

职业技术学院规划教材

设备润滑与防腐

范光松 主编

 机械工业出版社
China Machine Press

本书共分十一章,内容包括摩擦学的基本原理,润滑材料的基本知识,润滑油的新分类,新标准、新规格;典型零部件的润滑,现代设备润滑管理,废油回收与再生方法,润滑装置及工具的使用,如何治理设备泄漏,如何设置密封装置,产生金属腐蚀的环境及影响因素,腐蚀的防护对策以及除锈方法等。

全书从职业技术教育出发,加强应用技术,强化理论联系实际,同时适当扩大知识面和反映现代设备润滑管理,以及介绍新材料、新标准、新工艺,为我国润滑油的升级换代和工业设备管理服务。

本书可作为高等职业技术教育、中等专业教育机电类规划教材,也可作为职业大学、职业中专、职业高中及从事工业设备管理、设备润滑的工程技术人员培训教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

设备润滑与防腐/范光松主编. —北京:机械工业出版社, 2000. 5

职业技术院校规划教材

ISBN 7-111-07609-5

I. 设… II. 范… III. ①机械-润滑-专业学校-教材 ②金属-防腐-专业学校-教材 IV. ①TH117.2②TG17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 50483 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:张一萍 孙祥根 版式设计:霍永明

责任校对:张 佳 封面设计:姚 毅

责任印制:路 琳

成都新华印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm $1/16$ ·12.25 印张·296 千字

0 001—4 000 册

定价:16.50 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

前 言

本教材是根据机械工业中等专业学校机械专业教学指导委员会，于1997年8月常州会议通过的中等专业学校机械专业设备润滑与防腐课程教学大纲编写的。它可作为高等职业技术教育、中等专业教育机电类规划教材，也可作为职工大学、职业中专、职业高中等相关专业教材，以及从事工业设备管理、设备润滑的工程技术人员培训教材和参考书。

全书除绪论外，共分摩擦、磨损与润滑；润滑油、添加剂、润滑脂、其他润滑材料；典型零部件的润滑；设备润滑管理、废油回收与再生、润滑装置及工具；机械设备的防漏与密封，机械设备的防腐等11章。

摩擦学理论部分，简要地讲述机械运动副间的摩擦特点；磨损过程、原因及影响因素；润滑剂种类及润滑的原理。润滑材料部分较系统地介绍各种常用润滑油，润滑脂、矿物油和合成油，添加剂、固体润滑材料以及金属加工用油等。设备润滑管理部分，除了介绍设备润滑常规管理之外，还着重介绍设备润滑的技术管理，以及如何开展废油回收与再生工作；润滑装置及工具的使用，以及如何治理设备泄漏，及设置密封装置等。设备防腐部分，较为系统地介绍电化学腐蚀原理、各类腐蚀类型、产生金属腐蚀的环境及影响因素、腐蚀的防护对策，以及有关除锈方法等。

本书内容取材及编写的特点：按照高等职业技术学校学生培养目标的要求，从职业技术教育出发，削弱摩擦学等过深理论，加强应用技术，强化理论联系实际，充实基本知识和基本技能，同时适当扩大知识面和反映近年来先进的润滑管理方法，介绍新标准、新材料（油品）、新工艺全书力求做到“加强应用技术，培养工作能力，适应市场经济”的需要。全书内容简洁、实用。书后录有附表，可供学生或工程技术人员参考。

本书绪论、第一、二、三、五、六、十一章由福建高级工业专门学校范光松编写；第四章由山东省建筑工程学院宋传增编写；第七、八章由常州机械工业学校陶永德编写；第九、十章由贵州机械工业学校汪小荣编写。

本书由福建高级工业专门学校范光松主编，常州机械工业学校曹根基主审。参加审稿会议的有沈绍槐、严鹤峰、龚奇平、张庆斌、赵长旭、张群生、云建军等。

在本书编写过程中，得到有关院校、工厂及福建省设备管理协会的大力支持和帮助，谨此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限和编写时间仓促，书中错误和不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

1999年10月

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第一章 摩擦、磨损与润滑	3
--------------------	---

第一节 摩擦	3
--------------	---

第二节 磨损	5
--------------	---

第三节 润滑	9
--------------	---

思考题与习题	15
--------------	----

第二章 润滑油	16
---------------	----

第一节 润滑油的品牌	16
------------------	----

第二节 润滑油的选用	34
------------------	----

思考题与习题	38
--------------	----

第三章 添加剂	39
---------------	----

第一节 概述	39
--------------	----

第二节 清净分散剂	42
-----------------	----

第三节 抗氧化添加剂	43
------------------	----

第四节 增粘添加剂	44
-----------------	----

第五节 降凝添加剂	45
-----------------	----

第六节 油性剂和极压抗磨剂	46
---------------------	----

第七节 防锈添加剂	48
-----------------	----

思考题与习题	49
--------------	----

第四章 润滑脂	50
---------------	----

第一节 概述	50
--------------	----

第二节 常用的润滑脂	56
------------------	----

第三节 润滑脂的选用	62
------------------	----

思考题与习题	65
--------------	----

第五章 其他润滑材料	66
------------------	----

第一节 合成润滑剂	66
-----------------	----

第二节 固体润滑剂	71
-----------------	----

第三节 金属加工用油	75
------------------	----

思考题与习题	77
--------------	----

第六章 典型零部件的润滑	78
--------------------	----

第一节 滑动轴承的润滑	78
-------------------	----

第二节 滚动轴承的润滑	81
-------------------	----

第三节 齿轮传动的润滑	85
-------------------	----

第四节 导轨的润滑	88
-----------------	----

第五节 其他零部件的润滑	90
--------------------	----

思考题与习题	93
--------------	----

第七章 设备润滑管理	94
------------------	----

第一节 设备润滑管理的意义和 基本任务	94
------------------------------	----

第二节 设备润滑管理的组织	94
---------------------	----

第三节 设备润滑管理用图表	102
---------------------	-----

第四节 设备润滑的“五定”管理和 消耗定额	110
--------------------------------	-----

第五节 设备的换油与润滑油的 “三级过滤”	114
--------------------------------	-----

第六节 建立健全设备润滑档案	118
----------------------	-----

思考题与习题	119
--------------	-----

第八章 废油回收与再生	121
-------------------	-----

第一节 润滑油老化及鉴定	121
--------------------	-----

第二节 废油的回收与保管	123
--------------------	-----

第三节 废油的再生方法	124
-------------------	-----

第四节 再生油的使用	130
------------------	-----

思考题与习题	131
--------------	-----

第九章 润滑装置及工具	132
-------------------	-----

第一节 润滑方式及装置	132
-------------------	-----

第二节 常用的润滑工具	138
-------------------	-----

思考题与习题	139
--------------	-----

第十章 机械设备的防漏与密封	140
----------------------	-----

第一节 设备漏油的危害及原因	140
----------------------	-----

第二节 设备漏油及治理	142
-------------------	-----

第三节 密封	146
--------------	-----

思考题与习题	154
--------------	-----

第十一章 机械设备的防腐	155
--------------------	-----

第一节 腐蚀与防锈概述	155
-------------------	-----

第二节 影响金属腐蚀的因素	157
---------------------	-----

第三节 防止金属锈蚀的方法	161
---------------------	-----

第四节 金属锈蚀的程度及除锈方法	171
------------------------	-----

思考题与习题	173
--------------	-----

附录	174
----------	-----

附录图 1 润滑油粘度换算	174
---------------------	-----

附录表 1 粘度指数计算基数表	175
-----------------------	-----

附录表 2 国内外油品参照表	178
----------------------	-----

附录表 3 常见设备润滑用油的选择	185
-------------------------	-----

参考文献	190
------------	-----

绪 论

机械设备是企业生产的主要要素之一，一个工厂要持续、全面、均衡地完成生产计划，设备必须经常处于良好的技术状态，要做到这一点就必须重视设备的维护保养，合理而完善地进行润滑。只有这样才能控制摩擦，降低磨损，防止腐蚀，减少传动机构中消耗的能量，减少设备损坏与故障，延长设备的寿命。特别是现代化机械设备正在向超大型化、高速运行、高度自动化，高生产效率，高精度保持性、长寿命的方向发展，有的机械还需要能够适应各种类型的工作环境。这些对设备维修和润滑工作提出了一系列新的课题。

摩擦、磨损、润滑学是一门综合性的互相渗透的边缘性基础科学，它与物理、化学、力学、金属学等学科均有十分密切地联系，也普及到人类生产活动和生活的各个领域。据估计，目前世界上消耗的能源有三分之一表现为各种形式的摩擦损失。此外，由于摩擦副表面的磨损，致使设备损坏或需要更换零件而造成的损失也是十分惊人。

我国使用润滑剂减摩技术有着悠久的历史，据史书记载，我国周代中期（约公元前1066~570年）的《诗经》卷二邶风，泉水三章中记载了使用脂进行润滑的诗篇：“载脂载鞅，还车言迈，遄臻于卫……”。鞅（音狭 xia）就是车轴的古字。大意是说：“用脂膏涂在车轴上进行润滑，让车快跑到卫地去。”另外我国故宫中的一块长16.5m，宽3m，厚1.7m，质量为 $2 \times 10^5 \text{kg}$ 的大石雕，在清乾隆26年（公元1761年）由房山县大石窝运来时，是在沿途每隔一里挖一口井，在冬季汲水泼成冰道，用旱船拉运来的。

我国从60年代就开始将有关摩擦、磨损润滑方面的研究课题列入国家科研计划，由于当时我国机械工业尚且年轻，不能积累足够的材料以获得比较深刻的认识。又由于其他因素的干扰，使我国在这方面发展水平比世界先进水平落后了许多年。随着我国的开放、改革及经济的飞速发展，摩擦、磨损、润滑方面的研究工作同其他方面科学技术一样得到重视，并有所发展。1979年3月，成立了全国机械工程学会摩擦学学会。目前许多高等院校还设立有关专业课程，各地还设立了培训中心，学术活动十分频繁。现在，摩擦学在我国已成为发展最快和最年轻的学科之一。

在润滑剂方面，随着机械设备的工作性能不断提高，单纯矿物油已不能满足要求。因此发展了一系列可提高润滑油润滑性能的新型润滑油和添加剂。包括耐磨液压油、导轨油、数控机床用油，多效润滑油、合成润滑剂、固体润滑材料、难燃液和新型金属加工用油等。虽然合成润滑剂的价格比矿物油要贵，但使用经验表明，使用它以后可以显著延长润滑剂寿命，满足较为苛刻的使用要求，从总的价格平衡来看还是节约的。此外，固体润滑材料已在机械中普遍推广，这类润滑材料，本身具有良好的减摩和耐磨性能，一般可应用在工作温度范围比较广泛、环境条件较特殊的场合：如具有放射性、高真空的环境；不许可产品受到润滑液体的污染；以及应用于那些不可能或不便于维护保养的产品或部件。值得注意的是轴承、机床导轨等关键部件也越来越多地使用了固体润滑材料。一些先进的工艺方法，如真空沉积、化学气相沉积、射频溅射，离子喷镀、离子移植以及注射成型等也在固体润滑材料的成膜过程中得到应用。

在润滑装置方面,发展带有较好的监测和控制系统的自动化润滑装置,在某些润滑系统(如压力循环集中供油系统)中为保证供油系统正常地工作,配置了恰当的控制和指示装置,有时在出现故障时还能自动报警。例如:①温度控制,常用水银温度计及热电偶加上自动报警装置。对于油箱,如果油温太高,可开启冷却水阀门;如果温度过低,可开启蒸汽阀门。②压力控制,常用压力计、压力控制阀,压力表、压差报警器和压力报警器等。③流量控制,常用流量计、流量控制阀和浮子式液面指示器等。有些润滑部位的故障用电信号显示。

设备润滑管理是企业设备维护保养工作的重要组成部分。也是企业提高设备利用率、降低维修成本,保证生产持续、全面均衡地进行的重要环节。特别现代机械设备的不断发展,人们越来越感到润滑的重要性,据资料统计,由于润滑不良和润滑方法不当造成的设备故障次数占故障总次数的30%~50%。因此,造成的设备停歇时间占总停歇时间的30%~70%。

目前,国内外已普遍认识到设备润滑管理与节约能源材料、劳动力和提高产品质量,可靠性、寿命,安全都有直接关系,故对它十分重视。过去认为简单的加油、换油,现已提高到摩擦学的理论高度重新认识。在润滑油升级换代以及检测技术发展下,在设备润滑管理方式上也有改革。例如,原来“五定”管理中的定期换油发展为按质换油与周期换油相结合(即ABC管理法)的管理;“五定”管理的实现形式上采用“目视”管理等等,这些都是厂矿企业在实践中总结出较为先进的管理方法。

润滑油经过长期使用后会老化变质,对于老化变质的机理,现在又有新的认识,一般认为变质的只是其中部分烃类(质量分数为1%~25%)物质,其余大部分还是良好的。如果把这些大量老化变质的润滑油收集起来,经过再生加工,就可以重新炼出符合原有性能的优质润滑油,仍可继续使用,这样既节约了大量的石油,充分发挥石油资源的作用,又避免因排出废油造成对环境的污染。并且再生工艺简单、设备简易、投资少、产率高、生产灵活、经济价值高,深受世界各国重视。

机械设备的泄漏,对设备的效率与性能有很大影响,并且引起污染,影响外观,还会造成能源的浪费等。因此提高对治漏工作的认识,正常选择、贮存、安装与使用密封件、有着十分重要的意义。密封材料发展十分迅速,由传统的合成橡胶、塑料发展到各种密封胶(液体垫圈)密封胶是一种新型的高分子密封材料,具有较好的密封性,又有良好的耐热、耐压、耐油、耐化学试剂等特性。而且,使用方法简便,价格便宜,因此目前在机械行业中得到越来越广泛的应用。

最简单的金属腐蚀是锈蚀,对于机械零件的锈蚀,它只影响到零件加工精度,从而影响了设备的精度,而设备的腐蚀对社会带来更大危害,它不仅造成重大的经济损失,而且一些由腐蚀引起的突发性灾难事故,还会造成人员伤亡和社会正常秩序的破坏。在我国进行社会主义现代化建设中,更新、深化专业人员的腐蚀理论及向其他专业人员普及腐蚀知识是极有意义的。

设备润滑与防腐是一门跨学科而综合的课程,它与工程技术有着密切的关系。机械设备在运转过程中产生的故障、失效,常常与润滑、防护、保养等有关。因此我国及世界其他国家的工业与教育部门均十分重视这方面的教育与培训工作。这将鼓舞我们更加致力于设备润滑和防腐工作的研究和开发应用。

第一章 摩擦、磨损与润滑

第一节 摩擦

一、概述

相互接触的物体、在接触面间产生的阻止物体相对运动的现象称为摩擦。由于摩擦而产生的阻力，称为摩擦力。

我们可以观察在机械运动中产生的摩擦，同时存在摩擦力、摩擦热和磨损三个现象。其中：

摩擦力属于运动副的一种力学特征；

摩擦热是能量转换的一种形式。

磨损是摩擦表面物质转移的一种形式。

在机械运动中，发生相对运动的零件或部件统称为运动副，如轴与轴承、齿轮啮合、平面导轨、蜗杆与蜗轮、链条与链轮、带传动等。这些运动副在相对运动的同时都会发生摩擦，因此我们也称这些运动副为摩擦副。

摩擦是自然界普遍存在的现象，对人们的生活和生产都有着重要的作用。如人们利用摩擦振动使提琴、胡琴发音。有了摩擦人们才能走路，汽车、火车才能行驶，等等。某些机械利用摩擦力来传递动力和运动，如摩擦压力机、摩擦离合器、带传动等。但是，摩擦力也有它有害的方面，它对某些机械运动副起不良作用，主要有以下几点。

(1) 消耗大量的功 机械运动中克服摩擦面间的摩擦力所作的功称为无用功，它大约占总消耗功的三分之一，从而降低了机械效率。

(2) 造成磨损 由于摩擦表面的直接接触，零件表面产生严重磨损。降低机械的运动精度，间隙变大，出现振动和噪声，不仅影响机械的正常运转，同时还缩短了机械的寿命。据统计，大约有 80% 的损坏零件是由于磨损造成的。

(3) 产生热量 机械设备运行中用来克服摩擦力损失的那部分能量转换成热能的形式散发出来。其中一部分散发到空气中，另一部分来不及散发就使机械零件温度升高，降低机械强度，甚至产生热变形、热疲劳、热磨损，导致破坏机件精度，影响机械正常运转。特别是在要求运动灵敏度高的部位，如数控机床的导轨，丝杠螺母、测量仪器等，热变形更会影响机械的工作精度和寿命。

摩擦会导致磨损，最终将破坏机械的正常运转，这是一个客观规律。但是，只要我们认真研究和了解摩擦、磨损的现象和本质，并采取相应的措施，就能达到控制摩擦造成的危害，延长机械设备的使用寿命。

二、摩擦的类型

摩擦的类型很多，因为研究和观察的依据不同，所以摩擦的分类也不同。常见的分类有以下几种。

1. 按机械摩擦副的运动形式分类

(1) 滑动摩擦 两个相互接触的物体，在外力作用下，沿接触表面相对滑动（或具有相对滑动趋势）时，存在于接触分界面的摩擦，称为滑动摩擦。如导轨面间的滑动，滑动轴承间的转动以及活塞在汽缸中的往复运动。

滑动摩擦力的大小与接触面积无关，而与接触面间的法向载荷成正比

$$F = \mu N$$

式中 F ——摩擦力，单位为 N；

μ ——摩擦系数；

N ——正压力，单位为 N。

(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。滚动摩擦时，其接触处常常表现为点与点（如球形滚动轴承）或线与线（如圆柱滚子轴承）的摩擦。

物体在滚动时有一个阻碍滚动的阻力偶，称为滚动摩擦力偶，如图 1-1 所示。

由于接触处的局部区域产生弹性变形，致使在以接触点为中心的接触压力分布不对称，支承面的反力 N' 发生偏心（偏心距为 e ），此反力对接触点之力矩 M 为 $M = Ne'$ （单位为 $N \cdot mm$ ）

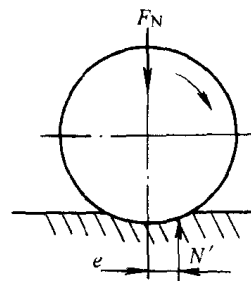


图 1-1 滚动摩擦示意图

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。在相对运动即将开始瞬间的静摩擦即最大静摩擦。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。两物体之间具有相对运动时的摩擦系数称为动摩擦系数。

3. 按摩擦表面的润滑状态分类

(1) 干摩擦 通常是指在两摩擦表面间没有任何润滑剂存在时的摩擦。

干摩擦有大量的摩擦功损耗和严重的磨损，在机械设备运动部件中是不允许出现干摩擦的。

(2) 液体摩擦 两个相互摩擦物体的接触表面被一层连续的润滑剂完全隔开的摩擦，叫液体摩擦。

这种摩擦的特点是在界面间润滑油膜内同分子之间摩擦；摩擦力的大小，仅与润滑油的粘度、滑动速度和接触面积有关；而与摩擦面的材料和状态无关。

这种摩擦状态下，摩擦系数最小，消耗功率小，是一种理想的摩擦状态。

(3) 边界摩擦 边界摩擦是由液体摩擦过渡到干摩擦之前的临界状态。在这种状态下，仅由吸附在表面的一层极薄（ $0.1\mu m$ ）的润滑膜隔开，摩擦力的大小与润滑膜的粘度无关，而只与润滑膜分子对摩擦面的吸附性有关。因此，边界摩擦的摩擦系数大小，也介于液体摩擦系数和干摩擦系数之间。

4. 按摩擦是否发生在同一物体分类

(1) 外摩擦 相互接触的物体作相对运动时，发生在物体界面之间的摩擦称为外摩擦。外摩擦即一般所指的摩擦。

(2) 内摩擦 它是同一物体的诸部分之间发生的摩擦。内摩擦一般发生在润滑剂之间的

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。在金属的塑性变形过程中也会产生内摩擦。

三、零件摩擦特点

两个零件的表面相接触，名义上是整个面积接触，实际上仅仅是极少数凸峰接触。全部凸峰接触面积之总和，常常只占名义接触面积的百分之一到数万分之一。因此，在真实接触面积上的单位面积上的压力非常大，接触点将产生塑性变形。出现表面微凸体相互压入和啮合，以及相接触的表面存在分子吸引力，如图 1-2 所示。当两表面相互运动时，则受到接触点上因机械啮合和分子吸引力所产生的切向阻力的总和的作用，即总摩擦力。

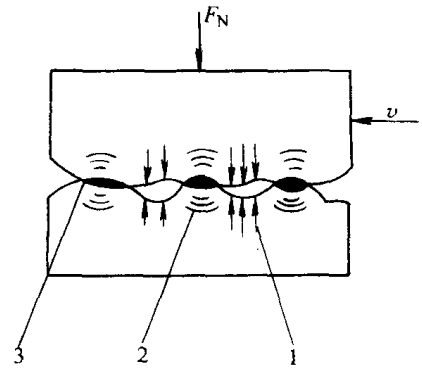


图 1-2 两个零件的表面接触

1—分子吸附 2—弹性变形
3—塑性变形

机械作用与分子作用的比例与零件表面粗糙度、材料种类、载荷大小有关。零件表面粗糙度小时，分子作用比例大；而零件表面粗糙度大时，则机械作用大。对于金属材料，分子作用大，而对于橡胶、塑料等，则分子作用小。载荷大，则机械作用和分子作用都会加大。

第二节 磨 损

两个相互接触的物体作相对运动时，物体表面的物质不断转移和损失，这种现象称为磨损。磨损的结果，使两相对运动的物体接触表面不断的有微粒脱落，表面性质、几何尺寸发生改变。

一、磨损的过程

通常，运动副的磨损过程可分为三个阶段，如图 1-3 所示。

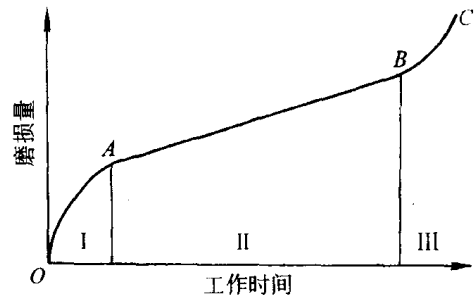


图 1-3 磨损的三个阶段

(1) 初期磨损阶段 零件（摩擦副）由于制造和安装误差的影响，机件在运转初期磨损速度较快，并有轻微的振动、噪声和发热，这个阶段的磨损称为初期磨损。初期磨损阶段是设备通过运转自行调整（磨合）的过程。经过跑合使磨损速度变慢，逐渐接近于稳定磨损阶段。在初期磨损阶段常常使用一些跑合剂（如二硫化钼粉、金刚砂等），以缩短跑合周期延长稳定磨损阶段。这对提高机械寿命有很大的意义。跑合结束后，应对摩擦副进行重新清洗和换油，为稳定磨损创造条件。

(2) 稳定磨损阶段 在这个阶段，磨损速度是比较缓慢和恒定的，在磨损量与时间关系的曲线上，具有基本不变的斜率。通常机械寿命的长短就是指这一阶段时间的长短。

(3) 剧烈磨损阶段 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，以及产生疲劳磨损等现象，急剧加快磨损速度，直至摩擦副不能正常运转。当机件到达剧烈磨损阶段时，机械效率下降，精度丧失、产生噪声和振动、摩擦副的温度也会急剧上升，此时，必须停机修理或更换。

二、磨损分类

现代机械工程界常采用的分类方法是按摩擦表面破坏的机理和特征，分为磨粒磨损，粘着磨损、疲劳磨损和腐蚀磨损。这种分类方法揭示了各种类型磨损的过程和本质，对采取抗磨措施有很大的指导意义。

1. 磨粒磨损

什么叫磨粒？广义地说，凡是硬质颗粒或硬金属都是磨粒，但从研究的角度讲磨粒一般指非金属矿物和岩石，如二氧化硅、灰尘等。

硬质微粒进入摩擦表面间时，由于产生切削和磨削作用，金属表面发生塑性变形而引起的磨损叫磨粒磨损。

按摩擦表面所受应力和冲击的大小分为凿削式磨粒磨损、高应力磨粒磨损和低应力磨粒磨损，如图 1-4 所示。

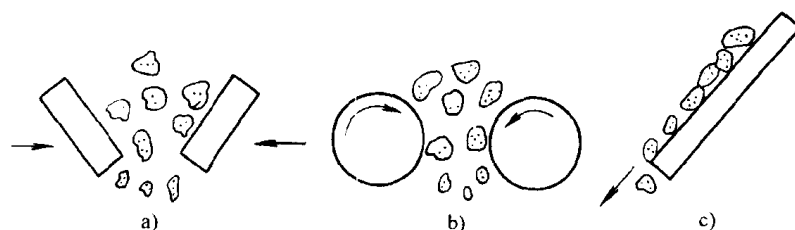


图 1-4 磨粒磨损的三种类型图

(1) 凿削式磨粒磨损 见图 1-4a，这类磨损的特征是冲击力大，磨料以很大的冲击切入金属表面。因此工件受到很高的应力，造成表面宏观变形，并可从摩擦表面凿削下大颗粒的金属，在被磨损表面有较深的沟槽和压痕。如挖掘机的斗齿、矿石破碎机锤头等零件表面的磨损即属于此种磨损形式。

(2) 高应力磨粒磨损 见图 1-4b，这类磨损的特点是应力高，磨料所受应力超过磨料的压碎强度。当磨粒夹在两摩擦表面之间时，局部产生很高的接触应力，磨料不断被碾碎。被碾碎的磨料颗粒呈多边形，擦伤金属，在摩擦表面留下沟槽和凹坑。如矿石粉碎机的腭板，轧碎机滚筒等表面的破坏。

(3) 低应力磨粒磨损 见图 1-4c，这种磨损的特征是应力低，磨料作用于摩擦表面的应力不超过它本身的压溃强度。材料表面有擦伤并有微小的切削痕迹。如泥砂泵叶轮的磨损。

2. 粘着磨损

由于摩擦表面存在着一定的表面粗糙度，在压力作用下，当摩擦表面互相作用时，在真实接触点上产生瞬时高温，存在于摩擦面上的表面膜在高温、高压作用下遭到破坏，从而发生新鲜金属表面直接接触，在接触点上产生粘着，若继续相对运动，撕裂面产生在某一局部强度弱的一方，而发生磨损。这种磨损叫粘着磨损，如汽车发动机的拉缸现象就是这种磨损。

产生粘着磨损的条件可归纳如下：

1) 表面纯洁，无吸附膜。金属表面实际上经常存在着吸附膜。常温下只有在塑性变形之后，金属滑移，吸附膜破坏，才能露出纯洁的金属表面。再就是温度升高，能使膜层破坏。

2) 接触面愈近, 愈易产生粘着。接触点愈密, 实际接触面愈大。原子晶格距离愈近, 愈易产生粘着。

3) 原子点阵晶格中的能量要超过一定的数值, 才能引起粘着。零件的弹性变化, 温度升高都会使原子能量增加, 活动能力增强, 容易产生粘着。

4) 同名金属易粘着。同名金属原子晶体距离相等, 亲合力强, 在其他条件相同时, 比异名金属易产生粘着。

3. 疲劳磨损

疲劳磨损是循环接触应力周期性地作用在摩擦表面上, 使表面材料疲劳而引起材料微粒脱落的现象。

在滚动摩擦面上, 两摩擦面接触的地方产生了接触应力, 表层发生弹性变形, 在表层内部产生了较大的切应力(这个薄弱区域最易产生裂纹), 由于接触应力的反复作用, 在达到一定次数后, 其表层内部的薄弱区域开始产生裂纹。同时, 在表层外部也因接触应力的反复作用而塑性变形, 材料表面硬化, 最后产生裂纹。在裂纹形成的两个表面之间, 由于压力的润滑油楔入, 使裂纹内壁产生巨大的内应力, 迫使裂纹加深并扩展, 这种裂纹的扩展延伸, 就造成了麻点剥落。如滚动轴承和齿轮传动的磨损就是属于疲劳磨损。

遭受滚动接触疲劳磨损的表面常出现深浅不同的针状痘、斑状凹坑或较大面积的剥落。所以有人又称其为点蚀或痘斑磨损。

疲劳磨损分为非扩展性和扩展性的两类。

(1) 非扩展性疲劳磨损 对于新的摩擦表面, 由于接触点少, 单位面积上的压力较大, 容易产生小麻点。但随着磨合, 实际接触面积增大, 单位面积承受的压力降低、麻点停止扩大, 因而不会明显地影响机件的正常工作。

(2) 扩展性疲劳磨损 当作用在两接触面上的交变应力较大, 或材料、润滑油选择不当时, 出现的小麻点数量不断增加进而形成麻点的连接现象, 形成痘斑状凹坑或大面积剥落。

4. 腐蚀磨损

摩擦时材料与周围介质发生化学或电化学反应而造成的磨损叫做腐蚀磨损。这种磨损实质上包含两个过程: 腐蚀和机械磨损。由于介质及材料的性质不同, 腐蚀磨损可分二类: 氧化磨损、特殊介质腐蚀磨损。

(1) 氧化磨损 大气中含有氧, 所以氧化磨损是一种最常见的磨损形式, 其特征是在金属的摩擦表面沿滑动方向形成匀细的磨痕。钢铁材料在低速滑动摩擦时, 由于摩擦热的作用可能形成黑色 Fe_3O_4 磨屑和松脆 FeO 。

影响氧化磨损的因素有滑动速度、接触载荷、氧化膜的硬度、介质的含氧量, 润滑条件及材料性能等。一般说来, 氧化磨损比其他磨损轻微得多。使用油脂润滑, 把摩擦表面与空气中的氧隔绝开来, 可以减缓氧化膜的形成速度, 降低氧化磨损。

(2) 特殊介质的腐蚀磨损 由于摩擦副与酸、碱、盐等特殊介质发生化学作用而产生的磨损称为介质腐蚀磨损。其机理与氧化磨损相似, 但磨损速度快得多。

镍、铬等元素在特殊介质作用下, 可形成化学结合力较高、结构较致密的钝化膜, 因此, 可减轻腐蚀磨损。钨、钼在 500°C 以上其表面可形成保护膜, 使摩擦系数减小, 因此钨、钼是抗高温腐蚀的重要材料。含银、铜等元素的轴承材料, 在温度不高时, 与润滑油中的硫化物作用也可生成硫化膜, 能起减摩作用。此外, 由碳化钨、碳化钛等组成的硬质合

金，也都具有高的抗腐蚀磨损能力。

三、影响磨损的因素

影响磨损的主要因素有：润滑情况，零件运动速度及单位压力，温度，湿度及周围环境，零件材料，零件表面加工质量，零件的配合间隙等。

1. 润滑对磨损的影响

润滑对减少零件的磨损有重要的作用。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，正确地选择润滑材料能够减低腐蚀磨损和疲劳磨损等等。对机件进行良好润滑，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。

2. 零件运动速度及单位压力对磨损的影响

有润滑油时，零件相对运动速度愈高，愈易形成液体摩擦而减少磨损。在干摩擦条件下，速度增加会因单位时间内经过的路程增长而使单位时间内磨损增加。机器旋转方向经常变化起动频率愈高，机件的磨损亦愈快。零件单位压力增加时，会使磨损加剧。因此一般不应长时间超负荷和使其产生冲击载荷。

3. 温度对磨损的影响

温度主要影响润滑油吸附性薄膜的强度。润滑油膜有相当高的机械稳定性，但温度及化学稳定性较差，当在高温和化学变化时，润滑油便失去吸附性能。一般润滑油的安全温度为 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$ 。当温度达到 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 时，摩擦表面的油膜便遭到破坏，摩擦性质由边界摩擦变为干摩擦，当然磨损也就加快。

4. 湿度及周围环境对磨损的影响

机件工作的周围环境是否有高温辐射、水湿、水汽、煤气、灰尘、铁末、或其他液体、气体的化学腐蚀介质等的影响。这些都将导致和加速机件的氧化和腐蚀磨损。

5. 零件材料对磨损的影响

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，易使材料增加脆性，而材料的韧性则可防止磨粒的产生，提高其耐磨性能。

经过热处理或化学热处理的钢材，可以获得新的优良的性质，提高零件的耐磨性，有时零件的表面需要提高耐磨性，可用表面淬火或高频淬火的方法获得。或者采用渗碳、渗氮或氰化的方法，使钢的表面具有较高的硬度和耐磨性。

在组合件中，如轴承副中的转轴，由于它是需要加工的主要零件，所以应采用耐磨材料（如优质合金钢）来制造；对较简单的零件，如轴承衬和轴瓦、则选用巴氏合金、铜基合金等较软材料（又称减摩合金）来制造，以达到减摩和耐磨的目的。

6. 零件表面加工质量对磨损的影响

零件表面加工质量主要指机械加工质量，包括宏观几何形状、表面粗糙度和加工刀痕方向等。

（1）宏观几何形状的影响 宏观几何形状指加工后实际形状与理想形状的偏差，即加工精度，如圆度、圆柱度、平行度和垂直度等。宏观几何形状的误差使零件表面载荷分布不均匀，集中于局部地方，容易造成局部严重磨损。

（2）表面粗糙度的影响 实验测得零件磨损量与表面粗糙度有如下关系：如图 1-5 所

示, 曲线 I 为轻载荷的情况, 曲线 II 为重载荷的情况。从图中可以看出: ①每一种载荷下有一个最合理表面粗糙度, 其磨损量最小; ②轻载荷比重载荷的合理表面粗糙要求更小一些; ③在相同的载荷下, 一般来说, 表面粗糙度愈细, 磨损量愈小, 但超过 O_1 , O_2 后, 磨损量又会逐渐上升。这是因为表面粗糙度过细会使接触面增大, 分子间吸引力增强, 产生粘着磨损的可能性也就增大。

(3) 刀痕方向的影响 刀痕方向对磨损影响较大, 如果两摩擦表面的刀痕方向是平行的而与运动方向一致, 则磨损小。如刀痕方向与运动方向交叉时, 则磨损在上述二者之间。

7. 零件的配合间隙对磨损的影响

零件的配合间隙对零件的磨损影响很大, 一般间隙不应过大, 也不应过小。当间隙过小时, 不易形成液体摩擦, 容易产生高的摩擦热, 而且不易散出, 故易产生粘着磨损和产生摩擦副咬死现象, 当间隙过大时, 同样不易形成液体摩擦, 而且会产生冲击载荷而加剧磨损。因此, 当配合间隙大到一定程度时, 即应进行修复, 以恢复原有的配合间隙。

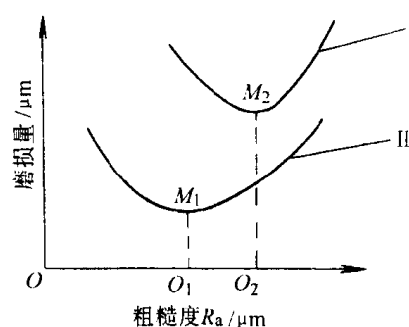


图 1-5 零件磨损量与表面粗糙度的关系

第三节 润 滑

润滑是人们向摩擦、磨损作斗争的一种手段。一般来说, 在摩擦副之间加入某种物质, 用来控制摩擦、降低磨损, 以达到延长使用寿命的措施叫润滑。能起到减低接触面间的摩擦阻力的物质都叫润滑剂。

一、润滑的作用

润滑对机械设备的正常运转起着重要的作用。主要如下几点。

1. 降低摩擦系数

在两个相对摩擦的表面之间加入润滑剂, 形成一个润滑膜的减摩层, 就可以降低摩擦系数, 减少摩擦阻力, 减少功率消耗。例如, 在良好的液体摩擦条件下, 其摩擦系数可以低到 0.001 甚至更低。此时的摩擦阻力主要是液体润滑膜内部分子间相互滑移的低剪切阻力。

2. 减少磨损

润滑剂在摩擦表面之间, 可以减少由于硬粒磨损, 表面锈蚀、金属表面间的咬焊与撕裂等造成的磨损。因此, 在摩擦表面间供应足够的润滑剂, 就能形成良好的润滑条件, 避免油膜的破坏, 保持零件配合精度, 从而大大减少磨损。

3. 降低温度

润滑剂能够降低摩擦系数, 减少摩擦热的产生。我们知道运转的机械, 克服摩擦所做的功, 全部转变成热量, 一部分由机体向外扩散, 一部分则不断使机械温度升高。采用液体润滑剂的集中循环润滑系统就可以带走摩擦产生的热量, 起到降温冷却, 使机械控制在所要求的温度范围内运转。

4. 防止腐蚀, 保护金属表面

机械表面, 不可避免地要和周围介质接触 (如空气、水湿、蒸汽、腐蚀性气体及液体

等)使机械的金属表面生锈、腐蚀而损坏。尤其是冶金工厂的高温车间和化工厂腐蚀磨损显得更为严重。

润滑油、脂对金属没有腐蚀作用,能隔绝潮湿空气中的水分和有害介质的侵蚀。我们在机械的金属表面涂上一层加有防腐、防锈添加剂的油或脂,便可起到防腐、防锈和保护金属表面的作用。

5. 清洁冲洗作用

摩擦副在运动时产生的磨损微粒或外来介质等,都会加速摩擦表面的磨损。利用润滑剂的流动性,可以把摩擦表面间的磨粒带走,从而减少磨粒磨损。在压力循环润滑系统中,冲洗作用更为显著。在冷轧、热轧以及切削、磨削、拉拔等加工工艺中采用工艺润滑剂,除有降温冷却作用外,还有良好的冲洗作用,防止表面被固体杂质划伤,使加工成品(钢材)表面具有较好的质量和较小的表面粗糙度值。例如,在内燃机汽缸中所用的润滑油里加入悬浮分散添加剂使油中生成的凝胶和积炭从汽缸壁上洗涤下来。并使其分散成小颗粒状悬浮在油中,随同循环油过滤器滤除,以保持油的清洁,减少汽缸的磨损,延长换油周期。

6. 密封作用

蒸汽机、压缩机、内燃机等汽缸与活塞,润滑油不仅能起润滑减摩作用,而且还有增强密封的效果,使其在运转中不漏气。提高工作效率的作用。

润滑脂对于形成密封有特殊作用。可以防止水湿或其他灰尘、杂质浸入摩擦副。

此外,润滑油还有减少振动和噪声的效能。

二、润滑的分类

1. 根据润滑剂的物质形态分类

(1) 气体润滑 采用空气、蒸汽或氮气等某些惰性气体作为润滑剂,可使摩擦表面被高压气体分隔开。如航海用的惯性陀螺仪;重型机械中垂直透平机的推力轴承;高速磨头的轴承等都可用气体润滑。气体润滑的最大优点是摩擦系数极小,几乎接近于零。气体的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 液体润滑剂包括矿物润滑油、合成润滑油,乳化油。水也可以作为初轧机胶木轴瓦的润滑剂和冷却剂。

(3) 半固体润滑 润滑脂是一种介于流体和固体之间的一种塑性状态或膏脂状态的半固体物质。它包括各种矿物润滑脂,合成润滑脂,动植物油脂等。

(4) 固体润滑 利用具有特殊润滑性能的固体润滑剂,如石墨、二硫化铝、二硫化钨等,代替润滑油、脂隔离摩擦接触表面,形成良好固体润滑膜,以达到减少摩擦、降低磨损的良好润滑作用。

2. 根据润滑膜在摩擦表面间的分布状态分类

(1) 全膜润滑 摩擦面之间有润滑剂,并能生成一层完整的润滑膜,把摩擦表面完全隔开。摩擦副运动时,摩擦是在润滑膜的内部分子之间的内摩擦,而不是摩擦面的直接接触的外摩擦,这种状态称为全膜润滑,这是一种理想的润滑状态。

全膜润滑的形态很多,其中之一就是人们所熟知的液体润滑。它是用液体作为润滑剂而获得的一种理想润滑状态。此外,还可以用气体、固体、半固体的润滑剂,形成一层完整的润滑膜。在边界摩擦和极压摩擦状态下,只要润滑剂选用得当,在一定条件下同样也能获得一层完整的边界润滑膜和极压润滑膜,能够起到控制摩擦,减少磨损的效果。

(2) 非全膜润滑 摩擦表面由于粗糙不平或因载荷过大、速度变化等因素的影响,使润滑膜遭到破坏,一部分有润滑膜,一部分为干摩擦,这种状态称为非全膜润滑。一般由于运动速度变化(起动、制动、反转),受载荷性质变化(突加、冲击、局部集中、变载荷等)以及润滑不良时,设备经常出现这种状态,其磨损也比较快。我们应当力求减少和避免这种状态。

现在我们研究用润滑油润滑的滑动轴承的润滑状态。图 1-6 所示,起动时为边界润滑,经过非全膜润滑过渡到全膜润滑。当轴承停止运转时,又由全膜润滑逐渐变为边界润滑。同时可以看出滑动轴承副在不同润滑状态下摩擦系数的变化规律,即摩擦系数 μ 随特性系数 $\eta \cdot n / F_n$ 的变化关系(即斯特里贝克曲线),(η 为油的粘度, n 为转速, F_n 为承载压力)。

图 1-6 中的 I-1 属于边界润滑,依靠边界油膜承载,常发生在供油不足,间歇润滑的低速重载的滑动轴承中。

I-2 是以边界润滑为主,液体润滑为辅的半液体润滑。常发生在间歇润滑和供油不足的连续润滑中。

I-3 也是半液体润滑,主要依靠油膜承载,常出现在载荷较重的飞溅润滑和油杯润滑的滑动轴承中。

II-4 是油膜厚度较薄的液体润滑。某些油环润滑的低载轴承和压力供油的滑动轴承处于这种润滑状态。

II-5 表示油膜厚度较大的液体润滑轴承。如某些汽轮机轴承、高速鼓风机轴承、精密机床主轴轴承等,多在高速轻载条件下工作。

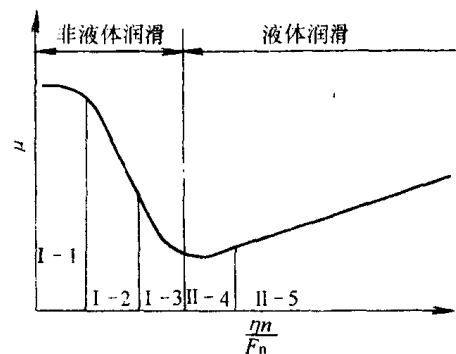


图 1-6 斯特里贝克曲线

从图 1-6 曲线还可以看出,在边界润滑时,由于是边界膜之间的滑动,所以摩擦系数几乎不随特性系数的增加而改变。但在半液体润滑条件下,随着特性系数的增加(即粘度 η 和转速 n 的增加、承载压力 F_n 的降低),将有利于液体润滑,所以摩擦系数迅速降低。 $\eta \cdot n / F_n$ 达到从非液体润滑向液体润滑的过度点,此时摩擦系数最低。在进入液体润滑的范围内,润滑油粘度 η 增加将增大滑动(液体内摩擦)阻力,而转速 n 增加,轴承单位承载压力降低,将使油膜增厚,于是流过轴承的润滑油量增加,也将增大滑动(内摩擦)阻力,所以,随着特性系数 $\eta \cdot n / F_n$ 的加大,摩擦系数 μ 将相应地加大。

三、润滑原理

摩擦副在全膜润滑状态下运行,这是一种理想的状况。但是,如何创造条件,采取措施来形成和满足全膜润滑状态则是比较复杂的工作。人们在长期生产实践中不断对润滑原理进行了探索和研究。下面就动压润滑、静压润滑、边界润滑的润滑原理作简单介绍。

1. 流体动压润滑

(1) 流体动压的形成 如图 1-7 所示,两相倾斜的板 A 和 B 间,大口间隙为 h_1 ,小口间隙为 h_2 ,中间充满粘度为 η 的油。 B 板上作用载荷为 F_n 。 B 板相对 A 沿 x 方向以速度 v 滑动。根据油性,只考虑速度 V 的影响,吸附在 A 板上的油层速度为零,吸附在 B 板上油层速度为 V ,中间油层速度变化为直线递减(图 1-7b)。 B 板将油从大口带入,小口流出,由于 $h_1 > h_2$,所以流进的油多,流出的油少,使两板间的油产生压力。若无外载荷,所产生的油压将把 B 板托起,并不断增加两板间距离。若两板不作相对滑动,两板间不产生油压;而单纯加载荷 F_n ,将使油从两侧挤出,如图 1-7c 所示,最后使两板直接接触。实际上,

两板间既有相对滑动，又有作用载荷，联合作用的结果如图 1-7d 所示，因板速的带动使进口的油多一些，但在负荷的作用下又挤回一些。在出口处，由板速的带动流出的少，但在压力作用下又挤出来一些。这样，就可使实际大口处的流入量与小口处的流出量相等，达到流量的平衡。此时，内部油中压力，其总压力足以平衡外作用负荷，并使两板任何一点都不直接接触，实现了全液压润滑。

注意：①如果两板平行，单纯速度的影响使进出口流量相等，内部不能形成油压以担负外载荷。所以，利用流体动压法实现全液体润滑，两板之间必须呈楔形间隙。②两呈楔形间隙板的相对滑动方向，必须能使油从大口进入，小口流出，才能形成油压。③油是流动的，一般会有流失。必须能不断地供给足够的油量，以确保全液体润滑的实现。

在楔形间隙中的油压要大到相当的程度，能够将载荷 F_n 作用的 B 板完全浮起，才能实现全液体润滑。内部产生的油压越高，可能担负的

外载荷越大，两摩擦面离开的距离就更大一些。使全液润滑更可靠。根据前面分析，利用流体动压法可能产生油压高低的基本关系是：①两摩擦面的相对滑动速度（转速）越高可能产生的油压就越大；②润滑油的粘度越大，油越不易从楔形间隙内被挤出，可能产生的油压就越大。

(2) 流体动压润滑应用举例 图 1-8 为普通径向滑动轴承副示意图。轴颈的直径比轴瓦的孔径小，装配后有间隙。静止时，在自重作用下轴颈偏在一边，自然形成楔形间隙。在轴承和轴瓦适当的部位上钻孔，选择适当的油品及供油装置，保证以一定的数量连续供油。工作中轴以转速 n 转动，轴颈表面相对轴瓦表面有滑动速度。所以，形成全液体润滑的基本条件是存在的。

当轴以图示方向开始转动时，由于转速低，接触处润滑不好，阻力大，轴颈就在轴瓦内

孔表面上爬。轴颈两侧都存在楔形间隙。左侧间隙中，由于轴颈将油从间隙小处带入，从间隙大处带出。因而该处不可能形成油压。右侧间隙中则可形成一定的油压。如轴转速不高，所选的油粘度不够大，内部产生的油压还不足以将轴浮起，轴颈就

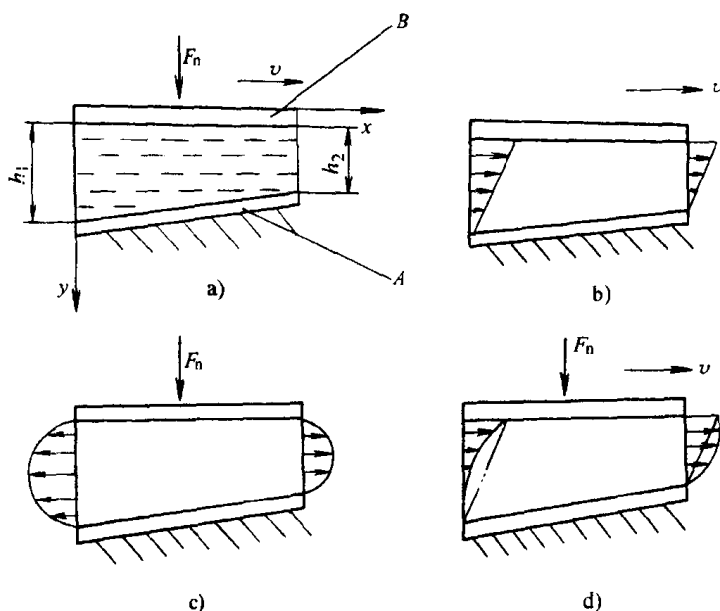


图 1-7 流体动压示意图

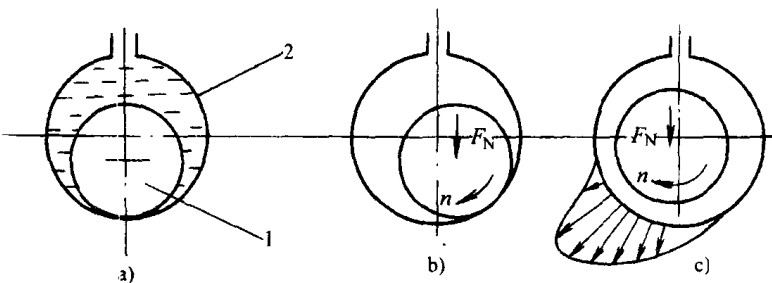


图 1-8 全液润滑滑动轴承示意图

1—轴颈 2—轴瓦

在如图 1-8b 所示位置运转。若轴转速进一步提高,或选用油的粘度相当大时,产生的油压很高,足以将轴浮起。此时,轴颈在其左右两侧的油压差的作用下被推向左侧。轴已浮起,两摩擦面任何一点都不直接接触,达到全液体润滑状态,如图 1-8c 所示。如无其他变化,轴就在该位置稳定运转。

根据以上分析,径向滑动轴承要确实达到全液体润滑状态,所选用油品的粘度和连续供油量与载荷大小、速度高低、配合间隙、结构尺寸和加工精度、表面粗糙度之间,必须符合一定设计要求。

2. 流体静压润滑

流体静压润滑简介,如图 1-9 所示。在平板 1 上作用有载荷 F_N ,在支承板 2 上开有一定深度的油腔,由外部的供油系统将具有一定油压的油送入油腔。当油压相当大时,足以将平板 1 托起,使两板间出现一定大小的节流间隙。此时板 1 和板 2 间无任何直接接触,就实现了全液体润滑状态。但是,油必将从节流间隙外泄,所以,除保证足够供油压力外,还必须以一定数量连续供油。

利用流体静压法实现全液体润滑,与两摩擦件滑动速度无关。因而在开车、停车及任意工作速度时都可保证全液体润滑。其缺点是:必须具有良好的,较复杂的供油系统,确保油腔进口处有一定的供油压力和供油量。

3. 边界润滑

从摩擦面间的润滑剂分子与分子间的内摩擦(即液体润滑)过渡到摩擦表面直接接触之前的临界状态,这种润滑称为边界润滑。除了相互接触的没有任何介质的纯净摩擦表面和完全被润滑介质隔开的摩擦表面的相互滑动以外,几乎各种摩擦副在相对运动时都存在着边界润滑状态。例如:汽缸与活塞、凸轮与顶杆、普通滑动轴承都可能出现边界润滑。

相对于干摩擦来说,边界摩擦系数低。因此,边界润滑能有效地降低零件磨损,延长使用寿命、提高承载能力。一般来说,滑动零件的若干故障多是由于边界润滑解决不当引起的。

在边界润滑状态下摩擦力与润滑油的粘度关系不大,而与润滑油的所谓“油性”有关。

(1) 润滑油的吸附现象 当在边界润滑状态时,润滑油中含有某些极性分子(或活性分子),由于分子吸引和静电作用,能吸附在金属摩擦表面上,形成一层具有一定润滑性能的吸附层(或边界膜)。润滑油中的极性分子的这种吸附在金属表面的性质称为“油性”(或称“吸附性”)。

吸附能力取决于润滑油的油性、金属材料的性质及其表面状况。动物油的油性最好,植物油次之。这是因为动植物油中含有脂肪酸等有机酸,其分子吸附力强。矿物油一般不含脂肪酸,而是含有烃类物质的碳氢化合物,也能吸附在金属表面,但不如有有机酸分子吸附的牢固。活泼金属较一般金属容易吸附。

(2) 边界膜的结构 具有一定体积的润滑油是由大量的润滑油分子组成的无数的小分子团构成的。每一个分子团内的分子互相平行并有一定的方向性。但是各个分子团之间的排列是无规则的,如图 1-10 所示。然而润滑油在金属表面构成吸附层后,边界膜上所有的极性

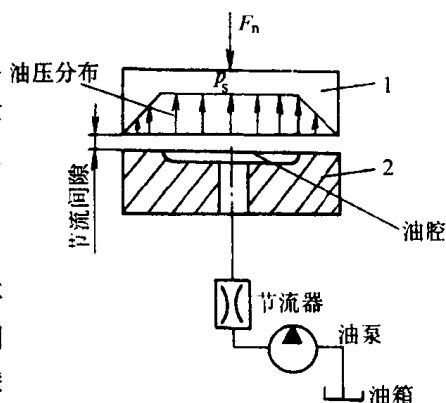


图 1-9 流体静压润滑示意图