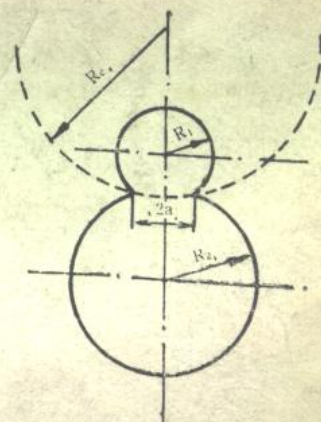


肖祥麟 主编

摩擦学导论

同济大学出版社



7-1117.1
13

摩擦学导论

肖祥麟 主编

编写者（以姓氏笔划为序）

石利英 肖祥麟 杨代华 姜范卿

同济大学出版社

内 容 提 要

本书是为工科大学开设摩擦学课程而编写的一本教材。内容包括摩擦学领域的各个主要方面：接触表面、摩擦磨损机理、各种润滑状态及其基础理论、润滑剂、摩擦磨损测试方法和摩擦学的系统分析等。编写本书的目的是使读者能从中获得摩擦学最根本的基础理论知识，有助于加深对本学科重要性的认识。

本书可作为工科大学本科学生的教材，也可作为各工科专业的研究生和有关工程技术人员的参考书。

EQ64/15

主 审 黄文治
责任编辑 陆菊英
封面设计 陈益平

摩 擦 学 导 论

肖祥麟 主编

同济大学出版社出版

(上海市四平路1239号)

新华书店上海发行所发行 同济大学印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 7.75 字数 192千字

1990年5月第1版 1990年5月第1次印刷

印数 1—3,000

ISBN 7-5608-0382-5/TH·11 定价：3.00元

前 言

任何机器的运转,都依赖其相应构件在约束条件下作相对运动来实现。此时,在这些构件的相互作用表面之间,必然将产生摩擦与磨损。润滑则是最早被普遍采用的、一种减少摩擦、降低磨损的有效措施。因此,有关摩擦、磨损和润滑的科学技术,是相互关联的。在本世纪的60年代中期,英国的一个以乔斯特为首的调查工作组,首先提出将有关摩擦、磨损和润滑的科学技术,综合成为一门新的学科,并创造一个新词“摩擦学”(Tribology)来命名这个学科。按照英国韦勃斯特新大学词典对摩擦学给出的定义:它是涉及在相对运动中相互作用表面的设计、摩擦、磨损和润滑的一门科学。显然,这一新学科包含的是一个内容比较宽广而又跨学科的研究领域。

摩擦学在节约能源、降低材料消耗和减少磨损失效的损失等方面,具有巨大潜力。在著名的乔斯特报告中指出,仅通过现有摩擦学知识的广泛应用,能使英国工业每年节约五亿一千多万英镑。据最近的报道,近年来英国工业每年的实际节约数字,已超过七亿英镑。美国机械工程师协会润滑研究委员会在它的“依靠摩擦学节约能源的策略”一文中估计,采用摩擦学技术可使美国每年的能源消耗节约11%,1976年价格约为一百六十亿美元。苏联、西德、日本等其它工业国家,也有类似的估计数字发表。在我国,中国机械工程学会的摩擦学专业学会近年来曾多次进行了工业调查。在它于1986年发表的“全国摩擦学工业应用调查报告”中指出,1984年全国工矿企业在摩擦、磨损和润滑方面的节约潜力,估计可达一百七十六亿美元,约占当年全国国民经济总产值的1.37%,到本世纪末的2000年,应用摩擦学技术在全国工矿企业中的节约潜力,将达到四百亿元。报告中还提到,摩擦学技术的推广应用,可用较少的投资取得巨大的经济效益,其投入产出的比例大约为1:50。正是由于摩擦学在节约能源和材料等各方面的重大作用,这一新的学科从60年代诞生以来的二十余年间,已经取得了飞速发展。在国外,它甚至被说成是当代技术科学中一门虽还年青、但发展最快的学科。

与研究工作的迅速发展的同时,摩擦学的教育工作,也在许多国家受到重视和发展。有人认为是,70年代把摩擦学列入工程师的常规教育计划,是摩擦学发展史上一件十分重要的事件。在许多工业国家是如此,在我国也并不例外。近十年来,在我国的工科大学里把摩擦学作为一门独立课程开设的已逐渐多起来了。有不少学校还根据自身的需要与条件,编写了若干种颇有特色的摩擦学教材。我们现在提供的这本教材,就是武汉工学院为了对全院各工程专业的本科高年级学生,开设摩擦学课程而编写的讲义,经过多年试用和几次修订而成的。

今天的工科大学学生,应该对摩擦学与整个机械化社会的重要关系,有一个基本认识,为此,让他们对摩擦学的一些主要的基础理论知识,有一个概括的理解是十分需要的。这本教材的内容已经包括了摩擦学领域的各个主要方面,如接触表面、摩擦和磨损机理、各种润滑状态及其基础理论、润滑剂、摩擦磨损测试方法和摩擦学的系统分析等。应该指出,摩擦学的领域比较宽广,要在篇幅有限的教材中包括本学科的全部主要内容是并不现实的。这本教材在内容取舍上,注意了保干删枝、并保持适当的广度和深度,因而我们有理由相信,读者能够从中获得摩擦学最根本的基础理论知识,有助于加深对本学科重要性的认识。

本书的摩擦磨损测试方法部分由姜范卿编写,摩擦和润滑材料由杨代华编写,系统分析由石利英编写,其余由肖祥麟编写。

黄文治

1989年5月于武汉工学院

目 录

第一章 绪论(1)	二、其它的表面性能测量仪器.....(17)
第一节 研究摩擦学的意义.....(1)	(一)俄歇电子能谱仪 (AES).....(17)
一、摩擦学的定义.....(1)	(二)X-射线衍射仪.....(17)
二、研究摩擦学的意义.....(2)	(三)电子显微探针分析仪.....(17)
第二节 摩擦学的主要研究内容.....(4)	(四)显微硬度计.....(17)
第三节 摩擦学与机械设计的关系.....(5)	三、实际接触面积的测量.....(17)
第二章 接触表面(7)	第三章 摩擦(19)
第一节 表面现象.....(7)	第一节 摩擦的分类.....(19)
一、表面力.....(7)	第二节 摩擦理论.....(19)
二、表面张力和表面自由能.....(7)	一、简单的粘着理论.....(20)
三、吸附.....(7)	二、修正的粘着理论.....(20)
四、润湿作用.....(8)	三、金属表面有污染膜时的粘着理论.....(21)
五、粘着.....(8)	四、粘着理论中的犁沟影响.....(22)
第二节 表面性质.....(9)	五、其它摩擦理论.....(22)
一、典型表面层.....(9)	第三节 影响摩擦的因素.....(25)
二、表面形貌.....(9)	一、硬度.....(25)
三、表面参数.....(9)	二、压力.....(25)
第三节 表面接触.....(10)	三、名义接触面积.....(25)
一、赫芝接触.....(11)	四、相对滑动速度.....(25)
(一)两圆柱体的接触.....(11)	五、温度.....(26)
(二)两任意曲面体的接触.....(12)	六、表面膜的影响.....(26)
(三)球与平面接触时的相对接近量.....(12)	七、粗糙度.....(26)
二、粗糙表面的接触.....(13)	第四节 特殊工况下的摩擦.....(26)
(一)各微凸体具有相同高度的情况.....(13)	一、真空中的摩擦.....(26)
(二)微凸体高度按指数规律分布的情况.....(14)	二、高速下的摩擦.....(26)
(三)接触变形的性质的判断.....(15)	三、高温下的摩擦.....(27)
第四节 表面参数的测量.....(15)	第五节 滚动摩擦.....(27)
一、表面微观几何形状的测量.....(15)	一、机理.....(27)
(一)电子显微镜.....(15)	(一)微观滑移.....(27)
(二)轮廓仪.....(16)	(二)弹性滞后.....(28)
	(三)塑性变形.....(28)
	(四)粘着效应.....(28)
	二、滚动接触的类型.....(28)

(一)自由滚动.....(29)	验机.....(47)
(二)同时承受切向牵引力的滚动.....(29)	一、试验分类.....(47)
(三)槽内滚动.....(30)	二、常用的试验机.....(47)
(四)沿曲线滚道滚动.....(30)	第十一节 减少磨损的措施.....(48)
(五)车轮转弯.....(30)	第十二节 失效分析.....(50)
第六节 各种材料的摩擦.....(31)	第五章 流体动压润滑(54)
一、聚合物和塑料的摩擦.....(31)	第一节 收敛楔的作用.....(55)
二、层状固体的摩擦.....(32)	第二节 雷诺方程.....(55)
三、金刚石的摩擦.....(32)	第三节 雷诺方程的推导.....(56)
四、橡胶的摩擦.....(33)	第四节 固定瓦推力轴承的流体动压润滑.....(59)
第七节 摩擦阻力的测定.....(33)	第五节 径向轴承的流体动压润滑.....(63)
第四章 磨 损(35)	一、静态性能参数计算.....(63)
第一节 磨损的分类.....(35)	(一)几何参数.....(63)
第二节 粘着磨损.....(35)	(二)径向轴承适用的雷诺方程.....(64)
第三节 磨粒磨损.....(37)	(三)边界条件.....(64)
第四节 疲劳磨损.....(39)	(四)无限宽轴承的承载能力、偏位角及摩擦力.....(65)
第五节 腐蚀磨损.....(40)	(五)摩擦.....(68)
第六节 其它类型磨损.....(41)	(六)无限短轴承的计算.....(70)
一、微动磨损.....(41)	(七)有限宽轴承.....(70)
二、侵蚀磨损.....(42)	(八)油流量.....(71)
第七节 影响磨损的各种因素.....(42)	二、动态问题.....(72)
一、与作用在摩擦表面上的机械作用有关的因素.....(43)	第六章 弹性流体动压润滑(74)
二、与周围介质有关的因素.....(43)	第一节 马丁理论.....(74)
三、与摩擦表面材料性质有关的因素.....(43)	第二节 线接触弹流润滑机理.....(75)
第八节 磨损过程及磨损量的测定.....(43)	第三节 弹流理论的基本方程.....(76)
一、磨损过程.....(43)	一、弹性方程.....(76)
二、磨损量的测定.....(44)	二、流体动压润滑方程.....(77)
第九节 磨损规律在设计中的应用.....(44)	三、压粘方程.....(77)
一、IBM公式.....(44)	四、能量方程.....(78)
二、用 PV 值来限定特定条件下的磨损量.....(45)	第四节 方程组的解.....(78)
三、设计时的注意事项.....(45)	一、格鲁宾理论.....(78)
四、计算零件使用期限.....(45)	二、道森理论.....(78)
第十节 摩擦磨损试验方法及试	第五节 各种润滑理论的应用范围.....(79)
	第六节 弹流润滑的测试.....(80)
	一、电阻法.....(81)

二、放电电压法·····	(81)	四、润滑油添加剂·····	(92)
三、电容法·····	(81)	第二节 合成润滑油·····	(95)
四、X射线法·····	(81)	一、合成润滑油的种类·····	(95)
五、压力和温度的测量·····	(82)	二、合成润滑油的特点·····	(95)
第七节 弹流理论的应用·····	(82)	三、合成润滑油的应用·····	(95)
一、道森公式的适用范围·····	(82)	第三节 润滑脂·····	(99)
二、渐开线齿轮的弹流油膜厚度公式·····	(82)	一、组成·····	(99)
三、举例·····	(83)	二、主要质量指标·····	(100)
第七章 边界润滑 ·····	(84)	三、润滑脂的选用·····	(101)
第一节 概述·····	(84)	第四节 固体润滑剂·····	(103)
第二节 边界润滑机理·····	(84)	一、分类·····	(103)
第三节 影响边界润滑性能的因素·····	(85)	二、优缺点·····	(103)
第四节 提高边界膜强度的方法·····	(85)	三、用途·····	(103)
第八章 润滑材料 ·····	(86)	四、固体润滑剂的使用方法·····	(104)
第一节 石油润滑油·····	(86)	第九章 系统分析 ·····	(105)
一、石油润滑油的组成·····	(86)	第一节 系统概念·····	(105)
二、润滑油的理化性质·····	(86)	第二节 系统概念在摩擦学方面的应用·····	(107)
三、润滑油的测试项目·····	(92)	第三节 应用实例·····	(109)
		参考文献 ·····	(112)

第一章 绪 论

第一节 研究摩擦学的意义

一、摩擦学的定义:摩擦学(Tribology)是研究相对运动的相互作用表面之间的摩擦、磨损和润滑的理论及应用的科学和技术。

相对运动可以是滑动、滚动、冲击、振动等任何一种运动形式,也可以是上述几种运动形式的结合。

这里所说的表面,是指两个接触物体的接触表面(界面)。而所谓接触是指直接接触和间接接触。摩擦学不仅研究两个固体表面直接接触时界面的情况,而且研究间接接触时界面的情况,亦即用流体层隔开而减少或避免了两个固体表面直接接触时的情况。

相互作用是指作相对运动的表面之间,由于接触而发生的吸附、粘着、变形、开裂、材料转移或脱落等由摩擦引起的后果。

当两物体接触时,存在阻碍接触表面发生切向相对运动(或运动趋势)的现象,称为摩擦。这时的接触表面称为摩擦表面。对相对运动的阻碍程度常以阻力的大小来度量,称为摩擦阻力,简称摩擦力。

摩擦过程中,接触表面的物质不断损失或产生残余变形的现象称为磨损。

用润滑剂减少两摩擦表面之间的摩擦、磨损或其它形式的表面破坏称为润滑。润滑剂是加入到两个摩擦表面之间来减少摩擦和磨损的任何物质(固、气、液态)。

用液体或气体进行的流体润滑是以各种方法在两表面之间保持一层充分厚的流体膜,把摩擦表面隔开。各种固体润滑剂有它独特的作用原理。

摩擦学仅仅名词是新的,摩擦学现象普

遍存在于一切生活和生产实践之中。甚至早在人类有文字记载的历史之前,人们就对摩擦学所涉及的内容十分关注。但对它们进行研究则还是近代的事,例如:

(一)对于摩擦现象的研究始于达芬奇(Leonardo da Vinci 1452~1519),他用大理石做实验,指出:“对于两光滑表面,刚开始滑动时摩擦阻力相等,此摩擦阻力的大小为重量的1/4,而与接触面积无关”,达芬奇说明了摩擦阻力与法向载荷(重量)成比例,比例常数(摩擦系数)为0.25。

1699年,阿蒙顿(G. Amontons)在大量实验的基础上建立了两个定律,第一定律为:“滑动摩擦阻力的大小与接触面间的法向载荷成正比,即 $F = \mu N$,式中 F 为摩擦力, N 为法向载荷, μ 为摩擦系数,它反映能量消耗,与相互作用的材料副有关。第二定律为:滑动摩擦阻力的大小与接触面积无关。

1780年库仑(E. Coulomb)区别了静摩擦和动摩擦,得出了第三定律,动摩擦力与滑动速度无关,这三条定律作为公理一直延用到今天。但是实践表明,对于很光滑的表面,摩擦力将反而随表面光洁度的提高而加大,对于纯净的光滑表面,由于在接触表面之间出现强烈的分子吸引力,摩擦力将与接触面积成正比。而且,当滑动速度较大时,摩擦力与速度有关(一般情况下,摩擦系数随滑动速度增大,越过一极大值后,又随滑动速度的增加而减少)。对于一些极硬(如钻石)或软(如聚四氟乙烯)的材料,摩擦力与正压力之间会出现非线性的关系。此时 $F = CN^p$, C 为常数, $2/3 \leq p \leq 1$ 。

所以,上述古典的摩擦三定律,只能近似地反映摩擦现象的规律,其实际应用存在

一定的局限性。而且，摩擦三定律也并不能包括全部摩擦现象的规律，因此，必须对摩擦加以研究。

(二)研究磨损是最近几十年的事。1929年德国的 Fuchsel 认为金属的磨损过程是，首先表面变形，然后变形的金属脱离金属表面。后来(1942年)Fink, Mailander和 Dies 等发现，变形的金属在磨损过程中可能氧化。他们强调环境条件对金属磨损的重要影响。到五十年代，对磨损的研究有了新的发展，Kerriage 指出，金属磨损可能发生在氧化之后，这种金属氧化层的磨损过程表现为缓慢的磨损。与此相反，基体金属材料发生转移时，便形成剧烈的磨损。对于金属表面的缓慢磨损，阿恰尔特 (Archard) 曾得出磨损的经验定理，即磨损量与载荷和滑动距离成正比，而与较软材料的硬度成反比。

由于磨损过程的复杂性，目前的研究还处于初始阶段。

(三)对于润滑的研究，1886年雷诺 (Osborne Reynolds) 论证了产生流体动压力的原理，为润滑技术奠定了理论基础。1902年斯屈贝克 (Stribeck) 在详细研究了滑动轴承和滚动轴承中载荷、速度等运转因素对润滑和摩擦的影响后，得出了 Stribeck 曲线见图 1-1，后来被广泛用来描述润滑的普遍特

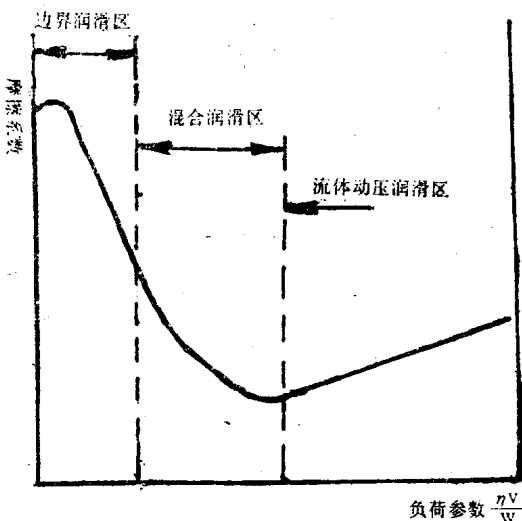


图 1-1 斯屈贝克曲线

性，即摩擦系数是润滑油粘度、滑动速度和载荷的函数（所谓粘度是流体受外力作用而流动时，分子间所呈现的内摩擦或内阻力），于是，产生了流体动压轴承的工程设计准则。但是，当单位面积上的压力很大，相对速度很低时，很难建立足够厚度的油膜来把两表面隔开。这时，有一部分表面可能只覆盖仅一、二个原子厚度的油膜，成为“边界润滑”状态，它的润滑作用决定于润滑剂的化学构成，因此产生了用于润滑剂的极压、抗磨等各种添加剂。

当机械在高速、重载、高温条件下工作时，摩擦表面间的接触应力高达几万大气压，引起金属表面几何形状的改变，连润滑剂的粘度也发生了变化。这时，雷诺方程已不能适用；1949年格鲁宾 (Грубин) 提出了弹性流体动力润滑理论。五十年代末，道森 (Dowson) 和希金森 (Higginson) 用电子计算机求得了数值解，得到了精确计算油膜厚度的公式，并为实验所证实。这些工作，有助于解决高副接触（齿轮、滚动轴承等）的润滑问题。

二、研究摩擦学的意义：摩擦是造成能量损失的原因，它引起磨损降低机器的寿命和可靠性，据估计，世界上的能源约有 1/2~1/3 以各种形式消耗在克服摩擦上。突出的例子如纺织机械的摩擦损失占整个功率的 85%。

磨损造成的损失更为严重，美国 1977 年估计，磨损造成的损失约为二千亿美元，相当于国民经济总产值 12%，西德估算 1975 年的损失相当国民经济总产值的 1%，苏联整个机器制造部门每年的磨损损失为 100~120 亿卢布。由于损失很大，所以开展摩擦学研究和应用有很大的节约潜力。1965 年英国以乔斯特 (Jost) 博士为首的调查组的报告认为，英国只要充分地运用现有的摩擦磨损和润滑知识，十年内每年可节约 5.12 亿英镑（最近几年实际已每年节约 7~10 亿英镑）。美国估

计,大力开展摩擦学研究,采取摩擦学措施,每年可使美国节约能量消耗11%,相当国民经济总产值的1%。西德估计,积极采用已有的摩擦学知识,50%的摩擦磨损损失可以避免,即每年可节约50亿马克。

我国1984年底对8个行业、地区作了一次调查,初步结论为,如果正确合理地运用摩擦学知识,到2000年止,每年可节约400个亿,相当于国民经济总产值的1.2%。

从上述数字(虽然不一定十分精确)可以看出,开展摩擦学研究对国民经济的发展有着重要的作用。因此近年来,世界各工业国的摩擦学研究进展十分迅速,对延长机器的使用寿命、提高其可靠性、节约能源、减少设备的停修和维修费用,收益很大,这也促进了摩擦学的发展。

我国的摩擦学研究与应用,与国外相比,还有较大差距,主要表现在以下两个方面:

(一)典型基础件的使用寿命比国外低,如在石油和天然气的钻井中,我国钻一口井要消耗200多个钻头,而国外只需70~80个钻头;磨煤机磨辊辊套,国内最高寿命为5200小时,而国外可达18000小时;轧钢机轴承,我国质量好的平均可轧钢50~60万吨,日本的可轧钢200~300万吨;机床的梯形螺纹丝杠,国内可使用3年,美国可正常使用10年;矿井提升减速器齿轮,国内的使用寿命一般为5~10年,国外为20~30年;石油钻机刹车片,国内一副刹车片只能起、下钻30次,国外一般能起、下钻70~80次。在农机基础件的寿命方面,一般只相当于国外同类产品的1/2~1/3。

基础件的寿命低,给国民经济的发展带来了一系列影响:

1. 直接影响机械设备的使用性能和可靠性(用精度保持性和故障发生率来衡量)。例如,机床的导轨、精密丝杠等的磨损会降低机床的加工精度和光洁度;缸套活塞环、液压元件等因磨损增大了配合间隙,会使其机

械效率下降;矿井提升机、石油钻井绞车、拖拉机、汽车等的制动,若变质或磨损严重会使制动失灵,造成事故;食品加工机械的严重磨损会使食品污染,不符合卫生标准(如面粉中的含铁量超过标准)严重影响人民群众的身体健康。

2. 影响机械设备的完好率和利用率,进而影响生产效率,据调查,有些单位的工程机械,由于磨损及其它原因,经常有一半处于维修状态。据四川某气井统计,钻一口3280米深的气井,总工时4747小时中,纯钻进工时仅1760小时,因为牙轮钻头磨损需要更换,起、下钻头的工时占1323小时,接近钻头的工作时间。尤其是一个电站的发电机组轴承失效,不但造成电站本身停工损失,还会使一系列工厂停工,造成连锁反应。

3. 增加了备件消耗量和储备量,占用了生产能力和投资,影响了再生产能力的扩大,消耗了大量的材料、人力和资源,如生产的轴承中,用于维修的约占40%,汽车配件中2/3用于维修。纺织厂的备件更多。

4. 影响了新技术的应用和新产品的发展,例如隧道联合掘进机是一种高效率的隧洞开凿设备,但由于刀具磨损严重及其它原因,掘进几十米就需要更换刀具,频繁的修复和更换刀具,使设备不能连续运转,根本不能发挥其巨大潜力,因此长期来该掘进机不能批量投产。又如,某厂曾试制一种强制式混凝土搅拌机,效率高,搅拌质量好,但由于叶片和衬板磨损极其严重,仅能使用1~3个月,工地不欢迎,影响其推广使用。

5. 造成巨大的经济损失,基础件寿命低所造成的损失不仅是磨损件的费用,还应考虑停机损失,储存备件所造成的资金积压,配件生产所占用的生产能力和投资及其对扩大再生产的影响,如一米七轧机停产一天就损失500万元,30万合成氨装置停产一天就损失80万元。

(二)能源损失大。例如,由于摩擦副的磨

损大,密封性差,使我国润滑油的耗量很大,美国每辆汽车平均每年消耗润滑油 16 公斤,而我国高达 130 公斤,为美国的 8 倍。如火力发电汽轮机组耗于自身轴承的能量,国外平均为 0.3~0.5%,而国内有的要达 0.6~0.7% 或更高,还不包括为了带走这部分能量变成的热能所需要的循环冷却设备的功耗。

总之,无论从四化建设的需要,还是从满足今后国民经济及科学技术发展的要求来看,必须全面地深入地开展摩擦学及其应用的研究。

第二节 摩擦学的主要研究内容

从达芬奇到雷诺,都是从力学角度来解释摩擦学现象,实际上,摩擦学是一门跨学科的边缘学科,它涉及到数学、物理、化学、材料科学、冶金学、力学、热力学、机械工程、石油与化学工程等学科,并不能用力学完全概括。

因此,摩擦学研究下列内容:

一、研究接触表面以及接触表面作相对运动时由相互作用引起的摩擦磨损现象。研究表面时,必须先研究单个表面性质、形貌、参数和评定方法,然后进一步了解两个表面接触时相应的作用,它们在加载时的位移、接触情况、热效应等。而当两表面之间还有相对运动时,对于所引起的摩擦与磨损,则必须研究它们的机理、影响因素以及控制摩擦与磨损的措施。研究摩擦与磨损时,必须了解它们的特点与相互关系。摩擦表现为对相对运动的阻碍作用,表现为能量损失,表现为发热以及由发热所引起的一系列问题。磨损则表现为界面材料的不断损失或产生残余变形,表现为机器零件的表面质量和尺寸形状的改变,表现为摩擦副工作状态的改变。

摩擦和磨损是摩擦副中同时存在的既有联系又有相互影响,但又各不相同的两个问题。说它们有联系,是因为摩擦和磨损都与

摩擦副的工况有关,说它们是不同的两个问题,是因为磨损和摩擦之间并没有一定的规律。例如圆销与圆环的摩擦与磨损试验,从表 1-1 可知各种材料的摩擦系数变化不大,而磨损率却相差很大,或者说材料在使用一段时间后,摩擦会减小而磨损却增加。在工业应用中,磨损效应比摩擦损耗更重要,这是因为前者往往带来严重的经济后果,而如果机器的摩擦较大,尽管运行费用有所增加,但只要能提高机器的耐磨损寿命,就可以得到补偿。因此机械设计时必须进行耐磨损设计,以求降低接触表面的磨损。

表 1-1 圆销与圆环的摩擦与磨损试验

材 料	摩擦系数	磨 损 率 厘米 ³ /厘米 ² ×10 ⁻¹²
1. 软钢对软钢	0.62	157,000
2. 60/40 铅黄铜	0.24	24,000
3. 聚四氟乙烯	0.18	2,000
4. 钴钨铬合金	0.60	320
5. 铁素体不锈钢	0.53	270
6. 聚乙烯	0.65	30
7. 碳化钨对碳化钨	0.35	2

注:载荷 400 公斤,速度 180 厘米/秒,除试验 1 和 7 外,圆环材料均为淬火工具钢。

研究摩擦与磨损时,必须强调指出,用摩擦系数来表征能量消耗(代表运动阻力)时,由于两表面总是互相制约的,因此摩擦系数这一类参数必定与相互作用的材料副相关联,单讲钢的摩擦系数而不考虑与之相配的固体材料,是不科学的,会使人误解。并且,在许多工程中,摩擦与磨损并不总是有害的,制动器、离合器、火车和汽车的驱动轮、螺栓和螺母之间的紧固都是靠摩擦。同样,初期磨损(磨合)使零件能更好地工作。

二、研究润滑,必须研究包括流体动压润滑、静压润滑、边界润滑、弹性流体动压润滑等在内的各种润滑理论及其在实践中的应用。不能把润滑狭义地理解为给机器“加加油”。据估计约有 40% 以上的设备故障是由于润滑不良引起的,那种凭经验甚至盲目使用润滑油(脂)的情况是不能允许的,由于选用什么润滑材料、采用什么润滑方式和润滑

系统,以及如何进行润滑管理等,都是与提高机件的耐磨性、可靠性及降低维修费用有着密切关系,因此正确的润滑设计是机械设计中必需解决的摩擦学问题之一,它包括运动副的材料选配、润滑剂选择、结构合理性等等内容。而在特殊工况(高温、低温、真空、辐射和特殊介质环境)下的润滑技术常常成为尖端技术的关键。

因此,研究摩擦学要开展对摩擦磨损的基础理论、润滑原理、润滑材料和润滑技术,以及耐磨、减摩材料和表面处理工艺等方面的研究,以便围绕提高机器使用性能、寿命、可靠性、经济性和节约能源等问题,结合具体产品或典型摩擦副解决生产实际中出现的问题。

近年来,随着摩擦学基础理论和磨损失效机理研究的进展,随着电子计算机和表面微观分析仪器及测试技术的发展,摩擦学研究正在由宏观发展到微观,从定性发展到定量,从静态发展到动态,从单项研究转向系统的综合研究,一步步地弄清摩擦、磨损和润滑的机理,逐步走向以理论来预测和控制摩擦磨损的目标。

第三节 摩擦学与机械设计的关系

人们虽然很早就关注和利用摩擦学的现象,但是在机器的设计阶段,摩擦学问题却并没有受到应有的重视。人们总认为力学等是机械设计的基础。例如设计水轮发电机时,对水轮机的水力学、力学、电磁学等方面的问题考虑得十分周到,而对于摩擦学问题常常只凭经验略加核算。但实践证明,毛病恰恰是常常出在摩擦磨损和润滑方面。为了减少机器因摩擦磨损或润滑方面的问题而出现故障,设计者缺乏摩擦学知识是不行的,必须将摩擦学的结论作为设计的中心观点之一,整个设计特别是结构设计都应围绕这一中心观点而展开,这样设计出来的机器,它的可靠性和效率就会高得多。例如,滚动体间存在

油膜的现象是在光洁度和精度都很高的齿轮上发现的,油膜厚度可应用弹流理论具体计算。有油膜存在便可延长齿轮寿命,但由于这种油膜非常薄(微米数量级),设计者要利用它也不太容易。于是,对设计者来说,就必须考虑如何设计才能使齿间存在较厚的油膜,并且应该知道,各种润滑油的粘度在常压下差别并不大,但在高压下,却有很大的差别。因此,要根据高压下的粘度来选用润滑油。不过,在蜗轮蜗杆的设计中,并非选用高压下粘度愈高的油愈好,因为它使效率降低,发热增加,而发热量对蜗轮蜗杆设计是一个非常敏感的问题。假若蜗轮传动的效率由90%提高到95%,从减少功率损失来讲似乎不过减少5%,无关大局,但由于使变成热能的功率由10%减少到5%,正好减少50%,在一定温升条件下,有的时候传动功率竟可提高一倍,因此设计制造蜗轮时,要考虑油的性能,使其仅在高压区由压力产生高粘度,以便形成油膜来保护表面,但在高压区之外的地方,仍希望粘度低,不产生过大阻力,以极力提高其效率。

还可以举一个例子,几十年前,英国的Austin作过试验,想以摩擦变速器代替齿轮变速箱,这种摩擦变速器是无级变速的,能使发动机经常在最合适速度运转,可以使汽车获得最好的加速性能,也便于自动改变速比,但实际上却不能使用,因为传动能力太

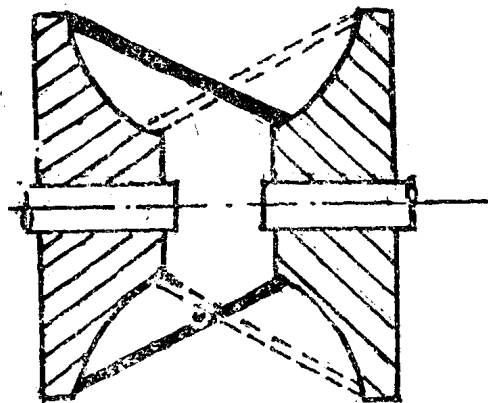


图1-2 无级变速器

小，以致会使变速器很庞大。这种变速器见图 1-2。

但是目前，有人在这样的变速器中用了特殊的润滑油，由于接触面上存在着高粘度油膜，所以磨损很小。这时，油已经不能简单地看成是润滑剂，而应该认为是最重要的结构件，整个设计都是围绕着油的性能而进行的。

还有，设计大型曲轴压床上用的轴承时，由于这种轴承的承载特点是往复的或间隙的，负荷是瞬时的大负荷，两次载荷之间有一定的间隔时间，故设计时并不是使轴承的承载能力大于外载荷，而是采用下述设计准则，使油由轴承间隙中被挤出来所需的时间长于负荷持续作用的时间，即在油膜还有一定厚

度时，负荷就消失了，所以轴承就不会损坏，也就是说，设计这类轴承时，是按油膜寿命而不是按油膜强度设计的。

此外，过去认为轴承必须用金属材料做成高精度。但从摩擦学的观点看，轴承具有过高的硬度是有害的，因为它会妨碍建立油膜，而且除非将它作得很精密，便无法使金属表面间形成产生动压油膜所需的形状。最理想的轴承结构是一薄层低泊松比的弹性材料上加一层致密材料(不一定是金属)，这种轴承即使精度不太高也能获得完全润滑。

以上的几个例子，已可说明摩擦学的结论必须成为设计时的中心观点之一，而不能把摩擦学问题留待机器的使用阶段再去考虑和解决，否则就被动了。

第二章 接触表面

外观看来似乎平整的金属固体表面，其微观几何形貌恰是凹凸不平的。而且是由若干层具有不同物理、化学性质和机械特性的表层构成。表面轮廓的微观几何形貌及表面结构等合称为表面性质，是研究两表面之间发生的各种相互作用时必须考虑的基本因素。特别是它影响表面之间的接触状况，因而对摩擦磨损有重要影响。

第一节 表面现象

一、表面力：任何物质都是由原子及分子组成。原子(或分子)之间的强大吸力使固体具有硬度和强度。这些吸力使原子和分子靠得非常紧密。为了简便起见，把原子或分子看作是坚硬而不可压缩的单元，但是当它们相互压紧时，它们实际上必定会产生少量变形，这样就产生了一个斥力，正好与吸力相互平衡。斥力只是在原子或分子相接触时才会发生，因而斥力亦称为“短程”力，原子或分子隔着很长一段距离相互吸引，因而吸力亦称为“长程”力。在自由运动状态下，原子或分子将在吸力的作用下接近，在相互接触时产生微量变形，以致斥力与吸力互相平衡。可用图 2-1 表示两个铜原子间的力，只有在两个原子刚好接触或即将接触时才会产生斥力，这些斥力随着原子的压紧(例如间距小于 3 \AA) 而急剧增大，因此表示斥力的曲线 B 是很陡的。另一方面，吸力则随着原子间距的改变而平缓地改变，它随着间距的增大而减小。表示两个原子间合力的曲线是斥力与吸力的和，图上用实线表示。P 点的合力是零，即斥力和吸力正好平衡，原子间距 OP 是平衡间距。当外力能完全克服原子之间的吸力时(也就是图上 Q 点的情况)，材料发生

断裂。

摩擦学所说的分子力就是一种吸力，亦称范德华引力。

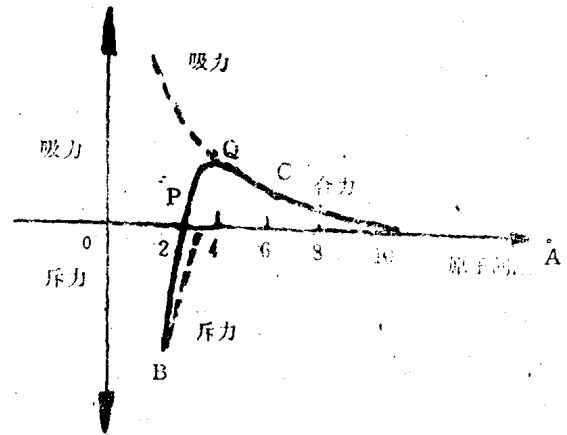


图 2-1 原子之间的力随间距而变化的曲线图

二、表面张力和表面自由能：表面张力可用分子吸力来解释，液体存在表面张力，是因为在液体内部，分子受到来自各个方向的相等的力，但在表面的分子受到不平衡的引力，结果表面受到向内的拉力，使液体表面都有自动收缩的趋势，收缩趋势的大小以表面张力(与表面平行的张力)的大小表示。

当把表面层比做一个扩展的薄膜时，它与扩展的弹簧相似。弹簧在扩展时需要对它做功，扩展的弹簧储存了能量。而弹簧卸荷时，放出储存的能量，因而，可采用表面自由能这个概念。它是由于表层分子受到向内部(即垂直于表面)的拉力引起的。这个概念可应用于固体与液体。它已成为探讨摩擦磨损问题的线索。

三、吸附：由于两相之间界面上的吸引力而形成的不同于两相成份的一个物质层，称为吸附层。被吸引的物质称为吸附物，负责吸引的相称吸附剂，吸附层有它自己的特

点,在液体/气体或液体/液体界面上,吸附程度能以所产生的表面张力的变化来确定,但它不适用于固体表面的吸附情况。当固体吸附气体时,由于固体的晶格类型不同,固体的吸附力也不同。和液体一样,固体表面也是不饱和的,表面原子所受到的力不对称,即固体表面有过剩的能量(表面自由能),所以固体表面可以吸附气体和液体分子。

固体对气体或蒸气的吸附有物理吸附和化学吸附两种,物理吸附是由固体和气体间的范德华引力引起的吸附,在压力稍高时,可形成多层吸附,这种吸附能较弱,是可逆的,在一定温度条件下可以解吸。

化学吸附是指固体表面(吸附剂)的分子与气体(吸附物)分子间交换电子(形成离子键)或共同占用电子(形成共价键),而在固体表面上形成新的化合物的过程。

化学吸附只局限于单原子层或单分子层的范围,其进行速度较慢,是不可逆的过程。

固体吸附气体的典型例子是金属对氧的吸附,通常金属都吸附氧,形成氧化膜,氧化膜的厚度至少有 $5\sim 10\text{ \AA}$,最大可达到 $200\sim 400\text{ \AA}$ 。厚度在 $200\sim 400\text{ \AA}$ 之间的氧化膜已经可以改变金属的外貌。厚度再继续增加,就可使表面具有氧化物所固有的颜色。

氧化膜对金属之间的摩擦影响很大。氧化膜有润滑效应,可降低固体表面的“粘着”(见下节),使摩擦系数下降。以镍在钨上滑动为例,经 1200°C 除气后,摩擦系数由正常值 0.3 上升至 $5\sim 6$ 。但是通入空气后,摩擦系数又下降,几小时后,摩擦系数回到 0.3 。此外,不同类型的金属氧化膜的性质(硬度、致密度、韧性等)是不同的,对摩擦系数的大小有影响。 Al_2O_3 膜在很大的负荷范围内,其摩擦系数都约为 1.2 。但铜的氧化膜,当负荷小时(0.1 克),摩擦系数约为 0.4 ,负荷大于 100 克时,摩擦系数增至 1.8 ,这是由于

大负荷引起氧化膜破裂,使金属与金属接触的面积增大之故。

一般情况下,在金属的吸附膜的表面,还会因为受环境的污染而生成污染膜。

四、润湿作用:在固体表面上放置的液滴,通常倾向于呈现图2-2所示的形状。图中的 θ 称为接触角。当固体表面的分子与液体分子之间的引力大于液体分子间的内部引力时,接触角接近于零,液体铺开在表面上。当液体分子间的引力大于固体表面和液体之间的引力时, θ 为某一特定值,于是可用接触角作为润湿作用的量度。 $\theta=0$ 为完全滑溜, $\theta=180^{\circ}$ 为无润湿,此时液滴近似球形。

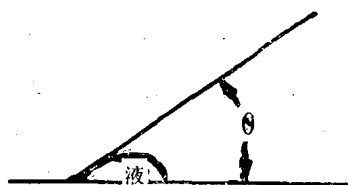


图2-2 置于固体表面的液滴

固体表面与液体之间的接触角,受固体本身的表面性质以及吸附层和表面活性物质(溶于水后,能显著降低水的表面张力的物质,叫表面活性物质)等因素的影响。一般说来,润湿度极大地依赖于表面活性物质的存在。如矿石浮选过程中,通常加入黄原酸钠及二硫代磷酸酯等表面活性物质,它易被矿苗吸附,使矿物的表面成为不被液体润湿的憎液性固体,再通入气体,矿末所附的气泡就浮至液面,而矿渣仍留在底部,于是把两者分离开来。

在钟表和仪器的润滑中,润滑剂能否长期保留在枢轴的油孔中是很重要的,为此可利用添加剂使润滑油有良好的反铺开性质。相反,使用渗透油时,要利用油的湿润性和渗透性。

五、粘着:两表面之间的吸引力,只在表面距离很小时才显著。当把两个表面压在一起时,由于吸引力的作用,表面之间会发生粘着现象,表面粗糙度愈小,则两表面接

触得愈紧密,于是大件物体也能粘着,例如两片光学平板玻璃,用苯清洗后,加适当的压力叠合,它们就粘合在一起,这是因为压力使接触点变形,逐渐增大了接触面积,因而增大了粘着力。一旦结合后,要分开这两个表面,就必须加很大的法向拉力,当这样的表面作相对运动时,摩擦和磨损是很厉害的。不过,实际上,表面能高的表面会很快形成表面吸附,而吸附层会大大减小摩擦。如果能去除这些吸附膜,就可能只用压力就可把两个很好地抛光过的表面焊接在一起。这时内聚力开始起作用,这就是金属冷焊的原理。通常焊接中加高温的目的并不是增加单位面积的粘着力,因为它与温度无关,而是为了要增加金属的塑性,使之变形以加大接触面积。锻焊则是在锻造中,一面增大接触面积,一面清除氧化物,从而把金属焊接起来。

这种粘着,在多晶材料二元合金及单相材料中都有。但实际发生的粘着如此之少,是因为:A)实际接触面积很小;B)表面被污染;C)残余弹性应力使粘着接点破裂。其中以C)为最重要,因为一旦去掉把两个表面压在一起的载荷,弹性应力就使两个表面在某种程度上恢复原有的曲率半径,使实际接触面积变得很小。

第二节 表面性质

一、典型表面层:金属在大气中可能形成的典型表面层如图 2-3。在基体材料的上部为变形层(25~60 微米),它是金属表面在使用切削刀具(或磨轮等)加工的过程中,由于产生了弹性变形、塑性变形和局部高温使晶格歪扭而成的加工硬化层。它硬度较高,有残余应力,并且金相组织发生了很大变化。

在变形层上部为贝氏(Bielby)层(0.1 微米厚),它是由于切削加工中分子层溶化和表面流动而成的冷硬层;具有非常细的结晶组织,对形成高的表面耐磨性具有重要作

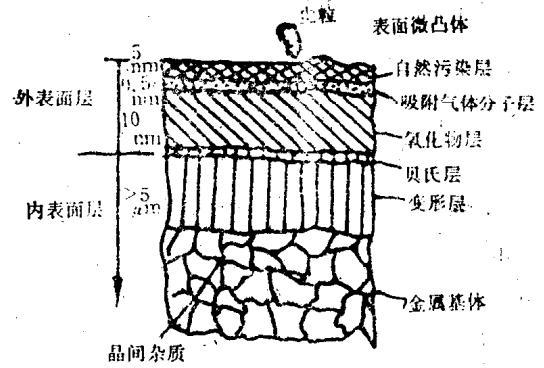


图 2-3 金属表面示意图

用。

在贝氏层的上面还有氧化层(0.01~0.1 微米),是空气与金属起化学反应生成的产物,这一层能起保护金属降低摩擦和磨损的作用(也有的增加摩擦,加速磨损)。

实际上,在氧化层外面,还有 0.5 毫微米的吸附气体层,在它外面常有环境中沉积的尘粒,磨损碎屑等形成的污染层,约 5 毫微米。

二、表面形貌:要加工出真正平滑的表面是极其困难的,这是由于加工过程中有变形、振动等原因影响加工质量,还有材料本身的原因,例如,工程中常用的金属往往是由多晶物质组成的,而晶体通常含有不同的组分,并且按无规方向排列。某些晶体比其它晶体硬,或其表面处于较难变形的方向,因此对这种材料进行抛光时,表面的某些部分会比其它部份容易磨去。即使是纯金属的单晶体,从原子角度看,基本上光滑的原子平面也会含有缺陷,这些缺陷产生了局部软化区,因而在抛光时首先被磨去。从熔融状态生成的单晶体,表面也往往会有高达几层原子的带台阶的凸部。因此,从微观看,表面总是凹凸不平的,常常以波度和粗糙度(或不平度的高度和形状)表示,称为表面形貌。波度的波长较长,约 1000~10000 微米,它是加工时因工件或刀具发生振动而形成的粗糙度,也称宏观粗糙度。

表面粗糙度或称微观粗糙度,是分布于