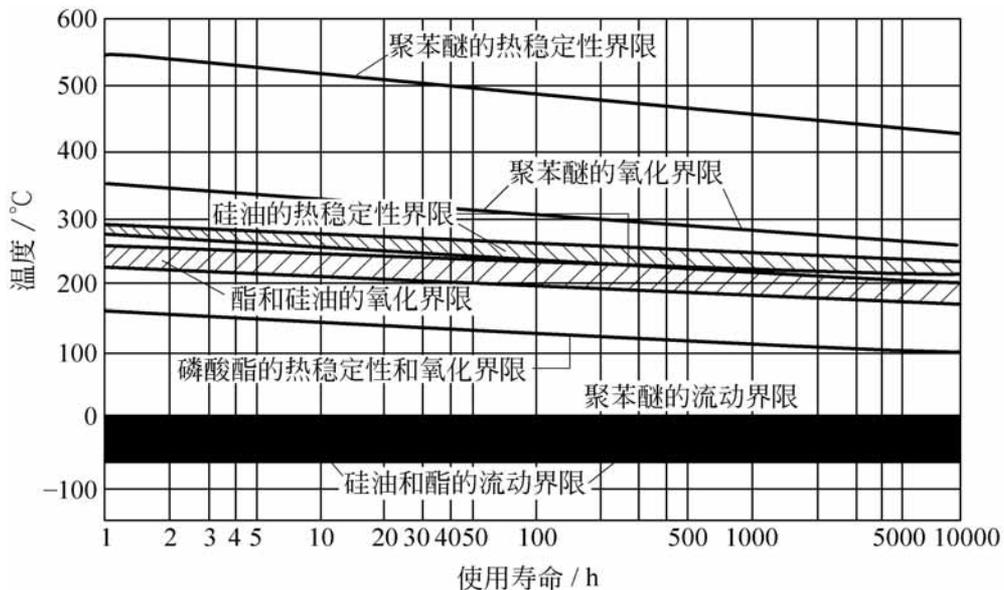


图 13-1 部分合成油的使用温度界限

常用的抗氧化添加剂有:二烷基二硫磷酸盐对羟基二苯胺、2,6-二叔丁基对甲酚二苯胺。它们在金属表层形成的保护膜既可防止锈蚀,又可阻止金属对润滑油氧化所起的触媒作用,因而降低氧化速度。

3. 其他要求

对润滑油的要求还需要考虑其他功能,如冷却、密封、防蚀、排屑、防火安全性以及与环境的相容性等。表 13-2 列出一些选取润滑油基本原则。

表 13-2 润滑油选取的基本原则

| 工作条件 | 润滑油特性 |
|-------------|--|
| 重载 | 应选用粘度较高的油 |
| 高速 | 润滑油的动压效应强,但发热量大,应选用粘度较低油,并采用循环供油系统 |
| 变速、变载、变向 | 润滑油的粘度增高 25% 左右 |
| 精密机床和液压系统 | 粘度可低,以避免发热 |
| 温升大 | 选用粘度高、抗氧化性能好的矿物油或合成油 |
| 温度变化较大 | 选用粘度指数高的油 |
| 低温 | 润滑油凝点应低于最低工作温度 50 |
| 磨损严重 | 应增加油的粘度,并加入抗磨或油性添加剂 |
| 磨屑多 | 应增加润滑油用量并在循环系统中设置过滤装置,必要时还应使用清净添加剂或分散添加剂 |
| 使用寿命长 | 粘度较高、抗氧化性能较好的润滑油 |
| 配合间隙大或表面较粗糙 | 选用粘度较高的润滑油 |
| 有燃烧危险处 | 使用防火性能好的合成润滑剂或采用水剂润滑。加入抗磨或极压添加剂可改善其润滑性 |

其他注意事项有:

- (1) 易氧化处及循环润滑系统不宜掺用动物油或植物油;
- (2) 汽油机油与柴油机油不宜用于潮湿处;
- (3) 变压器油不宜作润滑油用;
- (4) 内燃机等高温机械不宜用汽轮机油和液压油;
- (5) 当工作温度低或要求粘度较低时,可与煤油掺和使用,但煤油量不宜超过 50%;
- (6) 煤油不宜用于精密机械。

13.1.2 润滑脂的选择

1. 润滑脂的组成

润滑脂俗称黄油或干油,由润滑油加入稠化剂在高温下混合而成。在润滑脂中,润滑油是主要成分占总质量的 75% ~ 85%,稠化剂占 10% ~ 20%,还有 0.5% ~ 5% 添加剂。润滑油决定了润滑脂的润滑性能、低温性能和抗氧化安定性。高速轻载用的润滑脂须用粘度较低的润滑油,低温用的润滑脂须用低凝点的矿物油。

2. 稠化剂的作用

稠化剂的作用是减少润滑油的流动性,同时,增强密封性、耐压性、缓冲性等。润滑脂的耐温性、耐水性和软硬程度主要决定于稠化剂的品种和含量。例如,用钙皂作稠化剂的润滑脂耐水不耐温,而钠皂稠化剂耐温不耐水。润滑脂的分类按所用的稠化剂种类来划分,如钙基脂、钠基脂等。

3. 润滑脂添加剂

添加剂在润滑脂中的作用与在润滑油中相似,如添加石墨和 MoS_2 可提高润滑脂的抗磨耐压性能,添加胺基化合物可提高其抗氧化安定性。

13.1.3 固体润滑剂

固体润滑剂是指一些低剪切强度的固体,例如软金属、软金属化合物、无机物、有机物和自润滑复合材料。它们的特点是耐热、化学稳定性好、耐高压、不挥发、不污染,因此特别适用于不能密封和供油的系统中。对某些用常规润滑方式难以解决问题的场合,如原子能工业、塑料工业、火箭、人造卫星等领域具有特殊的意义。其缺点是通常润滑表面磨损比油润滑高。由于不能有效地带走热量,因而可能导致胶合。常用的固体润滑剂的特性见表 13-3。

图 13-2 给出了各种固体润滑剂的使用范围的大致界限,可供设计时参考。

表 13-3 常用固体润滑剂的特性

| 润滑剂种类 | 温度界限/ | 典型摩擦系数 | 使用方式 |
|------------|-----------|--------|---------------|
| 1. 层状固体 | | | |
| 二硫化钼 | 350(在空气中) | 0.1 | 粉末、粘结膜、阴极真空喷涂 |
| 石墨 | 500(在空气中) | 0.2 | 粉末 |
| 二硫化钨 | 440(在空气中) | 0.1 | 粉末 |
| 氟化钙 | 1000 | | 熔融涂敷 |
| 氟化石墨 | | 0.1 | 擦抹或阴极真空镀膜 |
| 滑石 | | 0.1 | 粉末 |
| 2. 热性料 | | | |
| 聚四氟乙烯(未填充) | 280 | 0.1 | 粉末、固体块、粘结膜 |
| 尼龙 66 | 100 | 0.25 | 固体块 |
| 聚酰亚胺 | 260 | 0.5 | 固体块 |
| 乙缩醛 | 175 | 0.2 | 固体块 |
| 聚苯撑硫(填充) | 230 | 0.1 | 固体块或涂敷 |
| 聚氨基甲酸酯 | 100 | 0.2 | 固体块 |
| 聚四氟乙烯(填充) | 300 | 0.1 | 固体块 |
| 尼龙头 66(填充) | 200 | 0.25 | 固体块 |
| 3. 其他 | | | |
| 三氧化铝 | 800 | | 粉末 |
| 酞菁 | 380 | | 粉末 |
| 铅 | 200 | | 擦抹或阴极真空镀膜 |

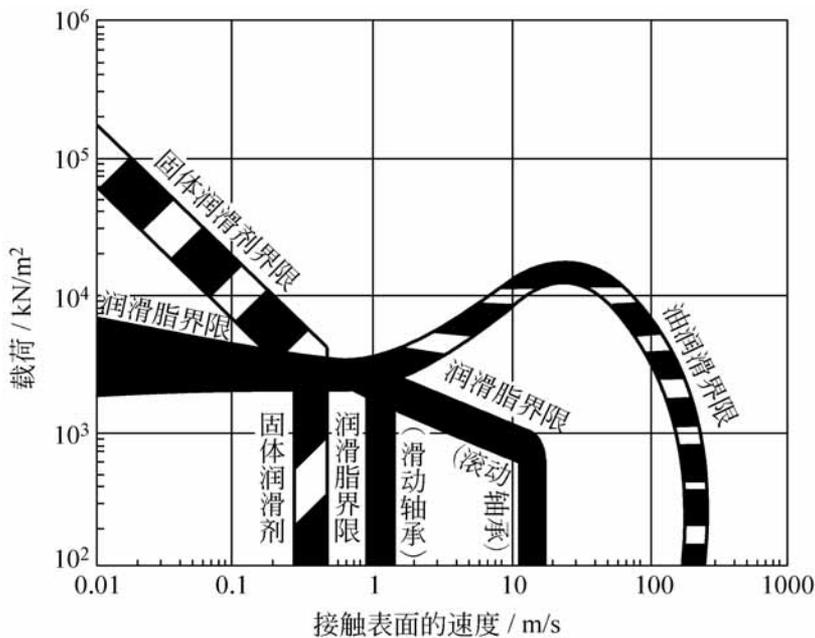


图 13-2 润滑剂的使用范围

13.1.4 过滤与密封

机 系统中相对运动部件需要通入润滑剂或冷却剂,而这些润滑剂和冷却剂经常被外来尘土所污染,加剧表面磨损。实践表明,润滑剂清洁与否,能够使摩擦副寿命相差达 10 倍。因此,要求对进入摩擦表面间的润滑剂和冷却剂进行过滤和密封,以清除有害的颗粒,是抗磨设计的措施之一。

润滑剂中的颗粒主要有硬颗粒和软颗粒。硬颗粒易导致摩擦副过早磨损和油孔梗阻。

润滑剂中颗粒造成表面磨损的机理可以分为三类:

(1) 硬颗粒嵌在摩擦表面上,对对磨表面起切削作用造成磨粒磨损,其磨损的严重程度与颗粒的数目及硬度成正比。

(2) 摩擦面间的硬颗粒在摩擦过程中不断进行辗、划、挤压,使表面产生局部塑性变形和原子位错,最终导致表面的疲劳磨损。

(3) 硬颗粒的辗、划、压挤作用,还可以在表面上挤出高垄来。这些高垄在以后的摩擦过程中将导致金属的直接接触以及发展为粘着磨损。

润滑剂中的颗粒类型与来源如表 13-4 给 。

表 13-4 润滑剂中的颗粒及其来源

| 颗粒类型 | 来源 |
|----------------------------|-------------------------------|
| 金属颗粒 | 加工、装配、铸造以及磨损的产物等,尤其在新装配的部件中多见 |
| 金属的氧化物(如氧化铝)、金属盐(如氯化物或硫化物) | 摩擦表面或悬浮着的金属颗粒经过腐蚀以后的生成物 |
| 油泥状沉积物 | 润滑油受热老化、油中混入了水与盐以后产生的沉淀物 |
| 橡胶颗粒 | 密封圈、挠性管、衬垫等磨损的产物 |
| 纤维 | 棉花(棉线)、过滤器滤芯上脱落下来的产物 |
| 无机晶粒(如沙粒) | 运转过程或维修过程中由周围环境进入 |

13.2 摩擦副材料选配原则

摩擦副材料的耐磨性是重要的选材依据。耐磨性是材料的硬度、韧性、互溶性、耐热性、耐蚀性等的综合性质。不同类型的磨损,由于其磨损机理不同,可能侧重要求上述性质中的某一方面或两方面。此外,还要注意摩擦副材料配偶表面的匹配性,有时硬配硬好如滚动轴承,有时硬配软耐磨如滑动轴承,有时还不得不特意让磨损限制在某一零件如活塞环上而保证配偶零件如缸套的耐磨性。下面按不同磨损类型对材料选配加以介绍。

13.2.1 磨粒磨损的摩擦副材料的选配

如前所述,对于磨粒磨损,纯金属和未经热处理的钢的耐磨性与自然硬度成正比。靠热处理提高硬度时,其耐磨性提高不如同样硬度的退火钢。对淬硬钢来说,硬度相同时,含碳量高的牌号耐磨性优于含碳量低的。

耐磨性与金属的显微组织有关。马氏体耐磨性优于珠光体,珠光体优于铁素体。对珠光体的形态,片状的比球状的耐磨,细片的比粗片的耐磨。回火马氏体常常比不回火的耐磨是因为未回火的微组织硬而脆。

对于同样硬度的钢,含合金碳化物比普通渗碳体耐磨,碳化物的元素原子越多就越耐磨。钢中所加合金元素若越容易形成碳化物则越能提高耐磨性,例如 Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, W, Mo 等元素优于 Cr, Mn 等元素。

对于由固体颗粒的冲击所造成的磨粒磨损来说,需要正确的硬度和韧性相配。对于小冲击角即冲击速度方向与表面接近平行的情况,例如犁铧、运输矿砂的槽板等,如图 13-3。在硬度和韧性的配合中更偏重于高硬度,可用淬硬钢、陶瓷、铸石、碳化钨等以防切削性磨损;对于大冲击角的情况,则应保证适当的韧性,可用橡胶、奥氏体高锰钢、塑料等,否则碰撞的动能易使材料表面产生裂纹而剥落;对于高应力冲击,如图 13-4 所示的破碎机碾子、球磨机滚筒、钢轨等,可用塑性良好且在高冲击应力下能变形硬化的奥氏体高锰钢。

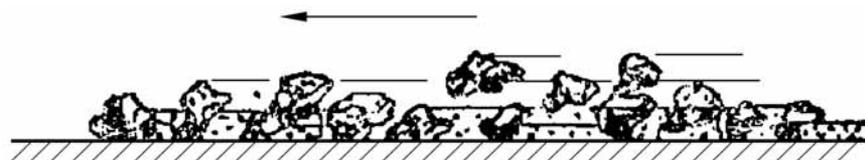


图 13-3 小冲击角磨粒磨损

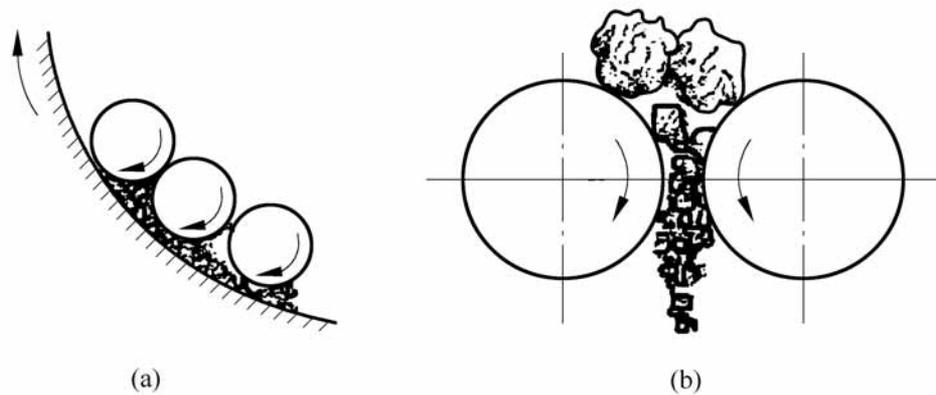


图 13-4 高应力冲击条件下的磨粒磨损

对于三体磨损来说,一般是提高摩擦表面的硬度,当表面硬度约为 1.4 倍颗粒硬度时耐磨效果最好,再高则无效。三体磨损的颗粒粒度对磨损率也有影响。实验表明,当粒度小于 $100\mu\text{m}$ 时,越小则表面磨损率越低。粒度大于 $100\mu\text{m}$ 时,粒度与磨损率无关。

13.2.2 粘着磨损的摩擦副材料的选配

前已述及,粘着现象常常是因摩擦热引起材料的再结晶、扩散加速或表面软化开始。甚至由于接触区的局部高压、高温而导致表面熔化。因此粘着磨损与表面材料匹配密切相关。对于材料的匹配有以下规律:

固态互溶性低的两种材料不易粘着。一般说来,晶格类型相近、晶格常数相近的材料互溶性较大,最典型的例据是相同材料很容易粘着。

两种材料形成金属间化合物,也较少粘着效应,因金属间化合物具有脆弱的共价键。塑性材料往往比脆性材料易发生粘着现象,且塑性材料形成的粘着结点强度常大于母体金属,因而撕裂常发生于次表层,产生的磨粒较大。

材料熔点、再结晶温度、临界回火温度越高,或表面能越低,越不易粘着。从金相结构上看,多相结构比单相结构粘着效应低,例如珠光体就比铁素体或奥氏体粘着效应差。金属中化合物相比单相固溶体粘着效应低,六方晶体结构优于立方晶体结构。金属与非金属如碳化物、陶瓷、聚合物等的配对比金属与金属的配对抗粘着能力高,聚四氟乙烯(PTFE)与钢配对抗粘着能力很高,而且摩擦系数低,表面温度低,耐热的热固性塑料较热塑性塑料为好。

其他条件相似的情况下,提高硬度则表面不易塑性变形因而不易粘着。

对于钢来说,700HV(或 70 HRC)以上可避免粘着磨损。

13.2.3 接触疲劳磨损的摩擦副材料的选配

接触疲劳磨损是由于循环应力使表面或表层内裂纹萌生和扩展的过程。由于硬度与抗疲劳磨损能力大体上呈正比关系,一般说来,设法提高表面层的硬度有利于抗接触疲劳磨损。

表面硬度过高,则材料太脆,抗接触疲劳磨损能力也会下降。如图 13-5 所示,轴承钢硬度 62HRC 时抗接触疲劳磨损的能力最高,如果进一步提高硬度,反而会降低平均寿命。

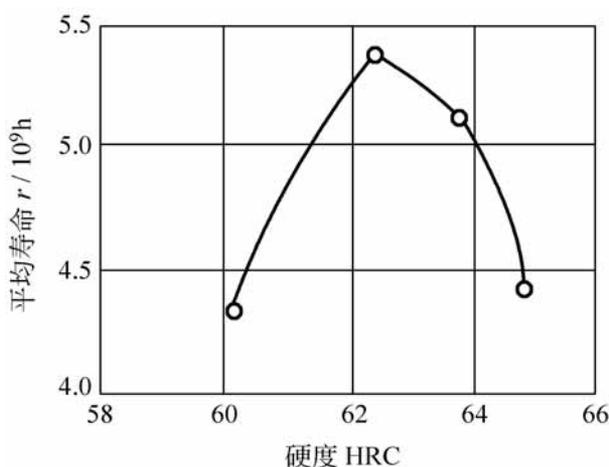


图 13-5 疲劳磨损寿命与硬度的关系

对于高副接触的摩擦副,配对材料的硬度差 50 ~ 70HBS 时,两表面易于磨合和服贴,有利于抗接触疲劳。

为控制初始裂纹和非金属夹杂物,应严格控制材料冶炼和轧制过程。因此轴承钢常采用电炉冶炼,甚至真空重熔、电渣重熔等技术。

灰口铸铁虽然硬度低于中碳钢,但由于石墨片不定向,而且摩擦系数低,所以有较好的抗接触疲劳性;合金铸铁、冷激铸铁,抗接触疲劳能力更好;陶瓷材料通常具有高硬度和良好的抗接触疲劳能力,而且高温性能好,但多数不耐冲击,性脆。

13.2.4 微动磨损的摩擦副材料的选配

由于微动磨损是粘着磨损、氧化磨损和磨粒磨损等的复合形式,一般说来,适于抗粘着磨损的材料配对也适于抗微动磨损。实际上,能在微动磨损整个过程的任何一个环节起抑制作用的材料配对都是可取的,例如,抗氧化磨损或抗磨粒磨损良好的材料都能改善抗微动磨损能力。

13.2.5 腐蚀磨损的摩擦副材料的选配

应选择耐腐蚀性好的材料,尤其是在表面形成的氧化膜能与基体结合牢固,氧化膜韧性好,而且是致密的材料,具有优越的抗腐蚀磨损能力。

13.2.6 表面强化

表面强化处理是在选用通用材料的基础上,用工艺手段使材料表面改性,提高耐摩擦副的磨损性能。常用的强化处理有三类:机械加工、扩散处理和表层覆盖。

(1) 机械加工强化是不改变表面的化学成分,通过加工过程改变材料表面的组织结构、力学性能或几何形貌来达到强化目的。

(2) 扩散处理强化是依靠渗入或注入某些元素的办法改变表面的化学成分,或同时附加热处理的手段,使表面得以强化。例如各种化学处理和化学热处理。

(3) 表面涂覆的特点是直接在材料表面进行镀、涂或用物理、化学方法覆盖上一层强化表面层。覆盖层分硬涂层和软涂层两种,硬涂层经常是镀铝、堆焊以及喷涂碳化物与陶瓷等,软涂层则常常是针对粘着磨损的,目的是降低摩擦系数和提高耐温性等。软涂层包括涂覆铜、钨、金、银等软金属,也包括涂覆 PTFE 和 MoS_2 等固体润滑剂。

表面强化效果评定可以用 f/f_0 , k/k_0 , F/F_0 参数来表示。这里, f_0 与 f 分别代表强化处理前后材料的摩擦系数; k_0 与 k 分别代表处理前后的耐磨性指标(例如疲劳负荷); F_0 与 F 则分别代表强化处理前后的胶合负荷。表 13-5 给出了化学热处理强化效果的评价数据。

表 13-5 常用化学热处理的强化效果

| 化学热处理名称 | 推荐材料 | f/f_0 | k/k_0 | F/F_0 |
|---------|-------------|-----------|---------|-----------|
| 渗碳 | 碳素钢和合金钢 | 0.8 ~ 1.0 | 2 ~ 3 | 1.0 ~ 1.5 |
| 氮化 | 合金钢 | 0.8 ~ 1.0 | 2 ~ 4 | 1.0 ~ 1.5 |
| 碳氮共渗 | 碳素调质钢、合金钢 | 0.7 ~ 0.8 | 2 ~ 5 | 1.5 ~ 2.0 |
| 氰化 | 碳素调质钢、合金钢 | 0.7 ~ 0.8 | 2 ~ 5 | 1.5 ~ 2.0 |
| 渗硼 | 中碳钢、合金钢 | - | 2 ~ 5 | - |
| 硫氰共渗 | 碳素钢、合金钢和不锈钢 | 0.5 ~ 0.6 | 2 ~ 5 | 4 ~ 5 |
| 渗硫 | 碳素钢和铸铁 | 0.4 ~ 0.5 | 1.5 ~ 3 | 5 ~ 10 |
| 碘-镉浴处理 | 钛合金 | 0.5 ~ 0.6 | - | 5 ~ 10 |

13.3 表面涂层

表面涂层是在固体表面涂覆一层或多层不同材料的薄膜来达到强化表面或使表面具有特殊功能的目的。因各种涂层的制备技术不同而性能各异,各种涂层只在特定的范围内使用才能取得良好的效果,因此了解表面涂层的类型、性能和设计准则才能有效地发挥各种涂层优势达到工程应用的目的。下面对常用的表面涂层的主要方法、类型、特性和用途等加以介绍^[2]。

13.3.1 常用的表面涂层方法

1. 堆焊

堆焊是利用焊接的方法使零件的表面覆盖一层具有一定耐磨、耐热或耐蚀的金属。堆焊的冶金过程和热物理过程基本上与一般的焊接工艺相同,但是其主要目的是获得特殊性能的表面,因此它并不完全等同于焊接。

常用的堆焊方法有:普通堆焊、电弧堆焊、埋弧堆焊、等离子堆焊和二氧化碳气体保护自动堆焊等,如图 13-6 所示。

普通堆焊是采用氧-乙炔作为热源,火焰温度较低,一般可以得到小于 1mm 的均匀堆焊层。适用于较小的零件表面。

电弧堆焊生产效率较高,但是由于电弧区保护作用差,有时表面容易形成气孔或产生裂纹。通过向保护区喷射水蒸气、二氧化碳等可以起到保护作用,而提高堆焊层的质量。

等离子弧堆焊由于其温度很高,因此可以堆焊难熔材料。另外,它还具有很高的堆焊速度和熔敷率以及很低的稀释率,因此得到了较广泛的应用。

2. 热喷涂

热喷涂是将熔融或半熔融的材料微粒或粉末以很高的速度喷涂到基体的表面,从而获得所需的表面涂层。热喷涂具有许多优点,如基体材料和零件的形状尺寸一般不受限制、涂层的种类多、基体材料在喷涂过程中不变化、涂层的厚度变化范围较大等。

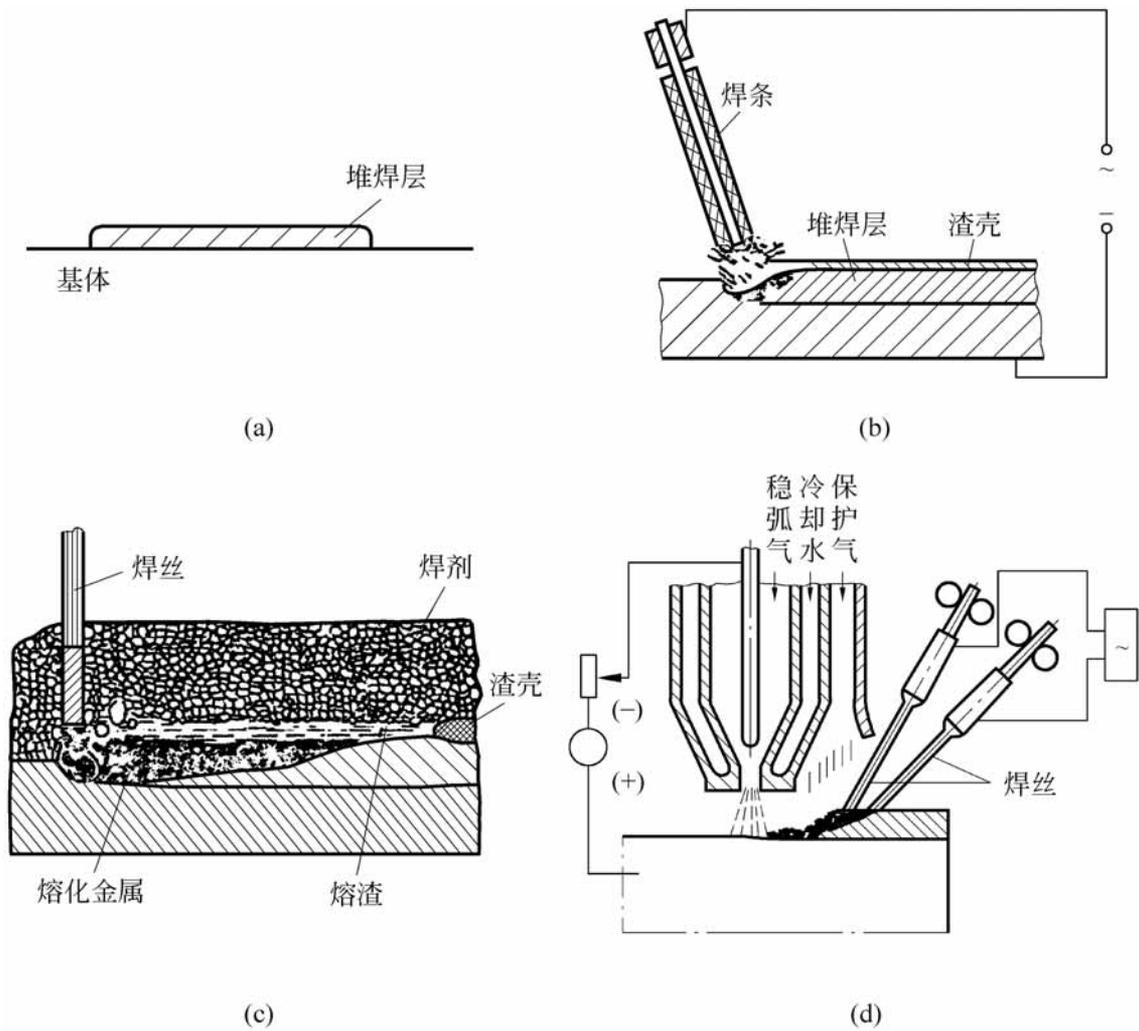


图 13-6 堆焊方法

(a) 普通堆焊; (b) 电弧堆焊; (c) 埋弧堆焊; (d) 等离子堆焊

热喷涂材料可以是金属、合金、金属化合物、陶瓷、塑料、玻璃和复合材料等,在表 13-6 中给出了热喷涂材料的类型和特性。

热喷涂方法主要有:

(1) 火焰喷涂 利用气体与氧化燃烧释放的能量熔化涂层材料,并通过压缩气体将熔化的金属微粒喷射到基材表面,沉积后获得涂层。

(2) 电弧喷涂 利用电弧热和放电能量熔化涂层材料,并通过压缩气体将熔化的金属微粒喷射到基材表面,经沉积形成涂层。

(3) 等离子喷涂 利用等离子焰将喷涂粉末加热至熔融或半熔融状态,并在等离子焰作用下喷射至基材表面形成涂层。

此外,还有气体爆炸喷涂法、高能密度气体喷涂法、激光喷涂法、水稳等离子喷涂法等。

表 13-6 热喷涂材料及特性

| 热喷涂材料 | 材料类型 | 特性 |
|-----------------|---|---|
| 金属线材 | Zn、Al、Zn-Al 合金、Cu 及其合金、Ni 及其合金、Pb 及其合金、Mo 及其合金、碳钢及不锈钢等 | 应用广泛,具有耐磨、耐蚀、耐热等特性 |
| 合金粉末、自熔性粉末及复合粉末 | Ni 基、Fe 基和 Cu 基合金粉末及 Ni-B-Si、Ni-Cr-B-Si、Ni-Cr-B-Si-Mo 和 Co-Cr-W 自熔性合金以及复合粉末 | 具有良好的喷涂和喷熔、耐磨和耐腐蚀性 |
| 耐热合金材料 | Ni/ Cr、Ni/ Al、Ni-Cr/ Al + MCrAlX (其中 M 可以是 Ni、Co、Fe、Ti、V、Zr、Ta、Ni-Co、Ni-Fe 等, X 可以是 Y、Hf、Sc、Ce、La、Th、Si、Ti、Zr、Ta、Pt、Rh、C、Y ₂ O ₃ 、Al ₂ O ₃ 、ThO ₂ 等) | 在高温下具有较好的蠕变强度、高温韧性和良好的耐腐蚀、耐磨、抗疲劳、抗冲击等特性 |
| 陶瓷 | Cr ₂ O ₃ 、Al ₂ O ₃ 、ZrSiO ₄ 、ZrO ₂ 、Al ₂ O ₃ -TiO ₂ 等 | 具有耐磨、耐腐蚀、耐热、耐高温氧化、绝缘、绝热等性能 |
| 塑料 | 聚乙烯、尼龙、EVA 树脂、环氧树脂 + TiO ₂ 、CaCO ₃ 、SiO ₂ 等 | 耐蚀 |

3. 浆液涂层

浆液涂层是把固液混合物以浆液的形式涂覆于固体表面,然后在一定的条件下固化而形成涂层。浆液涂层的优点是在较低温度下成膜。在较低的处理温度下,浆液中的陶瓷或金属颗粒一般不会发生冶金化结合,而是通过化学反应本身或通过化学反应原位形成的粘结剂相互结合。粘结剂的形成和性能对涂层性能至关重要。因此,浆液中的添加物质的选择和加入量需要严格控制,根据基体材料和所需涂层的性能来确定。

根据成膜的方法不同,浆液涂层有以下几种:

1) 料浆涂层

将含有粘结剂、固体颗粒和液体载体的浆液以刷涂或喷涂方式施于基体表面,先在较低的温度下烘干,在烘干过程中粘结剂部分或完全挥发。随后在更高的温度下烧结,从而形成所需要的表面涂层。烧结过程可以是在常压,但更多情况下是在真空或惰性气体的环境中进行。这种方法所制备的涂层,一般是以耐高温为目的,其基体材料通常为耐热合金。

2) 胶粘涂层

胶粘涂层(或冷敷涂层)可以分为有机和无机胶粘涂层两类。前者是将作为胶粘剂的树脂、固化剂、固体粉末填料等按比例混和制成具有一定粘度的浆液,然后涂覆于所要处理的基体表面,固化后形成所需的涂层。根据胶粘剂不同,固化可以是在室温也可以在一定的温度下进行。添加不同的固体填料可以获得诸如耐磨、减摩、防腐蚀等不同的涂层性能,涂层与基体材料的结合通常为简单的机械结合。目前,这种涂层大多适应于低应力磨损或稍高于常温的工作条件,如机床导轨无磨料滑动磨损、冲蚀磨损、气蚀磨损以及腐蚀磨损等。根据资料介绍,只要涂层与基体结合牢固,则涂层寿命一般会比普通金属材料提高 7~10 倍以上。

3) 热化学反应浆液涂层

热化学反应浆液涂层是通过浆液中所含化合物就地转化而获得,涂层与基体之间是依靠化学键结合。热化学反应浆液涂层的主要优点在于,这种方法可以在相对较低的温度和相对简单的条件下获得与基体结合良好的表面涂层,处理温度一般为 316~538 。

4) 基于铬元素价态转化的热化学反应浆液涂层

将含有可溶性铬化合物、固体颗粒及其他添加物质的浆液反复涂覆在金属基体表面,然后在一定的温度下进行加热处理,铬化合物受热时发生价态转变,同时在加热过程中,浆液中的某些成分通过一定的化学反应,在基体表面就地转化为所需的物质。

邵天敏^[3]等应用基于铬元素价态转化的热化学反应浆液涂层方法在较低的温度(190~200),并以较少的涂覆次数(3次)在铝、铝合金以及铁合金的基体上制备出具有一定的耐磨和耐腐蚀性能的 Cr_2O_3 基陶瓷涂层。他们的实验表明:涂层表面的微观硬度可达 400~800HV。选择合适的浆液配方所制备的涂层在常温下具有良好的摩擦学性能,而且可以在 400 以上的环境温度中正常工作。

4. 电刷镀

电刷镀技术是通过与直流电源阳极相接的镀刷和与负极相接的工件来形成涂层。镀刷常采用高纯细石墨块作阳极材料,石墨块外面包裹上棉花和耐磨的涤棉套。在进行电刷镀时,将浸满镀液的镀刷在适当的压力下与工件表面上作相对运动。由于电场的作用,镀液中的金属离子经镀刷与工件接触的部位扩散到工件表面。再从表面获取电子后还原成金属原子,这

些金属原子沉积结 就形成了镀层。

一般认为,电刷镀镀层金属与基体金属的结合机理包括机械结合、物理结合和电化学结合的重作用。机械结合是利用基材表面不平整而造成的镶嵌作用;物理结合则是物质之间互相接触而产生电子相互交换的过程;电化学结合是电解液中无数的金属离子经过电化学作用还原为金属原子,继而形成金属镀层与基材牢固地结合。

由于镀层金属与基材金属一般都是不同化学成分的固体,在它们的界面上每个镀层原子都与一些基体原子按照规律组成一定形式的晶格。这些原子并非简单堆砌在一起,而是随原子电子的得失存在着强烈的相互作用。金属键合的强度决定于两种界面的晶体结构和晶面性质,而镀层结合强度主要取决于键合的强度。因此,在镀层与基体的结合强度上,主要是电化学结合的作用,其次是机械结合和物理结合。

电刷镀技术的基本原理与普通电镀相似,但它也有其自身特点。电刷镀设备多为便携式,因而体积小、质量轻,用电、用水量少。电刷镀溶液大多数是金属有机络合物水溶液,络合物在水中有相当大的溶解度,并且有很好的稳定性,镀液中金属离子的含量高,性能稳定,能在较宽的电流密度和温度范围内使用,且不易燃、无毒、腐蚀性小。

表 13-7 给出了常用的电刷镀溶液的种类。

表 13-7 常用的电刷镀溶液及其成分

| 名称 | 类型 | 主要成分 |
|-----|-------|---|
| 电净液 | 表面处理液 | 氢氧化钠、磷酸三钠、镓酸钠、氯化钠等 |
| 活化液 | | 铬活化液、银汞活化液 |
| 纯化液 | | 锌纯化液、银纯化液 |
| 退镀液 | | 镍、铜、锌、钢、铬、铜镍铬、钴铁、焊锡、铅锡 |
| Ni类 | 单金属溶液 | 特殊镍、快速镍、半光亮镍、致密快镍、酸性镍、中性镍、碱性镍、低应力镍、高温镍、高堆积镍、高平整半光亮镍、轴镍、黑镍 |
| Cu类 | | 高速铜、酸性铜、碱铜、合金铜、高堆积铜、半光亮铜 |
| Fe类 | | 半光亮中性铁、半光亮碱性铁、酸性铁 |
| Co类 | | 碱性钴、半光亮中性钴、酸性钴 |
| Sn类 | | 碱性锡、中性锡、酸性锡 |

续表

| 名称 | 类型 | 主要成分 |
|------|-------|--|
| Pb 类 | 单金属溶液 | 碱性铅、酸性铅、合金铅 |
| Cd 类 | | 低氢脆镉、碱性镉、酸性镉、弱酸镉 |
| Zn 类 | | 碱性锌、酸性锌 |
| Cr 类 | | 中性铬、酸性铬 |
| Au 类 | | 中性金、金 518、金 529 |
| Ag 类 | | 低氢银、中性银、厚银 |
| 其他 | | 碱性钢、砷、锑、镓、铂、铈、铝 |
| 二元合金 | 合金镀液 | 镍钴、镍钨、镍钨(D)、镍铁、镍磷、钴钨、钴银、锡锌、锡铟、锡锑、铅锡、金锑、金钴、金镍 |
| 三元合金 | | 镍铁钴、镍铁钨、镍钴磷、镍铅锑、巴氏合金 |

电刷镀可以用于提高零件的耐高温、耐腐蚀和耐磨性能,也可以修补已磨损零件的尺寸与几何形状、填补零件表面的划伤沟槽以及加工超差产品。

5. 镀膜

这里介绍的主要是气相沉积镀膜技术,包括物理和化学两大类。物理气相沉积亦称 PVD,主要有真空蒸发镀膜、溅射镀膜和离子镀膜。化学气相沉积亦称 CVD,包括化学气相沉积和等离子体增强化学气相沉积。

1) 真空蒸发镀膜

蒸发镀膜是在真空环境中把材料加热熔化后蒸发(或升华),使其大量原子、分子、原子团离开熔体表面,凝结在作为衬底的被镀件表面上形成镀膜,如图 13-7。蒸发材料可以用金属、合金或化合物,制出的薄膜也可以是金属、合金或化合物。真空蒸发制成的镀膜具有材料纯、品种多样、质量高的特点。在光学、微电子学、磁学和装饰、防腐蚀、减摩耐磨等多方面得到应用。

2) 溅射镀膜

溅射镀膜利用辉光放电或离子源产生的包括正离子在内的荷能粒子轰击作为薄膜材料的靶材料时,通过粒子动量传递打出靶材料中的原子及其他粒子即为溅射过程,然后沉积凝聚在衬底表面形成薄膜,如图 13-8 所示。

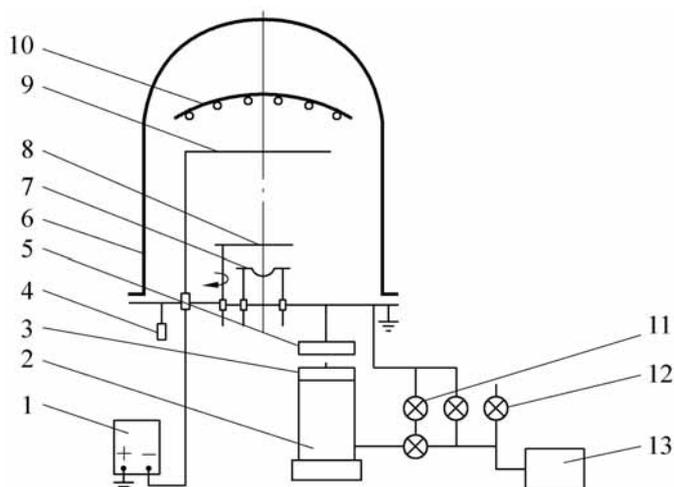


图 13-7 真空镀膜

- 1—直流辉光放电清洗电源;2—油扩散泵;3—水冷障板;4—规管;
5—高真空阀门;6—真空室钟罩;7—蒸发源(加热体);8—挡板;
9—工件架;10—加热器;11、12—放气阀门;13—机械泵

溅射镀膜可根据产生溅射粒子的方法分为直流溅射镀膜、射频溅射镀膜、磁控溅射镀膜和离子束溅射镀膜。溅射镀膜具有许多独特优点:可实现高速大面积沉积;几乎所有金属、化合物、介质均可作为靶材,在不同材料衬底上得到相应材料的薄膜等。因此,溅射镀膜技术受到关注,尤其是在 20 世纪 70 年代初期发展的磁控溅射镀膜技术在许多行业得到广泛应用。

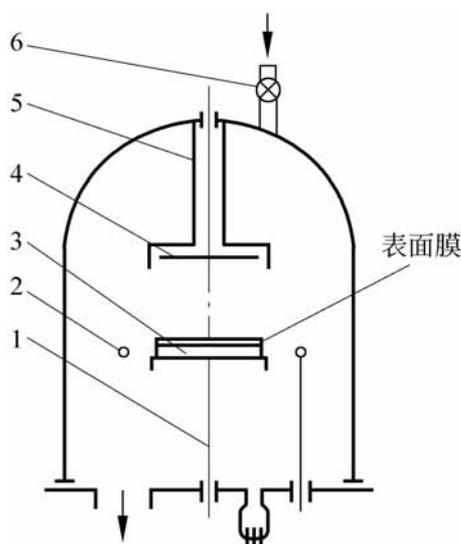


图 13-8 溅射镀膜

- 1—衬底架;2—阳极;3—衬底;
4—靶;5—靶屏蔽;6—充气阀门

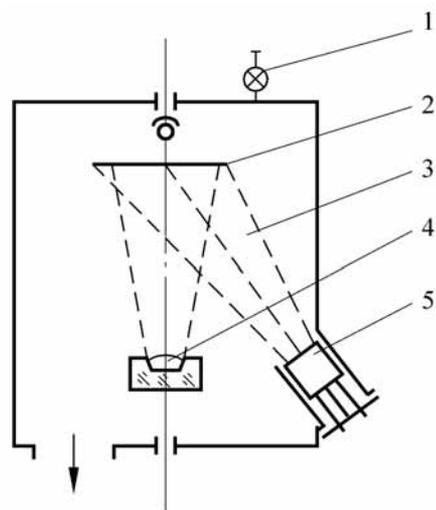


图 13-9 离子镀膜

- 1—充气阀门;2—衬底;3—离子束;
4—坩埚;5—考夫曼型离子源

3) 离子镀膜

蒸发源蒸发出的粒子主要是平均动能在 0.2eV 左右的原子或分子, 溅射粒子主要是由靶材原子组成, 平均能量在 $5 \sim 10\text{eV}$ 。而离子镀膜时, 凝聚成膜前的粒子有千分之几至百分之几被电离为正离子, 其能量从几电子伏至数百电子伏, 并且在薄膜凝聚和生长过程中伴有荷能离子轰击, 荷能离子可以是膜材料离子或工作气体离子, 在多数工艺中二者是同时存在。离子镀膜形成的薄膜与衬底附着牢固、膜结构致密、性能优良。离子镀膜是继蒸发镀膜、溅射镀膜之后发展起来的又一类强有力的 PVD 镀膜方法, 如图 13-9 所示。

离子镀膜方法, 可在金属、非金属衬底上镀金属、合金、陶瓷及化合物薄膜^[4]。它可作为防腐蚀、耐磨、润滑、装饰等的镀膜, 也有广泛应用。

4) 化学气相沉积

化学气相沉积薄膜是利用含有薄膜元素的一种或几种气相化合物、单质气体, 在衬底表面上令其进行化学反应生成的固体薄膜, 又称 CVD 薄膜。图 13-10 是化学气相沉积薄膜原理图。利用 CVD 技术, 可以沉积出玻璃态薄膜, 也能制出纯度高、结构高度完整的结晶薄膜。与其他薄膜制备技术相比, CVD 技术在较大范围内容易准确控制薄膜化学成分及膜结构。

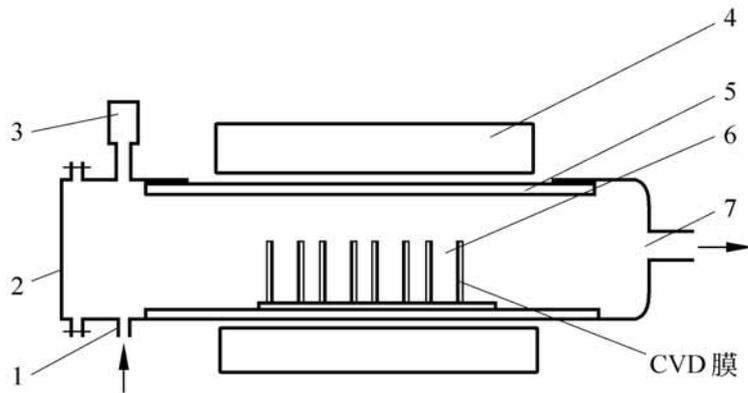


图 13-10 化学气相沉积镀膜

1—进气口; 2—衬底送入口; 3—压力计; 4—加热器;
5—石英管; 6—衬底; 7—排气口

化学相沉积技术可沉积纯金属膜、合金膜以及金属间化合物膜, 例如硼、碳、硅、锗、硼化物、硅化物、碳化物、氮化物、氧化物、硫化物、金刚石以及类金刚石等薄膜, 可作为耐磨、耐腐蚀、装饰、光学、电学等功能薄膜而得到应用。

CVD 技术主要缺点是薄膜沉积时衬底的温度高, 因而限制了它的应用

范围。例如沉积氮化物、硼化物作为硬质膜时,衬底需要加热到 900 以上。

13 3 2 表面涂层设计

表面涂层技术是利用表面冶金强化或表面镀膜强化方法,获得高质量的表面涂层。应用时必须首先了解预涂零件的工作条件和可能发生的失效类型,从而设计涂层性能和选择涂层材料。其次是根据各种涂层方法特点及其适用范围,选择适合的涂层工艺。因此,表面涂层设计是一项重要的工作。

1. 表面涂层设计的一般原则

1) 满足工况条件的要求

根据涂层受力状态和工况条件需要选择涂层类型。例如在氧化气氛或腐蚀介质中工作可以采用热喷涂,选择如陶瓷、塑料等非金属喷涂材料。而提高表面耐磨性则应选用陶瓷或者合金钢涂层材料。如果涂层工作温度很高或温度变化很大则必须选用耐热钢、耐热合金或陶瓷涂层。

2) 具有适当的结构和性能

根据涂层的工况条件,设计涂层厚度、结合强度、尺寸精度,以及确定涂层内是否允许有孔洞、是否需要机械加工及加工后的表面粗糙度等。

3) 与基体材质、性能的适应性

涂层与基体的材质、尺寸外形、物理化学性能、热膨胀系数、表面热处理状态等应有良好的适应性。

4) 技术上的可行性

为了实现设计的表面涂层性能,应分析选定的涂层方法的可行性。若单一表面涂层的性能不能满足要求时,可否采用复合涂层。

2. 表面涂层方法的选择

在选择表面涂层方法时,通常应从以下方面考虑:

1) 涂层材料的熔点高低

例如陶瓷涂层材料的熔点高于金属材料,故常选用等离子喷涂或镀膜等表面涂层方法。

2) 涂层厚薄

涂层方法不同,其最佳涂层厚度也不相同。一般情况下,堆焊层厚度范

围较宽,为 2~5mm;热喷涂涂层厚度为 0.2~0.6mm;喷熔涂层厚度为 0.2~1.2mm;电刷镀涂层厚度在 0.5mm 以下;镀膜涂层厚度在 0.05mm 以下。

3) 涂层与基材结合强度

堆焊与喷熔涂层可获得高的结合强度,例如:镍基自熔性合金粉末喷熔涂层与基材结合强度可达 $35 \times 9.81 \times 10^{-2}$ MPa 以上;热喷涂涂层一般为 $(3 \sim 5) \times 9.81 \times 10^{-2}$ MPa;电刷镀涂层与基材的结合强度大体上相当;镀膜涂层高于电刷镀涂层而低于喷熔涂层。

4) 基材耐热温度

堆焊涂层可使基材表面达到熔化状态;喷熔涂层使基材表面温度在 1000℃ 左右;喷涂涂层使基材表面温度上升至 300℃ 以下;电刷镀和浆液涂层可在室温条件下进行;镀膜工艺的基材温升也较低,通常可在室温或略高的温度下进行。

13.4 涂层性能测试

随着各类涂层及表面改性技术的广泛应用,涂层质量和性能检测的研究越来越受到人们的重视。由于涂层是通过不同工艺方法得到的,因此对涂层性能的测试方法也就不尽相同,对有些涂层只能以定性或半定量方式来进行评定。这里对在实际应用中常见涂层的性能测试方法进行介绍。

13.4.1 外观与结构

1. 涂层外观

涂层表面应光滑平整,组织致密,无气泡,无起皮和无脱落,色泽一致。若涂层不光滑或有少量针孔存在,可进行补充抛光处理。

2. 涂层厚度测定

常用的涂层厚度测量方法可以利用显微镜、千分尺或传感器进行,具体如下:

(1) 在显微镜下对涂层试样的断面进行测量两个以上视场,每个视场以相等的间隔测定 5 点以上,以平均值或最小值作为涂层的厚度。对热喷

涂涂层可采用 20 倍的倍率;对刷镀涂层可采用 200 ~ 500 倍的倍率进行测量。

(2) 先用千分尺测定基体的厚度,然后在喷涂或刷镀后再在相同位置测量 3 个以上点位,与基体的测量结果比较,求得涂层厚度的平均值或最小值。

(3) 利用电涡流式、磁力式或触头扫描式传感器进行测量。电涡流测量是利用产生于涂层表面的涡流振幅及相位随涂层厚度不同而改变的性质,通过检测涂层的涡流损耗来确定涂层的厚度。

3. 涂层孔隙率测定

涂层都存在孔隙,它可储存润滑剂和容纳磨粒,使涂层更耐磨。但腐蚀介质也会通过孔洞浸透到基材表面,降低涂层的结合强度而产生剥离。孔隙率是指单位面积上孔隙的多少,通常为 5% ~ 15%。常用的孔隙测定方法如下:

(1) 将涂层与基体剥离后放在 105 ~ 120 的空气中干燥约 2h,称出质量 m_1 ,再将涂层片浸入室温的蒸馏水中,在真空下浸润排气后,称出含水涂层质量 m_2 ,将出水试样表面擦干称得质量 m_3 ,则表面孔隙率可由下式计算:

$$= \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100\%$$

(2) 在规定的圆柱形坯样凹面上进行喷涂,精加工至规则的圆柱形,由圆柱坯料的原尺寸可知涂层的体积,准确称量磨削后圆柱质量,即可求出涂层的质量和密度,根据下式单计算涂层的孔隙率。

$$= 1 - \frac{a}{\rho} \times 100\%$$

式中, ρ 为喷涂材料的真密度; a 为喷涂层的表观密度。

13.4.2 结合强度试验

喷涂层的结合强度包括涂层与基体间的结合强度和涂层粒子间的结合强度。而对喷熔层及刷镀层,一般只需检测涂层与基体之间的结合质量。

(1) 落锤冲击试验 锤质量为 500g,从高度为 100mm 处对试片同一部位进行反复锤击,以涂层剥离时锤击次数多少来作为检测标准,如图 13-11 所示。

(2) 振动子冲击试验 使用振动子式重锤对涂层进行冲击,以涂层开裂或剥离时的冲击吸收功来表征涂层与基体的结合强度。该方法对评价陶瓷等热喷涂涂层的结合状态较为适宜。

(3) 划痕试验 使用针状工具垂直地把涂层划透,然后按涂层类型按规范判定。该方法适用于铝、锌、铅等软质金属喷涂层,以及塑料喷涂层、刷镀涂层。

(4) 折断试验 在 1mm 厚的低碳钢板上刷镀 0.1mm 的涂层,将试样夹持于虎钳上,用手反复弯曲另一端,直至断裂。如断裂处涂层无脱落现象,则说明结合良好。

(5) 法向结合强度测试 一般在拉伸试验条件下进行,拉伸试样可分为用粘结剂和不用粘结剂两类。

图 13-12 给出一种不用粘结剂试样试验。在基体中心开孔,柱销与中心孔采用滑配合,并使基体面与柱销端面处于同一平面后喷涂,然后按图所示施加载荷,即可求出结合强度。

不用粘结剂试验的缺点是:即使柱销与基体的滑配合精度很高,在两者间仍会形成桥状涂层,造成该部位应力集中成为断裂源,因此这种方法得出的测定值一般偏低,另外,要求涂层具有一定的厚度,否则会使涂层产生剪切断裂,从而测不出拉伸结合强度,而涂层太厚会使结合强度下降。

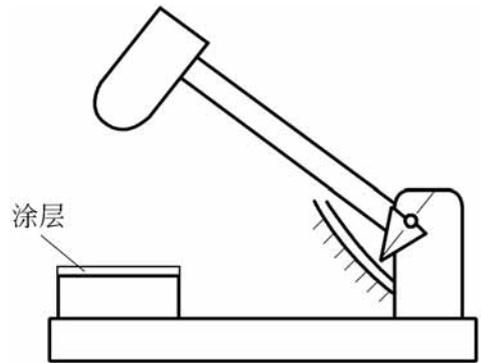


图 13-11 落锤冲击试验

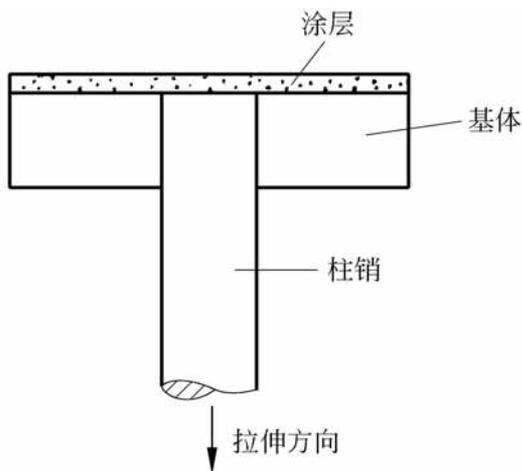


图 13-12 无粘结剂结合强度试验

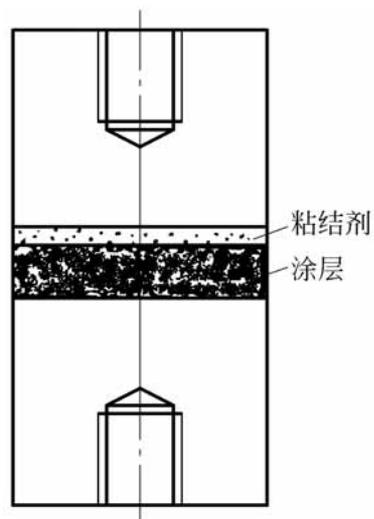


图 13-13 有粘结剂结合强度试验

图 13-13 给 用粘结剂粘结试样的拉伸试验法。在对偶试件的一个端面喷涂,随后用粘结剂把另一对偶试件的端面粘到涂层上。磨去粘结处外溢的粘结剂以及基体外圆上的喷涂涂层。

由于粘结剂在粘接对偶试样的过程中不可避免地要渗入涂层孔穴内,使测试结果难以直接与不用粘结剂试验进行比较。粘接对偶试样拉伸试验所测得的强度较高,通常不适用于喷熔涂层结合强度的测试,对于塑料喷涂层用该方法测试可得到较圆满的结果。

(6) 切向结合强度测试 涂层切向结合强度是指涂层抗剪切结合强度。切向结合强度也有粘接与无粘接两种,如图 13-14 所示。图 13-14(a)是用粘结剂把涂层粘接在两杆件上,拉伸杆件至涂层破坏获得涂层切向结合强度。图 13-14(b)是用两块平行板试样进行喷涂后进行剪切的试验。还有其他剪切试验,可参考文献[2]。

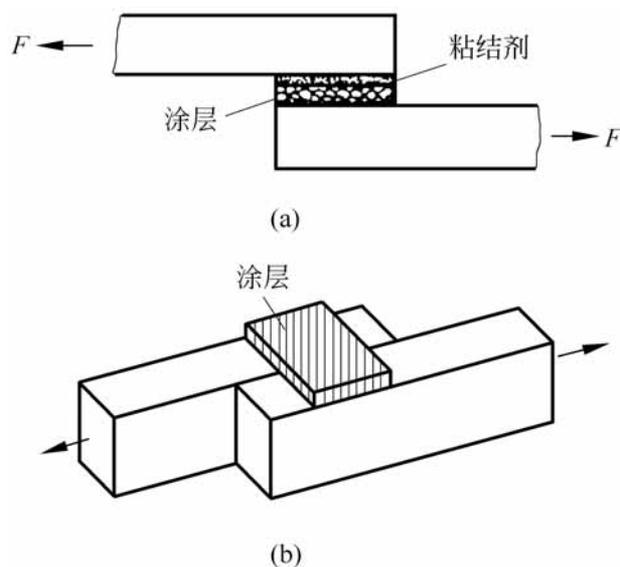


图 13-14 切向结合强度试验

(7) 涂层内部结合强度测定 涂层内部间结合强度即涂层粒子间的附着力,它反映粒子间内聚力的大小,故亦称涂层强度。涂层强度在平行于涂层方向与垂直于涂层方向上差别较大。

平行于涂层方向的涂层自身强度测试的夹具及试件尺寸如图 13-15 所示。加载速度原则上规定为 $9807\text{N}/\text{min}$,而后用简单的方法即可求出拉伸强度。

垂直于涂层方向的涂层自身强度测试过程如图 13-16 所示。如图 13-16(a)所示,先在坯料端面上制成低熔点的焊锡薄膜,用喷砂法对该

薄膜作粗糙处理,然后在表面上喷涂待试验的涂层。再把焊锡熔化取下涂层,按图 13-16(b)所示粘接在两个拉杆端面之间,即可进行拉伸试验。所使用的粘结剂强度应大于涂层的自身强度。

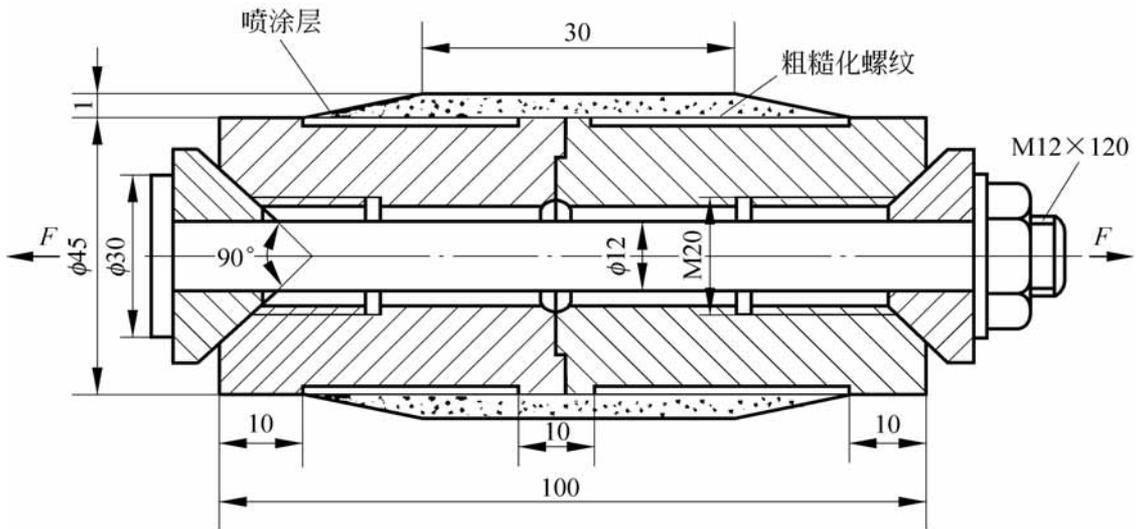


图 13-15 平行方向涂层强度试验

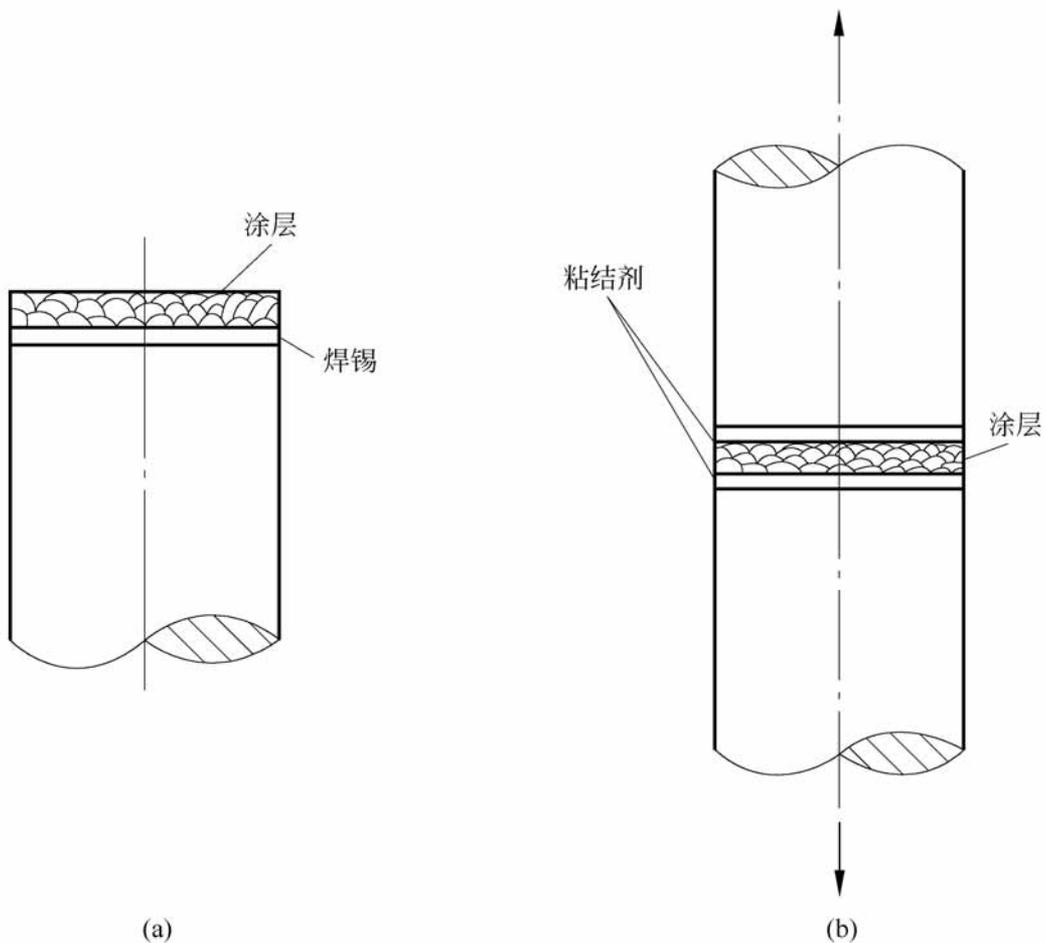


图 13-16 垂直方向涂层强度试验

高速束流粒子冲击涂层以测量涂层强度如图 13-17 所示。从喷嘴喷出的高速粒子,可以精确控制粒子运动速度、流量以及对试样的冲击作用点。通过高速运动的束流粒子对试样的冲击,使部分涂层粒子脱落,以涂层粒子脱落程度的大小来衡量涂层粒子之间的结合强度。它是涂层粒子间结合性能的高精度测试方法。这种方法与垂直于涂层方向测试法一样,不适用于喷熔涂层,它主要应用于陶瓷喷涂层及一些较硬金属喷涂层。

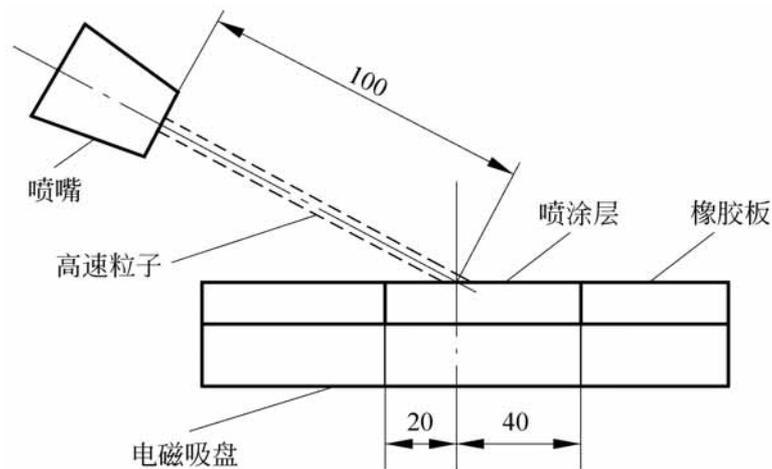


图 13-17 高速束流粒子冲击试验

刷镀涂层自身强度的扭转试验法如图 13-18 所示。对试样进行纯扭曲试验,以涂层开裂作为检测标准。此法所测试的是涂层自身的扭转抗剪切强度极限。如以刷镀层脱落作为检测标准,也可近似地认为是涂层与基材间的结合强度。

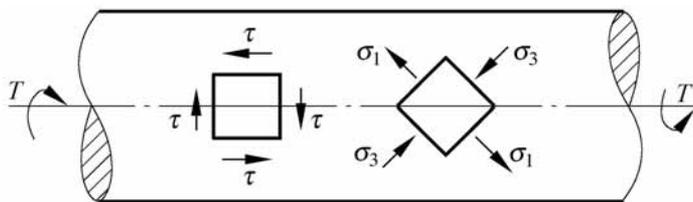


图 13-18 刷镀涂层自身强度扭转试验

扭转试验测量精度较高,重复性好。然而,刷镀涂层厚度对测量数据影响较大,应尽量保证涂层厚度的均匀性。

应当指出,上述的各种定性、定量测定涂层与基材结合强度的方法中,由于涂层形成的工艺方法和规范不同,其结合强度测定结果将会有一定误差,当涂层制成条件不同时,其结合强度值往往难以比较。

13.4.3 硬度测试

表面涂层的硬度测试可由多种方法来完成,但不同的测试方法,其涂层硬度的含义也不相同。通常测量物体硬度的方法分为两种,即静力测量法(压入法)和动力测量法。静力测量法包括布氏、洛氏、维氏硬度等;动力测量法包括锤击硬度、肖氏硬度等。此外,表面划痕硬度法也用于表面涂层的测试。由于常规硬度试验在许多书中都有介绍,这里只介绍两种特殊的硬度试验。

1. 显微硬度测试

其特点是把试验对象缩小到显微尺度以内,常用来测定某一组织的组成物或某一组成相的硬度。此外,测定单个喷涂粒子的硬度使用显微硬度计效果也很好。显微硬度计在原理上同维氏硬度计,但负荷较小,通常使用的负荷为 2、5、10、20、50、100、200g,适用于除塑料涂层以外的所有涂层,特别是测定小于 0.3mm 厚的刷镀涂层。

在研究喷熔涂层相结构时,显微硬度得到广泛应用。

2. 霍夫曼(Hoffman)划痕硬度测试

该方法可以间接测定涂层的硬度及耐磨损性能,适用于软的金属涂层和塑料涂层,要求最小涂层厚度为 0.89mm。采用 6mm 有斜面的负荷压头在 $2 \times 9.807\text{N}$ 负荷作用下在喷涂层表面刻划,以划痕宽度表示硬度及耐磨性。划痕越宽硬度就越低,涂层结合状况也越弱。Hoffman 划痕硬度值 H_N 可按下式计算。

$$H_N = \frac{b}{5} \times 10^{-3}$$

式中 b 是划痕沟槽宽度,以英寸为单位。

13.4.4 磨损试验

涂层应用最多和最能发挥其作用的性能是耐磨损性能。涂层的耐磨性是指涂层与它相互接触的物体抵抗磨损的能力。喷熔涂层的耐磨性取决于金相组织与硬度的配合。由于喷涂涂层中存在一些气孔,而且氧化物作为薄膜介于涂层粒子之间,或以不同形态(如粒状)存在于涂层组织内,因此,虽然其宏观硬度并不很高,但却具有很高的耐磨性。尤其是在有润滑油的

情况下,涂层的气孔起到储油孔的作用,从而具有一定的润滑性。刷镀涂层的耐磨性能不仅与涂层的硬度有关,还与涂层组织结构、镀液成分及刷镀工艺参数等有直接关系。此外,涂层的摩擦磨损性能,并非材料的固有特性,而是由磨损系统中许多因素共同决定的。若条件改变,其磨损试验的数据会发生很大变化。因此,只有在某种具体条件下才能对涂层的耐磨性能进行评价。有关磨损试验方法将在第 14 章作详细阐述。

13.4.5 其他性能试验

1. 疲劳强度测试

通常采用四点弯曲式疲劳试验,以裂纹产生时的循环次数来表示涂层抗疲劳破坏的性能。此外,还可采用扭曲疲劳、旋转弯曲疲劳试验等方法。

2. 残余应力的测定

涂层会因其凝固收缩或不平衡结晶等原因产生残余应力。基体材料与涂层材料之间的膨胀系数相差越大,则涂层中的残余应力也就越大。当刷镀液的成分、刷镀温度、基体温度以及操作工艺参数发生改变,会引起残余应力改变。一般涂层越厚,残余应力也越大。另外,残余应力还与涂层材料的熔点等因素有关。不同的热喷涂方法及涂层材料,会使涂层中产生不同的应力。当涂层材料为金属材料时,等离子焰喷涂后的残余应力高于氧乙炔焰,而当涂层为陶瓷材料时,氧乙炔焰喷涂层的残余应力又高于等离子焰喷涂层。

1) X 射线衍射法

在进行测量之前,先将涂层试样表面经砂纸打磨抛光,制成光滑试样,残存的表面最大粗糙度 R_a 为 $40 \sim 70\mu\text{m}$ 。X 射线衍射装置可测试室温至 600°C 条件下涂层的应力,其最大优点是非破坏性,缺点是只能测定表面应力,因此对于厚的涂层而言,难以准确地测定涂层与界面的应力分布状态与应力水平。一般涂层厚度在 0.15mm 以内时,测试结果较为准确。

2) 环状试样弯曲曲率法

先将试样坯料加工成环状,在环状坯料上喷涂涂层或刷镀涂层。由于涂层内存在一定的应力,会使坯料的曲率发生变化,可以根据测量到的曲率变化,通过下式计算出残余应力的大小。

$$\sigma_r = \frac{1}{1 - \mu^2} \left[\frac{h_1^3 E_1 + h_2^3 E_2}{6 h_1 (h_1 + h_2)} + \frac{E_1 (h_1^3 E_1 + h_2^3 E_2)}{12 h_1^2 (h_1 E_1 + h_2 E_2)} + \frac{E_1 E_2 h_2 (h_1 + h_2)}{2 (h_1 E_1 + h_2 E_2)} \right]$$

其中, E_1, E_2 为涂层和基体的弹性模量; h_1, h_2 为涂层和基体的厚度; r 为曲率半径; μ 为涂层和基体的泊松比; σ_r 为残余应力。

除了上述方法外, 还有一些方法如电阻应变仪测量法、幻灯投影法及梯形槽法等也都用来测量应力, 但均不如 X 衍射法方便准确。

参 考 文 献

- [1] 葛中民, 侯虞铿, 温诗铸. 耐磨损设计. 北京: 机械工业出版社, 1991
- [2] 陈学定, 韩文政主编. 表面涂层技术. 北京: 机械工业出版社, 1994
- [3] 邵天敏, 金元生. 浆液涂层研究进展, 摩擦学进展. 清华大学摩擦学国家重点实验室, 1996, (3): 31 ~ 35
- [4] Wang Yinglong, Jin Yuansheng, Wen Shizhu. The analysis of the friction and wear mechanisms of plasma - sprayed ceramic coating at 450 . Wear . 1988, (128) : 265 ~ 276

第 14 章

摩擦磨损实验与状态检测

14 1 摩擦磨损实验方法与装置

摩擦磨损实验的目的是考察实际工况条件下它们的特征与变化,揭示各种因素对摩擦磨损性能的影响,从而确定符合使用条件的最优设计参数。

由于摩擦磨损现象十分复杂,实验方法和装置种类繁多,所得的实验数据具有很强的条件性,往往难以进行比较,所以人们提出摩擦磨损实验的标准化问题,以便统一实验规范和方法。近年来,实验方法的标准化已得到越来越多国家和组织的重视。

摩擦磨损性能是多种因素影响的综合表现,因而必须严格地控制实验条件才可能得出可靠的结论。

目前采用的实验方法可以归纳为下列三类。

1. 实验室试件实验

根据给定的工况条件,在通用的摩擦磨损实验机上对试件进行实验。由于实验室实验的环境条件和工况参数容易控制,因而实验数据的重复性较高,实验周期短,实验条件的变化范围宽,可以在短时间内取得比较系统的数据。但由于实验条件与实际工况不完全符合,因而实验结果往往实用性较差。实验室实验主要用于各种类型的摩擦磨损机理和影响因素的研究,以及摩擦副材料、工艺和润滑剂性能的评定。

2. 模拟性台架实验

在实验室实验的基础上,根据所选定的参数设计实际的零件,并在模拟

使用条件下进行台架实验。由于台架实验的条件接近实际工况,增强了实验结果的可靠性。同时,通过实验条件的强化和严格控制,也可以在较短的时间内获得系统的实验数据,还可以进行个别因素对磨损性能影响的研究。台架实验的主要目的在于校验实验室实验数据的可靠性和零件磨损性能设计的合理性。

3. 实际使用实验

在上述两种实验的基础上,对实际零件进行使用实验。这种实验的真实性和可靠性最好。但是实验周期长、费用大,实验结果是各种影响因素的综合表现,因而难以对实验结果进行深入分析。这种方法通常用作检验前两种实验数据的一种手段。

以上三类实验可根据实验研究的要求选择其中的一种或几种。应当指出,摩擦磨损性能是摩擦学系统在给定条件下的综合性能,因此,实验结果的普适性较低。所以在实验室实验时,应当尽可能地模拟实际工况条件,其中主要的有:滑动速度和表面压力的大小和变化、表面层的温度变化、润滑状态、环境介质条件和表面接触形式等。对于高速摩擦副的摩擦磨损实验,温度影响是主要问题,应当使试件的散热条件和温度分布接近实际情况。在低速摩擦副的实验中,由于磨合时间较长,为了消除磨合对实验结果的影响,可以预先将试件的摩擦表面磨合,以便形成与使用条件相适应的表面品质。对于未经磨合的试件,通常不采纳最初测量的几个数据,因为这些数据可能不稳定。

一般使用最多的通用摩擦磨损实验机主要用来评定在不同速度、载荷和温度条件下各种材料和润滑剂的性能,也可以用来进行各种磨损的机理研究。

图 14-1 为通用摩擦磨损实验机所采用的试件接触情况和运动方式。试件之间的相对运动方式可以是纯滑动、纯滚动或者滚动伴随滑动。实验机的试件有采用旋转运动,也有是往复运动的。试件的接触形式可以有面接触、线接触和点接触三种。通常面接触试件的单位面积压力只有 50 ~ 100MPa,常用于磨粒磨损实验。线接触试件的最大接触压力可达 1000 ~ 1500MPa,适合于接触疲劳磨损实验和粘着磨损实验。点接触试件的表面接触压力更高,最大可达 5000MPa,适用于需要很高接触压力的实验,例如胶合磨损或高强度材料的接触疲劳磨损实验。

下面介绍几种常用的摩擦磨损实验机。

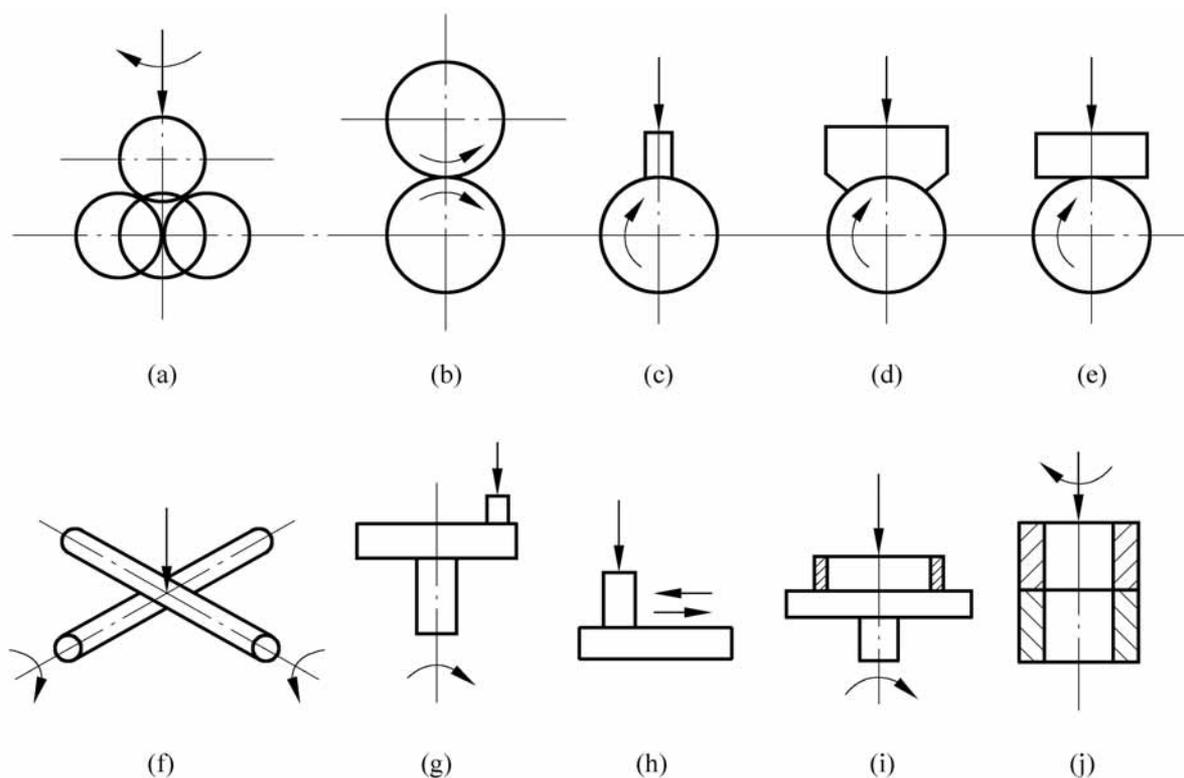


图 14-1 摩擦磨损实验机的试件形式

四 试验机是根据图 14-1(a)所示的原理制成的。将四球当中的三个球夹紧成巢状置于带有滚道的套杯中,如图 14-2。另一个球置于上方,在轴向载荷下保持与其他三个球分别构成点接触,同时被驱动旋转,与下面的三个球相对滑动。四球试验机通常用来评定润滑油添加剂的性能,根据磨损痕直径和摩擦系数对试验结果进行分析。

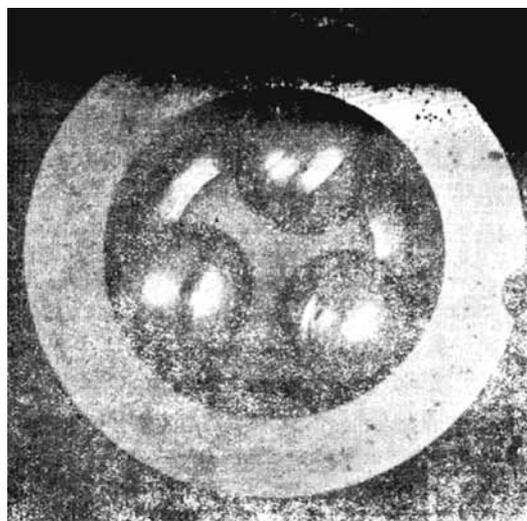


图 14-2 四球机中的下面三个球及滚道

Timken 试验机又称环块试验机,它是根据图 14-1(e)的形式设计的属于线接触试验。旋转圆环作为实验基准,一般用圆锥滚子轴承的外套圈或标准件将它压紧在矩形试块上。随着旋转时间的加大,矩形试块表面将出现条状磨痕。通过测量条状磨痕的宽度,以评定润滑剂或矩形试块材料的摩擦磨损性能。

销盘式试验机是按图 14-1(g)、(h)形式设计的面接触摩擦副试验机。它采用了圆柱体和圆盘作连续滑动或者往复滑动,对任何材料都能够方便地制作试件。

目前,已有许多新型的多功能摩擦磨损试验机,它们具有多种试件接触和运动形式,只要更换试件,就可以完成多种不同类型的试验或组合试验。

虽然通常的摩擦磨损试验机都具有同时测量摩擦力的功能,但测量精度低,不能满足某些对摩擦性能实验研究的要求。以下介绍两种测量摩擦的装置。

图 14-3 是 Bowden 和 Leben 用来精确测量边界润滑摩擦行为的设备原理图。摩擦力的测量是在平试样 A 与半球头试样 B 之间进行。平试样安装在拖板 C 上,由液压缸中的活塞平稳地向前推进。上试样由测力环 F 压紧在下试样上,而环 F 则由螺钉 G 张紧,并与臂 E 成刚性连接。臂 E 悬挂在由钢丝 DD 组成的框架上。当 B 上作用的摩擦力对双线悬挂的轴线产生一个力偶时,使臂 E 绕某一铅垂轴线转动。转动的范围由观察镜 M 来测量。摩擦力不同观察镜的转角不同,从而可以得到精确的摩擦力大小。

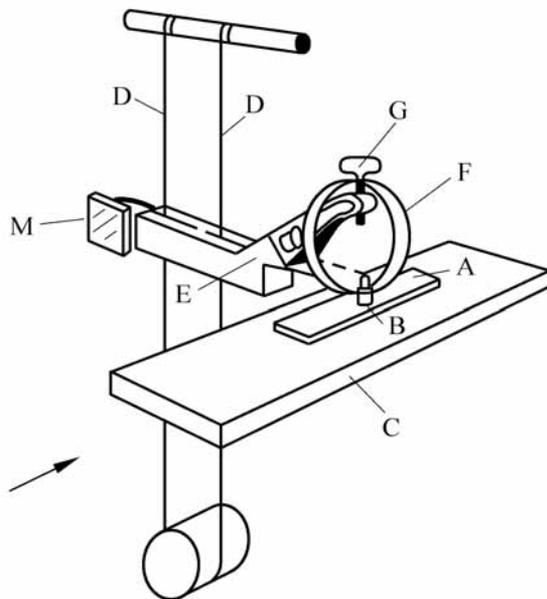


图 14-3 Bowden-Leben 摩擦试验机

图 14-4 是另一种摩擦试验机。采用液压装置驱动,避免了机械传动的不精确而产生的附加加速运动和保证工作平稳。试验机应用由两个衍射光栅产生的莫尔条纹的方法获得匀速运动。短光栅与上试样安装在一起,长光栅安装在拖板上。利用并联的相差为 90° 的光电晶体管装置,在示波器上画出近似于圆的轨迹。当把光束调整到某一固定频率,就可用很高的精度来检验运动的规律性。摩擦副是由两个相交错成 90° 的圆柱体构成的点接触,其优点是两个试件可以加工成相同的状态。圆柱试件的安装有两种方式:其一是使它们的支架分别平行和垂直于运动的方向;另一是两圆柱体均与运动方向成 45° 角。在后一安装中,通过接触区域在两试样上连续改变位置,可以研究氧化膜性能的极面效应。

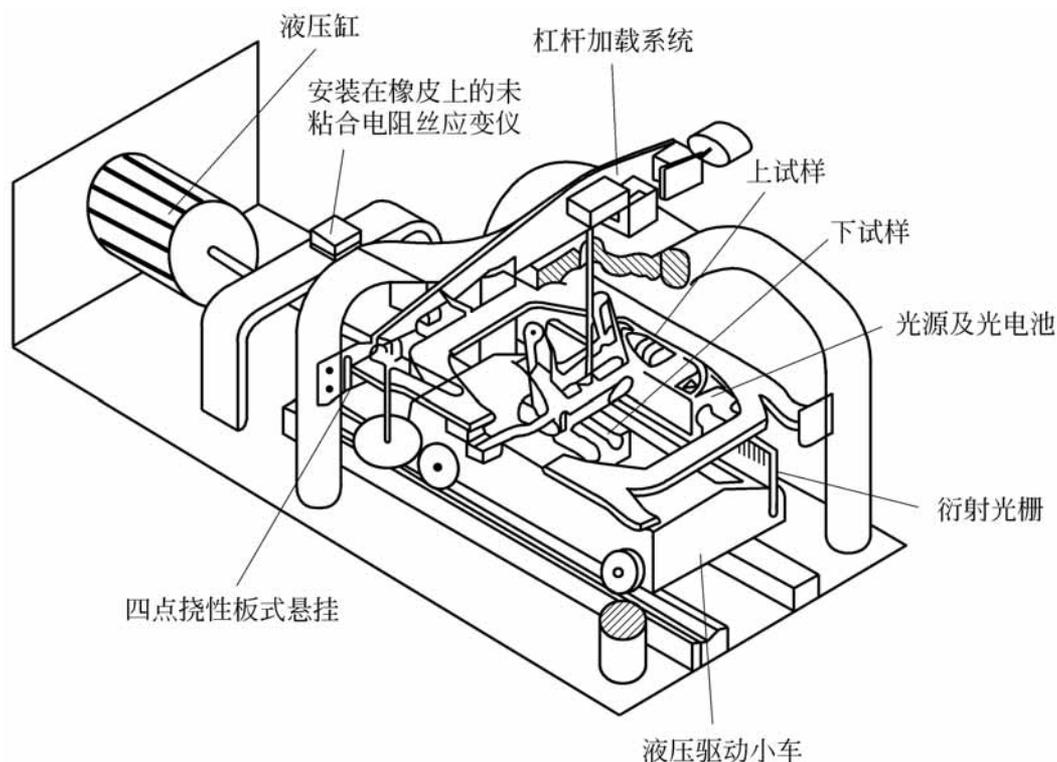


图 14-4 动摩擦试验机

14 2 磨损量的测量

机械零件的磨损量可以用磨下材料的质量、体积或者磨去的厚度来表示。磨损质量和磨损体积是整个磨损表面的总和,而磨损厚度测量能够反映磨损沿摩擦表面的分布情况。

常用的磨损量测量方法如下:

1. 称量法

用称量试件在实验前后的质量变化来确定磨损量。通常采用精密分析天平称重,测量精度为 0.1mg 。由于测量范围的限制,称量法仅适用于小试件。对于微量磨损的摩擦副需要很长的实验周期才能产生可测量的质量变化。如果磨损过程中试件表层材料产生较大的塑性变形,试件的形状虽然变化但质量损失不大,则称量法不能反映表面磨损的真实情况。

2. 测长法

使用精密量具、测长仪、万能工具显微镜,或其他非接触式测微仪测量试件在实验前后法向尺寸的变化,或者磨损表面与某基准面距离的变化。

测长法可以测量磨损分布情况。但是这种方法存在误差,例如测量数据包含了因变形所造成的尺寸变化,接触式测量仪器的测量值受接触情况和温度变化的影响等。

3. 表面轮廓法

用表面轮廓仪可以直接测量磨损前后表面轮廓的变化来确定零磨损量,即磨损厚度不超过表面粗糙峰高度的磨损。

为了保证准确地描绘磨损前后相同部位的轮廓,可以采用图 14-5 的装置,通过显微镜和试件上的定位基准确定测量位置。

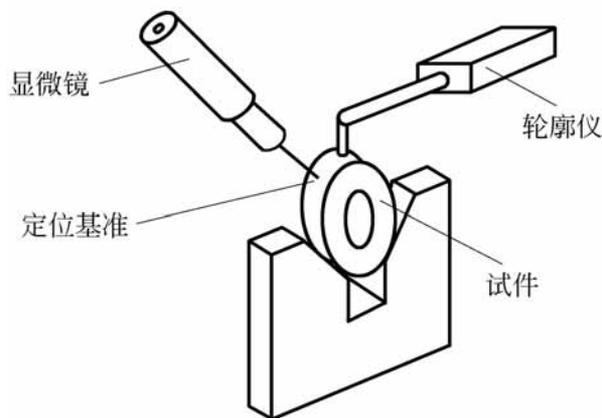


图 14-5 表面轮廓测量

当轮廓法用来测量表面的可测磨损时,即测量磨损厚度超过表面粗糙度的磨损必须采用测量基准。图 14-6 给出两种测量基准,图 14-6(a)是用

未磨损表面作为基准,而图 14-6(b)是在表面上开设一个楔形槽,根据磨损前后楔形槽宽 B 和 b 的数值计算磨损厚度 h 。

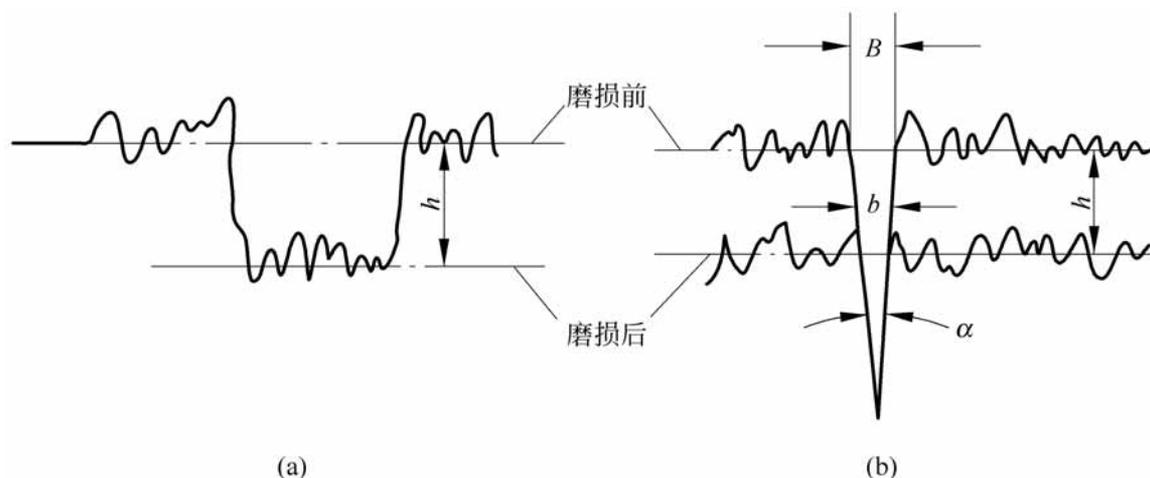


图 14-6 可测磨损的轮廓法测量

轮廓法可以记录表面轮廓在磨损过程中的变化和磨损分布。但是轮廓法测量手续复杂,被测零件的形状和尺寸受量程范围的限制。

4. 压痕或切槽法

人为地在摩擦表面上压痕或者切槽作为测量基准,用基准尺寸沿深度变化的规律度量磨损厚度。如果在摩擦表面上不同部位布置基准,还可以测量磨损沿表面的分布。

压痕法通常采用维氏硬度计的压头在摩擦表面压出正方角锥形的坑,如图 14-7 所示。

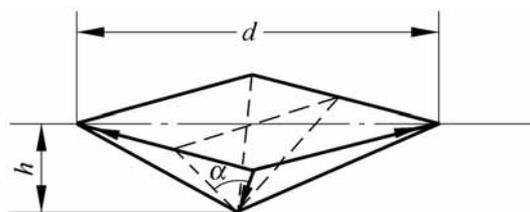


图 14-7 正方角锥压痕

如果锥面角为 α (通常 $\alpha = 136^\circ$), 对角线长为 d , 则高度为 h

$$h = \frac{d}{2 \cdot 2 \tan \frac{\alpha}{2}} = \frac{d}{m} \tag{14-1}$$

$$m = 2 \cdot 2 \tan \frac{\alpha}{2} \tag{7}$$

当表面磨损以后,通过测量对角线的变化计算高度的变化。如果磨损前后对角线由 d 变化到 d_1 ,于是磨损厚度 可以按下式计算

$$= h - h_1 = \frac{1}{m}(d - d_1) \quad (14-2)$$

压痕法也可以用来测量圆柱面上的磨损。图 14-8 表示内圆表面上的测量, R 为磨损前内圆半径, d 和 d_1 为磨损前后的对角线长,此时内圆表面的磨损厚度 为

$$= \frac{1}{m}(d - d_1) - \frac{1}{8R}(d^2 - d_1^2) \quad (14-3)$$

外圆表面的压痕尺寸如图 14-9 所示,磨损厚度 的计算公式为

$$= \frac{1}{m}(d - d_1) + \frac{1}{8R}(d^2 - d_1^2) \quad (14-4)$$

应当指出:按照上述公式计算的磨损厚度有一定的误差。因为压痕过程并非是完全塑性变形,所以压坑与压头的形状不完全相同。考虑弹性变形的影响应将 m 数值增大。当锥面角 $\alpha = 136^\circ$ 时,根据经验可按以下数值选取:塑性良好的金属例如铅,选取 $m = 7$; 铸铁,选取 $m = 7.6 \sim 8.2$, 平均值为 7.9 ; 轴承钢,选取 $m = 7.7 \sim 8.4$, 平均值为 8 。

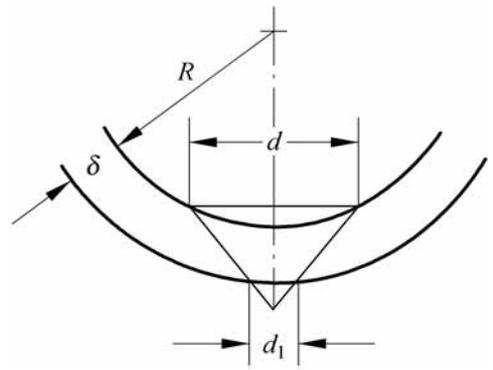


图 14-8 内圆面测量

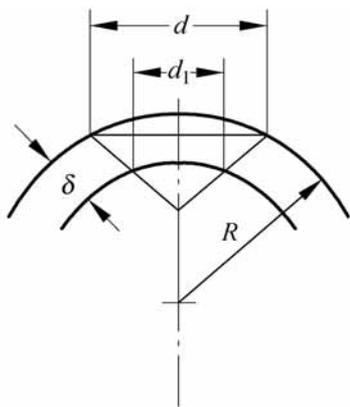


图 14-9 外圆面测量

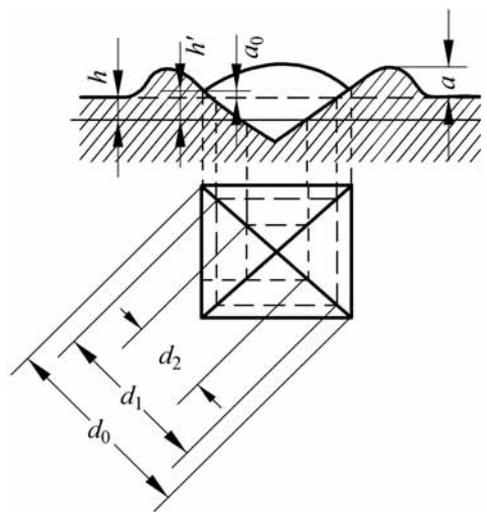


图 14-10 压痕变形

压痕法产生误差的另一个因素是压坑四周形成鼓起,使表面形状变化,并影响摩擦副的配合性质和磨损测量精度。图 14-10 表示压坑四周鼓起情

况, 尺寸 a 和 a_0 的大小依材料性质而定。

如果磨损前后对角线尺寸由 d_1 减少到 d_2 , 则实际磨损厚度 h 为

$$h = \frac{1}{m}(d_1 - d_2)$$

但由于压坑四周鼓起的影响, 测量的磨损厚度 h 为

$$h = \frac{1}{m}(d_0 - d_2)$$

测量误差

$$E = \frac{h - h}{h} = \frac{d_0 - d_1}{d_1 - d_2} \quad (14-5)$$

通常 E 的数值达到 60%, 甚至更高。所以为了减少测量误差, 必须采用专用工具修整, 或实验前经过充分磨合, 或在终加工工序之前进行压痕等方法来消除压痕四周的鼓起。

如果要测量磨损分布, 可以在摩擦表面上布置一系列的压痕。为了保证测量精度, 应当使作为测量用的对角线与滑动方向垂直, 而另一对角线则与滑动方向一致。各个压痕的尺寸应尽可能相同。为了使各个压痕尺寸大致相同, 在进行压痕时常采用专门的载荷限制器。

压痕时的压头压入力可以由下式计算

$$P = 54 \frac{d^2}{H_v} \quad (14-6)$$

式中, P 为压入力, N; d 为对角线长度, mm, 通常取 $d=1$; H_v 为材料的压痕压力, MPa。

切槽法测磨损与压痕法十分相似, 但是切槽法排除了弹性变形回复和四周鼓起的影响。虽然由于切削中的弹性变形和切削热等因素造成槽形几何误差, 但一般不超过 5%, 所以测量精度比压痕法高。图 14-11 示出切槽尺寸。

根据几何关系得

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}}$$

或

$$h \approx \frac{l^2}{8r} \quad (14-7)$$

按照近似公式(14-7)计算的误差最大不超过 1%。

根据切槽宽度 l 的变化计算磨损厚度

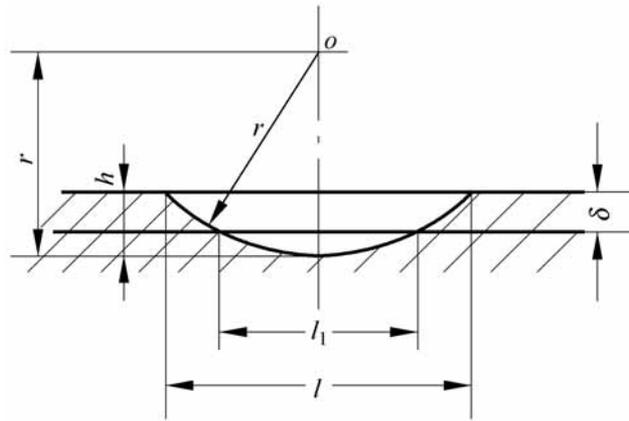


图 14-11 切槽法

$$= \frac{l^2 - l_1^2}{8r} \quad (14-8)$$

当测量圆柱表面上的磨损量时,如果圆柱面半径为 R ,则测量内圆表面的磨损厚度 为

$$= \frac{1}{8} (l^2 - l_1^2) \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \quad (14-9)$$

外圆表面的磨损厚度 为

$$= \frac{1}{8} (l^2 - l_1^2) \frac{1}{r} + \frac{1}{R} \quad (14-10)$$

为了避免磨屑堵塞槽内影响测量精度,槽的长度方向应当与滑动方向垂直。通常选择槽长尺寸为 1.5mm 左右,而槽深应超过表面粗糙度和磨损厚度。

压痕法和切槽法只适用于磨损量不大而表面光滑的试件。由于这两种方法都要局部破坏试件的表层,因而不能用于研究磨损过程中表面层的组织结构的变化。

应当指出,上述各种磨损测量方法的共同缺点是测量时必须拆卸机器,所以操作复杂。此外,测量磨损量随时间变化时,则磨损工况条件将因每次拆装而改变。下面介绍的两种方法可以实时测量磨损量,避免了上述缺点。

5. 沉淀法或化学分析法

将润滑油中所含的磨屑经过过滤或者沉淀分离出来,再由称重法测量磨屑质量。

另外也可以采用定量分析化学的方法测量润滑油中所含磨屑的组成和质量,这不仅可以测量各种磨损元素的质量,还可以根据材料使用情况来判

断磨损的部位。

如果定期地从润滑系统中取出油样进行测量,这两种方法都可测量磨损量随时间的变化。但是它们测量的是整个表面的总磨损量,无法确定摩擦表面的磨损分布。此外,润滑油的合理取样是保证测量精度的关键。

6. 放射性同位素法

将摩擦表面经放射性同位素活化,则在磨损过程中落入润滑油中的磨屑具有放射性。因此定期地测定润滑油的放射性强度,就可以换算出磨损量随时间的变化。

图 14-12 为同位素方法测量滑动轴承磨损的装置。具有放射性的磨屑随着润滑油的循环流动通过盖格计数器附近,计数器及其定标装置记录放射性辐射脉冲数目,从而连续地测量磨损量的大小。

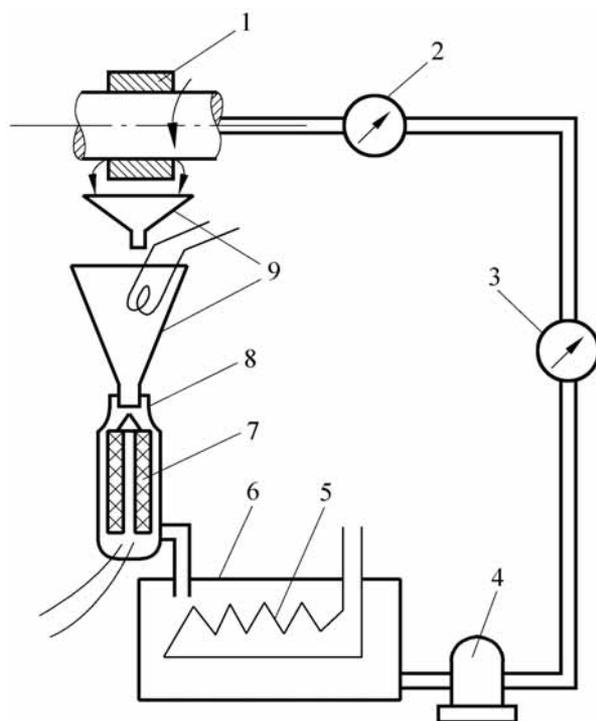


图 14-12 同位素方法测量磨损

1—轴承部件;2—流量计;3—压力计;4—油泵;5—冷却器;
6—油箱;7—专用过滤器;8—盖格计数器;9—漏斗

放射性同位素方法最大的优点是测量磨损量的灵敏度高,可达 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ g。同时还可以分别测量几个摩擦表面和部位的磨损量。

试件表面的活化方式有镀层法、熔铸法、嵌入法、照射法及扩散法等 5 种。根据试件放射性强度的大小需要采取不同的防护措施。

14.3 摩擦表面形态的分析

由于摩擦现象发生在表面层,表层组织结构的变化是研究摩擦磨损规律和机理的关键,现代表面测试技术已先后用来研究摩擦表面的各种现象。

14.3.1 表面形貌的分析

摩擦过程中表面形貌的变化可以采用表面轮廓仪和电子显微镜来进行分析。

表面轮廓仪是通过测量触针在表面上匀速移动,将触针随表面轮廓的垂直运动检测、放大,并且描绘出表面的轮廓曲线。再经过微处理机的运算还可以直接测出表面形貌参数的变化。

采用透射电子显微镜和反射电子显微镜可以研究摩擦表面形貌和亚表面的破坏特性以及表面氧化膜的形貌。但由于它们只能作复型检测,检测范围有限、测量误差大及操作不便,目前已逐渐被扫描电子显微镜替代。

扫描电子显微镜能够直接观察摩擦表面的形貌及其在摩擦过程中的变化。电子扫描的图像清晰度好,并有立体感,放大倍数变化范围宽,检测范围亦较大,甚至可以直接用于测量小型零件的摩擦表面。

应当指出,以上介绍的表面分析局限于在磨损前后进行,不能考察磨损过程中的表面变化。王伟强和温诗铸^[2]采用原位观察技术对干摩擦磨损过程中的表面变化进行了研究。

14.3.2 表面结构的分析

金属表面在磨损过程中表层结构的变化通常用衍射技术来分析。它是将电子束照射到磨损表面,由于金属晶体中原子的有序排列,使电子的散射在特定的方向上而形成衍射斑点。不同的原子和晶体衍射斑点的分布情况是不同的,可以用它来分析表面结构及其变化。

电子衍射的穿透能力小,散射厚度仅为 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm。电子衍射仪可以用来进行薄层的摩擦表面分析,例如研究金属的粘着磨损和摩擦副材料迁移现象。

X射线与电子束一样能够产生衍射斑点,其穿透能力大,散射层厚度可达到 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ cm。X射线衍射仪常用来对较厚的摩擦表面的结构分析,也有人用它研究润滑油添加剂在金属磨损中的润滑机理。

如上所示,通过表面观测考察材料磨损所采用的仪器如光学显微镜、扫描电子显微镜、X射线衍射仪等,它们可以对磨损表面的形貌以及磨损颗粒进行观测,但是无法提供包括材料亚表层在内的情况。在磨损过程中,材料亚表层发生很大的变化,使用上述这些表面成像仪器,需将样品做剖面分析才能获得亚表层信息,这样就破坏了样品原有的磨损特征。

近年来,新研制的声学显微镜能无损地揭示材料亚表层的结构,不需要把样品剖开,从而保留亚表层的原始特征,这对材料磨损的研究具有广泛应用前景。下面介绍声显微镜的基本原理和应用^[3,4]。

图 14-13 给出了反射式声学显微镜的基本原理。它由四部分构成:换能器-透镜、信号检测电路、机械扫描系统和成像显示系统。其中,换能器-透镜是核心部分,其作用是超声波激励和聚焦,包括压电换能器、石英阻尼杆以及球形声透镜。阻尼杆的一端为抛光表面并镀上金属膜,膜上是压电换能器;另一端被磨成球形以形成一个声透镜。高频电信号激励压电换能器产生超声波,超声波以纵波的形式在阻尼杆中传播,最后被声透镜聚焦,通过耦合液(一般是水)到达样品表面和内部。当超声波遇到样品中不连续的介质或缺陷例如空洞、裂纹、夹杂等将发生反射,反射信号被换能器接收并转换为电信号,经检波、放大作为灰度信号。对样品台上的样品逐点进行扫描,采集每一点的电信号就构成了样品在该扫描区域的声显微图像,它的分辨率为 $5\mu\text{m}$ 。

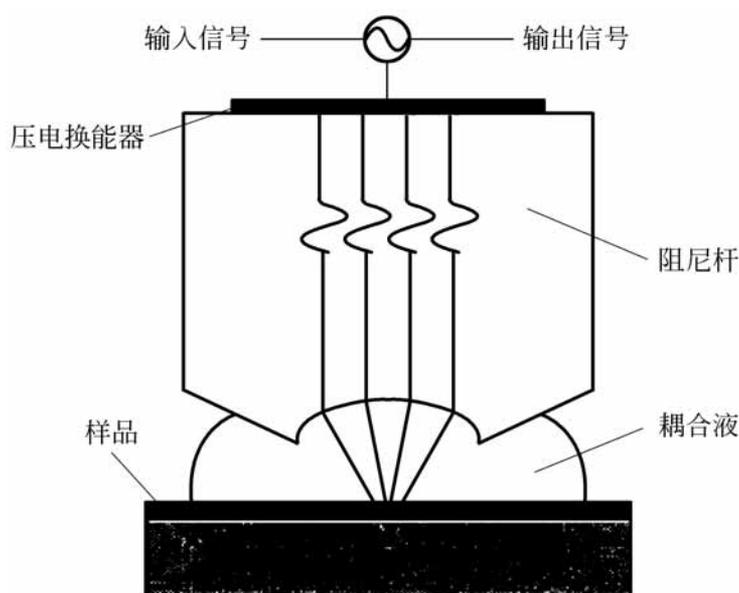


图 14-13 声学显微镜原理图

目前扫描声学显微镜有两种成像模式,即表层/亚表层成像和内部成像。图 14-14(a)给出了表层/亚表层成像的原理图。当声波入射样品的入射角大于产生瑞利波的临界角时,会在样品表面激励起瑞利波。瑞利波是表面波,传播深度为一个波长,瑞利波在传播的过程中向外辐射能量,以瑞利角射出,故而又称之为泄漏瑞利波。这样,接收射出的泄漏瑞利波就得到了样品的一个瑞利波波长深度的亚表层信息。图 14-14(b)示出了内部成像的原理图。内部成像采用较低的频率和较大的镜头曲率,在样品表面不激发瑞利波,纵波经透镜汇聚到样品一定深度,然后接受该深度范围内传回的声波以得到样品该深度内的图像。但由于受频率的限制,分辨率一般不高。

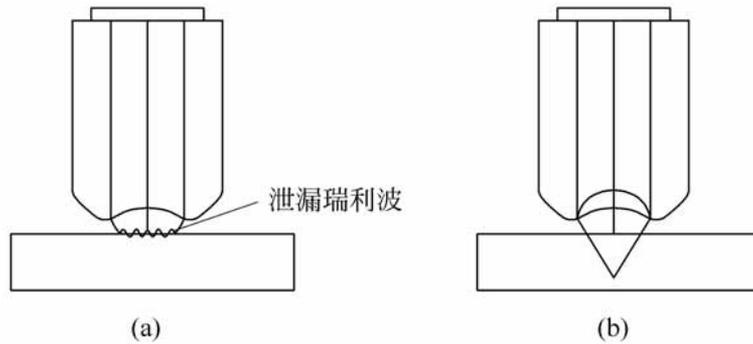


图 14-14 声学显微镜成像原理

(a) 表层/亚表层成像; (b) 内部成像

图 14-15 为彭海涛等人^[4]通过声学显微镜获得的三种涂层亚表层的声显微图像。图像中存在白和黑两种区域,白区为金属合金,黑区为氧化物与合金的混合组织。

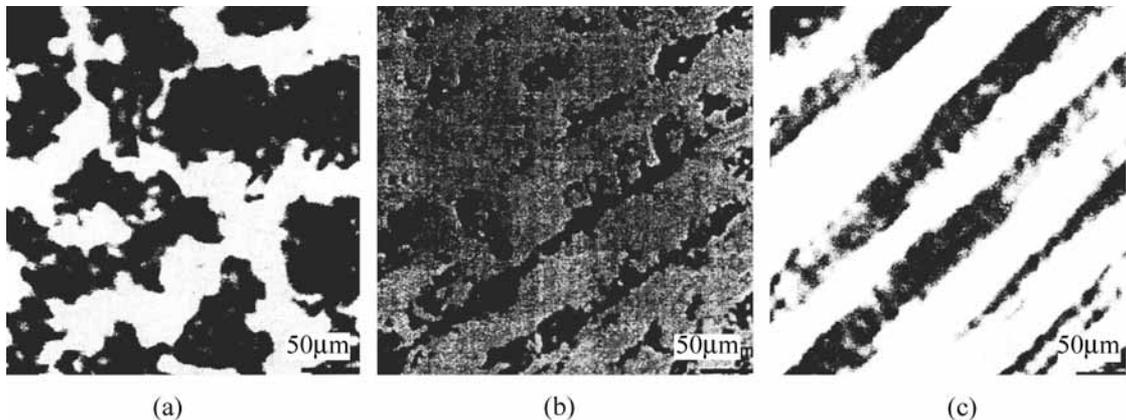


图 14-15 三种涂层亚表层的声显图像

($f = 150\text{MHz}$, $z = -25\mu\text{m}$, $A = 2.5\mu\text{m} \times 2.5\mu\text{m}$)

(a) $\text{CoCrMoSi} + \text{Al}_2\text{O}_3 \text{TiO}_2$; (b) $\text{CoCrMosi} + \text{Fe}_3\text{O}_4$; (c) 碳钢

应当指出,声学显微镜可以无损地实现对材料亚表层组织结构的观测,目前应用尚处于初期阶段,还需要其他手段验证和补充。可以预计,随着

功能不断发展和完善,声学显微镜在磨损过程研究方面必将成为重要工具之一。

14 3 3 表面化学成分的分析

摩擦表面化学成分的分析对摩擦磨损机理研究十分重要,因为表面层的化学成分与分布特点反映了摩擦副表面间的化学反应和元素迁移。下面介绍几种常见的分析方法。

1. 能谱分析

将电子束、X 射线或真空紫外光束照射到试件表面,表面受到激发而产生俄歇电子或光电子,测量和分析这些电子的能量即可确定表面的化学成分。

俄歇电子能谱仪是通过电子束使表面激发而产生二次放射的俄歇电子。各种元素的俄歇电子的能量不同,收集这些电子进行能谱分析能够研究摩擦表面上二三层原子厚度内的组织成分变化。如果将俄歇电子能谱仪配置电子束扫描,将能够对表面更大范围内的成分和元素分布作定量分析。

X 射线光电子能谱仪是用 X 射线激发表面产生光电子,并进行能谱分析。它适用于研究表面膜的形以及添加剂对磨损的影响。

2. X 射线显微分析(电子探针)

通过电子束对试件表面的作用,使各元素发生相应的射线谱,根据不同特征的 X 射线的波长和强度来确定表面组织成分和含量。通常将电子探针与扫描电镜组合成扫描式电子探针,它不仅可以对微米范围内的成分作定点测量,还能够使电子束在试件表面作线或面的扫描,分析表面的元素分布。

应当指出,随着电子技术和超高真空技术的发展,将各种表面分析技术结合而组成多功能的测量仪器,实现同时对表面的形貌、组织结构和化学成分进行全面的分析,这将在摩擦磨损机理研究中起着更加重要的作用。

14 4 磨损状态的检测

在大型成套机组或者重要的机械系统中,要求在运转过程中对于关键摩擦副的磨损状态进行检测,及时预报它们的工作状况,以便采取有效的维

修措施,避免机械装备的突然损坏或发生重大事故^[5,6]。

通常采用物理的或化学的检测方法,定期地或连续地显示机械装备的磨损状态。常用的检测方法有以下几种。

1. 铁谱分析

20世纪70年代出现的铁谱分析是将润滑油所含的磨屑进行分离和分析的技术。由于大多数机械的磨损过程是形成磨屑,观察润滑油中磨屑的尺寸、形状和组成就可以判断磨损的形式、磨损剧烈程度和磨损发生的部位。

如图14-16所示,从润滑油循环系统中抽取少量的润滑油,将油样在低而稳定的速度下流经铁谱仪中的磁极,在磁场力作用下制作铁谱片。由于液体在倾斜的玻璃片上向下流动,油的流动仅限于在玻璃片的中央狭带位置。又因为玻璃片离磁极面的距离在顶部略小于出口端,随着颗粒向下流动,磁场梯度增加,这将使作用在颗粒上的粘性力和磁场力的总效果将按磨屑颗粒尺寸分开。较大的颗粒首先沉积下来,较小的颗粒在玻璃片尾部沉积。当一定量的润滑油流经玻璃片后,经清洗及固定过程来除去多余的油,并使颗粒定位,即完成铁谱片的制作。

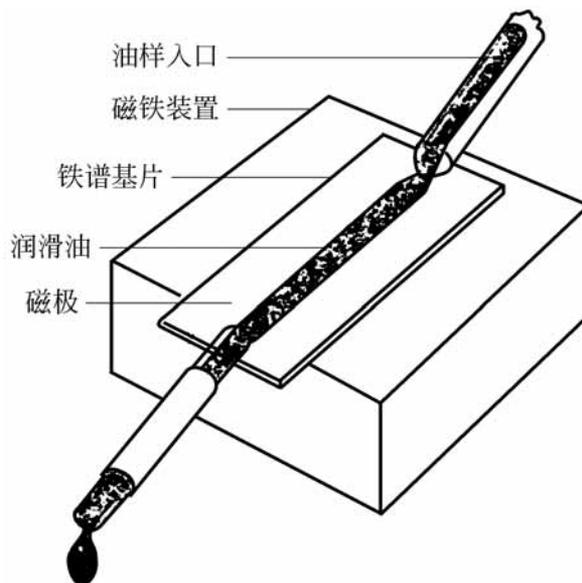


图 14-16 铁谱测量原理

图14-17为一典型的铁谱片,其中沉积的颗粒表现为沿玻璃片中间的一条暗带。在典型情况下,沉积物总质量约为 $10\mu\text{g}$ 。用铁谱仪沿玻璃片不同位置处测量其光的密度即可估计出磨屑的密度和分布。

根据大量的检测结果,将磨屑图像汇编成标准的铁谱图册用作测量时

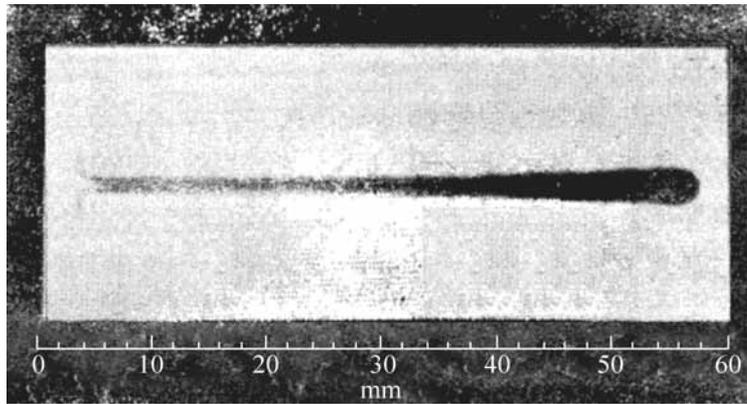


图 14-17 典型铁谱片

参考。利用光学显微镜对制成的铁谱片进行观察,并与铁谱图对照即可根据磨屑的形状和分布密度确定磨损的状态。例如正常磨损的磨屑一般呈片状;磨粒磨损或犁沟作用形成的磨屑具有螺旋状或卷曲状;而球形磨屑则是表面接触疲劳磨损产生的。对于氧化磨损或腐蚀磨损,它们的磨屑是由化合物组成的,在有色光作用下显示出不同的颜色。此外,磨屑的浓度说明各种磨损的严重程度。图 14-18 是由光学显微镜观察到球状和切削型的两种磨屑形状。

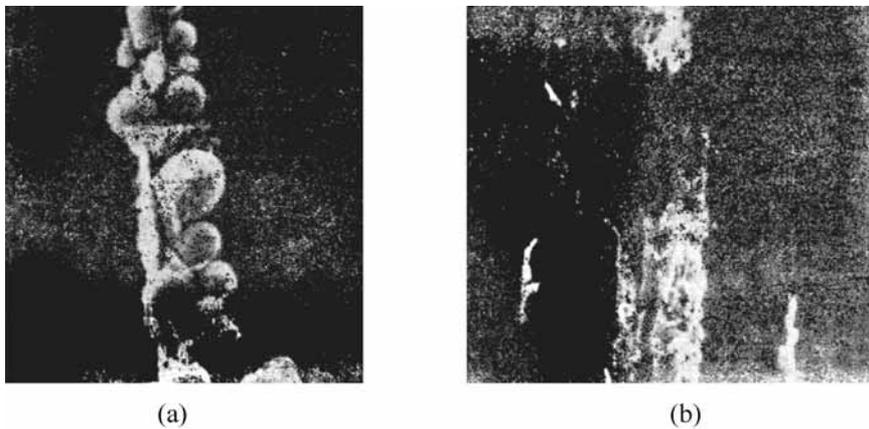


图 14-18 铁谱片上的磨屑的形状

(a) 球状磨屑; (b) 切削型磨屑

2. 光谱分析

光谱分析是利用组成物质的原子在一定条件下能发射具有各自特征的光谱的性质,用来分析润滑油中的金属含量。

在一般情况下,原子处于稳定态。当得到一定能量以后,原子被激发。处于激发态的原子是不稳定的,在极短的时间内转化为稳定态,同时将多余的能量以光的形式释放出来而产生光谱。不同的原子所产生的光谱不同,

因此通过光谱分析可以测定润滑油中金属元素的含量变化,从而预测磨损状态。

光谱分析方法通常应用于铁路机车和船舶柴油机以及航空发动机的磨损检测,以防止故障发生。

3. 润滑油成分分析

采用理化分析仪器对于润滑油的酸度、添加剂浓度、不溶物质的含量和组成进行测定,也是分析磨损状态的方法。

4. 机械振动或噪声分析

通过机械设备在运行中的振动或噪声测定是鉴别磨损状态变化的重要手段,它可以实现连续检测。将振动或噪声测量的信号经过频谱分析等处理,还能够预示严重磨损的出现。

这种间接检测的方法在低噪声零件中应用的效果较好,例如滑动轴承。而在诸如齿轮传动等产生较大振动和噪声的零件中应用时,往往难以将零件本身的振动与因磨损恶化所产生的振动区分开来而影响检测的可靠性。

5. 润滑状态的分析

对于全膜润滑的摩擦副,采用传感器测量摩擦表面之间的油膜厚度、摩擦系数、接触状况以及表面温度等参数来检测润滑状态。

在以上的检测系统中,当采用电测技术时,可以进行连续测量,甚至于实现自动控制作用。例如当油膜厚度或温度达到临界数值时,通过自动控制系统及时调节工作参数,以保证继续正常工作或者停机,以防止事故发生。

14.5 磨损失效分析

在实际生产中,磨损失效分析是一个十分重要的问题。为了准确地判断发生磨损失效的原因和决定对策,需要具有广泛的专业知识和丰富的经验,本节仅扼要地介绍磨损失效分析的一般方法。

为了确定产生磨损失效的原因,通常从以下几个方面进行分析。

1. 现场调查

应尽可能到失效现场收集资料,了解失效过程和有关情况,主要有以下四方面:

- (1) 被磨损零部件的实物和图纸,如果可能应收集未使用的相同零件,以便分析对比。
- (2) 磨损失效零部件所在系统的工作情况,包括载荷、速度、温度等参数,以及破坏过程和部位。
- (3) 润滑油供应系统和技术性能。
- (4) 维护保养和操作规范等。

2. 润滑油及其供应系统

着重检查以下问题:

- (1) 润滑油的品种和性能。检查油的粘度和粘温特性;检查润滑油的灰分即完全燃烧后剩余的残渣以及所用添加剂中 Zn, Ba 和 Ca 的含量。必要时进行光谱分析确定润滑油的化学组成和添加剂含量。
- (2) 润滑油变质和污染程度。检查润滑油的酸度或碱度,以及不溶物质、水分、乙二醇、污染物等的含量。检查润滑油中是否含有过量的、大块的或者异常的磨屑,必要时进行铁谱分析,检查润滑油的更换周期。
- (3) 润滑油供应系统的工作状况。包括油泵和过滤器的工作性能以及供油系统的流量。

3. 被磨损零部件

- (1) 分析零件开始破坏的位置和破坏的发展过程。
- (2) 确定主要磨损形式。采用光学显微镜观察摩擦表面,根据磨损特征判断磨损形式。用切截剖面观察疲劳裂纹和白层结构等组织变化。对于大型零件不便在实验室分析,可以采用复印技术即用专门的聚合物贴附在磨损表面,将破坏部位的形貌详尽地复印出来,供在实验室中观察和分析。
- (3) 材料选择的合理性分析。采用能谱技术分析材料的化学成分和含量,检查磨损前后表面形貌和硬度等机械性能的变化。用切截剖面观察非金属夹杂物尺寸和分布情况。

4. 设计和运行情况

分析失效零部件设计的合理性。对于全膜润滑的摩擦副,核算油膜厚度、膜厚比、润滑油流量、表面压力以及工作温度。了解磨损失效前后载荷、速度、温度以及振动、噪声的变化情况。

通过以上的观察和分析,有助于确定造成零部件失效的主要磨损形式和原因。一般说来,磨损失效最常见的原因是:

- (1) 摩擦副材料或润滑剂选择不当;
- (2) 润滑油供应系统工作不正常或润滑油变质和污染;
- (3) 工况条件超过设计参数所允许的范围;
- (4) 制造和安装误差造成的恶劣工作条件。

Shell 石油公司的科技人员经过多年的调查研究,总结出磨损失效的统计表,如表 14-1 和表 14-2 所示。

表 14-1 失效形式统计

| 失 效 形 式 | 数 量 |
|---------------------|------|
| 腐蚀(电腐蚀、弱有机酸腐蚀、低温腐蚀) | 408 |
| 沉积 | 266 |
| 磨损 | 146 |
| 高温腐蚀 | 136 |
| 疲劳折断 | 155 |
| 表面接触疲劳磨损 | 149 |
| 粘着磨损、擦伤 | 83 |
| 断裂 | 102 |
| 浸蚀 | 70 |
| 气蚀 | 41 |
| 磨粒磨损 | 40 |
| 胶合磨损 | 26 |
| 熔融软化 | 24 |
| 微动磨损 | 18 |
| 其他 | 55 |
| 总计 | 1719 |

表 14-2 失效零部件统计

| 零 部 件 | 数 量 |
|--------------|------|
| 滑动轴承、滚动轴承 | 320 |
| 缸套与活塞环 | 241 |
| 燃烧装置零件(如排气阀) | 150 |
| 海水装置 | 110 |
| 燃油系统零件 | 73 |
| 锅炉、加热器及其管道 | 72 |
| 透平叶片 | 64 |
| 齿轮传动 | 55 |
| 燃料输送和储存设备 | 41 |
| 机架、底座 | 38 |
| 润滑系统零件 | 31 |
| 压缩机、透平增压器 | 30 |
| 冷却系统零件 | 15 |
| 其他 | 138 |
| 总计 | 1378 |

参 考 文 献

- [1] 温诗铸. 摩擦学原理. 北京:清华大学出版社, 1990
- [2] Weiqiang Wang, Shizhu Wen. In situ observation and study of the unlubricated wear process. Wear, 1993, (171): 19 ~ 23
- [3] Wang Yinglong, Jin Yuansheng, Wen Shizhu. The inspection of the sliding surface and subsurface of plasma-sprayed ceramic coating using scanning acoustic microscopy. Wear, 1989, (134): 399 ~ 411
- [4] 彭海涛等. 三种等离子喷涂涂层的声显微镜观察. 摩擦学进展, 1999, 4(2): 1 ~ 9
- [5] 樊建春, 林富生, 温诗铸等. 设备状态监测中的摩擦学应用工程. 润滑与密封, 1997, (4): 13 ~ 14
- [6] Yuxiang Huo, Darong Chen, Shizhu Wen. Monitoring of the wear condition and research on the wear process for running equipment. Tribology Transactions, 1997, 40(1): 87 ~ 90

第三篇

应用摩擦学

第 15 章

微观摩擦学

微观摩擦学(micro tribology)或称纳米摩擦学(nano tribology)、分子摩擦学(molecular tribology),它是在原子、分子尺度上研究摩擦界面上的行为、损伤及其对策^[1]。

纳米摩擦学在学科基础、研究方法、实验测试设备和理论分析手段等方面都与宏观摩擦学研究有很大差别。微观摩擦学实验研究仪器主要是扫描探针显微镜,它包括原子力显微镜、摩擦力显微镜以及专门的微型实验装置。在理论分析方面,宏观摩擦学通常是根椐材料表面的体相性质在摩擦界面上的反应来表征其摩擦磨损行为,并应用连续介质力学,包括断裂和疲劳理论作为分析的基础。而纳米摩擦学则是由原子、分子结构出发,考察纳米尺度的表面和界面分子层摩擦学行为,其理论基础是表面物理和表面化学,采用的理论分析手段主要是计算机分子动力学模拟。

本章对微摩擦、微接触与粘着以及微磨损现象进行介绍。另外,还将对分子膜润滑等内容加以讨论。

15.1 微观摩擦

15.1.1 宏观摩擦与微观摩擦

Bhushan 和 Koinkar^[2] 分别采用球-盘摩擦实验机和摩擦力显微镜 FFM,对材料的宏观摩擦系数和微观摩擦系数进行了对比实验,如表 15-1 所示。宏观摩擦系数测定采用直径为 3mm 的铝球与试件相对滑动,滑动速度为 0.8mm/s,载荷为 0.1N,相应的 Hertz 应力为 0.3GPa。微观摩擦系数测定为 FFM 的探针与试件滑动摩擦,探针材料为 Si₃N₄,针尖半径约

为 50nm, 滑动速度为 $5\mu\text{m/s}$, 探针扫描面积为 $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$, 载荷为 $10 \sim 150\text{nN}$, 相应的 Hertz 应力为 $2.5 \sim 6.1\text{GPa}$ 。

表 15-1 宏观与微观摩擦系数

| 试件材料 | 粗糙度 R_a/nm | 宏观摩擦系数 | 微观摩擦系数 |
|-----------------------|---------------------|--------|--------|
| Si(111) | 0.11 | 0.18 | 0.03 |
| C ⁺ -注入 Si | 0.33 | 0.18 | 0.02 |

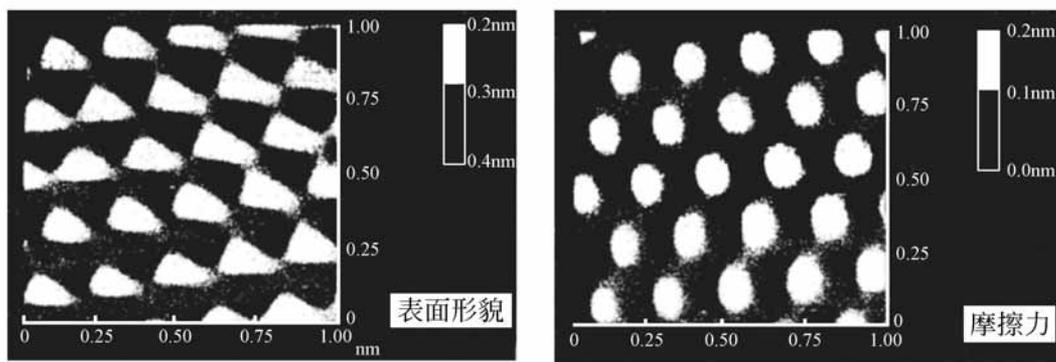
表 15-1 说明, 微观摩擦系数远远低于宏观摩擦系数。Bhushan 等认为, 在纳米摩擦学实验中, 根据微小尺度和极轻载荷测量的材料硬度和弹性模量都比宏观测量的数值高, 因而微观摩擦过程中, 材料的磨损极少, 从而摩擦系数低。同时, 微观摩擦中, 嵌入表面的磨粒少, 也减少了犁沟效应对摩擦力的影响。实验还证明, 当载荷增加时, 微观摩擦系数和微观磨损都显著增加, 因而经典的 Amontons 公式中摩擦系数与接触面积和载荷无关的结论显然不符合微观摩擦规律。他们还进一步推论, 在轻载荷作用下微小面积的滑动表面将具有实现极低摩擦和零磨损的可能性。

15.1.2 微观摩擦与表面形貌

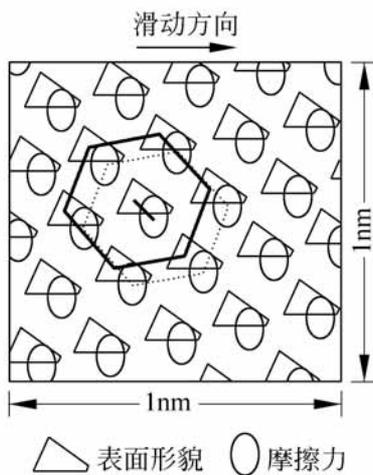
Ruan 和 Bhushan^[3] 利用摩擦力显微镜 FFM, 对纯度 99.99% 的高定向热解石墨 HOPG (highly oriented pyrolytic graphite) 的新劈开表面进行了滑动摩擦实验。实验表明, 当探针滑过 HOPG 基片表面时, 由 FFM 测得的原子尺度的摩擦力变化与表面形貌变化相互对应, 并具有相同的变化周期。但是摩擦力变化峰值的位置相对于表面形貌峰值的位置存在一定的偏移。

图 15-1(a) 中, 左图给出在 $1\text{nm} \times 1\text{nm}$ 面积内新劈开的 HOPG 基片表面形貌变化的灰度图像, 右图是相同面积内摩擦力变化灰度图像。图(b) 是根据图(a) 中表面形貌和摩擦力灰度图像重叠在一起绘制的, 图中三角形和圆形符号分别对应形貌和摩擦力峰值的位置。由图看出, 形貌峰值的位置与摩擦力峰值的位置在空间存在很规则的偏移。分析表明, 摩擦力偏移是由粗糙峰的斜率造成的。

表面形貌还使得微观尺度的摩擦具有显著的方向性或称各向异性特征, 即沿不同方向滑动所得到的摩擦力大小不同。图 15-2 列出的实验结果说明了摩擦的方向性。图中, (a) 是根据 HOPG 摩擦力分布灰度图像绘制的, (b) 和 (c) 分别是沿 A—A 和沿 B—B 方向摩擦力的变化和平均值。显

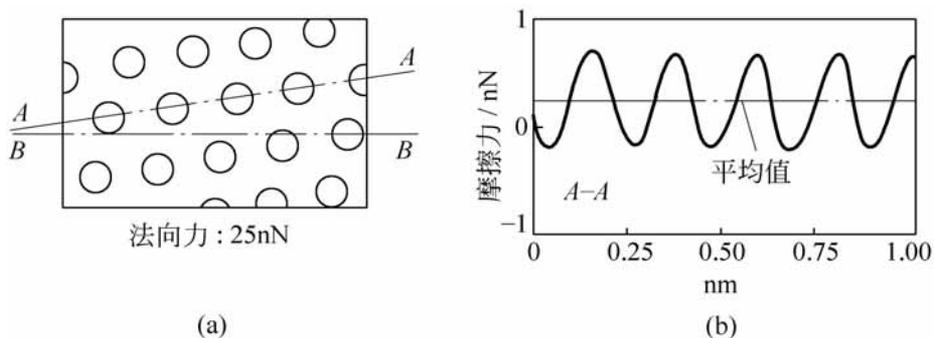


(a)



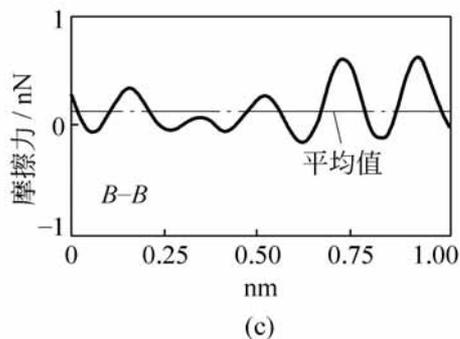
(b)

图 15-1 HOPG 微观摩擦图像



(a)

(b)



(c)

图 15-2 摩擦的方向性

然,沿 $A-A$ 方向的摩擦力大于沿 $B-B$ 方向的摩擦力。摩擦的方向性有时在宏观尺度的滑动摩擦中也能够观察到。

Ruan 和 Bhushan 根据图 15-1 所示的摩擦力变化与形貌变化具有相同的周期并相互对应的特征,提出微观摩擦的“棘轮(ratchet)模型”。探针滑过基片表面类似于棘爪沿棘轮齿缘的运动,从而得出粗糙峰斜率是决定摩擦系数的关键因素的结论。

微观摩擦力与粗糙峰斜率的相关关系已被用 Si_3N_4 探针与 HOPG 基片或单晶金刚石基片的 FFM 摩擦实验所证明。图 15-3 给出单晶金刚石表面在 $200\text{nm} \times 200\text{nm}$ 范围内粗糙峰高度、斜率和摩擦力分布的灰度图。金刚石表面经抛光处理,实验用法向载荷 50nN 。由图可知,摩擦力分布与粗糙峰斜率分布基本上相同,而与峰高关系不大。

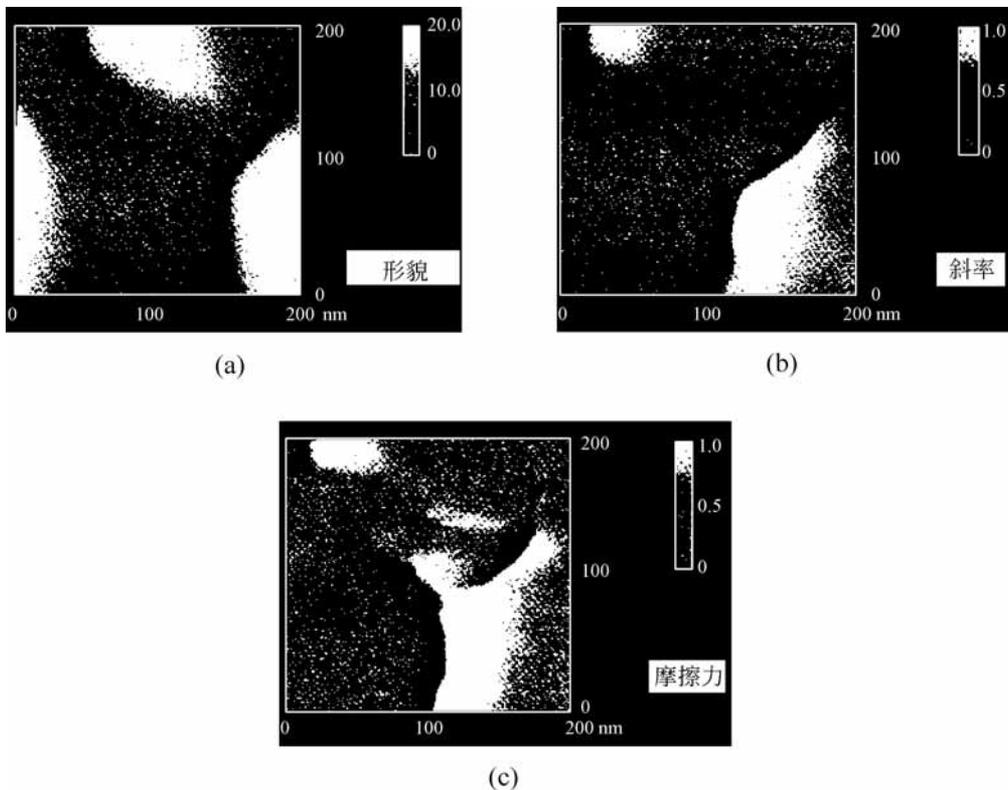


图 15-3 单晶金刚石微观摩擦

Ruan 和 Bhushan^[4] 采用同样的方法,对于 Si_3N_4 探针与热解石墨 HOPG 的摩擦与形貌关系作了进一步研究。探针在 42nN 的法向载荷作用下,以 $1\mu\text{m/s}$ 的速度沿石墨表面滑动。图 15-4 给出在 $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ 范围内表面粗糙峰高度分布和摩擦力分布的相应关系。由图可以看出, HOPG 基片的主要部分是原子尺度的光滑表面,它们的摩擦系数极低。而在表面上存在的若干条状形貌区域内,其摩擦系数骤然增加。

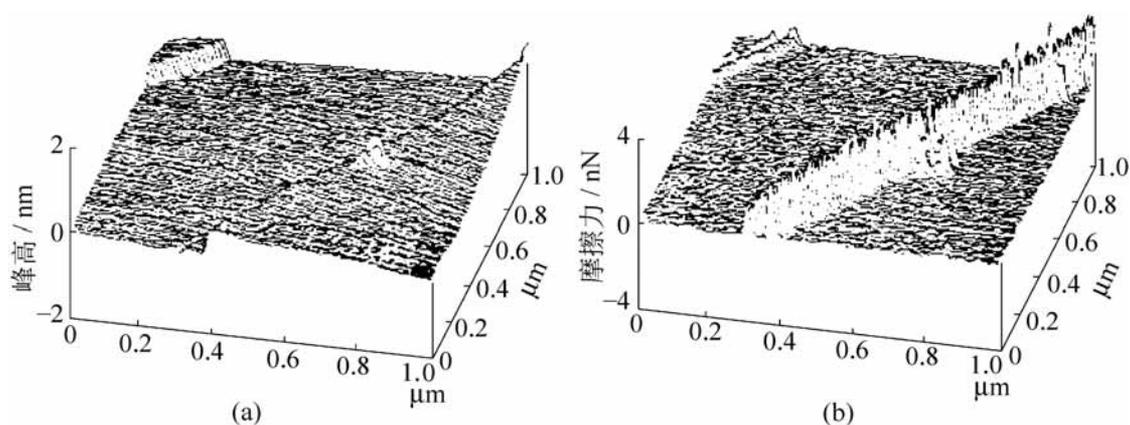


图 15-4 HOPG 微观摩擦

(a) 形貌; (b) 摩擦

为了考察条状形貌对摩擦的影响, 以及棘轮模型的适用性, Ruan 和 Bhushan 进一步分析了探针在往返滑动中粗糙峰斜率与摩擦力的对应关系, 如图 15-5 所示。

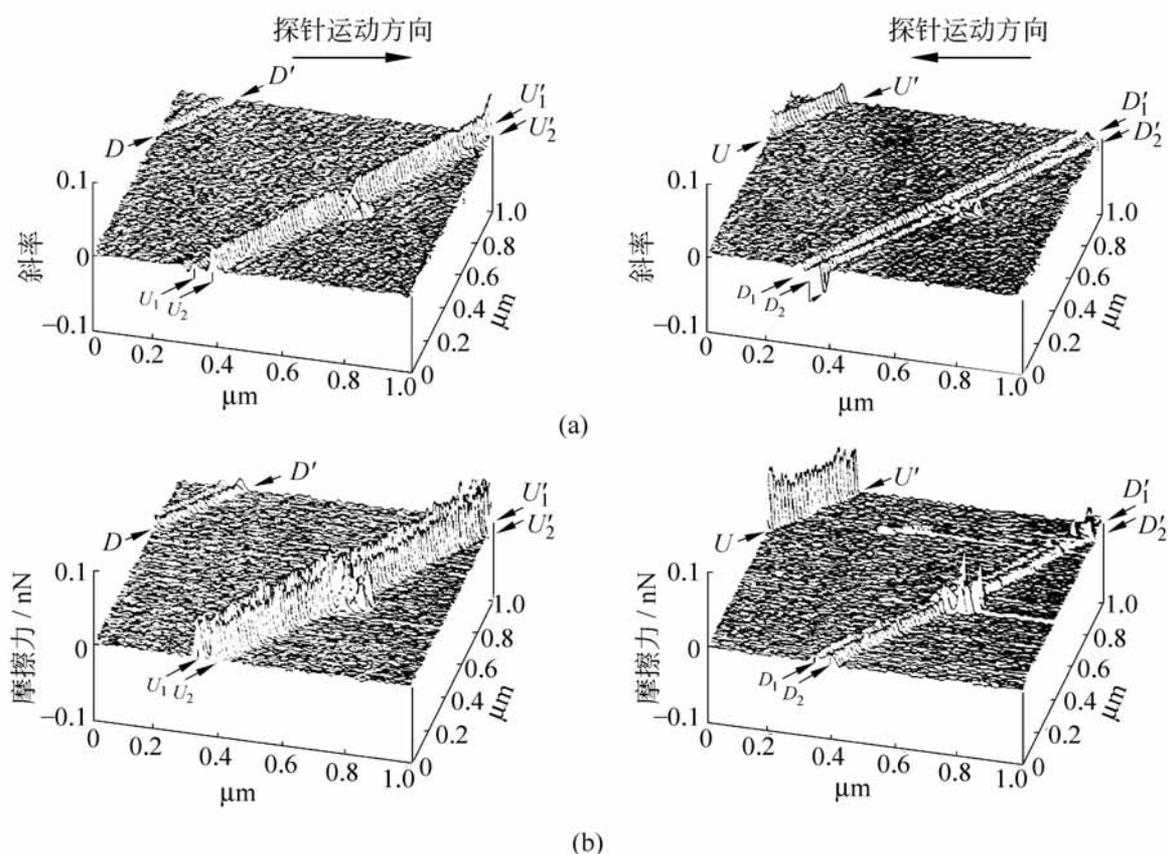


图 15-5 条形形貌斜率与摩擦力

(a) 表面斜率; (b) 摩擦力

图 15-5(a) 给出探针沿正反方向运动时表面粗糙峰斜率分布, 图 (b) 为探针沿正反方向运动的摩擦力分布。由左侧的两图对照可知, 在负斜率条状形貌 DD 处的摩擦力高于光滑表面的摩擦力; 而在正斜 $U_1 U_1$ 和 $U_2 U_2$

处,其摩擦力更高。同时还可以看出,虽然沿 $U_1 U_1$ 和 $U_2 U_2$ 的斜率差别很大,但它们的摩擦力却基本上相同。类似的情况也存在于右侧两图所表示的探针反方向滑动中。在正斜率条纹 UU 处摩擦力增加很大,但是在负斜率条纹 $D_1 D_1$ 和 $D_2 D_2$ 处,摩擦力也略高于光滑部分的摩擦力。此外,虽然 $D_1 D_1$ 和 $D_2 D_2$ 的斜率相差较大,而它们的摩擦力却几乎相等。

图 15-7 的实验结果说明,单纯用粗糙峰斜率来表征摩擦力大小的观点,对于经粗化处理的复杂形貌,特别是具有条状形貌的表面不能适用。通过电子显微镜对条状形貌区域分析表明,表面粗化造成摩擦力增加的原因有二:一是粗糙峰高度增加,同时表面较大部分的晶格方向改变,不再是(0001)平面;二是粗化处理使得条状区出现非晶碳。因此,粗化造成材料结构的改变是造成摩擦力增加的原因。

综上所述,石墨材料的滑动摩擦力与晶格方向密切相关,沿(0001)平面滑动具有最低的摩擦力。研究表明,其他材料也具有类似的性质,也就是说微观摩擦具有明显的各向异性特征。

15.1.3 犁沟效应与粘着效应

1. 犁沟效应

微观摩擦是在极轻载荷下分子光滑表面之间的摩擦。在这种条件下,粘着摩擦理论存在一些新的有待进一步研究的问题,例如:在分子光滑表面滑动中,犁沟效应的作用和材料转移行为;零载荷或者负载荷下的摩擦机理;粘着力为零时界面摩擦的起因等。

根据第 10 章所述的 Bowdon 和 Tabor 提出的粘着摩擦理论的摩擦力模型,一个硬粗糙峰在软表面滑动的摩擦阻力包含推动粗糙峰前方材料和分离粘着接触面积上的力。在考察犁沟效应时,通常是在排除粘着力的条件下测定摩擦系数 μ ,并以 μ 表示犁沟效应的强弱。分析表明,球形粗糙峰产生的犁沟摩擦系数取决于球形半径和压入深度,而锥形粗糙峰的犁沟摩擦系数只与锥顶角有关。

Guo 等人^[5]采用圆锥探针在氯化钠基片上滑动,观察到犁沟力随时间波动变化,探针前方的材料也出现不均匀移动,其对应于材料波动式的塑性变形,这是韧性材料犁沟过程的重要特征,也是引起滑动摩擦不稳定的原因之一。

Guo 等采用金刚石圆锥探针与硬的类金刚石碳膜涂层基片进行犁沟

实验得出,当载荷低时,涂层变形主要是塑性的。当在高载荷下滑动时,观察到表面断续地出现微小的断裂区,而且每一次断裂出现都伴随着摩擦力的突然下降。图 15-6 给出滑动过程中摩擦力的变化。图中符号 A 表示微观断裂发生时摩擦力的突然下降。

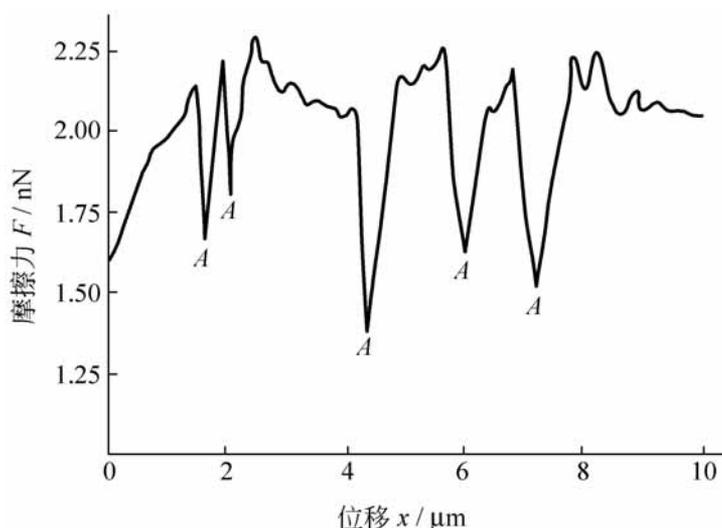


图 15-6 陶瓷材料脆性断裂

综上所述,在犁沟过程中,不同材料的力学行为不同,韧性材料产生波动式的塑性变形,而脆性材料则断续地出现微观断裂,其结果都导致犁沟力变化。

2. 粘着效应

Guo 等人^[5]采用摩擦力显微镜对高真空条件下的钨探针和金基片进行摩擦实验,发现明显的韧性行为和粘滑现象。他们根据 Bowdon 和 Tabor 的修正粘着摩擦模型中法向力(载荷)和切向力(摩擦力)联合作用下接触面积计算公式,以及接触面积和接触电阻关系式,分析计算了探针和基片在完全塑性接触和零载荷下滑动时摩擦力 F 与接触电阻 R 的关系。图 15-7 给出计算值和测量值对比,两者吻合较好。图中接触面积与接触电阻成反比,因此,随着接触面积增加摩擦力也增加的结论。由于是零载荷下的滑动,接触面积上只受到粘着力作用,因而摩擦力是由粘着效应产生的阻力。

在静接触中,表面间粘着力往往比外加载荷更为重要。图 15-7 再次表明,粘着力对于滑动接触行为的作用大于或者不亚于外加载荷的作用。实验证明,甚至在外加载荷为负值,例如 $P = -0.6\mu\text{N}$ 时,滑动中仍然出现一定的摩擦力。这是微观摩擦十分重要的特征。

为了深入揭示零载荷甚至负载荷下的摩擦行为和机理,用作实验的摩

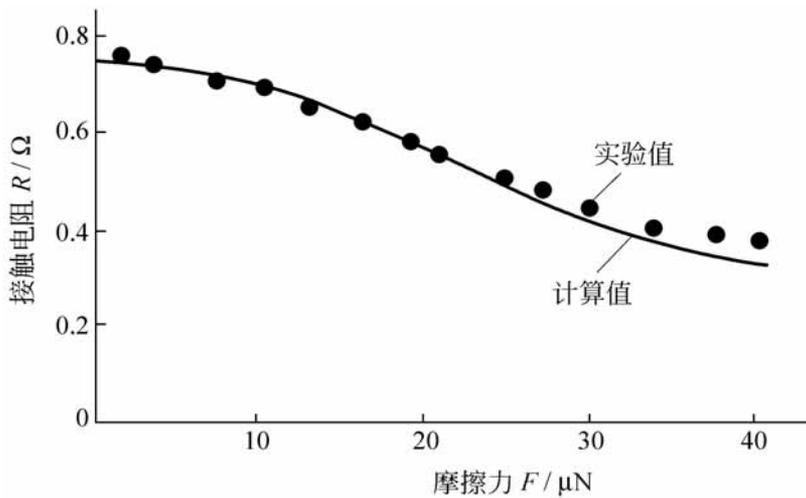


图 15-7 零载荷下摩擦

摩擦副材料应选择具有适当的粘着强度而又不至于产生表面损伤或材料转移,还应使滑动剪切发生在界面上。Pivin 等人^[6]采用金属铱(Ir)探针与共价化合物 Ni_3B 基片组成摩擦副,在高真空环境和负载荷 $-0.9\mu\text{N}$ 条件下进行摩擦实验。Ir 是硬金属材料,而 Ni_3B 是单晶状态,表面非常光滑,并具有导电性,可以采用测量接触电阻来计算接触面积。图 15-8 给出表面粘着过程中摩擦力和接触电阻(与接触面积成反比)随滑动位移的变化。

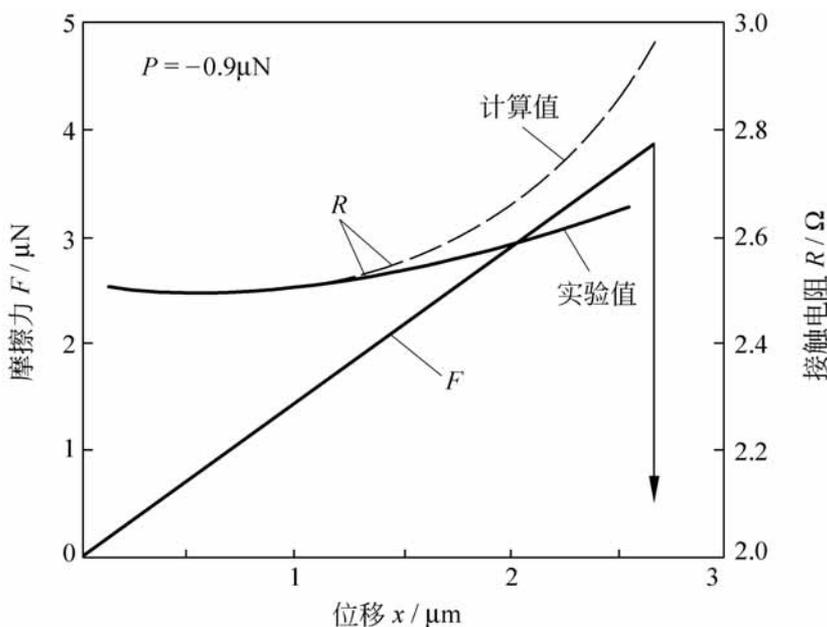


图 15-8 负载荷下摩擦

实验表明,负载荷下的滑动呈现强烈的粘滑现象。图 15-8 是在一次粘着过程中摩擦力和接触面积的变化,即摩擦力增加而接触面积减小。然而,图 15-8 与图 15-7 的实验结果相反,后者得出随摩擦力增加接触面积也增加的结论。

15.2 微接触与粘着现象

15.2.1 固体表面的微接触

1. 零载荷接触

1981年, Pollock 根据高真空条件下探针与基片的微观接触实验得出, 对于某些材料的组合, 在零载荷条件下有可能出现表面接触和表面变形。图 15-9 给出不同材料组合的接触面积与载荷之间的关系。横坐标为外加载荷 P ; 纵坐标为接触电阻 R , 它与接触区半径成反比。

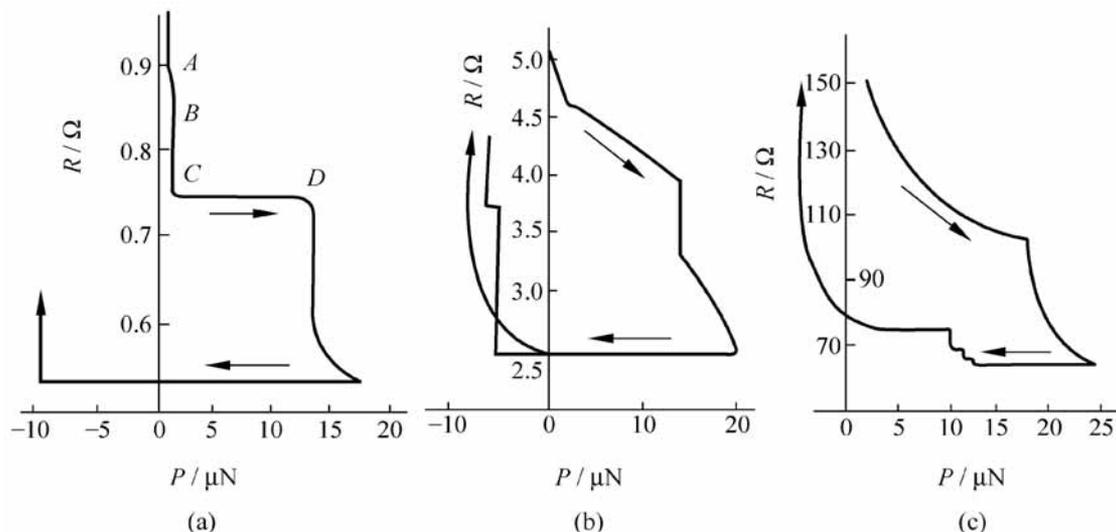


图 15-9 接触面积与载荷

图 15-9(a) 的材料组合为钨探针和金基片, 材料经离子腐蚀净化和接近熔点温度的退火处理。图中 A 和 B 部分显示在载荷极小或零载荷条件下, 接触电阻迅速降低即接触面积增大到一定数值。这是由于表面粘着能引起的表面接触和塑性变形。图 (b) 的材料也是钨探针和金基片, 实验前预先暴露在氧气中, 表面受到污染, 此时零载荷的接触不明显。图 (c) 为钨探针与 Ti_4O_7 基片, 实验表明无零载荷接触出现, 而且分离接触的载荷非常小, 说明其粘着能较低。

上述实验表明, 界面上的粘着能和表面力对于表面接触和变形起着重要影响, 不同材料组合的粘着能大小不同, 表现出不同的接触状态。因此, 在表面接触和变形研究中必须考虑它们的影响。特别是在纳米摩擦学研究中, 粘着能和表面力的作用至关重要。

2. 弹性、弹塑性和塑性接触

Pollock 等人^[5]将宏观力学中如硬度、弹塑性、韧性等概念引入微观接触分析,推导出相关的近似公式。

将表面力 S 的作用等效为载荷作用。根据几何模拟和弹性模拟条件,可以将两个粗糙表面的接触等效为高度随机分布的若干个弹性半球体与刚性平面的接触。为了研究方便起见,通常只分析单个粗糙峰之间的接触。对于半径为 r 的弹性半球体与刚性平面相接触,在外加载荷 P 作用下的接触圆半径 a 应当是总载荷 $(P + 2S)$ 作用下的接触圆半径。这样,由 Hertz 弹性接触理论可以得到考虑表面力作用的弹性接触的修正公式为

$$P + 2S = K \frac{a^3}{r} \quad (15-1)$$

需要说明,式(15-1)与 1971 年 Johnson、Kendall 和 Roberts 首次考虑表面能作用提出的弹性接触公式(通常称为 JKR 公式)相同。式(15-1)表明,考虑表面粘着能影响计算的接触面积将大于经典 Hertz 弹性接触理论的计算值,这意味着与接触面积相关的所有摩擦磨损性能都将相应增加。

随后,根据半球体与平面接触的应力场计算,求得接触中心轴上开始出现塑性变形时的近似关系式为

$$P + 1.5S = 1.1 a^2 Y \quad (15-2)$$

式中, Y 为弹性极限。

当接触载荷 P 满足式(15-2)关系时,即开始进入弹塑性接触状态。

如果不考虑粘着能的影响,由经典接触理论得出:当塑性变形区扩展到接触表面即达到完全塑性接触时,接触圆半径 a 的近似值为

$$a = 60r \frac{Y}{E} \quad (15-3)$$

在考虑粘着能的影响下,根据经典的塑性接触分析提出塑性接触关系式,即

$$P + 2wr = a^2 H \quad (15-4)$$

式中, H 为硬度; w 为粘着能。

当式(15-3)和式(15-4)同时得到满足时即达到完全塑性接触状态。由以上公式可以看出,甚至在 $P = 0$ 即零载荷条件下,由于粘着能 w 的存在也能够导致接触表面产生塑性变形。

15.2.2 固体粘着与表面力

1. 固体粘着现象

关于固体表面粘着微观机理最有影响的研究报告是 1990 年 Landman 和 Luedtke 等人^[7]提出的。他们采用分子动力学模拟研究了硬的镍探针与软的金基片之间法向趋近与分离过程。结果发现,当探针以准稳态方式慢速向下趋近基片表面达到 0.4nm 时,探针移动开始出现不稳定,同时,在表面力作用下金基片的表面逐渐向镍探针鼓起。随后,金晶体的原子突然在极短时间内迅速向上跳跃,在 10^{-12} s 内金原子向镍探针跳动距离 0.2nm。进而两表面形成粘着接触,即在探针表面形成单分子的金膜。这种现象是由于探针和基片的表面能不同引起的,有如固体表面被液体润湿一样。

当探针继续向下移动而压入金基片过程中,探针表面粘附的金原子逐渐增多,金基片的晶格产生滑移和缺陷,此时金材料由弹性变形转变为塑性变形。

当探针反方向移动即向上分离时,与探针相连的基片材料发生韧性拉伸和颈缩,呈现出明显的塑性流动和材料转移。进而形成原子尺度的连接探针和基片的金丝,连接丝仍然保持晶体状态。最后连接丝断裂,探针与基片完全分离,分离后的金基片表面出现损伤痕迹,而镍探针表面粘附金材料。

2. 粘着能与表面力

如图 15-10,当固体 A 的表面 a 与固体 B 的表面 b 相互粘着接触而构成界面 **ab** 之后,如果施加外力将该粘着界面分离,并将两固体移开相距无限远,则外力在单位面积上所作的功定义为粘着功或称 Dupré 粘着能,以 w 表示。

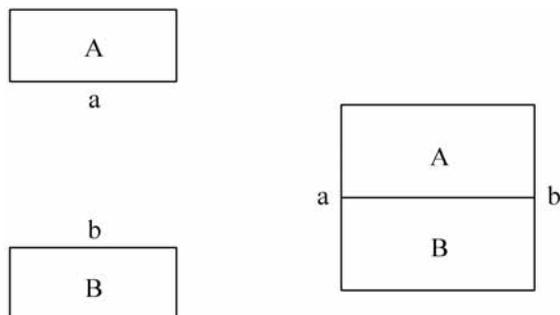


图 15-10 固体接触与分离

根据表面物理可以得到

$$W = \gamma_a + \gamma_b - \gamma_{ab} \quad (15-5)$$

式中, γ_a , γ_b 分别为两固体表面 a 和 b 的自由能。自由能的定义为: 使表面增加单位面积所需要做的功或能量。还可以理解为在单位面积上使分子由固体内部移动到表面所需要做的功或能量。由此可见, 处于表面的分子比固体内部的分子具有更高的能量。 γ_{ab} 为界面能, 它可以定义为使界面 ab 扩大单位面积所需要做的功或能量, 也可以理解为在单位面积上表面 a 的分子或者表面 b 的分子越过界面到另一个表面上所需做功或者能量。二者在数值上是相等的。

事实上, Dupré 粘着能表示分离粘着表面时外加拉力克服两表面之间的吸力所作的功。若令接触面上总粘着能为 E , 在拉力 P 作用下的位移为 s , 则表面力 S 为

$$S = - \frac{E}{s}$$

通常认为工程表面接触是粗糙峰之间的接触, 通过几何模拟可以将粗糙峰的接触当量为球体与平面的接触, 其接触面积是正圆, 因而在接触力学计算中属于轴对称问题。在纳米摩擦学中, 分析原子尺度的接触问题也属于接触面积为正圆的轴对称接触。此时单个接触点的面积通常为 $0.01 \mu\text{m}^2$, 因此, 在扫描探针显微镜实验中, 采用的金属或陶瓷探针尖端半径应为 $0.3 \mu\text{m}$, 施加的载荷为 100nN 。

如果接触圆的半径为 a , 接触圆上的总粘着能则为 $E = \pi a^2 w$ 。根据能量平衡条件, 对于轴对称接触问题, 式(15-5)推导出表面力的公式为

$$S = \frac{3}{2} w K a^{3/2} \quad (15-6)$$

其中, K 为当量弹性常数。

式(15-6)中粘着能 w 的数值可以根据 A、B 两固体相在界面上的作用势函数来计算, 它等于把两固体相表面 a、b 上的分子从接触状态分离并移动到无限远处所需要做的功。假设两固体相界面的作用势函数 $\gamma_{ab}(r)$ 满足几何平均规律, 即

$$\gamma_{ab}(r) = [\gamma_a(r) \cdot \gamma_b(r)]^{1/2}$$

这里, r 为位置坐标; $\gamma_a(r)$ 和 $\gamma_b(r)$ 分别为两固体相表面 a 和 b 的势函数。

经过推导可以求得粘着能与表面自由能之间的关系, 即

$$w = 2 (\gamma_a \gamma_b)^{1/2} \quad \text{为常数}$$

由上式求得粘着能以后,就可以由式(15-6)确定表面力。

15.3 微观磨损

15.3.1 微观磨损实验

微观磨损是在极轻载荷作用下产生的表面原子分子层的损伤,其磨损深度通常在纳米量级,有时也称纳米磨损。微观磨损实验主要采用原子力显微镜 AFM、摩擦力显微镜 FFM 或者其他专门研制的纳米磨损实验机。磨损形成大都是通过锥形探针在法向载荷作用下沿基片即被试材料的表面上滑动,由纵向扫描与横向步进相组合构成二维磨损平面,即探针在基片表面每次沿纵向滑动一定行程后,沿横向移动一个微小步距,再重复纵向滑动。

通常纳米磨损测量和表征方法与宏观磨损不同,根据失重来测量磨损的方法不能用来表示纳米磨损量。在微观磨损研究中,根据试样表面品质的不同,可以采用磨损深度或者极限磨损次数来表示材料的磨损性能或者表面涂层的耐磨损寿命。对于光滑表面,可以根据磨损表面高度变化来确定磨损深度,并用它表征材料的抗磨损性能。但是对于粗糙表面,通常采用磨去一定厚度的表面层所需极限磨损次数来衡量材料的抗磨性能。

为了合理选择纳米磨损实验采用的工况参数,Jiang 等^[8]对于探针载荷、磨损次数、纵向滑动速度和横向移动步距等对磨损深度的影响进行了实验研究。实验采用金刚石探针与硅基片上用 CVD 沉积厚度 800nm 金膜表面对磨,由于试样表面非常光滑,因此采用磨损深度表示抗磨损性能。图 15-11 给出滑动速度 $3.06\mu\text{m/s}$,步距 30nm 条件下,经 3 次磨损后金膜表

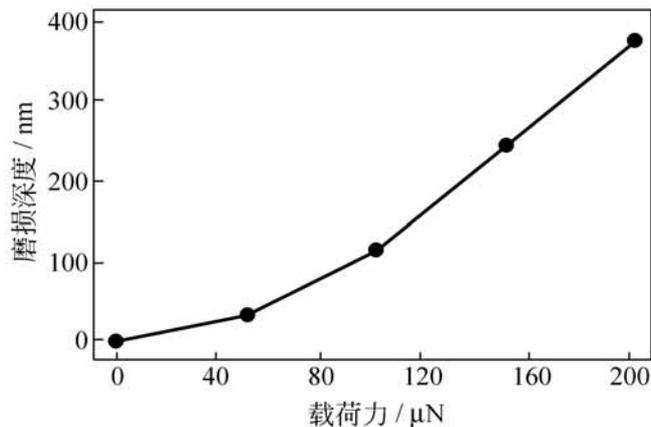


图 15-11 载荷与磨损深度

面的磨损深度与载荷的关系。图 15-12 表示在不同载荷下,金膜表面磨损深度随磨损次数的变化,实验条件与图 15-11 相同。

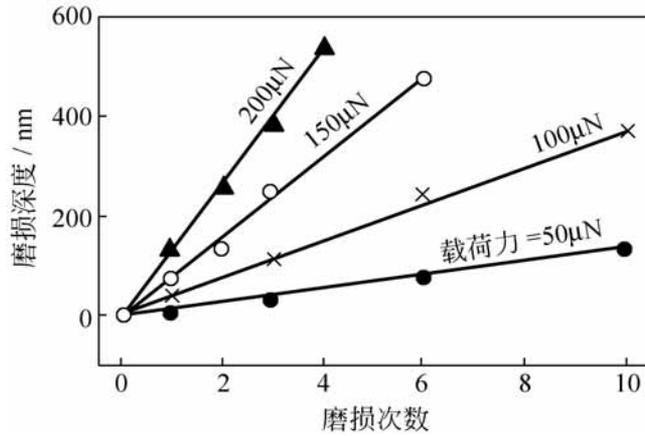


图 15-12 磨损次数与磨损深度

由图 15-12 可知,磨损深度随磨损次数线性增加,也就是每次行程磨去相同厚度的材料,这表示金膜沿厚度方向是均质的。

图 15-13 和图 15-14 分别为两种载荷下一次磨损的深度与速度和步距的关系。图 15-13 的步距为 30nm,图 15-14 的滑动速度为 $3.06 \mu\text{m/s}$ 。

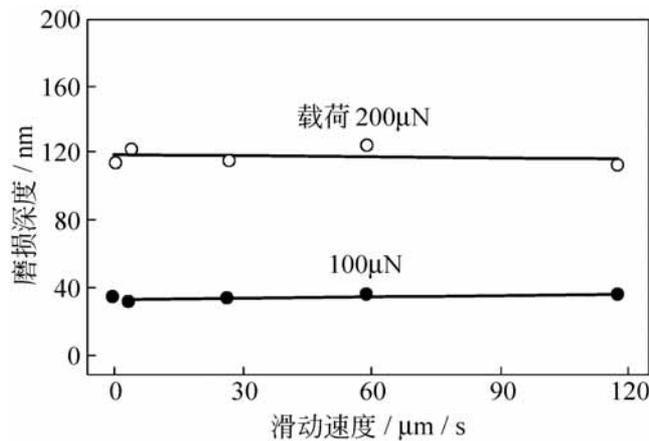


图 15-13 滑动速度与磨损深度

图 15-13 表明,滑动速度对纳米磨损几乎没有影响,这是由于实验中采用的速度较低,而且金膜材料较软的缘故。

应当指出,迄今所报道的微观磨损实验或者分子动力学模拟计算都是针对理想化的材料表面进行的,它与工程实际表面存在差异。实际摩擦副材料即使是简单晶体材料,它的强度也仅是理想晶体强度的 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 倍,这是由于实际晶体内部存在许多位错和微裂纹等缺陷造成的。此外,许多材料是多晶体或非晶体,而且表面常被污染,因而不是均质的。所以,微

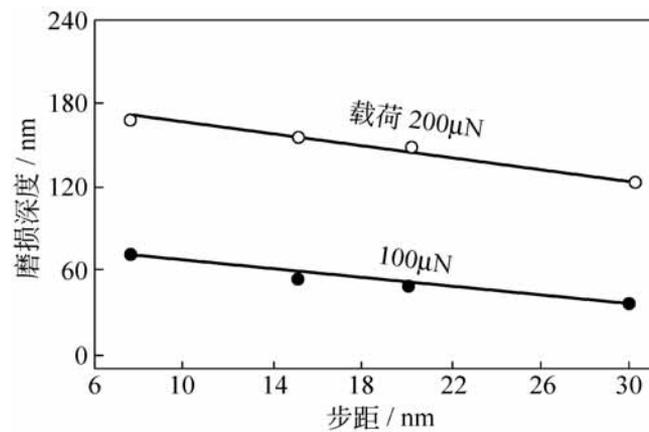


图 15-14 步距与磨损深度

观磨损实验所得的数据通常难以直接应用于工程问题的定量分析,但作为定性分析的依据仍然是十分重要的。

15 3 2 磁盘-磁头的微观磨损

磁记录装置中磁头与磁盘的间隙(也称为平均运行高度)介于 25 ~ 76 nm,而两表面的相对运动速度为 3 ~ 30 m/s。显然,它们之间的接触与随之而来的摩擦磨损是难以避免的,从而严重影响磁记录装置的工作精度和可靠性。因此,微观摩擦学研究是发展高密度磁记录装置的关键问题之一。

在磁头-磁盘机构方面, Bhushan 和 Koinkar^[2] 对于各种硅材料的摩擦磨损性能进行了实验研究。微观实验是采用 FFM 进行的。实验条件和实验方法可参考文献[1,2]。经大量的实验,将各种硅材料的摩擦磨损性能汇总于表 15-2。

表 15-2 硅材料微观摩擦磨损性能

| 试样号 | 材 料 | 粗糙度 ¹⁾ R_a | 摩擦系数 | 刻划深度 ²⁾ / nm | 磨损深度 ²⁾ / nm | 微硬度 ³⁾ / GPa |
|-----|----------------------|----------------------------|------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 单晶硅 Si(111) | 0.11 | 0.03 | 20 | 27 | 11.7 |
| 2 | 单晶硅 Si(110) | 0.09 | 0.04 | 20 | | |
| 3 | 单晶硅 Si(100) | 0.12 | 0.03 | 25 | | |
| 4 | 多晶硅 | 1.07 | 0.04 | 18 | | |
| 5 | 多晶硅(抛光) | 0.16 | 0.05 | 18 | 25 | 12.5 |
| 6 | PECVD 氧化硅 Si(111) | 1.50 | 0.01 | 8 | 5 | 18.0 |

续表

| 试样号 | 材 料 | 粗糙度 ¹⁾ R_a | 摩擦系数 | 刻划深度 ²⁾ / nm | 磨损深度 ²⁾ / nm | 微硬度 ³⁾ / GPa |
|-----|----------------------------------|----------------------------|------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 7 | 干燥热氧化硅 Si (111) | 0.11 | 0.04 | 16 | 14 | 17.0 |
| 8 | 潮湿热氧化硅 Si (111) | 0.25 | 0.04 | 17 | 18 | 14.4 |
| 9 | C ⁺ 离子注入硅 Si (111) | 0.33 | 0.02 | 20 | 23 | 18.6 |

1) 测量面积 500 nm × 500 nm;

2) 探针载荷 40 μN;

3) 探针载荷 150 μN。

图 15-15 是在不同的探针载荷下, 经过 10 次刻划行程后表面形貌的测量结果。图中 4 种试样材料分别为: (a) Si(111) 表面, (b) PECVD 氧化 Si(111) 表面, (c) 干燥环境热氧化 Si(111) 表面和 (d) C⁺ 离子注入 Si(111) 表面。可以看出, PECVD 氧化处理的 Si(111) 表面粗糙, 但具有较高的抗划伤能力。

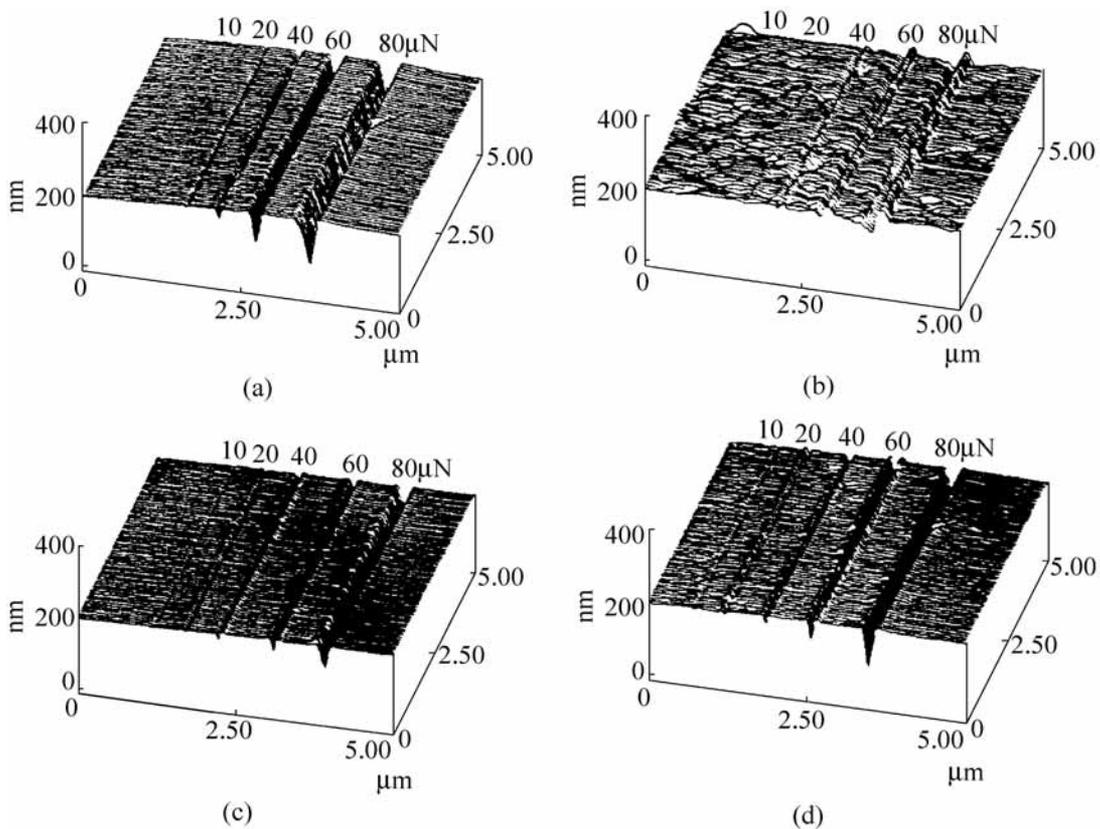


图 15-15 微刻划表面形貌

图 15-16 是相同条件下得出的 4 种硅材料表面磨痕形貌图像。图中 (a), (b), (c) 和 (d) 依次是未经处理的 Si(111) 表面, 经 PECVD 氧化, 干燥

环境热氧化和 C^+ 离子注入等强化处理的 Si(111) 表面。实验表明, PECVD 氧化处理的表面具有最高的抗磨损性能, 同时, 4 种硅材料表面抗磨损能力的排序与抗刻划能力相同。此外还观察到, 由于纳米磨损深度很小, 磨屑很容易从表面上清除, 在探针扫描运动中, 磨屑自动脱落。

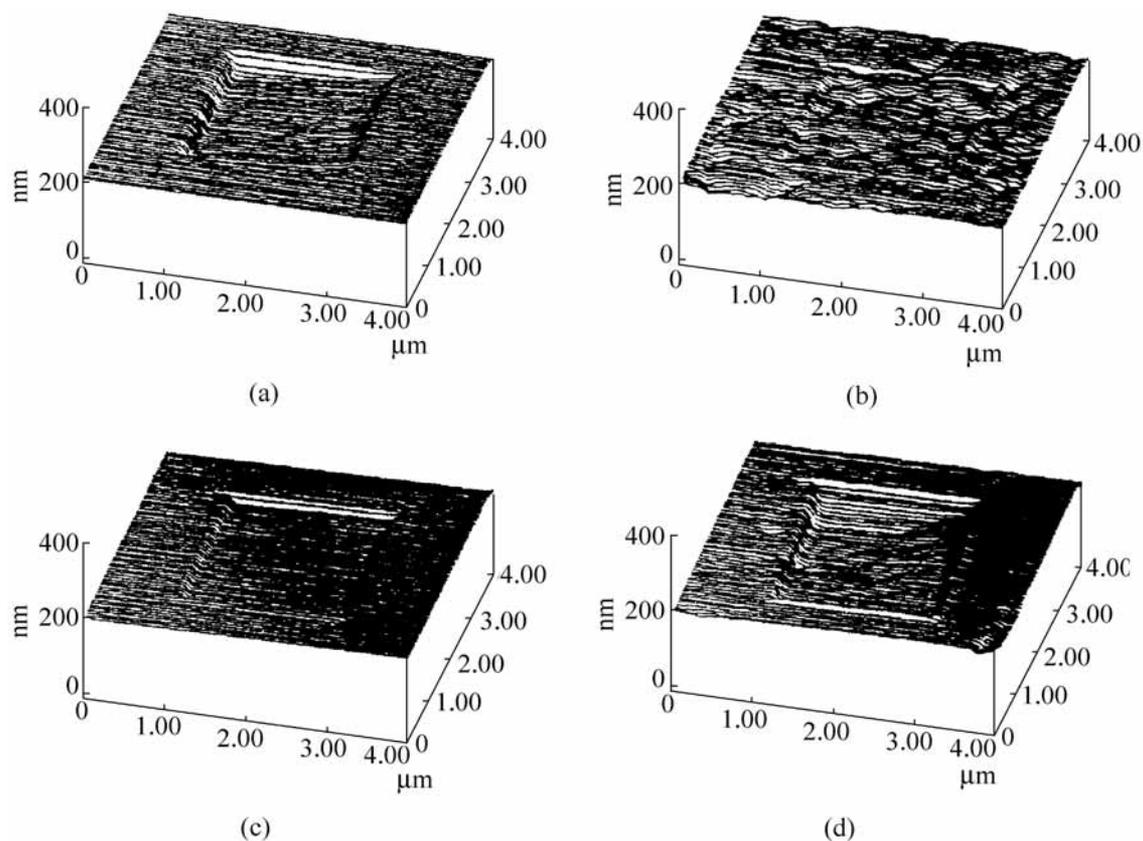


图 15-16 磨痕表面形貌图像

Bhushan 和 Koinkar 等人采用 AFM 对表面有类金刚石碳膜涂层的铝基片进行磨损实验, 测出在载荷 $20\mu\text{N}$ 作用下不同磨损行程次数时的表面形貌。它反映了微观磨损的发展过程, 如图 15-17 所示。由图表明, 微观磨损先在表面缺陷处产生划痕, 随后, 由于划痕处的表面能较高而构成损伤的薄弱部位, 划痕逐渐扩展。而在无划痕的部位具有相对高的抗磨能力, 这就造成微观磨损分布的不均匀性。

硬磁盘-磁头机构通常在磁介质表面加涂一层耐腐蚀保护膜, 再加涂一层润滑膜, 用来改善摩擦磨损性能。近来, 单分子有序膜例如自组装膜 SAM 和 LB 膜在硬磁盘-磁头的润滑中已经得到应用。Bhushan 等人实验研究了润滑膜对微观摩擦磨损的作用, 其结果如图 15-18 所示。图中, (a) 为 SAM 润滑表面磨损形貌, 它是硅基片经氧化处理后, 再用氨基硅烷通过化学反应在表面上植入 C_{18} 单分子膜, 表面为多层结构即 $C_{18}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ 。

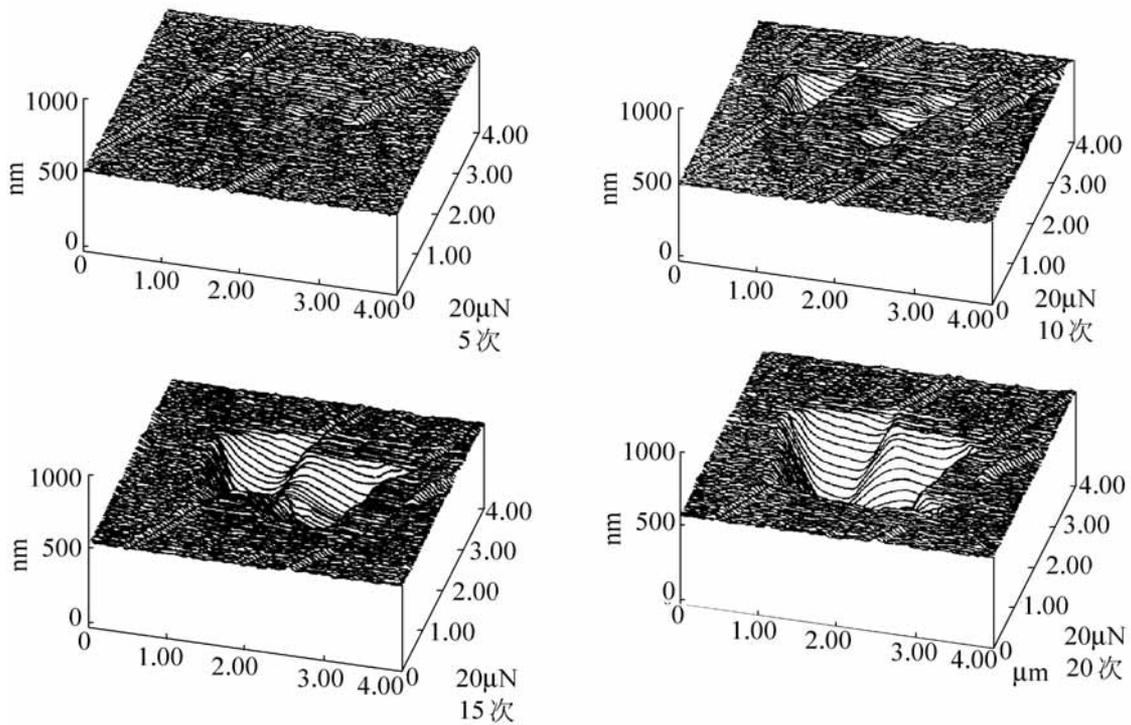


图 15-17 微观磨损的不均匀性

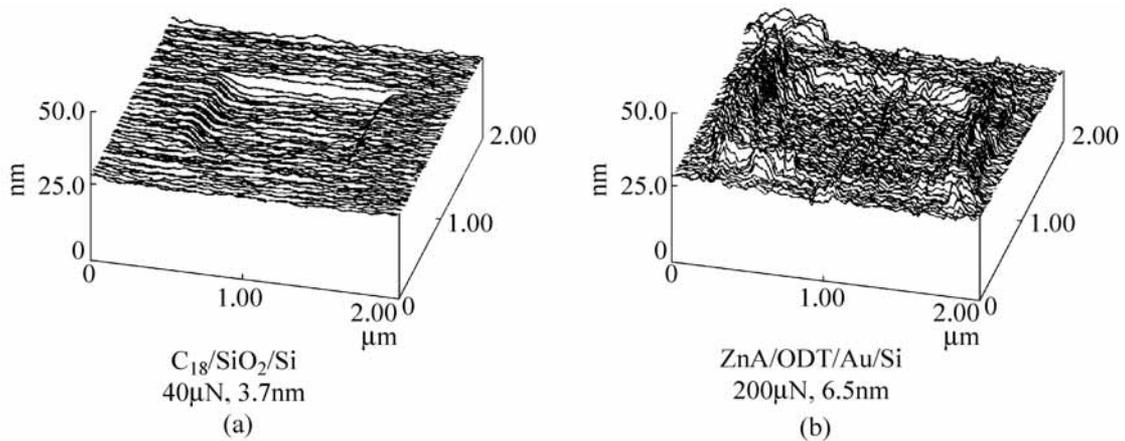


图 15-18 SAM 膜与 LB 膜润滑

(b)为 LB膜润滑表面磨损形貌,其表面结构是硅基片上镀金,再涂敷十八烷基硫酸(octadecylthiol, ODT),然后吸附花生酸锌(zinc arachidate, ZnA),表面层结构为 ZnA/ ODT/ Au/ Si。

实验结果表明, C_{18} 的 SAM膜的润滑性能优于 ZnA 的 LB膜,其摩擦系数低,磨损寿命长。采用 FFM 检测得出, SAM膜润滑的摩擦系数为 0.018,在 $40\mu\text{N}$ 载荷下的磨损深度 3.7nm,磨痕表面平整光滑,而 LB膜润滑时的摩擦系数为 0.03,在较低的载荷 $200\mu\text{N}$ 下的磨损深度高达 6.5nm,磨痕表面及边缘相当粗糙。这是由于 LB膜与基片的连接是依靠范德瓦耳吸力,结合强度微弱,而 SAM膜则是通过共价键的化学结合,适当选择键

长和极性团 可以进一步改善 SAM 膜边界润滑性能。作者的研究生钱林茂^[9]、蒋玮^[10] 分别采用原子力显微镜和微型球盘实验机对自组装膜的润滑性能进行了全面研究。

15.4 分子膜与边界润滑

在以往有关边界润滑的研究中,大多从物理化学的角度揭示边界膜的形成和失效机理,以及边界润滑的摩擦化学研究,而对于边界膜的物理形态和力学行为涉及较少。此外,由于受到表面测试仪器的限制,以往的研究也未能深入到原子、分子尺度揭示边界膜的微观结构与性能的关系,致使建立边界润滑物理模型和边界膜定量的构性关系的研究遇到困难。

边界润滑是纳米摩擦学中最活跃的研究领域之一。通过原子力显微镜 AFM、摩擦力显微镜 FFM 和表面力仪 SFA 的实验研究,以及分子动力学模拟的理论分析,近年来,在边界润滑特性和粘滑现象,以及边界膜的流变性能和物理形态等方面的研究取得一系列重要进展,对于实现润滑性能控制和边界膜分子结构设计具有十分重要的意义。

15.4.1 分子膜静态剪切性能

介于两表面微小间隙中的液体称为约束液体(confined liquid),固体表面可以影响邻近它的液体分子的结构,而两个相互贴近表面的协同影响使液体分子结构变化更大。因此,约束液体的分子结构和性能与体相状态很不相同。

图 15-19 是 Ni(100)表面在低速 $10\mu\text{m/s}$ 和温 120K 条件下的摩擦实

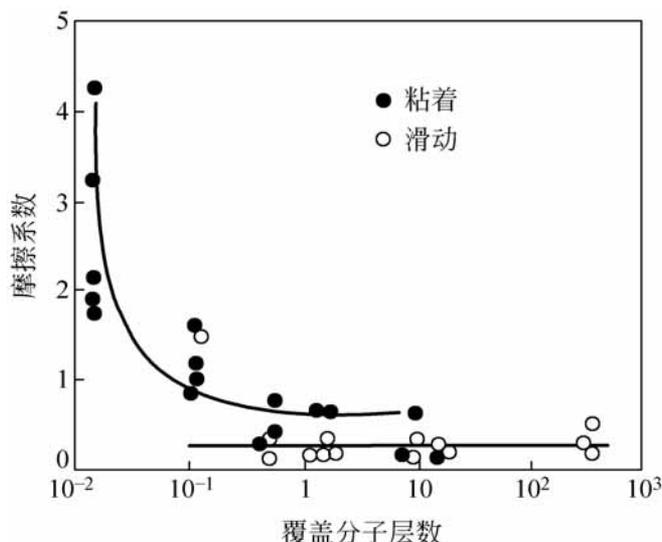


图 15-19 摩擦系数与覆盖量

验,得出摩擦系数随乙醇 C_2H_6O 分子覆盖量的变化关系。当摩擦表面不能全部被单分子层覆盖时,摩擦系数很高,滑动中表面粘着强烈,并出现严重磨损。当表面被单分子层或多分子层完全覆盖以后,摩擦系数稳定在0.2左右,并且摩擦系数与覆盖分子层数无关。因此,对摩擦起决定性影响的是最初在表面上形成的单分子层。

法国的 Vinet^[11] 在他的博士学位论文中描述了一系列润滑剂的剪切行为。在假定泊松比为常数的条件下得出聚苯乙烯的剪切弹性模量 G_c 与接触压力之间的关系,如图 15-20 所示。

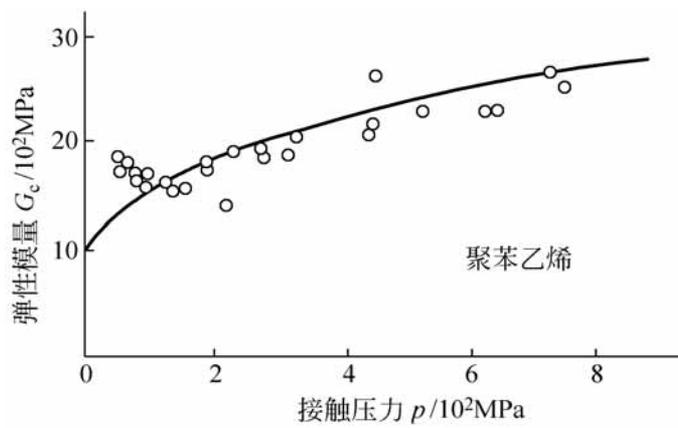


图 15-20 剪切弹性模量与接触压力

15.4.2 分子膜动态剪切性能与粘滑现象

关于界面分子膜粘滑问题全面深入的研究是 Israelachvili 等人^[12,13] 进行的。他们采用云母材料作为摩擦表面,八甲基环四硅氧烷(OMCTS)作为润滑剂,利用表面力仪对于粘滑规律进行实验研究。OMCTS 是一种非极性的硅液体,在云母表面之间形成的分子膜层次清晰。图 15-21 是典型的滑动摩擦粘滑曲线,图中, n 为分子层数; P 为法向载荷; v 为滑动速度。

由图可知,滑动过程中,摩擦力波动变化。从粘着接触到开始滑动,摩擦力稳定增加到最大值即静摩擦力 F_s ,它表示静态极限剪切应力。然后突然滑动到新的粘着接触,摩擦力减少到最小值即动摩擦力 F_k ,它表示动态极限剪切应力。粘着与滑动的交替过程周而复始,而表面并无磨损痕迹。此外,在达到静摩擦力后,滑动进行非常快,而由动摩擦转变为静摩擦则是渐变过程,如图示,这种转变需要 5s 时间。

静、动摩擦力的数值与分子膜的分子层数和滑动速度有关。当分子层数 n 减少时, F_s 和 F_k 均增加,交替变化的幅值 $F = F_s - F_k$ 亦增加,而变化

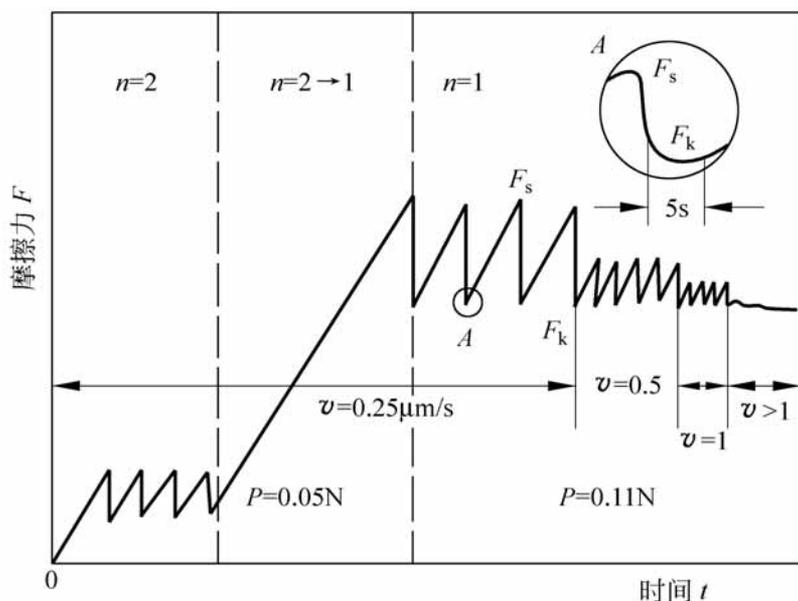


图 15-21 粘滑曲线

频率减小。随着滑动速度 v 增加,幅值降低,频率增加,直至达到临界滑动速度 v_c 时粘滑现象消失。此后将以动摩擦力 F_k 作平稳滑动,显然,这是所希望实现的摩擦状态。

从粘着摩擦理论中界面摩擦力公式 $F = c A$, 可得

$$F = A(c_s - c_k) = A c$$

$$c = c_s - c_k$$

这里, A 为接触面积; c_s 和 c_k 分别为静、动摩擦的极限剪切应力。

图 15-22 列出不同滑动速度下摩擦力变化 F 随接触面积 A 变化的实验结果。图示 F 与 A 的线性关系证明了 c 为常数,说明粘着摩擦理论

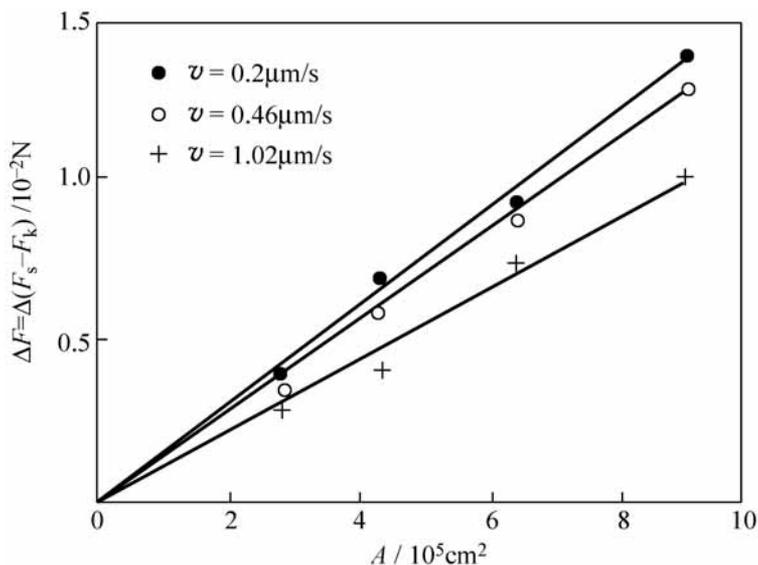


图 15-22 F 与 A 的关系

中 F 与 A 成正比的结论是正确的。

由图 15-22 可以建立 τ_c 与 v 的关系,如图 15-23 所示。将线段外延至与横坐标的交点,即可求得 F_s 与 F_k 相等即粘滑消失时的临界滑动速度 v_c 。如图,在 $n=1$ 时,OMCTS 的临界滑动速度约为 $3\mu\text{m}/\text{s}$ 。当 $n=2$ 时, v_c 介于 $1\sim 2\mu\text{m}/\text{s}$ 之间, τ_c 和 v_c 的数值均比 $n=1$ 时降低。

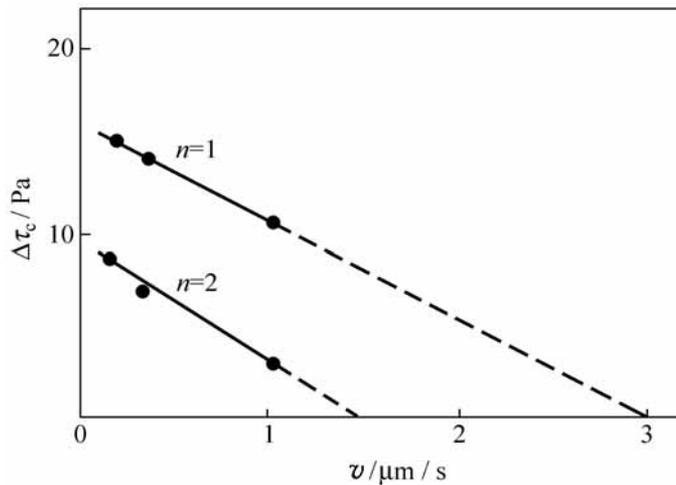


图 15-23 τ_c 和 v_c 的关系

对于通常的边界润滑系统,都具有如图 15-21 典型的摩擦规律,它们的摩擦状态都是由两个区域组成,即 $v < v_c$ 的粘滑区和 $v > v_c$ 的平滑区。其原因是摩擦过程中分子膜周期性相变,即由类固体(凝结状)的粘着转变为类液体(熔融状)的滑动,而当超过临界滑动速度时,分子膜来不及凝结固化而保持类液体状态的平稳滑动。

对于某些边界润滑系统,例如云母表面植入乙酸双十六烷氯化二甲基铵(DHDAA)单分子膜润滑,将出现摩擦力更低的超动(superkinetic)摩擦状态。

图 15-24 为两云母表面分别植入 DHDAA 单分子膜在干燥环境和温度 25°C 时的摩擦曲线。在低速时出现常规的粘滑现象,摩擦力在 F_s 与 F_k 之间变化。滑动速度增加到临界速度 $v_c = 0.1\mu\text{m}/\text{s}$ 以后,粘滑消失而以动摩擦力 F_k 平稳滑动。然而当滑动速度更高,达到超临界(supercritical)速度 $v_c^* = 0.4\mu\text{m}/\text{s}$ 时,将出现超动摩擦,摩擦力在 F_k 与 F_{sk} 之间变化。 F_{sk} 为超动摩擦力,且 $F_{sk} < F_k$ 。

超动摩擦有其特定的存在条件。由于 DHDAA 分子的一端与表面连接牢固,而整个分子可以自由摆动。在超临界速度时,分子将顺从滑动方向倾斜,因而获得更低的摩擦力。

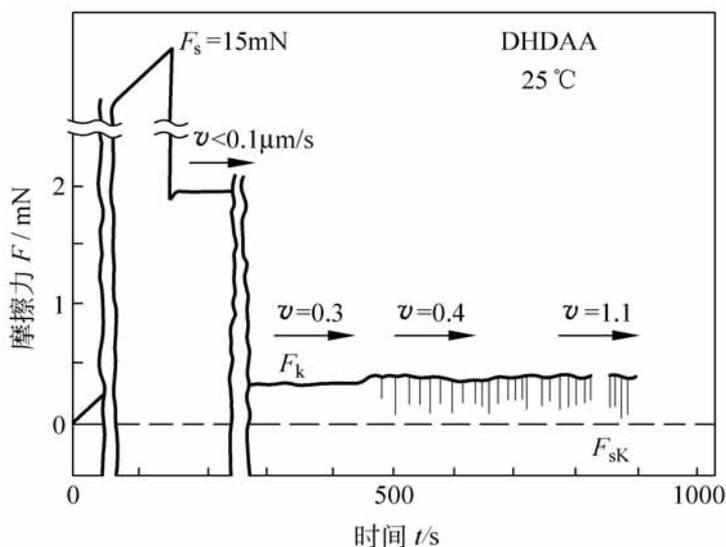


图 15-24 超动摩擦

实验表明,法向载荷增加将使超临界速度降低,即载荷加速进入超动摩擦状态。这是因为增加载荷使间隙减小,从而促使润滑分子倾斜。在常规的粘滑摩擦中,载荷也有促使粘滑消失的作用,因为载荷增加延长了润滑分子的松弛时间,使分子膜结构变化的时间增加,因而阻止了分子膜的相变或固化而保持类液体状态下的摩擦。

15.4.3 物理形态与相变

界面分子膜在摩擦过程中所处的状况极为特殊。这种受到微小间隙约束的液体,在结构化力和法向载荷作用的同时还承受切向剪切运动,因而其分子结构和性质与体相状态显然不同。通常认为约束液体根据工况条件而具有不同的形态,而且在摩擦过程中发生相变。

Israelachvili 等^[13]提出界面分子膜在滑动过程中具有三种物理形态,即类固体、非晶态和类液体,如图 15-25 所示。他们从这种观点出发对边界润滑特性进行分析和解释,取得相当满意的结果。

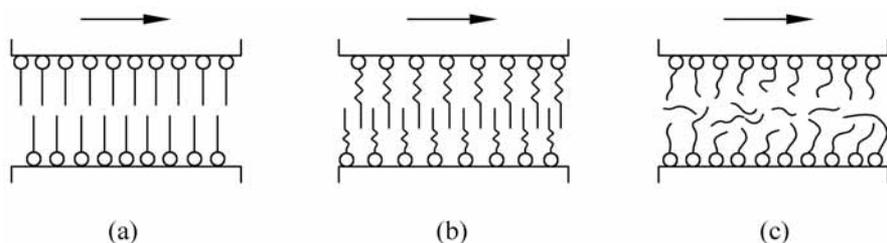


图 15-25 三种物理形态

(a) 类固体(凝结); (b) 非晶态; (c) 类液体(熔融)

图 15-25 所示 形态及其相互转化并不是液体的固有特性,它只是与构成界面的分子膜相关,并是在滑动过程中出现的动态性质。决定分子有序排列的主要因素是表面能的作用,并受到温度、载荷和滑动速度或剪切率的影响。通常较高的滑动速度和较低的温度趋向于形成类固体,而低滑动速度和高温度易于形成类液体。

15 4 4 摩擦的温度效应与机理

关于分子膜润滑状态的摩擦机理,人们还从分子膜的物理性质和能量转换的角度进行研究。Yoshizawa 和 Israelachvili 等对于 DHDAA 的单分子膜滑动摩擦的温度效应进行了实验研究。图 15-26 为干燥环境即相对湿度 RH 为 0 条件下的实验结果。由图可知,摩擦力随温度的变化不是单调的,随着温度升高,摩擦力先增加而后降低,摩擦力的最大值在 25 左右。这种现象与聚合物粘弹性引起的能量损耗随温度的变化一致。聚合物键在某一温度时的缠绕最大,即能量损耗最大。

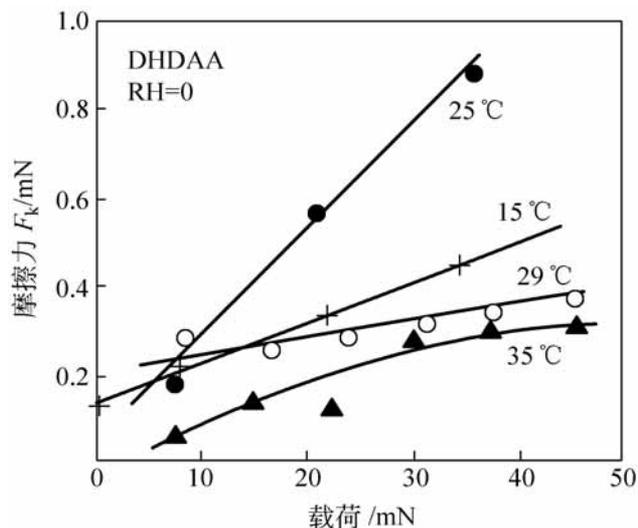


图 15-26 温度效应

可以认为,DHDAA 的摩擦行为与它的粘弹性有关。在温度较低的摩擦中,分子膜处于类固体状态,如图 15-25(a),分子间的缠绕不易发生,因而能量损耗小,摩擦力小。在高温条件下,分子膜为类液体,如图 15-25(c),虽然滑动中链状分子的缠绕较多,但由于液体分子活动大,解除缠绕容易,因此能量损耗和摩擦力也较低。在中间温度时,分子膜为非晶状,分子缠绕不易消除,因而摩擦力 大。

15 4 5 分子膜的流变特性

研究滑动中润滑膜在动态剪切时的力学响应即流变特性,对于工程设

计是十分重要的问题。Granick 等^[14] 在温度 28 和低切应变率条件下, 测得十六烷 $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_3$ 的等效粘度 η_e 与膜厚的关系, 如图 15-27。在膜厚 4.0nm 时, $\eta_e = 10\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。已知十六烷是简单液体, 它的体相粘度仅为 $0.0001\text{Pa} \cdot \text{s}$, 比处于分子膜状态的粘度低许多数量级。同时, 随着膜厚减小, 等效粘度剧增。当分子膜厚度为 $2.6\text{nm} \pm 0.1\text{nm}$ 时, 间隙尺寸与十六烷分子直径接近而阻止其流动, 所以等效粘度突然发散。

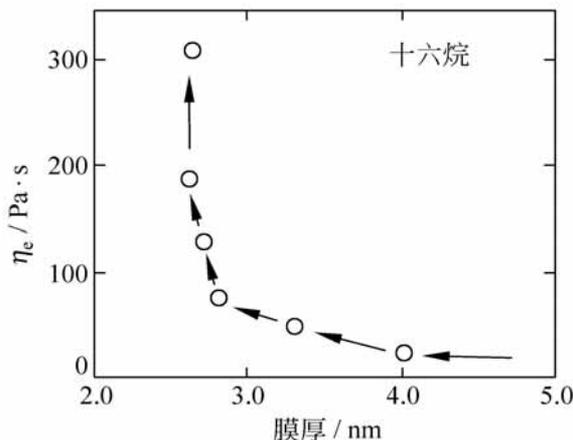


图 15-27 粘度与膜厚关系

通常体相状态的十六烷是牛顿流体, 但是在受到微小间隙约束时, 流变特性变得相当复杂。图 15-28 给出在对数坐标中十六烷分子膜的等效粘度 η_e 与切应变率 $\dot{\gamma}$ 的关系。由图可知, 在极低的切应变率时, 等效粘度保持常数, 即十六烷呈牛顿流体性质。随着切应变率升高, 等效粘度按指数规律衰减, 出现非线性剪切稀化现象。

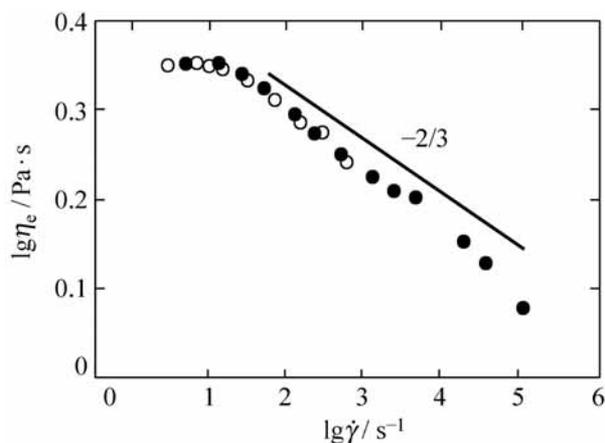


图 15-28 粘度与切应变率

Alsten 和 Granick^[15] 对十二烷分子膜测得的粘度与膜厚的关系如图 15-29 所示。图中数值表示分子膜的平均压力, 单位为 MPa。实验表

明,分子膜粘度不仅与膜厚有关,而且与压力有关。

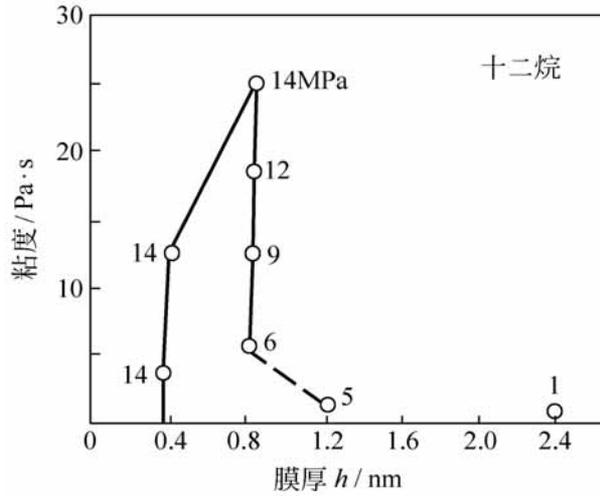


图 15-29 粘度与膜厚和压力关系

图 15-30 列出十二烷类固体膜的极限剪切应力 τ_s 与平均压力 p 的关系。如图,极限剪切应力随平均压力线性增加,它们的关系式为

$$\tau_s = \tau_{s0} + p$$

式中, τ_{s0} 为 $p=0$ 时的极限剪切应力; $\tau_{s0} \approx 20$ 。

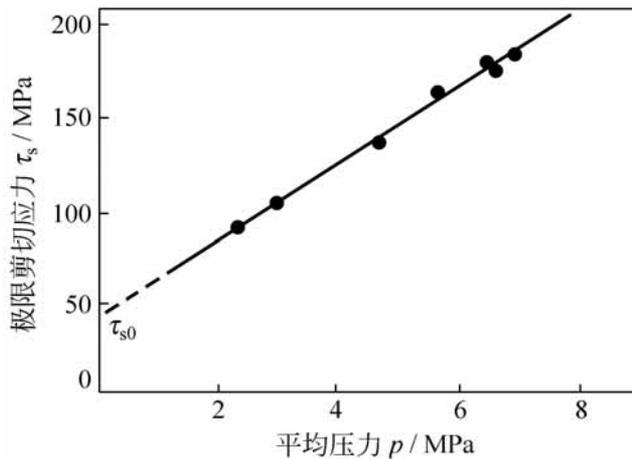


图 15-30 极限剪切应力与压力

实际上,类固体的极限剪切应力是开始滑动时的剪切屈服应力,显然,它与分子膜的静摩擦性质有关。

Alsten 和 Granick 研究指出,分子膜的屈服应力与它所经历的过程有关。液体固化后的极限剪切应力还随着时间不断增高。图 15-31 是一种非晶态聚合物聚苯甲基硅氧烷固化膜极限剪切应力随时间的变化。开始测量的极限剪切应力为 1MPa,经过 4h 增加到近 3 倍。这说明固化是分子膜分子重新排列的过程,开始生成的固化膜在结构上可能包含许多空穴,随着时

间不断地调整充实。

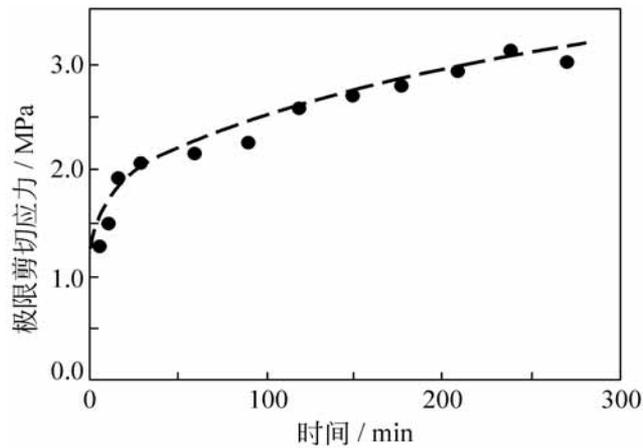


图 15-31 极限剪切应力变化

以上分析有助于对静摩擦机理的了解。固体静摩擦系数随着持续接触时间而增加,传统的观点认为是由于法向载荷使两个表面粗糙峰相互嵌入和变形导致接触面积增加,随着静止接触时间延长,嵌入和变形程度加强,因而使得静摩擦力增加。然而,对于分子膜润滑,静摩擦力变化的原因则是约束液体需要有足够时间来完成分子的重新排列。

15.4.6 有序分子膜

有序分子膜是覆盖在固体表面上的分子排列有序而结构致密的单分子层,或者由若干单分子重叠而成的多分子层膜。通过制备方法可以改变有序分子膜的组成结构,还可以根据使用要求在结构中引入特殊功能的基因,因此,它提供了一种依靠表面分子工程来控制摩擦学性能的途径。

目前有序分子膜应用较多的主要是:LB(Langmuir-Blodgett)膜和自组装膜(self-assembled monolayer, SAM)。这里介绍它们的结构、制备与应用。

1. LB 膜

LB 膜是将有机两亲分子在水与空气界面上生成排列高度有序的单分子膜,然后再把它转移到固体表面上形成的超薄有序体系。LB 膜的成膜分子为两亲分子,它不溶于水,但分子的一端具有亲水性,另一端具有亲油疏水性。当两亲分子遇水时,其亲水端钻入水中而疏水端则留在空气中,即这种分子漂浮在水与空气界面之上。典型的两亲分子如脂肪酸 $C_n H_{2n+1} COOH$, 其亲水端为羧基团($-COOH$), 疏水端为烷基链。

水作为最常见的液体亚相材料,它的作用是形成水与空气界面,成为两亲分子成膜的载体。制备 LB 膜时,水必须经过去离子处理以及控制 pH 值和表面张力。形成的有序分子膜可以转移到玻璃、硅片、各种金属及其氧化物等固体表面上。根据制备的 LB 膜性质不同,固体表面还必须经过亲水或疏水处理。

图 15-32 表示 LB 膜制备过程。如图 15-32(a),将两亲分子溶于有机溶剂而后滴加到水面上,待溶剂挥发后便在水与空气的界面上留下一层单分子。如图 15-32(b),由于分子间距离较大,移动障板以压缩界面上的分子,逐渐形成紧密的有序排列。如图 15-32(c),将其向基片表面转移,最常见的是采用垂直提升方法。

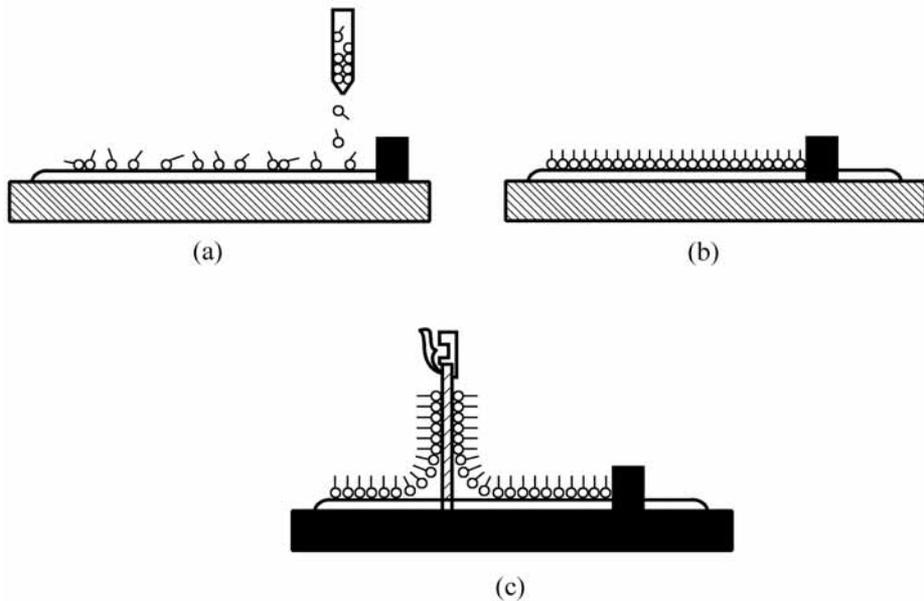


图 15-32 LB 膜的制备过程

LB 膜在摩擦学中应用实例是作为硬磁盘的润滑剂。例如在硬磁盘磁记录介质表面利用 LB 技术制备一层厚度为 1 ~ 10nm 的全氟聚醚(PFPE)润滑膜,从而改善磁盘与磁头的摩擦磨损性能。

影响 LB 膜润滑性能的因素很多,除了滑动速度、载荷和工作温度等工况参数之外,成膜物质、膜的层数与结构、基体表面状态、亚相液体性质和界面的化学反应等都有重要的影响。

2. 自组装分子膜

自组装分子膜的成膜机理主要依靠固-液界面上的化学作用。将适当材料的基片浸入含有表面活性剂的有机溶液中,活性剂分子的反应基(或称

头基)与基片表面自动地发生化学吸附或者化学反应,从而在基片表面形成化学键连接的、紧密排列的单分子膜。同一层分子之间的连接仍然依靠范德华力作用。如果活性剂分子的尾基也具有化学反应活性,则又可以与别的物质相作用,构筑同质或异质的多层膜。然而,这种表面化学反应具有选择性,不同反应基需要选择与之相匹配的基片材料才能实现自组装作用。图 15-33 表示自组装单分子膜的制备过程。图 15-34 为表面活性剂分子的结构简图。

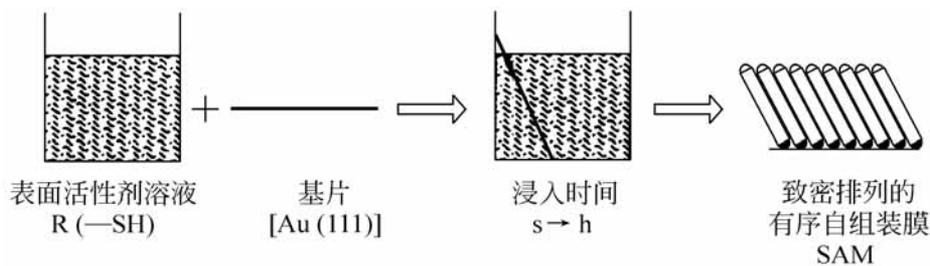


图 15-33 自组装单分子膜的制备

如图 15-34 所示,制备自组装膜的表面活性分子的结构应包含三部分,即能与基片产生化学吸附的头基、能通过范德华力与相邻分子发生链间结合的烷基链以及尾部的功能性基团。影响自组装膜质量和成膜能力的因素很多,主要是基片材料和表面粗糙度、活性剂分子反应基的活性、分子链的大小和极性、尾基的活性以及成膜溶液中溶剂的极性和浓度等。

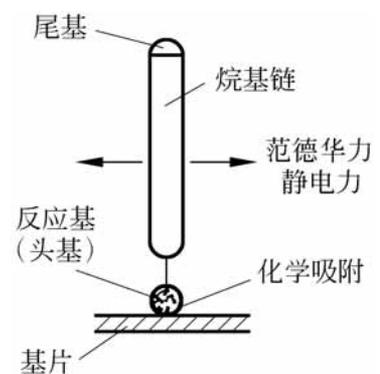


图 15-34 活性剂分子结构

由于自组装膜结构致密而且稳定性高,它在润滑和磨损防护方面具有广泛的应用前景。近年来,有关它的研究报告日益增多,研究范围也不断拓展。

参 考 文 献

- [1] 温诗铸 纳米摩擦学 清华大学出版社,1998
- [2] Bhushan B, Koinkar V N. Tribological studies of silicon for magnetic recording applications. J. Appl. Phys. 1993, 75(10): 5741 ~ 5746
- [3] Ruan J, Bhushan B. Atomic-scale and microscale friction studies of graphite and diamond using friction force microscopy. J. Appl. Phys. 1994, 76(9): 5022 ~ 5035

-
- [4] Ruan J, Bhushan B . Frictional behavior of highly oriented pyrolytic graphite .
J . Appl . Phys . 1994 , 76(12) : 8117 ~ 8120
- [5] Guo Q, Ross J D J, Pollock H M . What part do adhesion and deformation play in
fine-scale static and sliding contact ? Proc . of MRS . Boston, 1988 , 140: 51 ~ 66
- [6] Pivin J C, Takadoum J, Ross J D J, Pollock H M . Tribology: 50 Years On .
London: Mech . Eng . Publications, 1987, 179 ~ 181
- [7] Landman U, Luedtke W D . Interfacial junctions and cavitation . MRS Bulletin,
1993 , 18(5): 36 ~ 43
- [8] Jiang Z G, Lu C, Bogy D B, Miyamoto T . An investigation of the experimental
condition and characteristics of a nano-wear test . Wear, 1995 , (181 ~ 183) : 777 ~
783
- [9] 钱林茂, 雒建斌, 温诗铸, 萧旭东 二氧化硅及其硅烷自组装膜微观摩擦力与粘着
力的研究 物理学报, 2000 , 49(11): 2240 ~ 2246, 2247 ~ 2253
- [10] 蒋玮, 雒建斌, 温诗铸 . OST 分子膜的摩擦特性 . 科学通报, 2000 , 45 (17) :
1900 ~ 1904
- [11] Vinet P, PhD Dissertation . Ecole Centrale de Lyon . ECL Lyon, 1986
- [12] Israelachvili J N . Intermolecular and Surface Force . New York: Academic Press,
1991
- [13] Yoshizawa H, Chen Y L, Israelachvili J . Recent advances in molecular level
understanding of adhesion, friction and lubrication . Wear, 1993, 168 (1 - 2) :
161 ~ 166
- [14] Granick S . Molecular tribology . MRS Bulletin, 1991 , 16(10) : 1 ~ 6
- [15] Alsten J V, Granick S . Molecular tribology: recent results and future prospects .
Proc . of MRS . Boston, 1988 , 140: 125 ~ 130

第 16 章

金属成形摩擦学

自然界的金属在古代就被人们锻打成形。然而,研究成形过程中摩擦学问题却是相当近代的事。早期的金属成形工艺采用的润滑剂大多为天然油脂和脂肪油,或者是对它们改进而得到的润滑剂。从 20 世纪 40 年代以后,对成形润滑剂的研究得到了迅速的发展,对润滑剂提出了更严格的要求。一些新开发的金属材料被用来满足航空航天技术和电子工业的要求,而它们的成形工艺与常用的金属有很大不同,因而在润滑方面也出现了某些相当困难的问题。这就使得人们对塑性加工摩擦学这个领域产生了很大的关注^[1~3]。

在材料成形过程中,模具和工件间摩擦力总是存在的。如锻件和砧子间的摩擦、坯料和挤压模间的摩擦、金属从模膛流出时的摩擦和轧件与轧辊间的摩擦等。与常规摩擦不同,金属成形摩擦是在高压下产生的,压力最大可达 2500MPa。而且成形大都是在高温下进行的,温度一般在 800 ~ 1200 范围。这时,金属的组织 and 性能会发生明显的变化,给润滑带来很大困难。此外,成形摩擦常常由于变形产生的新的接触表面而不断改变工具与工件之间的接触条件,接触面上金属各点位移情况不同,也给润滑增加了困难。

由于摩擦的作用,模具会产生磨损,工件表面也会出现划伤,从而缩短模具寿命和影响产品表面质量。此外,摩擦使金属变形的力和功相应加大,使锻件脱模困难,还会引起金属变形不均,严重时会使产品出现裂纹或产生粘模现象。然而,摩擦有时也有好的作用,如轧制时增加轧辊与坯料间的摩擦力可以提高咬入能力。

本章对锻造、拉拔和轧制摩擦学加以介绍^[1,2],并给出相关的一些研究成果^[4~6]。

16.1 成形中的力学基础

16.1.1 屈服准则

根据塑性力学理论,使金属产生塑性变形的各应力分量之间满足一定关系。一般说来,有两个常用的屈服准则。一个是 Tresca 屈服准则,为

$$\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{\sigma_s}{2} \quad (16-1)$$

另一个是 Mises 屈服准则,可写成

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 \quad (16-2)$$

式中, σ_1 , σ_2 和 σ_3 是三个主应力, σ_s 是材料的屈服应力。

屈服准则可以简单地用平面应力状态 ($\sigma_3 = 0$) 的应力图来表示,如图 16-1。Tresca 屈服准则为六边形,而 Mises 屈服准则为一个椭圆。

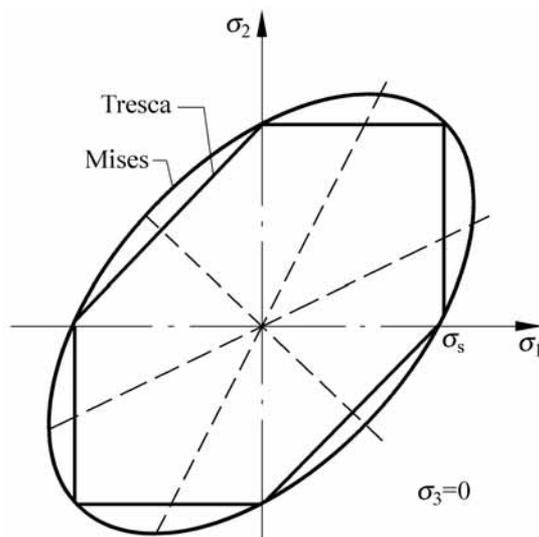


图 16-1 平面应力状态下的两种屈服准则

通常的塑性变形有如下一些形式:

- (1) 拉伸: 单向拉应力达到屈服应力 σ_s 时开始塑性变形。
- (2) 压缩: 材料在压缩屈服应力下开始变形, 对延性材料, 一般等于拉伸屈服应力 σ_s 。
- (3) 板材涨形: 板材表面两个主应力相等, 并且必须达到 σ_s 时开始塑性变形。
- (4) 纯剪: 两个主应力大小相等方向相反, 塑性变形当达到剪切屈服应力 σ_s 时产生。剪切屈服应力有时用 k 来表示。

(5) 平面应变：当工件受到限制只能在一个方向上发生变形而其他方向不能变形时，则不变形方向产生的应力等于其他主应力的平均值。对 Tresca 准则，屈服应力仍是 σ_s ，而对 Mises 准则，则为 $1.15 \sigma_s$ 。

16.1.2 摩擦系数与剪切系数

如前所述，模具和工件界面间存在有摩擦会影响成形过程。而通常的塑性理论简化了界面上的受力和摩擦情况。

1. 摩擦系数与界面粘着

摩擦系数可表示成：

$$f = \frac{F}{N} = \frac{\tau_i}{p} \tag{16-3}$$

式中， p 是正压力， τ_i 是剪切应力，它们分别由摩擦力 F 和正压力 N 除以表观面积 A 得到。

当 τ_i 达到 k 值时，滑移不一定出现在工具与工件的界面上，它可以发生在工件内部，而界面仍然保持不动。此时产生了成形中的界面粘着（图16-2）。粘着的条件是

$$\tau_i = fp > k \tag{16-4}$$

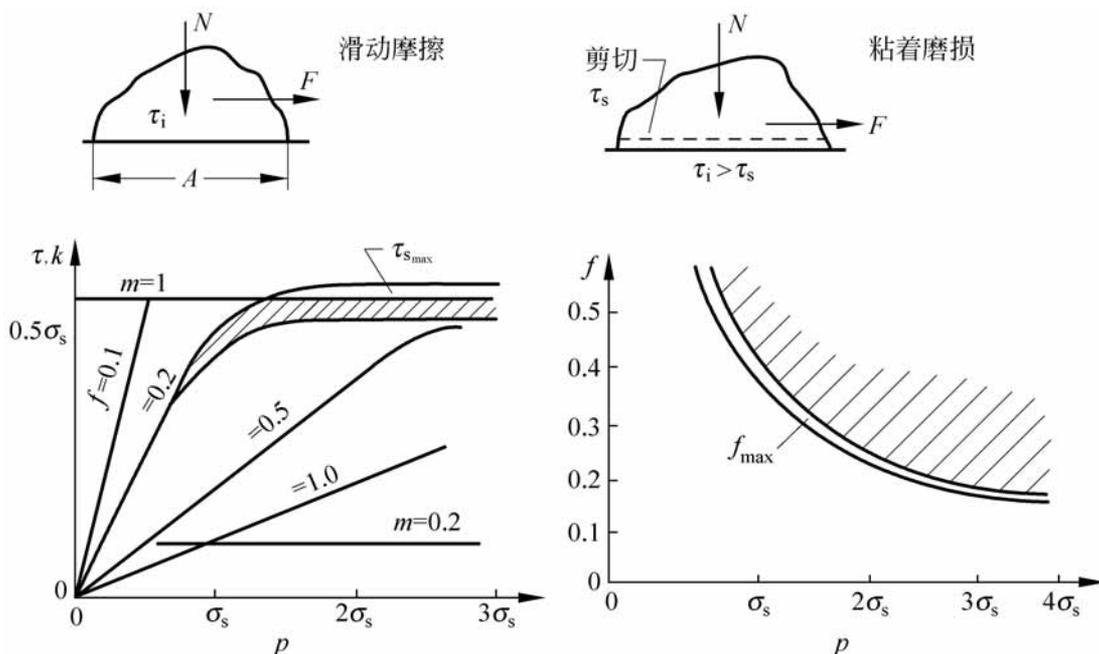


图 16-2 界面压力下滑移剪切应力、粘着摩擦系数随界面压力的变化

2. 剪切系数

在成形过程中,按式(16-3)计算得到的摩擦系数变化会很大。如果界面上没有相对滑移,可以得到极低的 f 值。相反,如果拉伸应力很大,界面压力下降,则 f 值会变得极高。因此,有人建议采用剪切系数描述界面的摩擦。这时,剪切应力为

$$\tau = m k \quad (16-5)$$

式中, m 就是摩擦剪切系数。

对无摩擦界面, $m = 0$, 而在粘着摩擦时, $m = 1$ (图 16-2)。然而,使用 m 并不很方便,因为界面通常与工件材料有紧密关系。联立式(16-4)和式(16-5),得到

$$\tau = f p = m k \quad m \epsilon / 2 \quad (16-6)$$

这里, ϵ 为拉应力。

由此可以看出:两种方法的差别将随着界面压力的增加而加大。

16.1.3 金属成形中摩擦的影响

金属成形中摩擦的影响反映在多方面,并与其他因素相互影响。

1. 摩擦对变形力的影响

材料成形时所需的压力由三部分组成:

$$p = f_1(\epsilon) f_2(i) f_3 \quad (16-7)$$

式中, f_1 是纯变形力,反映材料性能的影响,它的数值通常有 $\pm 5\%$ 的波动。 f_2 为摩擦的影响,在具有良好润滑的冷轧或拔丝中,它不到纯变形力的 5%。 f_3 是过程几何条件函数,反映不均匀变形的影响,它可使变形力大幅度增加,甚至完全掩盖摩擦的影响。

当工具与工件发生相对运动时,它们之间必然发生摩擦,进而影响变形力。例如正挤压时坯料沿着挤压筒壁向前运动产生了滑动摩擦(图 16-3(a)),以及如图 16-3(b)所示的金属丝拉过拉模的摩擦都使得材料的变形力增加。

在镦粗过程中,材料的滑移所引起的摩擦力并不十分明显。如图 16-4(a)所示,随着圆柱体的高度减小和直径增加,扩展的表面向外运动而沿着模具表面滑移,界面将产生摩擦阻力。为了克服这个阻力,界面压力必须增加。随着与边部距离的增加,端面上的摩擦力和模具压力也必定增加,导致

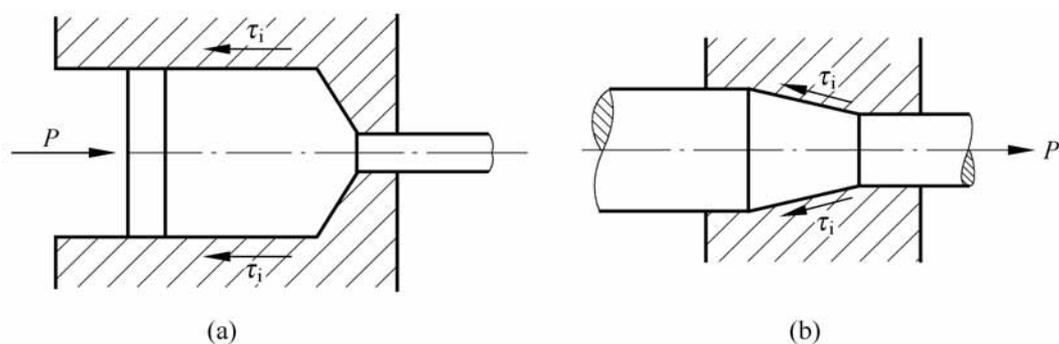


图 16-3 摩擦增加变形力的情况

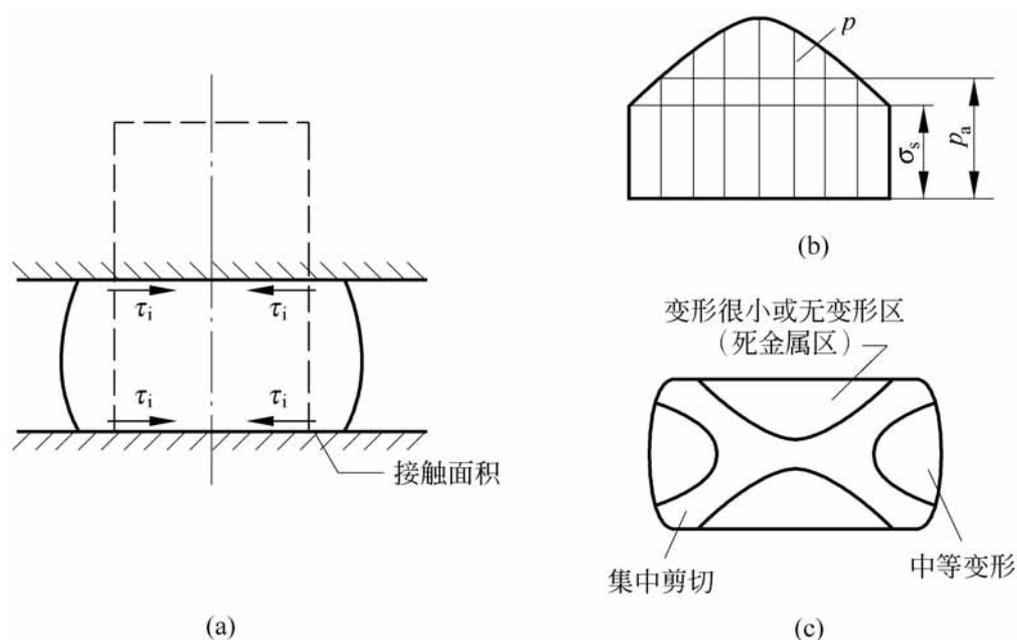


图 16-4 镦粗时摩擦的影响

(a) 剪切应力的方向; (b) 界面压力的增加; (c) 变形不均匀性

了摩擦峰的出现(图 16-4(b))。结果, 模具压力可能大大高于用材料屈服应力 σ_s 所估算的值。

2. 变形不均匀性

为方便起见, 在分析金属成形时常常假设变形是均匀的。实际上这一假设并不适用。

首先, 摩擦对变形施加限制使工件的表面层受到剪切, 工件以最小能的方式进行变形。由于受到粘着摩擦区的约束, 就导致了相邻局部的变形, 并产生金属死区, 如图 16-4(c) 所示。又由于加热和冷却的影响, 工件内部变形可能与外部变形差别很大。

另外, 加工过程本身的几何条件也可能引起变形不均匀性。在成形过

程中,当工件整个厚度承受变形时其几何条件造成的变形不均匀性不是非常明显。

在许多加工过程中,由于摩擦和几何条件引起的变形不均匀性同时出现,有时互相加强,有时互相抵消。

16.2 锻造摩擦学

锻造是最早出现的塑性加工技术,包括热锻、冷锻、自由锻、模锻、开式模锻等,皆为间歇工艺过程,因此在锻造时的残余润滑剂、磨损或产品表面也总是不断地变化的。由于锻造过程很少有稳定状态,因此对其进行系统的分析很困难。这里将通过轴对称圆柱镦粗、开式和闭式模锻等介绍对这一类问题的摩擦学分析方法。

16.2.1 镦粗的摩擦

1. 圆柱体的镦粗

由于在镦粗中锻件侧面可以自由变形,因此工件变形所需要的能量最小。变形时的应力状态由屈服应力 σ_s 和剪切应力 τ 合成。载荷对镦粗中的应力、应变和摩擦峰的影响如图 16-5 所示。

依据圆柱体直径与高度比 d/h_0 , 可以归纳为以下几种情况:

(1) 图 16-5(a) 零摩擦。由于不存在摩擦,端面可自由扩大,工件保持圆柱形,此时平均压力 $p_a = \sigma_s$ 。

(2) 图 16-5(a) 低摩擦。端面扩展受到摩擦剪切应力 τ 阻碍,当 $k < k$ 时,圆柱侧面出现明显的凸肚,端面从中心点向外滑动,圆柱中心点为中性点,其压力存在低的摩擦峰,如图 16-5(d) 的左侧。平均压力只比屈服应力 σ_s 略高。

(3) 图 16-5(a) 粘着摩擦。当 d/h_0 比例足够大时为粘着状态,即 $k = f p_a$ 。当摩擦不大时变形的死金属区近于零,此时摩擦峰为圆弧形,如图 16-5(d) 的右侧,压力 p_a 增加也比较剧烈。

(4) 图 16-5(b)、(e)、(f) 表示 d/h_0 值大的情况。当接触面所有点为 $> k$ 时,变形金属死区增大,摩擦峰陡峭程度增加,如图 16-5(e)、(f) 的右侧。此时即使是用粗糙无润滑模具的镦粗,总的压力值并不大,因为工件侧面发生压缩和弯曲变形,如图 16-5(e) 的右侧。当接触面 $< k$ 时,平均压

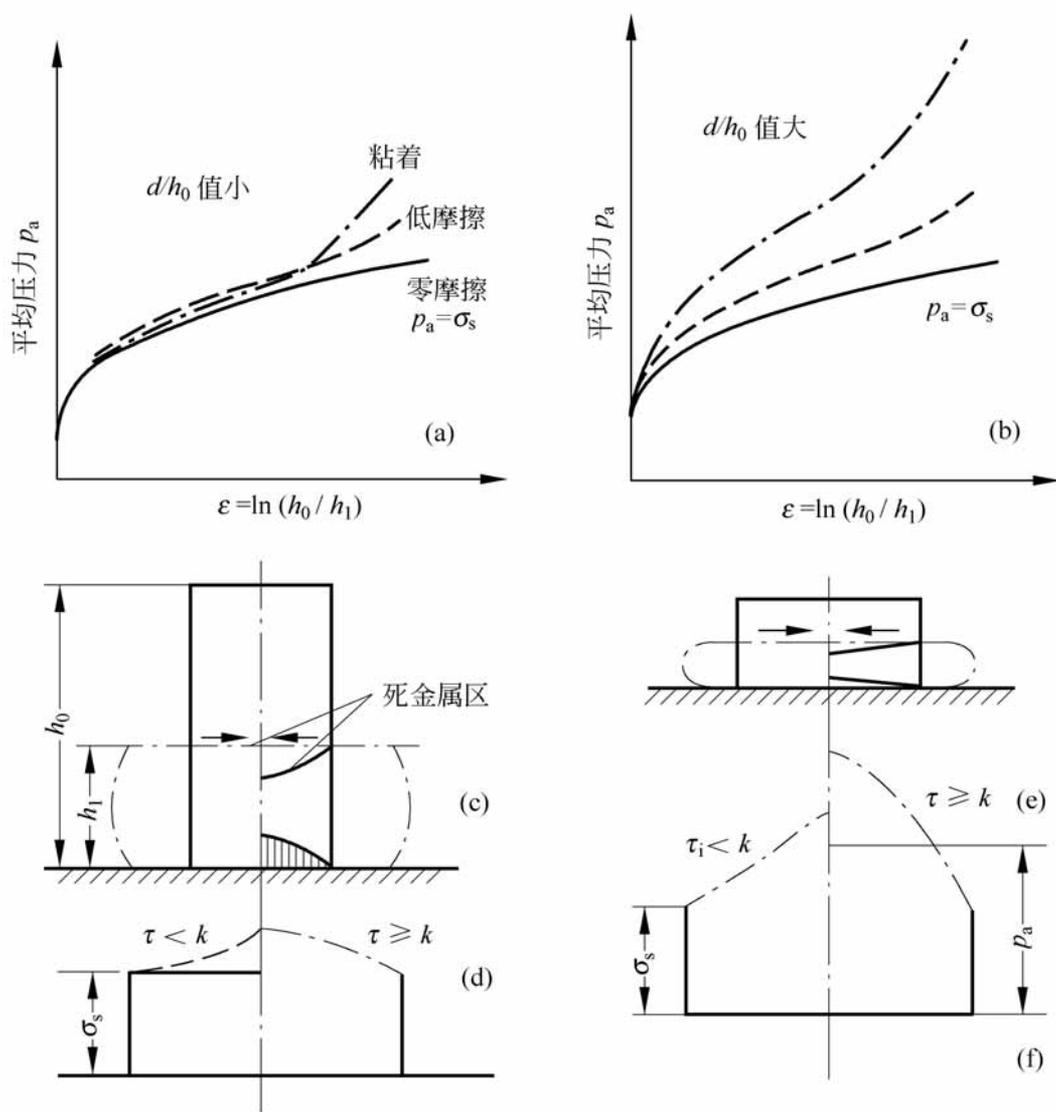


图 16-5 圆柱体镦粗的变形与压力

力剧烈增加,如图 16-6(b)所示。摩擦峰及剪切变形如图 16-5(e)和(f)左侧所示。

2. 环形件的镦粗

如图 16-6 所示,当表面摩擦力为零时,环形件压缩变形使圆环扩展,径向变形速度超过其他全部表面,摩擦稍有增加。由最小能原理知其中心孔的直径增加较小而中性圆环直径增加,其变形和压力分布如图 16-6(a)。当摩擦力较高时,环形件内径减小,并且内、外侧面为鼓形,压力峰值有较大增长,如图 16-6(b)所示。

环形件镦粗可用来评价轧制润滑剂性能,观测其内径的变化,如果直径减小量较少,说明剪切阻力小,摩擦低,润滑剂性能好。

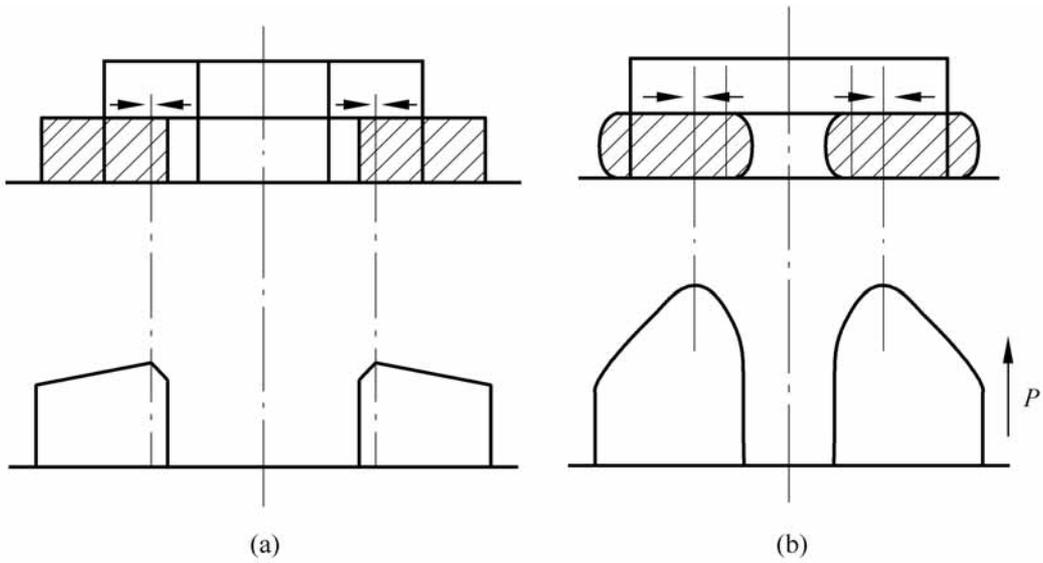


图 16-6 环形件墩粗的变形与压力

(a) 低摩擦; (b) 高摩擦

16.2.2 开式模锻的摩擦

开式模锻在分模面处有金属形成飞边,它的作用使金属充满整个模膛。坯料开始变形时,金属流入模膛同时也流入飞边槽。随后,坯料过剩金属充满飞边槽而形成阻力,使金属充满模膛各凹角处,当模具分界面形成完整飞边时,金属充满模空腔。因此,在飞边槽中应具有高摩擦,而在模膛中则要求低摩擦才有利于成形。

在一般开式模锻中,润滑剂几乎不能在模膛中形成低摩擦而又同时在飞边槽中形成高摩擦。因此,润滑剂的作用不大。通常在模锻较大断面锻件时,为使金属充满模膛才使用润滑剂。但也有人发现,在开式模锻中使用润滑剂会妨碍金属充满模膛,因为润滑会使金属从飞边槽中溢出。

根据测量锻制工件后的推出力可以估计工件与锻模之间粘着摩擦力的大小。例如,利用一个带有锥形孔的环形模(图 16-7),将圆柱形坯墩粗锻造充满模中的锥形孔,然后将模子翻转 180° 测量出推出力 P_E ,进而确定粘着摩擦力。

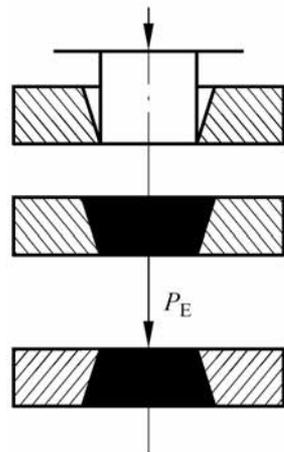


图 16-7 推出实验测量摩擦力

16.2.3 闭式模锻的摩擦

在闭式模锻过程中,模膛是封闭的,其分模面的间隙保持不变。基本工序是正、反挤压变形工序的联合。挤压总是伴有模壁摩擦而妨碍材料流动,因此必须进行有效的润滑。

在锻造时使用润滑剂的作用是在锻造过程中材料与模壁相对滑动时或成品推出模具时保护已形成的表面。通常润滑剂破裂和模具粘结往往不是在成形期间而是在推出期间。

16.2.4 润滑与磨损

根据工艺的难易程度,如工件几何形状、锻造时表面接触压力、材料延伸与滑动的程度等来精选润滑剂。

润滑剂适用性的评价,大多以实验为根据。通常用压力的变化和模具粘着程度作为评价的依据。锻造润滑剂性能评定如图 16-8 所示。图 16-8 (a) 表示在倾斜模具面上锻造扁坯,引起中性面向收敛侧移动,并且朝着扩展侧金属流量增加。这一方法被广泛用来评价润滑剂性能,因为中性面的位置不仅取决于模具面的倾斜角,而且也依赖于界面摩擦阻力。

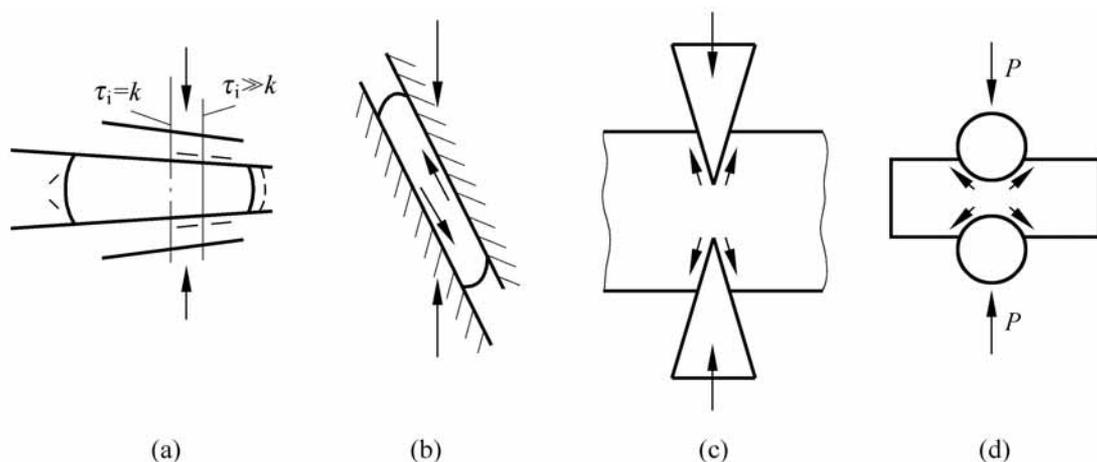


图 16-8 锻压润滑剂的评定方法

使用较好润滑剂时,材料的流动总是在宽度方向较多。这样就可以根据材料流动情况,或确定平均表面摩擦系数 f 或根据适当的方法求得表面剪切因子 m ,对润滑剂进行评定分级。

其他评定锻造润滑剂的方法还有:

(1) 把板料夹在两个倾斜面间,如图 16-8(b)。根据作用力、计算水平和垂直力的比例确定摩擦系数。

(2) 使用夹角为 30° 的尖劈进行压痕实验,如图 16-8(c)。当力作用之后,其尖劈的渗透率可以从滑移线理论计算出。这种实验方法对于高摩擦有着足够的灵敏度。

(3) 如图 16-8(d),使用两圆柱形压头,施以压痕力后,其渗透性与压痕力和压头形状有关。首先确定用粗糙的压头作为粘着摩擦的压痕力,然后用光滑压头和被测的润滑剂进行压痕,确定其压痕力,根据力的大小可以计算出摩擦系数。此实验方法简单可靠,常用来评价高温特性的润滑剂等级。

在用液体润滑剂的模锻,有可能局部地形成塑性流体动力润滑 (PHD) 状态,但大部分区域是边界润滑,因此,实际上为混合润滑状态。

冷锻工艺中对润滑剂的要求是:在承受 20MPa 以上的压力下保持低的摩擦系数;有良好的热稳定性,在 $300 \sim 400^\circ\text{C}$ 范围内不降低润滑效果;涂敷性好和易于清除。例如轻质矿物油,或者二硫化钼、石墨和油酸组成的混合剂。

高压力和大表面扩展挤压变形时,使用液体润滑剂将引起严重的粘着磨损。因此,要应用固体合成润滑剂,例如用热塑性材料如聚乙烯或聚氯乙烯在表面形成固体薄膜润滑,但它们价格高。

锻造过程中变形金属与模壁间的这种特殊工况下的滑动摩擦过程,迄今的研究还无法满意地确定摩擦系数值。典型的摩擦系数值为 $0.05 \sim 0.1$,含良好的添加剂的液体润滑摩擦系数较低,而工件与模具产生粘着时,摩擦系数可能高达 0.3 以上。

锻造模具的表面粗糙度影响金属流动的摩擦阻力和模具磨损寿命,通常选择粗糙峰高度的算术平均偏差 $R_a = 0.125 \sim 2.50\mu\text{m}$,而对于某些冷冲压模具表面常要求更低的粗糙度,例如 $R_a = 0.125 \sim 0.25\mu\text{m}$ 。

一般来说,锻造过程是接触表面在极高的压应力下发生滑动,并伴随很高的温度,但是滑动速度和滑移量一般不大。在这种工况条件下,模具磨损机理包含了粘着磨损、氧化磨损、磨粒磨损甚至疲劳磨损等形式。各个模具的主要磨损形式和磨损部位则需要根据模具材料和形式,以及锻造工艺等因素来确定。

通常冷锻模具寿命很高,用于冷挤压变形时,钢模可加工 10 万件,碳化钨模还可增加 $3 \sim 5$ 倍。所用模具材料应具有足够硬度和耐磨性,而且不能与极压添加剂发生化学作用而形成腐蚀磨损。

实践证明,润滑可显著地减小模具的磨损。图 16-9(a)是根据冲头直径的改变来判断磨损程度,图中表明,使用轻煤油为基础的氧化石蜡磨损最

大,用含有极压剂的工业用冷顶镦润滑剂磨损较少,而用磷皂系润滑剂则磨损极其微小。图 16-9(b)是用峰谷距平均值表示被冲孔的表面粗糙度来表征模具在磨损过程表面粗糙度的变化。

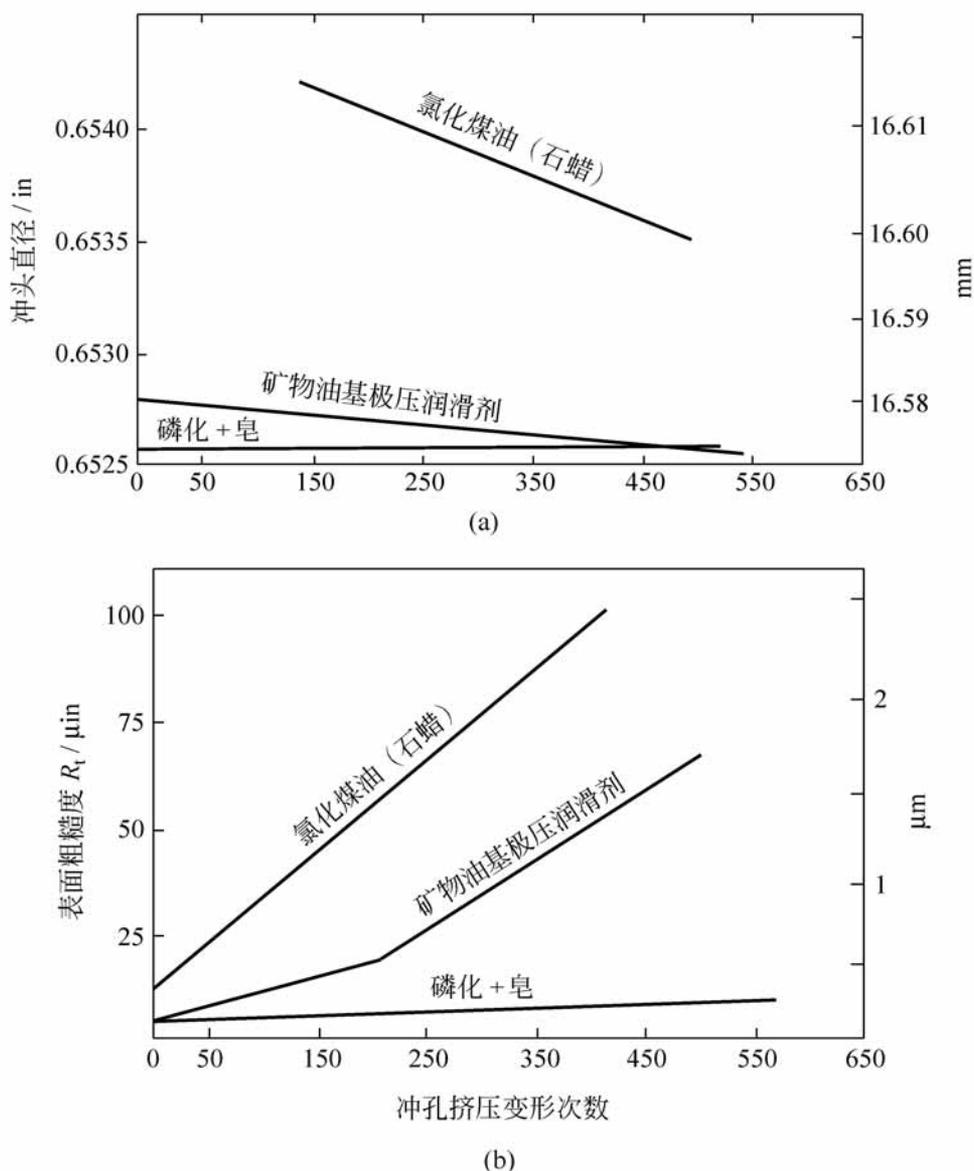


图 16-9 模具磨损曲线

16.3 拉拔摩擦学

16.3.1 摩擦与温度

如图 16-10 所示,拉拔过程中在拉拔力 P_0 的作用下,金属对模壁作用的压力为 p ,金属的变形分布为 ϵ ,产生摩擦力的切应力为 τ ,轴向和径向正应力分别为 σ_l 和 σ_r 。

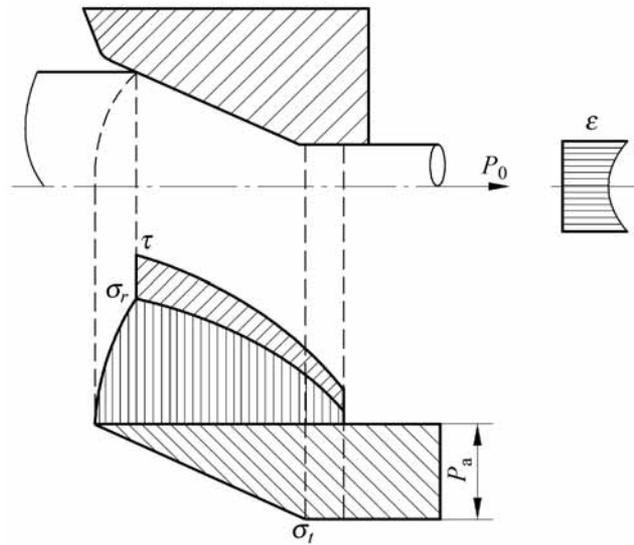


图 16-10 拉拔过程中的应力分布

从图中可知, 摩擦力为

$$F = A \tau \quad (16-8)$$

式中, A 为接触面积, τ 为切应力。

由于金属发生塑性变形的屈服极限为 σ_s , 此时的摩擦系数 f 为

$$f = \frac{F}{N} = \frac{A \tau}{A \sigma_s} = \frac{\tau}{\sigma_s} \quad (16-9)$$

在金属拉拔过程中产生的能耗主要用于金属的有效变形、金属的不均匀变形及金属内部滑移的内摩擦损失和克服金属与模具间的外摩擦损失。研究表明: 摩擦约占总能耗的 10%。随着摩擦系数增加, 摩擦能耗占总能耗比例增加。当摩擦系数 f 由 0.02 变化到 0.1, 减面率即截面积减小的比率为 10% ~ 40% 时, 摩擦消耗功所占比例将由 6% 增加到 40%。

摩擦功几乎都转变为热能。由于摩擦产生的热, 对拉拔过程也有不利的影响。摩擦功 w_f 可由微分式表示

$$\frac{dw_f}{dt} = f p v \quad (16-10)$$

式中, v 为拉拔速度。

拉拔后线材的温度可以按下面的方法计算。首先计算拉拔应力 σ_y ,

$$\sigma_y = \sigma_s \left[\ln \frac{1}{1 - \epsilon} + \frac{2}{3} \frac{\epsilon}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha + \frac{f}{\sin \alpha} \right] \left(1 + \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1 - \epsilon} \right) \ln \frac{1}{1 - \epsilon} \quad (16-11)$$

式中, σ_s 为平均屈服应力, f 为摩擦系数, ϵ 为减面率, α 为模具半锥角。

式(16-11)包括三项, 即纯变形功、剪切功和摩擦功。金属拉拔加工产

生的 80% ~ 90% 热量储存于金属中。设纯变形功和剪切功全部用于金属温升, 而摩擦功考虑只有 m 份用于升温。则拉拔后的温升 T 为

$$T = \frac{\gamma}{Jc} \ln \frac{1}{1 - \epsilon} + \frac{2}{3} \frac{2}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha + \frac{mf}{\sin \alpha} \left[1 + \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1 - \epsilon} \right] \times \ln \frac{1}{1 - \epsilon} \quad (16-12)$$

式中, γ 为金属密度, c 为比热容, J 为热功当量。

图 16-11 给出拉拔速度分别为 10m/ min 和 100m/ min, 减面率为 39.2%, 拉拔含硫量为 0.62% 的碳钢时钢丝变形区的温度分布。

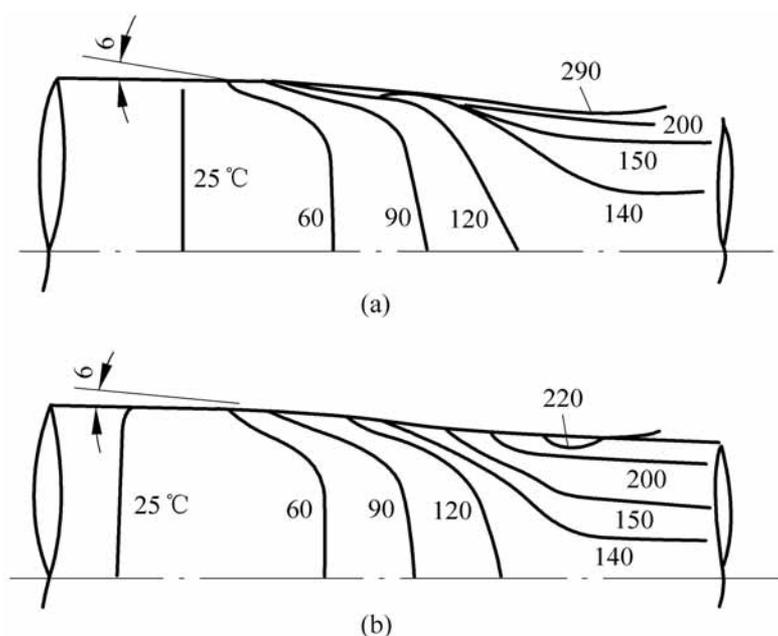


图 16-11 拉拔钢丝的温度分布

(a) 拉拔速度 100m/ min; (b) 拉拔速度 10m/ min

由图 16-11 可知:在模具出口处的钢丝中心温度约 135 ,拉拔速度对它几乎无影响。但与模壁相接触的钢丝表面温度则随拉拔速度增加而升高。这是由于拉拔速度高,模壁与钢丝表面摩擦产生的热量来不及传导,致使摩擦功转变的热全部由钢丝表面吸收而温度迅速升高。

16.3.2 润滑

润滑是影响拉拔工艺的重要因素,不良的润滑不仅影响产品质量,甚至使拔制变形无法实现。

拉拔润滑的目的包括:减小摩擦以降低拉拔动力消耗;降低拉拔产品表面温度,减小应力分布不均,避免出现断裂;减少磨损,防止锈蚀,延长模具寿命。

为了减小拉拔过程的摩擦,可将润滑剂在金属进入拉模前直接涂在线(丝)材上,同时起冷却和润滑作用。对润滑剂的要求应能抗高压,且在高温下保持其润滑性能和润滑薄膜的完整性。例如,在拉拔高碳钢丝时,润滑剂在拉模内受到的压力达 2100 N/mm^2 ,并且在变形区终端温度可达 200°C ,而在润滑条件不好时,温度还会更高。此外,拉拔润滑剂应与钢丝表层粘附良好,否则润滑剂就会从钢丝上拉脱下来。同时,拉拔后制品表面的润滑膜又能容易地被去除。

金属在拉拔时的润滑机理是多种润滑状态的组合。在变形区可能存在流体润滑区、边界润滑区和混合润滑区。

在拉拔时,由于模具的锥角润滑剂在变形区入口处具有强烈的油楔效应,润滑剂将被曳入变形区而形成一定厚度的流体动压润滑膜。此外,由于模具和拔制金属表面存在的凹穴形成储存润滑剂的小池,拉拔时润滑剂将随之带入变形区。表面越粗糙带入的润滑剂越多,润滑膜越厚。在边界润滑区,润滑剂在拔制金属表面产生吸附起到润滑作用。当在润滑剂中加入含有硫、磷、氯等活性添加剂时,在摩擦产生高温条件下,便与金属发生化学反应,从而生成低摩擦的化学反应膜。

16.3.3 润滑剂流体动压的建立

良好的润滑状态应使流体润滑区在变形区中占主导地位甚至全部实现流体润滑。

1. 拉拔压力管润滑计算

拉拔压力管如图 16-12 所示。

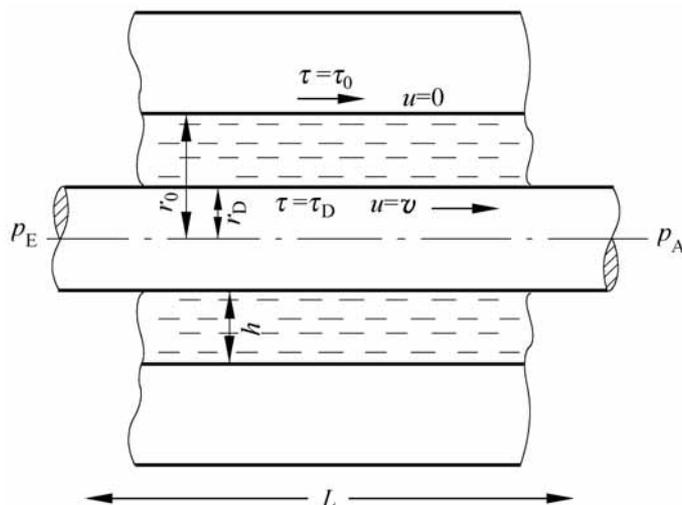


图 16-12 钢丝通过压力管的润滑

图中, r 为压力管内孔的半径坐标; r_0 为压力管内孔的半径; r_D 为钢丝半径; $h = r_0 - r_D$ 为钢丝与压力管内壁之间的间隙; L 为压力管的长度; v 为钢丝运动速度; p_E, p_A 分别为压力管入口和出口端流体的单位压力; τ_0 为在压力管内壁表面流体的切应力。当存在压力差时, 即 $p = p_A - p_E \neq 0$ 的情况下, 当流体在轴向上处于平衡状态时, 应有

$$\tau_0 (d + 2h)L + \tau_D dL = p_A (d + h)h$$

$$\text{即 } p_A = \tau_0 \frac{d + 2h}{d + h} + \tau_D \frac{d}{d + h} \frac{L}{h} \quad (16-13)$$

式中, d 为钢丝直径; τ_D 为钢丝表面的切应力。

因为 $h \ll d$, 故式(16-13)可简化为

$$p_A = (\tau_D + \tau_0) \frac{L}{h} \quad (16-14)$$

由上式可知, 在 τ_D 和 τ_0 一定情况下, 改变 L/h , p_A 也就随之改变, 因此, 可以通过合理选择 h 和 L 来获得所需要的润滑剂的压力。若提高润滑剂粘度, 即 τ_D 和 τ_0 提高, 同样可以使润滑剂压力升高。但是由于流体润滑剂粘度一般比较小, 即 τ_D 和 τ_0 比较小, 实现完全的流体润滑拉拔时, 润滑剂压力 p 应达到在拔制条件下能使金属屈服变形的值, 润滑膜才能保持一定厚度, 使变形钢丝表面和模壁完全分开。故为了实现流体动压润滑, 除了要求间隙 h 比较小以外, 压力管必须具有较长的长度。

2. 拉拔流体动压润滑计算

拉拔常采用皂粉润滑剂, 属非牛顿流体。这种流体的本构关系可用下式近似表示为

$$\tau = A + B \frac{du}{dz} \quad (16-15)$$

式中, τ 为切应力, $\frac{du}{dz}$ 为切应变率; A 和 B 为润滑剂雷诺系数, 它们与压力的关系可用指数形式表示:

$$\begin{aligned} A &= A_0 \exp(\alpha p) \\ B &= B_0 \exp(\beta p) \end{aligned} \quad (16-16)$$

式中, A_0 和 B_0 为压力 p 为零时的雷诺系数; α 为润滑剂压力系数。

由一维的雷诺方程和式(16-15)可得

$$h^3 \frac{dp}{dx} = -6Bv(h - h^*)$$

将式(16-16)代入上式得拉拔非牛顿润滑基本方程

$$\exp(-p) \frac{dp}{dx} = -6B_0 v \frac{h-h^*}{h^3} \quad (16-17)$$

式中, h^* 为常数。

用式(16-17)可计算非牛顿流体拉拔中的动压润滑的压力分布。

16.3.4 拉拔模具磨损

拉拔是金属通过模孔的变形过程。金属在通过模孔时存在很高压力作用下的摩擦,从而模孔产生粘着磨损。磨损导致模孔直径增大,产品直径增加,因此生产中必须规定一定的允许磨损值。

另外,在拉拔过程中由于模孔磨损的不均匀性,使模具几何形状发生变化。这不仅引起润滑膜的破坏,同时也影响拉拔产品的质量。

1. 模具形状磨损

经拉拔使用后的模具的磨损形状如图 16-13 所示。磨损主要发生在三个位置上:

(1) 线材入口处。该处磨损严重,模具呈环状磨痕,致使线材入口形状和位置改变,和拉拔产品表面及润滑膜厚度变化。

(2) 锥角磨损。它将引起模具工作锥形状改变,直接影响润滑膜厚度和拉拔力。

(3) 直径磨损。它使产品的直径变大,因超差而降低模具寿命。如果模具磨损不均匀,拔制品还会形成非圆形断面,使得成品圆度超差。

2. 磨损机理

拉拔模具的主要磨损有粘着磨损、磨粒磨损和疲劳磨损。在许多情况下还包括化学侵蚀和物理损伤。当摩擦表面出现严重的粘着和在运动部件上有显著的振动时将产生严重的粘着磨损,如图 16-14 中曲线 所示。

磨粒磨损是由于经热加工的拔制金属表面大多带有较硬脆的氧化物,剥落后构成磨粒;某些润滑剂和涂层本身含有中等磨粒;在湿拉拔中的磨损

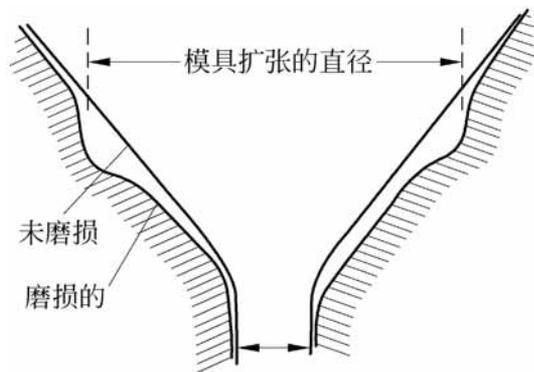


图 16-13 拉拔磨损后的截面形状

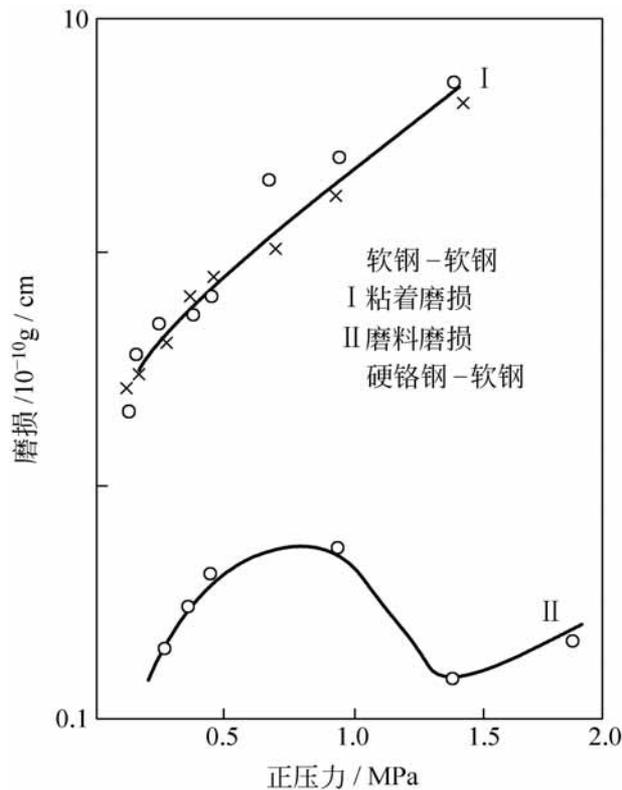


图 16-14 无润滑磨损与载荷的关系

碎屑在拉拔中不能连续不断地清除也形成磨粒磨损。另外,当金属与模具相接触就有可能发生二体磨粒磨损,其磨损严重与否取决于工件与模具材料的配合。

疲劳磨损是由于拉拔时模孔内具有高应力梯度,而且是连续加载下,钢丝振动使疲劳磨损进一步恶化。这种高温造成的热疲劳磨损可能引起钢制模具的裂纹,但疲劳磨损通常不是主要的形式。

3. 减少磨损的措施

1) 改善模具材料

使用耐磨性强的材料制作模具。一般拉拔模用 WC-CO 系硬质合金,拉拔极细钢丝则用金刚石石墨、陶瓷模,尤其 ZrO_2 陶瓷涂层用来拔制不锈钢丝被认为是最有前途的模具。模具表面进行喷镀硬铬等也是提高模具寿命的途径之一。

2) 模具加强冷却与线材直接冷却

拉拔时模具发热会引起润滑失效,因为各种润滑剂都是在特定的温度范围内有效。超出该范围之后,则因化学分解和焦化,使润滑膜破坏,模具磨损加剧。拉拔时约有 20% 的热量累积在模具中,如不及时消除,有可能

使模具温度很高,再加上温度分布不均,局部高温使模具磨损严重,或因与钢套分离造成模芯爆裂。

采用水冷模具或直冷模具都会使模具温度下降,更重要的是能改善模具内温度分布,使模套温度显著降低。此外,在拉拔时采用直接冷却钢丝不仅可以改善钢丝的力学性能,而且影响模具温度下降,从而可以提高模具的寿命。

3) 改善润滑剂和润滑方法

拉拔润滑剂的种类不同,模具磨损也不同。图 16-15 所示为各种润滑方法的拉拔模具磨损量的比较,磨损量以线径的增大表示。表 16-1 给出各种润滑方法对模具寿命的影响。强迫润滑拉丝、直冷拉丝与通常拉丝相比,模具寿命提高一倍。若是强迫润滑与直冷拉丝并用,则模具寿命可提高两倍。湿式拉拔中用强迫润滑模具寿命可提高 2~3 倍。

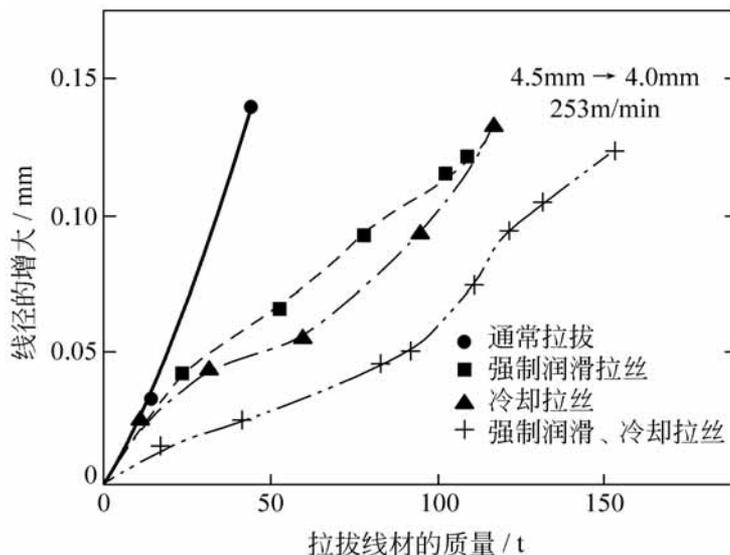


图 16-15 不同润滑下的模具磨损

表 16-1 各种润滑方式的模具寿命比

| 润滑方法 | 干式润滑 | 湿式润滑 |
|-----------|------|---------|
| 通常拔丝 | 1.0 | 1.0 |
| 强制润滑拔丝 | 2.0 | - |
| 冷却拉丝 | 2.1 | - |
| 强制润滑、冷却拉丝 | 3.0 | - |
| 强制润滑拉拔 | - | 3.0~3.8 |

由图 16-16 所示通常干式润滑拉拔与强迫润滑拉拔模具磨损截面。可见,在同样拉拔条件下拉拔 762m 钢丝后,只因为润滑方式不同,其模具磨

损有明显差异。

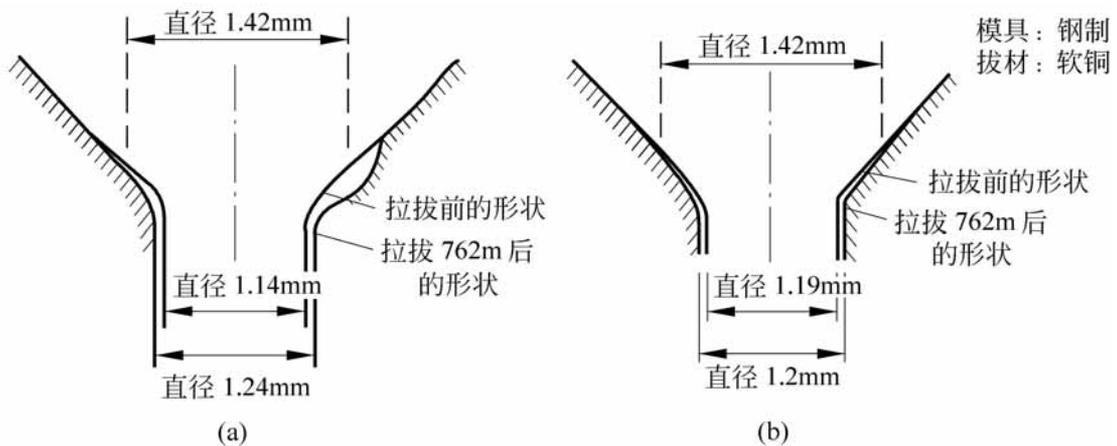


图 16-16 模具的磨损

(a) 干式润滑; (b) 强迫润滑

4) 采用反拉力拉拔

反拉力拉拔是在金属丝拉拔模前入口端施加一个与其前进方向相反的拉力的一种方法。金属在未进入模孔前就产生了拉伸弹性变形,使其直径变小拉应力增加,其结果引起的径向应力和摩擦力减小,改善了模孔的磨损。

5) 采用旋转拉模拉拔

旋转模拉拔是将拉模安装在可旋转的圆筒体内,通过一套机构在拉拔过程中使筒体转动带动模具旋转。因此,金属在旋转模内变形时,变形金属表面与模孔产生相对螺旋运动,改变金属与模具之间的摩擦力方向,使阻碍拉拔的轴向摩擦力减小,致使模具磨损减小。由于在拉拔时模具高速旋转,使模孔内壁磨损较均匀,也可使模具使用寿命增加。研究表明,使用旋转模能使模具寿命增加 10~100 倍。

16.3.5 超声波在拔丝加工中的减摩作用

1955 年, Blaha 和 Lan-glueker 发现超声波可使单晶锌的塑性变形抗力显著降低的所谓 Blaha 效应。随后,人们不断探索将超声波应用于各种塑性加工过程中。研究表明,超声波可以降低拔丝时的拉拔力和摩擦阻力,提高线材的表面质量,减少中间退火次数,有利于塑性低的难加工材料的成形以及极细线材的成形。拔管时在芯棒上施加超声波,除了可以获得减摩卸载的效果外,还可以提高断面减缩率,特别适合于薄壁管的成形。另外,在深拉伸方面应用超声波,也能取得降低拉伸力,增加深冲比的效果。因此,可以说将超声波应用于塑性加工是一种很有潜力的特种加工技术。下面介

绍孟永钢等人^[4]对超声波在拔丝加工中的减摩降载作用的研究结果。

超声拔丝实验装置如图 16-17 所示,它主要包括超声波发生器、超声换能器、超声变幅杆以及拔丝模几个部分。超声波发生器的作用是将 50 Hz 的交流电变成有一定功率输出的高频振荡信号以提供激振模具所需要的能量。

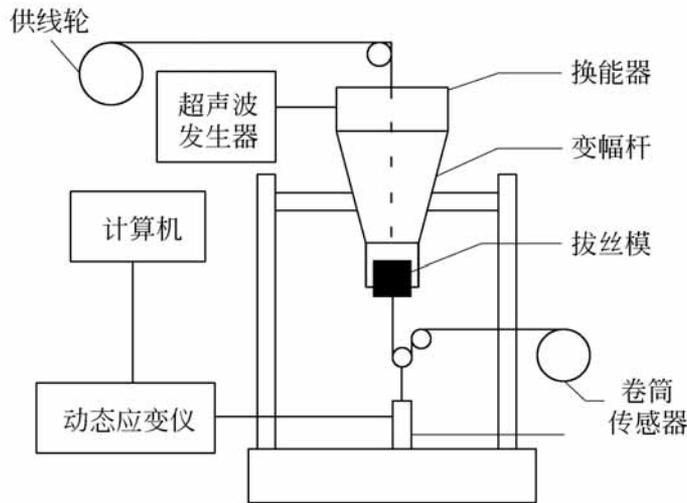


图 16-17 超声拔丝实验装置简图

试验中拉拔力是由应变式测力传感器测得。实验时将铜线的一端预先磨细穿过拔丝模后缠绕在卷筒上,该卷筒经由一个可控硅直流调速装置控制的电机驱动,通过改变电机转速以实现不同的拉拔速度。试验使用皂化液、粘度为 $17\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的机械油和一种水剂润滑液三种介质作为模具与线材之间的润滑材料。

图 16-18 是超声输出电流对拉拔力的影响实验曲线,拔丝速度为 131.3mm/s ,皂化液润滑。细线为未施加超声波时的拉拔力,而粗线则表示施加了输出电流为 0.7A 的超声振动的实验结果。施加超声波后所引起

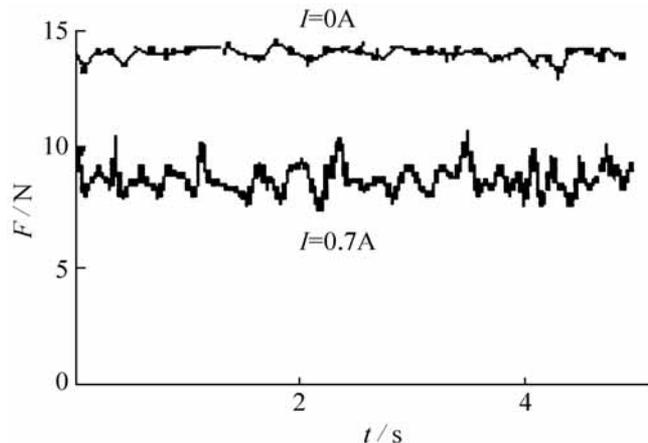


图 16-18 不同输出电流时拉拔力随时间的变化

的拉拔力下降是十分明显的,用拉拔力的时间平均值来衡量,施加超声波后拉拔力下降了约 37%。

从图中还可以看出,施加超声波后拉拔力随时间的波动明显增大了。平均拉拔力 F_{av} 随超声波发生器的输出电流 I 的变化如图 16-19。在本实验条件下,平均拉拔力随输出电流的增加而近似线性减小。

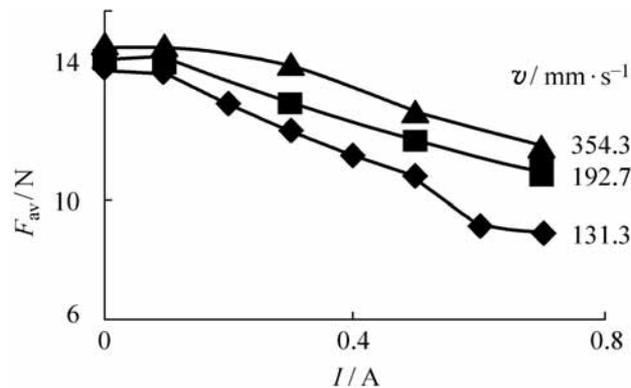


图 16-19 平均拉拔力随输出电流的变化

图 16-19 还给出了几种拔丝速度下测得的拉拔力,所用的润滑材料均为皂化液。在同样的超声振动强度下,拔丝速度越大,超声波所产生的降载效果越小。

尽管实验时所选用的三种润滑材料的化学组成和粘度等性能都有很大差别,但实验发现在其他加工条件相同的情况下,润滑材料并不影响拉拔力的变化。尽管超声波的作用可能会引起润滑条件的改善和摩擦阻力的下降,但不可能因此而导致拉拔力的显著改变。

单从拉拔力的实验结果难以分辨出超声波对界面润滑和摩擦的影响程度,因此还比较了有无超声作用情况下拔丝后所得到的线材的表面形貌。图 16-20 是输出电流分别为 0 和 0.5A 时线材表面的扫描电镜照片。在无超声振动时,线材表面存在较多的坑凹和微小的裂纹,加工纹路不够清晰,有粘着发生的迹象。而当有超声振动作用时,表面穿过模孔时留下的纹路十分清晰和均匀,比较平滑,无细小裂纹。由以上结果可以判断由于超声振动的作用,模具与线材间的润滑得到了改善,减少了表面粘着和损伤,线材的表面光洁度提高。

根据实验研究,孟永钢等人提出了以下几种因素可能是导致超声波在塑性加工中产生减摩降载作用的原因:(1) Blaha 效应;(2) 模具对工件的高速冲击作用;(3) 模具的振动使得在某些瞬间模具相对于工件超前运动因而产生一个促使工件运动的正向摩擦力,从而抵消了一部分摩擦阻力;

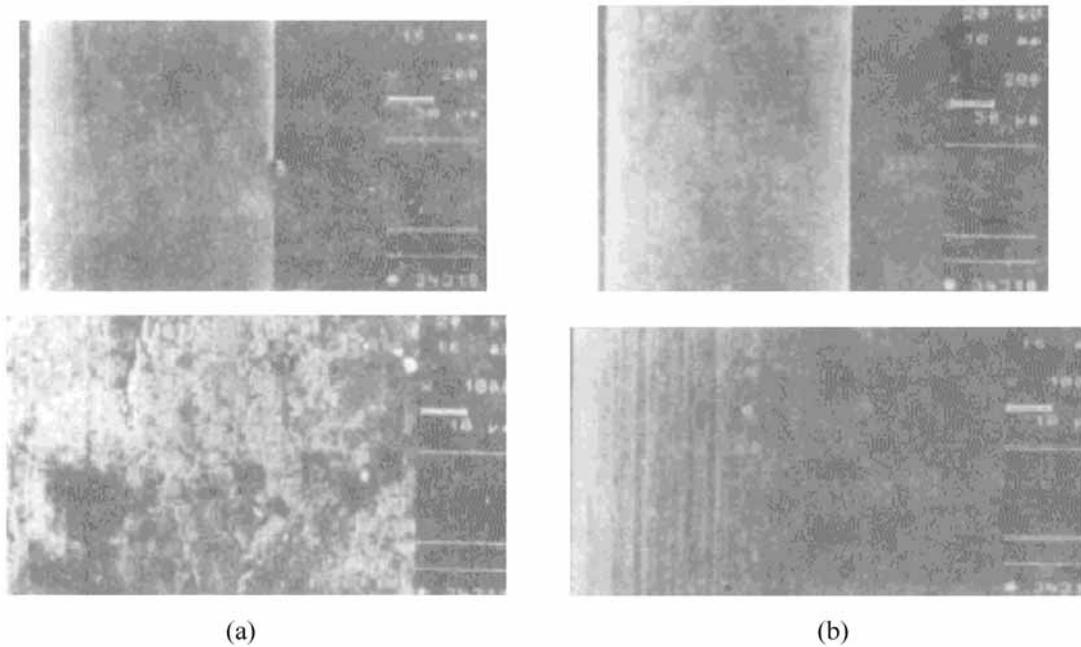


图 16-20 拔丝线材表面扫描电镜照片

(a) $I = 0\text{A}$; (b) $I = 0.5\text{A}$

(4) 超声波促使润滑剂易于进入接触界面从而提高了润滑性能; (5) 超声振动导致工件温度升高, 变形抗力下降。

16.4 轧制摩擦学

16.4.1 轧制过程中的摩擦

1. 单位压力和摩擦力分布

实验表明: 摩擦力沿接触弧的变化规律比较复杂, 它既不服从于摩擦定律也不服从粘着摩擦理论的规律。它和金属的滑动有密切关系, 因而单位摩擦力与单位压力具有较复杂的相互关系。轧制变形区的摩擦力的方向应当指向中性面, 它限制轧件沿接触弧相对运动, 这就是单位压力沿变形区分布出现所谓摩擦峰的原因。

关于轧制过程沿接触弧单位摩擦力的分布有不同的假设, 单位摩擦力分布特点及变形区几何特点对摩擦峰的形状及数值有很大影响。图 16-21 绘出不同条件下单位压力和摩擦力分布, 由图中可以明显看出摩擦峰的变化。以下分别说明图 16-21 中各图的情况。

图 16-21(a) 当 $v/h > 5$ 时, 在接触弧上靠近出口、入口处的部分为滑动区, 该区遵从干摩擦定律, 单位压力 p 向接触弧中心方向逐渐升高。当单

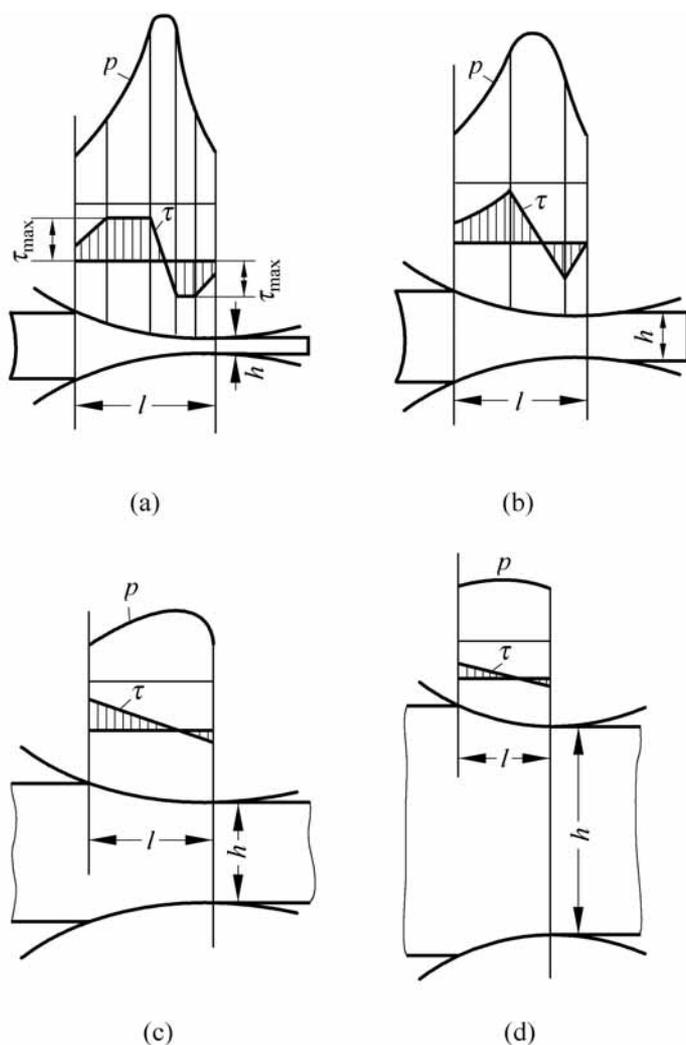


图 16-21 压力和摩擦力在接触弧上的分布

位摩擦力因 p 升高而达到 k 值, 即 $\tau = fp = k$ 时, 摩擦力为常数值, 在粘着区中部为塑性变形停滞区, 在该区域内没有塑性变形发生。对于此种工况, 摩擦力近似按直线规律变化, 此时摩擦峰表现出很陡峭。

图 16-21(b) 当 $lh = 2 \sim 5$ 时, 单位摩擦力常数区段消失, 摩擦力沿接触弧分布呈三角形状态。产生上述情况是因为接触弧长度还不足以使单位摩擦力达到最大值时出现塑性变形停滞区。此时压力分布中的摩擦峰较陡峭。

图 16-21(c) 当 $lh = 0.5 \sim 2$ 时, 粘着区发生在整个变形区, 金属滑动趋势非常小, 摩擦力可用近似于停滞区的三角形分布来表示。此时摩擦峰较为平缓。

图 16-21(d) 当 $lh < 0.5$ 后, 金属沿接触弧滑动趋势更小, 摩擦力对单位压力影响减弱, 摩擦峰很平缓。

2. 轧制时摩擦系数的计算

轧制过程的摩擦情况复杂, 影响因素很多, 通常采用以下几种方法近似

计算摩擦系数。

1) 按扭矩计算摩擦系数

在带材轧制中, 当后张力不断增大直到中性面移到出口点, 此时带材开始打滑(图 16-22(a))。根据打滑时的扭矩可以确定摩擦系数, 即

$$f = \frac{M}{PR} \quad (16-18)$$

式中, M 为两个轧辊的总扭矩; P 为轧制力; R 为轧辊半径。

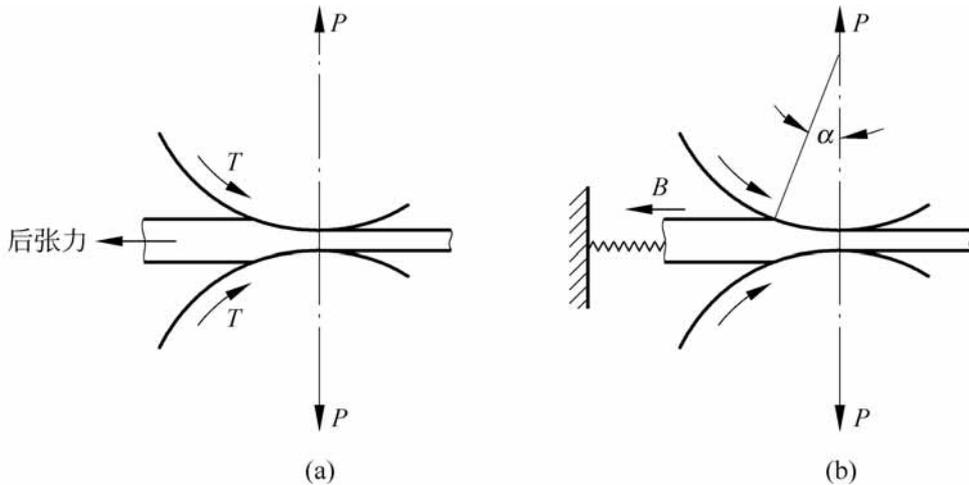


图 16-22 通过打滑确定摩擦力

如果轧机没有装扭矩测量装置, 可把带材固定在一个弹簧拉力器上, 如图 16-22(b)。根据 Pavlov 的理论, 此时摩擦系数为

$$f = \frac{B}{4P} + \tan \frac{\alpha}{2} \quad (16-19)$$

式中, B 为张力; α 为吸入角。

2) 按前滑计算摩擦系数

在中性面上带材与轧辊以相同的速度运动。因此, 带材出口速度更高。如图 16-23, 前滑定义为

$$S_f = \frac{v_1 - v_0}{v_0} \quad (16-20)$$

其中, v_0 为在吸入角 α 处的速度; v_1 为在中性角 β 处的速度。

根据轧制过程的几何参数, 前滑近似等于

$$S_f = \frac{1}{2} \beta^2 \frac{2R}{h_1} - 1 \quad (16-21)$$

式中, β 为中性角; R 为轧辊变形后半半径; h_1 为轧制厚度。

由图 16-23 可知, 中性角为

$$= \frac{1}{2} - \frac{1}{f} \frac{1}{2}^2 \quad (16-22)$$

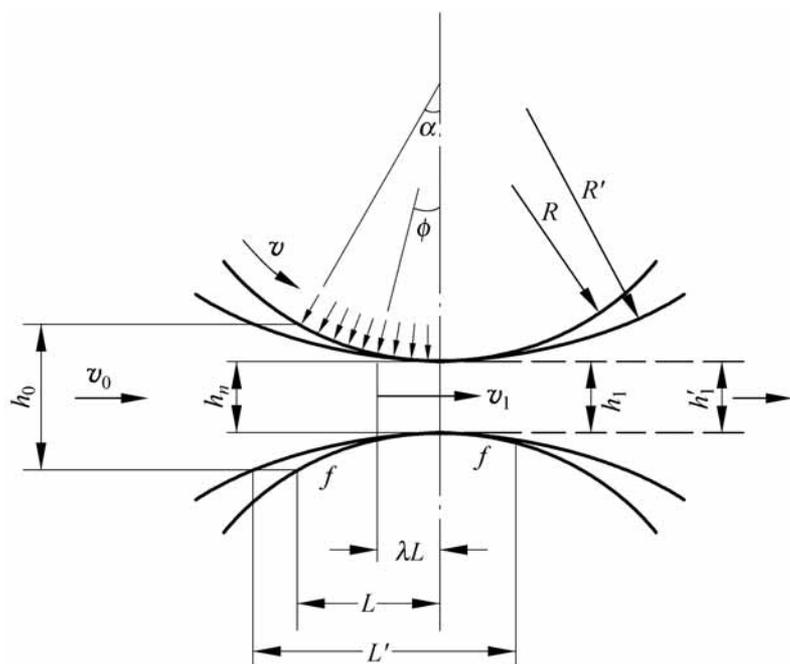


图 16-23 轧制过程的几何形状

这里

$$\sin \phi = \frac{L}{R} = \frac{h_0 - h_1}{R}^{\frac{1}{2}} \quad (16-23)$$

把式(16-23)代入式(16-22), 当 ϕ 很小时, $\sin \phi \approx \phi$, 可得

$$= \frac{h_0 - h_1}{4R} - \frac{1}{f} \frac{h_0 - h_1}{4R} \quad (16-24)$$

前滑的数值可由轧辊表面刻痕法测得, 因此由式(16-21)确定中性角后, 从式(16-24)可求得摩擦系数 f 。

3) 按打滑计算摩擦系数

随着压下量增加, 中性角逐步移向出口。在某一临界压下量时中性面移到出口截面处即 $\phi = 0$, 此时出现打滑现象。当没有张力和 α 角较小的情况下, 由式(16-23)和式(16-24)可以求得打滑时吸入角

$$\phi_{\text{打滑}} = \frac{h_0 - h_1}{R}^{\frac{1}{2}} = 2f \quad (16-25)$$

测得吸入角后, 可由上式得到轧制时的摩擦系数。

16.4.2 轧制中的润滑问题

在轧制工艺中润滑极为重要, 迄今已开发出许多类别的具有良好润滑

性能的轧制液。通常使用的润滑剂是含各种添加剂的矿物油和动、植物油脂,同时,水基介质和乳化液作为润滑剂也受到重视。

大多数带材的轧制采用低吸入角和高轧制速度有利于促进油膜的形成。但是由于需要一个稳定的前滑值,再加上带材表面质量和退火时色斑的限制,因此,实际生产中的润滑常常是混合润滑状态,轧件与轧辊表面有接触。尽管是混合润滑为主,但其他润滑机理也会起一定的作用。

1. 全膜润滑

在弹性流体动压润滑理论发展的基础上,人们对轧制过程的润滑问题提出塑性流体动压润滑理论,将流体力学和弹塑性力学相耦合进行数值分析,并提出了一些轧制中润滑膜厚公式。显然,与点线接触表面的弹流润滑问题相比,要建立完备的轧制中塑流润滑问题的物理数学模型是很困难的,况且实际的轧制过程不可能实现全膜润滑。因此,通常是根据一些近似的膜厚公式进行粗略的分析,而研究的重点应放在混合润滑状态。

常用的一种轧制塑流润滑油膜厚度计算公式为

$$h = \frac{6 \nu}{2k \tan \alpha} \quad (16-26)$$

式中,粘度 ν 采用室温或轧辊入口处的温度,以及压力采用大气压或入口区压力下的数值;速度 ν 用轧辊圆周速度或入口处带材与轧辊的平均速度;屈服应力 k 一般用平面应变屈服切应力表示,即 $\sigma_1 - \sigma_3 = 2k = \sigma_s$,也有一些理论考虑加工硬化的影响; α 为油楔在入口处的曳入角。

由式(16-26)知,油膜厚度随着屈服应力或轧制压力的减少而增加。通常轧制压力可以通过张力的调整来改变,因此对于给定的金属,调整张力可以影响油膜状况。

应当指出,塑性流体动压润滑还可以应用于其他金属成型问题,例如孟永钢等人^[5]对冷锻中的塑流润滑进行了有限元分析。

2. 混合润滑

实际的轧制过程都是在混合润滑状态下进行的。润滑状况取决于带材表面质量以及润滑剂的流体动压特性及边界润滑特性。

1) 油膜厚度

在混合润滑条件下平均油膜厚度反映了流体动压润滑对润滑效果的贡献大小。

一般影响油膜厚度的因素有入口几何参数、粘度、轧制速度。

(1) 入口几何参数

在式(16-26)实际应用中,经常使用轧制吸入角 α ,而不用 $\tan \alpha$ 。从图16-22的几何关系可知,随着轧辊直径增加和压下量减少, α 角变小,则由式(16-26)得到膜厚 h 增加。

(2) 粘度

随着润滑剂粘度的增加,平均油膜厚度也增加,其润滑更加趋于流体动压润滑。

在考虑粘度选择润滑剂时,油的组成和它的粘压系数的影响不能忽略。例如,粘度非常低的油有时比粘度高的油有更大的压下量。又如石蜡比相同粘度的环烷合成油更有效。在油中加入3%的低比重极压剂,由于有效粘度增加,可以得到很低的摩擦系数。

(3) 轧制速度

高的轧制速度有利形成流体动压润滑和增加油膜厚度,然而轧制速度的增加受到工艺的限制。

2) 润滑膜破裂

润滑膜包括流体膜和边界膜的破裂表现为表面粘结和损伤。轧制铝时,在某一临界压下量下,粘结首先出现在严重损伤的表面上。低压下量时,轧制还能继续进行,但在高压下量时,粘结在轧辊表面不均匀地扩展,最后由于带材表面变得粗糙、开裂,并且覆盖着一层金属碎末,轧制不得不停止。对于一个给定的油膜厚度、轧制速度和压下量,可以通过界面添加剂来延缓粘结的发生。

轧制钢和不锈钢时,只有在足够高的速度下轧制产生大量的热才产生局部的粘结。因此,经常把在带材表面上局部的、拉长的缺陷称为热擦伤或摩擦粘结。热擦伤的防止要求轧机的速度低于临界速度。

3) 水基润滑剂

水是很好的冷却剂,同时又是较差的润滑剂。它不能防止粘结,因此水只是偶尔单独用于轧制不易粘结的金属,如普通碳钢和铜。但在实际应用中,水往往与润滑剂结合使用。对于冷轧带钢,应用相当普及的有两个基本方法:

(1) 水与润滑剂分离

将纯净的不含水润滑剂预先加到带材表面上,然后,把水加到轧机上。这种技术主要用于以棕榈油为润滑剂的串联轧机轧制板带钢中。从被轧带材的表面质量可以判断出,加到油脂表面的水几乎很少或根本就不改

善润滑机理,这时的水只起冷却作用。

(2) 乳化液

用乳化液做润滑剂时,在金属表面具有良好的浸润性。矿物油基乳化液的润滑能力较差,对于有色金属来说,加入油脂化合物能改善润滑能力。脂基乳化液应用于钢轧制具有较好的润滑能力。以复合矿物油为基的乳化液,在浓度未到 10% 以前,其润滑能力随浓度的增加而改善。因此,低稳定度的乳化液浸润性比高稳定度的乳化液要好。在带材上预先涂上一一定量的乳化液,可以降低对润滑的敏感性。

16.4.3 轧辊磨损

在大多数情况下正常磨损与滑动距离成比例。在轧制中,相对滑动距离只是整个轧出长度的一部分。因此,轧制时的磨损量是较小的,但是轧辊表面的初始光洁度在轧制过程中将逐渐消失,影响产品的表面质量。

通常粘着磨损和磨粒磨损是轧辊磨损常见的形式,但是轧辊报废的主要原因是由于疲劳造成的表面剥落。

对于较软的轧制材料如铝,粘着磨损主要由局部的微粒间的粘着作用而致,而对于较硬的材料如钛,可能发生直接的粘着磨损。当表面上的氧化物很硬且由坚实的基体支持时,磨料磨损是很明显的。轧制硬铝合金、不锈钢和镍基合金时,轧辊磨粒磨损占整个磨损的大部分。使用某些润滑剂在使轧辊寿命延长的同时,可能会产生腐蚀磨损,不过这种损伤是局部的。

使轧辊报废的主要原因是疲劳剥落。这种剥落有时很深,使得冷轧轧辊表面的硬化层只留下少量的一层。由于局部磨损而产生的不均匀应力分布、轧辊表面研磨时产生的裂纹及残余应力都将加剧剥落的发生。剥落是由于浅层裂纹或延伸到硬化层与轧辊心部边界的环形裂纹而形成的。浅层薄片形成的剥落可以对轧辊重新研磨表面进行修复。

轧辊表面的破坏有时是偶然而严重的。例如带材的焊接点、偶尔进入变形区的外界物体或者带材表面的折叠都可使轧辊表面损坏。还可能是局部的热冲击,或者高速连续轧机失去控制时产生的对轧辊的破坏等。据统计,这类破坏占有所有轧辊损坏的 20% ~ 50%。

16.4.4 轧制用乳化液润滑性能

近年来兼有润滑和冷却作用的乳化液在轧制工艺中有着广泛的应用前

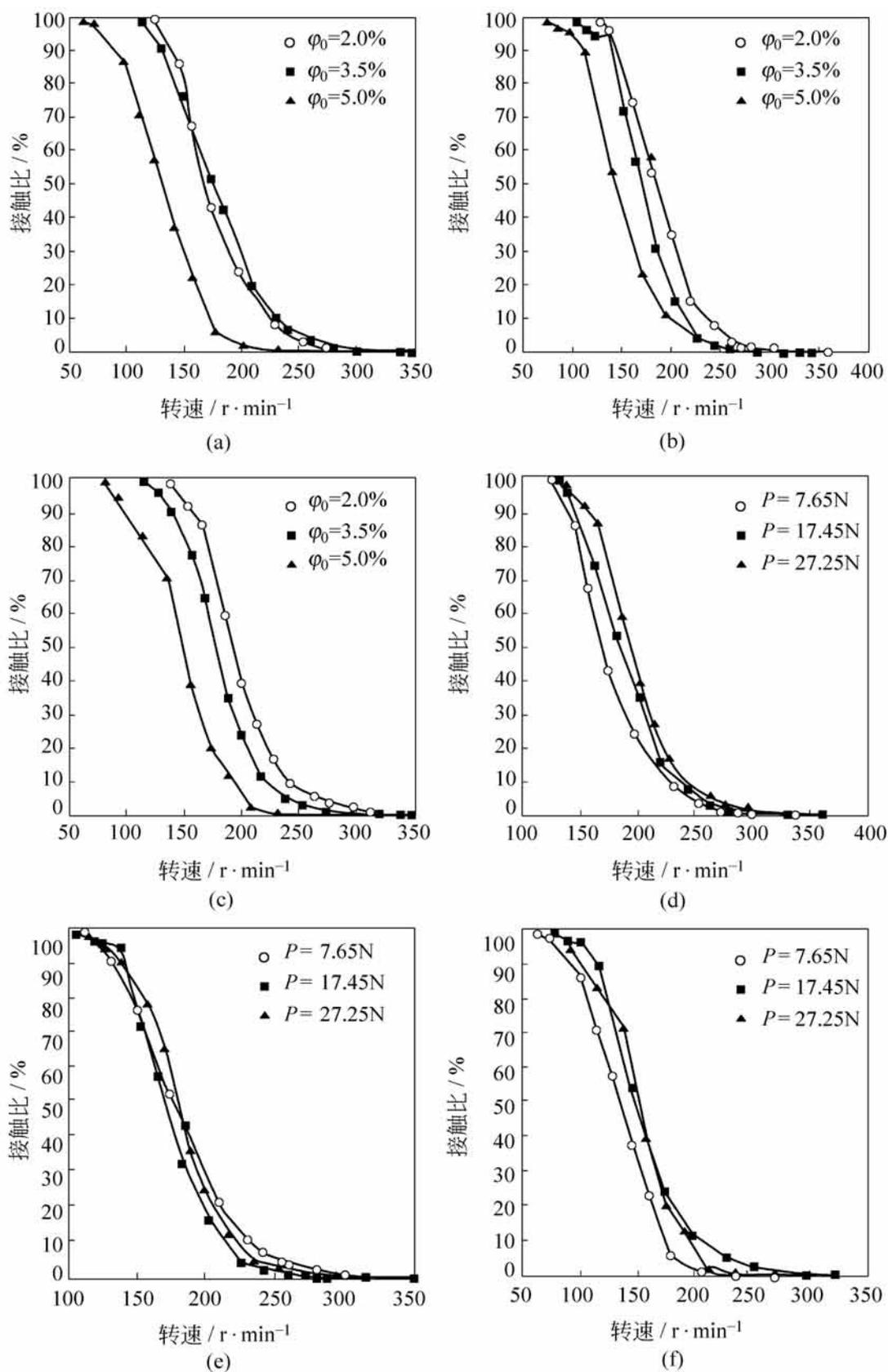


图 16-24 乳化液润滑性能

(a) $P = 7.65\text{N}$; (b) $P = 17.45\text{N}$; (c) $P = 27.25\text{N}$

(d) $\phi_0 = 2.0\%$; (e) $\phi_0 = 3.5\%$; (f) $\phi_0 = 5.0\%$

景,钱林茂和孟永钢等人^[6]对于轧制用乳化液的润滑性能进行了实验研究,这里介绍他们得到的一些结果。

实验是在清华大学摩擦学国家重点实验的混合润滑实验台上进行的。由软钢轧材制成的试块和 52100 钢(硬度 58 ~ 62HRC)制成的圆盘组成线接触滑动摩擦副,它们的表面粗糙度分别为 $R_a = 0.130\mu\text{m}$ 和 $R_a = 0.157\mu\text{m}$ 。

试验用润滑剂有 3 种,分别为体积分数 2.0%, 3.5% 和 5.0% 的 N54 油液与水配制而成的冷轧带材用轧制乳化液。对于同种浓度的乳化液,分别在 $P = 7.65\text{N}$, 17.45N 和 27.25N 三种载荷下和转动速度处于 0 ~ 400 r/min 范围内进行试验。采用电阻法测量混合润滑状态下表面接触时间率。得到在不同油相体积分数 ϕ_0 (%) 和不同载荷下接触时间率随着转动速度的变化关系,如图 16-24 所示。

由图 16-24 可以看出:不同工况得到的曲线按照转动速度都可以分为 3 个区域,分别是:低速区(0 ~ 150 r/min)、中速区(151 ~ 300 r/min)和高速区(301 ~ 500 r/min)。在低速区,接触时间率接近 1,表明存在连续接触,处于边界润滑状态。在中速区,接触时间率介于 0 与 1 之间表明是断续接触,处于混合润滑状态,在这一区域,接触时间随速度升高急剧减小。在高速区,表明接触表面存在完整的润滑油膜,处于全膜润滑状态,此后转动速度继续升高基本无变化。

综上所述,在足够高的速度和油相体积分数条件下,轧制乳化液可以显示出良好的润滑性能,减少混合润滑过程表面接触时间。

参 考 文 献

- [1] 茹铮,余望,阮熙寰,孟宪堂.塑性加工摩擦学.北京:科学出版社,1992
- [2] 李虎兴.压力加工过程的摩擦与润滑.北京:冶金工业出版社,1993
- [3] 格鲁捷夫等著.金属压力加工中的摩擦和润滑手册.北京:航空工业出版社,1990
- [4] 孟永钢,刘新忠,陈军.超声波在拔丝加工中减摩降载作用的研究.清华大学学报,1998,38(4):28 ~ 32
- [5] Meng Y G, Wen S Z. A finite element approach to PHD in cold forging. Wear, 1993, (160):163 ~ 170
- [6] 钱林茂,孟永钢,黄平,史小路.电阻法检测乳化液润滑状态的变化.摩擦学学报,1996,16(3):239 ~ 246

第 17 章

生物摩擦学

人体内存在各种摩擦,如关节的摩擦;管腔(血管、气管、消化道、排泄道)内的摩擦;运动时产生的肌肉、肌腱间的摩擦等。摩擦可以引起人体许多生理变化和疾病。

20 世纪 80 年代兴起的生物摩擦学是摩擦学与生物力学、生物化学、流变学等的交叉学科,在医学与摩擦学工作者共同努力下得到迅速发展^[1]。

在生物摩擦学领域,特别是人和动物的关节和人造关节的润滑机理,是摩擦学原理的应用发展得最快的一个方面。近年来对关节中各种润滑机理和摩擦磨损行为获得了比较深入的了解。

17.1 生物软组织的力学基础简介

17.1.1 软组织的流变学特性

为了认识生物体器官的生理机能,必须首先了解软组织的流变特性^[2]。生物组织都是复合材料,所以其流变性质可视作复合材料的力学性能来处理。根据应力范围的不同,承载的单元是不同的。对生物组织来说,加载和卸载时的本构方程不一样,而且各向异性相当显著。

图 17-1 是收缩后的肌肉纤维的应力-伸长比曲线。图中实线是按式(17-1)算出的理论曲线,它和实测结果相当吻合。

$$\sigma = \frac{1}{3} G \left(\frac{L}{L_0} \right)^3 - \frac{1}{N} \left(\frac{L}{L_0} \right)^{-3/2} \quad (17-1)$$

式中, σ 为变形前的应力; L/L_0 为伸长比(伸长后的长度与初始长度之比); G 为常数; $G = nkT$, 其中 n 为单位体积中所具有的网目链数, k 为玻尔兹曼常

数, T 为热力学温度; N 为网目链中的随机链环数; L 是 Langevin 函数:

$$L(x) = \coth x - \frac{1}{x}$$

L^{-1} 是 L 的逆函数。

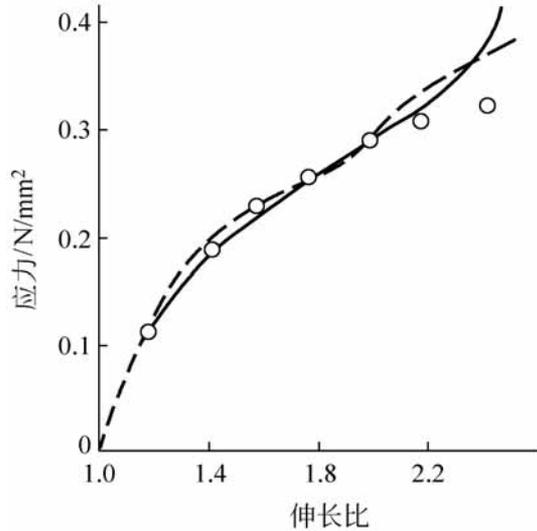


图 17-1 收缩状态肌肉纤维的应力与伸长比曲线

17.1.2 应力-应变曲线的分析

图 17-2 是动物的心肌沿轴向以一定的应变速度拉伸, 又以同一速度卸载时, 测得的应力-应变曲线。

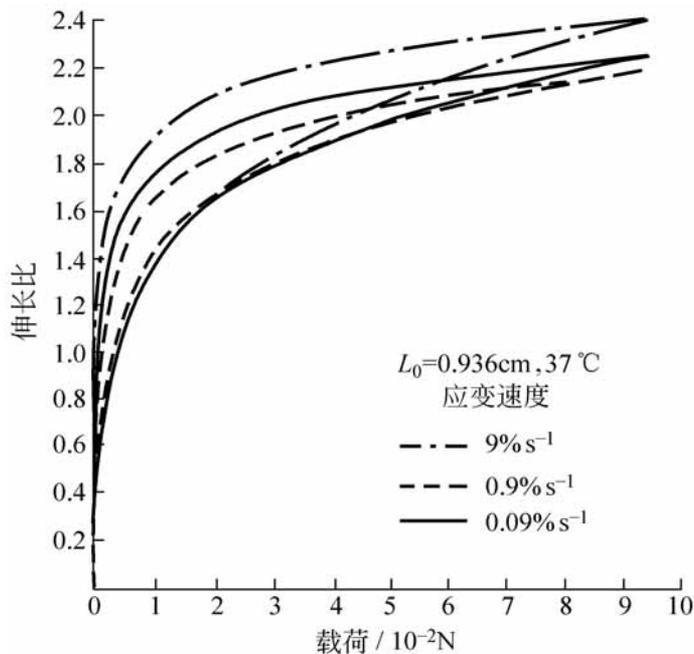


图 17-2 动物心肌应力-应变曲线

图 17-3 是动物主动脉周向切片, 在纵向拉伸时, 张力 T 和 $dT/d\lambda$ 的曲线, T 为相应于初始截面积的载荷, λ 为伸长比。

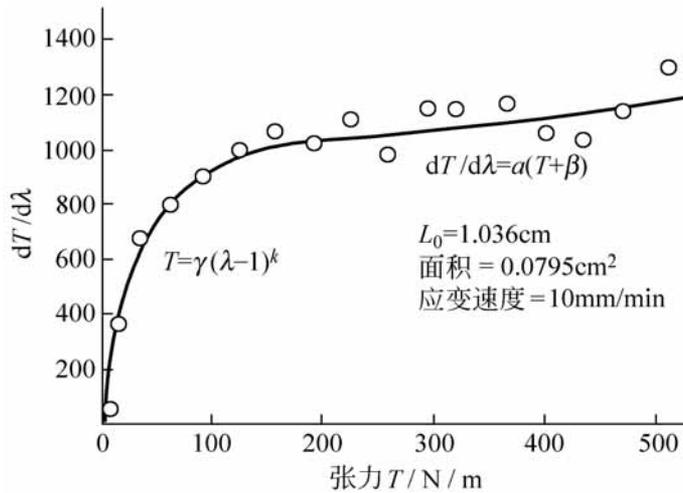


图 17-3 动物主动脉周向切片的 $dT/d\lambda - T$ 曲线

如图 17-3 所示, 当张力 $T > 200 \text{ N/m}$ 时, 有

$$\frac{dT}{d\lambda} = (T + \beta) \tag{17-2}$$

积分上式得

$$T = (T^* + \beta) e^{(\lambda - 1)} - \beta \tag{17-3}$$

这里, $\lambda = 1$ 时, $T = T^*$ 。

同样按图 17-3 可以求得当 $T < 200 \text{ N/m}$ 时, 张力与伸长比的关系为

$$T = (\gamma - 1)^k \tag{17-4}$$

上述应力-应变关系除可用于主动脉外, 还可以用于肠系膜、皮肤、尿管、心肌等许多组织。这些组织的应力-应变关系的一个特征是: 加载和卸载时的曲线不一样(图 17-2)。也就是说, 参数 γ, β, k 在加载或卸载时数值不同。

生物组织的应力-应变曲线的另一特征是, 无论是加载还是卸载, 应变速度的影响很小。在图 17-2 中, 应变速度变化范围为 100 倍, 曲线的变化并不显著。所以, 试样作正弦型伸长时, 滞后回线不随频率而变化。Fung 等^[3] 在周期为 1s 到 1000s 的频率范围内进行的测量结果证明, 上述结论对于肠系膜、动脉、皮肤、肌肉、尿管等都是正确的。

17.1.3 各向异性关系

生物组织几乎都是各向异性的。而目前有关软组织流变性质的数据,

大都是在一维条件下测定的,如细长圆管状试样拉伸。要研究组织的各向异性特性,必须采用二维测量方法。

Fung 等^[3]用动物的腹部皮肤做了二维拉伸实验,其结果在图 17-4 中给出。所谓二维拉伸就是在两个相互垂直的方向上,分别加力使之拉伸。取腹皮纵向和侧向的坐标轴为 x, y , 这时, $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ 都是沿 x, y 方向伸长比 λ_x, λ_y 的函数。图中的曲线是分别固定 λ_x, λ_y 其中之一得到的。

另外 Fung 等人关于动物肠系膜的实验得出,剪切弹性模量不是常数,

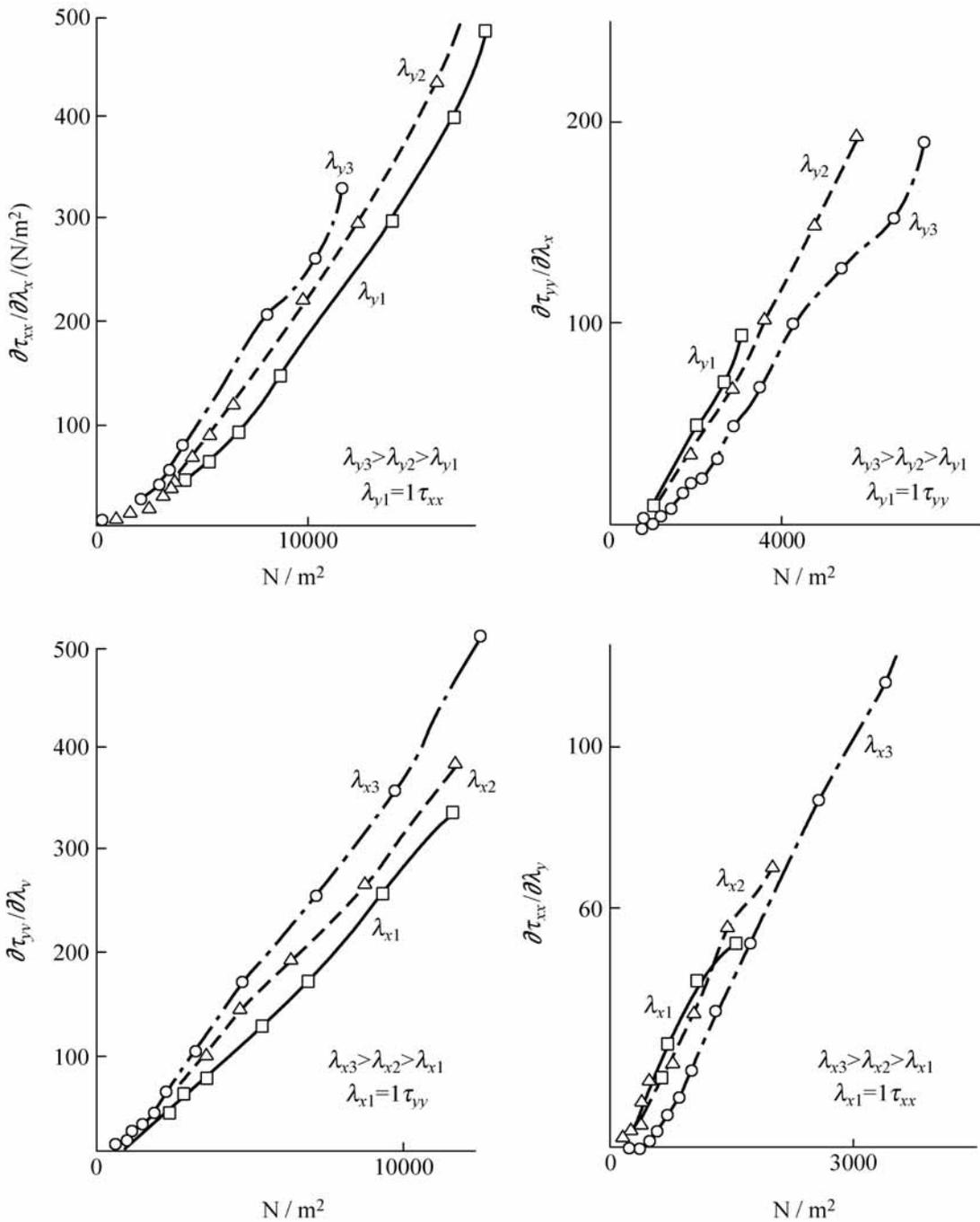


图 17-4 动物腹部皮肤的二维拉伸

而是随应力增大而增大的。若将切应力 τ_{ij} 与切应变 γ_{ij} 的关系写为

$$\tau_{ij} = G \gamma_{ij} \quad (17-5)$$

则根据实验数据得出

$$G = G_0 + f_1(I_1) + c I_2^{1/2} \quad (17-6)$$

这里, G_0 , c 是常数, I_1 , I_2 分别为应力张量的第 1 和第 2 不变量。

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \quad (17-7)$$

$$I_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2] + \tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{31}^2 \quad (17-8)$$

17.2 关节润滑液的特性

17.2.1 关节润滑液

关节润滑液含有称之为粘蛋白 (mucin) 的糖蛋白质, 它不是单纯的粘性液体, 而是具有弹性的粘弹性液体, 且有拉丝性。由于关节炎的影响, 关节润滑液的拉丝性有明显的变化。例如蛋白、研磨后的芋薯之类的物质也是粘弹性液体, 也有可拉丝性。所谓拉丝性, 就是像蒸熟后发霉的豆那样, 可以拉出丝来的性质。胶体化学中习惯于把液体的弹性称为流动弹性。

关节润滑液是由血浆透析而生成的, 它不含纤维蛋白原, 故不会凝固。粘蛋白的主要成分是透明质酸, 关节润滑液的粘弹性主要是它引起的。透明质酸通常总是和蛋白质结合, 以复合体的形式出现的, 如图 17-5 所示。

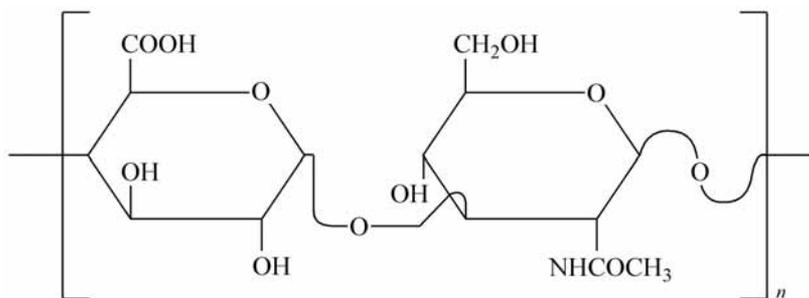


图 17-5 透明质酸的分子结构

在这种复合体中, 蛋白质占 2%, 只要透明质酸不发生分解、复合, 蛋白质是很难分离出来的。所以, 透明质酸的粘弹性与复合体形成的程度没有

明显的关系。透明质酸的分子量约为 10^6 ，它的分子由可卷曲的随机螺旋形链构成，各种外界的作用，例如化学药品、放射线、热、溶剂、重金属离子等都很容易使它的分子链裂解或复合。由于切应力也可以使透明质酸的分子裂解，故静态和动态下测得的粘度不一样。

17.2.2 关节液润滑特性

下面介绍 Myers 等人^[4]关于关节润滑液研究结果。所用测定装置为扭转振动型同心圆粘度计。这种装置在 $5 \sim 25\text{Hz}$ 的低频域内特别方便。在内、外圆筒的间隙之间，装入关节润滑液，外筒作振幅为 3° 的正弦型扭转振动，从内筒的振幅和相位角的滞后特性可以求出关节液的动粘度和动剪切弹性模量 G ，它们都是频率的函数。试样取自患者并在 0 下保存。

一般对于动粘弹性问题，应力和应变关系分别用复数表示，即

$$\sigma = G + iG \quad (17-9)$$

若复数粘度用 η^* 表示，则 $\eta^* = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}}$ ，取圆频率 ω ，应变率 $\dot{\gamma} = i\omega\gamma$ ，因而

$$\eta^* = \frac{G}{\omega} - i \frac{G}{\omega} \quad (17-10)$$

所以动粘度 η' 为

$$\eta' = \frac{G}{\omega} \quad (17-11)$$

由于关节润滑液的动粘度 η' 随 ω 和温度 T 而变化，所以需要按照时间与温度换算法则，将测定值用折合因子 a_T 换算成 25°C 时的数值。若 25°C 时的定常粘度为 η_0 ，而温度 T 时的定常粘度为 η ，则折合因子为

$$a_T = \frac{\eta_0}{\eta} \quad (17-12)$$

图 17-6 给出了 $\lg a_T$ 和 $1/T$ 的关系。

图 17-7 是动粘度 η' 和频率的关系，图 17-8 是动态剪切模量 G 和频率的关系。可见 η' 随频率增大而降低，而 G 则相反，随频率增大而升高。

由于 $\omega \rightarrow 0$ 时， G 急剧减小，关节润滑液可以认为是没有屈服应力的。由图 17-9 可知，静粘度依赖于切应变率，故关节润滑液是非牛顿流体。当 $\omega \rightarrow 0$ 和 $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ 时，静粘度的极限值和动粘度的极限值相等。

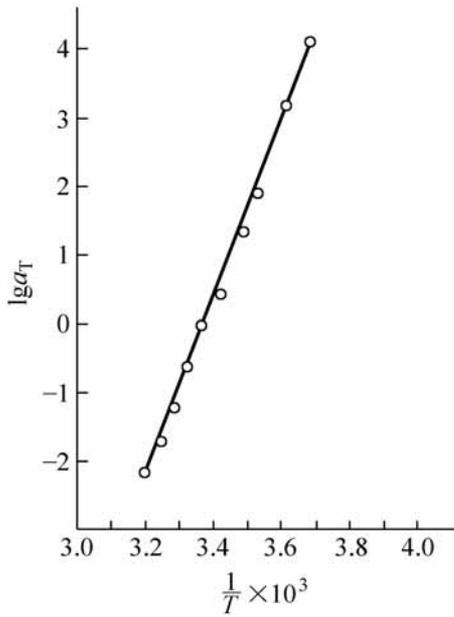


图 17-6 关节润滑液的折合因子 $\lg a_T$

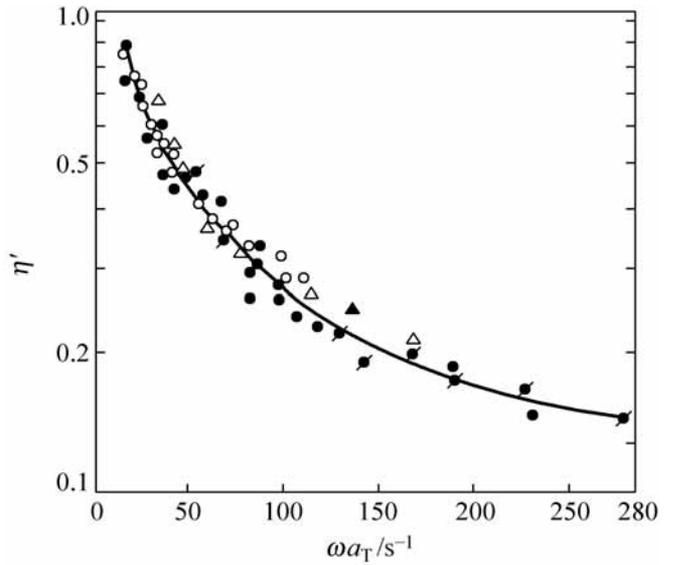


图 17-7 关节润滑液动粘度

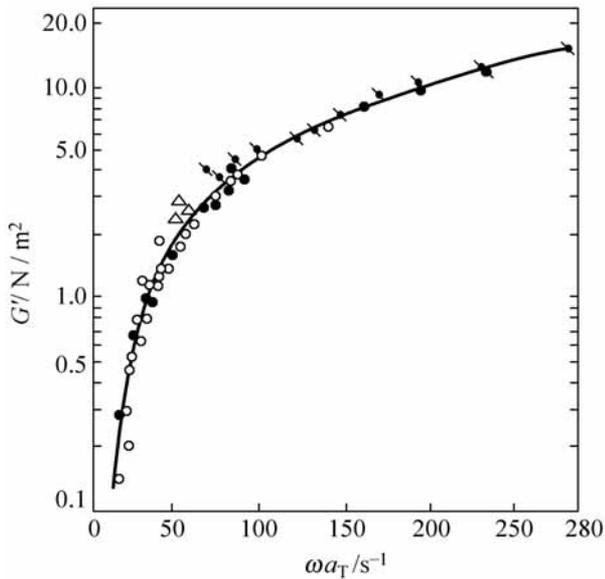


图 17-8 关节润滑液动态剪切模量

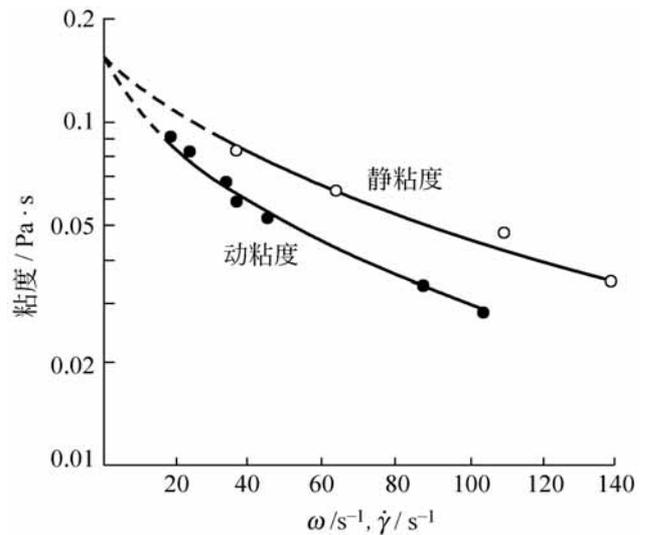


图 17-9 关节润滑液静、动粘度

上述实验结果表明, 关节润滑液在相当于关节作缓慢运动的低频域内, 其性能类似粘性液体, 而在相当于关节作剧烈运动的高频域内, 性能则趋于弹性体。

虽然氢化可的松不直接影响关节润滑液的静粘度, 但注射氢化可的松以后, 关节润滑液的动粘度和弹性模数 G 均增大。

关节润滑液的动粘度主要取决于透明质酸的浓度, 部分地依赖于透明质酸和蛋白质的复合体的形成。另一方面, 关节润滑液的动弹性模量和复

合体的形成呈线性关系。

17.3 人和动物关节的润滑

图 17-10(a) 列出人关节的示意图, 它粗略地表明膝部、臀部或脊骨共有的特性。关节传递载荷的结构件是骨骼, 它们的端部可以用一球体的或椭圆体的表面(臀部)来表示, 用以提供某种形式的支承面积。而在另一情况下用圆柱体(膝部)可能更恰当。

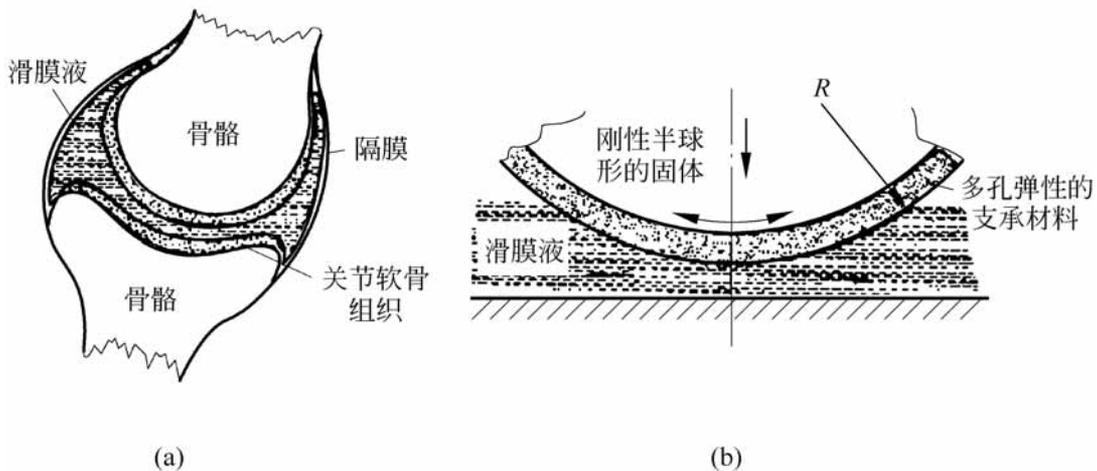


图 17-10 人关节及其润滑模型

(a) 人关节; (b) 等效润滑模型

图 17-10(b) 中给出了关节等效的润滑模型。骨骼表面在关节的内部由一层较软的或多孔的关节软骨组织所覆盖, 这就是支承材料。上下骨骼上的软骨组织由润滑液使之分开, 这种润滑液由隔膜包住并在关节之间提供必要的润滑作用。

从自然进化的人的关节结构远远胜过人类能够制造的人工关节。如正常的人类关节显示摩擦系数处在 $0.001 \sim 0.03$ 的范围以内, 这甚至比流体动压润滑的径向轴承或精密的滚动轴承都要低得多。最早的关节润滑机理研究推测这是一种流体动压作用, 但很快发现以此来解释人类关节中实际测到的极低的摩擦系数是不正确的, 因为在骨骼表面之间的相对滑动速度从没有大于几厘米每秒的情况, 不可能产生足够的承载力。

人们还提出过边界润滑、分泌和弹流润滑等机理, 这些机理在关节

的润滑中起着重要的作用。另一种润滑形式是在软骨组织之间存在挤压膜,它强烈地阻止骨骼表面的相互接近,特别是当膜厚变薄的时候例如 $0.25\mu\text{m}$ 。人和动物关节中的整个润滑机理可以看作是以挤压膜作用为主,加上边界润滑、分泌和弹流润滑效应的组合。后者作为挤压膜一种补充作用。

17.3.1 人体关节的性能

人体关节的软骨组织是平滑的软骨,铺衬在关节中骨脂的表面上。其功能是吸收由于关节运动所造成的磨损,提供一种润滑机理以使关节的摩擦降到最低,并传递身体内部发生的载荷。每一个关节软骨组织的厚度是不同的,而且常常是在同一关节的表面上各个位置也有所不同。在青年时期,较大的关节软骨组织的厚度可以达到 $4\sim 7\text{mm}$,而较小的关节软骨组织的平均厚度为 $1\sim 2\text{mm}$ 。

软骨组织的结构由分布在整个三维的骨胶原纤维网状组织中的单细胞所构成。这种网状组织埋在一种称为软骨胶硫酸盐的基体物质之中,并由一种液体充满。液体组分弥散在整个固体骨架之中,并以不同程度的分子吸力与骨架连接在一起。某些液体分子牢固地结合在纤维结构之上,但大多数仅仅是保留在纤维间的空隙之中。这些液体分子在由压力梯度所造成的整体流动和化学浓度局部差异所引起的扩散的联合作用下,穿过细胞的基体而转移。发生在软骨组织中的两种主要的物理化学过程是集结与膨胀,它们是液体流入和流出细胞组织的结果。集结过程是当外部的压缩载荷加到软骨组织上时,引起了液体含量的减少,而膨胀则意味着液体含量的增加。这种液体发生变换的速率是特别有意义的,因为它决定软骨组织厚度变化的时间。

关节软骨组织最重要的结构特征是它的多孔性,孔的平均尺寸约为 6nm 。这些孔在软骨组织表面上的分泌对润滑起重要作用。用探针扫描仪器测出的软骨组织表面粗糙度表明,它的结构比工程支承面要粗糙得多。图 17-11 表示两个软骨组织表面轮廓的对比,图 17-11(a)为健康青年人的,图 17-11(b)为老年人的软骨表面。前者呈现“波纹”或明显的宏观结构,在每一宏观凸体的表面迭加微观粗糙度,如图 17-11(a)所示;而图 17-11(b)所示的老年人软骨组织表现更大的宏观起伏波度。

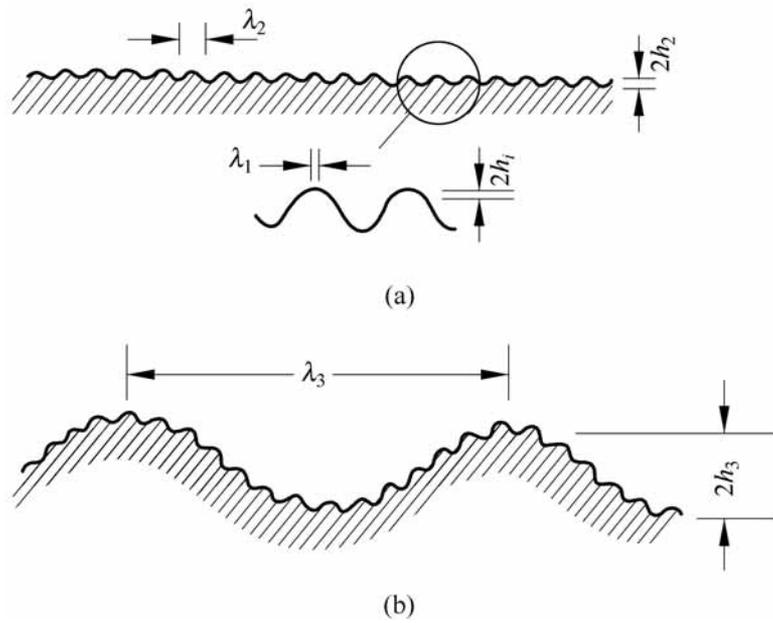


图 17-11 典型关节软组织的表面粗糙度

(a) 健康青年人; (b) 老年人

17.3.2 关节润滑液

关节润滑液是一种透明、黄色而发粘的物质,存在于自由运动的关节腔穴中,并与软骨组织相互作用以实现润滑功能。从工程的观点,可以把润滑液结构看作是由粘朊酸构成的蜂窝状的网状组织的界壁,而水状组分处于其中。因此,在健康状态下,润滑液似乎具有海绵状结构。化学成分表明,它是一种血浆的渗析物加上粘朊酸和一种微小的细胞状组分。润滑液最重要的性能是它的粘度,而这似乎主要与粘朊酸组分有关。作为一种边界润滑剂,粘朊酸能够影响软骨组织的摩擦性能。

润滑液属于非牛顿液体,它有明显的剪切稀化特性,即粘度几乎与切应变率成线性地下降。如果在软骨组织表面间的膜厚低于大约 $1\mu\text{m}$ 时,则液体分子能显著地影响滑动性能,并显示出边界润滑剂的特性。这是由于在载荷作用下润滑液浓缩,因而在软骨组织的表面上形成一种凝胶体,它比整体液体有高得多的粘度。凝胶体的形成是在法向载荷下低粘度的液体透过软骨组织的海绵状结构而引起的。凝胶体状的润滑液被截留在软骨组织表面上的凹陷处成为储存器,以维持必要的边界润滑作用。图 17-12 列出分泌作用的边界润滑图形,它是由于润滑液从软骨组织的孔中逸出,凝胶体截留在隔离的坑中而形成的。

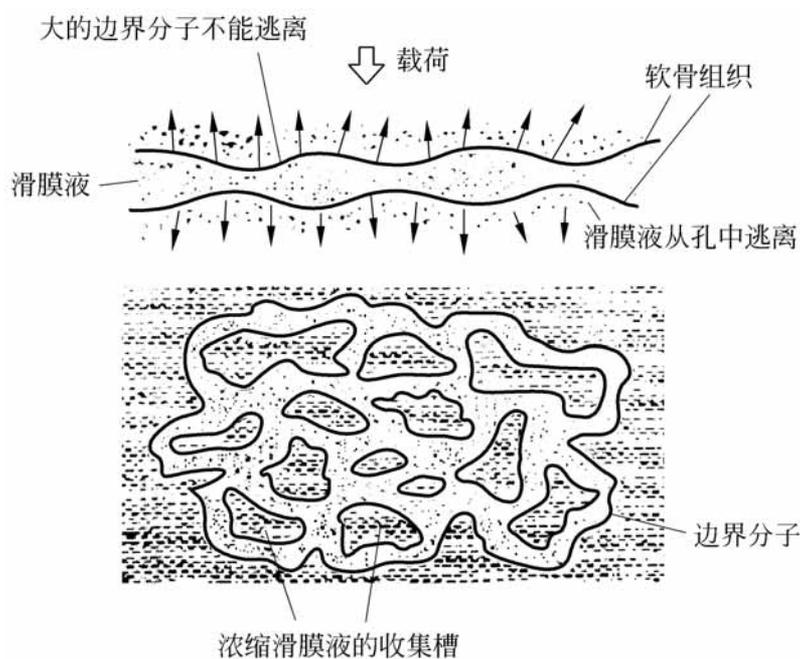


图 17-12 含润滑液(滑膜液)的关节软组织接触区

17.3.3 关节润滑机理

如上所述,动物关节中的润滑机理较为复杂。在承受载荷的关节中,流体动压效应对润滑的作用很小,然而在轻载状态下(如在行走中的摆动状态),两个软骨组织的表面可能是由于流体动压力的产生而被分开的。这个效应可以认为是对主要的挤压膜作用的一种补充机理,挤压膜在承载中起主导作用。

两个平行表面相互接近的挤压膜效应,可由公式(17-13)表示:

$$t = \frac{K L_T^4}{W} \left(\frac{1}{h^2} - \frac{1}{h_0^2} \right) \quad (17-13)$$

式中, t 是时间; K 是表面形状系数; η 是润滑剂粘度; L_T 是当量长度; W 是载荷; h 是膜厚; h_0 是初始膜厚。

上面是挤压润滑膜一般形式,也适用于关节承载的情况。从这一公式可以看出:当保留的挤压膜厚度 h 达到足够小的数值时,接近时间会变得很大。而令人惊奇的是从人体关节实验中观察到的挤压膜的时间,比公式(17-13)理论上预示的要大很多,这是由于关节润滑膜的粘度大幅度提高所致。例如,当 $t = 40\text{s}$, 且最小膜厚相当于粘朊酸的分子直径(约为 $0.5\mu\text{m}$), 可以发现润滑膜的平均粘度是 $20\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。这比润滑液的整体粘度约为 $0.01\text{Pa} \cdot \text{s}$ 大得多。这一结果表明:在挤压过程中,一种十分厚的物质或凝胶体在软骨组织的表面上形成,即软骨组织中的孔允许小分子物质渗

出,而把大的凝胶体状的分子留下,如前所述并在图 17-12 中所描绘的那样。

当开始行走时关节在轻载下摆动以前,加载的时间一般小于 1s,因此可以肯定,在流体动压作用尚未产生以前,挤压膜的减薄是十分微小的。在长期站立时间内,挤压膜效应产生一种加稠的凝胶体物质,用以提供边界润滑作用,这样,仍保持较低的摩擦系数(约为 0.15)。图 17-13 比较了有病的和健康的软骨组织的挤压膜润滑效应,它用达到边界膜状态的时间 t 对挤出时间百分率的曲线表示。在这里,挤出时间定义为在压挤载荷下,软骨组织中的润滑液从初始的完全饱和状态下降到最后实际上干摩擦状态所需的时间。

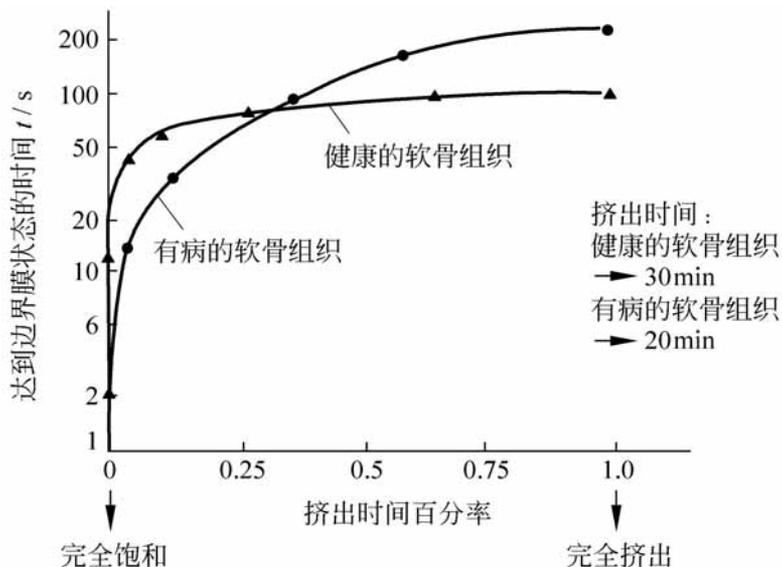


图 17-13 健康与有病关节软骨组织挤压性能比较

在辨别图 17-13 中健康的和有病的软骨组织的性能时,可以看出,从完全饱和到完全挤出达到边界膜状态所需的时间逐渐增加,而有病的软骨组织要大得多。这可能部分的是由于在使粘度较低的润滑液渗透多孔结构和在胶凝现象的综合效应上,健康的和有病的软骨组织有不同的能力。

在长时间的站立之后,图 17-12 中环绕截留液体的各凹坑边缘将处于边界润滑状态,而在挤压过程中这些边缘的尺寸将增大。同时,由于软骨组织表面上的不均匀(见图 17-11)在承受压力下将形成非常大的面积接触,弹性流体动压效应将会出现,而且它比边界润滑效应较好地发生在挤压过程中。弹性流体动压的、边界的和流体动压的膜厚,与关节软骨组织表面粗糙度相对尺寸的比较次序示于图 17-14。

对人体关节润滑的研究,有助于寻求消除影响老年人关节疾病的方法。

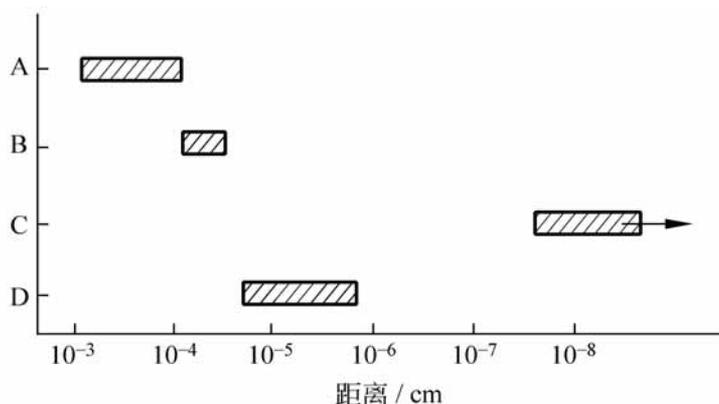


图 17-14 人体关节润滑中的相对尺寸

A—弹流润滑膜；B—粘肽酸分子长度；

C—流体动压膜；D—关节软骨组织表面粗糙

骨关节炎是常见疾病之一，影响臀部和膝部行动。虽然其原因还没有完全清楚，但痛苦和僵直与软骨组织的磨损和润滑破坏密切相关。把一种人造润滑液注入关节中，可能是防止进一步恶化的方法。如果人造润滑液的粘度足够高，它将形成厚膜把骨骼表面隔开，使痛苦和磨损减少。然而，高粘度将要求高的剪切力，这就需要有坚强的肌肉方可使关节动作。患关节炎的关节的肌肉能否承受这些高的剪切力并容许关节自由运动是值得怀疑的。

17.4 人工关节的摩擦

下面介绍 Yoshinori 等人^[5]对人工关节所进行的模拟试验和一些结果。

1. 模拟试验机

试验机的原理如图 17-15 所示。

该实验台是为模拟膝关节弯曲-伸展运动和行走运动中胫骨承受轴向载荷的情况而设计的。施加载荷是通过下面和侧面的两个液压激振器来实现，这些激振器由计算机控制。在股骨和胫骨之间的摩擦力是利用应变片测量股骨轴的转矩而获得。

图 17-16 是试件的结构尺寸图。

圆柱形的股骨关节用 SUS316 不锈钢制成，一块 UHMWPE 平板作为胫骨元件。在试验中，采用 PVA 水凝胶和聚亚安酯两种人工软骨材料。在 PVA 水凝胶中的平衡水为 79%，PVA 的平均聚合度为 2000，其平均皂

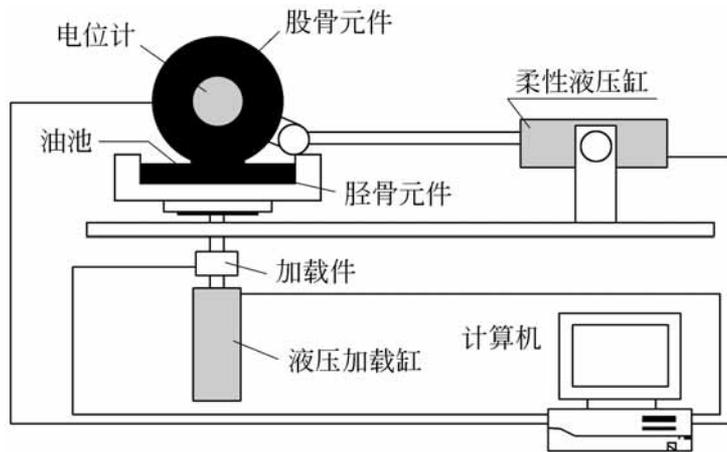


图 17-15 膝关节模拟试验台

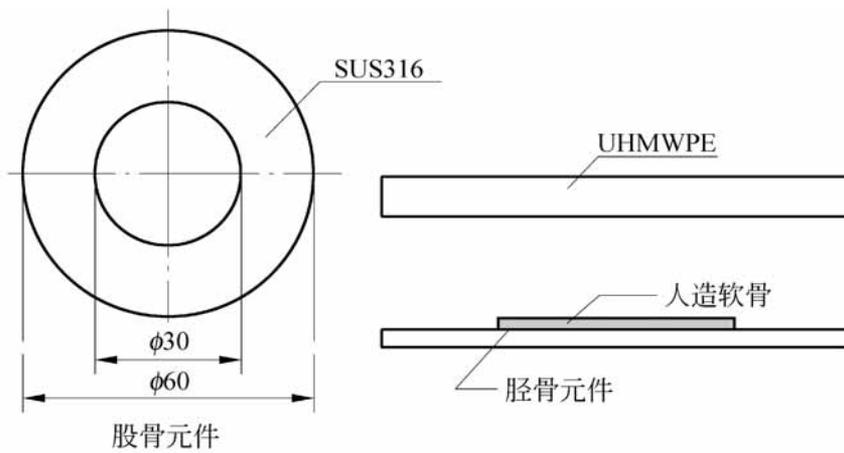


图 17-16 试件的结构尺寸

化度为 99%。聚亚安酯是医用材料。胫骨元件是用人工软骨材料聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl)——甲基丙酸烯 (methacrylate) 作表面,并用氰基丙烯酸盐 (cyanoacrylate) 粘合而成。所有的试验是在 14 ± 1 的室温下进行的。

2. 试验结果

图 17-17 给出了 UHMWPE (超高分子量聚乙烯) 胫骨元件与不锈钢股骨元件配合时转矩随循环百分比的变化曲线。图中结果表明:在行走的条件下,浆液蛋白可以增加摩擦。血清蛋白和球蛋白都能增加不锈钢股骨和 UHMWPE 胫骨间的摩擦力,而球蛋白更加明显有效。

对于两种人工软骨材料受蛋白质影响的长期实验表明:聚亚安酯的摩擦力受浆液蛋白质的影响而增加,球蛋白的影响更加明显。另一方面,浆液蛋白质减少 PVA 水凝胶的摩擦力。

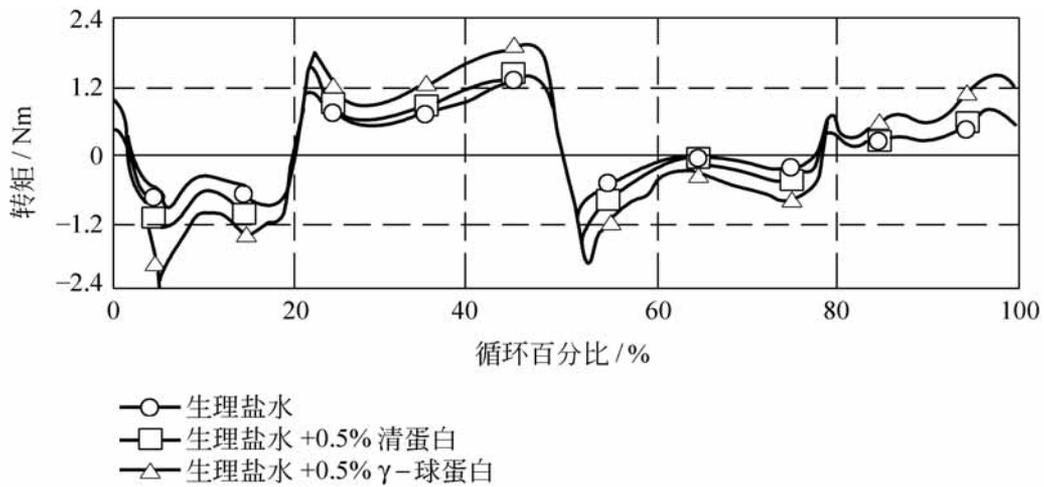


图 17-17 转矩与循环次数关系变化曲线

17.5 人体关节的磨损

人膝关节发生磨损时,将产生磨粒。这些磨粒由关节表面材料组成,通过磨粒分析可研究磨损表面的状况。以往的研究已开发出一种使滑液中磨粒磁化并进行铁谱分析的方法。这里介绍应用这种方法对人膝关节滑液的抽出物和关节生理盐水冲洗液进行铁谱分析的一些结果^[6]。

从骨性关节炎患者和风湿性关节炎患者的关节滑液抽出物的铁谱分析证实磨粒的存在。通过双色偏振光显微镜和扫描电子显微镜能够识别和区分骨性关节炎和风湿性关节炎的关节骨、软骨及纤维组织的磨粒。

与滑液分析的其他技术相结合,上述方法可作为一种无损伤、反复评估关节的磨损率以及根据磨粒进行磨损机制和病理研究的手段。对于骨性关节炎病关节采用此分析技术也有可能作为关节病早期诊断,以及对治疗效果的评估和预测关节病进程的一种方法。

17.5.1 实验仪器及方法

实验过程是将人体关节滑液中的磨粒通过磁化而分离出来,制成铁谱基片,在双色显微镜下对磨粒进行观察和分析,从而获得磨损信息。

1. 预处理液的制备

通过医用无菌针头从病人关节中抽取滑液 3mL,并用等体积生理盐水稀释。对于风湿性关节炎患者滑液需经过真菌透明质酸酶 (fungal

hyaluronidase) 处理, 以避免软骨组织磨粒生成凝块状沉淀; 而对于骨性关节炎患者所抽取的滑液无需经过酶处理。经过酶处理后的试样, 需在 37 左右保持半小时, 取稀释后的试样 1mL 注入试管并摇匀, 在医用离心机以 6000r/min 离心处理 10min。离心处理后, 试管内液体分成上、下两层, 去除上层清液, 留下底层沉淀, 再加入 1mL 生理盐水摇匀, 重新进行离心处理。按以上滑液处理顺序重复两次后得到预处理液。

2. 生物磨粒铁谱基片的制备

在预处理液中加入含 Er^{+3} 磁化液 1mL 进行磁化, 并充分振荡使磨粒悬浮。在铁谱制谱仪上 (图 17-18), 试样 1 被微量泵 2 输送到与磁铁 4 上方呈一定角度的玻璃基片 3 上。随液体试样流下的过程中, 磁化的磨粒在磁场梯度作用下, 由大到小依次沉积在玻璃基片的不同位置上, 经清洗残液和固定颗粒的处理后, 制成铁谱基片。

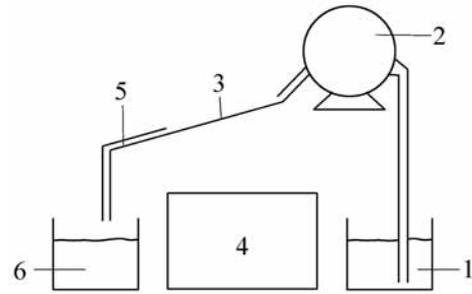


图 17-18 铁谱制谱仪工作原理
1—液样; 2—微量泵; 3—玻璃基片;
4—磁场装置; 5—导流管; 6—贮油杯

在双色显微镜下对铁谱基片定好起始坐标, 利用不同光强的透射光、反射光及不同角度的偏振光对磨粒进行观察。图 17-19 至图 17-22 为磨粒图像。

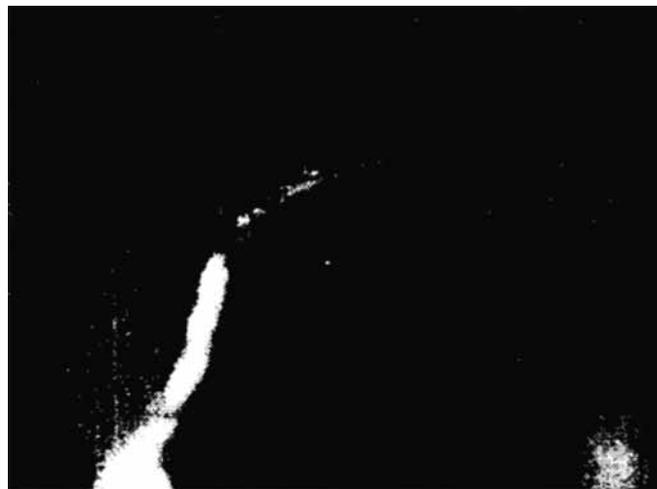


图 17-19 风湿关节炎中条状纤维组织

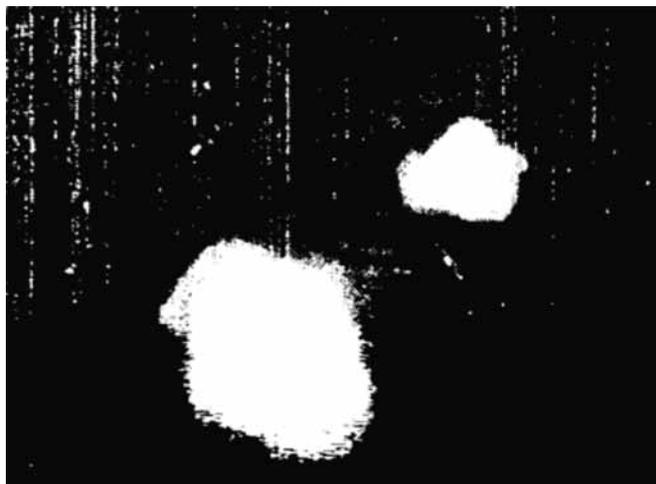


图 17-20 类风湿关节炎的球状磨粒



图 17-21 骨性关节炎的骨磨粒(白色)



图 17-22 骨关节炎中的细条状磨粒

17 5 2 实验结果

根据人膝关节滑液抽出物的磨粒谱片分析可看出:沉积于铁谱基片上的不同磨粒具有不同形状及不同的光学性能,这就为磨粒种类(如骨、软骨、

纤维组织等)的识别提供了依据。和正常人骨、软骨、纤维组织的标准试样对比,证实了根据光学特性可区分骨、软骨及纤维组织的磨粒,电子能谱分析表明,骨性关节炎患者滑液中的软骨磨粒存在钙化层。

根据磨粒分析可以得出人膝关节的磨粒有如下一些特征:

(1) 纤维组织的磨粒旋光性高,呈细条状,长度为 $10\mu\text{m} \sim 10\text{mm}$,一般沉积在铁谱片的中、后部接近出口处;

(2) 软骨磨粒旋光性适中,在偏振光下呈黄色。骨性关节炎磨粒多为条状、块状,长度几微米到几百微米。风湿性关节炎磨粒多为直径 $10 \sim 25\mu\text{m}$ 块状,沉积在铁谱片的中、后部接近出口处;

(3) 骨磨粒旋光性很高,偏振光下呈白色,一般呈颗粒状、块状。骨性关节炎关节滑液中产生的磨粒较细,沉积在铁谱片的前部入口处。

在骨性和风湿性关节炎的关节滑液中,软骨磨粒较多,有条状、块状和球状。其中球状软骨磨粒多出现于风湿性关节炎中。条状和块状的软骨磨粒在骨性关节炎患者滑液中居多,其磨损表面凹凸不平,棱角边缘尖锐,大多是长而薄的磨损微片剥层,具有典型的疲劳磨损特征。这是由于关节软骨之间反复摩擦,接触面存在高度应力集中,在周期性载荷作用下疲劳剥落而形成磨粒。

骨性关节炎患者的骨磨粒明显地较风湿性关节炎患者多。严重的骨性关节炎患者滑液中存在较多骨磨屑。这种磨粒的产生或是由于关节软骨被磨掉后引起骨表面产生裂纹,造成骨切削;或是一侧的关节软骨被磨掉时,磨粒嵌入另一侧关节软骨中,其凸出部分与骨直接接触,犁削出一系列的微小磨粒。这些骨磨粒表面凹凸不平,呈片状或块状,具有典型的疲劳磨损特征。

17.6 其他生物摩擦研究

目前生物摩擦学中一个重要的研究目标是研制摩擦磨损低、病理反应小的人工器官,主要集中在人工关节和心脏瓣膜的研究。有时被称为生物工艺学。

现在人工关节已经大量地应用于关节炎晚期、外伤致残或骨瘤切除病人的关节置换。根据调查推算,我国可能有 100 万 ~ 150 万骨关节病人需要做人工关节手术。通常手术后 10 年的近期效果相当满意,但是更长期的工作可能因磨损、滑液老化或生物相容性不适而出现脱位、松动甚至引起骨

折。关节置换的耐久性逐年提高,根据国外报道,手术后 20 年全膝和全髋置换术的成功率分别达到 93% 和 86%。^[1]

自从 1960 年首次进行人工心脏瓣膜置换手术以来,人工心脏瓣膜为延长心瓣膜疾病患者的寿命做出了一定的贡献,但迄今尚未能取得满意的结果,原因是心瓣膜材料与血液反复摩擦产生的磨损以及疲劳断裂产生不良的影响。

以上讨论的人类和动物关节的润滑问题,可以提供一个对所涉及的原理的基本知识,然后运用这些知识可能提供假肢设计的改进方法,或恢复有病关节功能的人工关节设计等等。其他同等重要的例子包括应用摩擦学原理对于血管和毛细管中血的流动、体内废液的排泄,以及人造心脏瓣膜的研究等。可以预料,这些领域的工作将有助于提出减少血凝结、血栓形成、血管扩张和心脏病发生的参考意见。

用摩擦学系统的测量方法检验皮肤病是生物工艺学另一项实用技术,它处在发展阶段。在有病的皮肤上,滑动摩擦系数与正常健康皮肤不同,设计一种轻便的摩擦仪器用作检验皮肤病的医疗器械。它有可能检验皮肤遭受各种不同外伤所引起的摩擦性能的反应,如烧伤、结疤和引起严重感染的擦伤等。

参 考 文 献

- [1] 温诗铸. 世纪回顾与展望——摩擦学研究的发展趋势. 机械工程学报, 2000, 36 (6): 1 ~ 6
- [2] 岡小天. 生物流变学. 北京: 科学出版社, 1980
- [3] Fung Y C. Biorheology of soft tissues. Biorheology. 1973, 10: 139 ~ 155
- [4] Myers R R, Negami S, White R H. Dynamic mechanical properties of synovial fluid. Biorheology, 1966, 3: 197 ~ 209
- [5] Yoshinori S, Teruo M. Effect of serum proteins on friction and wear of prosthetic joint material. Proc. of First Asia International Conf. On Tribology, Beijing, China, 1998, Vol 2, 828 ~ 833
- [6] Gu Zhenqiu, et. al. A preliminary ferrographic study of the wear particles in synovial fluid of Human Knee Joints. Proc. of First Asia International Conf. On Tribology, Beijing, China, 1998, Vol 2, 838 ~ 841

第 18 章

生态摩擦学

人类为了可持续发展面临着资源和环境两个重大问题,为此,最近提出的生态摩擦学研究可望成为今后的重要研究方向之一。

据估计,全世界约有 $1/3 \sim 1/2$ 的能源以各种形式消耗在摩擦上,而摩擦导致的机械磨损所损耗的材料在我国每年高达几百亿元,因此减摩耐磨技术的开发和技术普及具有重要的经济和社会效益。最大限度地降低摩擦是人们长期追求的目标,近来出现的超滑技术研究采用有机分子膜润滑或表面改性和形貌修饰等方法可望实现较低的摩擦;而通过表面涂层方法将已磨损表面进行修复的再制造技术也将是减少材料损耗的措施。

摩擦的不稳定性特别是低速时的粘滑现象所激发的摩擦振动是机械设备噪声的重要来源之一。目前,有关摩擦振动与噪声的机理和抑制研究都还很不够。

润滑油特别是添加剂含有多种有害的金属元素。据统计,全世界每年润滑油消耗量为 300 万吨,其中约有 30% 因各种原因被排放到环境中而造成污染,伤害人类健康。虽然有许多废油再生方法,但因成本太高无法实施。从 20 世纪 90 年代开始,国际上大力开发绿色润滑油以取代传统的矿物基润滑油,它们目前在世界范围内市场占有率已达 10%,并呈逐年增加趋势。绿色润滑油应具有低毒性、低污染及可生物降解的特点,其基础油主要有聚醚、合成酯和天然植物油等。而与基础油相适应的添加剂是绿色润滑油实际应用的前提,这方面的研制才刚刚起步。

18.1 超滑技术

现代机械科学的发展,出了机电一体化、超精密化和微型化的趋势,许多高新技术装置如微电子设备、微型机器人、生物医疗微型器械等的摩擦

副常要求摩擦系数极低。由于超精密微型机械中摩擦表面接触率大、间隙小(甚至达到纳米量级)等特点,从而使表面效应、润滑分子的粘性力对摩擦的影响显得非常突出。在此背景下,提出实现超滑和零磨损的概念,引起了摩擦学、材料科学、物理和化学等研究学者的关注。

理论上说超滑是实现摩擦系数为零的状态。一般认为摩擦系数在0.001量级或更低的状态即为超滑态。对超滑技术和机理进行深入的研究,不但对探索润滑和摩擦的本质具有很大的意义,而且也将为人们逐渐地摆脱摩擦和磨损的束缚以及现代高新技术装备和纳米技术的发展提供可能。

当前超滑的研究集中在以下两方面:一方面从理论上研究超滑态的产生条件和存在机理,另一方面进行超滑材料和技术的研发。这两方面都已取得了初步进展。

18.1.1 超滑机理研究

目前超滑的产生机制有四种: 处于宏观量子态的低温超流问题; 特定配对表面和特定滑移方面的超滑问题; 高速剪切导致润滑剂分子有序排列而出现的超动摩擦问题; 高分子聚合膜造成的界面斥力场而出现的超滑问题。

1. 超流

超流现象先是由 λ 于 1938 年在一次低温实验中发现,即液氦(^4He)在 2.17K 以下温度时出现无摩擦的流动现象,盛在陶瓷容器中的超流氦会像水经过滤网一样漏出来,盛在玻璃容器中的超流氦会沿容器壁“爬”出容器^[1]。Kubota 进一步研究表明,临近固体表面的是一层正常流体,而超流层仅是正常流体最外层的厚度为零点几纳米的薄层,如图 18-1 所示,从而纠正了人们普遍认为的超流层是最临近固体而且比较厚的设想。超流的机理是玻色子在低温下会发生玻色凝聚现象,大量的离子都会处于同一最低的能态上。当有宏观量级的离子处于这一能态时,量子性质就表现出宏观量子效应。于是,处于最低能态的离子构成的流体就是超流体,而在基态上发生了元激发的流体则是正常流体。

如图 18-2 所示一宏观物体 M 在超流体中以初速度 v 运动。如果有摩擦阻力,必然产生能量和动量的变化。在激发一个动量为 p 的元激发后, M 的速度变为 v_1 ,根据能量和动量守恒定律可知

$$\frac{1}{2} Mv^2 = \frac{1}{2} Mv_1^2 + (p) \quad (18-1)$$

$$Mv = Mv_1 + p \quad (18-2)$$

两式联立, 消除 v 得

$$(p) - pv + p^2/2M = 0$$

由于 M 相对很大, 最后一项可以忽略。设 p 与 v 之间的夹角为 θ , 于是有

$$pvcos\theta = (p) \quad (18-3)$$

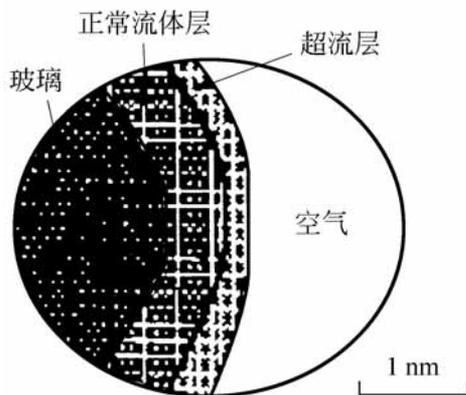


图 18-1 液氦超流层

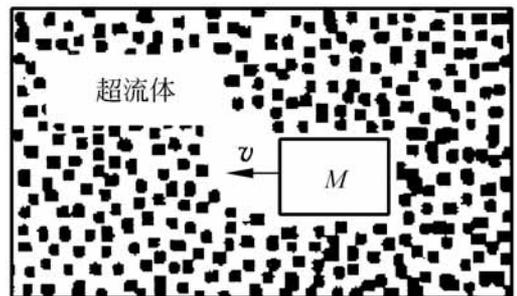


图 18-2 超流模型

由于液体处于宏观量子态, 能量不连续而存在一个势垒, 即 (p) 存在一大于 0 的值。当传递给宏观量子态的液体一个小于 (p) 最小值的能量时, 不会引起该液体的能量变化, 也就是说物体 M 存在一临界速度 $v_c = [(p)/p]_{\min}$ 。当运行速度 v 小于 v_c 时, 其在宏观量子态的液体中运行时所传递给该液体的最大能量小于 (p) 最小值, 元激发动量 p 就不能产生, 于是液体的动量就不发生变化, 即能量和动量守恒定律就不成立。于是, 物体 M 在运动过程中本身的动量和能量不发生变化, 即无摩擦阻力。对于液氦, v_c 为 58 m/s 。由此可见存在超流的条件为: 存在宏观量子态; 元激发的能谱应大于 0。

超流现象发现后, 引起了物理学界的广泛关注。先后有几位从事该方面研究的科学家获得了诺贝尔奖。但是, 由于超流是低温下出现的特性, 目前尚未能应用于工程中, 特别对摩擦学领域而言, 还很难对其实用价值进行评估。

2. 超滑

超滑是由日本的 Shinjo 和 Hirano^[2] 根据原子运动模型通过计算而提出的。他们指出: 按照一定规律排列的两个晶体表面作相对运动时, 由于分子间力的弱作用和时效作用, 在特定配对的摩擦表面和滑动方向下, 摩擦阻

力可能变为零,即处于超滑态,如图 18-3^[4]。其超滑条件为: 准静态滑动; 弱粘附力; 接触面不相适程度大; 存在出现超滑的特定方向(如同塑性变形中的滑移方向)。在一些实验中,如采用云母、高真空下特定滑移方向的二硫化钼,高取向热解石墨作摩擦副,已观察到沿特定方向滑移时,摩擦系数迅速减少的现象。例如 MoS_2 在真空下摩擦系数小于 0.001。Hirano 等人在随后的研究中,运用晶体结构和表面能的理论对二硫化钼等固体润滑剂的超滑现象作了有益的探索。他们用扫描隧道显微镜观察到净洁的 $\text{Si}(001)$

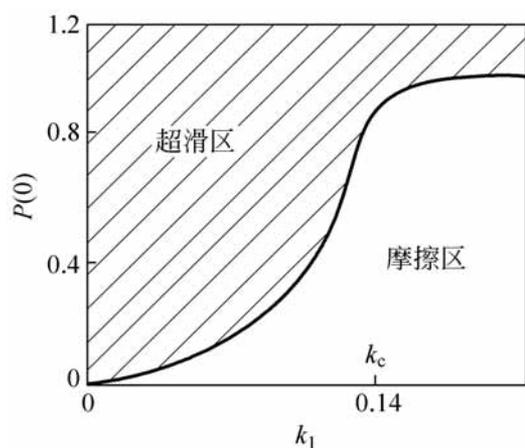


图 18-3 一维摩擦系统分区图

表面与探针 $\text{W}(011)$ 表面之间摩擦力消失的现象,从而证明即使在强粘附力作用下,加载表面间仍然存在摩擦力消失的现象。遗憾的是由于其实验精度不太确切,他们的研究结果未得到普遍的认可,特别是实验验证方面尚需深入研究。

3. 超动摩擦

如第 15 章 15.4 节所述,超动摩擦是由 Yoshizawa 和 Israelachvili^[3] 提出的。他们用 DHDA 在表面力仪上进行滑动摩擦中的粘-滑实验,如图 18-4。当发现滑动速度 $v < v_c$ 时,出现粘-滑现象,即静、动摩擦交替,摩擦系数较高。当 $v > v_c$ 时,粘-滑现象消失,以动摩擦系数滑动。若速度进一步提高超过 v_c^* 时,摩擦力突然降低并趋于 0,即出现超动摩擦现象,见图 18-4(a)。此外,在相对湿度 H_r 为 100% 时,观察到 DHDA 摩擦系数达到 0.0005,如图 18-4(b)。Yoshizawa 等人将此现象推测为润滑分子从咬合状态转变为有序排列的分离态而造成的,见图 18-4(c)。但是,这种分子作用状态的转变机理尚不清楚,而且还没有得到实验的验证。另外,对于非直链分子是否存在超动滑动以及如何从咬合状态转变为分离态有序排列还有待于进一步研究^[4]。

4. 高分子聚合膜的分子刷理论

Jacobklein 等人在表面力仪上采用高分子聚合膜(带极性端头的聚苯乙烯)对表面力进行实验研究。他们发现:这种高分子聚合膜的极性端头以

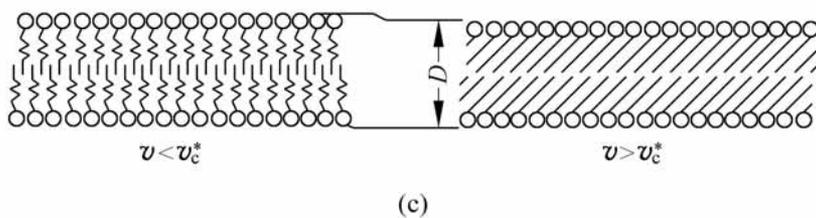
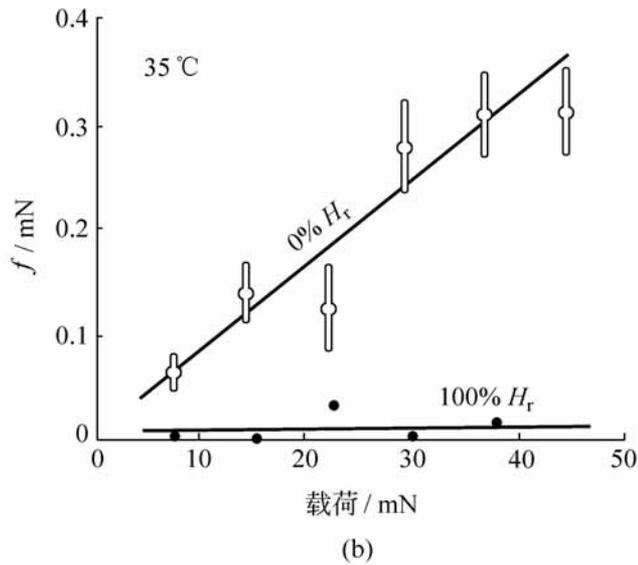
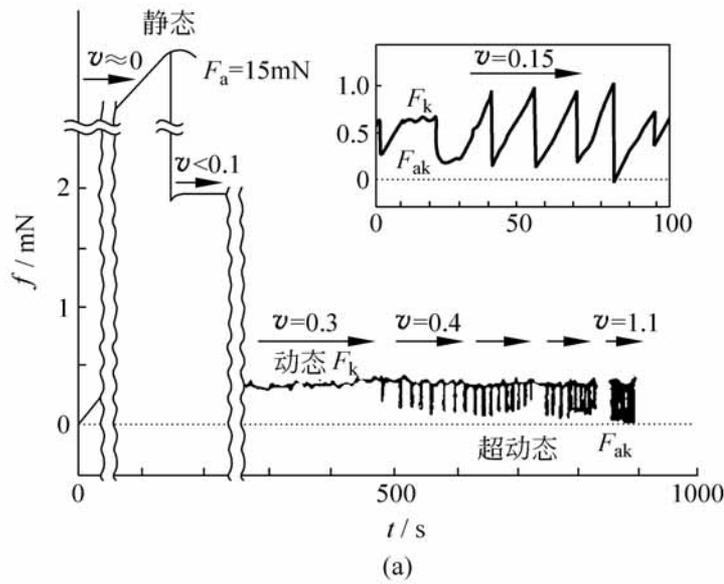


图 18-4 超动摩擦

植入云母表面的方式或以吸附的方式与云母表面形成比较牢固的表面膜，长链漂浮在甲苯液中，形成一层“分子刷”结构，并会发生伸展而不脱离基体。分子刷之间只能产生有限的相互渗透，并且在双电层排斥力和色散力的作用下，两聚合物间的作用力处于排斥力场范围。而此作用力场与所采用的高分子的结构、极性、柔性和溶剂等有关。当选择合适时，斥力场可达到分子团半径的 6~15 倍即几百纳米，如图 18-5 所示(图中 R_g 为分子团的

等效半径)。斥力随云母片间距离的减小而迅速增大。由于分子刷层间巨大的排斥力,使两个云母片保持隔离,便于自由滑动,于是在较高的正压力下仍具有很低的摩擦力,实现了摩擦系数在 0.001 量级的超滑态。

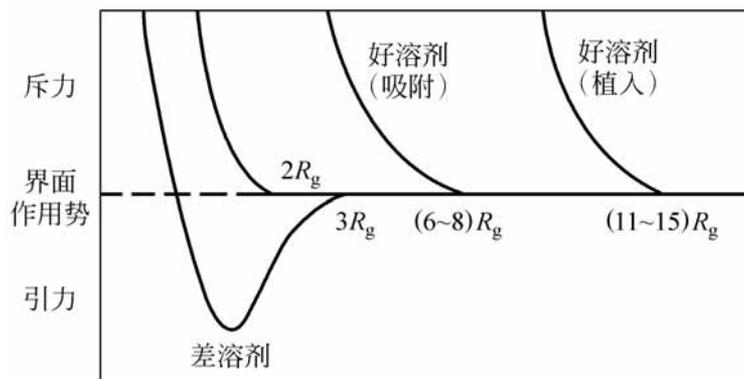


图 18-5 高分子聚合膜间的分子间力

18.1.2 超滑机理讨论

20 世纪 90 年代初,人们在进行纳米膜润滑研究中观察到一些超滑现象,并开始了这方面的研究。但是,目前还有许多基本理论问题需要进一步研究,如超滑的定义与机理,超滑与分子有序化的关系,超流与超滑的联系,外场对超滑现象的影响等等。

1. 超滑的定义

目前关于超滑问题的提法尚不一致。一种观点认为超滑是摩擦系数为零的状况;另一种则认为超滑是摩擦系数由于润滑分子的结构变化而突然降低;还有一种观点是摩擦系数下降到具有较大的工程应用价值如小于 0.001 时的现象。从低温超流原理可知,要实现摩擦力为零的状况是非常困难的。对于摩擦学而言,超滑研究应以摩擦界面实现摩擦力大幅度降低或者趋于零为目标。

2. 有序分子膜润滑

分子有序化是纳米级薄膜润滑重要特征之一,也是实现常温超滑态的重要途径。因为无序的流体分子在摩擦剪切过程中不仅会因分子的缠绕、碰撞等原因造成能量损失,而且无法建立稳定的斥力场。只有在润滑分子发生有序化转变后,才可能消除分子的缠绕与碰撞,并通过改变分子结构产生平衡载荷的分子间力场。有序分子膜具有性能稳定、摩擦系数低、厚度可

控、与基体结合性能好等特点。特别是一些高分子或具有极性端头的大分子优点更为突出。目前有序分子超薄膜具有六种类型:即 Langmuir-Blodgett (LB)膜,自组装膜,分子沉积膜,分子束外延生长膜,高取向固体有序膜,以及剪切诱导有序膜。其中 LB 膜技术出现最早并得到了广泛的研究。近几年来它的机械性能不断提高,加上其高度有序、极性端可控、厚度从一个分子层到多层分子等特点,受到摩擦学界的重视。但是,其牢固性尚需进一步提高。

自组装膜是由化学吸附作用而自发生成的一种二维分子体系,自 20 世纪 80 年代提出以来有了很大的发展。目前可以在 Au, Ag, Cu, Al₂O₃, 玻璃等基体上制作单层脂肪酸膜或其他有机膜。但其在厚度控制、质量稳定性以及基体与分子结构的匹配关系方面尚需进一步研究。

原来用于晶体生长的外延生长技术已开始应用于晶体表面的有机分子生长研究。固体有序膜如 MoS₂ 和高取向热解石墨等在摩擦过程中形成有序滑移层,不仅大幅度地降低了摩擦系数而且具有良好的稳定性和抗压性能。其主要缺点是难于在纳米量级控制其厚度。

剪切诱导有序膜是指无序的液体润滑分子在基体表面能和剪切诱导的作用下或外加力场作用下而趋于有序化排列,从而导致摩擦系数大幅度降低。近年来,有序流分子膜的超滑研究受到人们的关注。分子膜厚度到了纳米量级时,分子层间的摩擦机制与宏观液体态的内摩擦力大不相同。它受到固体表面力以及分子间诱导力场等的作用,液体效应大大减弱。因此,等效粘度变化很大,需要进一步研究分子有序化程度与等效粘度和摩擦力的关系。

3. 外场的影响

超滑的机理是建立在界面作用力场的基础上,因而一切影响分子间力的因素,如电场、磁场等都可能影响超滑效应。电场对摩擦影响的研究主要集中在电压上。然而,电压虽然可以加强分子间的诱导力场,促使分子趋于有序排列,但是却增加了分子层间的引力,不利于分子层间的滑移^[5]。因此,为了克服分子间的引力,有效的方法是将相斥的电场或其他外场施加于摩擦副的对偶面。

当润滑膜厚度达到纳米量级时,基体表面的物理特性对润滑膜的影响不可忽视,特别是金属、金属氧化物等的高表面能对润滑分子的作用更加重要。最近已开始对润滑数值计算和实验中考虑基体表面张力对润滑分子的

作用。Thompson 等人^[6]用分子动力学模拟方法探讨了固体壁面对润滑分子的影响。显然,基体表面和固液界面上的力学行为,特别是摩擦行为与基体表面能、粗糙度、硬度、晶粒形状和大小、电子云密度等的相关性是控制摩擦的关键问题。

18 2 磨损表面的修复技术

各种机械零件的材料破坏大都自表面开始,诸如磨损、腐蚀、高温氧化等,而表面的局部损坏又往往造成整个零件失效,最终导致设备停产。因此,改善材料的表面性能将会有效地延长其使用寿命,节约资源,减少环境污染。表面工程的重要意义是能够以多种方法制备出优于材料本体性能的表面功能薄层,其厚度一般为几微米到几毫米,仅为结构尺寸的几百分之一到几十分之一,却使零件具有了比本体材料更高的耐磨性、抗腐蚀性和耐高温等能力,采用表面工程技术的平均效益高达 5~20 倍以上。表面工程能直接针对许多重要零部件的失效原因实行局部表面强化、修复、预保护,以重新恢复使用价值。据报道,自 20 世纪 80 年代以来,我国通过在设备维修领域和制造领域推广应用表面工程已取得了几百亿元的经济效益。

随着经济高速发展,人类生存环境面临日益增长的机电产品废弃物的处理和资源短缺的问题。例如,1996 年全球有 2400 万辆汽车报废,到 2004 年仅美国估计就将有 3.15 亿台计算机被废弃。为了缓解资源短缺和浪费的矛盾,减少报废产品对环境的污染,最大限度地利用废旧产品的材料,20 世纪末出现的再制造工程,以期使废旧产品得以再生,并迅速发展成规模化产业。

再制造工程是针对已达到使用寿命而报废的产品,通过失效分析和寿命评估,将报废零部件作为再制造对象,采用先进的加工方法,使其恢复原技术性能而继续投入使用。其中对于磨损和腐蚀失效的零部件,采用表面涂层技术或热处理进行修复应用最为广泛。据报道^[7],采用氧乙炔火焰喷熔技术对水轮机过流部件进行修复后,其抗气蚀和冲蚀磨损寿命提高了 3~5 倍。应用等离子喷涂技术修复载货车辆零件,涂层耐磨性比新产品提高 1.4~8.3 倍,而喷涂修复成本仅为新产品价格的 10%~12%。

近年来还提出自修复方法,它是在摩擦条件下由于润滑介质及环境的摩擦物理化学作用,对磨损表面产生一定补偿的修复现象。修复型添加剂是实现这种补偿作用的关键。例如汽车内燃机的气缸与活塞随着汽车行驶

里程的增加,当超过极限磨损值后,间隙加大而降低了内燃机性能。如能适当加入修复型添加剂,则可能修复磨损部分,提高气缸的密封性,维持良好的工作状态,提高其使用寿命。姜秉新等^[8]的研究表明,铜型添加剂有一定的修复作用。修复型添加剂的修复机理大致分为两类:第一是铺展成膜理论,添加剂分子与金属表面具有亲和作用,在摩擦条件下表现出极性,扩散到摩擦副微观表层,形成一层铺展膜起到抗磨减摩作用;第二是共晶成膜理论,即在边界润滑条件下局部的摩擦高温促使添加剂微粒与磨损微粒化合成微小的共晶微球,在表面形成具有滚动性润滑功能的保护层膜,可以填充摩擦表面微观沟谷,改善摩擦表面的密封性能,并降低摩擦阻力,延长寿命。一些金属或金属合金类纳米粒子可在某种程度上体现这一理论的作用机制。在一定的温度、压力、摩擦力作用下,表面产生剧烈摩擦和塑性变形,纳米材料在摩擦表面沉积并与塑性表面作用,当摩擦表面的温度高到一定值时,纳米粒子强度下降,即与金属表面摩擦的微观颗粒产生共晶,填补表面微观沟谷,从而形成一层修复膜。

应当指出,摩擦条件下修复膜的存在处于动态变化过程,随着摩擦的加剧和温度的升高,修复膜会以一定的速度增厚。与此同时,修复膜又处于被磨损状态中,因而修复是有限度的,在摩擦条件下几乎不可能把磨损完全补偿。

18.3 摩擦噪声与控制

机械运动系统都包含摩擦环节,而接触摩擦界面的力学行为,必然会影响到整个机械系统的动力学特性。不良的摩擦特性往往是造成机械振动和噪声的原因。

18.3.1 声音的产生与传播

机械振动在介质中的传播过程称为机械波。声音作为一种机械波是物体的机械振动通过弹性介质向远处传播的结果。发生声音的振动系统称为声源,如机器的振动系统是机械噪声的声源^[9]。

在弹性介质中,依靠弹性力来传播振动的波分为纵波和横波。如果介质质点的机械振动方向和波的传播方向一致,这种波称为纵波;如果质点振动方向在垂直于波的传播方向的平面内,则称为横波。任何复杂的波都是由纵波和横波迭加的结果。在通常情况下,因气体和液体没有切变弹性,所

以在其内部仅能够传播纵波。而固体则兼有容变弹性和切变弹性,故对纵波和横波都能够传播,且能够传播各种复杂的弹性波。

如图 18-6 所示,当物体 m 在激振力 $F(t)$ 的作用下,产生振动时,其周围空气分子受到振动作用,且由近及远传播出去,从而使空气的密度发生一疏一密的变化,造成大气压力 $p(x)$ 的波动,这就是疏密纵波,其传播方向与空气质点振动方向相同。大气压力的波动越大,表示声波的振幅也越大,亦即声音越强。

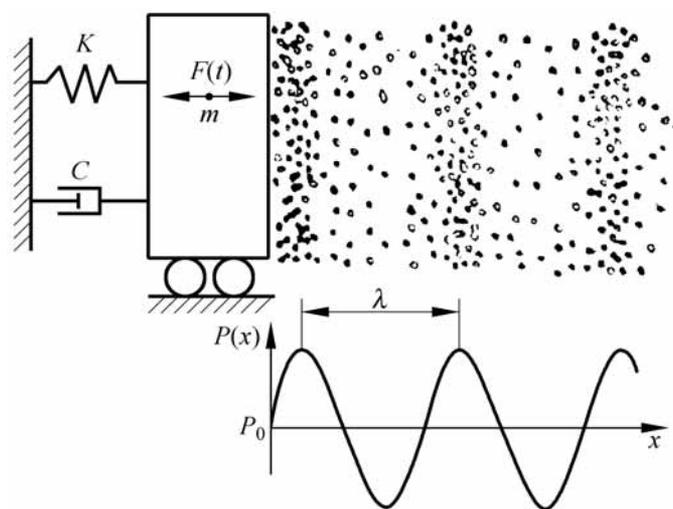


图 18-6 振动与声波示意图

因为介质可以是气体、液体,也可以是固体,所以噪声也就有所谓空气噪声 ABN(air borne noise)、流体噪声 FBN(fluid borne noise)和固体噪声。因为在机械中固体都是以某种结构来具体体现,所以固体噪声通常又叫结构噪声 SBN(structure borne noise)。不过,一般所讲的噪声是指传入人耳的空气噪声。

并非所有的振动都能引起人们的听觉。一般地说。只是频率在 $18 \sim 20000 \text{ Hz}$ 之间的机械波传入人耳引起鼓膜振动,才能刺激听神经而产生声的感觉。故将这一频率范围内的振动称为声振动,由声振动激发的纵波才称为声波。

如果一个物体在弹性介质中振动,机械波即从这一物体发出。如果这一振动是声振动的话则是声源。声波从声源向空间传播,有声传播的空间便称为声场,而声波的传播方向叫声线(波线或射线)。声波向空间传播时,其相位相同的各点可以连成一个面,称为波阵面(或波前)。如果声源的尺寸远小于波长,便可把声源视作为一个脉动着的微小球体或称为点声源,在无限介质中传送出声波。显然这样的波阵面是一个球面,这球面的半径就

等于离开声源的距离,这样的波称为球面波,如图 18-7(a)所示。当传播的距离很大,波阵面上个别部分可视为平面;或当声源的尺寸远大于波长时,它的声波将不是向四面八方传播出去,而是按此振动体的振动方向辐射,声线近似为在一个方向上,因此其波阵面亦可视为一个平面,这样的波称为平面波,如图 18-7(b)所示。在各向同性的介质中,声线恒与波阵面垂直。

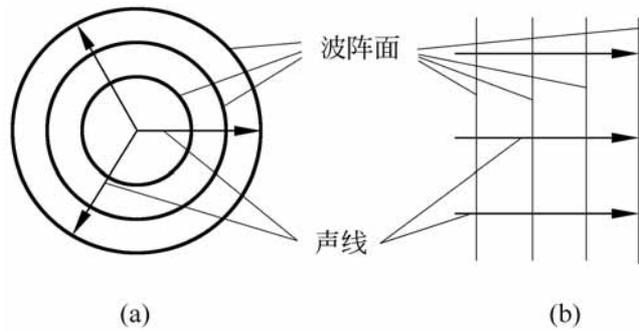


图 18-7 波阵面和声线的示意图

实际上振动源不会小得成为一个点,也不会大得发出平面声波,多数发声体发出的声波常在一个角度范围内沿振动体的振动方向前后发射,如图 18-8 所示。其他方向也有声波发射出去,但比较微弱。振动体本身尺寸越大,频率越高,所发出的声波方向性就越强,扩散角也就越小,就接近于平面波。由于绝大多数发声体发出的声波既不是平面波,也不是各个方向均匀辐射的球面波,所以声波总是在某些方向强些,而在另一些方向弱些。这就是声波的指向性(或方向性)。

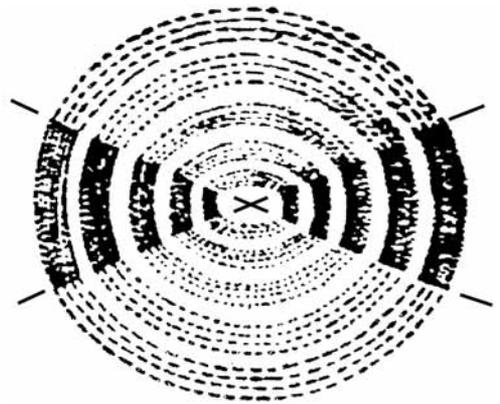


图 18-8 振动体的声波传播

18 3 2 运动的传递和粘滑效应

1. 摩擦机械系统的动力学

具有摩擦副的机械运动系统我们称为摩擦机械系统。任何摩擦机械系统的功能特性都与系统的一个或几个元件的相对运动表面的摩擦行为有关,这个运动可能通过摩擦机械系统构成能量、信息或材料的转移。整个系统的运动和动力学特性都受到运动元件间界面摩擦过程的影响。很明显,对不同的摩擦机械系统,如球轴承、导轨或金属切削系统,摩擦过程对运动

系统的动力影响可能完全不同。各种摩擦学过程的影响可能造成运动系统的有害振动。这些干扰性影响,在各种摩擦机械系统中都可见到,从制动装置的尖叫声,到机床在切削过程中的颤振等。

由于摩擦中的粘滑效应影响到任何摩擦机械系统的特性,因此下面将对这种效应给予较仔细的讨论。

功能目标与传递运动有关的摩擦机械系统都可用图 18-9 所示图形以简化方式加以模拟。模拟系统包括质量为 m_1 的物体 1,该物体相对于质量为 m_2 的对偶件 2 而运动,偶件 2 则通过一个弹簧常数为 C_2 的弹簧和一个阻尼系数为 C_d 的阻尼器而固定在地上。物体 1 经由弹簧 C_1 驱动,而弹簧 C_1 按定速 $v_0 = \dot{x}$ 运动。

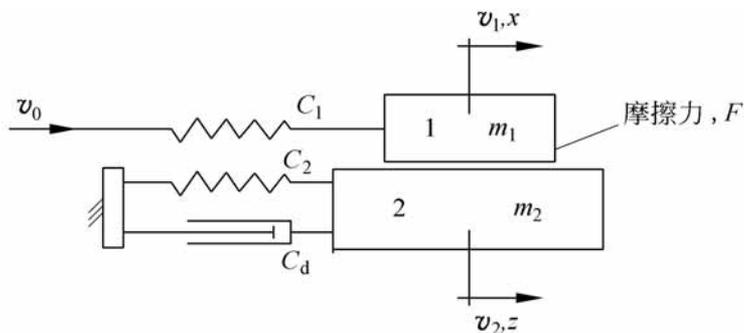


图 18-9 摩擦机械系统模型

速度为 v_1 、位移为 x 的物体 1 相对于速度为 v_2 、位移为 z 的物体 2 的运动,受到作用于物体 1 和物体 2 之间界面上摩擦力 F 的影响。由下面的简单定性研究可知,运动形式取决于相对速度 $v=0$ 时摩擦力的数值和摩擦力对于速度的依赖关系 $F=f(v)$ 。设图 18-9 所示系统的初始状态为弹簧 C_1 及 C_2 处于自然状态,而且 m_1 和 m_2 是静止的。当给以速度为 v_0 的运动时,在 m_1 上的驱动力还没有大到足以克服 m_1 和 m_2 间的静摩擦力之前,就不会有 m_1 相对于 m_2 的运动的“粘滞”阶段。然后,假如 m_1 相对于 m_2 开始运动即“滑移”阶段,弹簧就减载,于是驱动力就下降某一数量。当 m_1 上的驱动力降低到低于动摩擦力时,就会形成第二次“粘滞”阶段。这又引起驱动力的增加,直到第二次滑移阶段的运动开始,如此继续交替下去。

决定机械运动系统功能特性的基本方程,可用系统分析的网络方法列出来。图 18-10 中画出了图 18-9 系统的网络图。

网络图以电气与机械相似量为基础。在应用描述速度与势差相似和力与流通相似的原理中,根据回路观点可以把速度看成与电路的“电压激励

器”相似。因此力 F 就是贯穿电路中各元素即质量 m_1 、 m_2 ，弹簧 C_1 、 C_2 和阻尼器 C_d 的流通变量。与图 18-10 网络图相应的信号流图表示在图 18-11 中。

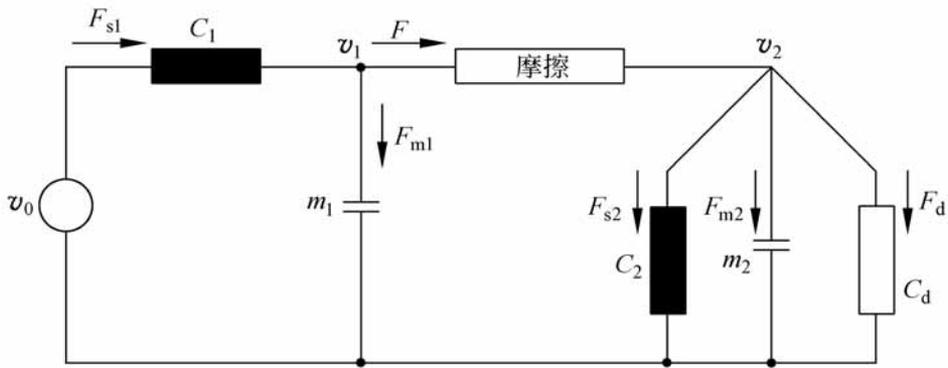


图 18-10 网络表示法

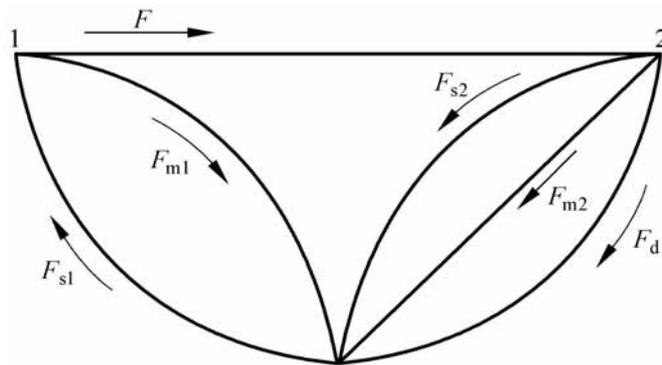


图 18-11 信号流图

由网络图和信号流图,容易导出描述摩擦机械系统功能特性的方程式。应用克希霍夫节点定律,可得到下列方程:

$$\text{对于节点 1} \quad F_{s1} = F + F_{m1}$$

$$\text{对于节点 2} \quad F = F_{s2} + F_{m2} + F_d$$

上述方程可写成:

$$\begin{aligned} G(v_0 t - x) &= F + m_1 \ddot{x} \\ -F &= C_2 z + m_2 \ddot{z} + C_d \dot{z} \end{aligned}$$

或

$$\ddot{x} = -\frac{C_1}{m_1} \dot{x} + \frac{C_1}{m_1} v_0 t - \frac{F(1/\dot{x} - 1/\dot{z})}{m_1} \quad (18-4)$$

$$\ddot{z} = -\frac{C_d}{m_2} \dot{z} - \frac{C_2}{m_2} z - \frac{F(1/\dot{x} - 1/\dot{z})}{m_2} \quad (18-5)$$

这些微分方程可用微积分方法求解。

下面将用模拟计算机来研究这些方程和图 18-9 所示摩擦机械系统的粘滑特性。

2. 粘滑特性的模拟

如果一个系统能用微分方程表示, 则系统的特性就可用模拟计算机来研究。系统的元素可以相当准确地由标准的计算机元素来代表。对图 18-9 中的摩擦机械系统来说, 虽然弹簧和阻尼器时值 C_1 、 C_2 和 C_d 可以分别由电位计的调整来进行调节, 但摩擦特性的模拟却需要一个适当的功能发生器。上述粘滑效应的定性讨论已经指出, 粘滑运动可以由摩擦力 F (或摩擦系数 f) 对速度的关系来确定。为了研究具有普遍性的粘滑运动, 我们对于摩擦与速度的特性关系选用了 Stribeck 曲线的形状, 而且研究了在 Stribeck 曲线不同部分的摩擦机械系统特性。系统的模拟计算机流程图示于图 18-12 中。

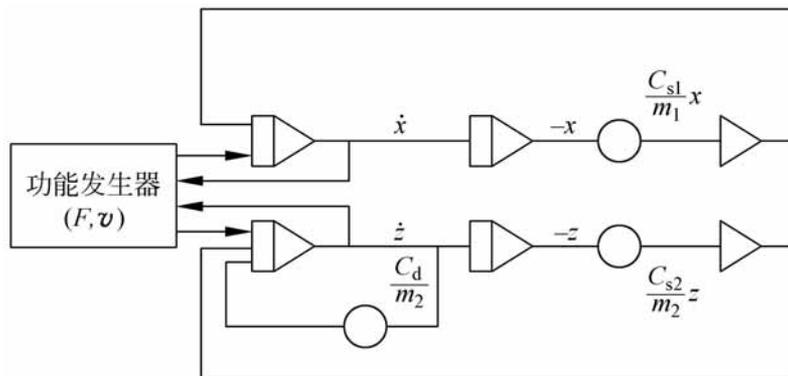


图 18-12 模拟计算机流程图

由图可见, 计算机流程图的上下两部分相应于上述微分方程式 (18-4) 和式 (18-5), 而且通过摩擦力 (或摩擦系数) 来耦合这些微分方程, 是由图 18-12 中间的功能发生器模拟的。适当的比例系数根据图 18-9 模型的设计参数决定。

对于给定的常数值 m_1 、 m_2 、 C_1 、 C_2 来说, 根据摩擦系数在 Stribeck 曲线内位置的不同, 可以观察到摩擦机械系统不同的动态特性。不涉及数值细节时, 可以把图 18-9 的模拟摩擦机械系统的运动特性, 区分为以下三种不同的通用模式:

(1) 对于 Stribeck 曲线最低点附近的摩擦条件来说, 系统是不稳定的, 而且由于干扰引起的运动是发散的, 即系统自行激发而振动起来, 如图 18-13 所示。图中 f 、 v 的变动范围。

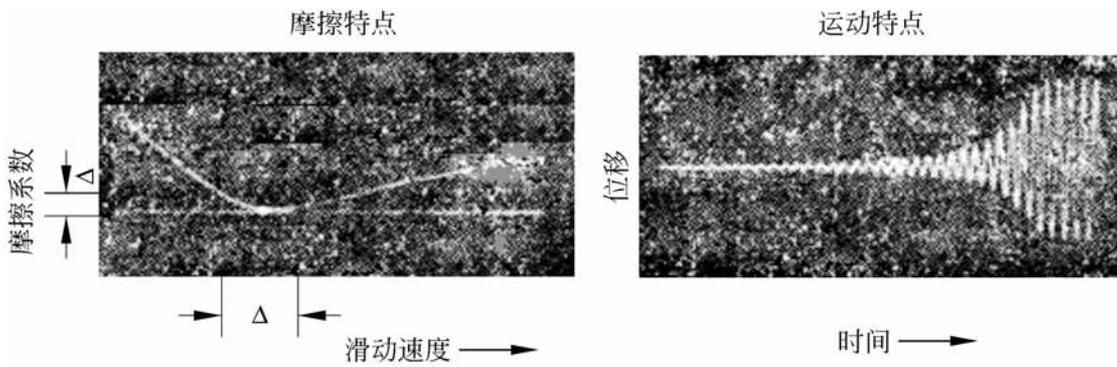


图 18-13 曲线最小值的不稳定运动

(2) 对于 Stribeck 曲线左面部分的摩擦条件来说, 产生典型的粘滑运动图, 如图 18-14。

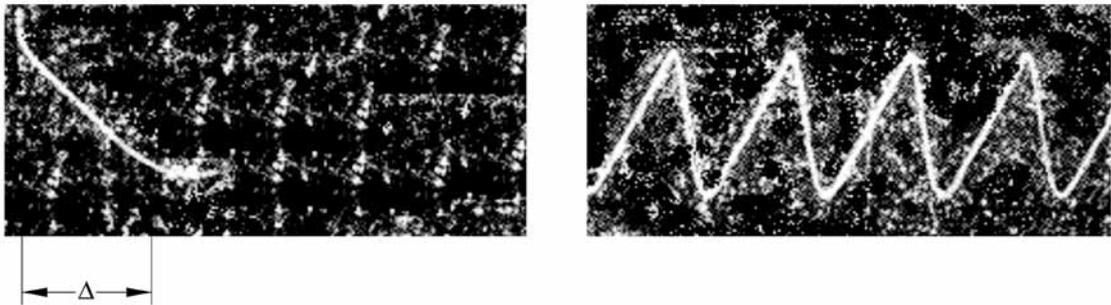


图 18-14 曲线左部分的粘滑振荡 ($f=0.6$)

(3) 对于在 Stribeck 曲线右面部分的摩擦条件来说, 系统是稳定的, 即引入系统的振动自行减弱。这种特性可在图 18-15 所示, 该图给出 Stribeck 曲线右面部分五种工况即摩擦系数 f 不同变化斜率的情况。

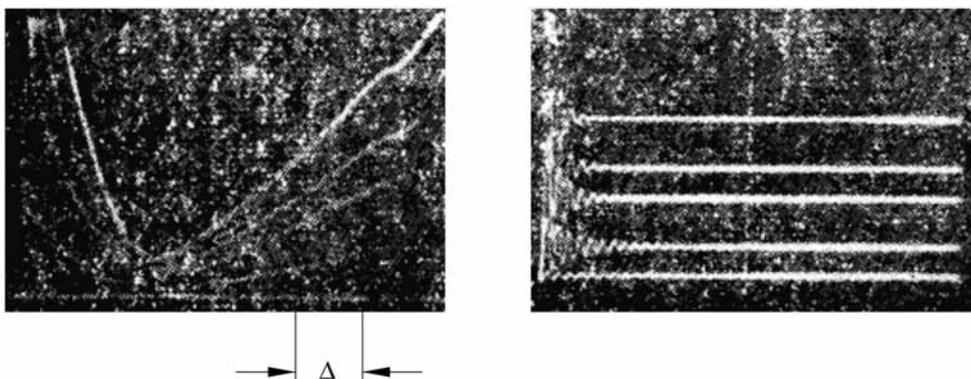


图 18-15 曲线右部分的稳定运动

($f=1.0; 0.7; 0.5; 0.3; 0.02$)

以上分析验证了实验结果, 即当 Stribeck 曲线的左面部分斜率为负或等于零, 即 $df/dv < 0$ 时, 则可能产生粘滑效应。因此粘滑效应只是在固体

摩擦或边界润滑或混合润滑的条件下才会产生,而在 Stribeck 曲线右面部分的流体动压润滑条件下是不可能产生的。

这些结果说明,摩擦机械系统的粘滑特性能够方便地用模拟计算机加以研究。如果实际的摩擦机械系统用这种方式进行模拟,则通过改变模拟计算机调定数值,从而模拟出系统元素(质量、弹簧、阻尼器)在设计中的最优化数据,以减轻粘滑效应并得到合理的动态特性。因此,系统模拟技术和模拟计算机的联合应用,可以大大有助于得到一个给定摩擦机械系统的正确功能特性。

18.3.3 轮轨摩擦噪声

铁道列车通过弯道时常常发出尖叫声,这种噪声级别在 4000 ~ 8000 Hz 频率范围时高达 120dB。作为典型的例子,图 18-16 表示车辆通过半径为 193m 弯道时测得的噪声曲线。

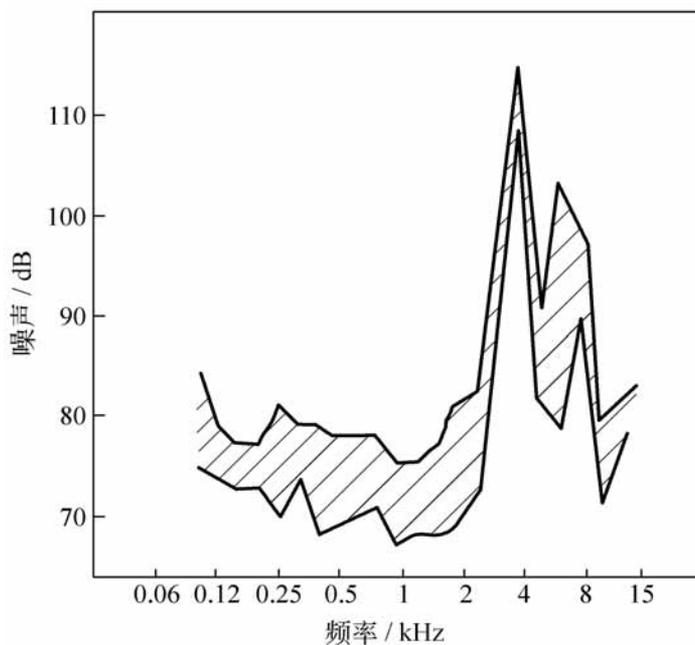


图 18-16 轮轨弯道噪声频谱

通过弯道时作用于轨道和刚性车轮车架之间的力和运动的理论研究表明:对于轨距为 1.435m 的铁路,如果轨道曲率半径小于 500m,则轮轨间便会发生横向滑动。对于列车速度为 15 m/s 而轨道曲率为 200 ~ 500m,则横向滑动速度 v_t 在 0.1 ~ 0.3 m/s 范围内。横向滑动和界面摩擦导致轮轨系统粘滑引起的振动,显然就会产生噪声。

对于摩擦机械系统,在深入分析产生噪声的原因之后,可以把发出噪声理解为摩擦学系统引起的“损耗输出”,采用一般的噪声系统描述方法研究

产生噪声各参数的相关关系,进而改变各种参数,以减轻噪声源。

根据上节,摩擦引起的噪声源可用下式描述:

$$Z = f(X, S)$$

其中, Z 为噪声; X 为工作参数; S 为系统结构。

1) 工作参数, $X = \{W, v, T\}$

W 为载荷(车辆加旅客重量);

v 为速度(列车速度、横向滑动速度);

T 为温度(取决于季节)。

2) 系统结构, $S = \{A, P, R\}$

A 为元素: (1) 车轮形式; (2) 轨道形式; (3) 环境状况;

P 为元素的性能: 轮和轨的材料、轮轨的几何设计和表面性能、线路的几何设计;

R 为元素的相互关系: (1), (2), (3) 之间摩擦学的相互关系。

很显然,元 (1)和(2)对于标准的轮轨列车系统是固定的,因此无法改变设计。所以限制噪声只能通过直接影响噪声源的界面摩擦学过程 $\{R\}$ 来进行。

经验证明,如果把一定的磷酸盐溶液喷涂在轨道上,噪声将在很大程度上被抑制。从粘滑效应的计算机模拟研究得知,粘滑效应依赖于摩擦速度梯度。为了阐明消除粘滑引起噪声的可能性,并提出轨道表面处理的最优条件,有的学者曾在试验室里进行了粘滑研究。他们使用销-盘和球-盘的摩擦实验机,试件采用实际的轮轨材料,在类似于实际情况的工作条件($p_H = 50 \times 10^7 \text{ N/m}^2$; $v = 0.02 \sim 0.2 \text{ m/s}$)下进行。

试验结果表明,粘滑效应明显受到不同的磷化表面处理的影响。通过表面处理,静摩擦系数 f_s 稍有降低,而动摩擦系数 f_d 却大大地增加,两者之差 $f = f_s - f_d$ 大幅度减小,所以也就满足了抑制粘滑效应的条件并降低摩擦噪声。表面处理对于粘滑特性的影响的典型结果如图 18-17 所示。

通过系统地试验研究,可以配制出适合于实用目的的磷酸盐溶液。每隔一定时间用这种溶液处理轨道,对于降低轮轨系统粘滑引起的噪声可收到良好的效果。

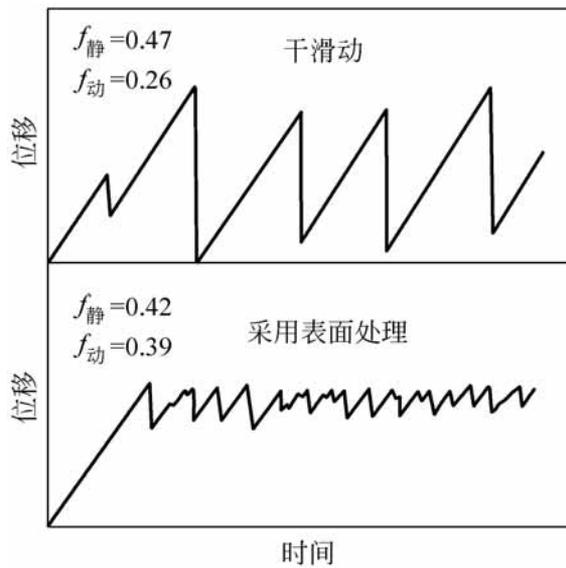


图 18-17 表面处理对粘滑特性的影响

18.3.4 滚动轴承摩擦噪声

1. 轴承噪声的产生

轴承往往是机器噪声的主要声源之一。摩擦和振动是轴承产生噪声的主要原因,而且是互相关联的。振动一般会使摩擦阻力加大,反之摩擦阻力也加剧振动,因而使轴承的噪声增大。通常滑动轴承的噪声主要是由于润滑不良,使轴颈与轴承表面间发生固体摩擦引起的。要降低滑动轴承的噪声,必须在轴颈和轴承表面间保持必要的油膜厚度。由于滑动轴承的噪声比滚动轴承的噪声级小得多,这里着重对滚动轴承的噪声进行讨论。

滚动轴承的噪声主要是由轴承零件的几何形状误差和表面质量造成的。这些误差引起径向跳动而发生振动。近年来国内外普遍实行对内外圈滚道和滚动体的超精加工,滚动轴承的噪声已有所降低,但几何误差的影响总不能完全消除。若和齿轮啮合频率发生共振时则会引起高噪声级。即使能制造出一种完全没有表面缺陷和几何误差,且表面粗糙度极低的滚动轴承,那么由于滚动体和相匹配的滚道固有的弹性或装配间隙,仍会发生振动。在负荷区内,滚道和滚动体间产生弹性变形,当两个滚动体相对于顶点等距离时弹性变形量最小如图 18-18(b),而当只有一个滚子在载荷的正下方时,引起的弹性变形最大如图 18-18(a)。这种振动频率等于单位时间内通过外滚道上一个定点的滚动体数。

显然滚动轴承噪声产生也与轴承内部各零件之间存在的摩擦有关,而

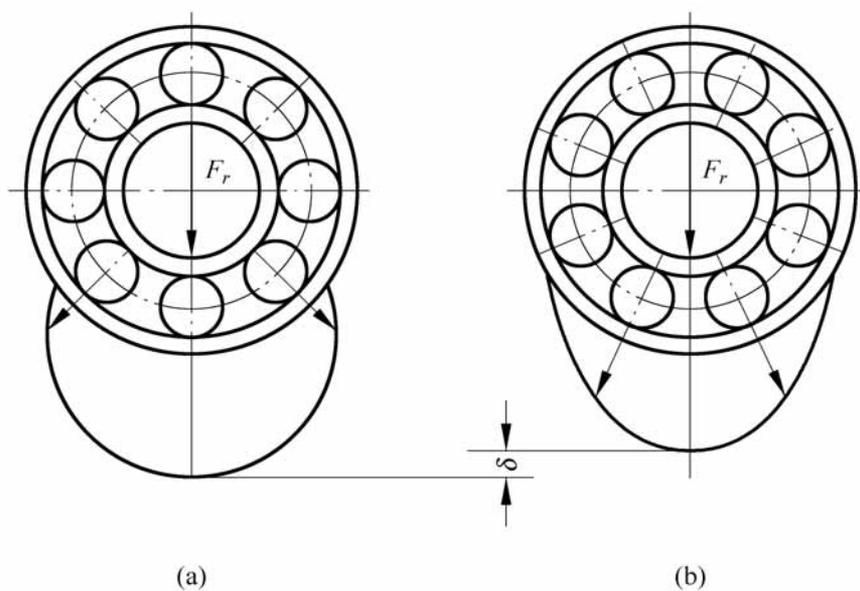


图 18-18 滚动轴承的弹性变形

磨损导致的表面损伤严重地破坏轴承内部零件运动的平稳性而加剧振动。

轴承相对运动面的任何损伤,都会引起极大的振动和噪声。正常安装和运转的滚动轴承,表面损伤的原因主要是过载塑性变形和磨损,特别是接触疲劳磨损产生的剥落。

2. 轴承噪声的控制

1) 轴承类型对噪声的影响

滚动体是滚动轴承中形成滚动摩擦的主要元件,滚动体的形状不同,运转中与内外滚道相对运动状况不同,致使不同类型的轴承有不同的噪声级。据上海第二机床厂对 D7520、D7518 圆锥滚子轴承,220、218 向心球轴承以及 46220、46218 向心推力球轴承装在 C6150 型车床主轴上作为前后轴承,在 1250r/min 的转速下,对轴承噪声进行对比试验,其结果如表 18-1 所示。很明显球轴承的声级比圆锥滚子轴承的声级低 9dB(A)。从降低轴承噪声要求出发,在满足使用要求时,尽可能采用球轴承。

表 18-1 不同类型轴承噪声级比较

dB(A)

| 工 况 | D7520 | 220 | 46220 |
|------|-------|-----|-------|
| | D7518 | 218 | 46218 |
| 主轴旋转 | 81 | 72 | 72 |
| 整机运转 | 81.4 | 81 | 81 |

2) 保持架精度对噪声的影响

保持架通常用低碳钢板冲制成型,当滚动轴承运转时,滚动体与保持架之间为滑动摩擦并发生撞击,发出高的噪声。试验证明,减少保持架和滚动体之间的间隙,可使轴承噪声级降低约 6dB(A)。此外,目前高速高精度轴承其保持架通常采用酚醛胶布、青铜或铝合金制成实体的结构形式,这对降低轴承噪声取得良好的效果。

3) 预紧力对轴承噪声的影响

通常预紧轴承是为了提高支承的刚性。近年来,对机器噪声源的研究证明,轴承预紧力过大,轴承噪声级约增加 2dB,并使轴承温度上升,而当没有预紧力时即有间隙存在,轴承的噪声级也约增加 2dB。因此,设计合理的轴向预紧结构,以保证轴承在正常预紧力状态下工作对限制噪声有利。如图 18-19 所示的结构,通过 24 只弹簧使轴承内圈或外圈受到均布在圆周上的轴向力,轴承始终在调整好的预紧力下运转可降低噪声。

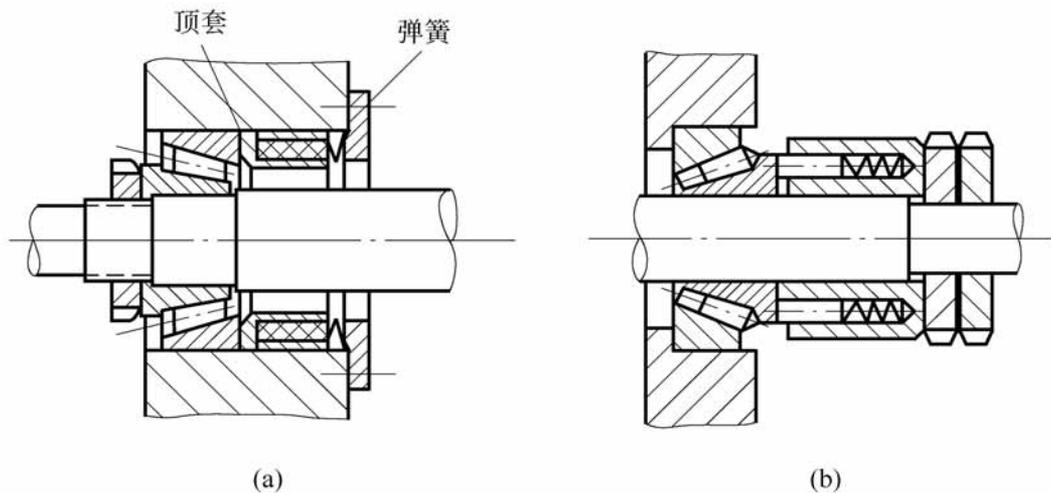


图 18-19 轴承加载结构

4) 轴承精度对噪声的影响

一般来说,轴承的精度高其噪声较低。表 18-2 的试验数据是对 7520 和 7518 一对轴承按内、外圈和滚子的不同精度进行组合,在 1250r/min 的转速下取得的。由表可知,只要把滚子精度提高一级,轴承噪声可下降 7~10dB(A),效果显著。因此,滚子精度是影响轴承噪声的主要因素之一。

表 18-2 不同精度组合对噪声的影响

| 内圈精度 | 外圈精度 | 滚子精度 | 声级/ dB(A) |
|------------|------------|------------|-----------|
| 超精加工 C 级精度 | 超精加工 C 级精度 | 超精加工 1 级精度 | 69.5 |
| 超精加工 C 级精度 | 超精加工 C 级精度 | 一般加工 2 级精度 | 76 |
| D 级精度 | D 级精度 | 超精加工 1 级精度 | 70 |
| D 级精度 | D 级精度 | 一般加工 2 级精度 | 80 ~ 81 |

18.4 绿色润滑油

从保护环境、限制污染的角度考虑,在润滑油研究方面有许多亟待解决的课题,包括环保型制冷用润滑油的研制、废油再生技术、发展生物降解润滑油以及最大限度降低机器润滑油消耗量等。

18.4.1 环保型制冷用润滑油的研制

在各种制冷设备装配、运输和运转以及废油的处理过程中,由于各种原因流失到环境中的冷冻机油,对环境存在着很大的潜在危害。目前广泛用于空调、冰箱和其他制冷设备的制冷剂是 R12 和 R22。R12 属 CFC(氯氟碳)类物质, R22 属于 HCFC(氢化氯氟碳)类物质,其用量甚至超过 R12。这些制冷剂中含的氯元素是破坏臭氧层的重要因素。因此,1987 年制定的蒙特利尔(Montreal)条约规定 1995 年禁止使用 R12,2010 年禁用 R22。德国和丹麦将于 2000 年停止使用 R22 生产的新产品,国内外都在加紧替代 R22 的混合工质的研究和应用。研究表明^[10],聚醚酯作为替代 R22 的混合工质的润滑油,台架试验的结果令人满意。这类冷冻机油的生物降解率在 36% ~ 75%,属于环保型的冷冻机油。

由于 HFC-134a 是一种无氯的氢化氟碳物质,它不破坏大气臭氧层而可作为替代 CFC 类的制冷剂。但其具有极性的结构特征与传统的矿物油相容性差,所以必须研制新一代环保型的冷冻机油来与之匹配。最有希望成为 HFC-134a 及其混合工质相匹配的冷冻机润滑油主要有聚醚油和酯类油两大类。

聚醚油(PAG)主要是由环氧乙烷、环氧丙烷共聚而成的含端羟基的化合物或其改性物。它们的流动点较低,有很好的抗负荷能力和抗磨性能,高的粘度指数和稳定性,使之有可能成为新型冷冻机油。通过改性的聚醚、聚

醚酯更具有较好的与 HFC-134a 的高低温相容性。它不但能与 HFC-134a 相匹配,也能与混合工质(如 R32/ R134a, R32/ R125/ R134a 等)相匹配,成为新型冷冻机油。聚醚酯作为冷冻机油,在中国科学院能源研究所和中山市威力空调厂等单位进行了台架试验,取得满意的结果。下面简略地介绍这些结果。

1. 应用试验

1) 样品基础油和冷冻机润滑油结构和性质

样品基础油和冷冻机润滑油结构和性质见表 18-3、表 18-4。

表 18-3 聚醚酯的结构和性质

| 编号 | 名称 | 粘度/ mm^2/s 40 / 100 | M_n | 分子式 |
|--------|-----------------|--|-------|--|
| BP1 号酯 | 聚环氧丙烷乙酸酯 | 16.02/ 4.25 | 520 | $\text{RO} [\text{CH}_2 \text{CH} (\text{CH}_3) \text{O}]_n \text{OCOCH}_3$ |
| BP2 号酯 | 聚环氧丙烷乙酸酯 | 80.59/ 14.60 | 730 | $\text{RO} [\text{CH}_2 \text{CH} (\text{CH}_3) \text{O}]_n \text{OCOCH}_3$ |
| BPE 酯 | 环氧丙烷和环氧乙烷的共聚乙酸酯 | 73.20/ 13.74 | 720 | $\text{RO} [\text{CH}_2 \text{CH} (\text{CH}_3) \text{O}]_n (\text{CH}_2 \text{CH}_2 \text{O})_m \text{OCOCH}_3$ |

注:表中,BP 是以丁醇作起始剂的聚环氧丙烷;BPE 是以丁醇作起始剂的环氧丙烷和环氧乙烷的共聚物; M_n 是用端基分析法计算的聚醚酯的数均分子量。

表 18-4 冷冻机聚醚油的编号和性质

| 编号 | 粘度/ mm^2/s , 40 / 100 | 备注 |
|---------|---------------------------------------|-------|
| GE-22 | 24.92/ 5.91 | — |
| GE-22T | 22.44/ 5.34 | 已加添加剂 |
| GE-30T | 29.72/ 6.49 | 已加添加剂 |
| GE-50 | 53.65/ 10.49 | — |
| GE-50T | 49.38/ 9.39 | 已加添加剂 |
| GE-100 | 103.54/ — | — |
| GE-100T | 103.54/ — | 已加添加剂 |

2) 聚醚油 GE-30T 的应用试验

聚醚油 GE-30T 提供给中国科学院广州能源研究所作为 R32/ R125/

R134a 三元混合工质制冷体系的润滑油,通过压缩机制热工况、空调工况和冷热联供等不同运转方式,与 R22/ 烷基苯油制冷体系进行了比较,结果见表 18-5、表 18-6。

表 18-5 压缩机运转情况对比

| 性 能 | 制热工况 | | 空调工况 | | 冷热联供 | |
|-----------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | R22 | 混合工质 | R22 | 混合工质 | R22 | 混合工质 |
| 压缩机功率/ kW | 3.142 | 3.125 | 2.752 | 2.767 | 2.800 | 2.788 |
| 压缩比 | 3.27 | 3.74 | 3.03 | 3.24 | 2.93 | 3.26 |
| 制冷量/ kW | 6.881 | 7.125 | 5.910 | 6.309 | 6.874 | 7.109 |
| 供热量/ kW | 9.803 | 10.094 | 8.626 | 8.993 | 9.468 | 9.843 |
| 制冷性能系数 | 2.19 | 2.28 | 2.15 | 2.28 | 2.46 | 2.55 |
| 供热性能系数 | 3.12 | 3.23 | 3.13 | 3.25 | 3.38 | 3.58 |

注:混合工质为 R32/ R125/ R134a

表 18-6 聚醚油 GE-30T 运转前后的基本性能

| 性 能 | 运转前 | 运转后 |
|--------------------------------------|-------------|-------------|
| 粘度/ $\text{mm}^2/\text{s}(40 / 100)$ | 29.72/ 6.49 | 28.59/ 6.55 |
| 酸值/ mgKOH/g | 0.11 | 0.10 |

实验结果表明:该三元混合工质使用 GE-30T 作润滑油与纯工质 R22 使用矿物油作润滑油相比,循环性能系数 COP 上升 4.5% ~ 6.0%,单位容积制冷量上升 3.5% ~ 6.0%,压缩机排气温度均下降,说明该制冷体系可以替代 R22 体系,而聚醚油 GE-30T 的润滑性能也十分优异。

3) 聚醚油 GT-50T 的应用试验

聚醚油 GT-50T 通过了中山市威力空调器厂中心实验室的试验,结果见表 18-7、表 18-8。检测结论:GT-50T 与 R32/ R134a 在 -35 ~ 70 范围内完全互溶。从寿命试验前后压缩机性能数据可知变化不大,寿命试验合格。试验后压缩机内壁磨损情况表明,GT-50T 润滑性能良好,可作为一种替代 R22 工质匹配的润滑油。

表 18-7 润滑油 GT-50T 的压缩机寿命试验 (连续运转 1000h)

| 压缩机性能 | 寿命试验前 | 寿命试验后 |
|-------|--------|--------|
| 功率/ W | 954 .6 | 930 .7 |
| 冷量/ W | 2744 | 2753 |
| 能效比 | 2 .88 | 2 .96 |

表 18-8 润滑油 GT-50T 运转前后的基本性能

| 性 能 | 运转前 | 运转后 |
|------------------------------------|----------------|--------------|
| 粘度/ mm ² / s(40 / 100) | 49 .38/ 9 .394 | 7 .79/ 9 .06 |
| 酸值/ mgKOH/ g | 0 .10 | 0 .08 |

2 . 生物降解性试验

从环境保护角度评价润滑油必须考虑其生物降解性。目前,广泛使用 CEC 生物降解试验方法对润滑油的环保性能进行评估。CEC 生物降解性试验方法是通过测定剩余油的内容物来计算降解率。

表 18-9 以高降解率的己二酸二异辛醇酯作为标准样品列出聚醚酯的生物降解率。由表可知,聚醚酯有一定的生物降解性,但生物降解性不高,在 20% ~ 40% 左右。将表 18-9 的生物降解结果与表 18-3 的分子量对照分析可知,在分子量不同的两种聚环氧丙烷合成的聚醚酯中,分子量较大的生物降解率较低。

表 18-9 聚醚酯的生物降解结果

| 样 品 | 红外光谱的选取 波数/ cm ⁻¹ | 生物降解率/ % | | |
|----------|---------------------------------|----------|-------|-------|
| | | 7 天 | 14 天 | 21 天 |
| 己二酸二异辛醇酯 | 2960 | 83 .5 | 89 .4 | 91 .5 |
| BP1 号酯 | 2970 | 23 .9 | 31 .4 | 32 .2 |
| BP2 号酯 | 2970 | 16 .2 | 18 .0 | 20 .3 |
| BPE 酯 | 2970 | 34 .0 | 36 .2 | 42 .5 |

所用的污水的菌群总数约为 1×10^9 / mL。

根据研究推测聚醚及其改性物的生物降解是从高聚物链端的醚氧和碳之间的醚键断裂开始的。在用端基分析法测定高聚物分子量 (M_n) 时, 对于线形聚合物来说, M_n 越大单位质量中所含的可分析端基的数目越少。而生物降解是从端基开始的, 所以 M_n 越大端基的数目越少, 其生物降解率越低。

此外, 从表 18-9 可以看出, 对于分子量相近的环氧丙烷均聚物与环氧丙烷与环氧乙烷的共聚物, 含环氧乙烷的量较多的聚醚酯, 生物降解率较高。

在聚醚油基础油中加入抗磨剂、抗氧化剂、防锈剂、金属减活剂和氢离子捕捉剂等组成全配方的冷冻机油。目前虽然对各种添加剂的生物降解性了解很少, 但添加剂对生物降解率有很大的影响。在表 18-10 中, 列举了不同粘度的全配方冷冻机油与其基础油的生物降解性的对比, 参见表 18-4 可知, 加入添加剂后其生物降解性普遍降低。

表 18-10 冷冻机聚醚油的生物降解结果

| 样 品 | 红外光谱的选取 波数/ cm^{-1} | 生物降解率/ % | | |
|---------|---------------------------------|----------|------|------|
| | | 7 天 | 14 天 | 21 天 |
| GE-22 | 2970 | 38.5 | 47.0 | 75.6 |
| GE-22T | 2970 | 36.3 | 46.1 | 68.0 |
| GE-30T | 2970 | 17.7 | 47.2 | 63.7 |
| GE-50 | 2970 | 25.1 | 48.9 | 74.0 |
| GT-50T | 2970 | 22.1 | 35.0 | 36.1 |
| GE-100 | 2970 | 32.1 | 60.1 | 71.8 |
| GE-100T | 2970 | 27.2 | 27.6 | 51.3 |

所用的污水的菌群总数约为 1×10^{12} / mL。

综上所述, 聚醚酯的润滑性能良好, 与混合工质匹配可作为一种替代 R22 工质匹配的润滑油。根据 CEC 生物试验方法的评估, 聚醚油的生物降解率在 20% ~ 75% 之间。而聚醚酯的生物降解性主要取决于聚合物分子量的大小。分子量越小, 越容易被微生物降解。在所研究的冷冻机聚醚油中, 添加剂的综合效应使聚醚油的生物降解率降低。

18.4.2 润滑剂对健康的危害

1. 石油产品的危害

许多石油产品对人体均有不同程度的危害。接触皮肤如不及时清洗干净,则可能轻者引起皮炎、疙瘩,重者发生皮疹或皮瘤。误入口内或吸入体内,可能发生肠胃病或肺炎,甚至导致癌症。

动物试验证明,精制矿物润滑油的毒性较低,但加入添加剂后其危害性增加而必须注意防护。即便是新油无毒,在使用过程中因变质和污染也会造成危害。

2. 废气、废油的危害

在内燃机中,燃油经燃烧的排气中,发现有数种烷基芳烃(PAH)可致皮肤癌,还包括有苯并吡啉等可致肺癌的物质。虽然一般大气中这类物质的浓度极小,距致癌浓度还相差很大,仅为致癌浓度的几百分之一到几千分之一而已,但从维护人类健康考虑亦应清除。

废油是指各种润滑油在使用过程中,因受杂质污染、氧化和热的作用,改变了原有的理化性能而不能继续使用的油。随着工业生产的迅速发展,人们逐渐认识到,对废弃物的某些不合理处理危害着人类的健康和环境质量。

废油含有多种毒性物质。这些毒性物质一部分是新油中的添加剂,例如,用作电容器浸渍剂和阻燃剂的多氯联苯;作为多种润滑油抗氧剂的锌及酚类化合物;其余部分则是新油在使用过程中受到污染或产生化学变化和添加剂分解的产物。它们除部分排入大气外,其余则和油中未变化的组分一同存留在油中。例如,在废内燃机油中,除受含铅汽油的污染而含有铅及其化合物外,还有因其在特殊情况下产生的苯并(a)芘及其他有毒物。内燃机油的工作条件随内燃机结构性能不断改进而日益苛刻,比如,当发动机转速 7000r/min 时,活塞环对气缸壁产生高速摩擦使气缸壁与活塞间温度达 300℃,活塞顶部温度 350℃,燃烧室瞬时温度超过 2000℃。在这种温度下,内燃机油中的部分烃类迅速氧化或不完全燃烧产生碳粒,部分烃类则经脱氢、环化等化学反应生成苯并(a)芘等多环芳烃化合物。它们一部分随内燃机废气排入大气,一部分则积存在油中,随废油排放出来。如果把废油倒入土壤,可导致植物死亡,被污染土壤内微生物灭绝。如果废油进入饮用水

源,1吨废油可污染100万吨饮用水。

为了减少废油在土壤和水中的积累,1991年欧盟要求用于公共场所的液压设备一律使用可生物降解液压油。瑞士也立法禁止在环境敏感地区,如森林、水源、耕地等使用非生物降解润滑油。工业发达国家各大石油公司竞相研制并开发了可生物降解链锯油、液压油、润滑脂、建筑脱膜油等。德国预计到2000年,此类润滑剂产量达到17万吨,占润滑剂总需求量的10%~15%。

我国是润滑油生产和消费大国,根据1998年的统计,年综合生产能力已达到360万吨,润滑油消耗量在世界排名第三,每年可回收废油100万吨以上。对废弃物资进行回收和综合利用是我国一项重大的技术经济政策,废油是可再生和综合利用的资源,研究开发废油和其他废弃物综合利用的新技术新工艺都将具有重大意义^[11]。自1980年以来,科技工作者便开始积极探索无酸化废油再生新技术,一些无污染、效率高、再生油质量达到新油标准的再生新工艺已研究成功,并将逐步实施。

参 考 文 献

- [1] 王竹溪.中国大百科全书:物理学.上海:中国大百科全书出版社,1987,690
- [2] Shinjo K, Hirano M. Dynamics of friction: superlubric state. Surface Science. 1993, 283(1 - 3): 473 ~ 478
- [3] Yoshizawa H, Chen Y L, Israelachvili J N. Recent advances in molecular level understanding of adhesion, friction and lubrication. Wear, 1993, (168): 161 ~ 166
- [4] 温诗铸.纳米摩擦学.北京:清华大学出版社,1998
- [5] 蒋洪军,孟永钢,温诗铸.电场对 Al₂O₃/Cu 摩擦磨损特性的影响及其机理研究.中国科学(E辑),1998,28(6):491 ~ 498
- [6] Thompson P A, Grest G S, Robins M O. Phase transitions and universal dynamics in confined films. Phys. Rev. Lett., 1992, 68: 3448 ~ 3451
- [7] 徐滨士,马世宁等.表面工程的应用和再制造工程.材料保护,2000,33(1):1 ~ 3
- [8] 姜秉新等.铜型添加剂摩擦修复作用的可行性研究.机械科学与技术,1999,18(3):475 ~ 477
- [9] 张建寿,谢咏絮等.机械和液压噪声及其控制.上海:上海科学技术出版社,1987
- [10] 陈静仪等.环保型聚醚油的应用研究.制冷,1999,18(4):13 ~ 17
- [11] 李西昌,晏双利.废油的污染及防治对策.再生资源研究,1999,(3):31 ~ 32