

高等学校试用教材

铸造合金力学及物理性能

东北工学院 刘 祥 主编



机械工业出版社

前 言

本书是根据 1978 年 4 月高等学校一机部对口专业座谈会及同年 6 月铸造专业在长沙召开的会议精神,为加强专业基础理论,拟定增设的一门专业基础技术课。

为满足以铸造合金及工艺为基础的需要,在编写过程中,既从适应本专业的发展需要,又从本专业学生实际出发,在学生已学过的数学、物理、金属学近代物理试验方法、材料力学的基础上,进一步加强对铸造合金材料的力学性能及物理性能本质的了解,力求结合铸造合金材料特点,进行比较深入的分析,同时也介绍了一些研究金属材料的力学和物理性质的实验方法。

全书分为两大部分,第一部分是力学性能。这部分以位错理论为基础,对合金材料的力学性能做微观的解释,并加强了宏观与微观的结合,达到比较深入地认识材料力学性能的本质,为改进铸造合金材料力学性能提供理论基础。

第二部分是物理性能,此部分内容以电子论为基础,对合金的物理性质作了本质的解释和说明,这对进一步了解合金材料的物理性能和实验方法的应用起到一定的指导作用。为适应学生基础,在编写中注意由浅入深,深入浅出,加强对物理概念的分析,不作繁琐的公式推导。

本书主要供高等学校铸造专业师生使用,对热加工其它专业也有一定参考价值,同时也可供从事铸造、冶金工作的科技人员参考。

本书由东北工学院材料系刘祥、赵效德、朱永山、程力智四同志共同编写。前言,第一、八、九、十章由刘祥编写;第二、三、四、五、六、七章由赵效德编写;第十一、十三章由朱永山编写;第十二、十四、十五章由程力智编写。本书由刘祥主编。全书经华中工学院朱孝谦、孙尧卿、林汉同三位副教授初审,由张承甫教授总审。一机部教编室周有德同志为本书责任编辑。

在编写过程中得到东北工学院陶学文副教授、孙福成、左秀忠、陈秀芳、刘泗积和北京工业大学王越等同志的帮助。同时还得到北京钢铁学院、大连工学院、西安交大、南京工学院、华南工学院、洛阳农机学院、新疆工学院、沈阳机电学院等兄弟院校铸工教研室的帮助和支持,在此表示衷心感谢。

由于我们业务水平有限,又是初次编写,缺乏教学与科研、实践,尤其在结合专业方面还很不够,书中难免有不当和错误之处,恳切希望读者提出批评和指正。

目 录

本书常用符号表	Ⅱ
---------------	---

第一部分 力学性能

第一章 位错的基本概念	1
§ 1-1 晶体的理论强度与晶体缺陷	1
一、晶体的理论强度	1
二、晶体缺陷	3
§ 1-2 晶体中的位错	3
一、位错的定义	3
二、位错的种类	4
三、位错的特征量——柏氏矢量	8
四、位错密度	9
§ 1-3 位错的弹性性质	9
一、刃型位错的应力场	9
二、螺型位错应力场	10
三、位错的应变能与线张力	12
四、应力场对位错的作用力	14
五、位错间的相互作用力	16
六、位错的塞积群	17
七、位错的点阵模型	19
§ 1-4 位错的运动	21
一、位错的滑移	22
二、位错的攀移	23
三、位错的交割与割阶	23
四、位错的增殖	25
§ 1-5 典型晶体中的位错形态	26
一、全位错与不全位错	26
二、特征位错	27
三、位错反应和扩展位错	27
四、面心立方晶体中的不全位错	30
§ 1-6 实际晶体中的位错	32
一、实际晶体中产生位错的原因	32
二、位错与晶体生长	33
§ 1-7 晶粒间界	35
一、小角度晶界的位错模型	35
二、大角度晶界	37

三、晶界能与晶界内吸附	39
第二章 金属的弹性与滞弹性	42
§ 2-1 广义虎克定律与弹性模量	42
一、广义虎克定律	42
二、金属的弹性模量	45
§ 2-2 金属弹性的物理本质	47
§ 2-3 金属弹性模量的影响因素	49
一、温度的影响	49
二、合金元素的影响	50
三、加工硬化的影响	50
§ 2-4 铸造合金的弹性	52
一、铸造合金弹性变形特点	52
二、铸造合金的弹性模量	52
三、影响铸铁弹性模量的因素	53
§ 2-5 弹性模量的测量	54
§ 2-6 滞弹性效应	55
§ 2-7 内耗	56
一、内耗的度量	56
二、内耗机理	59
三、内耗的测量方法	61
§ 2-8 铸铁的滞弹性	63
第三章 金属的塑性变形	65
§ 3-1 单晶体金属的塑性变形	65
一、滑移	65
二、机械孪生	73
三、形变带	79
§ 3-2 单晶体金属的屈服与加工硬化	80
一、屈服及其机理	80
二、屈服应力的影响因素	82
三、加工硬化	84
§ 3-3 多晶体金属的屈服与加工硬化	91
一、多晶体变形特点	91
二、多晶体的屈服与加工硬化	93
三、铸造合金的塑性变形	96
§ 3-4 塑性变形对金属组织和性能影响	98
一、形变织构	98

二、亚结构	99	§ 6-3 冲击性能	156
三、内应力	99	一、冲击性能指标及应用	157
四、力学及物理性质的变化	100	二、多次冲击抗力	159
第四章 金属的断裂与断口	101	三、铸铁的冲击性能	159
§ 4-1 断裂的基本概念	101	§ 6-4 扭转和弯曲性能	162
一、断裂的基本类型及特征	101	一、扭转变形特点	162
二、脆性断裂	103	二、铸铁的扭转性能	164
三、脆性断裂机制	104	三、弯曲变形特点	165
四、延性断裂	108	四、铸铁的弯曲性能	165
§ 4-2 铸造合金的断裂	108	§ 6-5 硬度	167
一、铸铁断裂的特点	108	一、硬度试验方法	167
二、铸钢断裂的特点	109	二、硬度与金属强度之间关系	171
三、影响铸铁断裂的因素	109	三、铸铁的硬度	172
§ 4-3 断口	111	第七章 合金材料的高温和低温性能	176
一、断口的宏观分析	111	§ 7-1 金属蠕变—断裂	176
二、断口的微观分析	114	一、金属蠕变曲线	176
三、铸铁的断口特征	121	二、持久强度	178
第五章 金属疲劳	126	三、蠕变—断裂经验关系式	179
§ 5-1 金属疲劳的基本概念	126	四、蠕变的变形机制	180
一、金属疲劳的类型	126	五、蠕变断裂机制	181
二、疲劳曲线和疲劳极限	127	§ 7-2 铸造合金的高温机械性能	184
§ 5-2 疲劳过程中组织和性能的变化	134	一、铸铁的高温机械性能	185
一、疲劳硬化	134	二、有色铸造合金的高温机械性能	188
二、疲劳软化	135	§ 7-3 铸铁的低温性能	190
§ 5-3 金属疲劳断裂过程及机理	136	一、低温下金属力学性质概述	190
一、裂纹的产生	136	二、铸铁的低温机械性能	190
二、疲劳裂纹的扩展	137	第八章 合金材料的磨损	196
三、疲劳裂口成核和裂纹扩展机理	138	§ 8-1 摩擦和磨损的概念	196
§ 5-4 低周疲劳与热疲劳	139	一、摩擦	196
一、低周疲劳	139	二、磨损	196
二、热疲劳断裂	140	§ 8-2 磨损机理及影响因素	197
§ 5-5 铸铁的疲劳	142	一、磨料磨损	197
一、灰铸铁的疲劳性能	142	二、粘着磨损	202
二、球墨铸铁的疲劳性能	144	三、腐蚀磨损	206
第六章 金属常用机械性能	147	四、表面疲劳磨损 (接触疲劳)	211
§ 6-1 静拉伸下金属性能	148	§ 8-3 磨损试验方法	216
一、静拉伸下金属性能指标	148	一、磨损试验的分类	216
二、铸铁的拉伸性能	150	二、常用试验机的分类	216
§ 6-2 静压缩下性能	153	三、磨损量的测定方法	216
一、静压缩下变形特征及指标	153	第九章 金属断裂韧性	219
二、铸铁的压缩性能	155	§ 9-1 概述	219

§ 9-2 线弹性断裂韧性	220
一、裂纹的三种基本形式	220
二、平面应力和平面应变	220
三、裂纹顶端附近的应力场	221
四、应力场强度因子和断裂韧性	222
五、裂纹顶端的塑性区尺寸和 K_{Ic} 的 塑性修正	224
六、裂纹扩展的能量释放率	226
§ 9-3 弹塑性断裂韧性	229
一、裂纹顶端张开位移(C.O.D)	229
二、“J”积分的概念	231
§ 9-4 断裂韧性参数的测试	233
一、平面应变断裂韧性 K_{Ic} 的测试	233
二、 δ_c 和 J_{Ic} 的测试原理简介	237
§ 9-5 影响断裂韧性的因素	238
一、温度和加荷速度的影响	238
二、断裂韧性和常用机械性能 的关系	239
三、组织结构对 K_{Ic} 的影响	241
四、晶粒度对 K_{Ic} 的影响	241
五、夹杂和第二相对 K_{Ic} 的影响	242
六、铸铁显微组织对铸铁断裂韧 性的影响	242
§ 9-6 断裂韧性在工程中的应用	243
一、对机件实际断裂强度的计算	244
二、机件裂纹临界尺寸的计算	245
三、在疲劳方面的应用	246
第十章 合金的强化	250
§ 10-1 固溶强化	250
一、弹性交互作用	252
二、电学交互作用	253
三、化学交互作用	254
四、几何交互作用	254
§ 10-2 第二相粒子强化	256
一、第二相粒子强化的机理	256
二、固溶体的脱溶沉淀强化	258
三、弥散强化	258
§ 10-3 晶界强化	259
一、晶界强化本质	259
二、强化的措施	261
§ 10-4 其它强化方法	261
一、晶须、复合材料	261

二、定向结晶	264
--------	-----

第二部分 物理性能

第十一章 量子力学及金属电子论的

基本概念	266
------	-----

§ 11-1 量子力学的实验基础	267
------------------	-----

一、光电效应	267
二、康普顿效应	267
三、玻尔原子	270

§ 11-2 量子力学的基本概念	272
------------------	-----

一、量子数	272
二、泡利原理和原子核外电子的排布	276
三、波动的基本知识	277
四、德布罗意(De Broglie)波	280
五、德布罗意波的实验证明	281
六、德布罗意波的统计解释	283
七、测不准关系	284
八、波函数	285
九、薛定谔(Schrödinger)方程	288
十、薛定谔方程对某些简单问题 的应用	289

十一、费米—狄拉克(Fermi— Dirac)统计	299
------------------------------	-----

§ 11-3 金属电子论的基本概念	303
-------------------	-----

一、经典电子论及其缺陷	303
二、自由电子的量子理论	304
三、金属能带理论	307

第十二章 金属的导电性

§ 12-1 金属的导电性	319
---------------	-----

一、表征金属导电性的基本物理量	319
二、金属导电的物理本质	320

§ 12-2 影响金属导电性的因素	322
-------------------	-----

一、温度对金属导电性的影响	322
二、成分与合金相对导电性的影响	325
三、晶粒组织与相分布对导电性 的影响	328

四、杂质和缺陷对导电性的影响	331
----------------	-----

五、冷加工和退火对导电性的影响	333
-----------------	-----

§ 12-3 电阻率的测定	333
---------------	-----

一、伏特计—安培计法	333
二、电位差计法	334

三、电桥法	335	一、热函和热容	372
§ 12-4 电阻分析在金属学		二、固体的导热率	373
研究中的应用	337	§ 14-2 晶体中的原子热振动	375
一、电阻分析的原理	337	一、一维单原子晶格的振动	375
二、测定固溶体的溶解度	339	二、一维双原子晶格的振动	378
三、用电阻率法研究碳钢的淬火、		§ 14-3 固体的比热	382
退火和回火处理的组织变化	340	一、经典的固体比热	382
四、电阻分析在合金的时效研究中		二、爱因斯坦模型	383
的应用	342	三、德拜模型	384
五、电阻分析在铸造合金研究中		§ 14-4 热传导及其影响因素	386
的应用	343	一、固体的热传导	386
第十三章 金属的磁性	345	二、影响金属导热率的因素	387
§ 13-1 铁磁现象及其物理本质	345	§ 14-5 导热率、热容的测定及热分析在	
一、铁磁现象	345	金属学研究中的应用	392
二、原子的磁性	347	一、导热率的测定	392
三、铁磁性的物理本质	348	二、热容的测定	396
§ 13-2 抗磁性和顺磁性	350	三、热分析及其在金属学研究中的应用	398
§ 13-3 磁化过程	351	第十五章 金属的热膨胀	404
一、铁磁体的磁结构	351	§ 15-1 金属的热膨胀系数	404
二、磁化过程	353	§ 15-2 晶体热膨胀的物理本质	405
§ 13-4 影响铸造合金磁性的因素	355	一、晶体的结合力和结合能	405
一、组织结构的影响	355	二、晶体的非线性振动与热膨胀	406
二、碳的影响	356	三、铁磁性物质 α_m 值的反常	408
三、晶粒大小的影响	356	§ 15-3 影响金属热膨胀的因素	409
四、温度的影响	356	一、温度对热膨胀的影响	409
五、杂质的影响	356	二、熔点 T_s 对膨胀系数的影响	409
六、热处理的影响	356	三、相变对热膨胀的影响	410
§ 13-5 磁性测量	357	四、合金元素与合金相对热膨胀	
一、直流冲击法的磁性测量	357	的影响	410
二、弱磁性材料的测量	360	五、冷加工对热膨胀的影响	414
§ 13-6 磁性分析	365	§ 15-4 热膨胀的测量及其在金属材料	
一、相磁性分析的一般原理	365	研究中的应用	414
二、奥氏体等温转变曲线的测定	366	一、热膨胀的测量	414
三、平衡图的建立	367	二、机械杠杆和光杠杆膨胀仪的构造和工	
§ 13-7 磁力探伤法及其应用	369	作原理	414
一、磁力探伤原理	369	三、膨胀系数的测定	417
二、检测方法	370	四、热膨胀测量在金属材料研究中	
第十四章 金属的热学性质	372	的应用	418
§ 14-1 热学性质的基本量和导热率	372	主要参考文献	423

本书常用符号表

一、力学性能常用符号

A ——截面面积 mm^2 或 cm^2 ; 振幅; 多次冲击功 $\text{kg}\cdot\text{cm}$

A_K ——冲击功 $\text{kgf}\cdot\text{m}$ 或 $\text{kgf}\cdot\text{cm}$

a ——裂纹长度或半长度 mm ; 点阵常数 $\text{\AA}$

a_K ——冲击值 $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{mm}^2$ 或 $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$

b ——柏氏矢量; 裂纹宽度 mm

c ——点阵常数 $\text{\AA}$

D ——直径 mm

d ——直径 mm

E ——弹性模量 kgf/mm^2 ; 应变能 erg/cm

$FATT$ ——断口状态转变温度 $^{\circ}\text{C}$

G ——切变模量 kgf/mm^2

G_I ——I 型加载下的裂纹扩展力或称应变能释放率 kgf/mm 或 $\text{kg}\cdot\text{fmm}/\text{mm}^2$

G_{Ic} ——I 型加载下的临界裂纹扩展力、又称材料在弹塑性下的断裂韧性 $\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}$

HB ——布氏硬度

HM ——显微硬度

HR ——洛氏硬度

HV ——维氏硬度

J ——“ J ”积分, 裂纹尖端的能量线积分 kgf/mm

J_I ——I 型加载下的 J 积分 kgf/mm

J_{Ic} ——I 型加载下的临界 J 积分, 又称材料在弹塑性下的断裂韧性 kgf/mm

K ——裂纹尖端的应力强度因子 $\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$; 体积压缩模量 kgf/mm^2

K_I, K_{I1}, K_{II} ——裂纹在 I 型 (拉伸), I 型 (面内剪切) II 型 (面外剪切) 下的应力强度因子 $\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$

K_{Ic} ——断裂韧性 $\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$

M ——弯矩或扭矩 $\text{kg}\cdot\text{m}$

N ——应力交变次数

P ——外力 kgf ; 压力 kgf/cm^2

Q^{-1} ——内耗

T ——绝对温度 K ; 线张力

T_M ——熔点 K

T_E ——等强温度 K

t ——温度 $^{\circ}\text{C}$

$Y(a/w)$ ——试样和裂纹的几何形状因子

γ ——切应变

δ ——延伸率%; 裂纹扩展率

ε ——正应变

μ ——泊松比

σ ——正应力 kgf/mm^2

σ_b ——拉伸强度极限 kgf/mm^2

σ_{bb} ——压缩强度极限 kgf/mm^2

σ_p ——比例极限 kgf/mm^2

σ_K ——断裂强度 kgf/mm^2

$\sigma_{0.2}$ ——条件屈服极限 kgf/mm^2

σ_{-1} ——疲劳极限 kgf/mm^2

σ_r ——持久强度 kgf/mm^2

$\sigma_s/\tau, \sigma_v/\tau$ ——蠕变极限 kgf/mm^2

φ ——扭转角, 相位差

ω ——角频率

二、物性部分常用符号表

h ——蒲朗克常数 $\text{J}\cdot\text{Sec}$

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$ $\text{J}\cdot\text{Sec}$

k ——波尔兹曼常数 JK^{-1}

C ——光速 $\text{m}\cdot\text{Sec}^{-1}$

N ——阿伏加德罗常数 mol^{-1}

m ——质量 g

ϵ_0 ——真空介质常数

μ_0 ——初始导磁率 G/Oe

R ——气体常数; 电阻 $\text{J/Kmol}, \Omega$

e ——电荷 C

A ——逸出功 J

ν ——光的频率	Hz
E ——能量	J
λ ——波长	m
M ——磁矩	G
ψ ——波函数	
ρ ——电阻率	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$
B ——磁场强度	C
ϕ ——磁通量	Wb
H_c ——矫顽力	Oe
χ ——磁化率	G/Oe
σ ——导电率	Ω/cm
α_r ——电阻温度系数	k^{-1}
ϵ ——电场强度	$10^6/\text{c}$ (静电单位制)
τ ——时间	S
m_0 ——电子质量	g(静电单位制)
U ——速度	m/s cm/s
V ——体积	M^3, cm^3
J ——电流密度	A/cm^2
λ ——电子平均自由程; 导热率,	$\text{cm} \cdot \text{Å}; \text{cal}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{k}$

P ——散射几率	
S ——面积	$\text{M}^2 \text{cm}^2$
u ——空位形成能	J
C_V ——定容比热	J/K
Θ ——德拜温度	K
$\bar{\alpha}_{\text{线}}$ ——平均线膨胀系数	$1/^\circ\text{C}$
$\bar{\beta}_{\text{体}}$ ——平均体膨胀系数	$1/^\circ\text{C}$
ϵ_L ——线收缩率	
ϵ_V ——体收缩率	
$\alpha_{\text{真}}$ ——真空膨胀系数	$1/^\circ\text{C}$
ρ_Q ——居里温度电阻率	
T_Q ——居里温度	$^\circ\text{C}; \text{K}$
Z ——金属元素原子价数	
η ——长程有序度	
ξ ——残留电阻率	
Q ——热量	cal
C_p ——定压比热	J/K
L ——罗仑兹常数	
$\alpha_{\text{导}}$ ——导热率温度系数	$1/^\circ\text{C}$
ω ——角频率	

第一部分 力学性能

第一章 位错的基本概念

位错是晶体中的一种缺陷，它普遍存在于实际晶体中。应用晶体中的位错理论，能比较系统地解释晶体力学性能中的一些重要问题，如屈服点、密排晶体加工硬化、脆性、断裂、蠕变等。它是我们掌握金属材料力学性能的重要理论基础。

§ 1-1 晶体的理论强度与晶体缺陷

一、晶体的理论强度

理想晶体中的原子是规则分布在晶格的节点上，其力学性质是由它们的排列方式、结合力的强弱所决定的。然而描述晶体力学性质的指标很多，有弹性极限、屈服强度、抗拉及抗压强度等，其中最具有代表性的是屈服强度。早在 1926 年弗兰克尔用两个原子平面在受剪应力 τ 的作用下，对理论强度作了理论估算。

图 1-1 a) 表示了理想晶体中的原子在滑移面上移动情况。设想在两个原子层中，作用着两种力：一为每层中原子间的相互作用力，此力与滑移无关；一为上下两层原子间的相互作用力，此力表现为周期函数。令在晶体滑移面及滑移方向上外加切应力 τ ，在相邻的两原子平面间产生位移，其位移 x 与切应力 τ 之间存在着正弦曲线关系，如图 1-1 b) 所示。当没加应力时，即：

$$\tau = 0 \quad x = 0$$

当位移为 b 时 (b 是相邻原子间距) 即：

$$x = b \quad \tau(b) = 0$$

在 $x = 0$ 或 $x = b$ 这两个平衡点之间存在着势能，如图 1-1 c) 所示。其势能的峰值 P 处应力为零，即：

$$x = \frac{b}{2} \quad \tau\left(\frac{b}{2}\right) = 0$$

当位移 $x > \frac{b}{2}$ ，应力就继续减小，直到 $x = b$ 时， τ 又恢复到零。因此应力 τ 与位移 x 之间的关系可以表示为：

$$\tau = A \sin 2\pi \frac{x}{b} \quad (1-1)$$

式 (1-1) 为周期函数的表达式。

式中 A ——振幅 (为一常数，其值为 $\tau_{\max}$)；

b ——周期 (为每层中相邻原子间距)。

所以上式可以写为下面形式：

$$\tau = \tau_{\max} \sin 2\pi \frac{x}{b}$$

当 $x < \frac{b}{4}$ 时, 原子为弹性位移, 取去外力 τ , 原子又恢复到平衡位置, 当 $x > \frac{b}{4}$, 就要产生塑性变形, 取去外力 τ , 发生了位移的原子再也不能恢复到原来位置了。这就产生了永久变形, 如图 1-2 所示。如果两个原子平面相对位移 $\left(\frac{x}{b}\right)$ 很小时, 它符合于虎克定律。即:

$$\tau(x) = Gr = G \frac{x}{a} \quad (1-2)$$

式中 G ——切变模量;

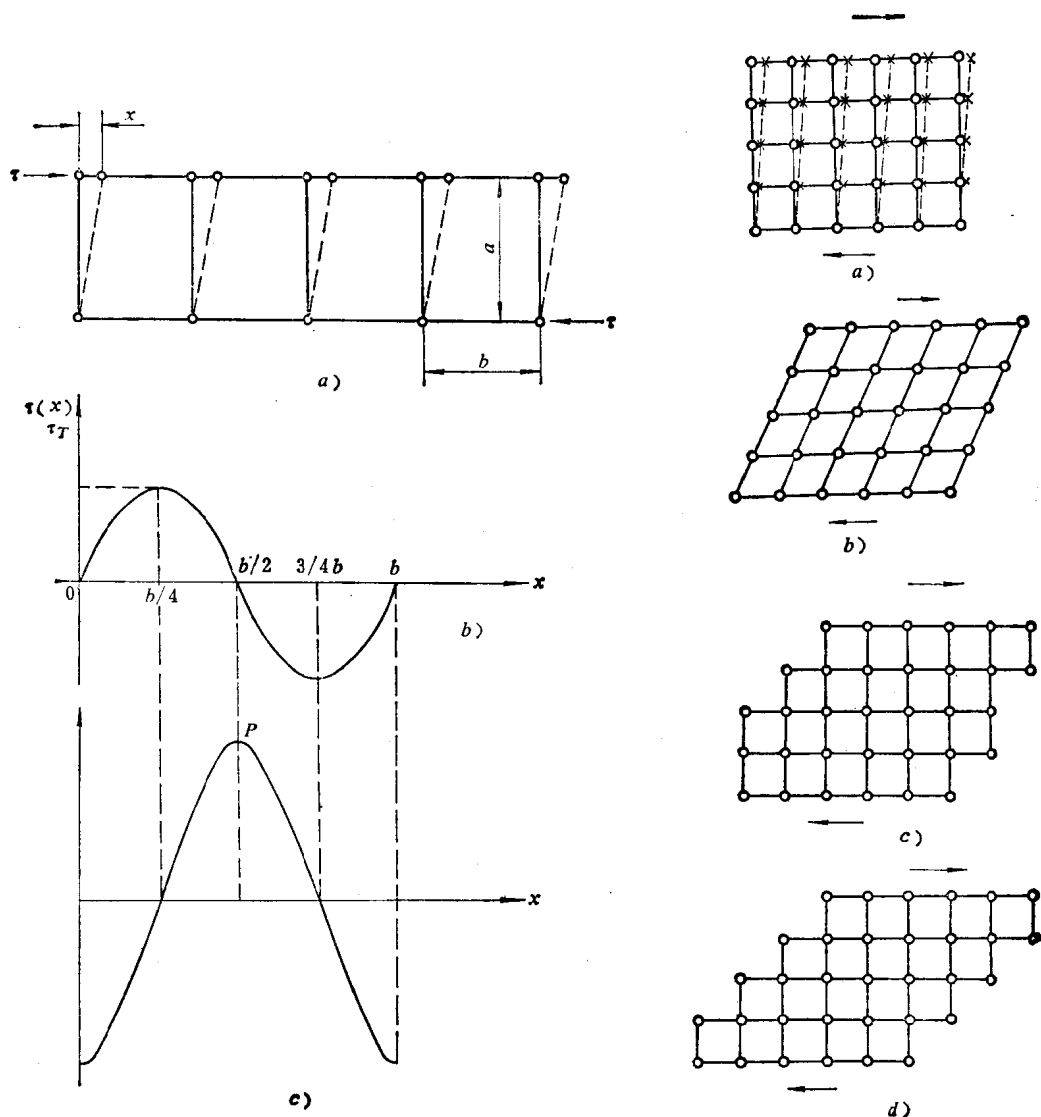


图1-1 理想晶体中的原子在滑移面上的移动

a) 原子在滑移面上移动 b) 应力与位移的关系
c) 势能与原子位移的关系

图1-2 弹性和塑性变形示意图

a)、b) 晶体为弹性变形
c)、d) 晶体为塑性变形

r —— 相对位移,

a —— 两相邻原子层间距。

当 x 很小时, 则式 (1-1) 成为:

$$\tau(x) = A \cdot \frac{2\pi x}{b} \quad (1-3)$$

从式 (1-2) 和式 (1-3) 可得

$$\tau(x) = \frac{Gb}{2\pi a} \sin \frac{2\pi x}{b} \quad (1-4)$$

从图 1-1 b) 可知, 当 $x = \frac{b}{4}$ 时, 应力达最大值 $\tau_{\max}$ 。前面已经讲过, 它是弹性向塑性转变的临界值。因此 $\tau_{\max}$ 为理论屈服强度, 将 $x = \frac{b}{4}$ 代入式 (1-4) 得:

$$\tau_{\max} = \frac{Gb}{2\pi a} \sin \frac{2\pi}{b} \cdot \frac{b}{4} = \frac{Gb}{2\pi a} \sin \frac{\pi}{2} = \frac{Gb}{2\pi a} \quad (1-5)$$

令 $a \approx b$, 则 $\tau_{\max} \approx \frac{G}{2\pi}$ 。可以认为是 $\tau_{\max} \approx 0.1G$, 一般工程用的金属的切变模量 G , 是在 $10^3 \sim 10^4 \text{ kg/mm}^2$ 数量级之间, 但实际金属晶体屈服强度只有理论值的 $\frac{1}{1000} \sim \frac{1}{100}$ 。其原因是实际金属材料中存在着宏观及微观缺陷。

二、晶体缺陷

前面提到金属晶体的理论强度是很高的, 但由于实际金属晶体中存在着缺陷, 因此金属材料的实际强度远远低于理论强度。实际金属晶体中的缺陷有以下几种:

1. 点缺陷 (或称零维缺陷), 点缺陷的大小和原子大小同一数量级, 即表现为在原子范围内, 如空位、间隙原子、原子杂质等。
2. 线缺陷 (或称一维缺陷), 这种缺陷是以线状存在于晶体之中, 通常所指的线缺陷就是位错。
3. 面缺陷 (或称二维缺陷), 这种缺陷分布于面上, 例如晶粒边界、晶面、孪晶等。
4. 体缺陷 (或称三维缺陷), 这种缺陷在三个方向上都超过了原子间距, 如缩孔、气孔、夹杂及裂纹等。

本章重点讨论线缺陷, 具体地说就是讨论位错问题。

位错存在于实际金属晶体之中, 它能在很低的应力下使晶体产生塑性变形, 这一点是与实验符合的。由于晶体中存在位错这个缺陷, 它能很好地解释晶体在塑性变形中所表现出的硬化及其它力学行为。

§ 1-2 晶体中的位错

一、位错的定义

位错——系指晶体已滑移部分相对于未滑移部分而言, 它使正常的原子排列方式产生了错排现象。从不同的角度对位错可以有以下几种定义。

1. 按冶金学定义位错

晶体已滑移部分与未滑移部分在滑移面上的交界线, 称为位错线。

2. 按物理学定义位错

作柏格斯 (Burgers) 回路, 如图 1-3 所示。先自 S 点开始, 向下作 n 步, 向右再作 n 步, 再向上作 n 步, 最后再向左作 n 步, 得出终点 F 。连接 $S-F$, 这样在完整的晶体中 $S-F=0$, 即 $b=0$, 则 S 、 F 两点重合, 如图 1-3 a) 所示。如果该回路中有位错存在, 则 $S-F \neq 0$, 即有 $S-F=\vec{b}$, 其方向从始点指向终点, 如图 1-3 b) 所示。这里的 $\vec{b}$ 称为柏格斯矢量 (简称柏氏矢量, 也称滑移矢量)。

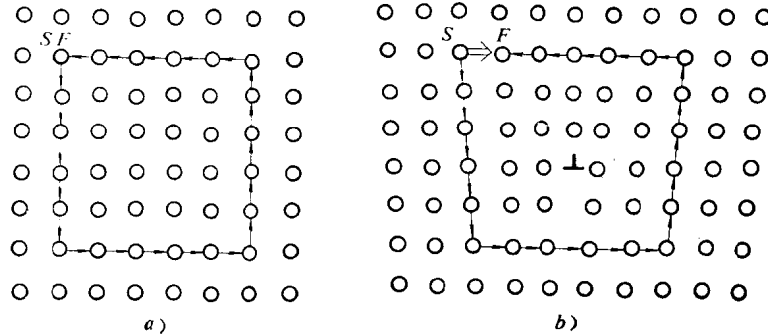


图1-3 柏格斯回路与柏格斯矢量

a) 理想完整晶体 b) 有位错的晶体

二、位错的种类

位错可分为刃型位错和螺型位错, 这两种类型的位错是基本形式。其它如混合位错, 扩展位错等, 在本质上都可以分解为上述两种基本位错。

1. 刃型位错

我们可以想像, 在一个完整的晶体中, 各原子平面互相平行。如图 1-4 a) 所描绘的那样。现在我们再取一个半原子平面, 从一侧插入到完整晶体的原子平面之间, 这势必会使插入半原子平面一侧, 比未插入半原子平面一侧多余了半个原子平面, 如图 1-4 b) 所示。而多余半原子平面终止于晶体内部, 其中断边沿就形成了一条线缺陷, 这就是刃型位错线。

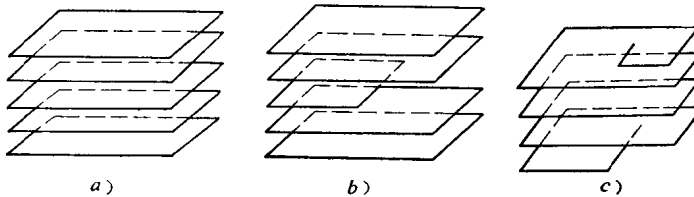


图1-4 原子平面的配置

a) 理想晶体 b) 刃型位错 c) 螺型位错

关于刃型位错我们还可以做这样的设想, 假定在一块如图 1-5 所示的单晶体中, 对单晶体的左侧上半部施加一个外加切应力 τ , 这个外加切应力 τ 使晶体左侧上半部的原子向右滑移一个原子间距, 由于右侧上半部的原子没有移动, 因此这一运动必然会产生一个多余的半原子平面 $ABCD$ 。则 CD 是已滑移和未滑移区的界线, 称为位错线。滑移矢量 b 和位错线 CD 垂直, 这种位错称为刃型位错。

刃型位错用符号 “ $\perp$ ” 表示, 当符号尖朝上时, 如图 1-6 a) 所示, 即以 “ $\perp$ ” 表示,

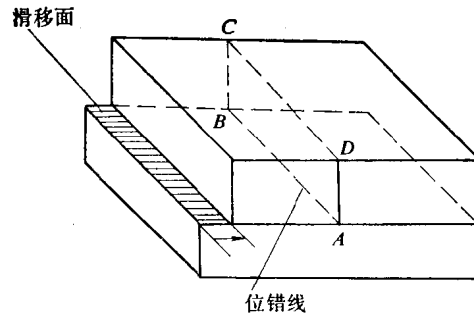


图1-5 刃型位错

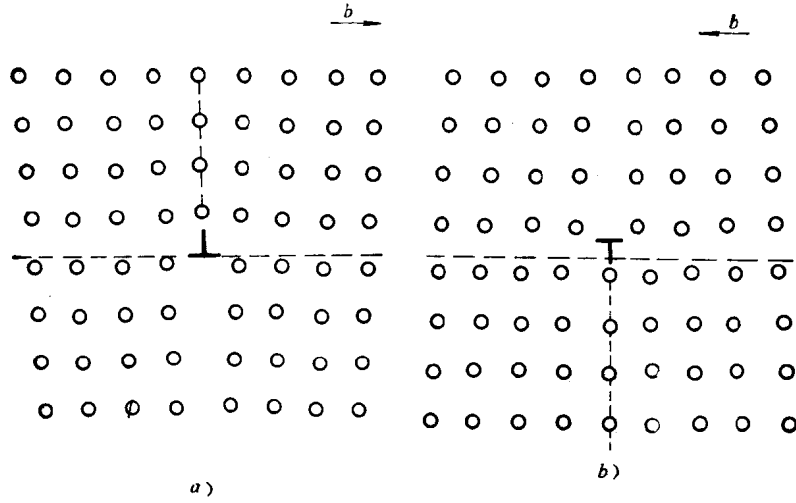


图1-6 刃型位错(位错线的方向是离开纸面的)

a) 正刃型位错 b) 负刃型位错

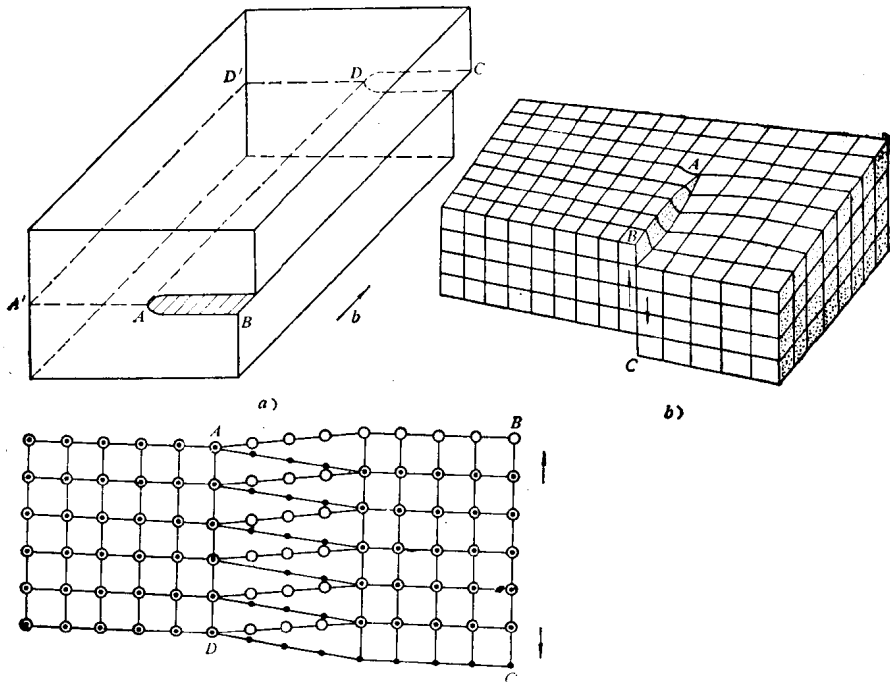


图1-7 螺型位错示意图

说明多余半原子面位于滑移面的上方, 这种位错称为正刃型位错; 当符号尖朝下, 即以“ $\downarrow$ ”表示, 说明多余半原子平面位于滑移面的下方, 这种位错则称为负刃型位错, 如图 1-6 b) 所示。

2. 螺型位错

我们设想, 将一块晶体如图 1-7 a) 所示。沿着滑移面 $ABCD$ 切开到直线 AD 为止, 然后使上下两部分沿着 AD 线滑移一个原子间距 b (b 沿着 AD 向), 则 AD 称为螺型位错线。若把图 1-7 a) 分别绕垂直轴和水平轴旋转 90° , 成为图 1-7 b) 的形式, 便可看到图 1-7 b) 表面发生了某些弯曲, 即垂直于位错线的晶面, 每个原子面的切口边缘与其相邻的原子面的边缘相连接, 结果所有垂直于位错线 AD 的原子面, 以 AD 为中心轴形成了一个螺旋面, 其几何特征如图 1-4 c) 所示。形成的螺旋面使 AD 线周围原子的正常排列遭到破坏, 形成了线缺陷, 这种线缺陷便是螺型位错。

图 1-7 c) 是图 1-7 b) 所示的情况在滑移面上的投影。图中圆点“ $\bullet$ ”表示图 1-7 b) 中 $ABCD$ 面以左的原子, 圆圈“ $\circ$ ”表示图 1-7 b) 中 $ABCD$ 面以右的原子。从以上的描述可知: 螺型位错的 b 矢量与位错线相平行, 并且当 b 矢量与位错线同向平行时称为右螺型位错; 当 b 矢量与位错线反向平行称为左螺型位错。

应该指出的是, 由位移矢量与位错所确定的平面称为滑移面, 在刃型位错中因为位移矢量与位错线垂直, 因此刃型位错的滑移面是唯一确定的。而螺型位错的滑移矢量 b 与位错线平行。因此所有包含滑移矢量 b 的晶面都可以是螺型位错的滑移面。

由于刃型位错的 b 矢量与位错线垂直, 因此刃型位错线可在同一平面内有任意形状, 而螺型位错的位错线只能是一直线。

3. 混合型位错

一根位错线或位错环上的柏氏矢量是守恒的, 即它的大小和方向都是不变的。前面已经讲过, 如果柏氏矢量垂直于位错线, 则这种位错为纯刃型位错; 如果柏氏矢量平行于位错线则为螺型位错。当柏氏矢量和位错线之间呈其它角度时, 称为混合位错。如有一混合型位错 AB , 如图 1-8 所示。其方向指向 AB , 并与柏氏矢量 $\vec{b}$ 的夹角为 θ 。作垂直及平行于 AB 的柏氏矢量的分量为 $\vec{b}_{//}$ 、 $\vec{b}_{\perp}$ 两部分, 则有:

$$b_{//} = b \cos \theta$$

$$b_{\perp} = b \sin \theta$$

图 1-9 a) 表示一块已经产生变形的晶体, 这种变形使晶体中所有位于 $A-C-B$ 面以上的原子相对于其下部原子按滑移矢量产生位移。并在晶体中产生一条由 A 到 C 的原子位移边界曲线, 从图 1-9 b) 中更清楚地看到了这条表明位移边界的位错线。此位错线各处的位移矢量 (等于柏氏矢量) 都相等。在靠近 A 点处, 由于 b 平行于位错线, 所以是纯螺型位错, 靠近 C 点的位错 (即 $\vec{b}$ 垂直位错线) 是纯刃型位错。介于两点之间的即与位错线成一定夹角的, 就是混合型位错。

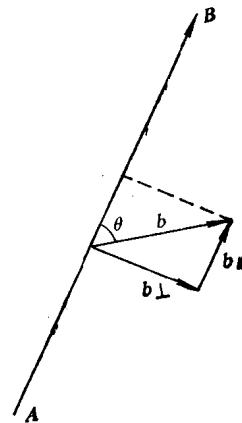


图1-8 混合型位错的分解

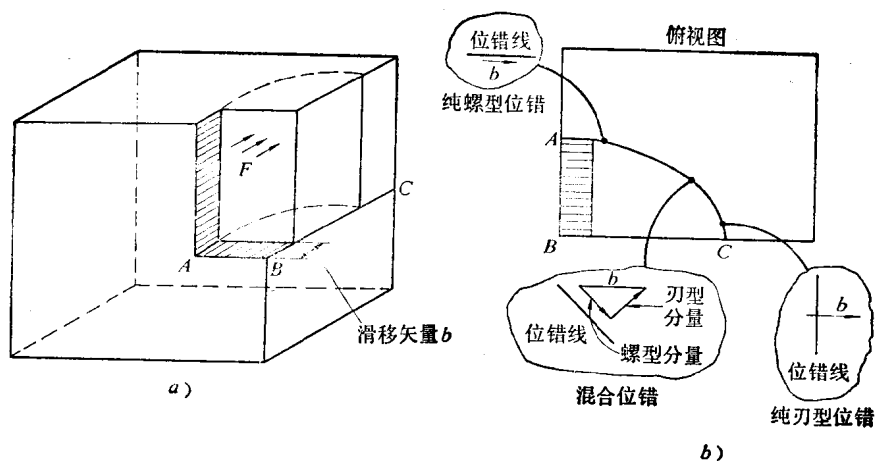


图1-9 混合位错

混合型位错的几何模型可以用图 1-10 来表示。图 1-10 可以想像为是图 1-9 a) 中位错曲线 AC 的原子排列情况的俯视图。图中圆圈代表滑移面上方的第一层原子，黑点表示滑移面下方的第一层原子。在位置 A 处看到的是纯螺型位错俯视图，在位置 C 处看到的是

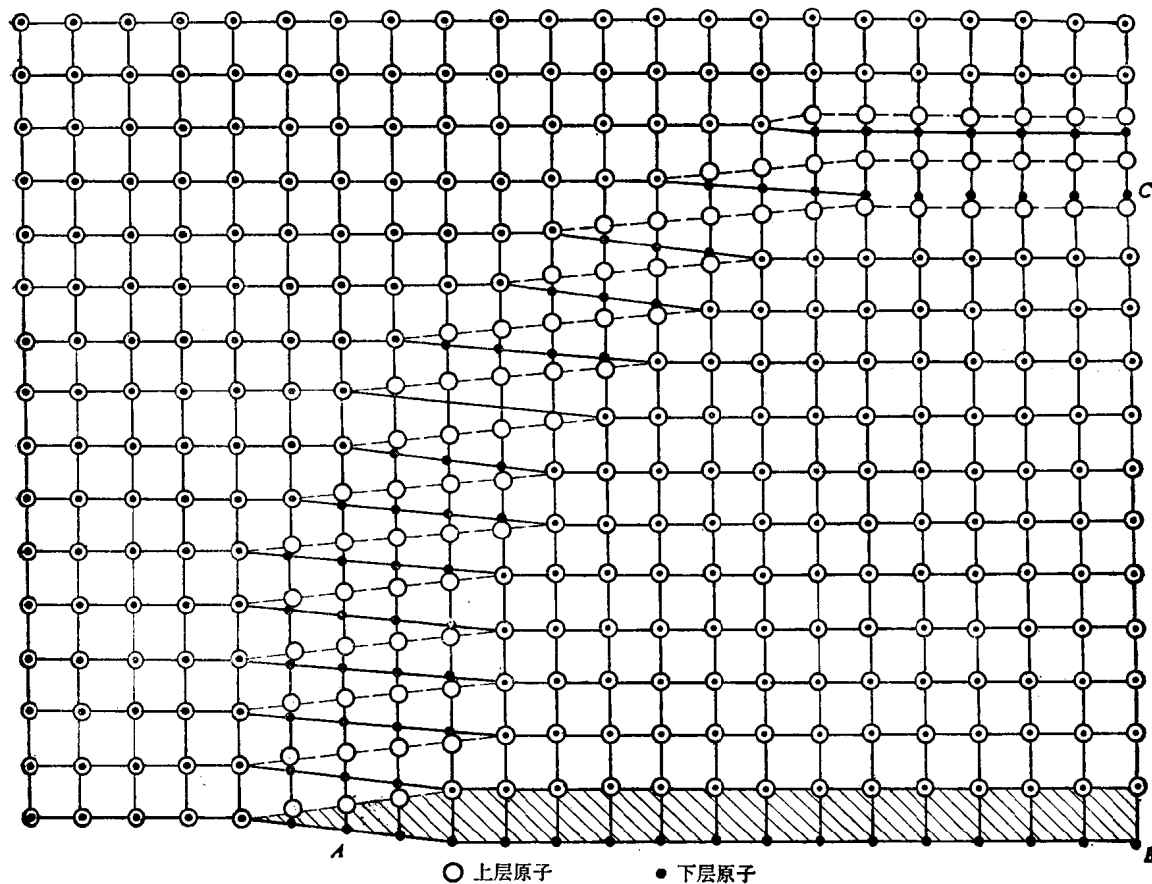


图1-10 表明原子位置的混合位错俯视图

刃型位错的俯视图，而在 AC 之间的各点则为混合型位错的俯视图。

三、位错的特征量——柏氏矢量

柏格斯 (J. M. Burgers) 在 1939 年指出了表征位错的重要物理量——柏氏矢量的意义。

设在晶体中取三个矢量构成的六面体。由晶体中任意一点出发，以一个初基矢量为一步沿初基矢量方向逐步走去，最后回到原来的出发点，若在理想的晶体中，必然有下列的结果

$$\sum n_a \vec{a}_0 + \sum n_b \vec{b}_0 + \sum n_c \vec{c}_0 = 0 \quad (1-6)$$

其中 n_a 、 n_b 、 n_c 有正，也有负的整数。这是因为这个回路会包含有正和负的初基矢量。正与负的数量相等，在各个初基矢量方向所走的步数应当相等，但允许有弹性应变的差异。

如果这个回路本身经过的地方都是良好的，而回路却围绕一个位错，回路的方向和位错的方向构成右手螺旋法则，其表达式为：

$$\sum n_a \vec{a}_0 + \sum n_b \vec{b}_0 + \sum n_c \vec{c}_0 = -\vec{b} \quad (1-7)$$

柏氏矢量的一个重要性质是守恒性。其主要表现为以下几点。

1) 一个位错可以分解为两个和两个以上的位错，如图 1-11 所示，位错线 1 可以分解为 2 和 3，则 2 与 3 两个位错线的柏氏矢量之和 $b_2 + b_3$ 应等于位错线 1 的柏氏矢量 b_1 ，即有：

$$b_1 = b_2 + b_3$$

因为位错线 2 与 3 可用一个大的回路 B_{2+3} 围绕，回路 B_{2+3} 的柏氏矢量显然是 b_{2+3} 。由前面讨论可知，位错线 1 的柏氏回路 B_1 可以在好区内扩大并移动，以致与 B_{2+3} 重合，所以有 $b_1 = b_2 + b_3$ 。

2) 一个位错环只能有一个柏氏矢量

设有一个位错环，如图 1-12 中的 $PQRS$ ，并令其中有两个不同的柏氏矢量即 PQR 为 b_1 ， PSR 为 b_2 ，这样由于 b_1 与 b_2 方向不同，必然会使两个部分变形不同，因此会有一个位错线 PR ，由此存在柏氏矢量 b_3 ，同时应满足 $b_3 = \pm (b_1 - b_2)$ ，但实际上只有一个位错环，不存在 PR ，因此 $b_3 = 0$ ，所以 $b_1 = b_2$ ，这就证明了一个位错环只能有一个柏氏矢量。

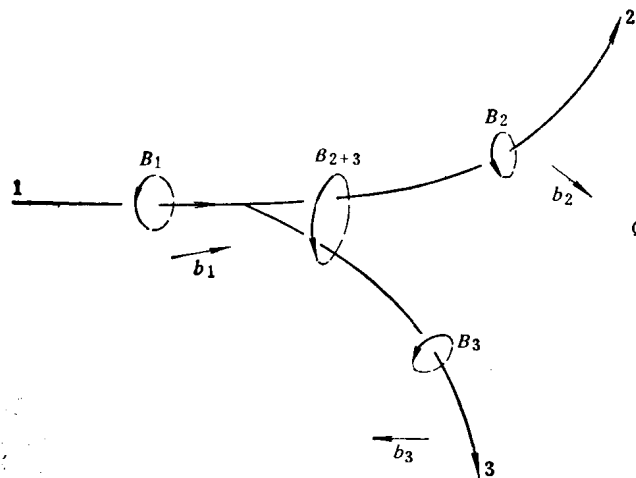


图1-11 位错的分解

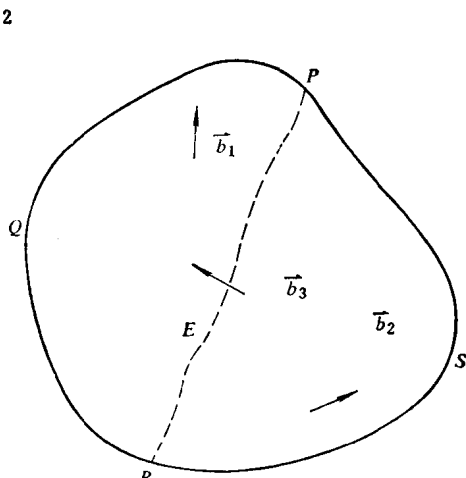


图1-12 一个位错环只能有一个柏氏矢量

3) 几个位错线相交一个节点, 则朝向节点的各个位错线的柏氏矢量的总和, 等于流出节点各位错线柏氏矢量的总和。若所有位错线的方向都朝向节点, 则各柏氏矢量的总和为零。

$$\sum b_i = 0 \quad (1-8)$$

四、位错密度

在单位体积的晶体中所包含的位错线长度称为位错密度。

$$\rho = \frac{L}{V} \quad (1-9)$$

式中 ρ ——位错密度, 量纲为 $[L]^{-2}$;

L ——在体积为 V 中所包含的位错长度。

为了便于观察测定, 把位错线设想为直线并且是平行地从一面穿到另一面造成的, 如图 1-13 所示。这样就在晶体表面有许多位错线的露头, 因此式 (1-9) 可以改写为:

$$\rho = \frac{L}{V} = \frac{l \cdot N}{S \cdot l} = \frac{N}{S} \quad (1-10)$$

式中 N ——位错线在 S 面上的露头总数;

S ——晶体的端面积;

l ——晶体的长度。

这样就把位错密度简化为垂直于位错线的单位面积上的位错露头数了。

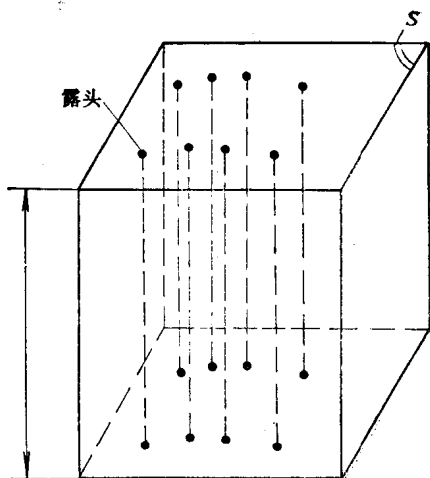


图1-13 位错密度计算示意图

§ 1-3 位错的弹性性质

由于位错的存在使晶体发生畸变, 所以在位错周围形成应力场, 位错的很多性质取决于位错应力场。因此可以应用弹性力学的方法来研究位错应力场的性质。

通常采用连续的弹性介质代替实际晶体, 用经典的连续介质弹性力学方法计算位错的长程应力场。当然这种理论是有局限性的, 它忽略了晶体的点阵结构, 对位错中心区域及近程原子严重错排区域是无法解决的, 但对长程问题的计算是可行的, 并已为实验所证明。

一、刃型位错的应力场

图 1-14 a) 为一各向同性的弹性圆柱体, 其切变模量为 G , 泊松比为 μ 。将圆柱体置于直角坐标系中, 如图 1-14 b) 所示, 将一个以 z 轴为圆心, 以 r_0 为半径的小圆柱体挖掉, 并沿 xz 平面切开, 把上下两部分施以剪切力, 使其发生位移 b , 这就必然会在圆柱体中引起应力场, 应力分布与大小和具有柏氏矢量为 $\vec{b}$ 的刃型位错, 在相同的弹性模量的晶体中, 所引起的应力场是相同的, 其应力表达式为: