

物理金属学

下 册

〔英〕 R. W. 卡恩 主编

科学出版社

物理金属学

下 册

〔英〕R. W. 卡恩 主编

北京钢铁学院金属物理教研室 译

科学出版社

1986

内 容 简 介

本书根据卡恩主编的《物理金属学》第二版译出。全书共二十三章，分上、中、下三册出版。这是下册，共有十章，包括：位错、点缺陷、力学性能、回复和再结晶、断裂，以及磁性、超纯金属的性质。

本书可供高等院校金属物理、物理冶金、材料科学及工科有关专业师生以及从事这方面工作的科技工作者参考。

Edited by R. W. Cahn
PHYSICAL METALLURGY
North-Holland, 1970

物 理 金 属 学

下 册

[英] R. W. 卡恩 主编

北京钢铁学院金属物理教研室 译

责任编辑 顾锦梗

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986年11月第 一 版	开本：787×1092 1/32
1986年11月第一次印刷	印张：19 5/8
印数：0001-3,050	字数：436,000
统一书号：15031·752	
本社书号：4269·15-2	
定价：4.55 元	

目 录

第十四章 位错.....D. Kuhlmann-Wilsdorf

肖治纲译 褚武扬校 913

- § 1 连续介质位错的几何学.....913
- § 2 连续介质中位错的弹性性质.....920
- § 3 晶体中的静止位错.....936
- § 4 晶体中运动位错的几何学.....947
- § 5 位错运动的晶格摩擦力.....957
- § 6 位错与其它缺陷间的相互作用.....961
- § 7 位错来源.....972
- § 8 研究位错的实验技术.....982

参考文献1498

第十五章 点缺陷.....Jin-Ichi Takamura

肖治纲译 褚幼义校 990

- 引言990
- § 1 金属中点缺陷的基本性质991
- § 2 点缺陷的热力学来源1000
- § 3 金属中的淬入空位1009
- § 4 范性形变产生的点缺陷1036
- § 5 点缺陷的场离子显微术1051
- § 6 受控偏离化学计量1053

参考文献1504

第十六章 对温度依赖较弱的力学性能.....

.....J. Weertman J. R. Weertman

任职涛译 褚武扬校 1056

§ 1 引言	1056
§ 2 应力-应变曲线	1057
§ 3 温度对应力-应变曲线的影响	1071
§ 4 加工软化	1078
§ 5 加工硬化理论	1080
§ 6 流变应力依赖于温度的理论	1095
§ 7 Lüders 带和屈服点	1098
§ 8 下屈服应力和晶粒度的关系	1102
§ 9 断裂和断裂应力	1105
§ 10 Bauschinger 效应	1112
§ 11 机械孪生	1113
§ 12 疲劳	1117

参考文献	1514
------------	------

第十七章 与温度有强烈依赖关系的力学性能

..... J. Weertman J. R. Weertman

褚幼义译 林实校 1128

§ 1 金属的蠕变	1128
-----------------	------

参考文献	1516
------------	------

第十八章 固溶体和金属间化合物的力学性能

..... P. Haasen

林实译 余宗森校 1160

引言	1160
----------	------

§ 1 固溶强化	1161
----------------	------

§ 2 沉淀硬化	1205
----------------	------

§ 3 有序硬化	1222
----------------	------

§ 4 金属间化合物的塑性	1236
---------------------	------

参考文献	1517
------------	------

第十九章 两相合金的力学性能

George S. Ansell
贺信莱译 陶正兴校 1244

§ 1 引言	1244
§ 2 为解释弥散强化材料屈服应力而提出的模型	1246
§ 3 加工硬化	1275
§ 4 蠕变	1282
§ 5 应力-破断性能	1290
§ 6 断裂形式	1291
§ 7 其它强度问题	1293
参考文献	1522
第二十章 回复和再结晶	R. W. Cahn
	褚幼义译 职任涛校 1295
§ 1 现象分类	1295
§ 2 回复	1296
§ 3 一次再结晶	1318
§ 4 晶粒长大和二次再结晶	1357
参考文献	1523
第二十一章 断裂	W. D. Biggs
	褚武扬译 陶正兴校 1373
§ 1 现象学考察	1373
§ 2 脆性体	1385
§ 3 半脆性体	1393
§ 4 韧性体	1411
§ 5 复合材料	1413
参考文献	1527
第二十二章 磁性	K. Hoselitz
	赵钟涛译 苏世璋校 1417
§ 1 引言	1417
§ 2 铁磁性和亚铁磁性	1424
§ 3 磁各向异性	1433
§ 4 微粒磁学及转矩分析	1435

§ 5 磁应力和夹杂分析	1442
§ 6 磁退火	1445
§ 7 各向异性织构	1451
§ 8 热磁分析	1454
参考文献	1529

第二十三章 超纯金属的性质.....O. Dimitrov C. Frois

平云译 马如璋校 1459

§ 1 引言	1459
§ 2 提纯技术	1460
§ 3 利用分析和电阻率测量确定纯度	1466
§ 4 杂质对力学性能的影响	1475
§ 5 杂质对铁的相转变的影响	1478
§ 6 杂质对消除点阵缺陷的影响	1480
§ 7 杂质对铁氧化的影响	1490
参考文献	1530

第十四章 位 错

D. Kuhlmann-Wilsdorf

§1 连续介质位错的几何学

1.1 引言

在各种晶体缺陷中，位错显得特别重要。它们的行为决定着晶态固体的力学性能。而且，对于结晶过程，固体里的相沉淀、相转变以及其它现象，位错也起着重要作用。因此，掌握一些位错的知识，对于冶金工作者和材料科学工作者是不可缺少的。

1.2 柏格斯回路

位错是线状缺陷，即是一种在某个方向比其它两个垂直方向要长得多的缺陷。晶体里实际存在的，和此处将要研究的位错，总可以想象为下述操作的结果：在介质中作一个割面，割面边缘终止于圆柱形管道（管道具有接近圆形的均匀截面，好象隧洞；管道轴线，也即割面的边界线，可以是任意的曲线），使割面两侧彼此作刚性相对移动，然后再把它们粘合起来。如果割面两侧的刚性相对移动具有垂直于割面的分量，在重新粘合之前必须填补或者取掉某些材料。最后，圆柱形管道应重新用材料填满。照这样切割和再粘合的结果，围绕着割面边缘的圆柱形管道，形成一个内应力和应变场；后来被填满的原管道位置，是畸变严重的应力场中心。

割面两侧刚性相对位移的大小和方向组成一个特征矢

量，被用来作为按上述操作产生的位错的标志。为纪念对位错理论的发展作出了许多贡献的 J. M. Burgers，它被称为“柏格斯矢量”，通常以符号 b 表示。圆柱形管道轴线所在的位置称为位错轴。

Burgers[1939]还发现了一个在原则上可借以确定位错柏格斯矢量的方法，同时也可以用来对“位错”一词作更精确的定义。这个方法后来被 Frank[1951]作了进一步发展。设想有两个晶体，一个是完整的，另一个除含有一个位错外，在各方面均与前者相同。现在，一步一个原子地作一个回路，并且使它在理想晶体中恰好闭合。如果同样的回路在非完整晶体中环绕着一个位错，它将不再闭合，例如图 1，就是回路中有一个最简单位错的例子。回路的“闭合短缺”，即弥补回路间隙使它重新闭合所需的矢量，就等于该位错的柏格斯矢量。关于如何作回路，只有两点要求：

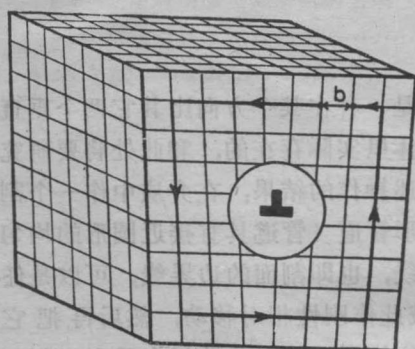


图 1 在简单立方结构中环绕一个 $\langle 100 \rangle$ $\{100\}$ 刃型位错的柏格斯回路

（i）环绕位错轴，（ii）保持在所谓的“好”材料中，此外没有其它限制*。所用的回路称为“柏格斯回路”，而“好”

* 因为在非完整晶体中存在位错，连接回路终点和始点的矢量在大小与方向上都有轻微畸变，所以上述定义不严格正确。实际上，柏格斯矢量是连接无位错晶体中两个相应原子的矢量。

材料是指原子间的最近邻关系未遭破坏的材料。因此，点缺陷及其最近邻原子，紧靠位错轴的区域，都属于“坏”材料。把上面的思路反过来，位错可以定义为一种线缺陷，围绕着这种线缺陷的柏格斯回路不闭合。

1.3 位错的类型及其运动

1.3.1 螺型位错

在各向同性连续介质中，位错完全决定于它的柏格斯矢量及其轴线的位置。因此，无论取什么样的切割、位移和再粘合操作，只要割面终止于同一圆柱形管道，并且割面两侧的刚性相对位移具有相同的大小和方向，将产生同一个位错。作为特例，当割面终止处的圆柱形管道是直的，割面两侧的刚性相对位移又和管道轴线相平行，则不论割面的方位如何，都产生如图 2 所描绘的畸变。这时，原来与轴线垂直的

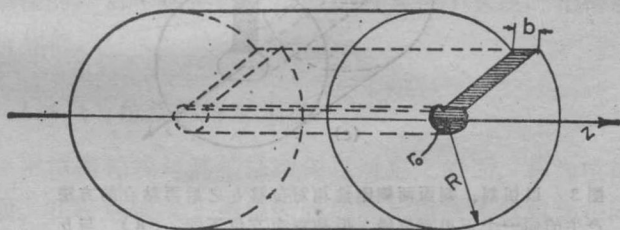


图 2 柏格斯矢量为 b 的右旋螺型位错

一系列厚度为 b 的平行平面，转变成一个连续的螺距为 b 的螺旋面。“螺型位错”的名称即来源于此。所有柏格斯矢量与轴线平行的位错均为螺型位错。画图时，常常给它们标注记号 S 或 S ，借以区分“右旋”和“左旋”螺型位错。

1.3.2 刃型位错

当剖面两侧的刚性相对位移（柏格斯矢量）与剖面边界线（位错轴线）垂直，则形成称为刃型位错的另一种位错。图1所描述的位错即属于这种类型。图3表明，只要相对位

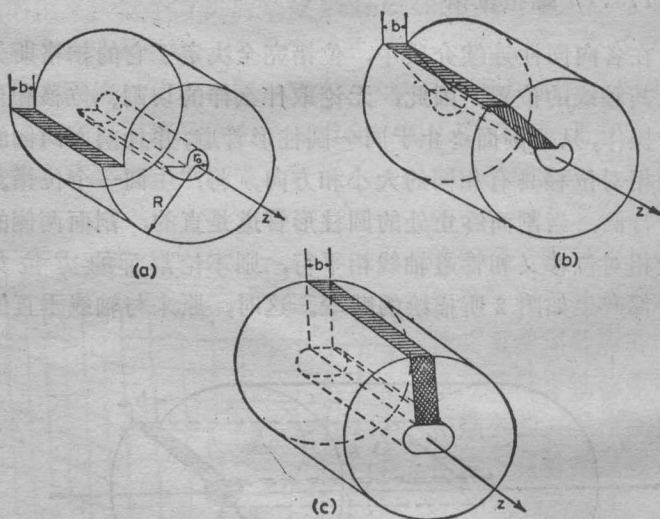


图3 以切割、剖面两侧刚性相对位移 b 之后再粘合的方法产生的同一个正刃型位错，但是剖面方位不同：(a) 与 b 平行，(b) 与 b 斜交，(c) 与 b 垂直

移的大小与方向相同，终止于同一轴线的任意方位的剖面都能形成同一个刃型位错，如在 § 1.3.1 中所讨论的那样。取名“刃型”位错，是基于它与额外插入介质的平面材料片（见图3c）刃边周围的畸变相象这一事实。刃型位错的符号为 $\perp$ （见图1）或 Γ 、或 Λ 、或任何其它方向的 Γ 字， Γ 字

的“竖”指示多余材料片所在的方向。也常用符号+和-分别代替 $\uparrow$ 和 $\downarrow$ ，并且把处于这两种不同方位的位错叫作“正”和“负”刃型位错。

1.3.3 混合型位错和曲线位错

在柏格斯矢量或垂直于位错轴（刃型位错），或平行于位错轴（螺型位错）的极端情况之外，任何中间取向关系都是可能的。这些中间状态的位错统称为“混合型”位错。从各方面讲，混合型位错均可看作是柏格斯矢量为 $b_{\perp} = b \sin \alpha$ 的刃型位错（刃型分量），与柏格斯矢量为 $b_s = b \cos \alpha$ 的螺型位错（螺型分量）的重叠，其中 α 为位错轴与柏格斯矢量的夹角。整个位错线上， α 角不一定是常数，实际上 α 是常数这种情况是很少的，亦即位错可以是曲线状的。换句话说，构成位错的剖面边界线可以相当任意地选取。因此，位错可以逐点地改变它的特征；但是因为剖面两侧的相对位移必须是刚性的，对于任何一个位错，沿其整个长度，柏格斯矢量保持相同。

1.3.4 位错的滑移运动

由位错轴线与其柏格斯矢量所定义的面，称为位错的滑移面。在特殊情况下当位错轴线和柏格斯矢量包含在同一个平面里时，则滑移面退化成平面，并称为“滑移平面”。

如果不考虑晶体中的位错，对于为什么提出滑移平面和滑移面两个术语的原因，是不能清楚的。在晶体中，位错能够沿它们的滑移面“滑移”运动（或“滑动”、或“移动”，三者是可以互换的术语），有些象弹性变形在长螺旋弹簧中传播，或波纹在水面上传播的样子。在图4中，示意地画出

了螺型位错滑移的情形。当位错从左向右运动〔图 4(a)到

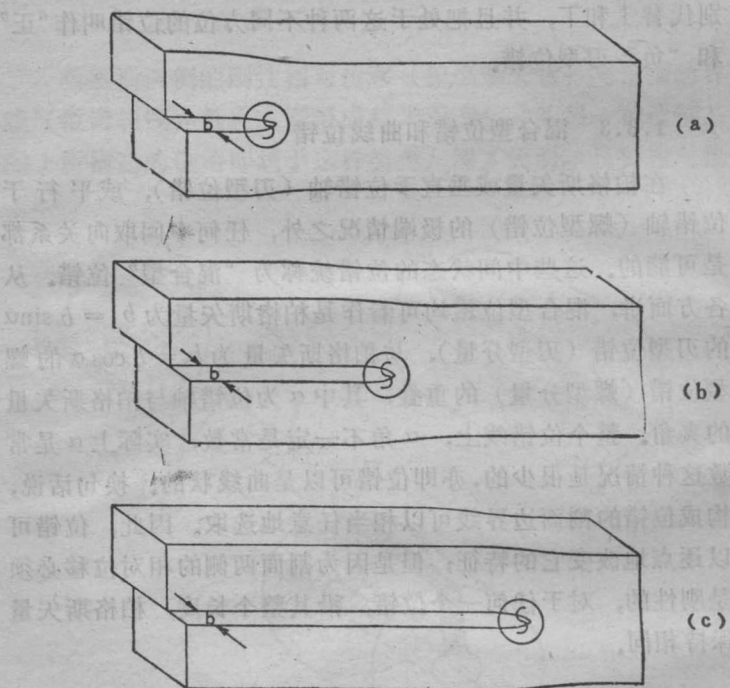


图 4 螺型位错运动引起滑移的示意图

(c)〕, 材料的上半相对下半沿着位错柏格斯矢量的方向, 并按其大小发生相对移动。所以, 位错的滑移运动引起材料“滑移”。

不难证明, 滑动位错引起的剪切变形为

$$\gamma = \rho \bar{l} b \quad (1)$$

其中 $\bar{l}$ 为位错扫过的平均距离, ρ 称为“位错密度”, 它的定义是: 单位体积材料中位错线的总长度, 或穿过单位面积的位错数。一般说来, 前一种位错密度定义更可取一些, 因

为它不会遇到位错线方位混乱分布引起的困难。

整根位错都与柏格斯矢量位于一个平面中的位错，时常称为“滑动”或“滑移”位错，而不与柏格斯矢量共面的位错环，叫作“棱柱位错”，因为它们的滑移面具有一般棱柱的形状。纯滑动时，“滑移”位错不能离开它的滑移平面，相似地，棱柱位错则限制在它的滑移面上，只有在位错恰好具有纯螺型特征的地方例外。对于纯螺型位错，位错轴与柏格斯矢量互相平行，没有被限定的滑移面，因而，在原则上一个螺型位错能够在任何方向作平行于自身的运动。

1.3.5 位错的攀移运动

位错的滑移或滑动被称为“保守的”位错运动，以便和位错垂直于其滑移平面的运动相区别。后一种运动，称为“攀移”或者“非保守的”位错运动，需要依靠通过扩散过程产生的物质传输，亦即点缺陷的产生或吸收。当我们想到刃型位错的形成，可以看作是由于插入了一片多余材料的时候，攀移过程必须伴随物质迁移就很好理解。为了刃型位错攀移，多余材料片必须延长或缩短。自然，对于混合型位错的刃型分量，这同样是正确的。关于攀移运动在几何上的一些细节可见 § 4.9（亦可参阅第十七章图15）。

1.4 位错节点和柏格斯矢量的克希霍夫 (Kirchhoff) 定律

因为此处考虑的位错，总可以看作是剖面两侧刚性相对位移的结果，又因为柏格斯矢量在大小与方向上与此相对位移相等，所以，一个位错的柏格斯矢量沿其整个长度必然保持相同，如在 § 1.3.3中已经指出的那样。然而，几个位错

可能相遇在一点, 形成所谓的“位错节点”。对于节点, 上面表述的柏格斯矢量“守恒定律”就意味着, 相遇于节点的诸位错的柏格斯矢量和必然等于零, 如果所有的位错都看作是指向节点的话 (Frank [1951a])。

在这个所谓的“柏格斯矢量的克希霍夫定律的后半部分中, 实际上包含着一个符号惯例。

1.5 符号惯例

虽然相对位移的大小与方向容易确定, 它们的指向, 譬如说, 是左还是右, 是上还是下, 是正的还是负的, 还需要标注清楚。这个问题的解决, 要借助于符号惯例。符号惯例的规定有某种任意性, 但是在应用时若保持始终一致, 结果便可以避免混乱 (Frank [1951a], Bilby [1951], Thompson [1953])。

第一步, 必须选定位错轴的正方向, 选法任意。其次, 可以照下面的步骤, 来确定柏格斯矢量的符号: 顺着位错轴的正方向看去, 沿逆时针方向作柏格斯回路。柏格斯矢量等于此闭合回路的短缺, 即回路的终点与始点相连接的矢量。(或见 § 1.2 脚注)。

按此定义, 如果把位错轴的正方向反转, 则柏格斯矢量的方向亦反转。

§ 2 连续介质中位错的弹性性质

2.1 螺型位错的应力与应变

若已知各向同性连续弹性介质在直角坐标系中的位移 u_j , 用虎克定律可求出应力分量 τ_{jk} 。

$$\tau_{ji} = \lambda \Delta + 2G e_{ji} \text{ 及 } \tau_{jk} = e_{jk} \quad (2)$$

其中应变分量分别定义为

$$e_{jk} = \frac{\partial u_j}{\partial k} + \frac{\partial u_k}{\partial j} \quad \text{及} \quad e_{jj} = \frac{\partial u_j}{\partial j}$$

此处 G 为刚性模量, $\lambda = 2G\nu/(1-2\nu)$, 其中 ν 为泊松 (Poisson) 比, $\Delta = \sum_j \frac{\partial^2}{\partial j^2}$. 此外, 弹性理论问题的每个解必须满足平衡方程

$$\tau_{jk} = \tau_{kj} \quad \text{及} \quad \frac{\partial \tau_{jj}}{\partial j} + \frac{\partial \tau_{kj}}{\partial k} + \frac{\partial \tau_{lj}}{\partial l} + P_j = 0 \quad (3)$$

其中 P_j 为体力, 如果有体力的话。解还必须满足相应问题的边界条件。最后, 还要满足相容条件, 即

$$\frac{\partial^2 e_{jk}}{\partial j \partial k} = \frac{\partial^2 e_{jj}}{\partial k^2} + \frac{\partial^2 e_{kk}}{\partial j^2}$$

及

$$2 \frac{\partial^2 e_{jj}}{\partial k \partial l} = \frac{\partial}{\partial j} \left(-\frac{\partial e_{kl}}{\partial j} + \frac{\partial e_{jl}}{\partial k} + \frac{\partial e_{jk}}{\partial l} \right) \quad (4)$$

螺型位错的应力与应变的求解方法, 由下列三个步骤组成:

(i) 根据虎克定律 (式 2) 由应变确定应力, 而应变是按照图 2 形成一个螺型位错时自行产生的。由于形成位错时发生的位移为

$$u_x = u_y = 0, \quad u_z = \frac{b}{2\pi} \theta = \frac{b}{2\pi} \arctan \frac{y}{x} \quad (5)$$

可见, 不为零的应力分量仅有

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = -\frac{Gby}{2\pi(x^2+y^2)} \quad \text{及} \quad \tau_{zy} = \tau_{yz} = \frac{Gbx}{2\pi(x^2+y^2)}$$

或

$$\tau_{\theta z} = \frac{Gb}{2\pi r} \quad (6)$$

其中

$$r = (x^2 + y^2)^{1/2}.$$

(ii) 检查按 (i) 得到的试探解是否满足平衡方程、相容条件和边界条件。相容条件与平衡方程可以直接验证,也可以用其它方法验证。例如,对于已反映在试探解中的 $u_x = u_y = 0$, $\partial/\partial z = 0$, 并且无体力作用的特殊情况,只要

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} = 0 \quad (7)$$

则所有包含在式 (3) 与 (4) 中的方程都自动满足。两种方法都说明,式 (3) 与 (4) 是满足的。边界条件,即含有螺型位错的空心圆柱内外表面上无作用力,也是满足的。但是,发现在端面上有切应力分量*,而且, τ_{zx} 与 τ_{zy} 在端面上形成的力偶作用到整个圆柱上,力偶矩的大小为

$$M_d = \int_{r_0}^R \tau_{\theta z} 2\pi r^2 dr = 1/2 Gb(R^2 - r_0^2) \quad (8)$$

其中 $\tan \theta = y/x$, 同前, R 与 r_0 代表空心圆柱的外半径和内半径。

(iii) 试探解的修正。如何改进试探解以便使端面应力为零的问题很复杂,但是已被 Eshelby 和 Stroh[1951]解决了。另一方面关于扭矩的校正是简单的:

在力矩 M_d 的作用下,圆柱体将发生每单位长度扭转角 $\phi = M_d/GI$ 的扭转,其中 I 为横截面的惯性矩,即

$$\phi = \frac{2M_d}{\pi G(R^4 - r_0^4)} = \frac{b}{\pi(R^2 + r_0^2)} \cong \frac{b}{A} \quad (9)$$

* 原文为正应力分量。——译者注