

才庆魁 编著

金属疲劳断裂理论

东北工学院出版社

11.8

TG111.8
12
3

金属疲劳断裂理论

才庆魁 编著

中国科技大学图书馆

DX65/21

东北工学院出版社



B 599338

内 容 简 介

本书以位错理论为基础，以疲劳断裂的全过程为主线索，阐述了各种疲劳现象，疲劳断裂的过程，疲劳断裂的形貌特征和疲劳断裂的微观机制。还从金属材料的微观强化机理出发，介绍了影响疲劳的各种因素以及改善和提高疲劳性能的途径，力求理论联系实际。

本书可作为从事宏观疲劳研究的硕士研究生的教材，也可作为从事疲劳研究的广大科研人员以及从事机械设计教学的广大教学人员参考。

金 属 疲 劳 断 裂 理 论

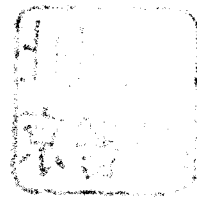
才庆魁 编著

东北工学院出版社出版 辽宁省新华书店发行
(沈阳·南湖) 东北工学院印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：13.5 字数：328 千字
1989年9月第1版 1989年9月第1次印刷
印数：1~1500册

责任编辑：王秀莲 责任校对：刘莹

ISBN 7-81006-122-4/TG·3 定价：2.66元



序 言

磨损、腐蚀和断裂是机械零件和工程构件的三种主要的失效形式。但由于磨损和腐蚀进程很慢，一般可以通过定期更换零件或进行修理来解决，而断裂失效常突然发生，往往导致灾难性的设备事故和人身事故，所以历来为工程界所重视。

造成断裂事故的原因是很多的，有过载、低温脆性、氢脆、应力腐蚀、辐脆和疲劳等，但是绝大多数的机械断裂事故是由于金属疲劳所引起的。可以这样说，机械零件和工程构件，凡是承受应力水平较高并循环变化的，都有可能产生疲劳破坏。因此，疲劳成为当前研究金属在循环载荷下破坏的带有普遍性的问题。

第一次对疲劳强度进行系统试验的是德国人 A·沃勒 (A. Wöhler)。他从 1847 年至 1889 年在斯特拉斯堡皇家铁路工作期间，完成了循环应力下多种疲劳试验，并于 1850 年设计了旋转弯曲疲劳试验机，用来进行全尺寸机车车轴的疲劳试验。他首次提出了 S-N 曲线及金属材料的疲劳极限概念。

1884 年 J·包辛格 (J. Bauschinger) 在验证沃勒的疲劳试验时，发现了“循环软化”现象，并于 1886 年作了报道。当时并未引起人们的重视，直到 1952 年柯扬 (Keuyon) 在做铜棒的疲劳试验时才被重新提出来，并被命名为“包辛格效应”。因此，包辛格是首先研究循环应力-应变关系的人。

但是，直到 19 世纪末叶，人们对于疲劳破坏的机理还缺乏正确的概念。当时将结构金属材料分为塑性材料和脆性材料两种，并认为塑性材料是纤维状结构，脆性材料是晶体结构。在循环应力下的金属疲劳，是由于金属改变了自己的结构，从塑性材料变成晶体结构的脆性材料的缘故。其后由于金相显微镜的应用，能观察到金属的微观结构，才发现上述的假设是不正确的。

1903 年 J·A·尤因 (J. A. Ewing) 和 J·C·W·汉弗莱 (J. C. W. Humphrey) 对退火的瑞典铁进行了旋转弯曲疲劳试验，在试验过程中用光学显微镜观察试样发现，在循环应力作用下晶体中产生滑移线，随着循环数的增加，滑移线逐渐变深变宽，形成滑移带，并在某个晶体上首先出现开裂，然后在晶体与晶体中形成一个长的连续的裂纹，最后导致破坏。这样，就把疲劳破坏与滑移联系起来，对了解疲劳机理迈出了一大步。

1923 年英国 H·J·高夫 (H. J. Gough) 对疲劳破坏机理提出了另一种假设。他观察到在循环应力作用过程中，由于材料的应变硬化，使金属产生的反复塑性变形随循环数的增加而递减。如应力幅低于疲劳极限将不产生塑性变形，如应力幅高于疲劳极限，应变硬化将达到一个极限值，从而形成裂纹。为了进一步阐明疲劳机理，对多种纯金属的单晶进行了一系列的试验，他认为：疲劳破坏并不是在晶体上产生滑移及应变硬化的结果，而是由于在某些局部区域中超过了极限晶格应变，使原子键破坏及晶格中位错不连续所产生。高夫于 1924 年在伦敦出版了一本金属疲劳的书，并在金属疲劳方面发表过 30 多篇论文，在疲劳机理方面做出了很大贡献。1927 年 H·F·穆尔 (H. F. Moore) 及 J·B·科默斯 (J. B. Kammers)

在纽约出版了第一本金属疲劳方面的美国书。1939年E·奥罗万(E. Orowan)在半定量的基础上对高夫的应变硬化理论进行了解释。他将金属材料看成是散布着“不均匀点”的弹性基体。当载荷作用时,在不均匀点上的应力要比基体上的高,屈服将先在这些点上发生。继续施加循环应力,不均匀点将产生加工硬化,使作用在其上的应力增大。如果硬化后的任何点上的应力没有达到破坏应力,则所施加的应力在安全范围内,否则将产生破坏。

1929年英国B·P·黑(B. P. Haigh)发表了高强度钢与低碳钢有不同的缺口敏感性的论文,他所应用的缺口应变分析及“残余应力”的概念,为后人加以补充和发展。在1930年前后,汽车工业中的弹簧和车轴采用了喷丸工艺以提高疲劳寿命。1926年美国J·O·阿尔门(J. O. Almen)进了通用汽车实验室,不久就从事残余应力的研究。他提出被喷丸零件疲劳强度的提高,是由于表层中产生了残余压应力。1936年美国O·J·霍格(O. J. Horgger)及T·L·莫尔贝奇(T. L. Maulbetsch)指出,表面辊压能防止裂纹的形成。1937年德国H·诺伯(H. Neuber)引入了在缺口处的“体素”和应力梯度的概念,他指出:缺口根部小体积内的平均应力,比缺口上的峰值应力更为重要。在第二次世界大战期间,飞机发动机及装甲车的设计中,已利用残余压应力以提高疲劳强度的措施,将应力集中与采用强化工艺结合了起来。

疲劳研究经过一个世纪的努力,在疲劳机理和工程应用方面,都已取得了很大进展。现在从事于疲劳研究的人员,有从材料性能的角度进行研究的,有从金属物理的角度进行研究的,有从力学的角度进行研究的,有从机械设计理论的角度进行研究的,有从专业设备的角度进行研究的。但由于疲劳现象的复杂性,它涉及多种学科,如从某一方面进行研究,总显得力量单薄,有其局限性。以疲劳寿命估算为例,从宏观来讲,疲劳损伤是因塑性应变引起的,所以局部应力-应变法能够体现宏观的这一特征,把缺口根部的应变作为损伤参数,适用于低周疲劳的裂纹形成寿命估算。能量法也是如此,在弹塑性应力-应变状态下,出现滞回环。但是在弹性范围内,宏观的理论不出现塑性应变,所以上面两种方法都不适用了。但如从材料的微观结构来考虑,则在宏观的弹性条件下,材料的内部就可能形成了驻留滑移带,带内就有微观塑性应变,引起微观疲劳裂纹,并在带内扩展。滑移带的密度、带内微观塑性应变集中程度与弹性应变程度有关。假使能把宏观与微观结合起来,就有可能解释疲劳的全过程,得出一个包括低周疲劳和高周疲劳在内的寿命估算方法。至于微裂纹、短裂纹和长裂纹的合理划分与确切定义,也必须将宏观与微观结合起来研究。因此,宏观与微观相结合是疲劳研究的方向。

本书是一本为从事宏观疲劳研究人员所编写的讲述疲劳微观机理的书。第1章讲述位错理论;第2章介绍材料在循环应力-应变下的特性;第3、4章分别介绍裂纹的萌生和扩展;第5章讲述疲劳断口分析;第6章讲述影响疲劳的因素;第7章讲述金属材料的强化机理;第8章介绍金属材料几种典型的微观组织;第9章介绍强化工艺。

本书可作为从事宏观疲劳研究的硕士研究生的教材;也可作为从事机械设计教学的广大教师、从事机械设计的工程技术人员参考。

徐 灏

1987年4月

编 者 的 话

金属疲劳断裂是工程构件带有普遍性的问题，宏观与微观相结合研究疲劳问题日益受到广大科研人员的重视。为了适应疲劳研究深入发展的新形势，满足教学和科研的需要，结合国内外疲劳研究的现状和我们开展疲劳研究的实践，编著了《金属疲劳断裂理论》一书。

在编写中，以位错理论为基础，以疲劳断裂的全过程为主线索，阐述了各种疲劳现象、疲劳断裂的宏观过程、断裂的形貌特征和疲劳断裂的微观机制。并且还从金属材料的微观强化机理出发，介绍并探讨了影响疲劳的各种因素及改善和提高疲劳性能的途径，力求理论联系实际。

参加本书编写工作的还有傅淑云、李好平、秦思展和向荣同志。

本书的编写得到了徐灏教授、李见教授的关怀和指导，徐灏教授还为本书写了序言，在此表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免有错误和不当之处，敬请批评指正。

作 者

1989年4月于沈阳

目 录

序 言

编者的话

第一章 位错理论基础

1.1 位错的基本概念	(1)
1.1.1 刃型位错与螺型位错	(1)
1.1.2 柏氏矢量的一般定义及其性质	(2)
1.1.3 混合型位错	(5)
1.1.4 位错密度	(5)
1.2 位错的弹性性质	(7)
1.2.1 刃型位错应力场	(7)
1.2.2 螺型位错应力场	(8)
1.2.3 位错的能量与线张力	(9)
1.2.4 位错的点阵模型	(10)
1.2.5 位错在外应力场中所受的力	(16)
1.2.6 平行位错间的相互作用力	(16)
1.2.7 位错的塞积	(18)
1.2.8 位错与溶质原子的交互作用	(20)
1.3 位错的运动	(22)
1.3.1 位错的滑移与攀移	(22)
1.3.2 位错的滑移与宏观应变	(24)
1.3.3 位错运动的特征	(26)
1.3.4 螺型位错的交滑移	(26)
1.3.5 位错的交割	(27)
1.4 位错的增殖	(30)
1.4.1 位错的均匀生核	(30)
1.4.2 在应力集中的地方生成位错	(31)
1.4.3 Frank-Read 源	(33)
1.5 典型晶体结构中的位错	(34)
1.5.1 典型晶体结构中的单位位错	(34)
1.5.2 面心立方和密排六方结构晶体中的堆垛序和堆垛层错	(34)
1.5.3 面心立方结构晶体中的不全位错	(36)
1.5.4 Thompson 记号	(39)
1.5.5 位错反应	(40)
1.5.6 面心立方结构晶体中的扩展位错	(41)
1.5.7 Lomer-Cottrell 锁	(42)

第二章 疲劳现象

2.1 包辛格(Bauschinger)效应	(45)
2.2 玛辛(Masing)特性	(47)
2.3 材料的记忆特性	(48)
2.4 疲劳硬化和软化	(48)
2.4.1 应力控制	(48)
2.4.2 应变控制	(49)
2.5 疲劳形变中的饱和现象	(52)
2.6 滑移带	(54)

第三章 疲劳裂纹的萌生

3.1 位错与裂纹	(58)
3.2 位错在疲劳过程中的作用	(59)
3.3 疲劳裂纹萌生的部位	(60)
3.3.1 从晶界萌生疲劳裂纹	(60)
3.3.2 在非金属夹杂物(或第二相)处萌生疲劳裂纹	(62)
3.4 疲劳裂纹萌生的孕育期	(63)
3.5 疲劳裂纹萌生机制	(64)
3.5.1 Wood 机制	(64)
3.5.2 Neuman 模型	(65)
3.5.3 Cottrell-Hull 机制	(65)
3.5.4 位错偶极子塞积模型	(66)
3.6 腐蚀条件下疲劳裂纹的萌生	(68)
3.6.1 腐蚀反应	(68)
3.6.2 氢脆	(69)
3.6.3 腐蚀坑与疲劳裂纹萌生之间关系	(69)
3.6.4 腐蚀条件下氢致疲劳腐蚀生核	(69)

第四章 疲劳裂纹的扩展

4.1 断裂力学概述	(72)
4.1.1 关于 Griffith 理论	(72)
4.1.2 线弹性断裂力学	(74)
4.1.3 裂纹尖端地区的结构	(85)
4.2 疲劳裂纹扩展速率	(87)
4.3 疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{Ih}	(92)
4.4 疲劳裂纹的闭合效应	(100)
4.5 疲劳裂纹扩展时的显微浮凸特征	(101)
4.6 疲劳裂纹的扩展过程	(103)

4.7 疲劳裂纹扩展的物理模型	(104)
4.7.1 切应变型 (第一阶段) 扩展机制	(105)
4.7.2 正应变型 (第二阶段) 扩展机制	(106)

第五章 疲劳断裂

5.1 疲劳断口的分类	(111)
5.1.1 拉-压疲劳断口	(111)
5.1.2 弯曲疲劳断口	(113)
5.1.3 扭转疲劳断口	(116)
5.2 疲劳断口的保存与清洗	(117)
5.2.1 断口的保存	(118)
5.2.2 断口的清洗	(118)
5.3 疲劳断口的宏观形貌	(120)
5.3.1 疲劳源区	(120)
5.3.2 疲劳裂纹扩展区	(121)
5.3.3 瞬时断裂区	(127)
5.4 疲劳断口的微观形貌	(128)
5.4.1 疲劳条纹	(128)
5.4.2 轮胎花样	(138)
5.4.3 韧窝花样	(139)

第六章 影响疲劳的因素

6.1 材料的组织结构对疲劳的影响	(144)
6.1.1 晶体结构的影响	(144)
6.1.2 堆垛层错能的影响	(145)
6.1.3 晶粒大小的影响	(146)
6.1.4 第二相性质的影响	(148)
6.1.5 非金属夹杂物的影响	(149)
6.2 试样或构件的表面状况对疲劳的影响	(150)
6.2.1 表面缺口的影响	(150)
6.2.2 表面状况的影响	(151)
6.2.3 表面残余应力状态的影响	(154)
6.3 环境介质对疲劳的影响	(155)
6.3.1 腐蚀介质对材料疲劳的影响	(155)
6.3.2 腐蚀疲劳机理	(157)
6.4 载荷变化对疲劳的影响	(159)
6.4.1 Miner 累积损伤假说	(159)
6.4.2 过载损伤作用	(159)
6.4.3 次载强化作用	(159)

第七章 金属材料的微观强化机理

7.1 固溶强化	(161)
7.1.1 原子尺寸效应引起的强化	(161)
7.1.2 弹性模量效应	(163)
7.1.3 固溶体的有序化造成的强化	(164)
7.2 位错强化	(164)
7.3 晶界强化	(168)
7.4 马氏体强化	(170)

第八章 金属材料的显微组织与疲劳性能

8.1 奥氏体的形成	(176)
8.1.1 钢中常见的显微组织	(176)
8.1.2 奥氏体的形成	(178)
8.2 珠光体组织与性能	(178)
8.2.1 片状珠光体的形成与形态	(179)
8.2.2 粒状珠光体的形成与形态	(179)
8.2.3 索氏体与屈氏体的形成与形态	(180)
8.2.4 珠光体组织的疲劳性能	(182)
8.3 贝氏体组织与性能	(183)
8.3.1 贝氏体的分类及其形态	(183)
8.3.2 贝氏体组织的疲劳性能	(184)
8.4 马氏体组织与性能	(185)
8.4.1 两种不同形态的马氏体	(185)
8.4.2 两种马氏体的形成条件	(186)
8.4.3 马氏体的性能	(187)

第九章 提高金属抗疲劳断裂的途径

9.1 表面的重要性	(188)
9.2 表面形变强化——喷丸和滚压处理	(189)
9.2.1 喷丸处理	(189)
9.2.2 滚压处理	(191)
9.3 表面化学热处理强化	(193)
9.3.1 表面化学热处理的基本过程	(194)
9.3.2 常用的几种表面化学热处理强化方式及强化规律	(195)
9.4 复合处理强化	(198)
9.4.1 氮化淬火冷处理复合强化	(199)
9.4.2 渗碳后重新加热淬火复合处理	(199)
9.5 激光辐照表面强化处理	(200)

第一章 位错理论基础

通常情况下，金属的疲劳断裂是由局部塑性应变集中引起的。塑性应变影响着整个疲劳过程，而塑性应变乃是在外加切应力作用下，位错相继运动的结果。因此，为要深入地研究疲劳的各种现象和揭示疲劳断裂的实质，必须宏观与微观相结合，了解和掌握位错理论。

1.1 位错的基本概念

1.1.1 刃型位错与螺型位错

位错是晶体结构缺陷中的一种线缺陷。它有两种基本形式，即刃型位错和螺型位错，并且也只有这两种基本形式，其它任何形式（如混合型位错）都是由刃型和螺型位错所组成。

(1) 刃型位错

设想在简单立方晶体中取出一块如图 1.1 所示的小晶体，若它是未滑移部分，按理想晶体概念，晶体原子应当是规则排列。但当晶体上下两部分沿滑移面推移一个原子间距且这个推移终止在晶体里面时，如图 1.2 所示，造成了滑移面上方多了一片材料 AA' 。用符号 \perp 表示刃型位错，其中竖线表示多余半原子面，横线表示滑移面，交点表示刃型位错线。

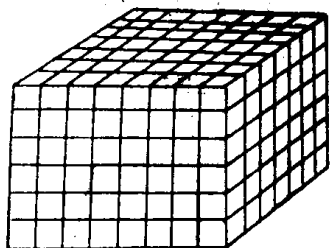


图 1.1 完整晶体示意图

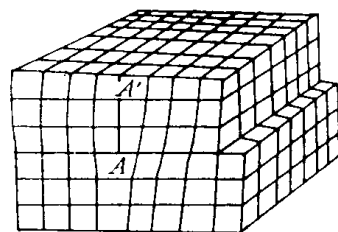


图 1.2 含有刃型位错的晶体

以后本书将位错线简称为位错。这种位错象是半薄片材料插进晶体上半部一样。薄片的边沿形状如刀刃，故称之为刃型位错，它是滑移区与未滑移区在滑移面上的交界线。

如果半薄片材料在滑移面的上面，这个位错用符号 \perp 表示，并称之为正刃型位错。如果半薄片材料在滑移面的下面，这个位错用符号 T 表示，称之为负刃型位错。

(2) 螺型位错

设想将一块晶体，如图 1.3 所示，沿平面 $ABCD$ 切开到直线 BC 为止，将上下两部分晶体沿此平面相对滑移一个原子间距，但这种滑移终止在晶体中，这样所获得的已滑移区与未滑移区界线（取几何中心）就是螺型位错线，简称螺型位错。图 1.4 为螺型位错周围原子的

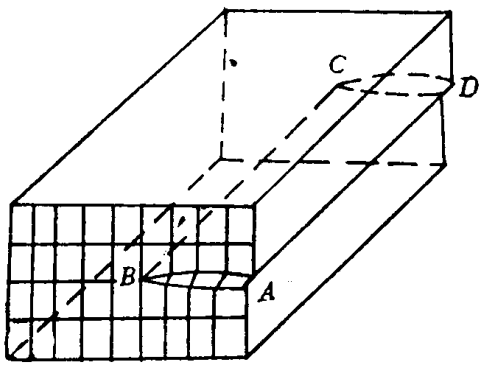


图 1.3 简单立方晶体中的螺型位错

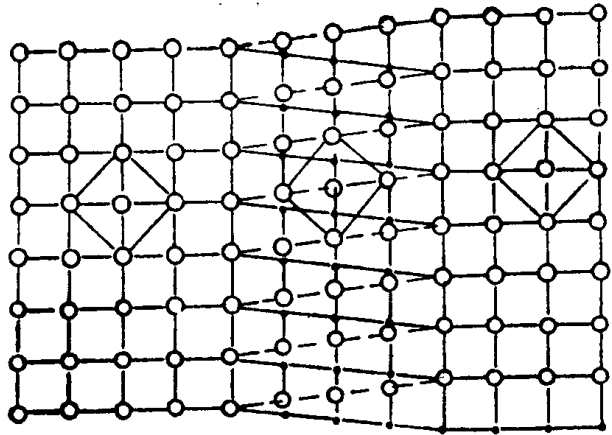


图 1.4 螺型位错周围原子排列的平面投影

配位情况，它是将图 1.3 ABCD 平面上下两层原子投影在滑移面上，用小的实心球表示下层原子，用大的空心球表示上层原子。在位错的左方和右方离位错较远的地方，每个原子都由相同平面上的四个原子配位，在图中用实线联接，另外还有两个近邻原子，一个比纸面高一层，另一个比纸面低一层，这六个近邻原子联结成一个八面体，称为配位多面体。由图看出，已滑移区中原子配位的情况和未滑移区中相同，在螺型位错附近的原子配位数没有变，但配位多面体发生了畸变。围绕着螺型位错的晶面呈螺旋形式是显而易见的。

螺型位错又分为右螺型位错和左螺型位错。为了进一步说明位错的有关性质，人为地给位错线规定一个方向，即沿位错线穿出晶体的方向是它的正方向。右螺型位错就是位错线方向确定了以后，螺旋前进的方向和位错线方向吻合，以右螺旋法则确定转向，右旋转一周（不闭合），升高一个原子间距，再旋转一周，又升高一个原子间距，成右手螺旋状，这样的位错称为右螺旋型位错如图 1.5 所示。左螺型位错就是与右螺型位错做相反的切变推移，绕位错线方向右旋一周，下降一个原子间距，它恰好是左螺旋形式的螺型位错，见图 1.6。

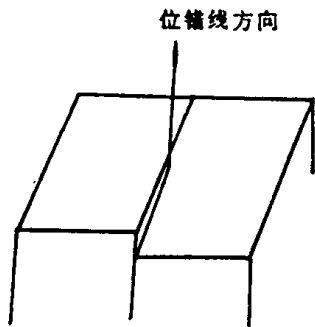


图 1.5 右螺型位错

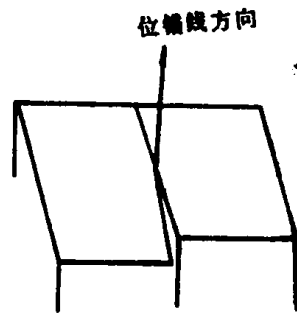


图 1.6 左螺型位错

1.1.2 柏氏矢量的一般定义及其性质

J.M.Burgers 在 1939 年一篇文章中揭示了表征位错的重要物理量——柏氏矢量。

按照晶体学观点，整个晶体可以看作是由在晶体中取三个初基矢量 $\vec{a}_0, \vec{b}_0, \vec{c}_0$ ，用这三个初基矢量做平行六面体，在 $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ 三个方向顺次堆积而成的，如图 1.7 所示。

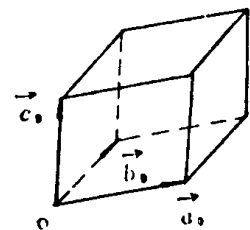


图 1.7 三个初基矢量做成的平行六面体

从晶体中的某一点出发，以一个初基矢量为步伐，在良好区域(允许有些弹性形变)，沿着初基矢量方向走去，最后回到原来的出发点，这样的闭路称为柏氏回路。

对完整晶体做柏氏回路，则有

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

式中 n_a, n_b, n_c 分别为 $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ 方向走的步伐数。式(1-1)不仅对完整的晶体成立，而且对含有点缺陷的晶体，当忽略了弹性范围内误差后，仍然成立。

对于含有位错的晶体做柏氏回路，则有

$$\sum n_a \vec{a}_0 + \sum n_b \vec{b}_0 + \sum n_c \vec{c}_0 = -\vec{b} \quad (1-2)$$

柏氏回路所经过的各点应该是晶体中良好的地方，但允许有弹性畸变，按上式求出 \vec{b} ，就是位错的柏氏矢量。

很显然，只要被包围的位错没有改变，无论柏氏回路做得大一点，还是小一点，也无论回路是什么形状，所得到的柏氏矢量都是相同的。因此，柏氏矢量不是回路的特征，而是位错的特征。

从图 1.2 和图 1.3 中看到，在位错中心原子间有较大的畸变。这些畸变反映在它周围所有原子间的排列上，即使在离位错中心较远的地方，这些畸变还是存在的，柏氏回路就把这些存在于位错中心四周原子间的畸变叠加起来，其结果由柏氏矢量表达。而点缺陷就没有这个特性，它的柏氏矢量恒等于零。因而位错的柏氏矢量是畸变的累积数。这就是柏氏矢量的物理意义。

Frank 在 1951 年的一篇论文里，用了比较严格的方法处理柏氏回路和柏氏矢量。它用两个晶体，一个是包含位错的晶体，另一个是作为参考的完整晶体。Frank 称在非完整晶体中围绕位错的闭路为柏氏回路，把在参考晶体中做出相当于柏氏回路最后一点到开始点的矢量，定义为含位错晶体中位错的柏氏矢量。

图 1.8 表示刃型位错柏氏矢量的确定方法。联结终点 E 到起点 A 的矢量 \vec{EA} ，就是图 1.8 中 (a) 表示的晶体中位错的柏氏矢量。刃型位错 \vec{b} 与位错线垂直。

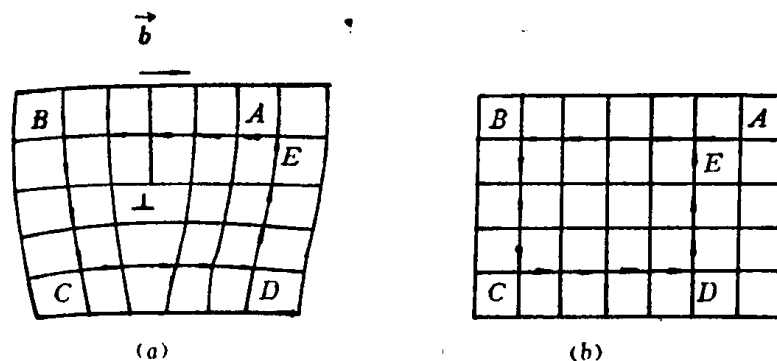


图 1.8 确定刃型位错柏氏矢量方法

图 1.9 是用 Frank 方法确定螺型位错柏氏矢量示意图。图 1.9 (b) 中联接 G 与 A 的矢量 \vec{GA} ，就是图 1.9 (a) 晶体中左螺型位错的柏氏矢量。由图可知左螺型位错的柏氏矢量 \vec{b} 与位错线逆向平行。用同样方法可判断出右螺型位错的柏氏矢量 \vec{b} 与位错线同向平行。

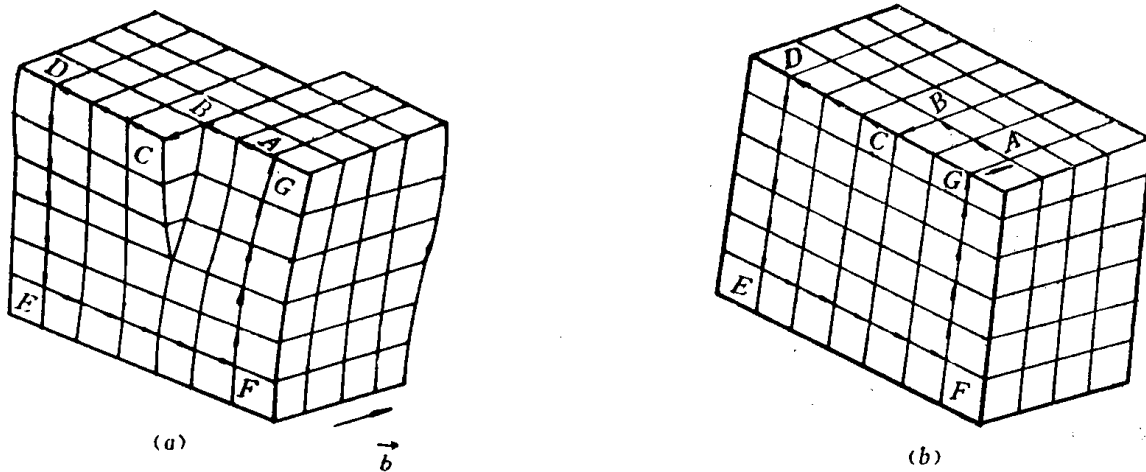


图 1.9 确定螺型位错柏氏矢量方法

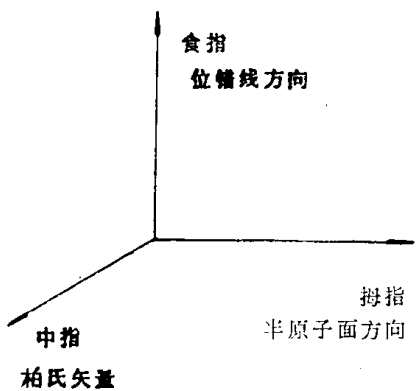


图 1.10 刃型位错的右手定则

刃型位错的柏氏矢量垂直于位错线。刃型位错的正、负号决定于插入的半原子面的位置。如图 1.10 所示，刃型位错的半原子面的方向、位错线方向及位错柏氏矢量三者是互相垂直且构成右手坐标关系，已知其中的两个量即可求出另一个量的方向。

柏氏矢量的基本特征，即它的不变性或称守恒性，表现在如下三方面：

(1) 一个不分叉的位错其各个部分的柏氏矢量一定是相同的，即只能有一个柏氏矢量。

(2) 设有一个位错，在它的中途又分叉成为两根（或两根以上），但分叉之后各位错柏氏矢量之和等于分叉之前原位错的柏氏矢量，如图 1.11 所示。

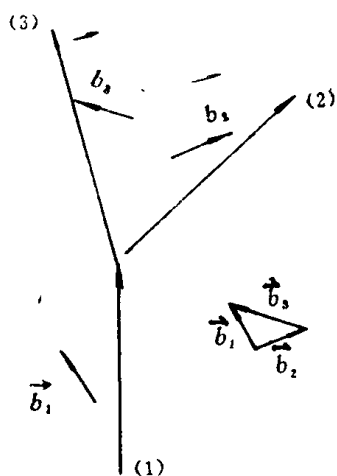


图 1.11 位错分叉但柏氏矢量不变

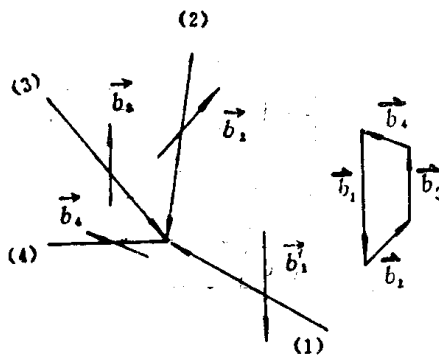


图 1.12 在位错结点上柏氏矢量的关系

(3) 几个位错线相遇在一个结点，若位错线的方向都是向着或背着结点，则这些位错线的柏氏矢量之和恒等于零，见图 1.12。

1.1.3 混合型位错

前面所讲的这两种位错，多半都是指全部是纯刃型位错或全部是纯螺型位错。事实并非如此，位错观察表明位错线和柏氏矢量一般都不能恰好正交或平行，而是位错线和柏氏矢量相交成一定角度，说明既不是单一的纯刃型位错，也不是纯螺型位错，而是混合型位错。这可以由分解柏氏矢量来理解。图 1.13 表示位错线 AB 和它的柏氏矢量 \vec{b} 相交成 θ 角，把 \vec{b} 分解为 \vec{b}_{\parallel} 和 \vec{b}_{\perp} 两部分，即

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

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

位错 AB 实际上是刃型位错和螺型位错两部分相叠加，刃型位错部分的柏氏矢量为 \vec{b}_{\perp} ，螺型位错部分的柏氏矢量为 \vec{b}_{\parallel} 。沿 AB 方向看去，螺型位错部分是属右螺型位错，按右手法则，刃型位错的半薄片材料方向垂直纸面向内，是负刃型位错。

混合位错 AB 还可以看成是折线的极限，见图 1.14。这条折线是一段螺型位错和一段刃型位错相间联接而成的，它的柏氏矢量都等于 \vec{b} 。这种分解方法显然将位错变长些，从能量上来考虑，位错总是趋向于拉直。

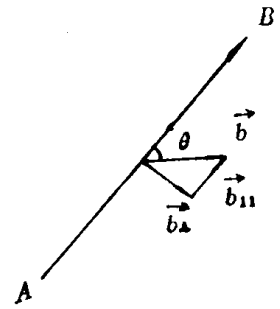


图 1.13 混合型位错分解为刃型部分和螺型部分

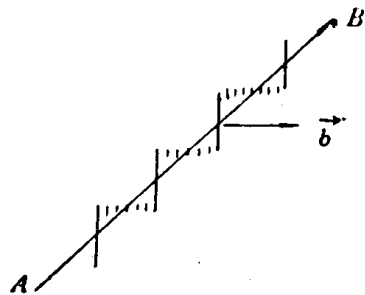


图 1.14 混合型位错的另一种分解

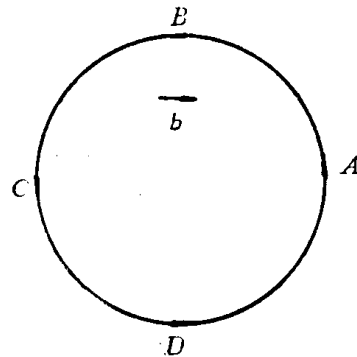


图 1.15 圆形位错环

图 1.15 的圆形位错环位于纸面上，它包含刃型的、螺型的和混合型的三部分。柏氏矢量也在纸面上，位错是逆时针方向，则在 A 处的位错段是负刃型，在 C 处的位错段是正刃型，在 B 处的位错段是左螺型，而在 D 处的则是右螺型，其它地方的位错段都是混合型的，无论哪一段位错，都具有相同的柏氏矢量 \vec{b} 。因为刃型位错和它的柏氏矢量是互相正交的，而螺型位错和它的柏氏矢量平行，所以刃型位错的形状可以是任意的。而螺型位错的形状只能是直线。由此可见，一个位错环可以有纯刃型的位错环，但绝不可能有纯螺型的位错环。

假如有一位错线段，其一端是刃型的，另一端是螺型的，中间必定经过混合型的部分。

1.1.4 位错密度

在单位体积中所包含的位错线的总长度称为位错密度。用下式表示：

$$\rho = \frac{L}{V} \quad (1-3)$$

式中： L —— 位错线的总长度；

V —— 晶体的体积；

ρ —— 位错密度。

实际观察表明，如图 1.16 所示，晶体表面上有许多露头，可以设想位错线是直的，而且平行地从试样的一面穿到另一面，依照上面的定义可有以下式

$$\rho = \frac{L}{V} = \frac{n \cdot l}{s \cdot l} = \frac{n}{s} \quad (1-4)$$

式中： n —— s 面上位错露头总数；

s —— 晶体表面面积；

l —— 晶体高度；

L —— 位错线的总长度；

V —— 晶体体积；

ρ —— 位错密度。

此时，位错密度即可重新定义为垂直于位错线的单位面积内位错的露头数。

实验表明，一般退火金属的 ρ 值约为 $10^5 \sim 10^8 / \text{cm}^2$ 。冷加工金属的 ρ 值增至 $10^{12} / \text{cm}^2$ 。如果晶体的滑移是由同号的位错的运动所造成的，尚残留了 N 根位错线在晶体内，则滑移在晶体两侧所产生台阶的高度差 δh 应等于 $Nb \cos \theta$ ，如图 1.17 所示。式中 θ 为滑移面和晶体表面法线的夹角。有人曾对 NaCl 晶体进行研究，台阶的高度差用干涉显微镜测量，滑移面内残留的位错用腐蚀坑方法显示。一系列的实验结果表明 $Nb \cos \theta$ 和 δh 为同一数量级，但 $Nb \cos \theta > \delta h$ ，这个结果说明滑移面上有异号的位错，而滑移过程是由正负位错两个方向运动所造成的。

晶体的范性弯曲也可以用位错的分布来解释。假设平行于晶体的滑移面截出一厚度为 d 的薄晶片，再将此晶片沿半径为 r 的圆柱面弯曲，晶片对轴的张角为 θ 。如图 1.18 所示。那么，晶片上下底面的弧长差为

$$(r + d)\theta - r\theta = d\theta \quad (1-5)$$

显然需要有 $d\theta/b$ 个正刃型位错分布在晶体中，而晶片的侧面积为 $r\theta d$ ，产生范性弯曲所需要的位错密度等于

$$\rho = \frac{d \cdot \theta / b}{r\theta d} = \frac{1}{rb} \quad (1-6)$$

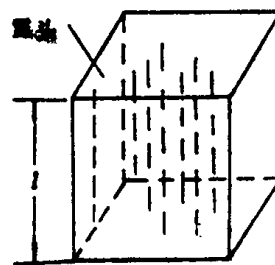


图 1.16 位错密度计算示意图

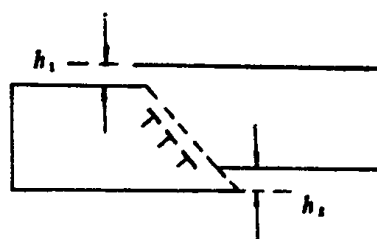


图 1.17 滑移面上位错分布与台阶高度差

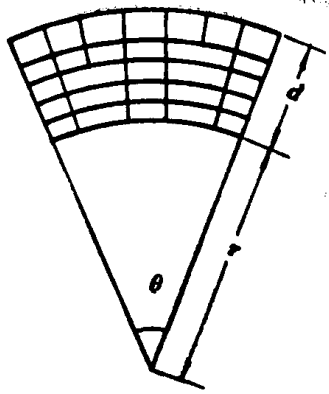


图 1.18 弯曲晶片刃型位错分布

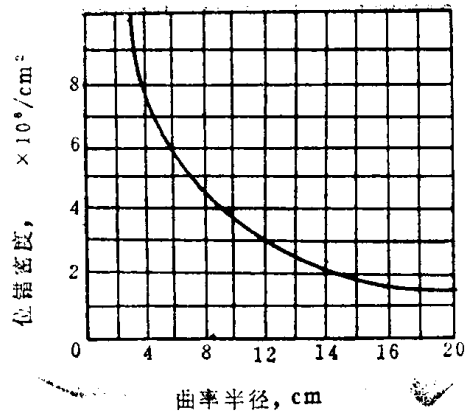


图 1.19 位错密度与曲率半径的关系

有人用锆晶体实验，位错密度与曲率半径的关系如图 1.19，与式(1-6)是相应的。

1.2 位错的弹性性质

从位错的基本概念知道，位错是一种线缺陷，在它的周围原子要偏离平衡位置，造成位错线附近晶体的畸变，因而晶体内存在着应力场。在位错应力场中，位错之间的作用力，位错与其它点缺陷的相互作用，以及位错本身的一些动态特征，都和位错应力场有密切关系。一个位错在晶体中引起的变形可分为两部分，一部分是位错中心附近的严重畸变，另一部分是位错周围的弹性变形。它们是通过位错的连续介质模型和位错的点阵模型描述的。

位错的连续介质模型，是用连续的弹性介质代替实际晶体，用经典的弹性力学方法进行计算。应用该模型前，应在位错中心挖一条小的孔道 ($r \approx 10^{-4}$ cm)，其目的是为了避开位错中心处发生应力奇异性。事实证明，这种处理的结果是很有效的。

位错的点阵模型，考虑了晶体点阵的周期性，克服了连续介质模型的局限性（即忽略了晶体的点阵结构），解决位错中心区的位错有关问题。例如，位错的宽度、位错中心区能量以及移动位错所需要的临界切应力等问题。但是，点阵模型并不是彻底的，它仍要采纳连续介质的某些观点和结果，所以常称之为半点阵模型。

1.2.1 刃型位错应力场

刃型位错的连续介质模型，如图 1.20 所示。设有一个无限长的圆柱体，沿其中心轴 oz 挖掉一个小圆柱体，形成直通孔道，半径为 r_0 ，外半径为 r_1 。沿着 xoz 平面将圆柱体切开到中心孔道，使上半部沿切面向中心做刚体式的推移，切开面上下相互滑移的距离为 b 。最后把切开面粘合起来，形成刃型位错。在中心轴挖一小孔道，其目的是为了避开推移后在中心处发生应力奇异性。

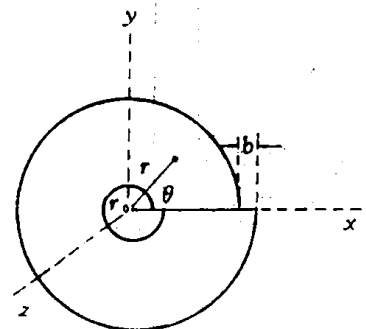


图 1.20 刃型位错的连续介质模型

按照上述操作，刃型位错的应力场问题归结为二维