

■ 高等学校“十五”规划教材 ■

# 工程摩擦学基础

庞佑霞 黄伟九 谭援强 刘厚才 编



煤炭工业出版社

高等学校“十五”规划教材

# 工程摩擦学基础

庞佑霞 黄伟九 谭援强 刘厚才 编

煤炭工业出版社

·北京·

**图书在版编目 (CIP) 数据**

工程摩擦学基础/庞佐震等编. - 北京: 煤炭工业出版社, 2004

高等学校“十五”规划教材

ISBN 7-5020-2416-6

I. 工… II. 庞… III. 工程力学: 动力学: 摩擦学 IV. TB122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 022507 号

煤炭工业出版社 出版  
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: [www.cciph.com.cn](http://www.cciph.com.cn)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

\*

开本 787mm × 1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 10<sup>3</sup>/<sub>4</sub>

字数 249 千字 印数 1—2,300

2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月第 1 次印刷

社内编号 5187 定价 25.00 元

**版权所有 违者必究**

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

# 前 言

摩擦学的问题在各个工程领域普遍存在，其在机械和材料等工程中的普遍性、重要性和复杂性，引起科学工作者的极大关注，成为研究的热点。现在，工程摩擦学已成为国内外发展最快的学科之一。根据现代工业的发展要求，各工业发达国家都很重视开展摩擦学的基础理论教育，在高等学校开设了摩擦学选修课程。

我国现有的摩擦学教材从不同的角度阐述了摩擦学的原理，或篇幅均较大，或只偏重于摩擦学的部分领域。为满足高等工科院校机械类、材料类专业开设少学时摩擦学选修课的需要，按照原中国煤炭工业部“煤炭高校“十五”规划教材编审出版计划”，我们专为工程院校机械类、材料类专业编写了这本供30学时左右的摩擦学选修教学用书。全书共分9章，第二章至第五章及第七章由湖南科技大学庞佑霞教授编写；第六章第五节和第八章由重庆工学院黄伟九教授编写；第九章由湘潭大学谭援强教授编写；第一章、第七章和第六章前4节由湖南科技大学刘厚才老师编写。全书由庞佑霞、刘厚才负责审稿。

本书部分章节曾为湖南科技大学机电工程学院机械类高年级学生开设摩擦学选修课时使用。这次编写是在参阅大量专业文献，总结多年来的科研和教学经验的基础上重新调整和改写。书中部分研究内容得到了国家自然科学基金项目（50005018）的资助。限于编者的水平，取材不一定恰当，论述方面可能会存在不少缺点，恳请读者批评指正。

本书在编写过程中，得到了湖南科技大学刘德顺教授、陈安华教授的热情帮助与鼓励，在此表示衷心的感谢！书中引用了某些著作中的成果，谨此向有关著者表示真诚的谢意。

2004 年元月

# 目 录

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第一章 绪 论              | 1  |
| 第一节 摩擦学发展简史          | 1  |
| 第二节 摩擦学研究现状与发展趋势     | 2  |
| 第三节 研究摩擦学的意义及研究内容    | 4  |
| 第二章 表面性质和表面接触        | 6  |
| 第一节 表面形貌             | 6  |
| 第二节 金属表面的性质          | 10 |
| 第三节 表面层的接触           | 15 |
| 第三章 摩 擦              | 22 |
| 第一节 摩擦的概念与分类         | 22 |
| 第二节 古典摩擦定律           | 23 |
| 第三节 各种摩擦理论概述         | 24 |
| 第四节 影响摩擦的因素          | 30 |
| 第四章 磨 损              | 34 |
| 第一节 磨损的概念及分类         | 34 |
| 第二节 粘着磨损             | 35 |
| 第三节 磨料磨损             | 39 |
| 第四节 表面疲劳磨损、腐蚀磨损及微动磨损 | 42 |
| 第五节 冲蚀磨损             | 44 |
| 第六节 磨损计算             | 50 |
| 第五章 润 滑              | 53 |
| 第一节 流体润滑的基本方程        | 53 |
| 第二节 流体动压润滑           | 56 |
| 第三节 流体静压润滑           | 67 |
| 第四节 典型传动件的润滑         | 70 |
| 第五节 润滑方法简介           | 74 |
| 第六章 材料的摩擦学性能试验方法与检测  | 76 |
| 第一节 摩擦学试验方法及试验机类型    | 76 |

|            |                            |            |
|------------|----------------------------|------------|
| 第二节        | 常用的摩擦磨损试验机 .....           | 78         |
| 第三节        | 摩擦磨损试验过程中的参数测量 .....       | 81         |
| 第四节        | 电子显微镜 (SEM 和 TEM) 简介 ..... | 85         |
| 第五节        | 其他先进分析仪器简介 .....           | 92         |
| <b>第七章</b> | <b>摩擦学材料及其应用 .....</b>     | <b>106</b> |
| 第一节        | 减摩材料 .....                 | 106        |
| 第二节        | 耐磨材料 .....                 | 111        |
| 第三节        | 摩阻材料 .....                 | 112        |
| 第四节        | 润滑材料 .....                 | 114        |
| <b>第八章</b> | <b>摩擦学中的表面工程 .....</b>     | <b>123</b> |
| 第一节        | 表面工程简介 .....               | 123        |
| 第二节        | 表面改性 .....                 | 125        |
| 第三节        | 表面涂层 .....                 | 135        |
| <b>第九章</b> | <b>摩擦学设计 .....</b>         | <b>150</b> |
| 第一节        | 摩擦学设计概述 .....              | 150        |
| 第二节        | 耐磨设计 .....                 | 151        |
| 第三节        | 典型零部件的摩擦学设计 .....          | 155        |
| 参考文献 ..... |                            | 163        |

# 第一章 绪 论

## 第一节 摩擦学发展简史

人类在史前时代就曾对摩擦的两个方面——摩擦和润滑产生兴趣，并得到成功应用。其一是摩擦生热现象，即钻木取火的应用；其二是物体运输过程中通过润滑可以减小摩擦阻力。古埃及 4000 年前建造的金字塔大都是由巨石堆砌而成的，在当时还没有理想的工程机械的情况下，完美地完成那样大型的工程，使生活在今天的人们都为之震惊。在一幅保存完好的浮雕图上，描绘着用滚筒和滑板搬运巨石和塑像的情景：172 名奴隶正沿着木头轨道拖运一座质量约为 6 万 kg 的巨型塑像，一个人站在滑板前端，正向滑板与滑道之间倾倒润滑剂以减少搬运的阻力。这无疑是对润滑技术的最早应用范例。我国古代著名诗集《诗经》里也有“载脂载辖，还车言迈”的诗句。意即“把油脂涂在车轴上，就可使车轮快速行进”，证明我国至少在 2500 年以前已经有了润滑的初步应用。此外，车轮的发明使物体运动从滑动摩擦变为滚动摩擦，从而大大降低运动阻力，这大概也有 5000 来年的历史。

然而，对物体运动和摩擦现象的科学研究，则远比上述早期的应用晚得多。对于摩擦现象的研究开始于 15 世纪意大利文艺复兴时期，L.da.vinci (1452 ~ 1519) 曾用大理石做实验，得出以下的结论：两光滑平面间的摩擦，当物体刚要开始滑动时，摩擦力为其重量的  $1/4$ 。这是最早确立的摩擦力与法向压力成正比（或摩擦系数）这个概念。

对于光滑的固体表面，摩擦系数为 0.25，即使在今天也是一个大体正确的数值。17 世纪末 18 世纪初，正处于英国工业革命和法国资产阶级大革命时期，由于他们的工业和制造业得到了发展，因而摩擦的研究得到了重视。这时，法国的阿蒙顿和库伦在大量实验基础上建立了古典摩擦定律。

润滑剂的作用起源很早，但是有关润滑的理论，则是后来的事。Newton (1642 ~ 1727) 首先提出粘性液体流动定律；1883 年俄国彼得罗夫提出了有润滑的两同心圆柱体间的摩擦力计算公式；1886 年英国的 O.Reynolds 建立了润滑膜中压力分布的微分方程，论证了产生流体动压力的原理，为以后润滑技术奠定了理论基础。

第二次世界大战后，机械工程向高速、重载以及高温发展。在这一时期中，高副接触（如齿轮、滚动轴承等）的润滑问题，具有很大的实际意义，其摩擦表面间的接触应力高达几万个大气压，金属几何形状及润滑油的粘度都发生较大变化，因此，不能简单地应用雷诺方程求解。1949 年苏联格鲁宾把弹性理论和润滑理论结合起来，分析了弹性接触区油膜压力分布问题，提出了弹性液体动力润滑理论。到 20 世纪 50 年代末，英国 D.Dowson 和黑金森通过电子计算机求得了大量数值解，得到精确计算油膜厚度的公式，并为实验所证实，将弹性理论的研究引向高潮。同时，在此期间，边界润滑、静压润滑、润滑剂等方面的研究也得到了很大进展。

1966 年英国 H.P.Jost 在《润滑的教育与研究现状及工业需求的调查报告》中首先正

式提出摩擦学这个概念，将其定义为“研究相互接触、相对运动表面的科学及相关技术，包括研究摩擦、磨损与润滑”，并建议用英语 Tribology 来表示，英国和一些先进的工业国家随后相继采用这个新词，进而形成了一门独立的学科——摩擦学（Tribology）。

从此，摩擦学研究受到各国的高度重视，并在国际范围内得到有力的推动，使原来分散在各个领域从事这方面工作的人员，都集合在摩擦学的旗帜下，形成一支包括许多专业研究人员的庞大队伍。1973 年在伦敦举行了第一届欧洲摩擦学会议，并成立了国际摩擦学会。此后，国际性的摩擦学会议相继召开，以摩擦学命名的杂志刊物大量涌现，摩擦学方面的研究成果及论文每年数以万计，使摩擦学得到了蓬勃发展。

我国的摩擦学研究起步较晚。1962 年中国科学院组织在兰州召开了第一次全国摩擦磨损润滑工作报告会，1979 年成立了全国摩擦学会，之后又开展了不少的国际性和全国性的学术活动，同时创办了《摩擦学报》、《密封与润滑》等专业刊物，并发表了许多的论文和取得了许多研究成果。现在全国许多高等院校、科研单位和企业已建立了摩擦学研究所或专业研究室，进行教学培训和科研工作，并取得了一系列科研成果，解决了许多生产实践中的难题，摩擦学在我国得到了迅速发展。

## 第二节 摩擦学研究现状与发展趋势

### 一、摩擦学研究现状

#### 1. 摩擦与磨损研究方面

在摩擦与磨损研究方面，采用原子力显微镜（AFM）和摩擦力显微镜（FFM）等先进仪器设备，观测相对运动的固体表面原子间的作用力以研究摩擦的起因；研究了在高真空条件下，粘着和摩擦的化学效应；研究了磁流体、磁粉和磁力空气摩擦理论、技术及产品；已开发出利用电压控制摩擦力以减少机械摩擦的新技术，即电控摩擦技术。用磨损图对材料分类取得了进展，在钢铁材料磨损图的基础上，已建立了切削刀具材料、铝合金、陶瓷、铝—石墨复合材料、聚四氟乙烯等多种材料以及耐磨镀层零件的磨损图。

在摩擦学热效应研究方面探索得到了闪温的测量与预测的方法，建立了接触表面温度与平均温度之间的关系。

在摩擦学材料方面，已开发出应用于高温的单片陶瓷，填充（干润滑剂）的高分子材料和高分子金属复合材料，以及可在高速重载条件下工作的自润滑轴承材料和在汽车及飞机中应用的性能好、寿命长的刹车材料，并研究了这些材料的摩擦学特性及摩擦学应用。

#### 2. 润滑方面

在润滑方面，研究了牛顿流体和非牛顿流体中光滑表面具有不同尺寸比的线接触和电接触的弹性流体动压润滑，并且对微弹流有了更深入的了解，从而可判断在圈流体膜和边界膜润滑之间的混合区实现润滑的可行性。此外，还研究了磁存储器中非常薄的空气膜的流体动压润滑的机理。

随着计算机数值分析技术的发展，采用数据处理多重网格技术，使各种制造方法形成的各种固体表面模式可作为计算的输入数据，从而改善了对粗糙表面润滑技术的突起特性的预测方法，并深化了表面形貌对润滑有效性影响的认识。

采用扫描隧道显微镜 (STM)、原子力显微镜和超薄膜干涉仪等先进仪器设备对边界润滑和边界膜进行了原位研究,揭示了几种不同的机理,他们都涉及到在边界润滑中起作用的油性膜。研制了润滑剂、涂层和自润滑材料产生选择性转移的“零磨损”效应的各类添加剂,并研究了它们的摩擦学特性。

### 3. 表面工程方面

在表面工程方面,应用表面涂层技术,尤其是应用物理气相沉积、化学气相沉积和离子注入技术都已获得明显的减摩和耐磨效果。目前已经开发了金刚石膜和类金刚石碳膜涂层 (DLC 涂层)、应用减摩的 Pb-Sn-Cu 三元涂层,激光处理、摩擦化学处理、热化学处理和等离子喷涂技术。近年来,复合表面技术也得到了发展,如复合陶瓷涂层-渗氮钢体系和复合 DLC 涂层等新技术。在涂层的摩擦、磨损和润滑机理方面的研究也取得了一些进展。

此外,在摩擦学的一些新领域,如微观摩擦学、生物摩擦学、极端环境下的摩擦学和磁记录技术中的摩擦学等的研究也都取得了一些初步研究成果。

## 二、摩擦学的发展趋势

### 1. 微观摩擦学

计算机、微机电系统等技术的发展对微观领域内的摩擦、磨损及润滑问题提出了新的更高要求,而各种高精度的先进试验、检测、分析仪器设备的出现为微观摩擦学提供了研究的技术和试验平台。此外,纳米材料、纳米技术的不断发展也必将促进微观摩擦学研究的快速发展。

### 2. 特殊工况下的摩擦学

随着航天、航空、信息等高技术和海洋开发、先进制造技术等工业的迅速发展,迫切需要解决极端条件如高速、高载、超高温、超低温、高真空、强辐射及各种外场作用下的摩擦学问题,因此开展特殊条件下摩擦、磨损与润滑的研究势在必行。这也是认识材料在极端条件下的结构与性能变化的重要内容。

### 3. 环境友好摩擦学

环境友好摩擦学主要包括兼容润滑剂及环境友好润滑技术等。目前人们使用的润滑剂有较大比例未经任何处理而直接进入环境,造成环境污染。环境友好润滑剂及添加剂要求其不仅应具有油品的性能,而且还必须具有生物可降解性、较小的生态毒性和毒性累积性。随着工业生产的发展和环保要求的不断提高,环境友好型润滑剂及添加剂的需求越来越大,同时也必将带动环境友好摩擦学研究的发展。

### 4. 摩擦学失效与表面工程

摩擦学失效主要包括磨损损伤和润滑失效两个方面,而润滑失效的最终结果也将产生磨损,并由此可能导致运行系统的破坏。据不完全统计,我国每年因为磨损失效而造成的损失高达数百亿元人民币,可见磨损失效的研究不但具有重要的理论意义,而且也将产生巨大的社会和经济效益。

避免摩擦学失效的有效方法是发展高性能润滑材料和摩擦学表面工程技术。该领域的研究将在一个相当长的时期内保持活跃的态势,也必将解决大量工程中的实际摩擦学问题。

## 5. 摩擦学设计

摩擦学部件随使用时间的延长,工况环境的变化,其材料表面特性和摩擦副特性将发生变化,即摩擦学问题具有时变特性,摩擦学系统为时变系统。摩擦学问题的解决应该考虑多方面的因素,是系统工程。除了对摩擦学材料、技术的研究外,近年来受到人们关注的磨损图的研究也许应看作是摩擦学设计前期工作的一个组成部分。此外计算机模拟摩擦、磨损与润滑状态被认为是一种高效而经济的研究方法,该领域的研究也将为摩擦学设计提供重要的借鉴作用。

摩擦学设计时的摩擦学问题必须在概念设计和方案设计时予以考虑,是摩擦学研究的高级阶段,是摩擦学知识在运行部件中得到合理应用的关键环节。由于摩擦学设计的前提在于大量的摩擦学知识与技术获取,因此该领域的研究工作任重而道远。

## 第三节 研究摩擦学的意义及研究内容

### 一、研究摩擦学的意义

摩擦学对人类生活和生产的各个方面都有着极为密切的关系,尤其是科学技术及工业生产高度发展的今天,要求摩擦学不断深入研究和迅速发展,则更有它重要的现实意义。

#### 1. 摩擦学是一门能源保护的科学

据估计,世界上能源的  $1/3 \sim 1/2$  最终以各种方式表现为摩擦的损失,近一半由于摩擦而白白浪费掉,这是一个十分可观的数字。据 1977 年美国能源消耗最大的四个部门(交通运输、电力、加工以及商业和民用部门)的统计分析,这四个部门的能耗占全国能源消耗的 80%,但是,其中近乎一半是在使用过程中未经做功而损失掉的,如果从摩擦学方面采取合理必要的措施,就会大大地节省能源消耗。

#### 2. 摩擦学的发展是工业和科学技术发展的迫切需要

摩擦学问题大量、普遍地存在于所有机械设备中。统计分析表明,导致机械失效的主要原因,并不是零部件的断裂,而是运动副的摩擦损坏。我国现在的机械产品质量不高,在国际市场上缺乏竞争力,主要问题之一是许多基础件未过关,而其中很大一部分是由于摩擦学方面的设计不够完善而造成的。如汽轮发电机组因轴承发生油膜振荡而不能运行,汽车因制动材料热性能差而不能提高行驶速度,许多机械因磨损过快而达不到寿命要求或精度要求,流体系统因密封不可靠而影响使用等。现在机械产品在国际市场上的竞争力,都是以效率高、精度保持性好、使用可靠、寿命长为号召的,这些要求大部分与摩擦学设计有关。所以,现在国际上公认,机械产品如不进行摩擦学设计,必然要丧失市场竞争能力。

#### 3. 摩擦学的研究和应用具有重大的经济意义

摩擦学的经济效益往往要经过一段时间之后才能体现出来。据国外文献报导,日本一年依靠摩擦学技术可节约 27 亿美元(1974 年);美国仅在运输、发电、工业生产等几个领域,依靠摩擦学技术一年即可节约 160 亿美元(1976 年)。其他国家也有类似的报导,其每年可节约的数字大致相当于国民经济年总产值的 1% 左右。我国由于企业管理水平不高,在改善摩擦润滑方面可能获得的经济效益的潜力比西方国家更大。我国有关组织曾对

冶金、石油、煤炭、机械、铁道等五个行业作过几年典型调查，统计测算表明，应用现有摩擦学知识和技术，每年即可节约 37.8 亿元人民币。由此推算出我国工业方面应用摩擦学知识每年有可能节约的潜力为 176 亿元人民币（1984 年），约占国民经济年总产值的 1.37%。我国现在按单位工农业产值计算的能源消耗比一些工业发达的国家都要高，约为日本、联邦德国的 3 倍，英国的 2 倍。我国到 2000 年实现了工农业总产值翻两番，而能源和材料只翻一番，这说明节约能源和材料的重要性。从现有的经验看，通过摩擦学的工业应用来节能、节材，确是大有可为的。

## 二、摩擦学的应用及研究内容

### 1. 摩擦学的应用

摩擦学的应用领域非常广泛。除各种机械传动中的摩擦、磨损、润滑、密封问题外，如机械制造中的切削、冲压、挤压、拉丝、铰孔、轧制等成型过程，交通运输中对路面、轮胎制动、刮水等的要求，以及建筑业中的层压结构、海洋工程中的潜水设备等，都有大量的摩擦学问题。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条件下的润滑技术，长寿命问题和高度可靠性的要求，在航天等技术中均至关重要。近年来对人类关节的摩擦与润滑的研究，已为因关节丧失活动能力的病人提供了医治的途径。

### 2. 摩擦学的研究内容

摩擦学的研究范围，包括诸如固体的表面性质、接触力学、摩擦磨损的机理和规律，流体和非流体润滑理论，特殊条件下的润滑问题，轴承和支承表面工程，润滑剂及减摩、耐磨、摩擦材料，以及摩擦、磨损、润滑的试验、检测和监控技术等方面。

从摩擦学的定义和研究范围来看，解决摩擦学问题要涉及物理学、物理化学、固体力学、流体力学、热力学、材料学、工艺学等学科的许多分支，包括表面物理、表面化学、表面力学、流变学等学科，它超出了过去机械工程技术人员所熟识的那个范围。因此，学习和研究摩擦学，必须了解这些学科的有关知识，把所研究的对象从各个侧面联系起来，运用相关学科的研究成果，综合地加以考虑，同时还须与有关专业技术人员紧密合作，才能收到较好效果。

## 第二章 表面性质和表面接触

摩擦、磨损以及润滑等现象都是在两物体表面间发生的。因此，应当对物体表面形貌和表面性质有所了解和掌握。

### 第一节 表面形貌

通常零件的表面，即使是经过超精细加工的平面，用人眼观察已经光滑如镜，但在显微镜下观察，仍然是十分粗糙的。这是由于在零件的切削加工过程中，机床—工件—刀具—工艺系统的误差、振动和零件材料组织的缺陷等，加工表面均有一定的形状误差和波纹，表面仍有一定的粗糙度。



图 2-1 放大后表面形貌图

如图 2-1 所示，经过高倍率放大后的表面形貌，可以看到其平滑的表面仍然是凹凸不平的，布满许多高低不一、形状不规则的尖峰和凹谷，而两固体接触表面之间的摩擦与磨损就发生在这些微小的凹凸点上。

经过机械加工的表面产生凹凸不平的原因，主要是：

- (1) 切削加工过程刀具遗留在工件表面上的痕迹；
- (2) 切屑与表面分离断裂时引起不规则的塑性变形；
- (3) 机床—工件系统的振动在工件表面上留下的波形，以及机床系统误差和工件在切削力与重力等作用下发生变形引起的误差。

#### 一、表面形貌

按照表面凹凸不平的几何特性和成因，可将表面形貌的组成分为：形状误差、波纹度和表面粗糙度。

##### 1. 表面形状误差

表面形状误差是实际表面形状与理想表面形状的宏观偏差，国家标准（GB/T1182—1996）已规定了形状和位置公差。平面的形状公差由直线度、平面度确定；圆柱面的形状公差用直线度、圆度、圆柱度、线轮廓度和面轮廓度确定。

表面形状误差是由于机床和刀具精度不够，以及不正确的加工规范或温度应力等造成。

##### 2. 波纹度

波纹度是零件已加工表面周期性重复出现的几何形状误差，通常用波距和波高表示，其数值与加工方法有关。一般波距较大，约为 1~10mm，而波高较小，约为波距的 1/40，

或从几个微米至几百微米。

波纹度主要是加工时机床—工件—刀具系统低频振动和机床传动件的缺陷周期复印在已加工表面上的结果，与正弦曲线比较接近，是一种表面宏观粗糙度，它影响配合零件的实际接触面积，导致真实接触表面压强增加，加快磨损。

### 3. 表面粗糙度

表面粗糙度又称表面微观粗糙度，这是表面微观几何形状误差，其形状可能呈现某种规律变化，也可能为无规律的随机变化。

零件在加工过程中，切削刀刃在已加工表面上残留的切削层，及切削时刀具与已加工表面的摩擦、切屑分离时的塑性变形和金属撕裂、工艺系统的高频振动等影响，使零件存在着间距较小的轮廓峰谷。这种表面上具有较小间距的峰谷所组成的微观几何形状特性，称为表面粗糙度。表面粗糙波距一般都很小，约为  $2 \sim 800 \mu\text{m}$ ，波高也很低，约为  $0.03 \sim 400 \mu\text{m}$ 。国家标准 GB/T131—1993 规定了表面粗糙度的代号、符号及其标注方法。

波纹度和粗糙度对机械零件的影响并不一样，但从图形上看，两者的主要区别只是波长不同。如图 2-2 所示，他们的波高一样，当表面很大时，前者与理想平面一样，并无粗糙的感觉，当波距缩得很短（如图 2-2b 所示）时，则表面虽然平直，但却成为一个粗糙的表面。目前还没有按波距的长短来区分波纹度和粗糙度的定义。

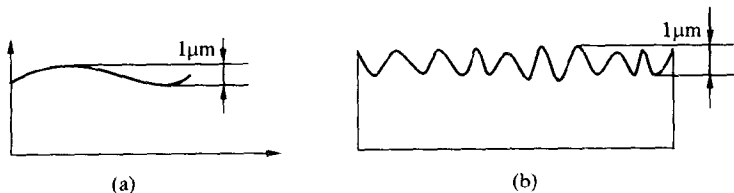


图 2-2 表面粗糙度廓形图

a—波纹度；b—粗糙度

表面粗糙度的特征与摩擦磨损的关系较密切，对接触表面上的压力分布、接触变形的程度、摩擦阻力大小和摩擦成因等都有很大影响，因此要对表面粗糙度再作进一步分析。

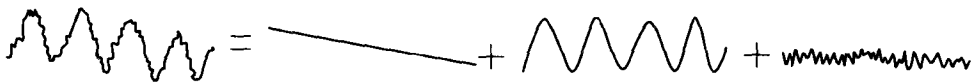


图 2-3 实际表面轮廓示意图

综上所述，实际表面轮廓 = 形状偏差 + 波纹度 + 表面粗糙度（图 2-3）。

## 二、表面形貌参数

工程上常采用表面粗糙度表征表面形貌参数。表面粗糙度可以通过轮廓仪记录下来，然后对其进行分析，测量所得的表面轮廓。由于沿轮廓方向和轮廓高度方向所取的比例不同（通常沿轮廓高度方向的放大倍数比沿轮廓方向大许多倍），以至如图 2-4 所示的表面

似乎很粗糙。

国家标准规定可用以下参数表示表面粗糙度：微观不平度 + 点高度  $R_z$ 、轮廓算术平均偏差  $R_a$  和轮廓最大高度  $R_y$ 。

### 1. 微观不平度 + 点高度 $R_z$

$R_z$  是在取样长度内 5 个最大的轮廓峰高的平均值与 5 个轮廓谷深平均值之和

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 y_{mi}}{5} \quad (2-1)$$

式中  $y_{pi}$ ——第  $i$  个最大的轮廓峰高；

$y_{mi}$ ——第  $i$  个最大的轮廓谷深。

这一参数对表面轮廓的评定，在测量时易受人为因素影响，不能稳定地反映出表面的几何特性。

### 2. 轮廓算术平均偏差 $R_a$

$R_a$  上指在取样长度  $L$  内，测量轮廓上各至中线  $ox$  偏距绝对值的总和的算术平均值。其数学表达式为

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

或近似表示为

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2-3)$$

式中  $y_i$ ——轮廓上任一点到中线的偏距；  
 $n$ ——测点数。

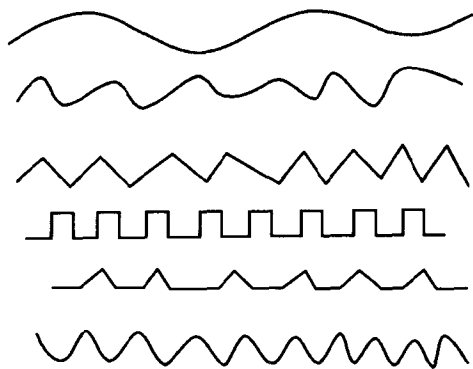


图 2-5  $R_a$  值相同的不同表面

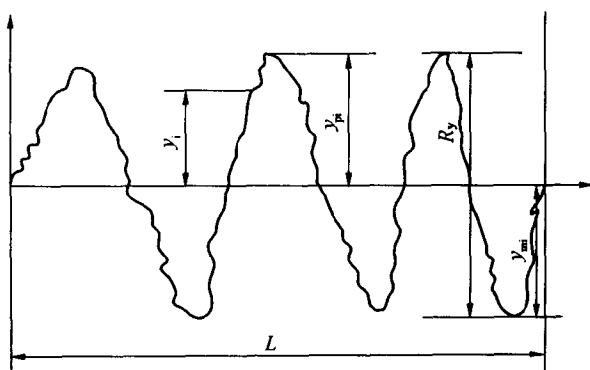


图 2-4 表面粗糙度轮廓图

### 3. 轮廓最大高度 $R_y$

$R_y$  是在取样长度内表面轮廓上经常出现的微观不平度的最大高度，轮廓峰顶线和谷底线之间的距离。

评定表面粗糙度的参数，也可用轮廓均方根偏差  $R_q$  表示。 $R_q$  是表面轮廓在取样长度内各点到中线距离平方和的平均值的平方根，即

$$R_q = \left( \frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx \right)^{1/2} \quad (2-4)$$

如图 2-5 所示具有相同轮廓算术平均偏差  $R_a$  的表面，由于波距，波形不一样，表面的接触特性也不相同。因此除了用表面粗糙度参数

外，应补充以下的附加参数：

轮廓最大峰高  $R_p$ 、轮廓峰顶部平均曲率半径  $r$ 、轮廓峰的平均倾角、轮廓支承曲线参数、波纹度、最大波峰高  $H_B$ ，平均波距  $S_B$ ，峰顶曲线平均曲率半径  $r_B$ 。

### 三、确定表面形貌的方法

测量表面形貌的方法和仪器设备种类很多，以下介绍几种测量方法和常用仪器。

#### 1. 光切法

光切法是利用显微镜观察表面粗糙度和相接触表面结构模型的方法，光线可以垂直、平行或倾斜地照射到被测表面，采用倾斜照射可以提高放大倍数。比较常用的是双管显微镜，光线经狭缝后形成一束光带，以  $45^\circ$  方向与被测表面相截。

#### 2. 干涉法

干涉法测表面形貌的原理（参见图 2-6）：从光源发出的光线通过分光镜分成两束，一束光线反射至被测表面后返回，另一束至参考表面后返回。由于被测表面有微观不平度，所以两路光线相遇后形成与其相应的起伏不平的干涉条纹，利用测量干涉条纹的弯曲量及两相邻干涉条纹之间的距离，即可算出相应峰、谷高度差。

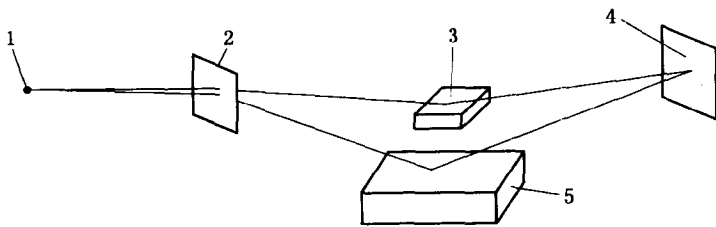


图 2-6 干涉法测表面形貌

1—光源；2—分光镜；3—参考面；4—观察屏；5—被测表面

#### 3. 电子显微镜观察法

电子显微镜的基本原理是在一个高真空中，用电子枪发射电子束到被测表面，通过由表面发射回来的电子束，在入射角适当时，可在荧光屏上看出试件的表面形貌。电子显微镜的分辨能力高，是最好光学显微镜的 250 倍，分辨能力为  $(1 \sim 2) \times 10^{-10} \text{ m}$ ，放大倍数为 20~80 万倍，用它观察表面可直接观察到固体表面的单个分子和晶体结构。

#### 4. 表面轮廓记录法

这是一种利用仪器的触针与被测表面相接触，并使触针等速地沿其表面轮廓移动以描述出轮廓图形的方法。在计算机技术大量应用之前，表面轮廓仪几乎都是以模拟电路进行信息

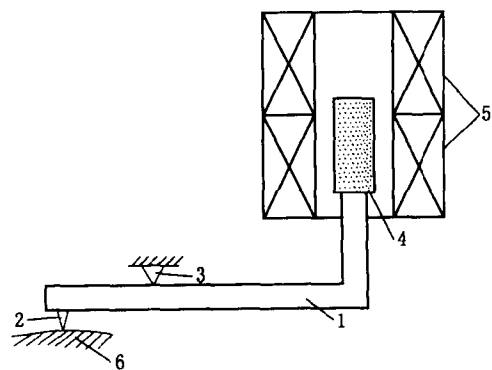


图 2-7 电感式传感器的原理图

1—杠杆；2—触针；3—支点；4—铁芯；  
5—差动电感线圈；6—被测表面

处理的，常用的是电动轮廓仪。

如图 2-7 所示，是电动轮廓仪的电感式传感器原理图，金刚石触针在轻微的压力下与被测表面接触。工作时，杠杆由电动机驱动，以一定速度沿被测表面作水平移动，被测表面的微观不平迫使触针上下来回运动。触针的上下运动使杠杆另一端上的铁芯同步地在传感器线圈内上下运动，引起线圈内电感发生变化使电桥失去平衡，于是输出与触针位移量有关的电讯号。电讯号经过放大、检波，就获得表示触针位移量大小和方向的电讯号。此后，电讯号分三路，一路接通指零表以指示触针的位置；一路经直流功率放大器后，推动记录器记录表面轮廓的图形，以供分析研究表面形貌时使用；三路经噪声和波度滤波以及平均表放大器后，输入积分计算器进行积分运算，即可得出表面粗糙度的值，如算术平均偏差  $R_a$  等。

轮廓仪的优点是在较大范围内记录表面轮廓的图形，比较直观、使用比较普遍。

## 第二节 金属表面的性质

金属及其合金是机械制造上应用最广泛的材料。其表面的物理和化学性质，如机械性能、电性能、热性能以及表面氧化和极性，必然影响到相互接触表面的摩擦学过程。

### 一、固体表面层结构的变化

金属及其合金都是由原子或分子组成的一种物质的凝聚集态，金属的性能不仅取决于其组成原子的本性和原子间结合键的类型，同时也取决于原子规则排列的方式。

固态金属规则排列的原子称为晶体结构。基本排列形式有体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格（参见图 2-8）。

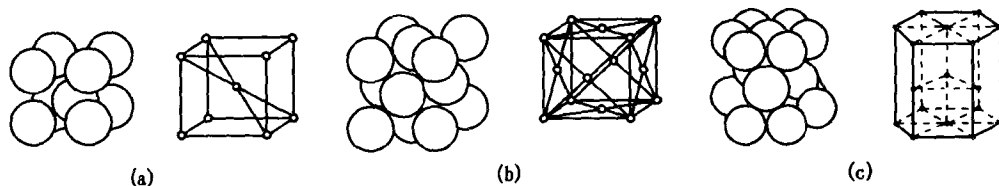


图 2-8 晶体结构

a—体心立方晶格；b—面心立方晶格；c—密排六方晶格

在常用金属中，如铬（Cr）、钼（Mo）、钨（W）、钒（V）、铁（ $\alpha$ -Fe）为体心立方晶格。铝（Al）、铜（Cu）、镍（Ni）、铅（Pb）和铁（ $\gamma$ -Fe）等为面心立方晶格。镁（Mg）、镉（Cd）、铍（Be）、锌（Zn）等为密排六方晶格。

#### 1. 晶格缺陷

实际金属的晶体结构并不像理论上的单晶体，按照一定的规律整齐排列，完好无损。由于各种原因，晶体结构存在着许多不同类型的缺陷，将显著地影响金属的机械性能和物理化学性能等。按照几何特征，晶体缺陷主要分为点缺陷、线缺陷、面缺陷。

##### 1) 点缺陷

在晶体中，原子在其平衡位置振动，各原子的动能时起时伏，当某个原子的平均动能大大超过给定温度下的平均动能，以致脱离其在晶格中原来的位置而“挤入”晶格间隙中，使其原来的位置空着成为空位。跑出的原子挤入晶格间隙破坏了原子有序的排列，形成多余的间隙原子，如图 2-9 示。如若在间隙中的原子为金属所含杂质，则为杂质间隙原子，杂质间隙原子比较常见。杂质原子也可取代金属原子而占据晶体的结点位置，成为替换原子。空位、间隙原子和替换原子都会影响晶体点阵的正常结构，导致发生畸变。

空位、间隙原子和替换原子称点缺陷。

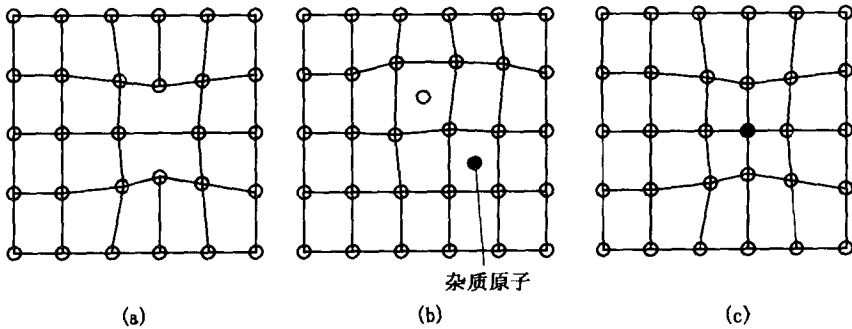


图 2-9 点缺陷  
a—空位；b—间隙原子；c—替换原子

## 2) 线缺陷

线缺陷就是指晶体中的位错。

由于某种原因，一部分晶体沿着晶面相对另一部分发生原子间距的错动，其结果形成位错。如图 2-10 所示，图中上半部分晶体逐步移动了一个原子间距，在发生了错动的晶体部分与未发生错动部分的边缘上产生了一个多余的原子面（ABCD），AB 即为位错线，就是晶体滑移部分与未滑移部分的分界线，故线缺陷又叫位错。

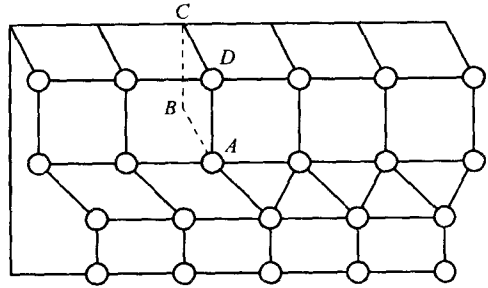


图 2-10 线缺陷

位错破坏了原子的有序排列，位错运动可使晶体产生弹性畸变和塑性变形。位错的产生使金属接近表面处产生微孔隙，当孔隙凝聚就产生相平行的裂纹，当裂纹生长到极限长度时，材料就会以“薄瓣状”被落下来。加工硬化就是当位错密度随塑性变形增加而增加时，许多位错相互作用的结果。

## 2. 晶体结构变化

晶体结构的变化可以改变金属表面的摩擦特性。元素钴在加热时，晶体结构从常温的密排六方晶格转变为面心立方晶格，摩擦系数增大，而当温度降到室温时，摩擦系数将减小到原来的数字。例如四氯化物在温度升高到 222.5K 时，摩擦系数大大降低。

在摩擦力的作用下，表层反复变形，温度也随之变化，接触区的晶体结构和材料结构