

先进材料表面处理和测试技术

刘勇 田保红 刘素芹 著



科学出版社

www.sciencep.com

内 容 简 介

本书介绍了一些先进表面处理和测试技术,共五章,内容包括材料表面和界面概论、激光表面处理技术、热喷涂技术、化学镀技术、涂(膜)层测试技术,附录中还给出了国际上和国内常用的有关表面处理和测试技术标准。

本书适合于材料、冶金、机械、汽车、化工等领域工程技术人员使用,也可供长期从事表面技术研究开发的技术人员、高校教师和研究生查阅参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进材料表面处理和测试技术 / 刘勇,田保红,刘素芹著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-020326-7

I. 先… II. ①刘…②田…③刘… III. 金属表面处理 IV. TG17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 035564 号

责任编辑:牛宇锋 王向珍 / 责任校对:钟 洋

责任印制:刘士平 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年4月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008年4月第一次印刷 印张:23 1/4

印数:1—3 000 字数:454 000

定 价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

表面技术是建立在表面(界面)科学基础之上,由材料、机械、物理、化学等多学科相互复合、渗透而成的一门交叉学科,在材料、机械、化工、能源、建筑、宇航、交通等诸多领域有着广泛的应用。

近几十年来,随着科学技术的飞速发展,人们对材料在高温、高压、高速、高度自动化和恶劣工况下长期稳定运转的性能,尤其是材料的表面性能,如耐磨、耐蚀、耐热、电磁及光学等性能的要求不断提高,使得传统的材料表面改性技术及手段已无法满足需要;与此同时,人们也希望通过对材料表面进行改性,以达到用普通材料替代昂贵材料的目的。因而,表面技术迅速成为一门极具研究和应用价值的学科。许多新的表面技术的不断涌现以及传统的表面技术不断改进、完善、交叉和复合,大大丰富和发展了原有的表面工程学。

本书总结了作者近年来在激光表面熔覆、热喷涂、化学镀等领域取得的一些研究成果,并结合国内外最新相关研究进展,对材料表面与界面基础理论、激光熔覆、热喷涂、化学镀、涂(膜)层测试技术进行了论述。附录给出了中国国家标准(GB)、国际标准化组织(ISO)、美国材料试验学会(ASTM)、日本工业协会(JIS)等有关材料表面处理和测试技术标准目录。

本书有关研究工作得到国家自然科学基金、原机械部机械工业技术发展基金、河南省杰出青年科学基金、河南省高校创新人才培养工程、河南省科技攻关项目、河南省自然科学基金、河南科技大学博士科研启动基金等多项基金的资助。河南科技大学(原洛阳工学院)郑世安教授、董企铭教授、吴磊副教授、杨院生研究员(现中国科学院金属研究所研究员)、黄金亮教授、王顺兴教授、于宗汉副教授、张一民博士等教师,以及硕士研究生马云庆、徐桂珍、赵涛等参与了部分研究工作;微观分析工作得到河南科技大学材料科学与工程学院材料分析实验中心吴逸贵教授、顾进立高级实验师、李炎教授、祝要民教授、罗美华实验师等的热情帮助;相关研究工作还得到北京机电研究所徐恺梯高级工程师、李春华高级工程师,东风汽车公司工艺研究所朱蕴策高级工程师,以及装备再制造技术国防科技重点实验室、北京航空工艺研究所、北京工业大学表面工程研究所等单位的大力支持,在此表示衷心感谢。本书得到了河南科技大学学术著作出版基金资助。感谢河南科技大学在本书编写过程中给予的大力支持。

本书由刘勇、田保红、刘素芹撰写。本书在撰写过程中,得到了河南科技大学郑世安教授、王顺兴教授等的大力协助,同时参考了大量相关文献,已在每章后列出,如有疏漏,敬请海涵,谨此对有关中外学者表示衷心感谢。

作 者

于河南科技大学

2007年8月31日

目 录

前言

第 1 章 材料表面和界面概论	1
1.1 表面和界面结构	1
1.1.1 固体表面的结构	1
1.1.2 固体的理想表面和清洁表面	2
1.1.3 实际表面结构	6
1.2 表面和界面热力学——表面能.....	11
1.2.1 液体的表面张力与表面自由能	11
1.2.2 固体的表面张力与表面自由能	12
1.3 表面和界面吸附和润湿.....	14
1.3.1 表面和界面吸附现象	14
1.3.2 润湿现象.....	16
1.3.3 表面吸附热力学	16
1.4 表面扩散.....	18
1.4.1 表面缺陷及其能量	18
1.4.2 表面扩散系数	21
1.4.3 表面扩散的实验研究和唯象理论	23
参考文献	24
第 2 章 激光表面处理技术	26
2.1 激光的产生及其与材料表面的相互作用.....	26
2.1.1 激光的产生	26
2.1.2 激光的特性	28
2.1.3 激光与材料表面的相互作用	30
2.2 激光表面处理特点及基本概念.....	33
2.2.1 激光表面处理的原理及特点	34
2.2.2 激光表面处理的基本概念.....	34
2.3 激光快速凝固的理论基础.....	36
2.3.1 快速凝固过程	36
2.3.2 界面形态.....	37

2.3.3	凝固界面的长大	38
2.3.4	激光凝固条件的匹配	41
2.4	激光表面热处理技术	42
2.4.1	激光表面热处理的工艺特点	42
2.4.2	激光处理层的组织、性能及应用	43
2.5	激光表面熔凝技术	46
2.5.1	表面处理条件	46
2.5.2	表面处理层	46
2.5.3	激光表面熔凝的应用	48
2.6	激光表面合金化技术	50
2.6.1	原理	50
2.6.2	工艺过程	51
2.6.3	添加合金种类	52
2.6.4	预合金层的制备方法	53
2.6.5	合金层的特性	57
2.6.6	应用	59
2.7	激光表面熔覆技术	63
2.7.1	激光熔覆材料	63
2.7.2	激光熔覆工艺参数选择和优化	65
2.7.3	激光熔覆层冶金质量及影响因素	80
2.7.4	激光熔覆层组织	86
2.7.5	激光熔覆层性能	87
2.7.6	应用	104
2.7.7	发展与展望	107
	参考文献	109
第3章	热喷涂技术	112
3.1	热喷涂概论	112
3.1.1	热喷涂历史	112
3.1.2	热喷涂分类	114
3.1.3	热喷涂技术特点	114
3.2	热喷涂工程	119
3.2.1	热喷涂工程简介	119
3.2.2	预处理	120
3.2.3	热喷涂施工	122
3.2.4	后处理	129

3.3 热喷涂现象的基础理论	133
3.3.1 高温气体的性质	133
3.3.2 高温高速射流的产生	136
3.3.3 粒子的加速、加热过程	137
3.3.4 粒子的冲击、变形过程	140
3.3.5 粒子的凝固和形成涂层过程	140
3.3.6 热喷涂涂层的组织	141
3.3.7 涂层的结合机理	143
3.3.8 涂层内残留应力及控制	144
3.4 热喷涂材料和热喷涂涂层	146
3.4.1 热喷涂材料	146
3.4.2 热喷涂材料和涂层的设计	149
3.4.3 耐磨涂层	154
3.4.4 耐腐蚀涂层	158
3.4.5 耐高温涂层	160
3.4.6 其他涂层	161
3.5 高速热喷涂技术	162
3.5.1 引言	162
3.5.2 高速热喷涂技术的空气动力学基础	165
3.5.3 高速电弧喷涂技术	168
3.5.4 高速火焰喷涂技术	196
3.5.5 超音速等离子喷涂技术	203
3.6 冷喷涂新技术	207
3.6.1 冷喷涂原理和特点	207
3.6.2 冷喷涂材料和涂层	208
3.7 纳米涂层热喷涂制备技术	209
参考文献	210
第4章 化学镀技术	213
4.1 概论	213
4.1.1 化学镀概念	213
4.1.2 化学镀发展简史	214
4.1.3 化学镀特点	214
4.1.4 化学镀用途	215
4.2 化学镀成膜理论	217
4.2.1 化学镀镍热力学与动力学	217

4.2.2	化学镀 Ni-P 机理	219
4.2.3	化学镀 Ni-B 机理	223
4.2.4	胍做还原剂化学镀镍	224
4.2.5	化学镀机理的进展	225
4.3	化学镀镍	226
4.3.1	化学镀镍溶液及其影响因素	226
4.3.2	化学镀镍工艺	241
4.4	化学镀镍层结构和性能	250
4.4.1	镀层外观	250
4.4.2	镀层组织结构	250
4.4.3	镀层物理性质	252
4.4.4	镀层力学性质	252
4.4.5	镀层均镀能力及厚度	253
4.4.6	镀层结合力及内应力	253
4.4.7	镀层硬度与热处理	254
4.4.8	镀层腐蚀行为	255
4.5	化学镀镍的工业应用	256
4.6	化学镀其他金属	261
4.6.1	化学镀铜	261
4.6.2	化学镀锡	281
4.6.3	化学镀镍基合金	283
4.6.4	化学复合镀	295
4.7	化学镀废液处理	299
4.7.1	化学镀镍废液的处理	299
4.7.2	化学镀铜废液的处理	301
	参考文献	302
第 5 章	涂(膜)层测试技术	305
5.1	涂(膜)层测试种类	305
5.1.1	表面分析的一般概念	305
5.1.2	表面分析方法概述	305
5.1.3	探针与材料表面的相互作用	307
5.1.4	表面成分分析技术	308
5.1.5	表面结构分析技术	314
5.2	涂(膜)层性能测试和评价	315
5.2.1	涂层质量	315

5.2.2 力学性能	324
5.2.3 化学和电化学性能	327
5.2.4 其他性能	329
参考文献	335
附录 有关表面处理和测试技术标准目录一览	337

第 1 章 材料表面和界面概论

1.1 表面和界面结构

1.1.1 固体表面的结构

固体可分为晶体和非晶体两类。晶体中原子、离子或分子在三维空间呈周期性规则排列,即存在长程有序的排列。非晶体包括传统的玻璃、非晶态金属、非晶态半导体和某些高分子聚合物,内部原子、离子或分子在三维空间排列短程有序,但是由于化学键的作用,在 1~2 nm 原子分布仍有一定的配位关系,原子间距和键角等都有一定特征,然而没有晶体那样严格。

固体中的原子、离子或分子之间存在一定的结合键,这种结合键与原子结构有关。最简单的固体可能是凝固态的惰性气体。惰性气体因其原子外壳电子层已经填满而呈稳定状态。通常惰性气体原子之间的结合键非常微弱,只有处于很低温度时才会液化和凝固,这种结合键称为范德华(van der Waals)键。除惰性气体外,许多分子之间也可通过这种键结合为固体。例如,甲烷分子内部没有很强的键组合,但分子间依靠范德华键结合成固体,这种结合键又称为分子键。还有一种特殊 H_2 分子间作用力称为氢键,可把氢原子与其他原子结合起来而构成某些氢的化合物。分子键和氢键都属于物理键或次价键。

大多数元素的原子最外电子层没有填满电子,具有争夺电子成为类似惰性气体那种稳定结构的倾向。由于不同元素有不同的电子排布,所以可能导致不同的键合方式。例如,氯化钠固体是离子键结合的,硅是共价键结合,而铜是金属键结合。这三种结合键都较强,同属于化学键或主价键。

常见的晶体结构有三种:面心立方、密排六方和体心立方。前两种晶体结构是密排型的,其配位数是 12,而体心立方晶格则是非密排的,配位数是 8。上述配位数是对位于晶体内部的原子而言的,而对位于晶体表面的原子,情况则有所变化,如面心立方晶体中(111)面作表面时,表面(111)面上的每个原子的最近邻原子数为 9,“断键”数为 3。这样,由于表面原子受力状态的改变导致表层体系自由能高于晶体内部,高出的这部分能量称为表面能。不同晶面作表面时,表面能不同,因此单晶体的表面能是各面异性的。在金属晶体中,金属原子靠金属键结合在一起,在晶体表面,由于出现“断键”,电子与离子之间的交互作用会发生改变,结果必然导致表面电子密度发生变化。

固体也可按结合键方式来分类。实际上许多固体并非由一种键把原子或分子

结合起来,而是包含两种或更多的结合键,但是通常其中某种键是主要的,起主导作用,这种键合方式称为混合键。例如,GaAs 晶体中共价键和离子键的比例为 96 : 4,其键合以共价键为主;而 MgO 晶体的共价键和离子键的比例为 32 : 68,以离子键为主。

物质存在的某种状态或结构,通常称为相。严格地说,相是系统中均匀的、与其他部分有界面分离的部分。在一定温度和压力下,含有多个相的系统称为复相系。两种不同相之间的交界区称为界面。

固体材料的界面有三种:

- (1) 表面——固体材料与真空、气体或液体的分界面。
- (2) 晶界(或亚晶界)——多晶材料内部成分、结构相同而取向不同的晶粒(或亚晶粒)之间的界面。
- (3) 相界——固体材料中成分、结构不同的两相之间的界面。

1.1.2 固体的理想表面和清洁表面

理想表面是一种理论上认为的结构完整的二维点阵平面,表面的原子分布位置和电子密度都与体内一样。理想表面忽略了晶体内部周期性势场在晶体表面中断的影响,也忽略了表面上原子的热运动以及出现的晶体缺陷和扩散现象、表面外界环境的作用等。通常可以把晶体的解理面认为是理想表面,但实际上理想表面是不存在的。

清洁表面是指在特殊环境中经过特殊处理后获得的表面,是不存在吸附、催化反应或杂质扩散等物理、化学效应的表面。例如,经过诸如离子轰击、高温脱附、超高真空中解理、蒸发薄膜、场效应蒸发、化学反应、分子束外延等特殊处理后,保持在超高真空下,外来污染减少到不能用一般表面分析方法探测的表面。

1. 清洁表面的结构

固体材料有单晶、多晶、非晶体和准晶等之分。目前对一些单晶材料的清洁表面研究的较为深入,对多晶和非晶体的清洁表面研究的还很少。

晶体表面是原子排列面,有一侧无固体原子的键合,形成了附加的表面能。从热力学来看,表面附近的原子排列总是趋于能量最低的稳定状态。达到这个稳定态的方式有两种:一是自行调整,使表面原子排列情况与材料内部明显不同;二是依靠表面的成分偏析、表面对外来原子(或分子)的吸附以及这两者的相互作用而趋向稳定态,因而使表面组分与材料内部不同。

表 1.1 列出了几种清洁表面的情况。由此来看,晶体表面的成分和结构都不同于晶体内部,一般要经过 4~6 个原子层之后才与体内基本相似,所以晶体表面实际上只有几个原子层范围。另一方面,晶体表面的最外一层也不是一个原子级

的平整表面,因为这样的熵值较小,尽管原子排列作了调整,但是自由能仍较高,所以清洁表面必然存在各种类型的表面缺陷。

表 1.1 几种清洁表面结构和特点^[1~4,5]

序号	名称	结构示意图	特 点
1.	弛豫		表面最外层原子与第二层原子之间的距离不同于体内原子间距(缩小或增大;也可以是有些原子间距增大,有些减小)
2.	重构		在平行基底的表面上,原子的平移对称性与体内显著不同,原子位置作了较大幅度的调整
3.	偏析		表面原子是从体内通过分离、扩散出来而聚集的外来原子
4.	化学吸附		外来原子(超高真空条件下主要是气体)吸附于表面,并以化学键组合
5.	化合物		外来原子进入表面,并与表面原子键组合形成化合物
6.	台阶		表面不是原子级的平坦,表面原子可以形成台阶结构

图 1.1 为单晶表面的 TLK 模型,已被低能电子衍射(LEED)等表面分析结果所证实。由于表面原子的活动能力较体内大,形成点缺陷的能量小,因而表面上的热平衡点缺陷浓度远大于体内的。各种材料表面上的点缺陷类型和浓度都以一定

条件而定,最为普遍的是吸附(或偏析)原子。另一种晶体缺陷是位错。实际单晶体的表面并不是理想的平面,而是存在很多缺陷的,如台阶、扭折、位错露头、空位等。由于位错只能终止在晶体表面或晶界上,而不能终止在晶体内部,因此位错往往在表面露头。实际上位错并不是几何学上定义的线,而被认为是具有一定宽度的“管道”。位错附近的原子平均能量高于其他区域的能量,容易被杂质原子所取代。如果是螺型位错的露头,则在表面形成一个台阶。无论是具有各种缺陷的平台还是台阶和扭折,都会对表面的一些性能产生显著的影响。例如,TLK 表面的台阶和扭折对晶体生长、气体吸附和反应速度等影响较大。

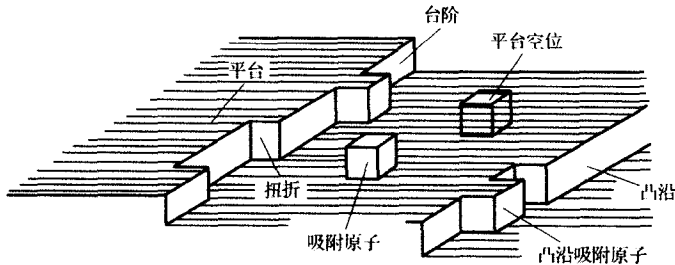


图 1.1 单晶表面的 TLK 模型^[1,3]

2. 表面弛豫

晶体的三维周期性原子排列规律在表面处突然中断,表面上原子的配位情况发生变化,并且表面原子附近的电荷分布也有改变,使表面原子所处的力场与体内原子不同,因此表面上的原子会发生相对于正常位置的上、下位移,以降低体系能量。表面上原子的这种位移(压缩或膨胀)称为表面弛豫。表面弛豫的最明显处是表面第一层原子与第二层之间距离的变化;越深入晶体内部,弛豫效应越弱,并且迅速消失。因此,往往只考虑第一层原子的弛豫效应。通常所观察到的大部分表面层间距缩短,即存在表面负弛豫,但也观察到表面层间距膨胀,即表面正弛豫的现象。例如,纯铝的表面为(110)面时,会有 3%~5% 的负弛豫;纯铜的表面为(110)面时,会有 20% 的正弛豫。在金属、卤化碱金属化合物、MgO 等离子晶体中,表面弛豫是普遍存在的。

一般简单地认为,负弛豫是将一个晶体劈裂成新表面时,表面原子原来的成键电子会部分地从断开的键移到未断的键上去,从而使未断键增强,因此会减小键长。不过,一旦有被吸附的原子存在,键长的变化应减少或消失。正弛豫是由于表面原子间的键合力比体内弱,表面原子的热振动频率会降低,使振幅增大,从而导致表面原子发生重组,重组后的点阵常数大于体内。研究表明,某些体心立方金属的表面,其弛豫的正负自表向内可能交替地改变,即自外向内的几个表面原子层的层间距是收缩、膨胀交替地变化。表面弛豫主要取决于表面断键即悬挂键的情况。

弛豫作用对杂质、缺陷、外来吸附很敏感。对于离子晶体,表层离子失去外层离子后破坏了静电平衡,由于极化作用,可能会造成双电层效应。

3. 表面重构

在平行基底的表面上,原子的平移对称性与体内显著不同,原子位置作了较大幅度的调整,这种表面结构称为重构。表面重构与表面悬挂键有关。表面原子价键不饱会产生表面悬挂键,当表面吸附外来原子而使表面悬挂键饱和时,重构必然发生变化。

表面重构能使表面结构发生质的变化,因而在许多情况下,表面重构在降低表面能方面比表面弛豫要有效得多。最常见的表面重构有两种类型:一种是缺列型重构;另一种是重组型重构。

缺列型重构是表面周期性地缺失原子列造成的超结构。所谓超结构是指晶体平移对称周期,即晶胞基矢成倍扩大的结构状态,合金的无序有序转变和复合氧化物固溶体的失稳分解都是造成超结构的物理过程。表面超结构,则是表面层二维晶胞基矢的整数倍扩大。在洁净的面心立方金属铀、铂、金、钯等中,(110)表面上的(1×2)型超结构是最典型的缺列型重构的例子,这时晶体(110)表面上的原子列每间隔一列即缺失一列。

重组型重构并不减少表面的原子数,但却显著地改变表面的原子排列方式。通常,重组型重构发生在共价键晶体或有较强共价成分的混合键晶体中。共价键具有强的方向性,表面原子断开的键,即悬挂键处于非常不稳定的状态,因而将造成表面晶格的强烈畸变,最终重排成具有较少悬挂键的新表面结构。重组型重构常会同时伴有表面弛豫而进一步降低能量,仅对表面结构变化的影响程度而言,表面弛豫比重组要小得多。

总之,当原子键不具有明显方向性时,表面重构较为少见,即使重构也以缺列型重构为主;当原子键具有明显的方向性如共价键时,则洁净的低指数表面上的重组型重构是很常见的。近年来发现,多种具有较强共价成分的晶体中也存在重组型重构,最典型的例子就是 SrTiO_3 晶体。

4. 表面台阶结构

清洁表面实际上不会是完整表面,因为这种原子级的平整表面熵很小,属热力学不稳定状态,故清洁表面必然存在台阶结构等表面缺陷。LEED 等实验证实单晶体的表面有平台、台阶和扭折(台阶的转折处称为扭折)。

5. 表面相变

由于表面原子处在各向异性的环境中,比体相原子具有较少的相邻原子,因此

其电子密度分布与体相不同,可用来键合的价电子既可比体相的多,也可比体相的少,所以在表面的原子平面上可以发生结构的转变。这种表面结构的重组不仅改变了键角,而且改变了转动的对称性和最近邻的原子数目,这就是表面的相变。

图 1.2 为川崎、高井等学者在高分辨透射电子显微镜下获得的 Au 单晶表面的原子结构。可以清楚看出, Au 单晶表面(110)晶面原子向表面方向松弛 0.02nm(白框内),而白色箭头所指原子则向晶体内部收缩,即发生表面弛豫,同时可以清晰看出 Au 单晶表面由众多台阶构成。

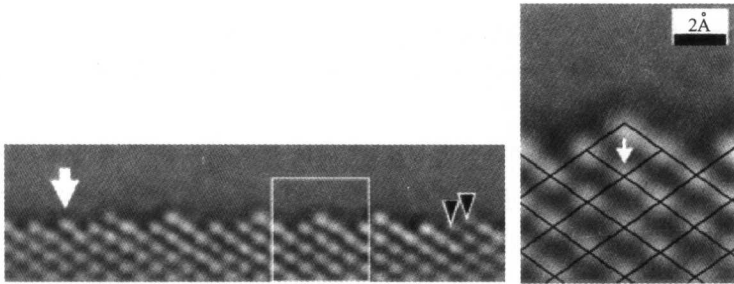


图 1.2 高分辨透射电子显微镜下的 Au 单晶表面的原子结构^[6]

1.1.3 实际表面结构

纯净的清洁表面是很难制备的,实际表面与清洁表面相比较,主要有以下不同。

1. 表面粗糙度

经过切削、研磨、抛光的固体表面似乎很平整,然而用扫描电子显微镜进行观察,可以看到表面有明显的起伏,同时还可能有裂缝、空洞等。

表面粗糙度是指加工表面上具有较小间距的峰和谷所组成的微观几何形状特性。它与波纹度、宏观几何形状误差不同的是相邻波峰和波谷的间距小于 1mm,并且大体呈周期性起伏。其主要由加工过程中刀具与工件表面间的摩擦、切屑分离工件表面层材料的塑性变形、加工系统的高频振动以及刀尖轮廓痕迹等原因形成。

表面粗糙度对材料的许多性能有显著的影响。控制这种微观几何形状误差,对于实现零件配合的可靠和稳定、减小摩擦与磨损、提高接触刚度和疲劳强度、降低振动与噪声等有重要作用。因此,表面粗糙度通常要严格控制和评定。其评定参数大约有 30 种。在我国国家标准中,GB 1031 对表面粗糙度参数及其数值,GB 3505 对表面粗糙度术语、表面及其参数,GB 7220 对表面粗糙度术语、参数测

量等,都有严格的规定。对工业制品,规定用中线制(即以中线为基准线评定轮廓的计算制)评定表面粗糙度,并从以下三项参数中选取。

(1) 轮廓算术平均偏差 R_a 。它是在取样长度 l 内轮廓偏距绝对值的算术平均值

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (1.1)$$

或近似为

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (1.2)$$

式中,轮廓偏距 y 是在测量方向上轮廓线上的点与基准线之间的距离; l 代表取样长度。

(2) 微观不平度十点高度

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}| \right) \quad (1.3)$$

式中, y_{pi} 是第 i 个最大的轮廓峰高; y_{vi} 是第 i 个最大的轮廓谷深。

(3) 轮廓最大高度 R_y 。它是取样长度 l 范围内的轮廓峰顶线与轮廓谷底线之间的距离。

在常用的参数范围内(R_a 为 $0.025 \sim 6.3 \mu\text{m}$, R_z 为 $0.100 \sim 25 \mu\text{m}$),以上三个参数中推荐优先选用 R_a 。

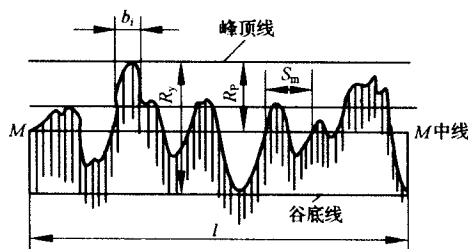


图 1.3 表面粗糙度轮廓示意图^[1]

除了 R_a 、 R_z 、 R_y 参数外,在一些实际工作中,还选用了其他表面粗糙度参数,列举如下(如图 1.3 所示)。

(1) 最大凸峰高度 R_p 。它是从中线到最高轮廓峰顶线的距离。

(2) 平均凸峰间距

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi} \quad (1.4)$$

(3) 相对凸峰宽度

$$t_p = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{l} \quad (1.5)$$

表面粗糙度的测量方法有比较法、激光光斑法、光切法、光波干涉法、针描法、激光全息干涉法和光点扫描法等,分别适用于不同评定参数和不同粗糙度范围的测量。

2. 贝尔比层和残余应力

固体材料经切削加工后,在几个微米或十几个微米的表层中可能发生组织结构的剧烈变化。例如,金属在研磨时,由于表面的不平整,接触处实际上是“点”接触,其温度可以远高于表面的平均温度,但是由于作用时间短,而金属导热性又好,所以摩擦后该区域迅速冷却下来,原子来不及回到平衡位置,造成一定程度的晶格畸变,深度可达几十微米。这种晶格畸变是随深度变化的,而在最外层的5~10 μm 厚度可能会形成一种非晶态层,称为贝尔比(Beilby)层,其成分为金属材料 and 它的氧化物,而性质与体内明显不同。

贝尔比层具有较高的耐磨性和耐蚀性,这在机械制造时可以利用。但是在其他许多场合,贝尔比层是有害的。例如,在硅片上进行外延、氧化和扩散处理之前要用腐蚀法除掉贝尔比层,因为它会诱发位错等缺陷而严重影响器件的性能。

金属在切割、研磨和抛光后,还存在着各种残余应力,同样影响材料的许多性能。实际上残余应力是材料经各种加工处理后普遍存在的。

残余应力(内应力)按其作用范围大小可分为宏观内应力和微观内应力两类。材料经过不均匀塑性变形后卸载,就会在内部残存作用范围较大的宏观内应力。许多表面加工处理能在材料表层产生很大的残余应力。焊接也能产生残余应力。材料受热不均匀或各部分热胀系数不同,在温度变化时就会在材料内部产生热应力,它也是一种内应力。

微观内应力的作用范围较小,通常分为两类。一类是其作用范围大致与晶粒尺寸为同一数量级。例如,多晶体变形过程中各晶粒的变形是不均匀的,并且每个晶粒内总的变形也不均匀,有的已发生塑性变形,有的还处于弹性变形阶段。当外力去除后,属于弹性变形的晶粒要恢复原状,而已塑性流动的晶粒就不能完全恢复,造成了晶粒之间互相牵连的内应力,如果这种应力超过材料的抗拉强度,就会形成显微裂纹。另一类作用范围更小,但却是普遍存在的。对于晶体来说,由于普遍存在各种点缺陷(空位、间隙原子)、线缺陷(位错)和面缺陷(层错、晶界、孪晶界),在它们周围引起弹性畸变,因而相应存在内应力场。金属变形时,外界对金属做的功大多转化为热能而散失,而大约有小于10%的功以应变能的形式储存于晶体中,其中绝大部分是产生位错等晶体缺陷而引起的弹性畸变(点阵畸变)。