

# 耐磨材料 理论与与生产实践

NAIMO CAILIAO LILUN YU SHENGCHAN SHIJIAN

侯利锋 吕仁杰 刘宝胜 卫英慧 编著



冶金工业出版社  
[www.cnmp.com.cn](http://www.cnmp.com.cn)

# 耐磨材料理论与生产实践

侯利锋 吕仁杰 刘宝胜 卫英慧 编著

北 京  
冶 金 工 业 出 版 社  
2017

## 内 容 提 要

金属材料广泛应用于实际生产,而由金属磨损引起的能源和原材料消耗等所造成的经济损失也十分巨大。本书概述了金属的磨损基础、失效机理及耐磨性的评定,分别详述了耐磨铸铁、耐磨铸钢和耐磨复合材料的性能、分类、热处理工艺、应用等,介绍了典型矿用槽帮耐磨材料的设计与生产实践。

本书可作为高等院校材料科学与工程专业高年级本科生和硕士研究生的教材及参考书,也可供材料领域的科技工作者学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

耐磨材料理论与生产实践/侯利锋等编著. —北京:  
冶金工业出版社, 2017. 9

ISBN 978-7-5024-7586-4

I. ①耐… II. ①侯… III. ①耐磨材料—高等学校  
—教材 IV. ①TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 209186 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 [www.cnmp.com.cn](http://www.cnmp.com.cn) 电子信箱 [yjcs@cnmp.com.cn](mailto:yjcs@cnmp.com.cn)

责任编辑 曾 媛 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7586-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2017 年 9 月第 1 版, 2017 年 9 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 12 印张; 235 千字; 184 页

56.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 [tougao@cnmp.com.cn](mailto:tougao@cnmp.com.cn)

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 [yjgycbs.tmall.com](http://yjgycbs.tmall.com)

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

# 前 言

---

耐磨损金属材料在煤矿、冶金、电力、建筑、国防和交通等许多重要工业领域受到广泛关注，其所制造零件的工况特点主要表现为承受复杂应力以及强烈的摩擦和冲击，工作条件十分恶劣。随着人们节能节材意识的增强，了解金属的磨损机理，研究和开发新型耐磨材料已经引起众多学者和工程师的重视。如果能深入地认识和科学地运用摩擦磨损理论，研制和应用新型耐磨材料，就可以降低材料磨损造成的损失，进而提高工作效率，降低生产成本，取得更好的经济效益和社会效益。

本书共分为7章，主要介绍了金属的磨损理论，包括金属的磨损基础、磨损失效机理和耐磨性能评定；耐磨铸铁、铸钢和复合材料的特性、主要化学成分、制备工艺、组织和性能关系；并以矿用槽帮耐磨金属材料为例，介绍其服役条件，以及采用微合金化理论改善其性能的综合应用案例。

本书可作为高等院校材料科学与工程专业的学生教材及参考书，也可作为耐磨材料生产企业的工程技术人员的参考书。

本书由侯利锋主编，卫英慧主审，参加编写的人员有：刘宝胜、李永刚、贺秀丽、吕仁杰、赵会琴、吉鹏辉等。本书顺利完成还要感谢张勇、张可兴和褚文魁的帮助。此外，在本书编写过程中，太原理工大学、太原科技大学、太原工业学院和中条山有色金属集团公司也

给予了帮助和支持，在此表示真挚的谢意！

在本书的编写过程中，我们参考了大量的文献资料，在此向这些文献资料的作者表示衷心的感谢。

由于作者的经验和水平所限，加之内容涉及面广，疏漏和不妥之处在所难免，诚请各位读者批评指正。

侯利锋

2017年6月

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 1 金属的磨损基础 .....          | 1  |
| 1.1 金属的表面 .....          | 1  |
| 1.1.1 金属表面的几何形状 .....    | 1  |
| 1.1.2 表面粗糙度的测量方法 .....   | 3  |
| 1.2 金属的缺陷 .....          | 4  |
| 1.2.1 金属的晶体缺陷 .....      | 4  |
| 1.2.2 晶体缺陷对材料性能的影响 ..... | 8  |
| 1.3 金属的表面能和表面张力 .....    | 12 |
| 1.3.1 常用术语 .....         | 12 |
| 1.3.2 液体/固体的界面润湿 .....   | 14 |
| 1.4 金属的表面膜 .....         | 15 |
| 1.4.1 吸附膜 .....          | 16 |
| 1.4.2 反应膜 .....          | 16 |
| 1.4.3 金属表层的一般结构 .....    | 18 |
| 1.5 摩擦与磨损 .....          | 19 |
| 1.5.1 摩擦的分类及评价方法 .....   | 19 |
| 1.5.2 磨损的过程 .....        | 20 |
| 1.5.3 磨损的评价方法 .....      | 22 |
| 参考文献 .....               | 22 |
| 2 金属磨损失效机理 .....         | 23 |
| 2.1 概述 .....             | 23 |
| 2.2 黏着磨损 .....           | 23 |
| 2.2.1 黏着磨损形式 .....       | 24 |
| 2.2.2 黏着磨损机理 .....       | 24 |
| 2.2.3 黏着磨损的影响因素 .....    | 28 |
| 2.3 磨粒磨损 .....           | 31 |
| 2.3.1 磨粒磨损形式 .....       | 31 |
| 2.3.2 磨粒磨损机理 .....       | 32 |

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 2.3.3 磨粒磨损的影响因素 .....         | 35        |
| 2.4 冲蚀磨损 .....                | 39        |
| 2.4.1 概述 .....                | 39        |
| 2.4.2 固体微粒的冲蚀 .....           | 39        |
| 2.4.3 气蚀 .....                | 41        |
| 2.4.4 液体碰撞冲蚀 .....            | 43        |
| 2.5 表面疲劳磨损 .....              | 44        |
| 2.5.1 疲劳磨损及其特点 .....          | 44        |
| 2.5.2 疲劳磨损的种类 .....           | 45        |
| 2.5.3 疲劳磨损机理 .....            | 45        |
| 2.5.4 疲劳磨损的影响因素 .....         | 47        |
| 2.6 微动磨损 .....                | 49        |
| 2.6.1 概述 .....                | 49        |
| 2.6.2 微动磨损理论 .....            | 50        |
| 2.6.3 微动磨损的影响因素 .....         | 50        |
| 参考文献 .....                    | 51        |
| <b>3 金属耐磨性的评定 .....</b>       | <b>55</b> |
| 3.1 金属的耐磨性 .....              | 55        |
| 3.2 耐磨性的表示方法 .....            | 55        |
| 3.3 磨损的测试技术 .....             | 55        |
| 3.3.1 常见的磨损试验方法 .....         | 55        |
| 3.3.2 磨损试验的影响因素 .....         | 56        |
| 3.3.3 磨损试验机 .....             | 57        |
| 3.3.4 表面分析技术 .....            | 57        |
| 3.3.5 表面分析仪器 .....            | 58        |
| 3.3.6 磨屑分析技术 .....            | 60        |
| 参考文献 .....                    | 60        |
| <b>4 耐磨铸铁 .....</b>           | <b>61</b> |
| 4.1 耐磨铸铁的分类 .....             | 61        |
| 4.2 减磨铸铁 .....                | 61        |
| 4.2.1 石墨和基体组织对铸铁减磨性能的影响 ..... | 61        |
| 4.2.2 含磷铸铁 .....              | 63        |
| 4.2.3 钒钛铸铁 .....              | 65        |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 4.2.4 硼铸铁 .....             | 65  |
| 4.2.5 铌铸铁 .....             | 67  |
| 4.3 抗磨铸铁 .....              | 72  |
| 4.3.1 普通白口铸铁 .....          | 72  |
| 4.3.2 镍硬白口铸铁 .....          | 75  |
| 4.3.3 中合金白口铸铁 .....         | 79  |
| 4.3.4 高铬钼白口铸铁 .....         | 81  |
| 4.3.5 高铬白口铸铁 .....          | 89  |
| 参考文献 .....                  | 96  |
| 5 耐磨铸钢 .....                | 98  |
| 5.1 概述 .....                | 98  |
| 5.2 耐磨高锰钢 .....             | 99  |
| 5.2.1 高锰钢的化学成分 .....        | 99  |
| 5.2.2 高锰钢的铸造 .....          | 108 |
| 5.2.3 高锰钢的热处理 .....         | 118 |
| 5.2.4 高锰钢的组织 .....          | 126 |
| 5.2.5 高锰钢的加工硬化机理 .....      | 127 |
| 5.2.6 Mn17 耐磨高锰钢 .....      | 128 |
| 5.3 高合金耐磨铸钢 .....           | 128 |
| 5.3.1 耐磨钢中合金元素的作用 .....     | 128 |
| 5.3.2 耐磨高合金钢 .....          | 131 |
| 5.3.3 抗磨耐蚀不锈钢 .....         | 134 |
| 5.4 中合金耐磨铸钢 .....           | 136 |
| 5.4.1 耐磨中合金钢 .....          | 136 |
| 5.4.2 耐磨中锰钢 .....           | 140 |
| 5.4.3 耐磨中铬钢 .....           | 144 |
| 5.5 低合金耐磨铸钢 .....           | 145 |
| 5.5.1 化学成分与性能 .....         | 145 |
| 5.5.2 化学成分的选择 .....         | 145 |
| 5.5.3 低合金钢的热处理 .....        | 150 |
| 5.5.4 低合金贝氏体耐磨钢 .....       | 155 |
| 5.5.5 低合金马氏体-贝氏体复相耐磨钢 ..... | 158 |
| 5.5.6 国外常用的低合金钢 .....       | 160 |
| 参考文献 .....                  | 163 |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 6 耐磨复合材料 .....                      | 164 |
| 6.1 金属基耐磨复合材料 .....                 | 164 |
| 6.1.1 金属增强-金属基复合耐磨材料 .....          | 164 |
| 6.1.2 颗粒增强-金属基耐磨复合材料 .....          | 165 |
| 6.1.3 纤维增强-金属基耐磨复合材料 .....          | 167 |
| 6.2 陶瓷基耐磨复合材料 .....                 | 168 |
| 6.3 聚合物基耐磨复合材料 .....                | 170 |
| 参考文献 .....                          | 172 |
| 7 典型矿用槽帮耐磨材料的设计与生产 .....            | 176 |
| 7.1 槽帮的服役条件 .....                   | 176 |
| 7.2 ZG20SiMnCrMo 槽帮耐磨材料 .....       | 177 |
| 7.2.1 成分设计 .....                    | 177 |
| 7.2.2 冶炼工艺 .....                    | 177 |
| 7.2.3 试验设备 .....                    | 178 |
| 7.2.4 热处理 .....                     | 179 |
| 7.2.5 力学性能 .....                    | 180 |
| 7.2.6 焊接性能 .....                    | 181 |
| 7.3 ZG15SiMnCrNbRE 微合金化槽帮耐磨材料 ..... | 182 |
| 7.3.1 成分设计 .....                    | 182 |
| 7.3.2 热处理 .....                     | 183 |
| 7.3.3 力学性能 .....                    | 183 |
| 参考文献 .....                          | 184 |

# 1 金属的磨损基础

## 1.1 金属的表面

### 1.1.1 金属表面的几何形状

对于机械加工与塑性加工后的金属零件的表面由于受金属结晶、工具表面作用、金属加工变形的影响，具有如下特点：（1）肉眼宏观观察：金属表面光滑；（2）显微镜下观察：金属表面凸凹不平，像起伏的山峦。与理想光滑表面相比较，金属表面形状从宏观到微观存在的三种不同的情况：形状偏差、表面波纹度、表面粗糙度，如图 1-1 所示。以两波峰或波谷的距离（波距） $\lambda$  来区别。一般波距小于 1mm 的属于表面粗糙度范围；波距在 1~10mm 间属于波纹度范围；波距大于 10mm 的属于形状偏差。可采用表面光度仪及轮廓曲线测定仪进行测量。

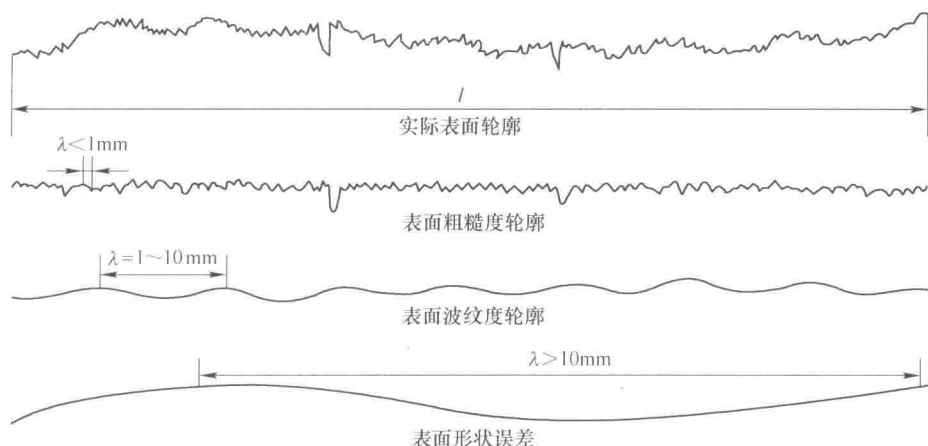


图 1-1 金属表面形状从宏观到微观的三种情况

（1）形状偏差（宏观几何形状误差： $\lambda > 10\text{mm}$ ）：肉眼可观察到的在金属表面明显的不平直的几何形状偏差。

描述形状偏差有两个指标：不直度和不平度。不直度：实际轮廓线与指定方向上理论直线的最大偏差；不平度：整个金属表面上各个方向上存在的最大不直度。

(2) 表面波纹度 (中间几何形状误差:  $1 < \lambda < 10\text{mm}$ ): 在金属表面重复出现的一种周期性的几何形状误差。

(3) 表面粗糙度 (微观几何形状误差:  $\lambda < 1\text{mm}$ ): 表面粗糙度对工具与零件使用性能的影响表现为, 接触表面越粗糙, 则实际接触面积越小, 单位实际接触面积压力越大, 越容易磨损或破坏。但是, 接触表面过于光滑, 则接触表面可能达到了分子间作用力的距离, 摩擦系数增大, 也会增加磨损。

表面粗糙度主要有以下评定指标: 轮廓平均算术高度  $Ra$ 、轮廓的最大高度  $Rz$ 。

#### 1.1.1.1 轮廓平均算术高度 $Ra$

在基本长度  $l$  内, 各点至轮廓中线  $m$  的距离  $y_1, y_2, \dots$  绝对值的总和的平均值, 如图 1-2 所示。轮廓中线  $m$  是指通过表面微观几何形状轮廓做一条直线, 该直线与两边轮廓线所包含的面积相等。在取样长度  $l$  内轮廓偏距绝对值的算术平均值:

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

或近似为

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

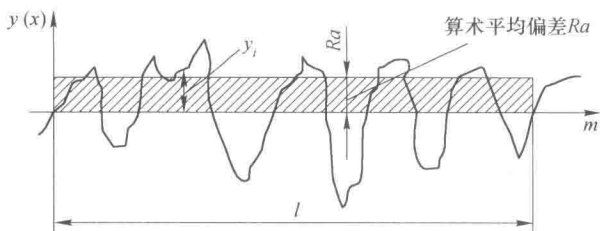


图 1-2 轮廓的平均算术偏差

#### 1.1.1.2 轮廓的最大高度 $Rz$

在新标准 GB/T 3505—2009 中, 轮廓的最大高度是指在一个取样长度  $l$  内, 最大轮廓峰高和最大轮廓谷深之和, 即  $Rz = y_{p_{\max}} + y_{v_{\max}}$ , 如图 1-3 所示。在旧标准 GB/T 1031—1995 中轮廓的最大高度符号是  $Ry$ , 应注意区分。

#### 1.1.1.3 微观不平度十点高度 $Rz$

在旧标准中, 在基本长度  $l$  内, 以平行于轮廓中线  $m$  的任意一条线起, 在被测轮廓的 5 个最大的轮廓峰高的平均值与 5 个最大的轮廓谷深的平均值之和, 如

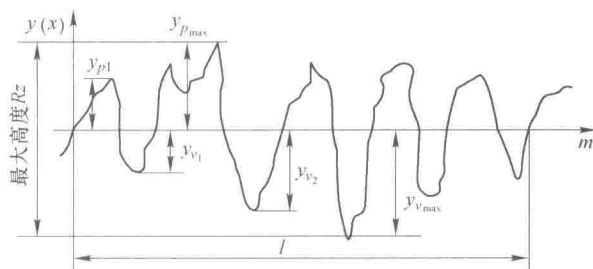


图 1-3 轮廓的最大高度

图 1-4 所示：

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{p_i} + \sum_{i=1}^5 y_{v_i}}{5} \quad (1-3)$$

式中,  $y_{p_i}$  为第  $i$  个最大的轮廓峰高;  $y_{v_i}$  为第  $i$  个最大的轮廓谷深。

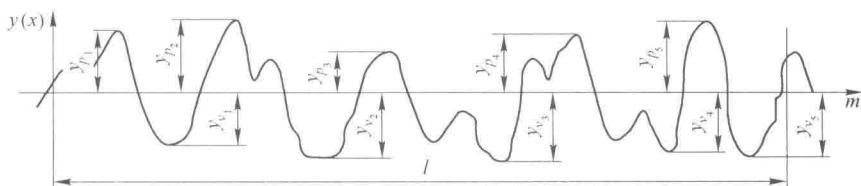


图 1-4 不平度平均高度

#### 1.1.1.4 微观不平度最大高度 $R_y$

指的是出现频率较多的微观不平度的最大高度  $R_y$ , 但不是指偶然出现的特大高度  $R_{\max}$ , 如图 1-5 所示。

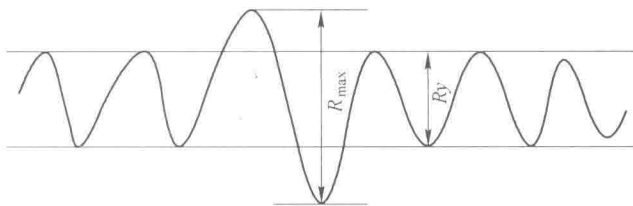


图 1-5 微观不平度的最大高度

### 1.1.2 表面粗糙度的测量方法

测量表面粗糙度的方法主要有比较法、感触法和印模法等, 它们的测量范围和测量原理见表 1-1。

表 1-1 几种测量表面粗糙度的方法

| 测量方法  | 测量范围                             | 测 量 原 理                                                                            |
|-------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 比较法   | $Ra = 0.05 \sim 100\mu\text{m}$  | 用带有级别标志的标准表面样板，将其和被测表面紧靠一起，通过比较表面的峰谷高度，确定其粗糙度                                      |
| 感触法   | $Ra = 0.05 \sim 12.5\mu\text{m}$ | 也称针扫法，原理是用尖端探针在被测表面均匀滑行，将高低不平的运动记录下来，并将位移信号转化为电信号放大处理后测出 $Ra$                      |
| 印模法   | $Ra = 0.1 \sim 100\mu\text{m}$   | 利用塑性材料（如石蜡）将被测表面的微观不平形貌印制下来，再采用一般方法测量粗糙度                                           |
| 光切法   | $Ra = 0.4 \sim 25\mu\text{m}$    | 它将一束平行光带以一定角度投射到被测表面上，光带与表面轮廓相交的曲线影像即反映了被测表面的微观几何形状，解决了工件表面微小峰谷深度的测量问题，避免了与被测表面的接触 |
| 光波干涉法 | $Ra = 0.12 \sim 0.2\mu\text{m}$  | 观测干涉带的形状和条数，可检定出被测表面的不平度和两平面间的不平行度                                                 |

1.2 金属的缺陷

晶体结构即晶体的微观结构，是指晶体中实际质点（原子、离子或分子）的具体排列情况。自然界存在的固态物质可分为晶体和非晶体两大类，固态的金属与合金大都是晶体。晶体与非晶体的最本质差别在于组成晶体的原子、离子、分子等质点是规则排列的（长程有序），而非晶体中这些质点除与其最相近外，基本上无规则地堆积在一起（短程有序）。金属一般为多晶体，金属表面原子呈有规则的排列形成的几何图形称为晶体的空间点阵。空间点阵的形式（晶格）有三种形式：体心立方（bcc）、面心立方（fcc）、密排六方（hcp），如图 1-6 所示。

在实际晶体中，由于原子（或离子、分子）的热运动，以及晶体的形成条件、杂质等因素的影响，实际晶体中原子的排列不可能那样规则、完整，常常存在各种偏离理想结构的情况，即晶体缺陷。晶体缺陷对晶体的性能，特别是对结构敏感的性能，如屈服强度、断裂强度、塑性、电阻率、磁导率等有很大的影响。另外晶体缺陷还与扩散、相变、塑性变形、再结晶、氧化、烧结等有密切关系。存在于金属表面的晶体缺陷还会影响金属表面的物理性能、化学性能和力学性能。

1.2.1 金属的晶体缺陷

金属的晶体缺陷有以下三种：点缺陷、线缺陷和面缺陷。

1.2.1.1 点缺陷

由于晶体中出现填隙原子和杂质原子等，它们引起晶格周期性的破坏发生在

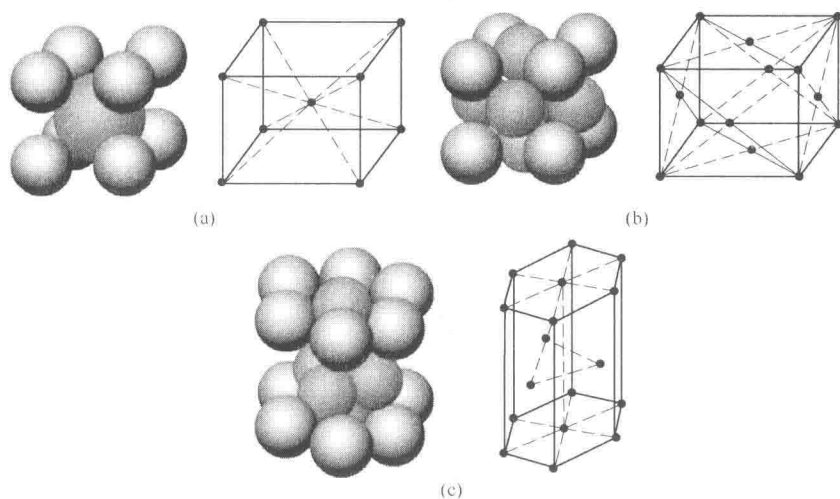


图 1-6 三种典型的晶体结构

(a) 体心立方; (b) 面心立方; (c) 密排六方

一个或几个晶格常数的限度范围内，这类缺陷统称为点缺陷。这些空位和填隙原子是由热起伏原因所产生的，因此又称为热缺陷。典型的点缺陷如图 1-7 所示。

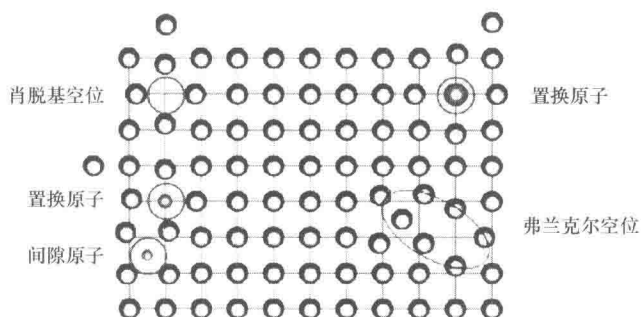


图 1-7 典型的点缺陷

(1) 空位：金属中空间点阵的原子在平衡位置处振动，处于能量起伏状态，总有某些原子振动能力较大，瞬时偏离其平衡位置，在原来位置处留下空位置，称之为空位。空位分为两种：肖脱基空位和弗兰克尔空位，前者是原子迁移到晶体的表面上，后者是原子迁移到晶体点阵的间隙中。

(2) 间隙原子：晶格点阵平衡位置上原子偏离平衡位置，跑到了点阵内的间隙位置，晶格内就在点阵间隙内多出了一个原子，称之为间隙原子。

(3) 杂质原子：实际晶体中存在某些微量杂质。一方面是晶体生长过程中引入的；另一方面是有目的地向晶体中掺入的一些微量杂质。当晶体存在杂质原

子时,晶体的内能会增加,由于少量的杂质可以分布在数量很大的格点或间隙位置上,使晶体组态熵的变化也很大。因此温度  $T$  下,杂质原子的存在也可能使自由能降低。当杂质原子取代基质原子占据规则的格点位置时,形成置换式杂质;若杂质原子占据间隙位置,形成间隙式杂质。

### 1.2.1.2 线缺陷

当晶格周期性的破坏发生在晶体内部一条线的周围则称为线缺陷,通常又称之为位错。它是由于应力超过弹性限度而使晶体发生范性形变所产生的,从晶体内部看,它就是晶体的一部分相对于另一部分发生滑移,以致在滑移区的分界线上出现线状缺陷。线缺陷可分为三类:刃型位错、螺型位错、混合型位错。

刃型位错也称棱位错,其特点是原子的滑移方向与位错线的方向相垂直。刃位错的示意图如 1-8 所示,而利用现代分析手段可以实际观察到金属晶体中的刃位错,图 1-9 为纯铝经表面机械研磨后的位错形貌<sup>[1]</sup>。

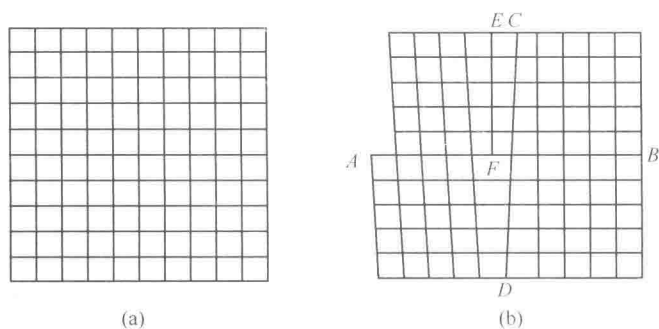


图 1-8 刃型位错  
(a) 未滑动 (b) 刃位错

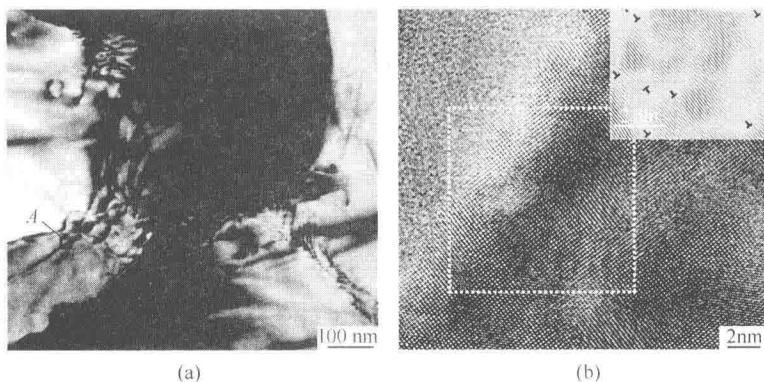


图 1-9 纯铝经表面机械研磨后的位错形貌  
(a) 位错滑移、聚集、缠结等作用; (b) A 处的 HRTEM 图像

螺型位错的特点是原子的滑移方向与位错线平行，且晶体内没有多余的半个晶面。垂直于位错线的各个晶面可以看成由一个晶面以螺旋阶梯的形式构成。当晶体中存在螺位错时，原来的一族平行晶面就变成为以位错线为轴的螺旋面，如图 1-10 所示。

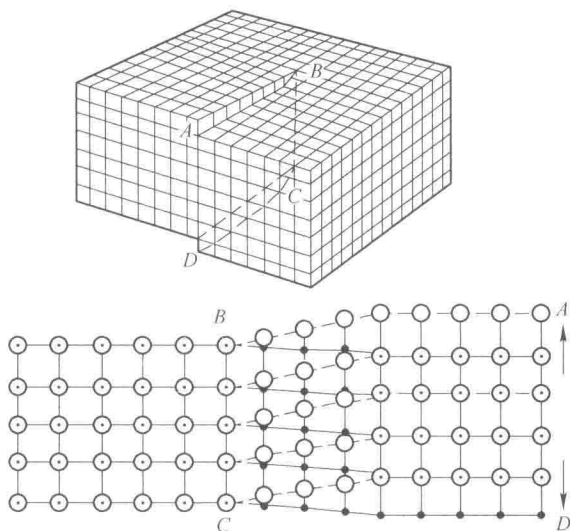


图 1-10 螺位错

位错线有以下特征：

- (1) 滑移区与未滑移区的分界线。
- (2) 位错线附近原子排列失去周期性。
- (3) 位错线附近原子受应力作用强，能量高，位错不是热运动的结果。
- (4) 位错线的几何形状可能很复杂，可能在体内形成闭合线，可能在晶体表面露头，不可能在体内中断。

刃型位错的特点是位错线垂直于滑移矢量  $\mathbf{b}$ ；螺型位错的特点是位错线平行于滑移矢量  $\mathbf{b}$ 。 $\mathbf{b}$  又称为伯格（Burgers）矢量，它的模等于滑移方向上的平衡原子间距，它的方向代表滑移方向。

除此之外，还存在位错线与滑移矢量既不平行又不垂直的混合型位错。混合位错的原子排列介于刃型位错和螺型位错之间，可以分解为刃型位错和螺型位错。

### 1.2.1.3 面缺陷

面缺陷是发生在晶格二维平面上的缺陷，其特征是在一个方向上的尺寸很小，而在另两个方向上的尺寸很大，也可以称为二维缺陷。晶体的面缺陷包括两

类：晶体的外表面和晶体中的内界面，其中内界面又包括了晶界、亚晶界（小角晶界）、孪晶界、相界、堆垛层错等。这些界面通常只有几个原子层厚，而界面面积远远大于其厚度，因此称为面缺陷。金属的耐腐蚀性能、强度、塑性等都与晶体中的面缺陷密切相关。

小角晶界：具有完整结构的晶体两部分彼此之间的取向有着小角度  $\theta$  的倾斜，在角  $\theta$  里的部分是由少数几个多余的半晶面所组成的过渡区，这个区域称为小角晶界，图 1-11 (a) 所示为 Al-0.1Mg 冷轧后形成的小角度晶界及示意图<sup>[2]</sup>。

层错（stacking fault, SF）：是由于晶面堆积顺序发生错乱而引入的面缺陷，又称堆垛层错，图 1-11 (b) 所示为 AZ31B 镁合金经压缩变形后出现的层错<sup>[3]</sup>。

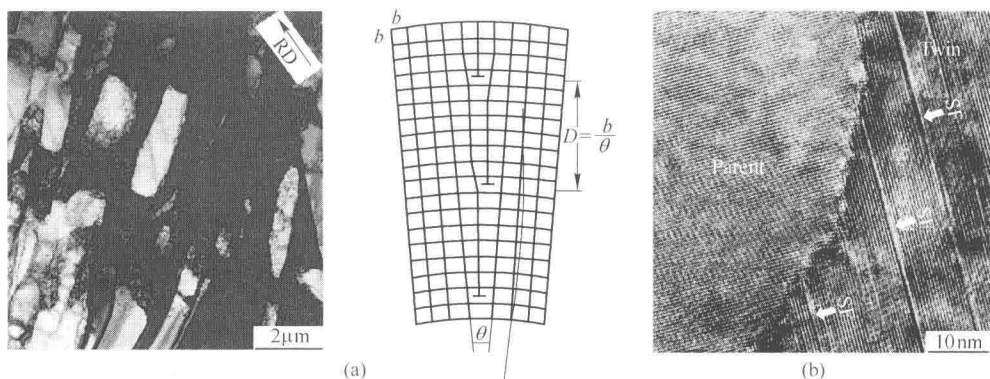


图 1-11 小角晶界的示意图及显微组织 (a) 和 AZ31B 镁合金压缩变形后的层错

## 1.2.2 晶体缺陷对材料性能的影响

### 1.2.2.1 点缺陷对材料性能的影响

晶体中点缺陷的不断无规则运动和空位及间隙原子不断产生与复合是晶体中许多物理过程如扩散、相变等过程的基础。空位是金属晶体结构中固有的点缺陷，空位会与原子交换位置造成原子的热激活运输，空位的迁移直接影响原子的热运输，从而影响材料的电、热、磁等工程性能。晶体中点缺陷的存在一方面造成点阵畸变，使晶体内能升高，增加了晶体热力学不稳定性，另一方面增大了原子排列的混乱程度，改变了周围原子的振动频率，使熵值增大使晶体稳定。矛盾因素使晶体点缺陷在一定温度下有一定平衡数目。在一般情形下，点缺陷主要影响晶体的物理性质，如比容、比热容、电阻率等：