

润滑剂性质与应用

郑发正 谢凤 主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

润滑剂性质与应用

郑发正 谢 凤 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书较系统地介绍了摩擦润滑的基本原理、润滑剂的性质、应用和质量管理。结合油料应用理论知识和油料工作实际,重点讨论了润滑油、润滑脂和特种液的主要理化性质及其性能影响因素,常用润滑油、润滑脂和特种液的品种牌号及其使用。本书适用于油料专业课程教学,也可作为军队和地方油料人员业务学习的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

润滑剂性质与应用/郑发正,谢凤主编.
—北京:中国石化出版社,2006
ISBN 7-80229-111-9

I. 润… II. ①郑… ②谢… III. ①润滑剂-性质
②润滑剂-应用 IV. TE626.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 079948 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

北京大地印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 17 印张 415 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

定价:45.00 元

前 言

随着石油工业和机械装备的快速发展，润滑剂的品种越来越多，质量性能要求也更加严格。为正确选用和使用各类润滑剂，保证用油设备技术性能的发挥，实现油料在储存、使用等各个环节的科学管理，编写出版了《润滑剂性质与应用》教材。

本书较系统地介绍了摩擦润滑的基本原理、润滑剂的组成、性质、种类和使用等内容。全书共分为摩擦与润滑基本理论、润滑油的基本性质、组成、种类牌号与使用、润滑脂的组成、基本性质、种类牌号与使用、特种液、润滑剂使用管理等9章，重点讨论了润滑油、润滑脂和特种液的主要理化性质及其性能影响因素，常用润滑油、润滑脂和特种液的品种牌号及其使用。

本书力求内容翔实准确，兼顾发展；讨论分析深入浅出，注重理论与实际相结合；章节配置合理，便于学习。既可作为相关院校油料专业的培训教材，又可供军队和地方人员自学使用。

全书由郑发正、谢凤主编，其中第一章~第三章由郑发正编写，第四章、第六章、七章由谢凤编写，第五章由杜占合编写，第八章由季峰编写，第九章由胡建强编写。

限于编者水平，谬误和疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

目 录

第一章 摩擦与润滑基础 (1)	三、抗氧添加剂..... (40)
第一节 摩擦..... (1)	四、清净分散剂..... (43)
一、摩擦现象..... (1)	五、润滑油抗氧化安定性与清净分散性评定方法..... (47)
二、摩擦的功与过..... (1)	第四节 润滑油的腐蚀性 (51)
三、摩擦种类..... (2)	一、腐蚀现象的产生..... (51)
第二节 磨损 (5)	二、润滑油中腐蚀性物质..... (52)
一、磨损过程的三个阶段..... (5)	三、润滑油腐蚀性的测定方法..... (54)
二、常见的磨损类型..... (6)	四、防锈剂与防腐蚀剂..... (56)
三、磨损的影响因素..... (8)	第五节 润滑油的抗泡性 (58)
第三节 润滑 (9)	一、泡沫的产生和危害..... (58)
一、流体润滑(液体润滑)..... (9)	二、影响润滑油抗泡性的因素..... (59)
二、边界润滑..... (10)	三、润滑油抗泡性的评定方法..... (59)
三、几种润滑类型的比较..... (12)	四、抗泡剂种类和性质..... (59)
四、润滑油的作用与润滑方式..... (13)	第六节 润滑油的其他性质 (61)
第二章 润滑油基本性质 (16)	一、闪点与燃点..... (61)
第一节 润滑性..... (16)	二、残炭..... (63)
一、粘度..... (16)	三、灰分..... (64)
二、油性和极压性..... (22)	四、氢氧化钠抽出物酸化试验..... (65)
三、油性剂和极压抗磨剂..... (23)	五、机械杂质和水分..... (65)
四、润滑性能的评定方法(四球摩擦试验机)..... (28)	第三章 润滑油的种类及成分 ... (67)
第二节 低温流动性 (30)	第一节 矿物润滑油 (67)
一、粘度对低温流动性的影响..... (30)	一、矿物润滑油的基本组成..... (67)
二、凝点、倾点的影响..... (31)	二、润滑油组成的表示方法..... (70)
三、改善润滑油低温流动性的添加剂..... (32)	三、润滑油组成和主要性质的关系..... (71)
第三节 抗氧化安定性与清净分散性 (35)	四、矿物润滑油的基本生产方法..... (74)
一、润滑油工作中的氧化情况..... (35)	五、矿物基础油的分类标准..... (82)
二、使用条件对氧化的影响..... (39)	

第二节 合成润滑油·····	(86)
一、聚 α - 烯烃油·····	(87)
二、酯类油·····	(87)
三、硅油·····	(89)
四、硅酸酯·····	(92)
五、磷酸酯·····	(93)
六、全氟碳油、氟氯碳油及 氟醚油·····	(93)
七、聚亚烷基醚·····	(94)
八、其他合成油·····	(95)

第四章 润滑油的分类、牌号和使用

·····	(98)
第一节 润滑油的分类和代号·····	(98)
一、GB/T 7631·1—87 润滑剂和 有关产品(L)类的分类·····	(98)
二、GB 500—65 润滑油的分组、 命名和代号标准·····	(99)
三、合成润滑油脂的命名和代号 ·····	(99)
第二节 内燃机润滑油·····	(100)
一、内燃机润滑油的分类·····	(100)
二、内燃机润滑油的工作条件和 品质要求·····	(102)
三、内燃机润滑油的品种规格 ·····	(105)
四、内燃机油的选用·····	(113)
五、内燃机油的换油期与换油 指标·····	(115)
六、航空活塞式发动机润滑油的 牌号和使用·····	(118)
第三节 航空涡轮发动机润滑油·····	(119)
一、航空涡轮发动机润滑油的 工作条件·····	(119)
二、航空涡轮发动机润滑油的 品质要求·····	(120)
三、航空涡轮发动机润滑油的 品种规格·····	(122)
四、使用航空涡轮发动机润滑油时	

应注意的几个问题·····	(124)
第四节 车辆齿轮油·····	(125)
一、车辆齿轮油的工作条件和 品质要求·····	(125)
二、车辆齿轮油的分类·····	(126)
三、车辆齿轮油的品种规格·····	(128)
四、车辆齿轮油的使用·····	(130)
第五节 压缩机油·····	(132)
一、压缩机油的工作条件和品质 要求·····	(132)
二、压缩机油的品种规格·····	(133)
三、使用压缩机油时的注意事项 ·····	(135)
第六节 冷冻机油·····	(135)
一、冷冻机油的用途、工作条件 和品质要求·····	(135)
二、冷冻机油的分类、规格·····	(136)
三、冷冻机油的选择·····	(137)
第七节 汽轮机油·····	(142)
一、汽轮机油的工作条件和性能 ·····	(142)
二、汽轮机油的分类、牌号与 使用·····	(144)
第八节 全损耗系统用油·····	(149)
一、全损耗系统用油的分类·····	(149)
二、L-AN 全损耗系统用油·····	(149)
第九节 仪表油·····	(151)
一、仪器仪表的润滑条件·····	(152)
二、对仪表油性能的要求·····	(152)
三、仪表油的品种规格·····	(153)
四、仪表油的使用·····	(156)
第十节 变压器油·····	(157)
一、变压器油的用途、工作条件 和品质要求·····	(157)
二、变压器油的牌号、规格和 使用·····	(158)
第十一节 润滑油的管理·····	(159)
一、润滑油管理的主要工作和 要求·····	(160)

二、润滑油的储存年限·····	(161)	第七节 润滑脂的其他性能及其测试项目·····	(190)
第五章 润滑脂的组成 ·····	(162)	一、强度极限·····	(190)
第一节 润滑脂的使用特点·····	(162)	二、相似粘度·····	(190)
一、润滑脂的定义·····	(162)	三、机械杂质·····	(191)
二、润滑脂的触变性·····	(162)	四、水分·····	(191)
三、润滑脂的优点和局限性·····	(162)	五、低温转矩·····	(192)
第二节 润滑脂的组成·····	(163)	六、蒸发性·····	(192)
一、基础油·····	(163)	第七章 润滑脂的种类、牌号与使用 ·····	(193)
二、稠化剂·····	(166)	第一节 润滑脂的分类和代号·····	(193)
三、稳定剂(结构改善剂)·····	(173)	一、按润滑脂使用性能分类·····	(193)
四、添加剂·····	(173)	二、按稠化剂类型分类·····	(194)
第六章 润滑脂的基本性质 ·····	(175)	第二节 钙基润滑脂·····	(196)
第一节 外观·····	(175)	一、钙基润滑脂·····	(196)
第二节 滴点·····	(176)	二、石墨钙基润滑脂·····	(197)
一、滴点的定义及测定方法·····	(176)	三、特 221 号润滑脂·····	(197)
二、滴点与润滑脂组成的关系·····	(177)	第三节 钠基润滑脂·····	(197)
三、滴点的测定意义·····	(179)	一、钠基润滑脂·····	(197)
第三节 稠度·····	(180)	二、4 号高温润滑脂·····	(198)
一、稠度的概念·····	(180)	三、特 12 号精密仪表脂·····	(198)
二、锥入度的定义及测定方法·····	(180)	第四节 钙钠基润滑脂·····	(198)
三、润滑脂组成结构对锥入度的影响·····	(181)	一、钙钠基润滑脂·····	(198)
四、锥入度的意义·····	(181)	二、滚珠轴承润滑脂·····	(199)
第四节 保护性能·····	(182)	第五节 锂基润滑脂·····	(199)
第五节 安定性·····	(184)	一、汽车通用锂基润滑脂·····	(199)
一、胶体安定性·····	(184)	二、极压锂基润滑脂·····	(200)
二、氧化安定性(或化学安定性)·····	(186)	三、通用锂基润滑脂·····	(200)
三、机械安定性·····	(187)	四、7007 号和 7008 号通用航空润滑脂·····	(202)
第六节 抗水性能·····	(188)	五、7011 号低温极压润滑脂和 7012 号极低温润滑脂·····	(202)
一、润滑脂抗水性的评定方法·····	(189)	第六节 烃基润滑脂·····	(202)
二、润滑脂的抗水性同使用的关系·····	(190)	一、工业凡士林和医药凡士林·····	(203)
		二、3 号仪表润滑脂·····	(203)
		三、特 8 号精密仪表脂·····	(203)

四、石墨烃基润滑脂·····	(204)	要求·····	(233)
第七节 其他类型润滑脂·····	(204)	二、汽车用防冻液(冷却液)·····	(234)
一、钼基润滑脂·····	(204)	第四节 汽车制动液·····	(238)
二、锌基润滑脂·····	(204)	一、汽车制动液的工作条件和	
三、钼铅基润滑脂·····	(205)	性能要求·····	(239)
四、膨润土润滑脂·····	(205)	二、汽车制动液的分类·····	(239)
五、硅胶润滑脂·····	(205)	三、制动液的品种牌号及技术	
六、酰胺钠润滑脂·····	(206)	要求·····	(240)
第八节 润滑脂在储存和使用中的		四、制动液使用中的注意事项	
质量管理·····	(208)	·····	(243)
一、润滑脂在储存中的质量管理			
·····	(208)		
二、润滑脂在使用中的质量管理			
·····	(209)		
第八章 特种液·····	(211)	第九章 润滑剂使用管理·····	(245)
第一节 液压油·····	(211)	第一节 润滑剂的选用与代用·····	(245)
一、液压传动的工作原理·····	(211)	一、润滑油的选用·····	(245)
二、液压油的主要性能要求·····	(212)	二、润滑脂的选用·····	(246)
三、液压油的分类·····	(214)	三、润滑油脂的代用·····	(250)
四、液压油的规格·····	(217)	第二节 润滑油的质量维护与监控	
五、液压油的选用、维护管理与		·····	(251)
更换·····	(224)	一、质量维护·····	(251)
第二节 航空液压油·····	(226)	二、质量监控·····	(252)
一、航空液压油的工作条件和		第三节 润滑剂的回收与再生	
品质要求·····	(226)	·····	(254)
二、航空液压油品种牌号及技术		一、润滑剂回收与再生的意义	
要求·····	(230)	·····	(254)
第三节 发动机冷却液·····	(233)	二、用过油料的回收·····	(255)
一、发动机冷却液的作用及性能		三、润滑剂的更生·····	(255)
		第四节 常用油料识别方法·····	(260)
		一、油料识别基本方法·····	(261)
		二、常用油料识别特征·····	(262)
		参考文献·····	(264)

第一章 摩擦与润滑基础

本章内容:

- 摩擦
- 磨损
- 润滑

摩擦、磨损和润滑方面的问题，也称作摩擦学问题，是一个始终贯穿于人类发展史和机械工业生产过程的矛盾统一体。摩擦现象的存在是这一问题的前提，而减缓摩擦进行润滑则是大多数场合中人们采取的一项重要措施。

第一节 摩擦

一、摩擦现象

相互接触的物体在相对运动时或具有相对运动的趋势时，接触面间所产生阻碍其相对运动的阻力称之为摩擦力，发生的此现象则称之为摩擦。

如果对摩擦现象进一步观察，则会发现，在摩擦运动中除存在着摩擦阻力以外，同时还伴随着摩擦热量的产生和材料的磨损。这三者统称为摩擦运动的特征。从物理性质来讲，摩擦力是摩擦副的力学特征，摩擦热是能量转换的形式，磨损则是摩擦表面物质的消耗。

摩擦是物体相互作用的一种形式，广泛存在于自然界和机械运动之中。在机械运动中，我们把发生相对运动而出现摩擦的零件统称为摩擦副。如轴与轴承、汽缸与活塞、凸轮与顶杆、齿轮啮合、皮带传动等等。这些零部件在运转时都产生着摩擦，同时伴随着摩擦阻力、材料的磨损和摩擦热量的产生。

摩擦也是日常生活中广泛存在的一种现象。如果我们留意的话，就会在周围随时捕捉到摩擦现象的发生。就以人们的行走与写字来讲，其中就包含着摩擦，走路包含着腿部关节的摩擦和鞋底与地面的摩擦，写字也存在着手与笔的摩擦和笔尖与纸张的摩擦。

二、摩擦的功与过

在许多场合下，摩擦对人类是有利的，也是不可或缺的。人们依靠摩擦来握拿物品，房间内的桌、凳、床、柜等家具全部依靠与地面的摩擦而保持在固定的位置，水龙头利用摩擦而拧紧，钉子依靠摩擦力而固定在木材中。利用摩擦生热可使火柴、打火机着火。依据摩擦中的磨损可应用砂轮打磨金属，以及我们生活中用刷子洗刷掉衣服上的脏污等等。这一切都离不开摩擦。如果脱离了摩擦，将会如何呢？就拿我们前面所讲的行走例子来讲，人们依靠鞋底与地面的摩擦而行走，如果没有这个摩擦力，也就没有人体前移的动力，其结果只能是

原地打滑,甚至连站立也极为困难。且不讲不存在摩擦,即使是一定程度地减小了摩擦(例如在泥泞的小路行走),也会给人们的行动带来很大的不便。摩擦在许多情况下对人类是有利的,并被利用而为人类服务。在现代工业中,已出现了利用摩擦焊接金属和利用摩擦切削金属等工艺。

然而,在更多的情况下摩擦是一个有害的因素,需要采取一定的措施进行限制。这在机械工业里是一个十分普遍的事情。摩擦对运动的机械摩擦副存在着许多不良作用,这些作用主要表现在:

(1) 摩擦阻力

由于摩擦阻力使机械运动受到阻碍,为克服这些阻力需消耗机械能量,而增大机械能量的消耗和降低动力机械的效率。因而摩擦对能量造成的损耗数目是惊人的。在现代汽车中,约有 20% 的功率为克服摩擦而消耗掉。全世界使用的能源约有三分之一以上是白白浪费在摩擦上。

(2) 磨损

摩擦时由于摩擦表面直接接触,在零件表面将会产生一定的磨损,结果会降低机械的运动精度,改变轴承间隙,以及使机械出现振动和噪声,不仅影响机械的正常运转,同时也缩短了机械寿命。机器的报废在很大程度上是由于磨损而造成的。由于磨损的因素,还需经常对机器进行维修,更换零件。这些在工业损失费用里都占有很大的比例。

(3) 摩擦热量

根据能量守恒定律,在摩擦过程中消耗的那部分机械能将以热能的形式释放出来,即通常讲的“摩擦生热”。热量的产生将使得摩擦部件温度升高,如果不能及时散热,温度过高将会降低机械强度,出现热变形、热疲劳、热磨损,导致破坏机件精度,影响机械正常运转,甚至损坏机械部件。

摩擦有它有利的一面,也有它有害的一面,这是一个客观规律。但是,只要我们认真研究和了解摩擦、磨损的现象与本质,并采取相应的措施,就能达到利用摩擦为人类造福和控制、减缓摩擦,提高机械效率,延长机器零件使用寿命的目的。

三、摩擦种类

摩擦的现象极为普遍,种类很多,根据对摩擦现象观察和研究的依据不同,可将摩擦划分为不同的类型。摩擦的分类通常按摩擦副的运动状态、运动形式和摩擦面上物质的状态来划分。

1. 按发生摩擦的物体部位分类

(1) 外摩擦

这是指在两个相互接触的物体表面之间发生的摩擦。外摩擦即一般所指的摩擦,只与接触表面的作用有关,而与物体内部状态无关。

(2) 内摩擦

它是指在同一物体内部各部分之间发生的摩擦。内摩擦一般发生在液体或气体之类的流体内,但也可能发生在固体内,如石墨、二硫化钼等固体润滑剂内。

2. 按摩擦副的运动状态分类

(1) 静摩擦

当物体在外力作用下对另一物体产生微观弹性位移,但尚未发生相对运动时的摩擦称为

静摩擦。在相对运动即将开始瞬间的静摩擦即最大静摩擦，又称极限静摩擦。此时的摩擦系数，称为静摩擦系数。

(2) 动摩擦

当物体在外力作用下沿另一物体表面相对运动时的摩擦，称为动摩擦。两物体之间具有相对运动时的摩擦系数，称为动摩擦系数。

静摩擦小于极限静摩擦，而动摩擦则一般小于极限静摩擦。例如某摩擦副钢和铸铁，摩擦因数在极限静摩擦时为 0.25，动摩擦时为 0.16。

3. 按摩擦副的运动形式分类

(1) 滑动摩擦

两接触物体作相对滑动时的摩擦，称为滑动摩擦。两接触物体接触点具有不同的速度，可能是速度的大小和方向不同，也可能仅仅是大小或方向不同，见图 1-1(a)。

(2) 滚动摩擦

两接触物体沿接触表面滚动时的摩擦，称为滚动摩擦。此时两接触物体接触点的速度之大小和方向均相同，见图 1-1(b)。

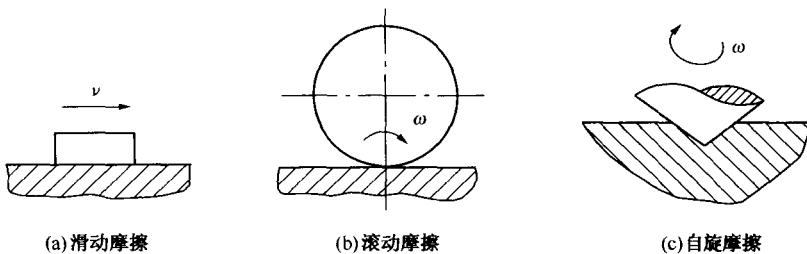


图 1-1 摩擦形式

(3) 自旋摩擦(转动摩擦)

物体沿垂直于接触表面的轴线作自旋运动时的摩擦，称为自旋摩擦，见图 1-1(c)。在分类时有时不作为单独的摩擦形式出现，以摩擦力矩来表征。

(4) 滑动摩擦与滚动摩擦的特点及应用

滑动摩擦和滚动摩擦都是工业以及日常生活中最常见的摩擦现象。滑动摩擦的情况，如活塞在汽缸里的往复运动，机床工作台在导轨上往复运动，曲轴在轴承套中转动等；滚动摩擦的情况，如滚珠或滚柱在轴承里的滚动，车轮在地面上的滚动，以及齿轮间的传动等。

滚动摩擦的摩擦因数远远小于滑动摩擦。如一般金属摩擦副干摩擦时滑动摩擦因数约为 0.1~0.5，滚动摩擦仅为 0.001~0.007。因此滚珠轴承和滚柱轴承这些滚动摩擦副在工业中得到了极为广泛的应用。从其应用的本质上讲，滚动摩擦也是人们减少摩擦阻力所采取的一种方式。

工业中，机械运转机件广泛使用滑动轴承和滚动轴承两类不同摩擦运动形式的摩擦副部件，并施加润滑剂进行润滑。这两类摩擦副部件由于摩擦运动的形式不同，在工作性能上有很大差别，分别适于不同的机械工作条件。

相比较而言，在摩擦阻力上，滚动轴承摩擦因数远远低于滑动轴承。由于其摩擦因数低，因此滚动轴承使用润滑剂的目的主要是防止摩擦接触点粘接和造成磨损；而滑动轴承则

完全是依靠润滑剂的润滑来降低摩擦阻力。

从承受负荷性能来讲,滑动轴承是同心圆的面接触,接触面大,承受负荷能力强。而滚动轴承是通过滚珠或滚柱形成的点或线的接触,接触面积小,承受负荷能力远小于滑动轴承。因此,滑动轴承具有高承载能力,适用于重载和具有冲击、振动载荷的机件,而滚动轴承则适用于轻、中载荷。如在功率较大的活塞式发动机的曲颈与连杆连接处等部位,由于负荷较大,一般多采用滑动轴承;而滚动轴承则多用于轻载荷的部件。

从摩擦副的结构来讲,滑动轴承零件结构较简单,精度较高,成本低,安装拆卸较简单方便。在承受相同负荷时,滑动轴承的尺寸可较大程度地小于滚动轴承。

4. 按摩擦副表面的润滑状态分类

按摩擦表面是否存在润滑剂和润滑的状态可将摩擦分为干摩擦、液体摩擦、边界摩擦等几种类型。

(1) 干摩擦

干摩擦是指在没有任何润滑剂的条件下,两物体表面间的摩擦。由于摩擦副间不存在润滑介质,摩擦表面固体直接接触,因而具有较大的摩擦阻力和摩擦中会产生较大的磨损。金属干摩擦的摩擦因数一般在 $0.1 \sim 0.5$ 的范围内,在机械工作中要严防干摩擦的出现。

这里应注意的是,此处讲的干摩擦是指一般环境条件下的干摩擦,而不同于真空下材料的摩擦情况。摩擦表面尽管不存在润滑剂,但由于材料的吸附作用及与环境中杂物的接触,摩擦表面都存在着分子吸附层和沾污层。其摩擦阻力和磨损情况还远小于真空条件下材料的纯净摩擦情况。

(2) 液体摩擦

液体摩擦又称流体摩擦,是发生在液体内部的一种摩擦现象,包括纯液体流动时的摩擦和液体将金属表面隔开时的摩擦。对于机械运转中的液体摩擦,我们主要指的是流动的液体薄层将金属摩擦表面相互隔开时的摩擦情况。

液体摩擦的液膜厚度一般需要在 $2\mu\text{m}$ 以上,小于这个厚度,一方面不能将金属表面凸出接触部位完全隔开,另一方面,液体在金属面上有一层一定厚度的吸附层(厚度一般小于 $0.5\mu\text{m}$)。吸附层中液体分子被金属晶格引力所束缚,已失去液体的流动性质,其摩擦时的性质已不同于液体摩擦的性质。

由于液体摩擦时摩擦面之间被液体隔开,两个摩擦面不直接接触,摩擦发生在液体内部,因而液体摩擦具有很低的摩擦阻力,且摩擦中磨损很小。液体摩擦系数一般为 $0.001 \sim 0.01$ 。在摩擦副间形成了液体摩擦后,摩擦阻力仅与液体的粘度、接触面积、滑动速度及油层厚度等因素有关。

(3) 边界摩擦

当固体摩擦表面不是被一层具有流动性的液体隔开,而是被一层很薄的吸附油膜隔开,或是被一层具有分层结构和润滑性能的边界膜隔开时的摩擦,称为边界摩擦。边界膜的厚度一般在 $0.1 \sim 1\mu\text{m}$ 以下,摩擦面大部分区域被边界膜隔开。

边界摩擦是液体摩擦和干摩擦之间的一种中间状态。摩擦阻力远小于干摩擦,摩擦因数约为 $0.01 \sim 0.1$,摩擦中出现的磨损约为干摩擦的 1% 。

实际上纯粹的边界摩擦并不存在。物体做相对滑动时,由于它的表面粗糙度不同,当凸起较高的部分发生边界摩擦时,凸起较低的部分处于液体摩擦状态中(半液体摩擦);当凸起

较低的部分处于边界摩擦时，凸起较高的部分因挤压较剧烈会导致边界膜破裂，其表面直接接触而发生局部的干摩擦、半干摩擦等。

边界摩擦、液体摩擦和干摩擦的情形见图 1-2 所示。

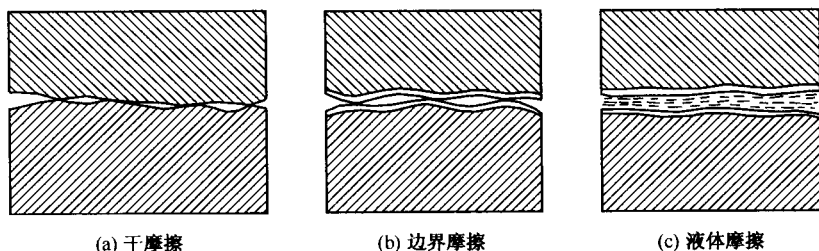


图 1-2 摩擦类型示意图

由以上分析可知，两个物体互相接触并做相对滑动时，干摩擦的摩擦因数最大，危害也最严重，液体摩擦的摩擦因数最小，边界摩擦也具有很低的摩擦因数。因此，机械摩擦表面应力求避免干摩擦，尽量保持液体摩擦，即使在苛刻的工作条件下也力求保持边界摩擦。实质上，液体摩擦和边界摩擦也是人们用来防止干摩擦的主要润滑方式。

第二节 磨 损

磨损是相互接触的物体在相对运动时，表层材料不断发生损耗的过程或者产生残余变形的现象。磨损是摩擦副运动所造成的，即使是经过润滑的摩擦副，也不能从根本上消除磨损。特别是在机械起动时，由于零件的摩擦表面上还没有形成油膜，就会发生金属间的直接接触，从而造成一定的磨损。摩擦副材料的磨损对机械造成的影响是十分严重的，尤其在现代工业自动化、连续化的生产中，由于某一零件的磨损失效则会影响到全线的生产。可以说，磨损是机械运转中普遍存在的一种现象，不仅是材料消耗的主要原因，也是影响机器使用寿命的重要因素。因此，人们对磨损现象不断进行研究，以找出磨损的因素和控制磨损的措施来达到减少磨损的目的。

一、磨损过程的三个阶段

机械摩擦副的磨损随使用时间的不同而不同，摩擦副从开始使用到完全失效，典型的磨损过程大致可分为三个阶段，见图 1-3。

1. “跑合”阶段

“跑合”阶段也称为“磨合”阶段。摩擦副初期使用时，在载荷的作用下，摩擦表面逐渐被磨平，实际接触面积逐渐增大，磨损速度开始很快，然后减慢，如图 1-3 中的 oa 段。

2. “稳定”磨损阶段

经过“跑合”，摩擦表面硬化，微观几何形状改变，从而建立了弹性接触的条件。

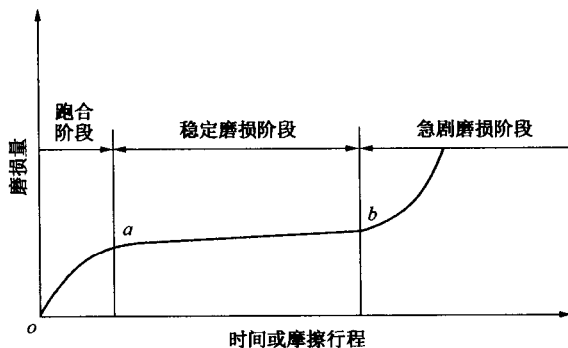


图 1-3 磨损过程的三个阶段

件,这时磨损已经稳定下来,磨损量与时间成正比缓慢地增加,如图1-3中 ab 线段。

3. “急剧”磨损阶段

经过较长时间的稳定磨损之后,由于摩擦表面之间的间隙和表面形状的改变,以及产生金属晶格疲劳等情况,磨损速度急剧加快,直至摩擦副不能正常运转,当摩擦副工作达到这一阶段时,机械效率下降,精度降低,出现异常的噪声及振动,最后导致零件完全失效。

从磨损过程的变化来看,为了提高机械零件的使用寿命,应尽量延长稳定磨损阶段。但是,恶劣条件下的磨合磨损之后,可能会直接进入急剧磨损阶段,不能建立正常工作条件。因此,对于新的机械设备保证良好的磨合是非常重要的。实践证明,良好的磨合能够使摩擦副的正常工作寿命延长1~2倍,而且还能有效地改善摩擦副的其他性能。例如对于滑动轴承,良好的磨合可改善表面形貌,更有利于建立流体动压润滑膜;发动机的合理磨合可提高气缸活塞环的表面品质,减少擦伤痕迹,提高密合性,使发动机的耗油量降低。

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。为了提高磨合性能,一般可选择合理的磨合规范,合理的磨合规范应当是逐步地增加载荷和摩擦速度,使表面品质得到改善,磨合的最后阶段应当接近使用工况。磨合还要选用适当的润滑油和添加剂,实践证明粘度较低的润滑油对于提高磨合性能有很大的作用,加入适当的油性添加剂也可提高磨合表面的品质。为加速磨合过程,有时还可添加适当的磨料,提高摩擦副表面的制造和装配精度,以减少磨合阶段的磨损量。

二、常见的磨损类型

根据磨损产生的原因和磨损过程的本质,磨损主要可分为四种类型,即:粘着磨损、磨料磨损、疲劳磨损和腐蚀磨损。

1. 粘着磨损

当摩擦副接触时,由于表面不平,发生的是点接触。在相对滑动和一定载荷作用下,在接触点发生塑性变形或剪切,使其表面膜破裂,摩擦表面温度升高,严重时表层金属会软化或熔化,此时,接触点产生粘着。在摩擦滑动中,粘着点被剪断,同时出现新的粘着点,如果粘着点被剪断的位置不是原来的交界面,而是在金属表层,则会造成材料的消耗,即粘着磨损。

根据粘着程度不同,粘着磨损情况也有差异。若剪切发生在粘着结合面上,表面转移的材料极轻微,则称“轻微磨损”;若剪切发生在摩擦副一方或两方金属较深的地方,称为“撕脱”,在一些高负荷的摩擦副上就可以见到这种现象。有的摩擦副之间由于粘着严重,还会出现“咬死”而不能相对运动的情况。如果发生粘着的摩擦副是由软硬两种不同金属组成,则常会发生软金属被剪切、转移到硬金属表面的“涂抹”现象,有时也会发生软金属接近表层的地方,引起硬表面的划伤。

粘着磨损的磨损量与载荷大小、滑动的距离和材料的硬度等因素有关,磨损量通常与载荷大小和滑动的距离成正比,与材料的硬度成反比。

为了提高摩擦副的抗粘着磨损能力,通常可以使用不易相互粘附的金属做摩擦副材料,增加润滑油膜的厚度,以及在润滑油脂中加入油性和极压添加剂,提高润滑油的吸附能力和油膜的强度。

2. 磨料磨损

磨料磨损是硬的物质使较软的金属表面擦伤而引起的磨损。它包括两种类型，一是粗糙的硬表面把较软表面划伤的情况；二是硬的颗粒在两摩擦面间滑动引起的划伤。

对于第一种情况，摩擦表面的磨损主要与材料表面的粗糙程度和两表面硬度的差异相关。一般来讲，材料表面的光洁度愈高，所造成划伤的情况就愈轻微。两摩擦表面的硬度相差愈大，愈易产生硬的表面把软表面划伤的情况。

对于硬的颗粒在摩擦面间引起的划伤情况，这往往是混入到摩擦面间灰尘、泥沙、铁锈以及发动机中的焦末等造成的，在粘着磨损、腐蚀磨损中产生的颗粒也能引起磨料磨损。磨料磨损是造成摩擦面磨损的一个重要类别。据统计，因磨料磨损而造成的损失，占整个工业范围内磨损损失的 50%。因此，对机械摩擦副要特别注意保持摩擦面、润滑系统以及润滑油的清洁，防止混入杂质颗粒。

3. 疲劳磨损

粘着磨损和磨料磨损都是基于表面直接接触，相接触的表面出现材料的损耗。这样所造成的金属磨损颗粒尺寸非常小，并且是伴随着摩擦副一开始工作就出现。还有一种磨损，在摩擦副工作的初期阶段一般不会发生，而发生在摩擦副经过长时期工作以后的阶段，其磨损现象是较大的片状颗粒从材料上脱落，在摩擦表面上出现针状或豆瓣状的小凹坑。此磨损类型即疲劳磨损。

疲劳磨损通常出现在滚动形式的摩擦机件上，如滚动轴承、齿轮、凸轮以及钢轨与轮箍等。

出现疲劳磨损的主要原因是在滚动摩擦面上，两摩擦面接触的部位产生接触应力，表层发生弹性变形，而在内部产生较大的剪切应力所致(最大剪应力点是在距接触面下约 $0.786b$ 处， b 为接触区宽度的二分之一)。由于接触应力的反复作用，使得金属的晶格结构逐渐遭到破坏，当晶格结构被破坏到使材料承载强度低于载荷应力时，材料将会出现裂纹，并随着摩擦过程的进行，裂纹逐渐扩大，沿着最大剪应力的方向扩展到材料表面，最终使少量的材料从表面上脱落，在摩擦表面出现豆瓣状凹坑。

对于完善的、无缺陷的金属材料来说，在滚动接触的情况下，损坏的位置决定于出现最大剪应力的位置。如果还伴随着滑动，损坏的位置就移向表面。然而材料很少是完美无缺的，因此，发生损坏的位置就与材料中的杂质、孔隙、细小的裂纹以及其他因素有关。

工作一定时间后开始出现大的磨损碎片是疲劳磨损的特点，摩擦副一旦出现了疲劳磨损，就标志着使用寿命的终结。改善摩擦副的材质、减小接触点的接触应力和采用合适的润滑剂可以延缓疲劳磨损的出现。尤其是大粘度的润滑油不易从摩擦面挤掉，有助于接触区域压力的均匀分布，从而降低了最高接触应力值。例如某单位有两台同型号减速器，其中一台先投入生产，采用 30 号机械油润滑，运行两个月后出现疲劳磨损；另一台换用 28 号轧钢机油，由于提高了用油粘度，运行了一年半的时间未出现疲劳磨损。

4. 腐蚀磨损

当摩擦是在腐蚀性环境中进行时，摩擦表面会发生化学反应，并在表面上生成反应物。一般反应产物与表面粘结不牢，容易在摩擦过程中被擦掉，被擦掉反应层的金属可又产生新的反应层，如此循环下去，而造成金属摩擦副材料较快地被消耗掉，这就是腐蚀磨损。由此可见，材料的腐蚀磨损实质是腐蚀与摩擦两个过程共同作用的结果。

腐蚀磨损根据与材料发生作用的环境介质的不同,可分为氧化腐蚀磨损和特殊介质腐蚀磨损。

氧化腐蚀磨损是与氧作用而产生的。大气中含有氧,所以氧化腐蚀磨损是最常见的一种磨损形式,它的损坏特征是在金属的摩擦表面沿滑动方向呈匀细磨痕。磨损产物通常是呈红褐色小片状的 Fe_2O_3 和灰黑色丝状的 Fe_3O_4 。滑动轴承易出现这种氧化磨损现象。为了降低氧化磨损的速度,要求润滑油对轴承材料没有腐蚀作用,或者希望润滑油能与轴承材料作用生成一层比较牢固的保护膜,达到降低氧化磨损速度的目的。因此,润滑油里往往加有抗腐蚀添加剂。

特殊介质腐蚀磨损是摩擦过程中,零件受到酸、碱、盐介质的强烈腐蚀而造成的腐蚀磨损情况。其磨损机理与氧化磨损相似,但磨损速度较快。对这样条件下的工作机件,除要求密封性好,减少与酸、碱的接触外,还要使用能够抗酸、碱的润滑油脂,以延长摩擦机件的工作寿命。

摩擦副的磨损除以上讨论的几种主要情况外,还有一些其他类型,如微动磨损、冲蚀磨损、气蚀磨损和热磨损等。微动磨损是两接触表面相对低幅振荡而引起的磨损现象,其多发生在机械连接处的零件上。冲蚀磨损是指流体束冲击固体表面而造成的磨损,它包括颗粒束冲蚀、流体冲蚀、气蚀和电火花冲蚀(如电机上的电刷的冲蚀等)。热磨损是指在滑动摩擦中,由于摩擦区温度升高使金属组织软化,而使表面“涂沫”、转移和摩擦表面微粒的脱落。

三、磨损的影响因素

1. 润滑对磨损的影响

润滑对减少零件的磨损有着重要的作用。比如液体润滑状态能防止粘着磨损;供给摩擦副洁净的润滑油可以防止磨料磨损;正确选择润滑材料能够减低腐蚀磨损和疲劳磨损等。对机件进行良好的润滑,在摩擦副中保持足够的润滑剂,可以减少摩擦副金属与金属的直接摩擦,降低功率消耗,延长零件使用寿命,保证设备正常运转。

润滑是人们与摩擦、磨损作斗争的一个有力措施。特别是已经投产的设备,它们的结构、零件的材质已确定,这时不断改善润滑条件,加强润滑技术管理,对降低零部件的磨损起着更为突出的作用。

2. 材料性能对磨损的影响

材料的耐磨性主要决定于材料的硬度和韧性。材料的硬度决定金属对其表面变形的抵抗能力。过高的硬度易使材料表面产生磨料状的剥落并增加脆性,而韧性则可防止磨粒的产生,提高其耐磨性能。

在组合机件中,如轴承的转轴,由于它是需要加工的主要机件,所以应采用耐磨材料(如优质合金钢)来制造;对较简单的机件,如轴承衬或轴瓦,则选用巴氏合金、铜基合金、铅基或铝基合金等软质材料(又称减磨合金)来制造,以达到减摩和耐磨的目的。

3. 表面加工质量对磨损的影响

机件的表面加工质量主要指表面粗糙度,也就是表面微观几何形状。

一般来讲,机件表面的磨损随粗糙度的减小而减小。以滚动轴承为例,轮廓算术平均偏差 $R_a = 0.32\mu\text{m}$ 的轴承比 $R_a = 0.63\mu\text{m}$ 的轴承的寿命高 2~3 倍, $R_a = 0.16\mu\text{m}$ 的轴承比 $R_a = 0.32\mu\text{m}$ 的寿命高 1 倍, $R_a = 0.08\mu\text{m}$ 的轴承比 $R_a = 0.16\mu\text{m}$ 的轴承寿命高 0.4 倍, $R_a =$

0.08 μm 以下的,对轴承寿命影响不大。零件表面硬度越高,要求粗糙度数值也越小,否则会降低寿命。

机件表面粗糙度对提高金属抵抗腐蚀磨损的能力也有重要的影响。表面愈粗糙,凹陷愈深,其腐蚀作用愈强,表面磨损愈大。同时,随着表面粗糙度的降低,机件的抗疲劳强度也相应提高,也起到减轻磨损的作用。

4. 机件的工作条件对磨损的影响

除了润滑状况、材料和表面粗糙度因素的影响之外,机件所处的外部工作条件对磨损也有一定的影响。机件的工作条件包括机械的负荷、运转的速度、温度的高低以及外部环境等,在不同工作条件下出现磨损的程度是不同的。

通常,在较高的负荷和带有冲击性的负荷时,机件会出现较严重的磨损。对于高速运转和频繁起动的机械,其磨损要高于相对较低转速和平稳运转机械的磨损。机械在高温下发生的磨损远高于常温 and 低温时的磨损,其原因是高温时金属的硬度会大幅度下降,同时油品润滑作用也会减弱。此外,机件工作环境中存在有高温辐射、水汽、灰尘及其他化学腐蚀介质时,也会因氧化和腐蚀作用而导致和加速机件的磨损。

第三节 润 滑

润滑是人们用来减少摩擦与磨损的重要措施和手段。一般来说,它是利用润滑剂在摩擦表面形成一层具有低摩擦阻力的润滑膜层,来减小摩擦件的摩擦和磨损。

根据润滑油在摩擦表面上所形成润滑膜层的状态和性质,润滑分为流体润滑和边界润滑两大类型。其中流体润滑中根据形成的方式不同又分为流体动压润滑、流体静压润滑和弹性流体动压润滑;而边界润滑中又分为吸附膜边界润滑和反应膜边界润滑。

一、流体润滑(液体润滑)

流体润滑又称液体润滑。它是在摩擦副的摩擦面被一层具有一定厚度,并可以流动的流体层隔开时的润滑。此时摩擦面间的流体层,称为流体润滑的润滑膜层。

流体润滑膜层具有三个特点:一是具有流动性,可以流动,因此摩擦阻力小,但容易流失;二是具有一定的流体压力,起到平衡外载负荷的作用;三是流体层需达到一定的厚度,保证摩擦面间的微凸体相互之间不发生接触。

流体润滑的摩擦因数很小,约在 0.001~0.01 之间,磨损也非常低,是润滑中一种最为理想的状态。其不足是流动液体层的形成较困难,需特定的条件,同时所形成的流体层易于流失,承受负荷的能力有限。

流体润滑根据流体润滑膜产生方式,分为流体静压润滑、流体动压润滑及弹性流体动压润滑三种类型。

1. 流体静压润滑

通过外部油泵提供的压力实现流体润滑的方式称之为流体静压润滑。润滑中,油品在高压油泵的作用下通过油路输送到轴承底部的油腔中,利用油的压力和流动的冲力将支承的轴顶起,以此形成轴与轴套之间的流体油层。由于这种润滑油层的形成与轴承的运转状况无关,无论轴承的转速是高或低,即使在静止状态时也可以保证摩擦面上有着足