

第3章 摩擦、磨损及润滑

【教学导读】

摩擦、磨损及润滑是摩擦学研究范畴的内容。摩擦是引起能量损耗的主要因素；磨损是造成零件失效和材料损耗的主要原因；而润滑则是减小摩擦和磨损的有效手段。本章介绍摩擦和磨损的分类和机理，润滑剂性能，形成油膜的动压和静压原理，以及弹性流体动力润滑的基本知识。

【课前问题】

- (1) 关于摩擦机理有哪些理论？黏附理论是如何解释金属表面摩擦机理的？
- (2) 零件的磨损过程大致可分为几个阶段？各有什么特点？如何利用磨损曲线进行零件的故障诊断？
- (3) 润滑剂的主要性能指标有哪些？设计时如何考虑？

【课程资源】

拓展资源：摩擦学研究进展；绿色润滑剂。

摩擦学(tribology)是研究做相对运动的两零件表面间相互作用及其有关理论与实践的一门学科。它的基本内容是研究工程表面的摩擦、磨损和润滑问题。摩擦(friction)能引起能量转换而消耗能量，磨损(wear)则使摩擦表面损坏并造成材料损耗，润滑(lubrication)是减少摩擦、磨损的重要手段。这三者是相互联系的。

3.1 摩擦

相互接触的两物体在外力的作用下发生相对运动或有相对运动趋势时，在接触面上就会产生抵抗运动的阻力，这种现象称为摩擦，这时所产生的阻力称为摩擦力。

摩擦可分为两大类：一类是发生在物体内部，阻碍分子间相对运动的内摩擦；另一类是在接触表面上产生的阻碍两物体相对运动的外摩擦。根据做相对运动两物体位移形式的不同，摩擦又可分为滑动摩擦与滚动摩擦。本节讨论的是金属表面间滑动摩擦。

根据摩擦面间存在润滑剂的情况，滑动摩擦可分为干摩擦、边界摩擦(又称为边界润滑)、液体摩擦(又称为液体润滑)及混合摩擦(又称为混合润滑)，如图 3-1 所示。其中干摩擦的摩擦因数最大，液体摩擦的摩擦因数最小。

1. 干摩擦

两摩擦表面间直接接触，不加入任何润滑剂的摩擦称为干摩擦。工程实际中，并不存在真正的干摩擦，因为在任何零件的表面总存在一层氧化膜和污染膜。在机械设计中，通常把人们无意加以润滑而又不会出现明显润滑现象的摩擦当作干摩擦处理。

工程设计中，常用库仑摩擦定律(古典摩擦定律)来揭示摩擦现象和计算摩擦力。库仑摩擦定律是基于实验建立的定律，虽然过去了几百年，它仍被认为是合理的。但近代对摩擦



3-1



3-2

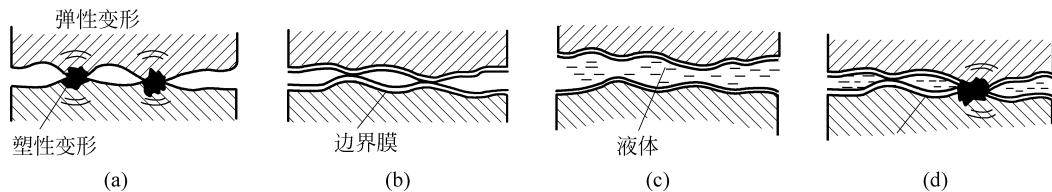


图 3-1 摩擦状态

(a) 干摩擦; (b) 边界摩擦; (c) 液体摩擦; (d) 混合摩擦

的深入研究发现,库仑摩擦定律与实际情况有许多不尽符合的地方,如:对于极硬材料(如金刚石)或极软材料(如聚四氟乙烯),摩擦力与法向载荷不呈线性关系;当粗糙度低到一定程度时,两相对滑动摩擦表面的摩擦力随着表面粗糙度的降低而增大;当滑动速度较大时,摩擦力与速度有关。

关于摩擦机理,有多种学派,其中由英国的 Bowden 和 Tabor 建立的黏着摩擦理论对于摩擦磨损研究具有重要意义,现简介如下。

当两金属表面接触时,由于表面是粗糙的,所以不是整个金属表面接触,只是某些凸峰接触,形成接触斑点的微面积,如图 3-2 所示。由于真实接触面积(A_r)只有表面接触面积的 $0.01\% \sim 1\%$,在法向载荷 F_N 的作用下,接触斑点上的压应力很容易达到材料的压缩屈服极限而产生塑性流动,如图 3-3(a)所示。接触点处受到高压力和塑性变形后,金属表面膜遭到破坏,在表面分子结合力的作用下,接触斑点牢固地黏结在一起,发生金属表面的黏着现象。当两金属表面相对滑动时,黏着结点被剪断。设黏着结点的剪切极限为 τ_B ,则黏着剪切力总和为 $F_T = A_r \tau_B$ 。摩擦过程就是黏着和滑动交替进行的过程。摩擦力 F_f 等于黏着效应和犁刨效应产生阻力的总和,即 $F_f = F_T + F_P$, F_P 为犁刨力。相应的摩擦因数 $f = f_a + f_m$,其中 f_a 为黏着分量, f_m 为犁刨分量。除了磨粒磨损外,多数切削加工表面的干摩擦因数可忽略 f_m ,故 $f = f_a = F_f / F_N = F_T / F_N$,其中 $F_N = A_r \sigma_s$,经整理得

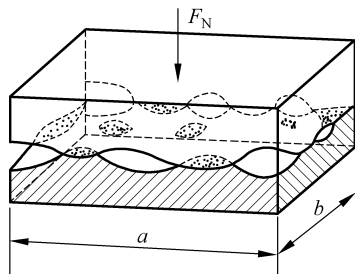


图 3-2 接触面积

$$f = \tau_B / \sigma_s \quad (3-1)$$

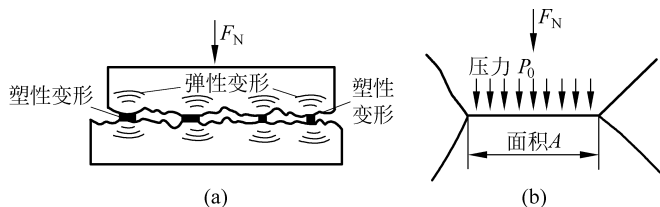


图 3-3 黏着

一般金属表面膜的剪切极限 τ_f 很低($\tau_f \ll \tau_B$),当剪切发生在界面上,摩擦因数 f 为

$$f = \tau_f / \sigma_s \quad (3-2)$$

式(3-1)和式(3-2)可以在相当大的范围内解释干摩擦现象。

2. 边界摩擦(边界润滑)

边界摩擦是指做相对运动的两金属表面被极薄的边界膜(润滑膜)隔开,两表面之间的摩擦和磨损不是取决于润滑剂的黏度,而是取决于两表面和润滑剂的特性。边界膜有物理吸附膜、化学吸附膜和化学反应膜。

(1) 物理吸附膜。当润滑油与金属接触时,靠分子吸力使润滑油中极性分子定向排列吸附在金属表面上,形成物理吸附膜,如图 3-4 所示。在吸附膜中极性分子相互平行,并都垂直于摩擦表面,吸附膜通常由三、四层分子组成,这些极性分子彼此聚集在一起,形成一种能防止粗糙凸峰穿透、避免金属直接接触的薄膜。当两摩擦表面相对滑动时,剪切仅在吸附膜各分子层间进行,所以摩擦因数较低。物理吸附膜很弱,吸附和脱附完全可逆,在高温时容易脱附,所以适用于常温、低速与轻载。

(2) 化学吸附膜。润滑剂吸附在金属表面上以后,一些极性分子的有价电子将与金属或其氧化表面的电子发生交换而产生新的化合物,使金属的极性分子定向排列吸附在金属表面上,形成化学吸附膜。化学吸附膜的形成是不可逆的。化学吸附膜适宜在中等载荷、中等温度和中等滑动速度条件下工作。

(3) 化学反应膜。化学反应膜是润滑油中的硫、磷、氯等有机化合物在较高的温度下与金属表面发生化学反应而生成的油膜。化学反应膜熔点高,抗剪强度低,比任何吸附膜都要稳定得多,这种反应是不可逆的,一般用于高速、重载和高温条件下润滑。

合理选择摩擦副材料和润滑剂,降低零件表面粗糙度,在润滑剂中加入油性添加剂和极压添加剂,都能提高边界膜的强度。

3. 液体摩擦(液体润滑)

两摩擦表面被一层具有一定压力、一定厚度、连续的流体润滑剂完全隔开,摩擦性质取决于液体内部分子间黏性阻力的摩擦,称为液体摩擦。

液体摩擦的摩擦阻力小,理论上不发生磨损,是理想的摩擦状态。

4. 混合摩擦(混合润滑)

在实际应用中,有较多的摩擦副处于干摩擦、边界摩擦和液体摩擦的混合状态,这种摩擦称为混合摩擦。

研究表明,摩擦副处于何种摩擦润滑状态,可用膜厚比 λ 来表征,即

$$\lambda = \frac{h_{\min}}{R_{a1} + R_{a2}} \quad (3-3)$$

式中, $h_{\min}$ ——两摩擦表面最小油膜厚度;

R_{a1} 、 R_{a2} ——两摩擦表面轮廓的算术平均偏差。

当 $\lambda \leq 1$ 时摩擦副处于边界摩擦润滑状态; 当 $1 < \lambda < 5$ 时摩擦副处于混合摩擦状态; 当 $\lambda > 5$ 时摩擦副处于液体摩擦润滑状态。

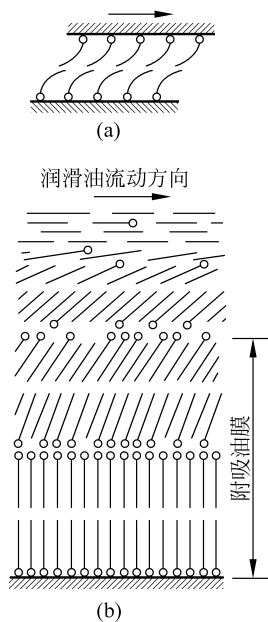


图 3-4 物理吸附边界膜模型

图 3-5 所示为滑动轴承摩擦特性曲线,反映了滑动轴承在各种摩擦润滑状态下,摩擦因数 f 随轴承特性系数 $\eta n/p$ (η 为润滑油动力黏度, n 为相对转速, p 为单位面积载荷) 的变化规律。在边界摩擦润滑时, f 的变化很小,进入混合摩擦润滑后, f 急剧减小,直到 $\eta n/p$ 达到某一临界值, f 达到最小值,之后随 $\eta n/p$ 的增加,油膜厚度也增加,油膜中的总内摩擦阻力相应有所增加,因而 f 将略有增加。

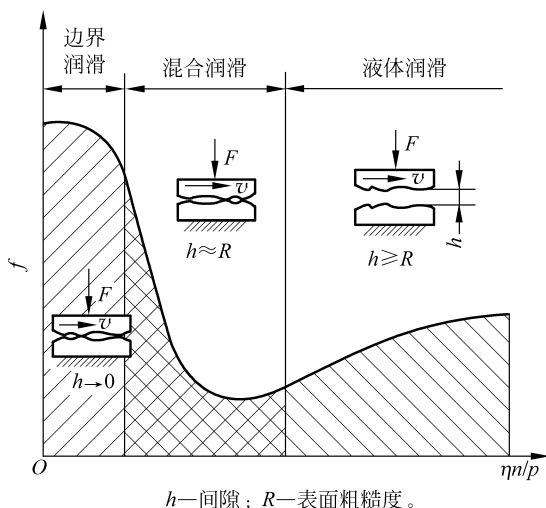


图 3-5 滑动轴承摩擦特性曲线

近年来,学者提出了介于液体润滑和边界润滑之间的薄膜润滑,以填补液体润滑和边界润滑之间上述的空白区。薄膜润滑研究不仅对于深化润滑和磨损理论具有重要意义,而且也是现代科学技术发展的需要,具有广泛的应用前景。例如:薄膜润滑已成为保证一些高科技设备和超精密机械正常工作的关键技术;传统机械零件的小型化和大功率要求也有减小机器中润滑油膜厚度的趋势。

随着科学技术的发展,摩擦学研究也逐渐深入微观领域,形成了纳米摩擦学。纳米摩擦学是在原子、分子尺度上研究摩擦界面的行为、损伤及其对策,主要研究内容包括纳米摩擦磨损理论、纳米薄膜润滑理论以及表界面分子工程。纳米摩擦学的学科基础、理论分析及试验测试方法都与宏观摩擦学研究有很大的差别。

纳米摩擦学的研究能够深入到原子、分子尺度,能够动态揭示摩擦过程中的微观现象,还可以在纳米尺度上使摩擦表面改性和排列原子。纳米摩擦学在微机械系统摩擦磨损特性研究等方面具有明显的应用前景,比如,通过最大限度降低磨损来保证诸如计算机大容量高密度磁记录装置等高科技设备的功能和使用寿命。

3.2 磨 损

零件的相对运动使其表面材料不断损失的现象称为磨损。磨损将消耗能量,降低机械效率;磨损将改变零件的形状和尺寸,降低零件工作的可靠性,缩短设备的使用寿命。因此,在设计时必须考虑如何避免或减轻磨损,以保证机器达到预期寿命。在工程上,有时也利用磨损来加工机械零件,如精加工中的磨削、抛光以及机器的“跑合”等。

磨损过程可分为三个阶段,如图 3-6 所示。

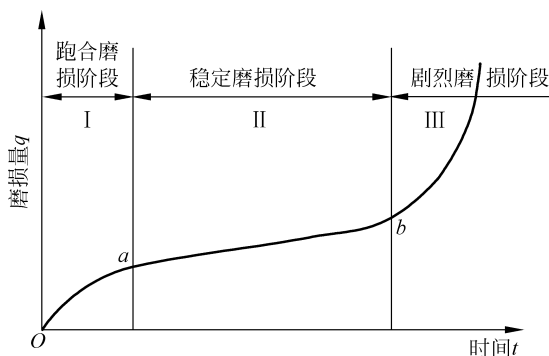


图 3-6 磨损过程

I 为跑合磨损阶段。新零件开始运转时,由于零件表面粗糙度的影响,使得摩擦副的实际接触面积较小,单位接触面积上的实际载荷较大,故工作初期零件磨损量较大。随着跑合的进行,摩擦面尖峰被逐渐磨平,实际接触面积增大,单位面积载荷减小,磨损速度变慢,转入稳定磨损阶段。由于跑合可改善机器零件摩擦表面的接触性能,故新机器一般需经过跑合后才交付使用。跑合时应注意由轻至重且缓慢加载,跑合后,要全部更换润滑油。II 为稳定磨损阶段。该阶段零件的磨损速度缓慢而稳定,磨损率 $\epsilon = dq/dt = \text{常数}$ 。该阶段是零件的正常工作阶段,时间周期长短代表了零件使用寿命的长短。III 为剧烈磨损阶段。零件经稳定磨损阶段后,间隙加大,精度下降,润滑状况恶化,出现异常噪声和冲击振动,磨损率急剧上升,温度迅速升高,零件很快就报废。应在零件进入剧烈磨损阶段前对机器及时进行检修。

根据磨损机理的不同,磨损主要有四种基本类型:黏着磨损(adhesive wear)、磨粒磨损(abrasive wear)、接触疲劳磨损(fatigue wear)和腐蚀磨损(corrosive wear)。

1. 黏着磨损

两摩擦表面的不平度凸峰在相互作用的各结点发生黏着,在相对滑动时,由于黏着点被剪切,材料或脱落成磨屑,或由一个表面迁移到另一个表面,这类磨损称为黏着磨损。

黏着磨损按破坏程度的不同可分为五类:①轻微磨损,即剪切破坏发生在界面上,表面材料的转移极为轻微;②涂抹,即剪切破坏发生在软金属浅层,并转移到硬金属表面上;③擦伤,即剪切破坏发生在软金属亚浅层处,有时硬金属表面接近浅层处也有划痕;④撕脱,即剪切破坏发生在摩擦副一方或双方金属较深处;⑤咬死,表面黏着严重,摩擦副不能运动。擦伤、撕脱和咬死通常也称为胶合,胶合是高速重载接触时常见的损伤形式。

减轻黏着磨损可以采取以下措施:①合理选择摩擦副材料,如同类材料之间互溶性比异类材料的大,脆性材料比塑性材料抗黏着性好,采用表面处理可提高抗黏着性;②采用油性好和含有极压添加剂的润滑油;③控制摩擦副表面的温度和压强。

2. 磨粒磨损

从外部进入摩擦表面间的硬质颗粒或摩擦表面上的硬质突起物在摩擦过程中起到切削或刮擦作用,使零件表面材料脱落,这种现象称为磨粒磨损。磨粒磨损与摩擦表面硬度和磨

粒硬度有关。

减轻磨粒磨损可采用以下措施：①提高材料硬度；②对零件表面进行处理以提高耐磨性；③定期更换润滑油，防止外部磨粒进入摩擦副表面。

3. 接触疲劳磨损

零件表面在接触处产生接触应力，在此交变接触应力的作用下，经过若干循环次数后，零件表面材料产生小片剥落而使零件表面形成小麻坑，这种由于表面材料接触疲劳而产生物质转移的现象称为接触疲劳磨损（亦称为疲劳点蚀）。接触疲劳磨损是由于接触应力超过材料的接触疲劳极限时，零件表面产生初始疲劳裂纹，裂纹与表面成锐角扩展，达到一定深度，裂纹又越出表面，形成小块材料剥落，呈点蚀现象。润滑油对被迫越面的裂纹扩展也起到一定的促进作用。

减轻接触疲劳磨损的措施：①提高润滑油黏度；②提高接触表面硬度；③降低表面粗糙度。

4. 腐蚀磨损

零件在摩擦过程中，金属与周围介质发生化学反应或电化学反应而产生的表面材料损失现象，称为腐蚀磨损。氧化磨损和特殊介质磨损是常见的腐蚀磨损形式。氧化磨损是指金属摩擦表面在氧化性介质中工作时金属表面生成氧化膜，在相对运动过程中氧化膜被磨去，新鲜表面很快又形成新的氧化膜，然后又被磨掉。特殊介质磨损是指金属表面与酸、碱、盐等介质发生化学反应，形成腐蚀磨损。

3.3 润 滑

润滑是指在两摩擦表面间加上润滑剂，使两摩擦表面尽量分开，避免表面直接接触，以减小摩擦，减轻磨损，降低工作表面温度。此外，润滑剂还能防锈、减振、密封、清除污物和传递动力等。

1. 润滑剂的分类

润滑剂有液体、气体、半固体和固体四种。

（1）液体润滑剂。矿物润滑油、合成润滑油、有机润滑油以及其他液体（例如水）都是液体润滑剂。其中，矿物润滑油应用最广泛，这是因为矿物润滑油来源充足，价格便宜，适用范围广而且稳定性好，加入各种添加剂可以改善它的性能。合成润滑油是化学合成的高分子化合物，它能满足矿物润滑油所不能满足的某些特殊要求，如高温、低温、高速、重载和其他条件，但合成润滑油成本较高。动物油和植物油油性好，但容易变质，常作添加剂使用。近年来，由于环境保护的需要，一种具有生物可降解特性的润滑油——绿色润滑油也在一些特殊行业和场合得到应用。

（2）气体润滑剂。气体润滑剂是指空气、氢气、氦气、水蒸气、其他工业气体以及液体金属蒸气等。由于气体润滑剂黏度低、温升低、黏-温性质变化小、承载能力低，所以气体润滑剂适用于高速轻载和有放射线的场合，如高速磨头、陀螺仪表等。

（3）半固体润滑剂。半固体润滑剂主要是指润滑脂，它是在液态润滑剂中加入稠化剂而形成的。稠化剂有钙、钠、锂、铝等金属皂。由于润滑脂呈膏状，不易流失，所以润滑脂应用也相当广泛，常用于低速工况。

(4) 固体润滑剂。固体润滑剂有无机化合物、有机化合物和金属三类。无机化合物有石墨、二硫化钼等,它们稳定性好;有机化合物有聚四氟乙烯、尼龙等;金属有铅、锡、铜、钼、银等。固体润滑剂在高温、低温、真空条件下均可正常工作,所以适用于食品工业、纺织工业等。

2. 润滑剂的性质

润滑油的主要性能指标有:

(1) 黏度。黏度是润滑油的主要性能指标。它标志着流体流动时内摩擦阻力的大小,黏度越大,内摩擦阻力越大,流动性越差。

如图 3-7 所示,在距离为 h 的两平行平板间(平板面积为 A)充满了一定黏度的润滑油,若移动平板在力 F 作用下以速度 V 沿 x 方向移动,则由于油分子对平板表面的吸附作用,吸附在移动平板上的油层也以 V 沿 x 方向移动,而吸附在静止板上的油层速度为零。由于润滑油内摩擦力的作用,在移动平板和静止板之间各层油的运动速度变化为直线分布,各油层之间都有相对滑动,在各油层界面上就存在着相应的剪切应力。按牛顿黏性定律,润滑油中任一点处的剪切应力与其速度梯度成正比,即

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (3-4)$$

式中, η 为液体动力黏度,又称为绝对黏度。

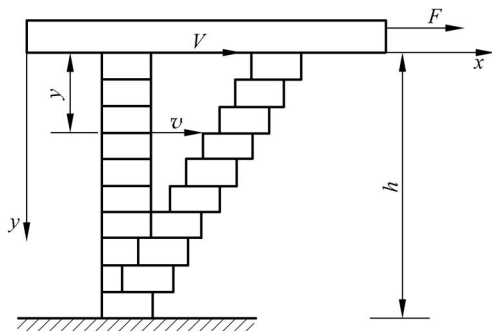


图 3-7 油膜中黏性流动

黏度单位:

① 动力黏度 η 。图 3-7 中,若 h 为 1 m,平板面积 A 为 1 m²,速度 v 为 1 m/s, F 为 1 N 时,则规定该润滑剂的动力黏度为 1 N·s/m² 或 1 Pa·s。

② 运动黏度 ν 。测量液体黏度的黏度计,不能直接测得液体的动力黏度,测得的是液体动力黏度 η 与密度 ρ 的比值,这个比值称为运动黏度 ν :

$$\nu = \eta / \rho \quad (3-5)$$

因油的密度单位为 kg/m³,故导出运动黏度 ν 的单位为 m²/s, m²/s 作为黏度单位太大,实际上常用 cm²/s 和 mm²/s,即 St(斯)和 cSt(厘斯)为单位,其换算关系为 1 m²/s = 10⁴ cm²/s(St) = 10⁶ mm²/s(cSt)。

③ 条件黏度。在石油产品中,普遍采用条件黏度。我国常用恩氏度($^{\circ}E_t$)作为条件黏度单位。条件黏度是指 200 mL 待测定的油,在规定的恒温(常为 40℃或 100℃,这时恩氏度用 $^{\circ}E_{40}$ 或 $^{\circ}E_{100}$ 表示)下流过恩氏黏度计的时间与同体积蒸馏水在 20℃时流过黏度计时

间之比。

润滑油的黏度随温度的变化而变化,图 3-8 给出部分润滑油的黏度-温度曲线。图中曲线数字代表润滑油在 40℃时的运动黏度值。黏度随温度变化越小的油,其品质越高。

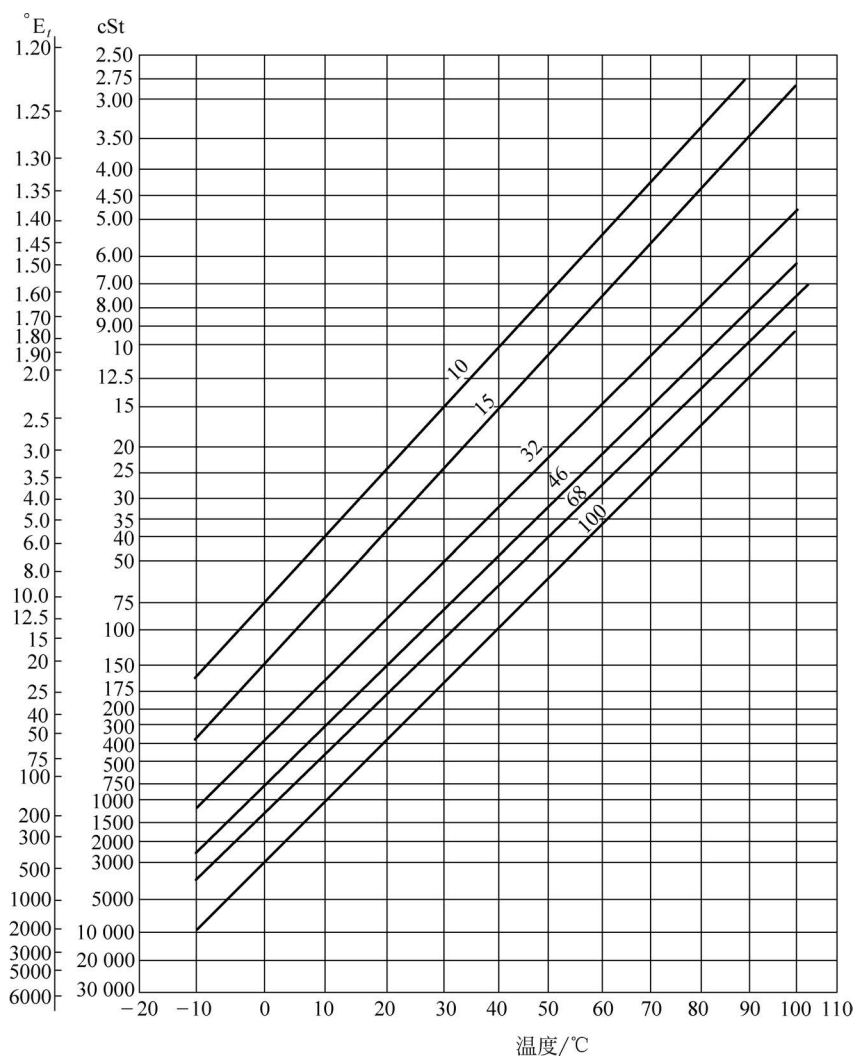


图 3-8 几种全损耗系统用油的润滑油黏度-温度曲线

润滑油的黏度随压力增大而增大,不过对于所有的润滑油来说,只有在压力超过 20 MPa 时,黏度才随压力的增高而加大,高压时则更为显著,因此在一般的润滑条件下也同样不予考虑。但在高副接触零件的润滑中,这种影响就变得十分重要。一般矿物油的黏压关系可用下列经验式表示:

$$\eta = \eta_0 e^{\alpha p} \quad (3-6)$$

式中, η_0 ——润滑油在 1 个标准大气压下的黏度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$);

α ——黏压指数, $(1 \sim 3) \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N}$;

p ——压力, N/m^2 。

(2) 油性。油性表示润滑油湿润或吸附于摩擦表面的能力。油性越好,吸附能力越强,油膜越不易破裂,这在低速、重载、润滑不充分的场合有重要意义。

(3) 闪点。润滑油在标准容器中加热所蒸发出的油蒸气,遇到火焰即能发出闪光的最低温度,称为润滑油的闪点。它是衡量润滑油易燃性的指标。通常使工作温度比润滑油的闪点低 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 凝点。润滑油在规定条件下冷却到不能自由流动时的最高温度,称为润滑油的凝点。它是润滑油在低温下工作的重要指标,直接影响机器在低温下的起动性能和磨损情况。

润滑脂的主要性能指标有:

(1) 针入度。针入度是指在 25°C 恒温下,使重量为 1.5 N 的标准锥体在 5 s 内沉入润滑脂的深度(以 0.1 mm 计)。它标志着润滑脂内阻的大小和流动性的强弱。针入度越小,润滑脂越不易从摩擦表面被挤出,故承载能力越强,密封性越好,但同时摩擦阻力也越大,不易填充较小的摩擦间隙。

(2) 滴点。滴点指润滑脂受热熔化后从标准测量杯的孔口滴下第一滴时的温度。它标志着润滑脂耐高温的能力。

3. 润滑油、润滑脂的添加剂

普通润滑油、润滑脂在一些十分恶劣的工作条件下(如高温、低温、重载、真空等)会很快劣化变质,失去润滑能力。为了适应这些极端情况,常加入添加剂以改善润滑油、润滑脂的性能。添加剂种类很多,大致可分为两大类:一类是影响润滑剂物理性能的,有降凝剂、增黏剂、消泡剂等,如关于降凝剂,加入 $0.1\%\sim 1\%$ 的降凝剂即可降低润滑油的凝点,在严寒地区工作的机器就能得到正常润滑;另一类是影响润滑剂化学性能的,有抗氧化剂、极压剂、油性剂、抗腐剂等,如关于油性添加剂,微量油性添加剂加于润滑油就可使油极易吸附于金属表面,并能提高边界膜强度,常用的油性添加剂有动物油、植物油、油酸、脂肪酸盐、脂肪醇、脂等。

4. 液体摩擦润滑

根据两摩擦表面间形成压力油膜原理的不同,可将液体摩擦润滑分为液体动力润滑、弹性流体动力润滑和液体静压润滑。

(1) 液体动力润滑。液体动力润滑靠两摩擦表面相对运动时把一定黏度的润滑油带入其楔形间隙形成承载油膜。承载油膜形成必须具备的必要条件:①两滑动表面沿运动方向的间隙必须为收敛楔形,如图 3-9 所示,即移动平板带润滑油流动方向必须从大口流向小口;②带油速度必须足够大,以便油连续泵入楔形间隙;③润滑油必须具有一定的黏度。关于液体动力润滑的基本理论及设计计算方法将在第 11 章中详述。

(2) 弹性流体动力润滑。弹性流体动力润滑研究高副接触(如齿轮传动、滚动轴承和凸轮机构等)摩擦表面间的润滑问题。理论分析与实验研究证实,在一定条件下,高副接触区内可形成将两表面完全分开的润滑油膜。这类润滑问题与低副接触摩擦表面润滑问题的两个突出区别是:既要考虑接触区的弹性变形,又要考虑润滑剂随压力增大后的黏度变化。

弹性流体动力润滑理论及实验研究表明,当接触圆柱体带油速度(U_1+U_2)越小时,油膜压力的分布越接近于干摩擦时的赫兹应力分布。

在弹性流体润滑条件下,接触区的出口附近会突然出现一个第二峰值压力(见图 3-10)。在赫兹接触区内的弹性变形,基本上形成一个平行的油膜厚度 h_0 ,对应于第二峰值压力处出现一种缩颈现象,形成最小油膜厚度 $h_{\min}$ 。弹性流体动力润滑最小油膜厚度公式如下。

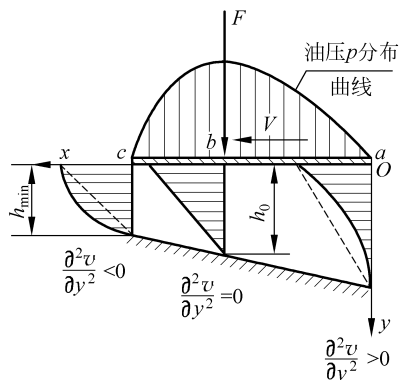


图 3-9 油楔承载原理

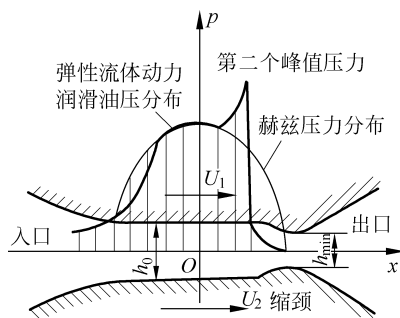


图 3-10 弹性流体动力润滑压力分布

$$\text{对于线接触: } h_{\min} = 2.65\alpha^{0.54} (\eta_0 U)^{0.7} R^{0.43} E'^{-0.03} p^{-0.13} \quad (3-7)$$

$$\text{对于点接触: } h_{\min} = 3.63\alpha^{0.49} (\eta_0 U)^{0.68} E'^{-0.117} R_x^{0.466} F^{-0.073} (1 - e^{0.68k}) \quad (3-8)$$

式中, α ——黏压指数;

U ——接触圆柱体滚动速度, $U = U_1 + U_2$;

R ——综合曲率半径, $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$;

E' ——综合弹性模量;

p ——单位接触宽度上的载荷;

R_x ——沿运动方向综合曲率半径;

F ——接触处的法向力;

k ——椭圆参数, $k = a/b$, a 和 b 分别为接触椭圆的半长轴和半短轴。

(3) 液体静压润滑。液体静压润滑指在摩擦副外部用泵将油加压送入摩擦表面间,使得摩擦表面间强迫形成一层油膜,将两表面完全分开,并能承受一定的载荷,如图 3-11 所示。工作时高压油不断送入油腔,又不断从轴承间隙外泄。当整个油封面上保持有均匀油膜时,其压力分布如图 3-11 所示,它的总和与外载荷 F 平衡。油膜厚度随外载荷变化而变化,其变化规律除与载荷变化有关,还与流量补偿性能有关。为了使摩擦副表面间油膜厚度总保持稳定数值,形成液体润滑,在供油路上加一补偿元件,如图 3-11 所示的节流器,用来调节补偿流量。液体静压润滑无论是在低速还是在高速下工作均可实现完全液体润滑,但它需要一套供油装置,这增加了设备费用。因此,液体静压润滑仅在一些重型、精密、高效机器的轴承、导轨、蜗杆副及传动螺旋等零件中应用。

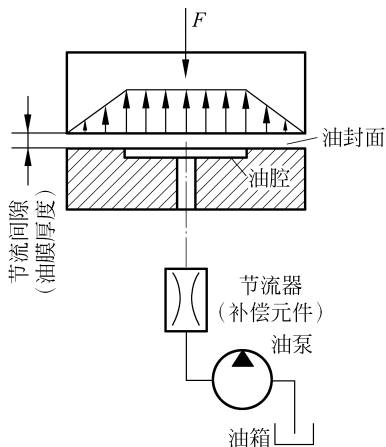


图 3-11 液体静压润滑



自测题 3