

润滑材料

傅匡秀 编

17.2

西南交通大学出版社

内 容 提 要

本书介绍的是润滑材料的性质和应用。全书分为八章,依次介绍摩擦、磨损和润滑的基本概念;各种润滑材料的化学组成和制造及其性质、各种理化指标、通用的理化检验手段和专用的模拟台架试验;添加剂对润滑油、脂的质量提高及其作用机理;各种润滑油、润滑脂、合成润滑油脂、固体润滑材料的分类、性能、优缺点、品种、牌号均有全面介绍。

本书内容翔实,深入浅出,阐述透彻、简练。

本书可供大专院校机械类专业“润滑材料”课教材,也是高、中级工程技术人员、管理干部、化验员的参考书。

润 滑 材 料

RUNHUA CAILIAO

傅匡秀 编

*

西南交通大学出版社出版

(四川 峨眉)

西南交通大学出版社印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 12.75

1987年9月第一版 1987年9月第一次印刷

字数: 323千字 印数: 1~4920册

ISBN 7—81022—009—8/TB 002

统一书号: 15478·28 定价: 2.20元

前 言

摩擦磨损润滑学是一门新兴的边缘学科。润滑工程是摩擦磨损润滑学的重要内容之一。要降低摩擦、减少磨损就需要发展润滑工程。润滑材料是实现润滑的物质手段,对每一个机械科技工作者来说,不论他是从事设计还是应用,不论他是从事哪一种机械门类或专业,摩擦磨损润滑学是必须具备的基础知识,润滑材料是不可缺少的重要知识。

本书专门介绍各种润滑材料。从油的化学组成、炼制,到各种理化指标和性质,按用途分类介绍润滑油的品种、质量与应用性能要求。除阐述一般理化检验外,还着重介绍一些重要的模拟和台架试验。添加剂对润滑油使用性能的提高有重要的意义,本书除对油料应用的基本理论和添加剂的作用机理作了较深入的阐述外,并对润滑油采用的各种添加剂作了比较详细的介绍。润滑脂是第二位的润滑材料。本书从脂的结构、组成、制造到品种与性质,以及各种理化指标及其在使用上的意义,应用性能的检验等都分别作了介绍。合成润滑油脂性能高、寿命长,在宇航、航空、核装置等尖端机械中独占鳌头。本书对几类重要的合成油和国产合成脂的制造、特性作了对比和评价。固体润滑材料是新型的有发展前途的润滑材料,对它的分类、使用方法和常见的一些品种都作了介绍和比较。本书分析了润滑油、润滑脂、合成润滑油脂以及固体润滑材料的优缺点,使用条件和选用根据。

本书除做高校机械类各专业“润滑材料”课教材外,还可供机械科技工作者、油料应用、管理和化验人员作参考书和工具书。

本教材全稿经铁道科学研究所金属化学研究所油润室王秉辉研究员审阅,特此表示衷心的感谢!水平所限,不当之处难免,希读者指正。

编 者

一九八七年五月

目 录

第一章 摩擦、磨损与润滑

第一节 摩擦	1
一、概 述	1
二、摩擦的类型	1
三、库仑摩擦定律	2
四、摩擦理论与影响摩擦系数的因素	3
第二节 磨 损	4
一、常见磨损的类型	4
二、减少磨损的途径	6
第三节 润 滑	7
一、润滑的分类	7
二、润滑的流体动力学理论	11

第二章 石油与润滑油的炼制

第一节 石油概述	12
第二节 石油的化学组成	13
一、烃 类	13
二、非烃类	17
第三节 原油分类与我国原油的基本性质	21
一、原油分类	21
二、我国原油的基本性质	23
第四节 润滑油的炼制	25
一、石油分馏	25
二、润滑油的精制	26

第三章 润滑油的物理化学性质

第一节 粘 度	31
一、润滑油粘度的定义、种类及单位换算	31
二、润滑油粘度与温度的关系	35

三、润滑油与压力的关系·····	36
四、油化学组成与粘度、粘温、粘压性质的关系·····	37
第二节 低温流动性·····	38
一、凝固点的定义和实用意义·····	38
二、低温失去流动性的原因·····	38
三、影响油凝固点的因素·····	38
第三节 润滑性·····	39
一、润滑性基本概念·····	39
二、评定润滑性方法简介·····	39
第四节 抗氧化安定性·····	42
一、氧化性质及影响因素·····	42
二、测定方法·····	43
第五节 热氧化安定性·····	43
第六节 腐蚀性·····	44
一、润滑油具有腐蚀性的原因·····	45
二、表示腐蚀性的指标及测定方法·····	45
三、腐蚀性在润滑油使用中的意义·····	46
第七节 清净分散性·····	47
一、基本概念·····	47
二、测定方法·····	47
第八节 抗乳化性·····	47
一、测定方法·····	47
二、影响油品抗乳化性的因素·····	48
三、抗乳化性的实用意义·····	48
第九节 抗泡性·····	48
一、泡沫的产生和危害·····	48
二、测定方法·····	48
三、影响抗泡性的因素·····	49
第十节 挥发性·····	49
一、闪点、燃点的定义·····	49

二、测定方法	49
三、闪燃点在使用中的意义	50
第十一节 其他理化指标	50
一、残炭值	50
二、机械杂质	51
三、灰分	51
四、密度与比重	52

第四章 润滑油的添加剂

第一节 清净分散剂	53
一、清净分散剂的作用效果	55
二、清净分散剂的作用机理	55
三、清净分散剂的种类与性能	56
第二节 抗氧抗腐剂和抗氧防胶剂	59
一、作用机理	59
二、抗氧防胶剂的种类和性能	61
三、抗氧抗腐剂的种类和性质	62
第三节 增粘剂	64
一、质量要求	64
二、作用机理	65
三、种类和性能	65
第四节 油性剂和极压抗磨剂	66
一、油性剂的作用机理	66
二、油性剂的种类与性质	66
三、极压抗磨剂的作用机理	67
四、极压抗磨剂的种类和性能	69
第五节 降凝剂	70
一、作用机理	71
二、种类与性能	71
第六节 防锈剂	72
一、作用机理	72

二、种类与性质	73
第七节 抗泡剂	75
一、作用机理	75
二、品种介绍	76

第五章 润滑油的品种介绍

第一节 润滑油的分类	77
一、内燃机用润滑油	77
二、工业用润滑油	77
三、特种润滑油	77
四、特殊用途的非润滑油	77
第二节 内燃机用润滑油	77
一、在内燃机中的工作条件	78
二、在内燃机中的作用	78
三、内燃机用油的质量要求	79
四、内燃机用润滑油使用性能评定	80
五、内燃机用油分类和品种	85
第三节 齿轮油	92
一、齿轮润滑的特殊性和齿轮油的工作条件	92
二、齿轮油在齿轮传动中的作用	93
三、齿轮油的主要性能	93
四、齿轮油性能的评定方法	94
五、齿轮油的种类和质量	96
第四节 汽缸油	103
一、工作条件	103
二、工作条件和质量要求	103
三、汽缸油的品种	103
四、乳化汽缸油的介绍	104
第五节 机械油	105
一、通用机械油	105
二、专用机械油	107

第六节 液压油	110
一、对液压油的基本要求	110
二、使用性能评定方法	112
三、液压油的品种与规格	113
第七节 液力传动油	117
一、质量要求	117
二、品种与牌号	117
第八节 汽轮机油	118
一、工作条件	118
二、质量要求	119
三、品种与牌号	119
第九节 压缩机油	120
一、往复式压缩机油	121
二、回转式压缩机油	122
三、压缩机油使用性能的评定方法	123
第十节 冷冻机油	124
一、工作条件与性能要求	124
二、规格牌号	126
第十一节 车轴油	126
一、工作环境	126
二、性能要求	127
三、规格与牌号	127

第六章 润 滑 脂

第一节 润滑脂的一般介绍	129
一、润滑脂的主要作用	129
二、和润滑油相比润滑脂的优缺点	129
第二节 润滑脂的结构与组成	130
一、基础油	130
二、稠化剂	130

三、稳定剂	131
四、添加剂	131
第三节 润滑脂的种类与制造原理	132
一、润滑脂的种类	132
二、皂基润滑脂的制造原理	133
第四节 润滑脂的评价	134
一、稠 度	134
二、滴 点	135
三、胶体安定性	135
四、触变安定性和机械安定性	136
五、高温轴承寿命试验	137
六、强度极限	137
七、转矩特性	138
八、抗水淋性	138
九、防护性	138
十、腐蚀性	138
十一、油膜保持能力	138
十二、漏失量	139
十三、极压抗磨性	139
十四、抗磨耗性	139
十五、抗氧化安定性	139
第五节 一些润滑脂的性能介绍	140
一、钙基润滑脂	140
二、钠基润滑脂	141
三、钙钠基润滑脂	142
四、复合钙基润滑脂	142
五、锂基润滑脂	143
六、铝基润滑脂	144
七、复合铝基润滑脂	145
八、钡基润滑脂	145
九、膨润土基润滑脂	146
十、烃基润滑脂	147
十一、酰胺钠润滑脂	147

第七章 合成润滑油脂

第一节 合成润滑油	149
一、烃类合成油	149
二、非烃类合成油	152
第二节 合成润滑脂	165
一、高低温润滑脂	165
二、通用航空润滑脂	165
三、光学仪器脂	167
四、密封脂	168
五、低温润滑脂	169
六、其他脂	170

第八章 固体润滑剂

第一节 概 述	171
第二节 固体润滑剂的种类	172
第三节 常用的几种固体润滑剂	173
一、石墨	173
二、二硫化钼	174
三、氟化石墨	175
四、聚四氟乙烯	176
五、尼龙	176
六、聚酰亚胺	177
七、聚对羟基苯甲酸	178
八、氮化硼	178
第四节 固体润滑剂的使用方法	178
附录: 国内外标准代号含义 附表 1	180
国际单位制基本单位 附表 2	180
国际单位制导出单位 附表 3	181
国际单位与其他单位换算 附表 4	181
国际制词冠 附表 5	182
各种粘度的换算 附表 6	183
润滑油粘度国际分级 附表 7 (插表)	
粘度指数计算基数表 附表 8	185

第一章 摩擦、磨损与润滑

第一节 摩擦

一、概述

互相接触的物体作相对运动时,在接触面间就会产生阻碍物体运动的现象称摩擦。这时的切向运动阻力称摩擦力。在大多数情况下,摩擦的存在对机械是有害的。因为机械运动要克服摩擦力须消耗能量,致使机械能量消耗增大,机械效率降低。摩擦消耗的那部分能量转化成热能散发出来,使机械温度升高,机械强度降低,甚至可产生热变形、热疲劳和热磨损,影响机械的工作精度和正常运转。同时摩擦还会导致磨损,使机械间隙变大,出现振动与噪音,影响机械正常运转,缩短使用寿命。所以通常要采取相应的措施,对摩擦最大限度地加以控制,如在摩擦面加入润滑剂,使其摩擦力达到最小,这样动力消耗最少,减少磨损,延长机器使用寿命,这就是润滑。因此摩擦是自然界存在的物理现象,摩擦力是摩擦副(即两相对运动的接触表面)的一种力学特性。磨损是摩擦产生的结果,是摩擦表面物质转移的一种形式。润滑则是降低摩擦,减少磨损的一种措施。在有些情况下,我们还必须依赖和利用摩擦和摩擦力。古代燧人氏利用摩擦生热,钻木取火;乐器师利用弦线的摩擦与振动使提琴与胡琴发出音响;没有摩擦螺母和螺栓就不可能扣紧;没有摩擦人和一切车辆都不可能行走。有些机械和部件是利用摩擦而工作的。例如:摩擦压力机、摩擦离合器、带式传动机、摩擦轮等;机车车辆的刹车制动就是利用闸瓦材料和车轮之间的摩擦而实现的。这些都是摩擦对人类有益的方面。总之摩擦存在于人们的生产、生活各个方面,在人类的文明建设中它有着十分重要的作用。人类研究摩擦除了利用摩擦外,最重要的还是研究避免摩擦,减少磨损,最大限度地发挥机械效能。据估计世界能源的 $1/3 \sim 1/2$ 最终以摩擦的形式消耗掉,一般机器中因磨损而报废的零件占全部报废零件的一半以上,所以改进润滑工作,降低机械的摩擦损失,对节约能源将是巨大的。控制磨损,对提高机械运转的可靠性和安全性,降低其维修费用和工作量,延长其使用寿命是可观的。

六十年代后期发展了一门新兴的边缘学科——摩擦学(英文称 Tribology)或摩润学又称摩擦磨损润滑学。它是专门研究摩擦、磨损、润滑三方面的有关理论和应用技术的一门学科。国际摩擦磨损润滑学会是1973年在英国伦敦成立的,主席乔斯特(也是英国摩擦磨损润滑学会的主席)。我国1979年成立了中国机械工程学会摩擦磨损润滑分会。目前这门学科发展比较快,它将在祖国物质文明建设中发挥应有的作用。

二、摩擦的类型

摩擦分类的方法很多,下面介绍常见的几种。

1. 按摩擦副运动形式分类

(1) 滑动摩擦 两个相互接触的表面作相对滑动时, 所产生的摩擦。例如: 活塞在气缸中往复运动; 机床工作台在导轨面上的往复运动; 曲轴在曲轴套中作旋转运动等。

(2) 滚动摩擦 物体在力矩的作用下沿接触表面滚动时的摩擦。滚动摩擦其接触处常表现为点与点(如滚珠轴承)或线与线(如滚柱轴承)的摩擦。实验证明使两物体发生滚动比它们发生滑动时所消耗的力小, 是其 $1/15 \sim 1/20$ 。现代的机器为了减少摩擦损失都尽量采用滚珠和滚柱轴承, 以便将滚动代替滑动。各种车辆的车轮在地面滚动所产生的摩擦即为滚动摩擦。

2. 按摩擦副运动状态分类

(1) 静摩擦 阻止物体从静止状态转入到运动状态的摩擦力。也就是当物体在外力作用下, 具有相对运动的趋势并处于静止临界状态时的摩擦。

(2) 动摩擦 摩擦副相对运动时的摩擦。一般情况下动摩擦系数小于静摩擦系数。

3. 按摩擦发生的位置分类

(1) 外摩擦 摩擦发生在相对运动物体的接触面上。例如: 自润材料制成的零件间的摩擦或未加润滑剂摩擦副间的摩擦都是。通常凡是没有人为加入润滑剂发生在两物体表面间的摩擦称干摩擦。干摩擦始终是消耗动力最大的一种形式(摩擦系数高达 $0.15 \sim 0.4$ 或更高), 摩擦放出的热量也最多, 造成磨损也最严重, 因此在设备运转中应竭力避免干摩擦的出现。外摩擦摩擦力的大小与摩擦副表面状态有关。

(2) 内摩擦 摩擦发生在物质内部的分子间。各种流体分子间的摩擦、摩擦系数最小(小于 10^{-2})。如润滑油、气态润滑剂流动时, 即产生内摩擦。有些固体润滑剂也可发生内摩擦。例如: 石墨、氟化石墨、二硫化钼等。由于它们结构上的特殊性, 可通过其分子间的摩擦而起润滑作用。内摩擦力的大小与摩擦副表面状态无关, 而与分子运动阻力有关。如为润滑油则与油的粘度有关。最理想的状态是流体的内摩擦。

(3) 混合摩擦 在摩擦副中既有外摩擦又有内摩擦。机器在实际使用的过程中, 纯粹的外摩擦或纯粹的内摩擦均较少, 大多数情况下是混合摩擦的形式。混合摩擦又可分为下列数种。

① 边界摩擦 是干摩擦和流体摩擦的中间过渡状态。两物体摩擦面间仅被极薄的边界膜(小于 0.1 微米)隔开, 则其间的干摩擦转变为两边界膜间的摩擦。其摩擦阻力比干摩擦小得多, 但比流体摩擦大。边界膜可以是物理吸附膜或化学反应膜, 其摩擦阻力的大小与润滑油的粘度无关而与其组分对金属表面的吸着性或化学反应性有关。

② 半干摩擦 在摩擦表面同时存在干摩擦和边界摩擦的情况。是润滑油膜部分被破坏, 出现不连续油膜状态的摩擦。这种情况通常造成磨损严重。

③ 半液体摩擦 在摩擦表面同时存在边界摩擦和流体摩擦情况, 是比较理想的状态。

④ 极压摩擦 在极压条件下的边界摩擦。由于极压条件处于高温, 润滑油中极压添加剂与金属表面形成化学反应膜, 实现两化学反应膜间的摩擦。它是边界摩擦的一种形式。

三、库仑摩擦定律

十五世纪意大利人达·芬奇提出两物体的摩擦力与物体所受的外力成正比而与两者接触面积无关。到 1699 年法国科学家阿蒙顿用实验证明了达·芬奇的科学见解, 并建立阿蒙顿

定律：(1) 摩擦与两物体的接触面无关。(2) 摩擦阻力与垂直负荷成正比。即

$$F = fW$$

式中， F 为摩擦阻力， W 为负荷， f 为摩擦系数。

到 1785 年法国物理学家库仑又进行了仔细的试验，对阿蒙顿的工作进行了补充和完善，人们称之为库仑定律（或阿蒙顿—库仑定律）其内容如下：

1. 摩擦力与法向负荷成正比；
2. 摩擦力与接触表面积无关；
3. 摩擦力与滑动速度大小无关。

该定律经历了许多年直到近代没有重大修改，但随着科学技术的不断发展，发现有些客观现象与摩擦定律有矛盾。例如：对光滑表面，摩擦力将随表面光洁度的提高而加大。对于很洁净、很光滑的表面，由于接触表面间存在强烈的分子吸引力，故摩擦力将与接触面积成正比。同时当滑动速度较大时，摩擦力会降低，说明摩擦力与滑动速度大小有关。对于一些极硬（如钻石）或较软（如聚四氟乙烯）的材料，摩擦力与正压力之间表现出非线性关系，此摩擦力为

$$F = CW^P$$

式中， W 为负荷， C 为常数， $2/3 \leq P \leq 1$ 。

实际上摩擦副相对运动时，克服摩擦力所消耗的能量包括多方面：表面在垂直方向上的微小位移，表面的接触变形，接触表面间的分子吸引力和表面磨损等，所以库仑定律只能近似地反映摩擦现象和规律，在实际应用中它存在一定的局限性。

四、摩擦理论与影响摩擦系数的因素

关于阐明摩擦产生原因的理论较多，有机械啮合理论（克服摩擦面的凹凸不平，峰谷交错，互相啮合的阻力）、分子吸引理论（克服摩擦副接触点的分子引力）、静电力理论（摩擦副接触面间存在静电效应产生阻力）、粘着理论等。由于摩擦现象比较复杂，上述各理论都只从一个方面阐述问题，都不能概括全部，对于宏观范围的金属摩擦现象，粘着理论更为合理。

粘着理论认为：物体表面凹凸不平，当互相接触时，仅在凸峰点的顶端互相接触，所以真实接触面积比表观接触面积小得多，因此接触点的压应力很高，足以引起接触处材料塑性变形，从而导致真实接触面积增大到恰好能支持载荷为止。在上述情况下接触点牢固粘接在一起称“冷焊”，摩擦件相对运动时必须有足够的切向力将粘结点剪断称“滑溜”，摩擦过程就是“冷焊”和“滑溜”的交替过程。另外较硬的金属表面的凸峰会陷入较软的金属表面，当两表面相对运动时，硬金属的凸峰会在软金属表面上犁出沟来。剪断粘结点和克服犁沟阻力所需的切向力就是用来克服摩擦阻力的。粘结力的存在已为实验所证实。经过修正目前比较实用的是粘着理论。

实践证明：摩擦力并不象库仑定律那样简单地只和载荷成正比，它和下列一些因素有关系。

1. 材料性质

相同金属或互溶性较大的金属摩擦副易发生粘着现象，使摩擦系数增大。不同金属由于互溶性差，不易发生粘着，摩擦系数一般比较低。

2. 表面膜的存在

机件在空气中金属表面总有一层氧化膜，可使摩擦系数降低。

3. 速度和温度影响。

摩擦系数随摩擦速度的增大而减少，也随摩擦温度的上升而下降。这对铁路列车的制动是一个应当考虑的问题。例如在下坡运行时，既不能无限制地令其增加速度，也不宜一次制动时间过长，否则摩擦面温度继续上升，摩擦系数继续降低，很可能造成制动失效事故。

4. 载荷的影响

对大多数物质来说，载荷过小或过大，摩擦系数均有变大的趋势。前者认为是静电效应的结果，后者认为是由于塑性变形使粘结面积增大所致。

5. 振动影响

振动可以使摩擦系数降低。

6. 光洁度的影响

对弹性接触的干摩擦，表面光洁度愈高，分子吸引力也愈大，摩擦系数也愈大。在塑性接触的情况下，由于光洁度对真实接触面积的影响不大，故对摩擦系数影响也小。

第二节 磨 损

两个互相接触的物体做相对运动时，其表面物质不断损失的现象称磨损。由于磨损使接触表面不断有微粒脱落，表面性质和几何尺寸发生改变，零件丧失精度，使机械效率降低，零件报废。据统计由磨损造成零件报废占全报废零件的一半以上，所以控制磨损是重要的课题。

一、常见磨损的类型

磨损的分类方法很多，按磨损的破坏机理可分下列五类。

1. 粘着磨损 (adhesive wear)

摩擦表面总存在一定的粗糙度，用显微镜观察就会发现它们是凹凸不平的。因此两物体真正的接触部分仅是一些凸出点，当两物体作相对滑动时，凸出点相互剪切产生瞬时高温，使金属表面的保护膜破裂，产生局部烧结（即接触点牢固粘结在一起），进一步滑动时切断粘结点。如果切断的位置恰好是原来的分界面就不会出现磨损。如果不是原来的分界面那么一些金属就从这一表面转移至另一表面，当进一步受到摩擦时，转移的金属就掉下来，这种现象称粘着磨损。按破坏程度粘着磨损可分五类：

(1) 轻微磨损 即轻度的粘着磨损。表面转移的材料极轻微，这是正常运转的机械零件所产生的磨损形式。例如：汽缸套与活塞环之间，曲轴与轴瓦之间，在正常运转时产生的磨损。

(2) 涂敷（又称金属转移） 剪断发生在离粘结分界面不远的软金属浅层内，软金属涂在硬金属表面，这是由于摩擦副材料选择不当，加工光洁度不合要求或润滑不良等原因造成。这种现象实际生产中比较普遍。例如：初轧机的压下螺母与纵杆，由于润滑不良常使螺

磨的铜丝抹在丝杠表面。

(3) 擦伤 剪断发生在软金属亚表层内，摩擦面出现划痕，有时硬金属亚表面也有划痕，这是由于润滑不良造成。例如：齿轮啮合面常因润滑不良出现擦伤现象。

(4) 撕脱 剪切发生在摩擦副的一方或两方金属较深处，撕开时常伴随冒烟现象。例如：滚珠轴承中钢球与滚道的粘结现象即属此类磨损。

(5) 咬死 摩擦副内产生极高温，造成粘结咬死不能动。例如：滑动轴承的烧瓦抱轴事故即是。

2. 磨粒磨损 (abrasive wear)

又称磨料磨损或擦伤磨损。硬质粒子进入摩擦副，在接触面间产生磨削作用，使金属表面被剪切剥落而损伤。它是一种最常见的磨损形式，约占总磨损的 50%，所以要特别注意润滑系统的清洁。对于铁路机车、车辆、工程机械以及农业机械中许多部件的磨损是磨粒磨损的型式。

3. 疲劳磨损 (fatigue wear)

两接触表面作滚动或滑动复合摩擦时，当负荷极大，尤其是交变接触压应力作用下，使材料产生重复变形，导致材料表面疲劳而产生脱落损失的现象。齿轮副、滚动轴承、钢轨、轮箍及凸轮副等均可产生此种磨损。通常疲劳磨损可分扩展性和非扩展性两类，前者往往由小麻点发展成痘状凹坑，进而使摩擦副失效而后者可继续正常的工作。疲劳磨损和一般材料的疲劳破坏的区别在于它存在摩擦磨损作用，表面发生塑性变形和发热现象并受润滑油的作用（低粘度油渗入裂纹，加速裂纹扩展）。

4. 腐蚀磨损 (Corrosive wear)

在摩擦过程中，金属与周围介质发生化学或电化学反应而产生物质损失现象称腐蚀磨损。一般有下列几种：

(1) 氧化磨损 金属零件的表面与空气中氧起作用生成氧化膜，在摩擦过程中这层氧化膜逐渐被磨掉，然后再生成，如此反复循环造成磨损。润滑油脂除了起减磨作用外，还起隔绝摩擦表面与空气中的氧直接接触，减缓氧化膜生成的作用。但油、脂与氧反应生成酸性氧化物对摩擦面有腐蚀作用。润滑油中加抗氧剂可以达到降低氧化磨损的目的。

(2) 特殊介质磨损 在摩擦过程中，零件受到酸、碱、盐、二氧化硫、硫化氢等腐蚀性介质的腐蚀，形成小块削落现象。例如：滑动轴承材料中含有镉、铝等元素，容易被润滑油中酸性物质腐蚀，在轴瓦表面生成黑点，逐渐扩展成海绵状空洞，在摩擦过程中形成小块剥落，即是特殊介质磨损。酸泵、碱泵的轴承损坏都比较快就是由于特殊介质磨损的原故。

(3) 气蚀 发生在与液体接触的零件表面，当液压发生突变时，液体中溶解的气体，由于气泡出现或溃灭，瞬时产生极大的冲击波，使零件表面生成麻点，如此反复作用使材料疲劳而逐渐脱落，随后发展成海绵状穴蚀。气蚀是一种比较复杂的破坏现象，它不单纯是机械作用所造成的破坏，而且液体的化学和电化学反应，以及液体中的磨料等都会影响气蚀磨损。气蚀磨损多发生在船用螺旋桨，水轮机转轮，柴油机缸套，滑动轴承和液压元件上。

(4) 微动腐蚀磨损 兼有微动磨损（见后面第 5 点）和磨蚀磨损，是微动磨损中以化学腐蚀为主的一种磨损形式。在铁路车轮和车轴接触处往往发生这种磨损，它的过程是：接触压力使结合面的微凸点发生塑性变形，产生粘着，而微幅振动使粘结点剪切脱落，露出基体

表面。脱落的粒子和新表面均与大气中氧反应，生成金属氧化物在接合面上起磨粒磨损作用。

5. 微动磨损 (fretting)

摩擦副存在微幅振动（振幅在 $10^{-7} \sim 10^{-3}$ 毫米）时，造成的磨损。在负荷作用下，摩擦表面的凸峰产生粘结，在微幅振动中剪断，如此反复造成磨损。由于微动磨损集中在局部地区，又因两摩擦表面不脱离接触，磨损产物不易排出，故又兼有氧化磨损、磨料磨损和粘着磨损的作用，所以微动磨损是典型的复合式磨损。加大压力使摩擦面不发生相对振动或保持足够的油膜，以保证两表面不相接触均可防止微动磨损。

上述几种不同破坏机理可以看到磨损是一种综合的破坏现象，通常较为复杂，任何一种磨损方式都不是孤立进行的。

二、减少磨损的途径

研究磨损的规律是为了防止或减少磨损，延长零件使用寿命。完全消灭磨损是做不到的，但使磨损降低至合理的范围是可以实现的。减少磨损的途径一般有以下两个方面：

1. 机械方面

(1) 材料的选择 正确选择摩擦副的金属材料可以减轻磨损。一般来说软质金属不如硬质金属耐磨。为提高零件耐磨性可采用氮化、磷化、氰化、等离子喷镀、滚压加工等表面处理方法。对边界润滑应选用互溶性差的金属做摩擦副，选择轴承材料时应避免采用同样的金属（防止采用互溶性为100%的金属）以减少粘着磨损。对轴承副中的转轴应采用耐磨材料（如优质合金钢），而轴承衬或轴瓦则可选用软质材料，如巴氏合金、铜基合金、铅基或铝基合金等。这些又称减磨材料。上述这些均可达到减磨与耐磨的目的。

(2) 表面加工质量 经过机械加工的零件表面总是有粗糙度的。当两摩擦面作相对运动时，由于接触面凹凸不平，即产生机械阻力，而造成摩擦与磨损。通常随表面粗糙度的降低而阻力减小，但当达到一定程度以后，随着光洁度的提高，摩擦磨损也提高，这是因为光滑表面实际接触面积大于粗糙表面，同时接触面间分子吸附作用加大的原故。在采用润滑油润滑时，光滑表面易于形成流体润滑膜，可使摩擦磨损大大降低。而粗糙的表面不易达到流体润滑，是边界摩擦和混合摩擦。此外机件表面粗糙度对金属腐蚀磨损也有影响，通常表面愈粗糙腐蚀磨损愈大。对铁路车辆轴颈来说，表面光洁度愈大愈好。

(3) 工作条件 有下列几个方面的因素对磨损有影响。

① 受力的性质 载荷的种类、大小和方向对磨损均有影响。例如：是短时的还是连续的？是平稳的还是冲击的？是局部集中的还是均匀分布的？是固定载荷还是变载荷？受力的性质不同造成磨损也不相同。

② 速度的特征 机件运行速度的大小、方向和性质对磨损均有影响。例如：是匀速还是变速？是正转还是反转？是连续的还是时开时停的？它们造成磨损都不相同，通常速度愈高，开停愈频繁，磨损愈快。

③ 温度情况 工件工作时是处于高温还是低温？是恒温还是变温？对磨损影响也不相同。

④ 周围环境 是否有水汽、煤汽、灰尘、铁粉或其他腐蚀性介质存在，这些都会增加氧化磨损和腐蚀磨损。

⑤ 其他 如摩擦类型不同磨损也不相同,滚动摩擦的磨损远远小于滑动摩擦的磨损,通常其磨损量为滑动摩擦磨损量的 $1/10 \sim 1/100$ 或更小。又如摩擦副的结构设计是否符合摩擦学原理也影响其磨损大小。总之导致磨损的因素很多,但对固定机械设备选用适宜的工作条件,无疑是可以达到减少磨损的效果。

2. 润滑方面

润滑是降低摩擦和减少磨损的重要手段,它对机械设备的运转起着重要的作用,可防止粘着磨损,磨粒磨损,降低腐蚀磨损和疲劳磨损。至今改善润滑条件,加强润滑管理仍然是降低磨损的重要途径(详见下节)。

第三节 润 滑

为了控制摩擦与磨损,在摩擦副间加入某种物质使其摩擦阻力降低,这种措施称“润滑”,这些被加入用以减摩的物质称润滑剂(或润滑材料)。

一、润滑的分类

1. 根据润滑剂的物质形态分类

(1) 气体润滑 使用气态润滑剂将摩擦表面分开。例如:空气、蒸气、氮气、氦气以及一些惰性气体等。它的最大特点是摩擦系数小(几乎接近于零),气体粘度不受温度的影响,所以气体润滑的轴承阻力小,精度高。

(2) 液体润滑 使用液态润滑剂将摩擦表面分开。例如:各种润滑油(可以是矿物润滑油也可以是合成润滑油)和各种润滑液(可以是乳化油也可以是特种液体,甚至是水)。当条件理想时,可实现液体摩擦代替干摩擦,使摩擦系数大大降低。(液体摩擦系数在 $0.001 \sim 0.01$ 左右,是干摩擦系数的 $10 \sim 1\%$)。

(3) 胶体润滑 使用胶态润滑剂将两摩擦表面分开。例如:各种皂基润滑脂、无机润滑脂、有机润滑脂、合成脂等,都是介于流体和固体之间的膏状物质。是稠化剂(固体)与液态润滑剂构成的分散体系,既易变形又不易流失,在一些不能使用流体润滑的摩擦面上实现胶体润滑往往可以收到理想的效果。它粘滞性较大,故内摩擦比油大。

(4) 固体润滑 使用固态润滑剂将两摩擦表面分开。例如:石墨、二硫化钼、二硫化钨、氟化石墨、聚四氟乙烯等。它们在摩擦面间可以形成良好的固体润滑膜,使摩擦系数降低。

2. 根据润滑剂在摩擦面间的状态分类

(1) 流体润滑 流体润滑剂把摩擦副完全隔开而本身又保持着流体的特性称流体润滑。当摩擦副运动时,摩擦发生在流体内部分子间而不是在摩擦面间,它是全膜润滑的一种,是理想的润滑状态,是人们企图实现并保持的润滑状态。按润滑膜压力产生的方式又分为下列三种。

① 流体动压润滑 由摩擦面间的相对运动使收敛形缝隙中的粘性流体产生压力平衡外负荷,并使流体形成足够厚的油膜将两摩擦面完全隔开,为流体动压润滑。实现流体动压润滑大多数情况下使用润滑材料是润滑油。流体动压润滑的油膜厚度一般为 $2.5 \sim 76$ 微米,摩擦