

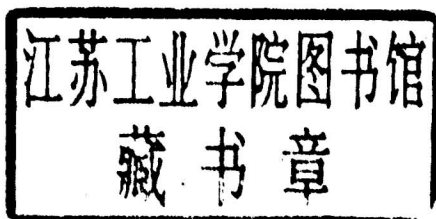
# 摩擦 磨损 与 润滑

编著 / 周锡容 杨启明

石油工业出版社

# 摩擦磨损与润滑

周锡容 杨启明 编著



石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书收集了大量资料,引入近期教学与科研成果,内容丰富、简明易懂,包括固体表面性质及表面接触、摩擦、磨损、润滑油与润滑脂、润滑理论基础、固体润滑剂、润滑方法和润滑系统。适合于石油机械工程技术人员学习和工作参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

摩擦磨损与润滑/周锡容,杨启明编著

北京:石油工业出版社.1997.9

ISBN 7-5021-2112-9

I. 摩…

II. ①周…②杨…

III. ①机械-摩擦②磨损③机械-润滑

IV. TH117

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 16997 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

西南石油学院印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 16 开本 17  $\frac{1}{4}$  印张 435 千字 印 1-1000

1997 年 12 月北京第 1 版 1998 年 4 月四川第 1 次印刷

ISBN-7-5021-2112-9/TE·1776

定价:26.00 元

# 前 言

摩擦、磨损与润滑三方面内容都包容在新兴学科——摩擦学之中。摩擦学在 20 世纪中期才发展起来,涉及了机械学、冶金学、材料学、物理、化学、流体力学、数学等多学科的理论和应用。目前,世界上各主要发达国家都深刻地认识到摩擦学这门学科在提高设备可靠性、高精度保持性,以及延长机器设备寿命和节省能源等方面的重要作用。因此十分重视摩擦学研究,建立专门的研究机构,大量出版摩擦学方面的论著和教材,广泛开展摩擦学的教育与培训,所有这些工作都促进了摩擦学学科的迅速发展。近年来,我国在摩擦学研究、教育和应用上取得了巨大的进步。

为了本科生和研究生的教学需要,我们在 1988 年编写的《摩擦学原理》,1992 年编写的《摩擦磨损原理》、《润滑工程》三本教材的基础上,收集了大量资料,引入近期教学与科研成果,进行修改和充实。本书在编写中加强了摩擦磨损与润滑的基础理论,注意了理论和实践的联系,突出了工程实际的应用。

本书作为机械工程系设备工程与管理专业本科生及摩擦学研究生的主要教学用书,也可以供机械系其它专业的大学生使用。由于本书内容丰富,简明易懂,有利于石油机械工程技术人员自学和工作参考。

本书第一、二、三、四、五章由周锡容编写,第六、七、八、九、十章由杨启明编写,并由周锡容负责主编。本书主要内容已在我院摩擦学研究生及机械专业高年级学生中多次使用,也在中国石油天然气总公司机动干部培训班中多次使用。

本书的编写工作得到了西南石油学院教务处和机械工程系的亲切关怀和悉心指导,张本奎教授全面细致地审查了本书,在此致以诚挚感谢。

由于编者的水平有限,书中谬误在所难免,热切希望读者的批评和指正。

编 者

1996 年 1 月

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	(1)
第一节 摩擦学定义、简史及研究内容 .....	(1)
第二节 摩擦学的意义 .....	(4)
第三节 学习本课程的重要性 .....	(5)
第四节 摩擦学发展及动向 .....	(6)
<b>第二章 固体表面性质及表面接触</b> .....	(9)
第一节 固体表面形貌 .....	(9)
第二节 固体表面的组成 .....	(18)
第三节 表面接触的基本概念 .....	(21)
第四节 赫兹(Hertz)接触 .....	(25)
第五节 粗糙表面的接触 .....	(28)
第六节 接触变形的判据 .....	(32)
<b>第三章 摩擦</b> .....	(35)
第一节 概述 .....	(35)
第二节 古典摩擦定律 .....	(37)
第三节 金属的滑动摩擦理论 .....	(39)
第四节 滑动摩擦的粘着理论 .....	(42)
第五节 滑动摩擦的分子机械理论 .....	(49)
第六节 影响滑动摩擦系数的因素 .....	(52)
第七节 工程设计中摩擦系数的选择 .....	(58)
第八节 滚动摩擦 .....	(59)
<b>第四章 磨损</b> .....	(65)
第一节 概述 .....	(65)
第二节 粘着磨损 .....	(67)
第三节 磨料磨损 .....	(75)
第四节 疲劳磨损 .....	(85)
第五节 腐蚀磨损 .....	(92)
第六节 微动磨损 .....	(96)
第七节 冲蚀磨损 .....	(102)
第八节 气蚀 .....	(109)
第九节 磨损的剥层理论介绍 .....	(110)
<b>第五章 非金属材料的摩擦与磨损</b> .....	(112)
第一节 工程聚合物的摩擦与磨损 .....	(112)
第二节 橡胶的摩擦与磨损 .....	(122)
第三节 工程陶瓷的摩擦与磨损 .....	(135)

第六章 润滑油与润滑脂 .....	(139)
第一节 润滑油 .....	(139)
第二节 润滑脂 .....	(161)
第七章 润滑理论基础 .....	(169)
第一节 润滑状态类型及转化 .....	(169)
第二节 边界润滑 .....	(171)
第三节 流体动压润滑 .....	(182)
第四节 流体静压润滑 .....	(192)
第五节 弹性流体动压润滑 .....	(195)
第八章 固体润滑剂 .....	(217)
第一节 概述 .....	(217)
第二节 常用固体润滑剂 .....	(219)
第三节 固体润滑剂的使用方法 .....	(222)
第九章 润滑方法和润滑系统 .....	(227)
第一节 润滑方法 .....	(227)
第二节 润滑装置 .....	(227)
第三节 润滑系统 .....	(231)
第十章 通用机械零部件的润滑 .....	(238)
第一节 润滑剂的选择 .....	(238)
第二节 滑动轴承的润滑 .....	(240)
第三节 滚动轴承的润滑 .....	(245)
第四节 齿轮和蜗杆传动的润滑 .....	(251)
第五节 链传动的润滑 .....	(255)
第六节 导轨的润滑 .....	(257)
第七节 钢丝绳的润滑 .....	(261)
参考文献 .....	(265)
附 录 .....	(266)

# 第一章 绪 论

摩擦、磨损与润滑是普遍存在的自然现象,三者紧密联系,互相渗透,随着科学与技术的发展逐渐形成一门综合性边缘学科。1966年英国乔斯特(H.P.Jost)采用新词 Tribology 来概括这一学科,中国机械工程学会摩擦学专委会正式通过将该词译为“摩擦学”。因此有必要对摩擦学的定义,研究内容及其发展作一概括介绍。

## 第一节 摩擦学定义、简史及研究内容

### 一、定义

摩擦学——Tribology 是由希腊字 Tribos 演变来的,其定义是:“研究相对运动的相互作用表面的有关理论与实践的一门科学与技术”,着重强调“相对运动表面”和“相互作用”。也可以说,“摩擦学是研究两相对运动表面摩擦、磨损和润滑这三项相互关联的科学技术的总称”。摩擦是现象,磨损是摩擦的结果,润滑是降低摩擦减少磨损的重要手段,三者密切联系。

### 二、简史

摩擦学既是一门古老的又是一门年轻的科学,只是由于现代科学的发展才大大地丰富了这门科学的内容,赋予它新的内涵。

摩擦现象研究始于15世纪意大利文艺复兴时期。达芬奇(Leonardo da Vinci)在1495年曾用大理石做实验,得出的结论是:两光滑平面间接触,当物体刚开始滑动时,摩擦力为其重量的 $\frac{1}{4}$ ;若重量加倍,则摩擦力也加倍,且摩擦力与名义接触面积无关。这是最早确定的摩擦力与正压力成正比的概念。即使在今天,光滑的固体表面摩擦系数为0.25这一数值也大体正确。法国阿蒙顿(Guillame Amontons)在不知道达芬奇研究的情况下,于1699年重新确认了上述总结,进一步指出不同材料具有不同的摩擦特性,认为摩擦来自表面微凸体的干涉。1750年欧拉(Leonard Euler)第一次用符号“ $\mu$ ”表示摩擦系数,并引入静摩擦概念。1785年库仑(C. A. Coulomb)证实了这些观察,并对静摩擦(使滑动开始所需的力)和动摩擦(保持滑动所需的力)作出明显区别。他指出动摩擦力要比静摩擦力低得多,并观察到动摩擦几乎与滑动速度无关,认为摩擦是由于表面微凸体间的啮合所致。阿蒙顿与库仑所获得的摩擦认识被总结成为大家熟知的古典摩擦定律。最近五十年,人们发现古典摩擦理论的不足,认识到表面接触仅发生在离散点上,即表面微凸体(asperity)上,接触点的状态对摩擦磨损至关重要。现代摩擦理论研究的巨大进步丰富了对金属摩擦的认识,同时,在非金属硬材料(钻石、陶瓷及其它)、橡胶、聚合物的摩擦研究上也取得重要成果。

第一个研究磨损问题的仍是达芬奇。1967年在马德里发现他的手稿中介绍了他对简单滑动轴承方面的研究。他发现磨损随载荷增大而加剧;磨损方向不一定是铅垂的,而是沿着载

荷的主向量方向。为了减少磨损,他研制了一种滑动轴承,其衬套建议用一种含 30%铜和 70%锡来制造。除了达芬奇的研究外。在科学基础上研究磨损还是近几十年的事。1930年前后德国才开始对磨损作早期的系统研究,当时几乎没有引起英语国家研究人员的重视。1938年塞伯(Seibel)对早期磨损研究的科学技术水平作过评价,根据引起磨损的外部条件的不同性质,对磨损形式作了区分。塞伯指出,由于磨损形式繁多,不可能靠单一的试验来测定磨损性能,获得材料的磨损数据。他建议由物理学家、化学家、冶金学家、弹塑性理论专家和工厂工程师密切协作,共同研究,以便在最复杂的磨损方面取得真正进步。第二次世界大战后,美英两国对磨损进行了大量的深入研究。英国阿恰德(Archard)的磨损模型影响很大,对磨损给出了定量描述。现在,国内外普遍认为至少有四种不同的主要磨损形式应加以区别,即粘着磨损,磨料磨损,腐蚀磨损和表面疲劳磨损。由于磨损的复杂性,人们对磨损的理解还不及对摩擦的理解深刻,如还没有象摩擦那样有一个概括性很强的、简明的定量定律。

19世纪之前,人们就采用动植物油润滑,1800年有人把石墨作为干膜润滑,1810年首次从油页岩中获得矿物油。雷勒(Rennie)在1825年运用润滑剂进行实验,发现在润滑系统中摩擦力与运动副材料无关,与润滑剂有关。他的研究还表明了有良好润滑的运动副的摩擦系数约为无润滑的 $1/26$ 。1845年斯托克斯(Stokes)研究了粘度概念,指出粘度是控制润滑摩擦的定量流体参数。19世纪中叶在美国宾夕法尼亚打出第一口油井(称为Drake油井),随之通过蒸馏法获得了油品,从而推动了石油润滑剂的应用,并大大降低润滑剂成本。1883年彼得诺夫(Petrov)给出表示润滑摩擦与流体性能间的关系式。1886年雷诺(Reynolds)推导出润滑压力与速度的关系式,为流体动压润滑奠定了理论基础。特别要提出的是,20世纪50~60年代,由于测试技术发展以及计算机技术应用,使弹性流体动压润滑取得突破性进展,建立了弹流润滑理论,并逐步扩大到工程设计中去。

我国在很早以前对摩擦磨损及润滑就有所认识。至少在商代(公元前1711~1066年)已有马车出现。古书中最先出现“润滑”这一名词的是在《淮南子》一书中。周代中期(公元前1066~570年)的《诗经》中对润滑有所描述。在磨损方面,西周时期的马车上已有一个称为“辖”(guan)的零件,它与车毂端面相摩擦,起止推支承面作用,提高车轴的耐磨性。

摩擦磨损及润滑是一个既重要又很复杂的问题,人们的认识也是随着科学技术的进步而逐渐深化。早期的机械都比较简单,摩擦磨损所造成的危害和困难不大,因而对其要求也不苛刻。现代机械设备向大型、高速、高度自动化、高性能、高精度保持性及特殊工况运行的方向发展,使摩擦磨损及润滑问题显得愈来愈重要,几乎所有机械制造、使用和维修部门都无时无刻不遇到这类问题。延长机器和机构的使用寿命,提高它们的可靠性,是一项十分重要的技术任务,具有重大的经济效益。愈是重要的机器或机构,愈是复杂的摩擦副,寿命问题愈突出。在许多场合,摩擦磨损及润滑已成为机械产品能否实现和推广使用的关键因素。

以前有很多学者从力学的角度来研究摩擦磨损和润滑,研究工作往往只是从各个侧面孤立地进行,经验和数据几乎分散在机械学的所有分支中。近几十年来,由于科学的发展,力学已不能概括这一复杂问题的各个方面,摩擦磨损润滑学自然地分散的单学科,逐渐发展成为一个新兴的综合性边缘学科。

摩擦学这门新学科统率了摩擦磨损及润滑的研究,使原来分散在各个领域中从事这方面工作的人集合起来,形成了一支包括不同专业学者的庞大队伍,有力地推动了摩擦学在国际范围的研究。现在,全世界每年有超过10000篇论文发表,有关摩擦学的杂志也大量涌现。

摩擦学涉及的主要学科有,流体力学、热物理、流变学(即考虑润滑流体在摩擦表面作用



下,其流动或变形与应力、应变、温度、时间的关系)、物理化学,弹塑性力学以及其它内容。这些知识已远远超出了机械工程技术人员所熟悉的知识。因此,学习和研究摩擦学就必须了解这些学科的有关知识,把所研究的对象从各个方面联系起来,运用相关学科的研究成果综合地加以考虑。

### 三、摩擦学研究内容

为了保证机器的可靠性和寿命,需要科技人员在设计阶段就要充分考虑控制摩擦和减少磨损的各个因素。可以肯定地说,现代机械设计中,若不考虑摩擦学就不是先进的设计。因此,有必要对摩擦学研究的主要内容(图 1-1)有所了解。

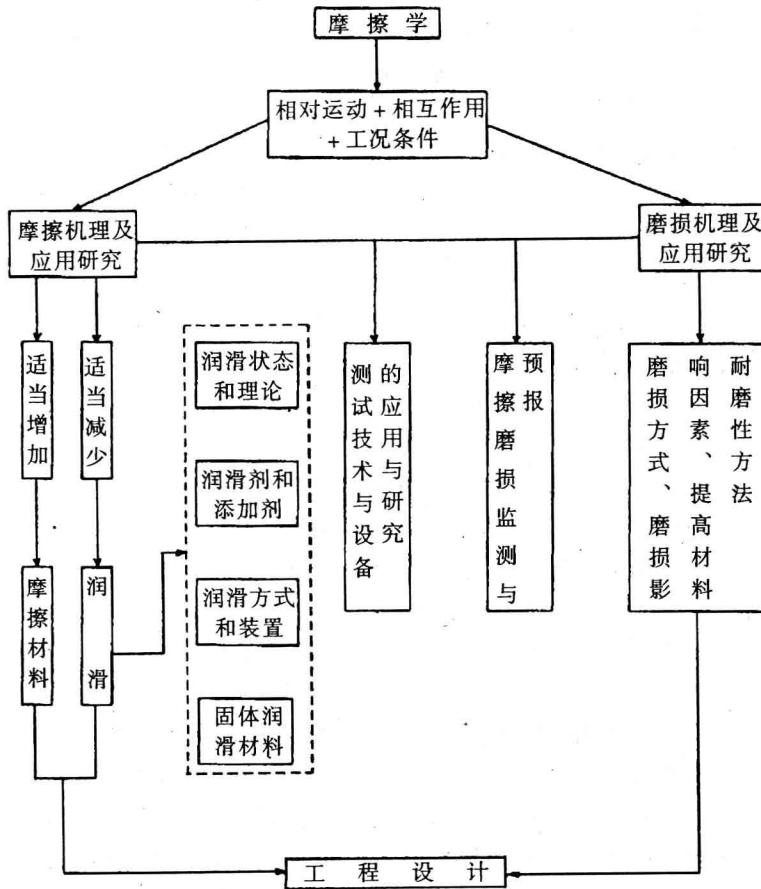


图 1-1 摩擦学研究内容

#### 1. 摩擦学机理研究

具有普遍意义的机理,如摩擦起因,磨损及磨屑形成机理,润滑理论等的深入研究,有助于揭示摩擦磨损及润滑问题的本质,为解决工程实际中存在的摩擦学问题提供理论基础,解决问题的面广,具有普遍性。

特殊工况条件运动副的摩擦磨损性能研究和失效机理研究的针对性强,能确保产品的可靠性和寿命,其成果能直接应用于产品设计。

2. 各种材料和表面处理工艺的摩擦学特性研究
3. 液体润滑剂、固体润滑材料及其摩擦学性能的研究
4. 摩擦学测试技术与设备的应用研究以及摩擦磨损工况监测与故障诊断研究

除此以外,还有建立摩擦学数据库、数据中心和专家系统,摩擦物理,摩擦化学,摩擦热力学等等。

## 第二节 摩擦学的意义

摩擦学的意义主要表现在经济与技术两个方面。

国际上讨论摩擦学意义时,经常要算非常细的经济帐。也即是说,运用摩擦学的理论和实践,能节约大量的资金,获得良好的经济效益。

据估计,世界上约有  $1/3 \sim 1/2$  的能源消耗在摩擦上,大约有 80% 的坏损零件是由磨损报废的。

英国在 1966 年的调查报告指出,如果英国工业能更好地应用摩擦学知识,每年可节约 5 亿 1 千多万英镑(包括延长机械寿命,减少故障维修与易损件更换,节约润滑材料与投资,节约人力与动力,降低摩擦损失等方面的得益),相当于英国国民经济总产值的 1%。这项报告引起了英国政府和工业部门的高度重视,同时也轰动了全世界。

据美国统计,1976 年美国公路运输,发电机械和机械工业能源节约潜力为国家总能源耗量的 11%,相当于每年可节约 160 亿美元。美国机械工程师学会在《通过摩擦学节约能源的战略》一书中写道:美国交通、电力、加工、商业等部门耗能占美国的 80%,其中约有一半是没做功就浪费掉了,1990 年这个数值可能达到 56%。美国国会所做的报告也指出,由于摩擦学方面造成的损失,估计每年约 1000 亿美元,其中 200 亿为材料费。

日本润滑学会 1977 年测算,由于搞好摩擦润滑工作节约能源费 9000 亿日元,相当于当年进口石油价值的 10%,加上因此而提高机械运转效率等的间接经济效益,则高达 72,200 亿日元,约为当年国民生产总值(2,280,000 亿日元)的 3.2%。

我国改善摩擦磨损及润滑的现状所能获得的经济效益的潜力比西方国家大得多。与国外一般的能源单耗相比,我国内燃机、汽车、拖拉机的燃油单耗要高 30% ~ 50%,电动机电耗约高 10% ~ 20%,这些超耗的能源概算价值为 70 ~ 100 亿元人民币。据调查统计,1974 年我国汽车,拖拉机用钢在新产品上为 51 万吨,配件上为 47 万吨,农机配件 40% 是由于磨损报废,这说明我国产品质量差,寿命短。中国机械工程学会摩擦专业委员会通过对冶金、石油、煤炭、铁道运输、机械(农机和轴承)等大行业的调查统计,推算到本世纪末,我国通过摩擦学技术达到每年节约 400 亿元是有可能的。同时指出,要获得这一经济效益的收支比为 50:1 左右,而英国摩擦学研究中心的收支比为 300:1。

大庆油田在 1982 年对该油田进行了《摩擦润滑的工业调查》,1983 年后加强了改善摩擦与润滑的各项措施,据 1988 年统计,取得直接经济效益达 5936.7 万元。如再计入 1987 ~ 1989 年延长设备寿命,减少维修,提高质量等效益 7500 万元,取得的总效益为 1.34 亿元。

1981 年底,西南石油学院机械系曾对四川石油管理局泥浆泵摩擦副的使用现状进行了调查分析。调查指出,泥浆泵易损件 86% 以上是由摩擦磨损造成失效的,其钢材耗量占整个钻采设备配件的 50% ~ 60%,1979 年耗资 409.05 万元,占局全年总投资的 1.86%。为此,西南石油学院与四川石油管理局联合科研,开展了“泥浆泵缸套活塞摩擦磨损研究”课题。由于应用

摩擦学知识和摩擦磨损研究成果,1982~1987年取得年增收1360万元的巨大经济效益,该课题获得1988年度石油部科技进步二等奖。

除了良好的经济效益外,摩擦学的研究推动了科学技术和生产的发展。许多特殊工况下的摩擦学问题常常是尖端技术的关键,例如高温、低温、真空、辐射以及特殊介质下的摩擦磨损及润滑技术。

### 第三节 学习本课程的重要性

现代石油工业的钻采、油气集输等设备正向着功能高级化、大型化、连续化及高精度保持性发展。石油工业之所以称为技术密集和资金密集的产业,其重要的标志之一就是使用了大量复杂而又贵重的设备。由于行业的特点,众多设备是在极端恶劣的条件下工作,寿命低,可靠性差成为普遍关注的问题。要使设备寿命周期费用最低,综合性能最好,摩擦磨损及润滑的研究与应用是重要的一个方面。因此本课程对于机械工程技术人员来说是相当重要的。

#### 一、石油机械中存在大量的摩擦学问题

##### 1. 链条与链轮

现代钻机广泛采用链传动,链条与链轮磨损的主要形式为粘着磨损、磨料磨损和表面疲劳磨损。正常情况下后者是主要失效形式。

##### 2. 三牙轮钻头滑动轴承与密封

钻头在高温、重载、含泥砂的介质下工作,条件十分恶劣。使用表明,钻头的使用寿命在很大程度上取决于轴承的耐磨性,而密封的好坏又直接影响轴承寿命。据国内资料,因一只轴承损坏造成三牙轮钻头失效百分比为78%~80%;由国内外统计资料获知,在失效钻头中,密封失效占30%~40%。轴承磨损的主要形式为表面疲劳磨损,粘着磨损和磨料磨损。轴承密封损坏的主要形式是磨料磨损,粘着磨损和橡胶的热破坏。

西南石油学院及石油大学(北京)在这方面的研究中取得很大进步。

##### 3. 钻井泥浆泵的缸套、活塞与阀

泥浆泵工况是泵压高(一般15~20MPa,甚至达30MPa),泥浆含砂量大,密度高且有腐蚀性,工作温度为70~80℃。泵中的缸套、活塞和阀的寿命都不高,统称为易损件。缸套的损坏是以疲劳剥落为主要控制机理的磨料磨损和腐蚀磨损。活塞橡胶皮碗的损坏主要是磨料磨损和疲劳磨损。泵阀的磨损形式主要是冲击条件下的疲劳磨损,磨料磨损和反向液流造成的冲蚀磨损。

大庆石油学院在活塞研究中做了大量卓有成效的工作。西南石油学院对活塞进行了深入全面的研究,所研制的新型活塞的平均寿命为538.8h,达到国际同类产品的先进水平,在国内居领先地位,已在全国九个油田推广应用,取得显著的经济和技术效益。

##### 4. 钻机刹车

钻机刹车是一种自增强刹车,与一般起重运输机械的刹车不同。其工况特点是作业周期性强,连续工作时间长,工况苛刻,负荷大。因此要求刹车副的摩擦系数稳定、磨损小、烟尘少、噪音低,并要求有足够的强度。

石油大学在对刹车块摩擦学特性研究中,根据钻机刹车副工作表面温度高,体内温度梯度大,变化剧烈等特点,在分析失效机理和原因的基础上,以其工作表面温度作失效判据,用不同

温度状态下的摩擦学特性——定温特性、变温特性及工况适应性评价刹车副的制动性能。该研究取得丰硕成果,所研制的产品获国家优质产品称号。

### 5. 键及螺栓

石油机械中广泛采用各种联接件。从宏观上看,联接件与被联接件间并不存在相对运动。实际上,由于机器本身或工作环境存在振动,使其接触而产生小幅振动,发生微动磨损,磨损积累到一定程度,最后造成联接失效。

上面只是简单地列举了几种摩擦磨损现象,实际上在石油机械中摩擦学问题比比皆是。

## 二、建立摩擦学准则,开展摩擦学设计和应用

在机械工程技术人员中,以强度作为机械设计准则的这种观念比较牢固。实践已充分证明,强度高的摩擦运动零件并不一定寿命就高,有些零件的失效用“强度”观点去衡量分析是不奏效的。除了强度,刚度等准则外,必须建立摩擦学准则去分析解决零件的失效问题。所谓摩擦学准则就是应用摩擦学的理论与实践,提高机器及零部件的寿命及可靠性。

1988年在英国里兹召开的摩擦学讨论会的主题是“机器零件的摩擦学设计”(Tribological Design of Machine Elements)。1991年在沈阳召开了全国第一次摩擦学设计学术会议。摩擦学设计已在世界范围内蓬勃兴起。所谓摩擦学设计就是利用摩擦学研究成果,对某一个特定对象通过合理的设计方法使其获得良好的摩擦学性能的设计过程,它至少应包括下列几点:(1)以现有的摩擦学研究成果为基础;(2)针对某一特定对象;(3)设计对象要获得良好的摩擦学性能;(4)必须有自身的设计方法。必须注意,摩擦学设计与摩擦学研究紧密相联,研究成果最终为设计提供理论基础。在摩擦学设计过程中,也常常会遇到新的问题,对摩擦学研究提出新的挑战。

## 第四节 摩擦学发展及动向

由于科学技术和工业的发展,加之世界范围的能源短缺,对机器设备提出更高要求,促进了机械工业在节约能源、材料,提高产品性能、效率,可靠性和寿命诸多方面取得进步。因此,摩擦学研究受到各国的普遍重视,成为发展得最快的学科之一。

### 一、摩擦学发展的主要表现

1. 从宏观表面进入微观表面研究;由静态研究发展到动态研究;由定性分析逐渐过渡到定量分析;从单因素研究扩展为多因素的综合研究,甚至进行系统的分析。

2. 多学科联合作业,至少包括有力学,表面科学、热力学及传热、化学及物理化学、金属物理、材料科学以及特有的测试技术。

3. 重视严格的科学实验。摩擦学研究离不开实验,通过实验进行机理研究,建立模型并验证,逐步做到定量设计计算。

### 二、摩擦学研究的动向

通过1989年在芬兰召开的欧洲第五届国际摩擦学会议,1990年在日本召开的国际摩擦学会议,以及国内近期召开的摩擦学有关会议,可以看出摩擦学研究的一些新动向。

1. 工程陶瓷材料摩擦学研究是热门课题

工程陶瓷具有许多独特性能,如高熔点、高硬度、耐磨损,化学稳定性好,耐氧化和腐蚀以及重量轻,弹性模量大等特点,引起了越来越多的学者的重视。陶瓷摩擦学理论向纵深发展,它的摩擦学的特殊应用取得了新的进步,成为世界性的热门课题。有人预言,90年代摩擦学材料发展将以工程陶瓷材料为主。

## 2. 表面工程研究是重点

表面工程是摩擦学研究的基础,因为摩擦磨损和润滑一般都发生在摩擦表面上。了解和研究表面形态,接触过程,掌握提高表面耐磨性的工艺方法和表面抗磨减摩材料的选用等技术,是当前摩擦学工作中的重点。目前,国际上最新发展的表面耐磨涂层技术、表面高分子减摩耐磨技术,激光表面改性技术……,都有相当好的表现。

## 3. 摩擦副中聚合物复合材料得到大力开发

多年研究表明,聚合物—金属组成的摩擦副的摩擦学特性一般要比金属—金属摩擦副优越得多。因此,许多国家都在大力开发由不同聚合物、复合材料与金属组成的摩擦副,详细研究它们的摩擦学特性,以及在不同工况条件下所表现出来的摩擦学行为,并在应用上取得很大进展。

## 4. 摩擦学应用研究深入新的领域

摩擦学不仅广泛应用于机械工业,而且已深入到各个领域,如核能技术、空间技术、生物工程或仿生技术以及磁记录(存储)系统。

生物工程摩擦学研究受到格外青睐,因为它能给人类带来极大好处。如人的关节,正常人关节软骨间的滑液是很稠的,使关节能自由地相对运动。但有些残疾人或关节炎患者,他们的滑液不能产生稠化作用,摩擦学家可以提供一种治疗方法,选择适当的聚合物注入到患者的关节,以恢复其稠化作用。上海交通大学正在进行人工髋关节研究,通过弹流计算,对人工髋关节的球面副作优化设计,防止人工髋关节松动和微动磨损。现在人工关节的磨损寿命已突破15~25年。有人认为人工关节可望达到150年的使用寿命。英国里兹大学和利物浦大学牙科医学院合作对镶牙材料的磨损,蠕变和生物相容性进行研究。英国摩擦学中心(NCT)与矫形外科医院长期合作,在生物工程摩擦学的实际应用方面取得许多重要成果。

近10年来,随着现代电子信息技术的飞速发展,磁记录(存储)系统的摩擦学问题研究越来越重要,所谓的微摩擦学(Minitribology)或称纳米(级)摩擦学(Nano-Tribology)在国际上引起广泛兴趣。纳米摩擦学研究的是纳米尺度( $1\sim 10\text{nm}$ ,  $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ )的超薄膜的摩擦行为。纳米尺度介于原子,分子与宏观物体之间,是尚未充分认识的新领域。

## 5. 摩擦学系统的工况监测及故障诊断技术有新的发展

摩擦学系统的工况监测,故障诊断以及失效的早期预报技术国外首先用于军用设备,然后逐步扩大到民用工业设备。在芬兰的国际摩擦学会议上,英国诺依兰斯(B. J. Roylance)发表了齿轮系统磨损工况监测及采用磨损颗粒分析的失效预报方法;芬兰的霍蒙伯瑞(K. Holmberg)及原苏联奈因(V. L. Lyin)分别发表了磨损失效预测的专家系统及工况监测专家系统,这些论文均是最新的研究成果。

美国海军实验室开发出能使非铁磁性磨损颗粒磁化的特殊磁化液,这样就可以用铁谱仪对非磁性颗粒及高分子基磨损颗粒进行形貌分析和磨损工况监测。

目前摩擦学系统的工况监测和故障诊断技术已从单一型向综合型发展,并与计算机联用。美国国际光谱有限公司的机械系统全面管理设备就是将原子发射光谱、红外光谱、粘度计等仪器与计算机联用,检测润滑油中各种金属元素及其含量和润滑油的品质变化。

## 6. 摩擦学数据库和信息系统迅速建立

在过去的 10~15 年中,摩擦学信息领域的发展已作为传递技术的独立分支,目前每年出版的摩擦学文章已超过 10000 篇。为了快速、经济和直接获取最新摩擦学数据,德国材料试验所(BAM),美国国家标准技术局建立起数据库或信息系统。

从上述介绍可以看到,摩擦学研究已经深入到各个领域,反映了摩擦学研究具有十分广阔的应用前景。

我国摩擦学研究起步较早,但从整体水平来看仍然落后于发达国家。早在 1962 年就召开了全国第一届摩擦磨损会议。时至 1979 年才召开了第二届全国摩擦学学术讨论会,并成立全国摩擦学学会。到 1992 年止,共召开五届全国性学术会。改革开放给摩擦学发展带来勃勃生机,我国摩擦学的研究工作取得很大进步。摩擦学的研究成果正在转化为生产力,推动和促进科学技术面向社会,面向现代化,取得了明显的经济和技术效益。

本书将系统论述摩擦、磨损及润滑的基本理论和应用。通过学习,以期达到掌握本学科的基本知识和方法,并能解决摩擦学有关问题。

## 第二章 固体表面性质及表面接触

摩擦磨损与润滑都涉及到相互运动表面间发生的作用和变化,既要考虑表面性质(主要包含表面形貌和表面组成两方面),又要考虑相互接触物体的力和变形(即所谓的接触力学)。因为表面性质是决定摩擦学特性的最重要因素,而在进行摩擦磨损及润滑的机理研究时,又必然要与表面接触问题相联系。可以说,本章所介绍的内容是摩擦学中的重要基础。由于摩擦副大多数由金属材料制成,这里所说的固体表面主要指金属表面。

### 第一节 固体表面形貌

表面形貌又称表面图形、表面结构、表面粗糙度或表面光洁度,它是研究固体表面几何形状的细节。

从宏观看,实际表面有的光滑如镜面,有的粗糙似锉刀。即使加工得很平整光滑的零件表面,在显微镜下观察时,会看到表面是由许多波峰和波谷组成的(如图 2-1)。这是因为任何机器零件的表面都是通过各种不同的加工方法制造成的。加工过程中的刀痕,切屑分离时的塑性变形,以及机床一刀具一工件系统的振动等原因,造成实际表面与理想的绝对光滑平整的表面存在着一定的几何形状误差。因而从微观上看,所有被加工表面都是如峰谷起伏。我们把表面形貌中的独立单体,即凸起的波峰称为微凸体。

表面上微凸体的形状及分布取决于表面最后的加工方法。微凸体的分布状态可以是有方向性的,也可以是各向同性的。例如经过车削、铣削和刨削加工的表面,其微凸体的分布显示一定的方向性;经过电抛光或研磨等方法加工的表面则表现为各向同性或等概率分布。

表面形貌对于表面之间的润滑状态、摩擦力大小、耐磨损能力、接触刚度、疲劳强度、配合性质、密封性能、流体阻力和表面涂层结合性能等都有至关重要的影响。

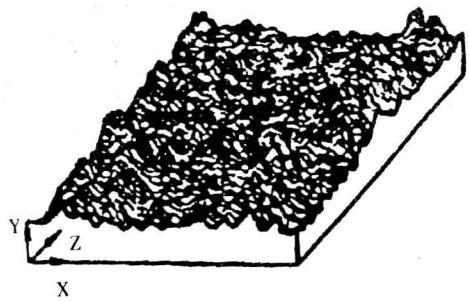


图 2-1 三维表面形貌

#### 一、表面的几何形状特征

固体表面形貌是指表面几何形状的详细图形。表面形貌有三个主要特征(图 2-2)。

##### 1. 宏观几何形状误差

由加工过程的固有误差引起表面对设计要求形状的偏差,即通常所说的表面形状误差。

##### 2. 表面波纹度

表面波纹度是零件表面周期性重复出现的一种几何形状误差,在表面轮廓上形成相对较大的波浪起伏。波纹度有两个重要参数即波高和波距,波距一般为  $1 \sim 10\mu\text{m}$ ,波高与波距之比约为 1:40。这种误差常常是由于机床切削系统在加工表面时出现的有害振动造成的。表面

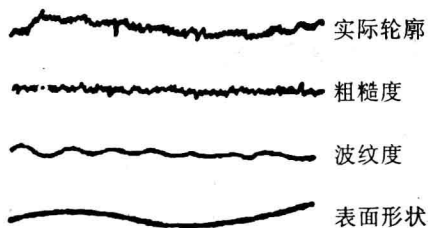


图 2-2 表面几何形状特征

波纹度会减少零件实际接触面积,在动配合中引起磨损加剧,当两表面波纹度的波高达到某一值时要增加摩擦阻力。

### 3. 表面粗糙度

表面粗糙度不象波纹度那样有明显的周期性,其波距约为  $2 \sim 800 \mu\text{m}$ ,波高亦较小约为  $0.03 \sim 400 \mu\text{m}$ 。粗糙度越小,表面越光洁,这与表面加工方法及过程密切相关。从摩擦学观点来看,它通常是最值得注意的表面几何形状。

## 二、表面粗糙度参数

为了正确反映表面粗糙度,应该采用不同参数。这些参数归纳为高度特性参数、间距特性参数和形状特性参数。根据表示方法的不同,还可分为一维、二维、三维的形貌参数。

### 1. 高度特性参数

(1) 轮廓算术平均偏差  $R_a$ , 或称中线平均值  $C.L.A.$

$R_a$  定义为在取样长度  $L$  内,轮廓图形上各点和参考中线之间距离的算术平均值。

表面轮廓的参考中线是一特定的线,它将轮廓图形划分为上下两部分,使实体面积和虚间面积相等,如图 2-3。

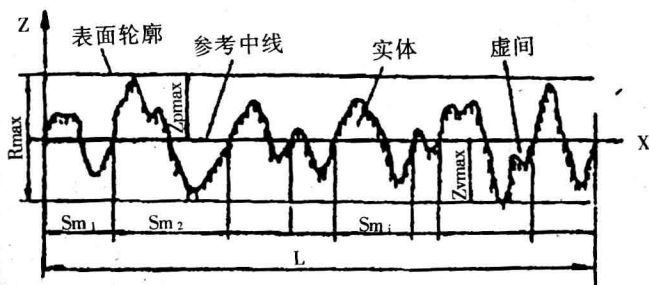


图 2-3 表面粗糙度表示

其数学表达式为

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| \quad (2-1)$$

概率统计表达式为

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x)| dx \quad (2-2)$$

式中  $z_i$ ——从参考中线上度量的轮廓图形高度;



$n$ ——测量次数；

$L$ ——积分长度(取样长度或标准长度)；

$f(x)$ ——轮廓图形的函数表达式,或称分布函数。

标准长度是有规定的,见表 2-1。

表 2-1  $R_a$ 、 $R_{\max}$ 、 $R_z$  的标准长度  $L$  与评定长度  $L_n$

$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{\max}$ 与 $R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	$L$ (mm)	$L_n(L_n = 5L)$ (mm)
$\geq 0.008 \sim 0.02$	$\geq 0.025 \sim 0.10$	0.08	0.4
$> 0.02 \sim 0.1$	$> 0.10 \sim 0.50$	0.25	1.25
$> 0.1 \sim 2.0$	$> 0.50 \sim 10.0$	0.8	4.0
$> 2.0 \sim 10.0$	$> 10.0 \sim 50.0$	2.5	12.5
$> 10.0 \sim 80.0$	$> 50.0 \sim 320$	8	40.0

(2) 轮廓均方根偏差  $R_q$  或称均方根值  $R. M. S$

$R_q$  定义为在取样长度  $L$  内,轮廓图形上各点和参考中线之间距离平方和的平均值的平方根,数学表达式

$$R_q = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i)^2 \right]^{1/2} \quad (2-3)$$

概率统计表达式为

$$R_q = \left[ \frac{1}{L} \int_0^L f^2(x) dx \right]^{1/2} \quad (2-4)$$

可以看出均方根值  $R_q$  对于离开参考中线较远的  $z_i$  值给予较大比重,与算术平均值  $R_a$  比较, $R_q$  更好地反映了微观不平度高度的情况。

在尚不知加工方法情况下, $R_a$  与  $R_q$  的近似关系可取为: $R_a \approx 0.8R_q$  或  $R_q \approx 1.25R_a$ 。

各种加工方法的表面特征及其粗糙度见表 2-2。

(3) 微观不平度最大高度  $R_{\max}(R_y)$  和十点高度  $R_z$

如图 2-3 所示

$$R_{\max} = z_{p\max} + z_{v\max}$$

式中  $z_{p\max}$ 、 $z_{v\max}$  分别表示在取样长度内最高波峰与最低波谷。 $R_{\max}$  实际上是表示表面粗糙度的最大起伏量,为了减少表面意外划伤或沾污的影响,一般取若干个取样段,再求  $R_{\max}$  的