

耐磨材料 应用手册

陈华辉 邢建东 李卫 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



耐 磨 材 料 应 用 手 册

陈华辉 邢建东 李卫 主编



机 械 工 业 出 版 社

本书系统全面地介绍了耐磨材料及其应用技术。前两章简要地介绍了材料的摩擦磨损基本理论；第3章介绍了材料摩擦磨损性能的测试方法；第4章至第11章分别介绍了高锰钢和中锰钢、耐磨合金钢、耐磨铸铁、硬质合金、陶瓷材料、耐磨高分子材料、复合材料、耐磨涂层的基本性能和作为耐磨件的应用情况。本书由中国金属学会特殊钢分会耐磨材料学术委员会组织编写，具有一定的权威性。本书在简要介绍基本理论的基础上，重点介绍了各类耐磨材料及其应用技术，具有很强的系统性、实用性。

本书的读者对象为各行业从事机械设备设计和维护的工程技术人员，也可供从事摩擦磨损和耐磨材料工作的研究人员、机械和材料专业的在校师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

耐磨材料应用手册/陈华辉等主编. —北京：机械工业出版社，2006.8

ISBN 7-111-19538-8

I. 耐… II. 陈… III. 耐磨材料-技术手册
IV. TB39-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 074917 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：陈保华 版式设计：霍永明 责任校对：吴美英

封面设计：鞠 杨 责任印制：洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

169mm×239mm·19.375 印张·755 千字

0 001—4 000 册

定价：55.00 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）68326294

编辑热线电话（010）68351729

封面无防伪标均为盗版

前 言

磨损是机械设备重要的失效方式。我国每年因磨损消耗的金属耐磨材料约 300 万 t 以上。磨损不仅引起设备零件失效, 导致工件更换和维修频繁、设备工作效率降低, 而且消耗了大量的能源和材料。因而, 减少摩擦和磨损, 提高资源利用效率, 力争以最少的资源消耗获得最大的经济和社会收益, 建设资源节约型社会, 促进国民经济可持续发展是我们每个工程技术人员乃至每个公民义不容辞的责任和义务。目前减摩降磨主要有两种方法: ①合理选择和使用耐磨材料; ②应用表面技术, 在普通材料表面上制备一层耐磨涂层, 即“好钢用在刀刃上”, 节省贵重材料。

材料磨损是一个非常复杂的现象, 它受摩擦工况条件、环境和材料自身因素的影响。因此, 了解摩擦磨损知识和耐磨材料, 对正确地选择和使用材料是非常重要的。

40 多年来, 从事摩擦磨损和耐磨材料研究的科技工作者对材料的摩擦磨损进行了大量的研究。在 20 世纪 80 至 90 年代, 机械工业出版社出版了《材料耐磨抗蚀及其表面技术丛书》, 冶金工业出版社出版了《金属磨损和金属耐磨材料手册》, 为我国工程技术人员了解摩擦磨损知识和正确地使用金属耐磨材料做出了积极贡献。近 20 年来, 我国耐磨材料的研究和应用又取得了重大进展, 满足了我国国民经济迅猛发展和日新月异的技术进步的需要。然而, 令人遗憾的是这一时期有关摩擦磨损和耐磨材料的书籍及专著却相当稀少。

自 1980 年中国金属学会特殊钢分会金属耐磨材料学术委员会 (以下简称耐磨材料学会) 成立以来, 耐磨材料学会的广大科技工作者和工程技术人员始终致力于金属耐磨材料的研究开发和推广应用工作, 取得了丰硕的成果。近十年来, 学会科技工作者在耐磨非金属材料 and 表面涂层方面也进行了卓有成效的研究和开发工作, 取得了可喜的成绩, 有力地推动了相关企业的技术进步和发展。为了使广大读者正确掌握材料摩擦磨损的相关知识, 及时了解近年来我国耐磨材料研究和应用的最新进展, 指导读者根据设备零部件的使用工况, 合理、正确地选择耐磨材料, 适应建设资源节约型社会的需要, 为

我国耐磨材料事业的发展尽绵薄之力，耐磨材料学会决定组织编写本书。本书的编写人员多为长期从事耐磨材料研究和应用、在我国耐磨材料界有着重要影响的知名专家、学者。尤其应当指出的是，书中部分章节是部分编写人员的专利，如第5章5.2节和5.3节中的部分内容、第11章的11.3节等，是他们从事耐磨材料研究和应用的辛勤成果和宝贵经验，蕴含着他们为丰富和发展我国耐磨材料事业所做出的奉献和追求。

本书与以前出版的耐磨材料书籍和手册的不同之处在于：①不仅介绍了金属耐磨材料，而且介绍了耐磨陶瓷、高分子材料和复合材料，并对热喷涂、激光熔覆和真空熔结耐磨涂层作了较详尽的介绍。②不仅简要介绍基本理论，而且介绍各种材料的应用实例以及实际应用中应注意的问题。本手册共分11章，前两章简要地介绍了材料的摩擦磨损基本理论；第3章介绍了材料摩擦磨损性能的测试方法；第4章至第11章分别介绍了高锰钢和中锰钢、耐磨合金钢、耐磨铸铁、硬质合金、陶瓷材料、耐磨高分子材料、复合材料、耐磨涂层的基本性能和作为耐磨件的应用情况。

本书由陈华辉、邢建东、李卫主编。编写人员编写情况如下：第1章：马向东；第2章：赵会友；第3章：陈华辉、赵会友；第4章：李卫；第5章：王定祥、刘光启；第6章：邢建东、高义民；第7章：石建华、曹万里、陈华辉、曹洪治；第8章：吕振林；第9章：李国禄；第10章：鲍崇高；第11章：朱子新（11.1）、曲敬信（11.2）、吴仲行（11.3）。全书初稿由陈华辉、邢建东、李卫分别审校，终稿由陈华辉审校定稿。

正是由于编写人员的辛勤工作和奉献精神，才使此书得以出版，在此对他们表示衷心感谢。同时也衷心地感谢书中被引用文献资料的作者们。本书最后的打印校正得到了研究生曹洪治和王利秋的鼎力帮助，在此一并表示感谢。

由于本书内容涉及面广，撰写和编审人员水平有限，不当之处还望广大读者予以指正。

陈华辉

2006年8月

目 录

前言

第 1 章 固体的摩擦 1

1.1 固体表面特性 1

1.1.1 固体表面 1

1.1.2 固体表面形貌 1

1.1.3 表面形貌的一维表征 2

1.2 摩擦原理 3

1.2.1 摩擦的概念及分类 4

1.2.2 摩擦定律 5

1.3 材料的摩擦 11

1.3.1 金属材料的摩擦 11

1.3.2 非金属材料的摩擦 13

1.3.3 层状固体的摩擦 20

参考文献 22

第 2 章 磨损及其影响因素 24

2.1 概述 24

2.1.1 磨损的定义 24

2.1.2 磨损的分类 25

2.1.3 磨损的评定方法 25

2.2 粘着磨损 27

2.2.1 粘着磨损的定义和分类 27

2.2.2 粘着磨损模型 28

2.2.3 金属的粘着磨损 30

2.2.4 其他材料的滑动磨损 36

2.3 磨料磨损 38

2.3.1 磨料磨损定义和分类 38

2.3.2 磨料磨损机理 39

2.3.3 影响磨料磨损的主要因素 44

2.4 冲蚀磨损 57

2.4.1 冲蚀磨损定义和分类 57

2.4.2 冲蚀磨损机理 57

2.4.3 影响冲蚀磨损的主要因素

因素 59

2.4.4 浆体冲蚀磨损 64

2.4.5 气蚀磨损 67

2.4.6 液滴冲蚀磨损 68

2.5 疲劳磨损 69

2.5.1 疲劳磨损定义 69

2.5.2 疲劳磨损机理 69

2.5.3 影响疲劳磨损的主要因素 71

2.6 腐蚀磨损 74

2.6.1 腐蚀磨损定义和分类 74

2.6.2 氧化磨损 75

2.6.3 电化学腐蚀磨损 78

2.7 微动磨损 84

2.7.1 微动磨损的定义及特点 84

2.7.2 微动磨损机理 85

2.7.3 影响微动磨损的因素和 防护方法 85

参考文献 90

第 3 章 材料摩擦磨损性能的

测试方法 93

3.1 材料摩擦性能的测定 93

3.1.1 摩擦阻力的测定 93

3.1.2 摩擦系数的测定 94

3.1.3 摩擦温度的测定 94

3.2 材料磨损性能的测定 95

3.2.1 磨损试验的类型 95

3.2.2 实验室磨损试验 96

3.2.3 常用的摩擦磨损试验机 简介 99

3.2.4 摩擦磨损动态测试 106

3.3 磨屑检测分析技术 108

3.3.1 光谱分析法 108

3.3.2 铁谱分析法	109	材料	224
3.4 表面分析技术及常用的 分析仪器	110	5.4.3 耐热耐磨钢	227
3.4.1 表面形貌	110	参考文献	230
3.4.2 表面分析技术	111	第6章 耐磨铸铁及其应用	232
3.4.3 常用表面分析仪器	111	6.1 普通白口铸铁	232
参考文献	114	6.2 镍硬铸铁	234
第4章 高锰钢和中锰钢及 其应用	115	6.2.1 化学成分与性能	235
4.1 Mn13 系列的高锰钢	115	6.2.2 铸造与热处理	241
4.1.1 高锰钢的国家标准和 ISO 国际标准	115	6.2.3 应用与耐磨性	244
4.1.2 高锰钢的化学成分	118	6.3 低铬铸铁	247
4.1.3 高锰钢的显微组织	122	6.4 中铬铸铁	251
4.1.4 高锰钢的力学性能	127	6.5 高铬铸铁	253
4.1.5 高锰钢的加工硬化 特性	133	6.5.1 高铬铸铁的组织	254
4.1.6 高锰钢的物理性能	134	6.5.2 高铬铸铁的化学成分及 牌号	259
4.1.7 高锰钢的铸造	135	6.5.3 高铬铸铁的熔炼、铸造及 热处理	269
4.1.8 高锰钢的热处理	142	6.5.4 高铬铸铁的物理性能和 力学性能	286
4.1.9 高锰钢的切割、焊接、机 加工与整形	145	6.5.5 高铬铸铁的耐磨性能	294
4.1.10 高锰钢的耐磨性与 应用	146	6.5.6 高铬铸铁在高温下的 性能	296
4.2 中锰钢	151	6.5.7 单向凝固高铬铸铁的性能 特点	304
4.2.1 水韧处理的中锰钢	151	6.5.8 高铬铸铁的应用	305
4.2.2 沉淀强化处理的 中锰钢	152	6.6 球墨铸铁	309
4.3 Mn17 (Mn18) 高锰钢	153	6.6.1 马氏体耐磨球墨铸铁	309
参考文献	153	6.6.2 贝氏体耐磨球墨铸铁	311
第5章 耐磨合金钢及其 应用	155	6.6.3 中锰耐磨球墨铸铁	314
5.1 耐磨低合金钢	157	参考文献	314
5.2 耐磨中合金钢	190	第7章 硬质合金及其应用	317
5.3 耐磨高合金钢	210	7.1 硬质合金的种类	317
5.4 国外部分耐磨合金钢	222	7.2 硬质合金的性能	318
5.4.1 工程机械合金钢零件	222	7.2.1 硬质化合物的性能	318
5.4.2 球磨机合金钢磨球与衬板		7.2.2 硬质合金性能简介	319
		7.2.3 硬质合金国家标准牌号和 相关性能	321
		7.2.4 硬质合金典型产品及	

性能	324	9.2.1 化学结构与性状	424
7.3 硬质合金的制备	326	9.2.2 聚四氟乙烯的生产 方法	424
7.4 硬质合金的应用	327	9.2.3 聚四氟乙烯的性能	425
7.4.1 切削用硬质合金	328	9.2.4 聚四氟乙烯的改性	430
7.4.2 矿用工具硬质合金	336	9.2.5 聚四氟乙烯的应用	434
7.4.3 耐磨零件和工具类硬质 合金	339	9.3 尼龙	441
参考文献	348	9.3.1 化学组成及命名	441
第 8 章 陶瓷材料及其应用	349	9.3.2 尼龙的性能	443
8.1 氧化物陶瓷	349	9.3.3 改性和新型尼龙品种	452
8.1.1 氧化铝陶瓷	349	9.3.4 尼龙的应用	455
8.1.2 氧化锆陶瓷	365	9.4 聚氨酯	461
8.2 碳化物陶瓷	373	9.4.1 聚氨酯弹性体结构与性能 特点	462
8.2.1 碳化硅陶瓷	374	9.4.2 浇注型聚氨酯弹性体	463
8.2.2 碳化硼陶瓷	385	9.4.3 热塑性聚氨酯弹性体	466
8.3 氮化物陶瓷	389	9.4.4 混炼型聚氨酯弹性体	469
8.3.1 氮化硅陶瓷	390	9.4.5 聚氨酯弹性体主要性能	470
8.3.2 Sialon (赛隆) 陶瓷	401	9.4.6 聚氨酯弹性体的应用	473
8.4 陶瓷材料的应用	405	参考文献	482
8.4.1 密封件	405	第 10 章 复合材料及其应用	486
8.4.2 轴承	405	10.1 复合材料的分类	486
8.4.3 发动机挺柱	406	10.2 复合材料的性能特点	487
8.4.4 磨球	406	10.3 聚合物基复合材料	489
8.4.5 衬板	407	10.3.1 聚合物的类型、结构与 性能	490
8.4.6 喷嘴	407	10.3.2 耐磨聚合物基复合材料 及工业应用	493
8.4.7 管道	407	10.4 陶瓷基复合材料	498
8.4.8 风机	408	10.4.1 陶瓷基复合材料原材料 及其特性	500
参考文献	408	10.4.2 耐磨陶瓷基复合材料的 应用	505
第 9 章 耐磨高分子材料及其 应用	414	10.5 金属基复合材料	509
9.1 超高相对分子质量聚乙烯	414	10.5.1 金属基复合材料的种类及 其微观组织特征	510
9.1.1 超高相对分子质量聚乙烯 的生产方法	414	10.5.2 颗粒增强金属基复合 材料	511
9.1.2 超高相对分子质量聚乙烯 的性能	416		
9.1.3 超高相对分子质量聚乙烯 的应用	420		
9.2 聚四氟乙烯	424		

10.5.3 纤维增强金属基复合 材料	513	11.2.1 激光及其特性	554
10.5.4 耐磨金属基复合材料的 应用	514	11.2.2 激光熔覆耐磨涂层 工艺	555
参考文献	518	11.2.3 激光熔覆材料	557
第 11 章 耐磨涂层	521	11.2.4 激光熔覆层的组织	560
11.1 热喷涂耐磨涂层	521	11.2.5 激光熔覆层的耐磨性	564
11.1.1 热喷涂技术概述	521	11.2.6 激光熔覆耐磨涂层 应用	568
11.1.2 耐磨涂层用热喷涂 材料	526	11.3 真空熔结耐磨涂层	570
11.1.3 金属喷涂材料及金属耐 磨涂层	528	11.3.1 真空熔结基本原理	571
11.1.4 陶瓷粉末及其涂层	536	11.3.2 适用于真空熔结的 原材料	573
11.1.5 金属陶瓷(或塑料)复合 粉末及其涂层	542	11.3.3 真空熔结工艺	581
11.1.6 热喷涂耐磨涂层的 应用	547	11.3.4 真空熔结装备	587
11.2 激光熔覆耐磨涂层	554	11.3.5 真空熔结的适用范围与 应用实例	588
		参考文献	607

第 1 章 固体的摩擦

1.1 固体表面特性

1.1.1 固体表面

固体可分为两大类：结晶固体和非晶质固体，在这里主要介绍结晶固体。理想的晶体是由晶胞组成，并具有三维周期性。但物质不是无限的，在晶体中原子或分子的周期性排列发生大面积突然终止的地方就出现了界面，如固体—液体、固体—气体及固体—固体的界面，常把固体—气体（或真空）、固体—液体的界面称为固体的表面。很多物理化学过程（如催化、腐蚀、摩擦和电子发射等）都发生在“表面”。表面是一个抽象的概念，实际常把无厚度的抽象表面叫数学表面，把厚度在几个原子层内的表面叫物理表面，而把我们常说的实际固体表面叫工程表面。工程表面是很复杂的，它可分为“内表面层”（包括基体材料和加工硬化层），以及“外表面层”（包括吸附层、氧化层等），图 1-1 所示是金属表面的实际构成示意图。对于给定条件下的表面，其实际组成及各层的厚度与表面制备过程、环境以及材料本身的性质有关。

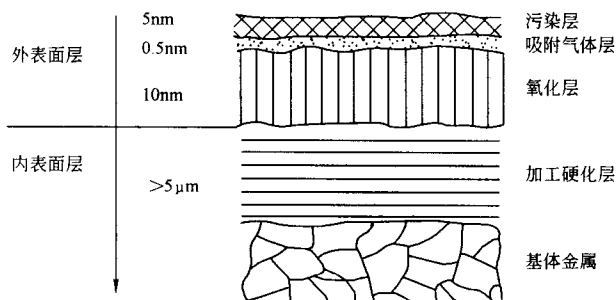


图 1-1 金属表面的实际构成示意图

1.1.2 固体表面形貌

固体的表面形貌特征与其材料的摩擦学性能之间存在着密切联系。用各种显微镜、轮廓仪等手段对磨损后的固体表面形貌进行观察与分析，是目前进行固体

材料磨损机理研究的重要方面。

图 1-2 所示是由触针式轮廓仪扫描获得的某一实际的固体表面形貌，工程实际中的固体表面形貌大多如此。

材料的摩擦和磨损主要取决于两表面间实际接触面积的性质，这种性质又取决于微凸体的分布、尺寸和形状。因此，在研究各种表面的接触现象时，必须测量这些特征。



图 1-2 三维表面形貌

1.1.3 表面形貌的一维表征

所谓固体表面形貌的一维表征，就是仅从一个空间尺度对固体的表面形貌进行刻划。通常的做法是，用名义平面的垂直面，沿一定的方位，从实际的固体表面上截取一个有代表性平面，称为表面轮廓，如图 1-3 所示。以此为基础对原表面的形貌特性进行表征。

根据其波长的不同，可将实际的固体表面分为宏观粗糙度和微观粗糙度两部分，如图 1-4 所示。其中，微观粗糙度是指表面上波长很短（通常短于 $400\mu\text{m}$ ）的峰（微凸体）和谷，而宏观粗糙度（又称为波度）则是表面上波长较长的粗糙度。摩擦学领域主要研究固体表面的微观粗糙度，如轮廓算术平均偏差（ R_a ）和均方根偏差（ R_q ）等。

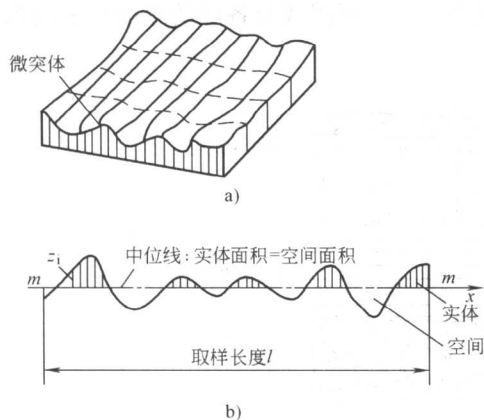


图 1-3 固体表面形貌与表面轮廓
a) 表面形貌(三维) b) 表面轮廓(二维)

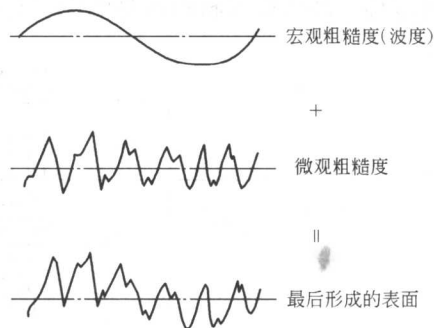


图 1-4 固体表面的形成

1. 轮廓算术平均偏差（ R_a ）

轮廓算术平均偏差（ R_a ），又称中位线算术平均偏差 CLA（Center Line Aver-

age), 定义为一个取样长度内, 表面轮廓线偏离其中位线的绝对值的算术平均值, 见图 1-3。其数学表达式为

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

式中 l ——取样长度, 其值随粗糙度等级不同而变化;

$z(x)$ ——为沿中位线的轮廓高度。

其离散化计算公式为

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

式中 n ——一个取样长度内的采样点数;

z_i ——沿中位线的轮廓采样高度值。

轮廓算术平均偏差 (R_a) 是国际上最为广泛认可和使用的表面粗糙度参数, 但它并不能完整地刻划固体表面的形貌特征。如图 1-5a~f 所示的六种表面轮廓, 它们的 R_a 值都相同, 但其形貌却显著不同。

2. 轮廓均方根偏差 (R_q)

统计学认为, 与 R_a 相比, 均方根偏差 (R_q), 简称 RMS (Root Mean Square), 能更好地描述表面轮廓的粗糙度特征。其定义为, 在一个取样长度内, 表面轮廓线偏离其中位线距离平方的算术平均值的平方根 (见图 1-3)。其数学表达式为

$$R_q = \left[\frac{1}{l} \int_0^l |z(x)|^2 dx \right]^{1/2} \quad (1-3)$$

其离散化计算公式为

$$R_q = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i|^2 \right]^{1/2} \quad (1-4)$$

图 1-5d、e 两表面轮廓具有相同的 R_q 值, 但它们的表面形状正好相反, 此即说明 R_q 仍不能完全区分不同的表面形貌。

对绝大多数的固体表面而言, R_a 与 R_q 之间有如下的近似关系, 即

$$R_a \approx 0.8 R_q \quad (1-5)$$

在 R_a 与 R_q 的使用中, 根据国家标准 GB/T 3505—1983 推荐优先选用 R_a 。

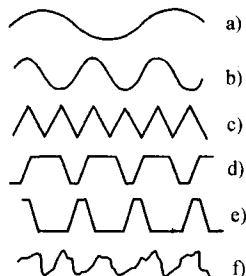


图 1-5 R_a 值相同的
不同表面轮廓

1.2 摩擦原理

摩擦是自然界存在的一种普遍现象, 与我们的生活息息相关。了解和掌握摩擦的基本规律, 使其能够更好地为人类服务, 具有重要的意义。本节着重介绍摩擦的基本概念和定律, 探讨摩擦产生的主要原因, 阐述不同材料摩擦的一些基本

特点。

1.2.1 摩擦的概念及分类

1. 摩擦的概念

两个相互接触的物体在外力作用下发生相对运动（或具有相对运动趋势）时，就会发生摩擦，在接触面间产生的切向运动阻力或阻力矩称为摩擦力或摩擦力矩。人类的许多活动都运用了摩擦原理，史前的原始人类就懂得了“摩擦生热”，而摩擦轮传动、带轮传动、各种车辆和飞机的制动器等都利用了摩擦，甚至连人们日常的行走也离不开摩擦。

但是，在大多数情况下，摩擦又是有害的，它造成了大量的能源损耗和材料磨损。据统计，世界上的能源约有 $1/3 \sim 1/2$ 以各种形式消耗于摩擦^[1]。

摩擦的实验测量方法如图 1-6a 所示，把长方形物体 B 放在水平桌面 C 上，B 的一端系一根绳，并且经过装在桌边的滑轮与盘 A 相连。逐渐增加盘 A 内的砝码数，即逐渐增大作用在物件 B 上的外力 P 。在外力 P 逐渐增大的过程中，物体 B 并不立即开始滑动，表明在 B 与 C 的接触面上产生了与 P 大小相等方向相反的阻力 F ，如图 1-6b 所示，阻止 B 在 C 上滑动。但当外力增大到一定数值时，物体 B 就开始滑动。因此，把 B 运动前的力 F 叫静摩擦力（ $F_{\text{静}}$ ）。 $F_{\text{静}}$ 随外力 P 的增大而增大，把 B 即将发生运动时的力 F 叫最大静摩擦力。当 P 超过最大静摩擦力时，物体就要发生相对滑动，此时的摩擦力 F 叫动摩擦力（ $F_{\text{动}}$ ）。

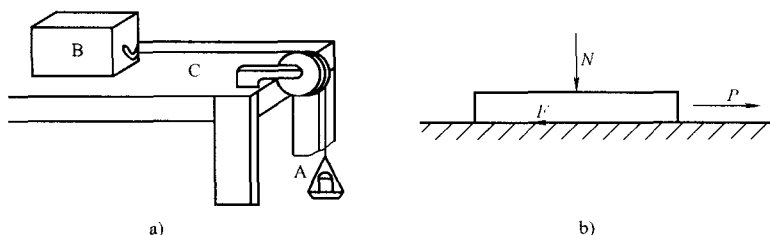


图 1-6 摩擦实验

a) 滑轮砝码测量方法 b) 受力分析图

2. 摩擦的分类

摩擦可以按不同的方式来分类^[2]。

(1) 按摩擦副表面的润滑状况分类

1) 干摩擦：常指名义上无润滑的摩擦。无润滑的摩擦不等于干摩擦，只有既无润滑又无湿气的摩擦，才能称为干摩擦。名义上无润滑，但并非绝对干燥的摩擦，应称为无润滑摩擦。

2) 边界摩擦: 两接触表面间存在一层极薄的润滑膜, 其摩擦和磨损不是取决于润滑剂的粘度, 而是取决于两表面的特性和润滑剂特性。

3) 流体摩擦: 具有体积特性的流体层隔开的两固体相对运动时的摩擦, 即由流体粘性引起的摩擦。

另外还有两种混合摩擦, 即半干摩擦 (此时部分接触点是干摩擦, 而另一部分是边界摩擦) 和半流体摩擦 (此时部分接触点处于边界摩擦, 另一部分处于流体摩擦)。

(2) 按摩擦副的运动形式分类

1) 滑动摩擦: 当接触表面相对滑动 (或具有相对滑动趋势) 时的摩擦, 称为滑动摩擦。

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, 称为滚动摩擦。

(3) 按摩擦副的材质分类

1) 金属材料的摩擦: 摩擦副由金属材料 (钢、铸铁及有色金属等) 组成的摩擦。

2) 非金属材料的摩擦: 摩擦副由高聚物、无机物等组成或非金属材料与金属配对时的摩擦。

(4) 按摩擦副的工况条件分类

1) 一般工况下的摩擦: 即常见的工况 (速度、压力、温度) 下的摩擦。

2) 特殊工况下的摩擦: 指在高速、高温、高压、低温、真空等特殊环境下的摩擦。

此外, 还有静摩擦 (两物体趋于产生位移, 但仍未产生相对运动之摩擦) 和动摩擦 (相对运动两表面之间的摩擦), 以及外摩擦 (两个相接触物体的表面, 相对运动时在实际接触处的分界面上所产生的摩擦) 和内摩擦 (同一物体的物质相对位移产生的摩擦) 之分。

1.2.2 摩擦定律

1. 古典摩擦定律^[3]

对摩擦现象进行科学研究, 最早开始于 15 世纪意大利的文艺复兴时代。1508 年伟大的意大利科学家达·芬奇 (Leonardo da Vinci) 首先着手于固体摩擦的研究, 他第一个提出一切物体, 刚要开始滑动, 便产生称为摩擦力的阻力; 并且指出, 摩擦力与重量成正比, 而与法向接触面积无关。1699 年法国科学家阿蒙顿 (G. Amontons) 进行了摩擦试验, 并建立了摩擦的基本公式。最后到 1780 年由库仑 (C. A. Coulomb) 在同样的试验基础上, 完成了今天的阿蒙顿-库仑摩擦定律, 现在称为“古典摩擦定律”。

现将古典摩擦定律的内容归纳如下：

1) 摩擦力的大小与接触面积间的法向载荷成正比，而与接触物体间名义接触面积的大小无关，即

$$F = \mu N \quad \text{或} \quad F \propto N \quad (1-6)$$

式中 F ——摩擦力；

μ ——摩擦系数， $\mu = F/N$ ；

N ——法向载荷。

2) 摩擦力的方向总是与接触表面相对运动速度的方向相反。

3) 摩擦力的大小与接触面间的相对滑动速度无关。

4) 静摩擦力大于动摩擦力。

实践证明，古典摩擦定律适合于一般的工程实际，但又存在一定的局限性和不确切性。如在古典摩擦定律中，摩擦系数 μ 是一个常数。但通过更多的试验指出，仅在一定的周围环境下，对于一定材质的摩擦来说，摩擦系数才是一个常数，不同材质的金属摩擦副其摩擦系数 μ 是不同的，不同的周围环境摩擦系数亦不同。如在正常的大气环境内，硬质钢的摩擦副表面，其摩擦系数为 0.6，但在真空下，其摩擦系数可达到 2.0；又如在正常的大气环境中，石墨摩擦副的摩擦系数为 0.1，但在非常干燥的环境下，摩擦系数超过 0.5；铜对镍在大气中的摩擦，其摩擦系数为 1.00，而在氦气中其摩擦系数则为 5.25。

因此，摩擦系数不是材料固有的特性，而是与材料和环境条件有关的综合特性。

2. 摩擦理论

(1) 简单粘着摩擦理论 从 1938 年开始，鲍登 (F.P.Bowden) 和泰伯 (D.Tabor) 对固体摩擦进行了深入的研究，提出了著名的摩擦粘着理论^[4]。这种理论认为：当两表面相接触时，在载荷作用下，某些接触点的单位压力很大，并产生塑性变形，这些点将牢固地粘着，使两表面形成一体（见图 1-7），即称为粘着或冷焊（焊接桥）。当一表面相对另一表面滑动时，粘着点则被剪断，而剪断这些连接点的力就是摩擦力。此外，如果一表面比另一表面硬一些，则硬表面的粗糙微凸体顶端将会在较软表面上产生犁沟，这种形成犁沟的力也是摩擦力。故摩擦力是两种阻力之和，即

$$F = F_a + F_p \quad (1-7)$$

式中 F ——摩擦力；

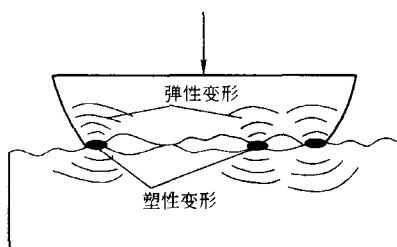


图 1-7 接触点的塑性变形及粘着点的形成

F_a ——摩擦力中的剪切阻力；

F_p ——摩擦力中的犁沟阻力。

粘着理论是目前人们广泛接受的一种摩擦理论，它对一些实验现象作出了比较合理的解释。这一理论认为摩擦以粘着为主，犁沟作用是次要的。但在一些情况下，实验结果常常与理论预测有一定差距。因此，对粘着理论还要作一些修正。

一般说来，对于理想的弹-塑性材料，粘着摩擦力就是剪断金属粘着点所需的剪切力。设粘结点部分的抗剪强度为 τ_b ，则粘着摩擦力为

$$F_a = A_r \tau_b = \frac{N}{\sigma_s} \times \tau_b \quad (1-8)$$

因而摩擦系数为

$$\mu_a = \frac{F_a}{N} = \frac{\tau_b}{\sigma_s} \quad (1-9)$$

式中 A_r ——实际接触面积；

N ——法向载荷；

σ_s ——材料的屈服点。

以上的分析是建立在理想的弹-塑性材料的基础上，忽略了冷作硬化的影响，与实际情况有一定差别。为了更接近实际情况，以较软金属的抗剪强度 τ_0 代替金属粘结点的抗剪强度 τ_b ，则粘着摩擦系数为

$$\mu_a = \frac{\tau_0}{\sigma_s} = \frac{\text{较软金属材料的抗剪强度}}{\text{较软金属材料的屈服点}} \quad (1-10)$$

按上式计算，对于大多数金属材料来说， $\tau_0 \approx \frac{1}{5} \sigma_s$ ，摩擦系数为 0.2。这说明了为什么大多数金属的力学性能（如硬度）变化很大而彼此间摩擦系数却相差不大的原因。如两个硬的金属接触时， σ_s 大， A_r 小， τ_0 大；而对于两个软的金属接触时， σ_s 小， A_r 大， τ_0 小；所以它们的比值 τ_0/σ_s 相差不会太大。但是，实验结果表明，很多金属材料在空气中测得的摩擦系数高于 0.5；在真空中测得的摩擦系数更高。因此，上述的简单粘着理论与实际结果有一定的差距，还要进行修正。

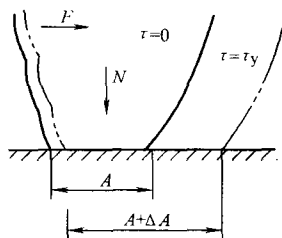


图 1-8 粘着点增大现象

(2) 粘着摩擦理论的修正 在静摩擦时，实际接触面积与载荷成正比。而在摩擦副滑动时，就要考虑切向力的存在，这时实际接触面积的增大是由于法向载荷与切向载荷联合作用的结果。也可以说，接触点发生屈服，是与由法向载荷所造成的压应力 σ 和由切向载荷所造成的切应力 τ 的合成应力有关，如图 1-8 所示。假定

$$\sigma^2 + \alpha\tau^2 = k^2 \quad (1-11)$$

式中 α 、 k ——待定系数。

当 $\tau = 0$ 时, 粘着点上的合成应力为 σ_y , 可得 $\sigma_y = k$,

代入上式得

$$\sigma^2 + \alpha\tau^2 = \sigma_y^2$$

即

$$\left(\frac{N}{A_r}\right)^2 + \alpha\left(\frac{F}{A_r}\right)^2 = \sigma_y^2$$

或

$$A_r^2 = \left(\frac{N}{\sigma_y}\right)^2 + \alpha\left(\frac{F}{\sigma_y}\right)^2 \quad (1-12)$$

式中 F ——摩擦力;

$\frac{N}{\sigma_y}$ ——简单粘着理论中的实际接触面积;

$\alpha\left(\frac{F}{\sigma_y}\right)^2$ ——切应力对接触面积的影响。

由上式可知, 纯净表面摩擦时, 实际接触面积可能增加很多, 因而摩擦系数变大, 这也可以解释在真空中所测得的摩擦系数为什么会增加的原因。

但是当摩擦副在空气中摩擦时, 由于表面有自然污染膜, 它的摩擦现象要用有自然污染膜存在时金属表面的粘着理论来解释。实际中大多数金属表面总是被薄氧化膜覆盖着, 因而这样的金属摩擦副的摩擦, 实质上是氧化膜对氧化膜的摩擦, 只有在氧化膜破坏后才可能直接形成金属对金属的摩擦。

因此, 当摩擦副表面被污染, 且污染膜的剪切强度较低时, 粘着接点的增长不明显。当污染膜的切应力 τ 达到污染膜的抗剪强度 τ_f 时, 表面膜被剪断, 摩擦副开始滑动。此时, 粘着摩擦系数可表示为

$$\mu_a = \frac{\tau_f}{\sigma_s} \quad (1-13)$$

式中 τ_f ——表面污染膜的抗剪强度;

σ_s ——金属本体的屈服点。

这个结论和简单粘着摩擦理论(当软金属膜镀覆在硬基体上时)的摩擦系数表达式一致。这是因为若界面的抗剪强度较低, 当 $F/A_r = \tau_f$ 时, 粘着接点的面积增大停止, 实际接触面积只与法向载荷有关。但在某些情况下, 由于表面污染膜被破坏, 金属与金属发生直接接触。这时界面的有效抗剪强度介于较软金属表面的抗剪强度与表面污染膜的抗剪强度之间。故摩擦系数决定于金属对金属和金属对污染膜摩擦时实际接触面积所占的比例。

在上述有关粘着摩擦的分析中, 是在下列假设条件下进行的: ①实际接触面积由塑性变形确定; ②两个摩擦表面由一个抗剪强度较低的膜隔开; ③摩擦力是剪切分离膜所需的力, 膜的强度高时, 摩擦力决定于基体材料的抗剪强度。