

耐磨材料 应用手册

第2版

中国金属学会特殊钢分会耐磨材料学术委员会◎组编
主编◎陈华辉 副主编◎邢建东 李卫



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

耐磨材料应用手册

第 2 版

中国金属学会特殊钢分会耐磨材料学术委员会 组 编

主 编 陈华辉

副主编 邢建东 李 卫



机 械 工 业 出 版 社

本手册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；第12章介绍了在冶金行业和电力行业应用的典型耐磨件的材料和使用性能。本手册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，具有权威性。本手册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，具有很强的系统性和实用性。

本手册可供各行业从事机械设备设计、维护的工程技术人员，以及从事耐磨产品生产的工程技术人员参考，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/陈华辉主编. —2版. —北京：
机械工业出版社，2012.10
ISBN 978-7-111-39615-4

I. ①耐… II. ①陈… III. ①耐磨材料-技术手册
IV. ①TB39-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 205977 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：陈保华 责任编辑：陈保华

版式设计：霍永明 责任校对：胡艳萍 陈秀丽

责任印制：杨 曦

北京京丰印刷厂印刷

2012 年 10 月第 2 版·第 1 次印刷

169mm×239mm·44.5 印张·2 插页·1021 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-39615-4

定价：109.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

社服务中心：(010) 88361066

销售一部：(010) 68326294

销售二部：(010) 88379649

读者购书热线：(010) 88379203

策划编辑：(010) 88379734

网络服务

教材网：<http://www.cmpedu.com>

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

中国金属学会特殊钢分会耐磨材料学术委员会 《耐磨材料应用手册》第2版编辑委员会名单

主任委员 陈华辉

副主任委员 邢建东 李 卫

委	员	李茂华	张永振	乔 峰	陈宗明	孟祥才
		杨志刚	马向东	赵会友	王定祥	刘光启
		高义民	石建华	曹万里	吕振林	李国禄
		朱子新	曲敬信	吴仲行	李慕勤	荣守范
		符寒光	朱正芳	曹洪治		

第2版前言

凡是有相对运动的地方就存在摩擦磨损。国外的统计资料表明：摩擦消耗掉全世界1/3的一次性资源，约有80%的机器零部件都是因为磨损而失效的。中国工程院的调查显示：我国2006年摩擦磨损造成的损失约9600亿元。因此，在全球面临日益加剧的资源、能源和环境问题的严峻形势下，应用先进的表面强化技术、表面复合材料技术及合金化强化技术提高机器零部件的耐磨性，不仅可节约能源和资源，而且可显著提高零部件的耐磨使用寿命。正是基于近些年来表面强化技术和复合技术的快速发展，中国金属学会特殊钢分会耐磨材料学术委员会决定对《耐磨材料应用手册》进行修订再版，在第1版的基础上，重新编写了第10章复合材料，该章介绍了作者最新的研究和应用成果；在第11章中补充了耐磨堆焊技术；在第5章中介绍了与耐磨材料有关的合金元素的作用，并增补了耐磨耐热钢；在第12章中介绍了在冶金行业和电力行业应用的典型耐磨件的材料和使用性能。

本手册第2版共分12章，前两章简要地介绍了材料摩擦磨损的基本理论；第3章介绍了摩擦磨损的测试技术和设备；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；第12章介绍了在冶金行业和电力行业使用的典型耐磨件的情况。

本手册的参编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和学者。具体编写分工如下：第1章由马向东编写；第2章由赵会友编写；第3章由陈华辉、赵会友编写；第4章由李卫编写；第5章由王定祥、刘光启编写；第6章由邢建东、高义民编写；第7章由石建华、曹万里、陈华辉、曹洪治编写；第8章由吕振林编写；第9章由李国禄编写；第10章由邢建东、高义民、荣守范编写；第11章由朱子新（11.1）、曲敬信（11.2）、吴仲行（11.3）、李慕勤（11.4）编写；第12章由符寒光（12.1）、朱正芳（12.2~12.4）编写。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。

本手册第2版的出版，首先要衷心感谢编写人员，同时也衷心地感谢书中被引用文献资料的作者们。书稿的打印校正得到了研究生曹晶晶、刘从祥、杨恬的鼎力帮助，在此一并表示感谢。

由于本手册内容涉及面广，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。

中国金属学会特殊钢分会耐磨材料学术委员会主任委员 陈华辉

第1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大力帮助,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

目 录

第2版前言

第1版前言

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 表面形貌的表征	2
1.2 摩擦原理	3
1.2.1 摩擦的概念及分类	3
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	12
1.3.3 层状固体的摩擦	18
1.3.4 常用润滑材料与硬表面的摩擦因数	21
参考文献	21
第2章 磨损及其影响因素	23
2.1 概述	23
2.1.1 磨损的定义	23
2.1.2 磨损的分类	23
2.1.3 磨损的评定方法	24
2.2 粘着磨损	25
2.2.1 粘着磨损的定义和分类	25
2.2.2 粘着磨损模型	26
2.2.3 金属材料的粘着磨损	28
2.2.4 其他材料的滑动磨损	34
2.3 磨料磨损	35
2.3.1 磨料磨损的定义和分类	35
2.3.2 磨料磨损机理	36
2.3.3 影响磨料磨损的主要因素	41
2.4 冲蚀磨损	52
2.4.1 冲蚀磨损的定义和分类	52
2.4.2 冲蚀磨损机理	52
2.4.3 影响冲蚀磨损的主要因素	54
2.4.4 浆体冲蚀磨损	59

2.4.5 气蚀磨损	61
2.4.6 液滴冲蚀磨损	62
2.5 疲劳磨损	63
2.5.1 疲劳磨损的定义	63
2.5.2 疲劳磨损机理	63
2.5.3 影响疲劳磨损的主要因素	65
2.6 腐蚀磨损	68
2.6.1 腐蚀磨损的定义和分类	68
2.6.2 氧化磨损	68
2.6.3 电化学腐蚀磨损	71
2.7 微动磨损	76
2.7.1 微动磨损的定义及特点	76
2.7.2 微动磨损机理	77
2.7.3 影响微动磨损的因素和防护方法	78
参考文献	81
第3章 材料摩擦磨损性能的测试方法	84
3.1 材料摩擦性能的测定	84
3.1.1 摩擦力的测定	84
3.1.2 摩擦因数的测定	85
3.1.3 摩擦温度的测定	85
3.2 材料磨损性能的测定	86
3.2.1 磨损试验的类型	86
3.2.2 实验室磨损试验	87
3.2.3 常用摩擦磨损试验机简介	89
3.2.4 摩擦磨损动态测试	96
3.3 磨屑检测分析技术	97
3.3.1 光谱分析法	98
3.3.2 铁谱分析法	99
3.4 表面分析技术及常用的分析仪器	100
3.4.1 表面形貌	100
3.4.2 表面分析技术	100
3.4.3 常用表面分析仪器	101
参考文献	103
第4章 高锰钢和中锰钢及其应用	104
4.1 Mn13 系列的高锰钢	104
4.1.1 高锰钢的相关标准	104
4.1.2 高锰钢的化学成分	107
4.1.3 高锰钢的显微组织	110
4.1.4 高锰钢的力学性能	116
4.1.5 高锰钢的加工硬化特性	121

4.1.6 高锰钢的物理性能	122
4.1.7 高锰钢的铸造	122
4.1.8 高锰钢的热处理	129
4.1.9 高锰钢的切割、焊接、机加工与整形	132
4.1.10 高锰钢的耐磨性与应用	132
4.2 中锰钢	138
4.2.1 水韧处理的中锰钢	138
4.2.2 沉淀强化处理的中锰钢	139
4.3 Mn17 (Mn18) 高锰钢	140
参考文献	140
第5章 耐磨合金钢及其应用	142
5.1 耐磨合金钢技术基础	142
5.1.1 合金元素在钢中的作用	142
5.1.2 变质剂在耐磨钢铁材料中的作用	154
5.1.3 耐磨合金钢的组织遗传性	158
5.1.4 耐磨合金钢常用相图	159
5.2 耐磨低合金钢	171
5.3 耐磨中合金钢	206
5.4 耐磨高合金钢	227
5.5 国内常用耐磨合金钢	238
5.5.1 耐磨钢铸件	238
5.5.2 球磨机衬板常用耐磨钢铁材料	239
5.6 国外部分耐磨合金钢	245
5.6.1 工程机械合金钢零件	245
5.6.2 球磨机合金钢磨球与衬板材料	247
5.7 耐热耐磨钢	250
5.7.1 国内部分耐热耐磨钢	250
5.7.2 国外部分耐热耐磨钢	256
参考文献	259
第6章 耐磨铸铁及其应用	263
6.1 普通白口铸铁	263
6.2 镍硬铸铁	265
6.2.1 化学成分与性能	265
6.2.2 铸造与热处理	271
6.2.3 应用与耐磨性	273
6.3 低铬铸铁	277
6.4 中铬铸铁	281
6.5 高铬铸铁	283
6.5.1 高铬铸铁的组织	283
6.5.2 高铬铸铁的化学成分及牌号	288

6.5.3 高铬铸铁的熔炼、铸造及热处理	299
6.5.4 高铬铸铁的物理性能和力学性能	316
6.5.5 高铬铸铁的耐磨性	323
6.5.6 高铬铸铁在高温下的性能	325
6.5.7 单向凝固高铬铸铁的性能特点	331
6.5.8 高铬铸铁的应用	334
6.6 球墨铸铁	337
6.6.1 马氏体耐磨球墨铸铁	337
6.6.2 贝氏体耐磨球墨铸铁	339
6.6.3 中锰耐磨球墨铸铁	342
参考文献	342
第7章 硬质合金及其应用	344
7.1 硬质合金的种类	344
7.2 硬质合金的性能	345
7.2.1 硬质化合物的性能	345
7.2.2 硬质合金性能简介	346
7.2.3 硬质合金国家标准牌号和相关性能	348
7.3 硬质合金的制备	352
7.4 硬质合金的应用	353
7.4.1 切削用硬质合金	353
7.4.2 矿用工具硬质合金	361
7.4.3 耐磨零件和工具类硬质合金	364
参考文献	373
第8章 陶瓷材料及其应用	374
8.1 氧化物陶瓷	374
8.1.1 氧化铝陶瓷	374
8.1.2 氧化锆陶瓷	389
8.2 碳化物陶瓷	397
8.2.1 碳化硅陶瓷	397
8.2.2 碳化硼陶瓷	408
8.3 氮化物陶瓷	411
8.3.1 氮化硅陶瓷	412
8.3.2 Sialon (赛隆) 陶瓷	422
8.4 陶瓷材料的应用	425
8.4.1 密封件	425
8.4.2 轴承	426
8.4.3 发动机挺柱	426
8.4.4 磨球	426
8.4.5 衬板	427
8.4.6 喷嘴	427

8.4.7 管道	427
8.4.8 风机	428
参考文献	428
第9章 耐磨高分子材料及其应用	434
9.1 超高分子量聚乙烯	434
9.1.1 超高分子量聚乙烯的生产方法	434
9.1.2 超高分子量聚乙烯的性能	435
9.1.3 超高分子量聚乙烯的应用	439
9.2 聚四氟乙烯	443
9.2.1 聚四氟乙烯的化学结构与性状	443
9.2.2 聚四氟乙烯的生产方法	443
9.2.3 聚四氟乙烯的性能	444
9.2.4 聚四氟乙烯的改性	448
9.2.5 聚四氟乙烯的应用	452
9.3 尼龙	458
9.3.1 尼龙的化学组成及命名	458
9.3.2 尼龙的性能	459
9.3.3 改性和新型尼龙品种	468
9.3.4 尼龙的应用	471
9.4 聚氨酯	476
9.4.1 聚氨酯弹性体结构与性能特点	477
9.4.2 浇注型聚氨酯弹性体	478
9.4.3 热塑性聚氨酯弹性体	481
9.4.4 混炼型聚氨酯弹性体	483
9.4.5 聚氨酯弹性体的主要性能	484
9.4.6 聚氨酯弹性体的应用	487
参考文献	494
第10章 复合材料及其应用	498
10.1 复合材料概述	498
10.2 颗粒增强金属基复合材料	503
10.2.1 颗粒增强钢铁基复合材料的铸渗工艺及其原理	504
10.2.2 颗粒增强钢铁基复合材料的组织与性能	513
10.2.3 表面复合层的强韧化设计	519
10.3 镶铸双金属复合耐磨材料	521
10.3.1 镶铸工艺	521
10.3.2 镶铸结合层的结合强度	522
10.3.3 镶铸复合耐磨部件的耐磨性	522
10.3.4 镶铸复合铸造工艺的应用	523
10.4 铸渗表面合金化复合材料	525
10.4.1 铸渗膏剂及工艺	525

10.4.2 铸渗层的成分、组织和耐磨性	528
10.4.3 铸渗法复合铸造工艺的应用	530
10.5 双液双金属复合铸造耐磨材料	531
10.5.1 双液双金属复合铸造方法	531
10.5.2 典型双液双金属复合铸造工艺	532
10.6 其他复合铸造方法	536
10.6.1 双金属复合铸造轧辊	536
10.6.2 组合式双金属复合铸造板锤	537
10.6.3 双金属复合铸锻截齿	537
参考文献	538
第11章 耐磨涂层及其应用	541
11.1 热喷涂耐磨涂层	541
11.1.1 热喷涂技术概述	541
11.1.2 耐磨涂层用热喷涂材料	545
11.1.3 金属喷涂材料及金属耐磨涂层	547
11.1.4 陶瓷粉末及其涂层	555
11.1.5 金属陶瓷(或塑料)复合粉末及其涂层	560
11.1.6 热喷涂耐磨涂层的应用	565
11.2 激光熔敷耐磨涂层	571
11.2.1 激光及其特性	572
11.2.2 激光熔敷耐磨涂层工艺	573
11.2.3 激光熔敷材料	574
11.2.4 激光熔敷层的组织	576
11.2.5 激光熔敷层的耐磨性	581
11.2.6 激光熔敷耐磨涂层的应用	584
11.3 真空熔结耐磨涂层	586
11.3.1 真空熔结基本原理	587
11.3.2 适用于真空熔结的原材料	589
11.3.3 真空熔结工艺	596
11.3.4 真空熔结装备	601
11.3.5 真空熔结的适用范围与应用实例	603
11.4 金属耐磨堆焊	620
11.4.1 堆焊的基本原理	620
11.4.2 耐磨堆焊方法	621
11.4.3 耐磨堆焊材料	628
11.4.4 耐磨堆焊的选择原则	636
11.4.5 耐磨堆焊技术的应用	638
11.4.6 堆焊耐磨复合钢板	646
11.4.7 耐磨堆焊再制造	647
参考文献	648

第 12 章 典型耐磨产品	654
12.1 轧辊	654
12.1.1 轧辊分类	654
12.1.2 轧辊的化学成分及性能	655
12.1.3 轧辊成形工艺	661
12.1.4 轧辊热处理工艺	666
12.1.5 轧辊检测方法	668
12.1.6 轧辊的耐磨性	670
12.2 耐磨防腐管道	672
12.2.1 耐磨防腐管道的品种分类及代号	672
12.2.2 耐磨管道的化学成分及力学性能	673
12.2.3 耐磨防腐管道的代号、使用特性及应用范围	676
12.2.4 耐磨防腐管道应用实例	677
12.3 破碎机与磨煤机	678
12.3.1 破碎机的分类及耐磨材料的应用	679
12.3.2 磨煤机的分类及耐磨材料的应用	684
12.4 水泵与风机	692
12.4.1 水泵的分类及选材要求	692
12.4.2 水泵常用耐磨防腐蚀金属材料	693
12.4.3 风机的分类和工作条件	693
12.4.4 风机常用金属材料	694
12.4.5 耐磨堆焊材料在排粉风机叶轮抗磨工程中的应用	695
12.4.6 贴片陶瓷在风机防腐抗磨工程中的应用	695
参考文献	695

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。

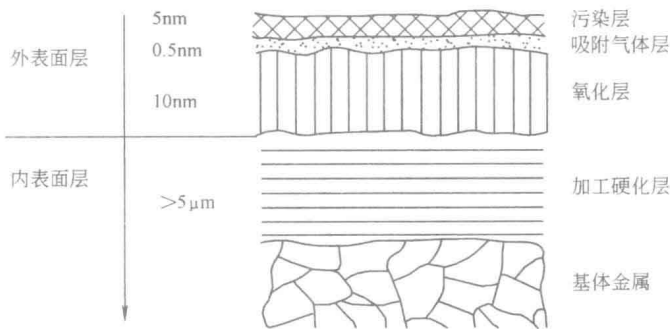


图 1-1 金属表面的实际构成示意图

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 所示是用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。

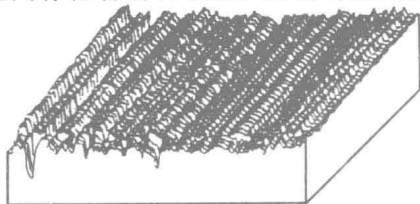


图 1-2 三维表面形貌

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。

1.1.3 表面形貌的表征

表面形貌的表征有多种方式, 比较常用的是表面粗糙度。表面粗糙度表述了微纳米尺度上的表面不规则性。通常的做法是, 用名义表平面的垂直面, 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 (Ra) 和轮廓均方根偏差 (Rq) 等。

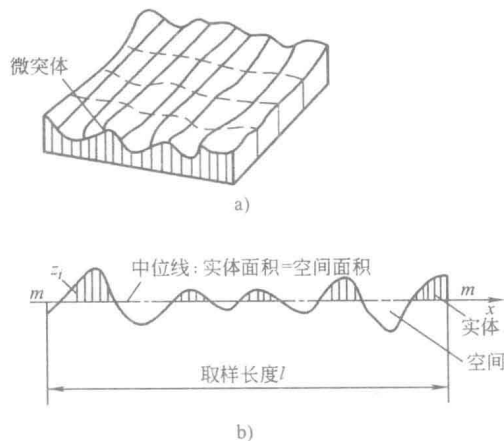


图 1-3 固体表面形貌与表面轮廓
a) 表面形貌(三维) b) 表面轮廓(二维)

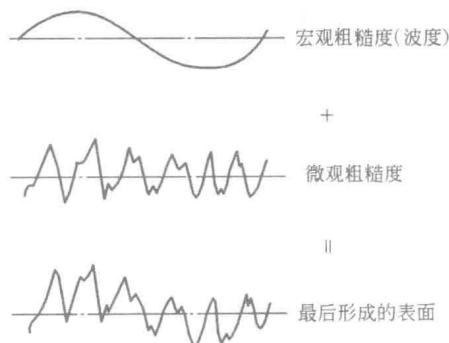


图 1-4 固体表面的形成

1. 轮廓算术平均偏差 (Ra)

轮廓算术平均偏差 (Ra), 又称中位线算术平均偏差 CLA (Center Line Average), 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 1-3b。其数学表达式为

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

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

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

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 (Ra) 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 Ra 值都相同, 但其形貌却显著不同。

2. 轮廓均方根偏差 (Rq)

统计学认为, 与 Ra 相比, 轮廓均方根偏差 (Rq), 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 1-3b)。其数学表达式为

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

其离散化计算公式为

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

图 1-5d、e 两表面轮廓具有相同的 Rq 值, 但它们的表面形状正好相反, 此即说明 Rq 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, Ra 与 Rq 之间有如下的近似关系, 即

$$Ra \approx 0.8 Rq \quad (1-5)$$

在 Ra 与 Rq 的使用中, 根据 GB/T 3505—2009 推荐优先选用 Ra 。

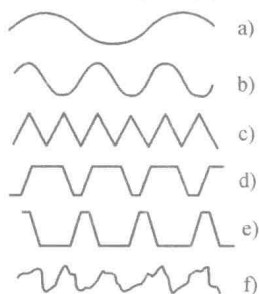


图 1-5 Ra 值相同的
不同表面轮廓

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, 介绍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。