

位错与强化



位錯与強化

陈进化 著

辽宁教育出版社

1991年·沈阳

第十

内 容 提 要

本书系统而完整地阐述了晶体缺陷与金属强度的现代理论与实践,对位错的基本特征与弹性性质、位错的运动与交割、位错的增殖与塞积、实际金属晶体中的位错及其观测,以及点缺陷与界面、强度的本质与强化的机理等一系列固体理论的基本问题都做了深刻而详尽的论述,同时还扼要介绍了晶体结构与弹性力学的基本知识,对重要的基本公式,都做了推导。

本书可做理工科高等院校金属材料 and 金属物理专业的研究生和本科生的教材或主要参考书,也可供有关专业的教师、科研和工程技术人员参考。

陈进化同志的这部遗著,由沈阳工业大学王绍铨审校,由康操平、陈立佳、张为宏整理,陈立佳续写了第十二章的最后一节。

位 错 与 强 化

陈进化 著

辽宁教育出版社出版

(沈阳市北一马路108号)

沈阳工业大学印刷厂印刷

字数: 470,000 开本: $787 \times 1092^{1/32}$ 印张: $21^{1/4}$

1—1 000

1991年1月第1版

1991年1月第1次印刷

责任编辑: 王一心

封面设计: 安今生

责任校对: 周广东

ISBN 7-5382-1195-0/G·936

定价: 13.20元

前 言

陈进化同志因劳累过度心脏病猝发而离开了我们。他走得太急，那支勤奋的笔尚未戴上笔帽，那些未写完的教材仍放在案头。他为教育事业奋战到生命最后一息，他的去世使每个熟悉他的同志、所有聆听过他教诲的学生无不由衷悲痛。

进化同志是位有作为的中年知识分子，他几十年如一日，对教育事业忠心耿耿，为培养合格的四化人才而呕心沥血。他把思想工作溶在教学过程之中，他是我校教书育人的典范；他思想敏锐、襟怀坦白，待人恳诚、积极上进，以极大热情关心改革大业，为学校的发展建设，提出过很多宝贵意见；他才思敏捷颇具文采，他把对党对社会主义教育事业的爱、对广大青年学生的情凝集在他的诗集《啊，水仙》之中；他对工作认真负责，对业务精益求精，主动承担超负荷的工作，他是教学科研第一线的骨干。

这本《位错与强化》是进化同志的最后一部学术著作。从本书的字里行间，我们可以看见进化同志为探索理论孜孜不倦的勤奋身影，为治学严谨求实的科学态度，为育人鞠躬尽瘁的奋斗精神。这些是他留给我们的宝贵财富，也正是需要我们向进化同志学习，不断使之发扬光大的创业精神。

这部遗著在进化同志生前友好的帮助整理下，今天出版了，进化同志的宿愿实现了，你安息吧！

李振东

1989年10月于沈阳

序 言

进化辞世，留下了这份遗稿。他的爱人请我为这部遗著审评。因才疏历浅，有金顶木椽之虞，不胜踟躇。但念故友之厚谊，又感家属之至诚，遂斗胆承命。

进化多年来研究位错理论，卓有成效，造诣颇深，曾有“位错基础”专著出版；又广有文略，博学多通，有诗集“啊，水仙”并蒂问世，文思敏捷，诗作昭昭。他以诗人特有的敏锐和笔锋，为这部现代科技专著润色。

在这部专著中，进化以独特的风格和简洁的语言系统而完整地阐述了晶体缺陷与金属强度的现代理论与实践，对位错的基本特征与弹性性质、位错的运动与交割、位错的增殖与塞积、实际金属晶体中的位错及其观测，以及点缺陷与界面、强度的本质与强化的机理等一系列固体理论的基本问题，都做了深刻而详尽的论述。同时为了便于读者学习，还扼要介绍了晶体结构与弹性力学的基本知识，对重要公式做了推导。

这部专著是进化多年从事本科生和研究生教学工作的总结，是他在金属理论方面研究成果的结晶。它浸透了汗水，凝聚着心血，闪烁着生命之火与智慧之光。进化为它付出了宝贵的生命。

本书可作为理工科高等院校金属材料 and 金属物理专业的研究生和本科生的教材或主要参考书，也可供有关专业的教师、科研和工程技术人员参阅。

王 绍 铿

1989年11月21日

目 录

前 言 序 言 绪 论

..... 1

✓第一章 晶体结构和塑性变形.....12

1—1 晶体结构.....12

1—2 常见金属的晶体结构.....41

1—3 实际金属晶体与晶体缺陷的概念.....47

1—4 完整晶体的塑性变形方式.....49

1—5 完整晶体的理论切变强度与位错理论
的产生.....62

✓第二章 位错与柏氏矢量.....68

2—1 滑移与位错.....68

2—2 刃型位错与螺型位错模型.....69

2—3 柏氏矢量.....72

2—4 混合位错.....81

2—5 位错的密度.....84

✓第三章 位错的运动与交割.....86

3—1 位错的滑移.....87

3—2 位错的攀移.....102

3—3 位错运动对晶体体积的影响.....105

3—4 位错的交割与割阶.....107

3—5 带割阶的位错运动.....116

第四章 位错的弹性性质	121
4—1 弹性连续介质及弹性力学函数	122
4—2 位错的应力场	147
4—3 位错的应变能	167
第五章 作用在位错上的力	175
5—1 位错的线张力	176
5—2 外加应力场作用在位错线上的力	180
5—3 位错间的相互作用力	185
5—4 晶体表面的作用力——映像力	194
5—5 派—纳力与半点阵模型	195
第六章 位错的增殖与塞积	207
6—1 位错的形成	208
6—2 位错的增殖	212
6—3 位错的塞积	228
第七章 金属晶体中的位错	235
7—1 堆垛层错	241
7—2 全位错与不全位错	241
7—3 位错反应	251
7—4 面心立方晶体中的位错和汤普森符号	256
7—5 扩展位错	260
7—6 扩展位错的运动	267
7—7 金属晶体中常见的位错形态	274
7—8 位错组态的晶胞模型分析法	292
7—9 密排六方晶体中的位错	296
7—10 体心立方晶体中的位错	304

7-11	超点阵中的位错	310
7-12	实际金属晶体中的位错增殖机制	315
第八章	位错观测技术	323
8-1	浸蚀坑法	325
8-3	缀饰法	327
8-3	电子显微分析	328
8-4	X 射线衍射法	332
8-5	场离子显微分析	333
第九章	点缺陷及其与位错的交互作用	335
9-1	点缺陷的类型与组态	335
9-2	点缺陷的形成能与嬗变	340
9-3	点缺陷的平衡浓度	348
9-4	点缺陷的迁移与迁移能	356
9-5	点缺陷的形成、聚集与消失	361
9-6	点缺陷有关参量的测定	371
✓9-7	点缺陷与位错的交互作用	381
第十章	界面与界面能	398
10-1	界面的分类与界面研究	398
10-2	晶体表面	402
10-3	晶界的几何参量	417
✓10-4	小角度晶界的结构模型	420
10-5	大角度晶界的结构模型	431
✓10-6	晶界的应力场与晶界能	449
10-7	晶界的运动	465
10-8	相界结构与相界能	475
10-9	微结构材料中的界面	490

第十一章 金属的变形强化机制..... 498

✓ 11-1 关于强化与强度问题的界分..... 498

11-2 金属晶体的流变应力与临界切应力... 501

11-3 加工硬化机制..... 517

11-4 加工硬化理论..... 537

11-5 Cottrell-Stokes定律及有关注释..... 561

✓ **第十二章 金属材料中的其它强化机制**..... 570

✓ 12-1 晶间强化..... 570

✓ 12-2 固溶强化..... 590

12-3 弥散强化..... 622

参考文献 636

后 记

绪 论

一、引言

金属的强度，狭义上是指金属的断裂强度。而广义上，由于对材料从不同侧面提出的不同要求，强度又包括弹性强度、屈服强度、疲劳强度、断裂强度，甚至抗冲击强度等等。金属的韧性是又一个重要的力学性能。研究金属材料的强韧化问题，即探求金属材料力学性能的规律，提高各种力学性能，使其适应现代工业、现代农业、现代国防及科学事业的需要，是金属材料工作者最为关心的问题。

人们在探寻金属强度规律的过程中认识到，金属晶体强度乃至力学性能的各个方面，都不仅与金属晶体结构而且与其缺陷尤其是与位错这种晶体缺陷有关。在一定程度上讲，一定的金属的强韧性及其力学性质，一般地都取决于一定量的材料中位错的密度、分布、形态、运动状况以及位错和其它晶体缺陷的交互作用。材料的其它性质，如电导性、电磁性、热物理性质等物理化学性质，也都与位错有关。在位错理论形成之前，还没有关于晶体强度和力学性质的理论，有一些也都是宏观的或半微观的经验性理论，它们都不能解

释强度和力学性质的物理实质。直到位错理论建立之后,才形成晶体强度的系统理论。抛开有关位错以及与之互为源头和尾闾的其它晶体缺陷的理论与知识,就无法涉入金属强度的微观理论之门。位错理论与金属强化是金属晶体力学的理论与应用的不可分割的两个方面。

二、发展史

晶体中的位错理论,也正是在晶体强化理论的发展过程中提出和发展起来的。

从本世纪初到二十年代,很多科学工作者,对金属晶体和离子晶体的塑性变形和力学性质,做了大量的研究工作^[1],探索到了很多规律,其中包括 Baker^[2]和 Andrade^[3]在金属晶体拉伸实验中对滑移线的发现,以及之后,晶体塑性变形滑移模型的建立,这些都为从晶体的微观结构探索金属的力学性质的实质打下了基础。

金属强度的来源是金属原子间的结合力,如果金属原子间的结合力能够充分发挥出来,它应能按照理论得出的结果计算出来。

1926年,Я.И.Френкель利用完整晶体滑移模型计算了金属晶体的屈服强度^[4]。结果发现,计算数据比实验测得的金属屈服强度值要高出几个数量级。后来,Orowan^[5]、Mackenzie^[6]等对这项计算进行了修正,但所得的结果,仍然与实测数据存在极大差异。

人们发现,只有标志弹性强度的弹性模量因其具有对结构不敏感的性质,既可以用理论计算,也可以通过实验测定,二者的结果是一致的。除此以外的很多力学性质,对材

料结构是敏感的,原子间结合力没有充分反映到强度指标上。

金属的理论屈服强度与实测屈服强度的巨大差异,促使人们对既已建立的晶体结构与滑移模型进行修正,探求导致实际晶体屈服强度下降的微观机构到底是什么。

最初,有人(Becker^[7,8])曾以实际晶体中存在的热应力,作为导致屈服强度降低的因素。认为晶体中原子的热运动具有自红外到声波范围内的各种不同的频率,在各个方向上,这些不同频率的波迭加结果不同,就会在某个区域内形成热应力峰,当外加应力与这种热应力峰处的应力的总和达到了理论强度值时,便在这个区域内发生滑移,并开始在整个晶体滑移面上传播,于是材料开始屈服。这个理论并没能圆满地解释理论计算与实测的屈服强度在数值上的巨大差异,而且,特别是在解释 0°K 时的材料性质时,遇到了更大困难。

稍后,Orowan对Becker的理论做了修正^[9],第一次在晶体中,引入了晶体缺陷的机制,并把加工硬化的概念引入了滑移模型,建立了新的理论强度的数学关系式,使计算数值降低下来了。但是,他的有关修正模型,没能阐明确切的物理意义,而且没能够阐明晶体缺陷的实质。

最早把滑移位错作为一种特殊晶体缺陷引入晶体结构中的是Prandtl^[10]与Dehlinger^[11]先后在1928年、1929年所发表的论文。

直到1934年,Taylor^[12]、Polanyi^[13]、Orowan几乎同时提出了晶体缺陷的具体模型,阐明了位错的概念和明确图像,特别是Taylor,把连续介质中位错与晶体滑移联

系起来,设想出了位错在滑移中的形态,以此计算出了加工硬化的曲线。

至此,晶体中的位错模型才算确定下来。这标志着位错理论已经初步建立起来。但是在位错的原子模型确立之后,人们为验证它的存在,以位错的存在解释滑移与塑性变形现象、位错的本质对晶体的影响以及位错的来源等不同方面进行了大量的研究工作。

1938年,Конторова和Фремкель得出晶体在承受外力时,晶体内部有位错传播的论断。在1939年,Burgers^[14]提出了量度位错的畸变的矢量——柏氏矢量的概念,阐明了它在研究位错本源方面的重要意义。这为定量的研究位错对晶体力学性质的影响,打下了基础。

Burgers同时阐明的螺型位错的模型,与Taylor以前阐明的刃型位错模型,构成了晶体中两种基本位错模型。到这时,位错的连续弹性介质模型已经建立起来,位错中心以外的应力场、应变能以及由此建立的弹性力学理论也相继成型。

Peierls^[5]在1940年、Nabarro^[16]在1947年,相继建立了简单立方晶体中存在一个刃型位错的数学模型,也叫Peierls—Nabarro位错中心模型,计算出了位错中心的宽度和使这个位错运动所需要的切应力——派-纳力。这项应力与实测的金属晶体强度很为一致。他们的工作,不仅通过具体的计算数字,证明了晶体中存在的位错导致了屈服强度下降,使之远远低于理论强度这一设想,而且初步解决了应用经典弹性力学所无法解决的位错中心的问题,处理了位错中心应力与应变的非线性关系,为进一步解决位错中心的力学

性质问题，迈出了卓有成效的一步。

1947年7月在英国 Bristol举行的国际固体强度会议上，Cottrell^[17] 报告了他的论文《溶质原子对位错行为的影响》，以溶质原子与位错的弹性交互作用，解释碳素钢出现屈服点的现象，获得了满意的结果。这样，不仅有力地证明了位错的存在，而且成为位错理论解决金属材料强化问题的一个开端，使位错的研究工作进入了一个新阶段。

也是在这个会议上，Heidenreich和 Shockley^[18] 报告了研究面心立方晶体中扩展位错的成果，打开了用位错理论研究实际金属晶体的力学性质的工作的大门。

1949年，Frank^[19] 用位错机制解释了实际晶体生长速度为什么远远高于用完整晶体模型计算出的生长速度问题。并且预言：由于晶体中存在螺型位错，在晶体表面会出现生长蜷线。到1950年，Griffin^[20] 利用相衬显微技术在绿宝石上观察到了这种生长蜷线。此后的很多工作，利用相衬显微镜、多光束干涉显微镜，对晶体生长蜷线做了大量观察。直到后来Hedges与Mitchell^[21] 用缀饰技术，使晶体中的位错网被显示出来。至此，晶体中的位错，才为实验所证实，位错理论才真正建立在实验的稳固基础上了。

从1934年位错模型建立到1950年第一次在晶体上看到螺型位错存在而导致的晶体生长的蜷线形貌，相距16年，其间位错理论的研究工作，经历了一个很缓慢的时期。一方面是由于位错理论作为一种新理论刚刚提出来，还没能够引起广大科学工作者的足够重视；另一方面是因为，任何一种新的科学理论都离不开相应的实验技术，都受着实验技术水平的制约。当时的实验技术还不能够供人们进行微观结构方面的

观察,限制了在这方面做更为深细的研究工作。事实上,在这一时期以后的几年中,随着实验技术的提高与应用,位错的研究工作获得了迅速的发展。

从1950年起位错理论中的若干重大问题,都一一获得了解决。1950年, Frank和Read^[22]共同提出了一个位错增殖机制,就是著名的 F—R 位错源,阐明了利用一个两端被固定的位错线段在外力作用下,重复做弯曲运动的机制,阐明了由一个位错在滑移中不断释放出新的位错,导致晶体发生宏观滑移带的原理。1952年, Seitz^[23]提出金属在凝固过程中由空位凝聚而转化成位错的机制,这个机制为1958年用电子显微镜观察实验结果所证实^[24]。之后 Bilby^[25]在1954年, Amelinckx^[26]在1957年,在 F—R 源的基础上,提出了更具普遍意义的位错增殖机制。至此,做为位错理论的一个重要组成部分的位错源问题,已获得了解决。

从1950年到1956年,是位错研究工作的一个高潮时期。位错的几何学与弹性力学的问题,诸如:关于单个位错运动的规律;位错网的行为;位错与位错之间、位错与其它晶体缺陷之间的交互作用理论,已经得到了初步阐明,位错理论基本已经建立起来。

由于把电子显微镜、X 射线等新的实验技术应用到位错研究上,使晶体中的位错的形态及位错运动,接连被显示出来。1956年, Menter^[27]首先用电子显微镜在铂钨花青 (Pt—Phthalocynine) 晶体中直接观察到了位错。同年, Hirsch等人^[28]用相衬法在电子显微镜下观察了金属晶体中的位错运动。这两项实验在位错的实验工作上是一个很大突破。此后使人们用种种新的实验技术,如红外线偏光技

术^[29]，X射线光源显微技术^[30]等等，把有关位错的许多方面的理论设想，诸如位错的原子组态、位错的应力场、位错的增殖机制、位错的滑移、攀移与交割、堆垛层错与不全位错，以及位错网的分布等等，在不同晶体中进行了验证^[31]。到了六十年代，位错的基础理论已经基本形成，在六十代以后，大量的研究工作，诸如研究位错在晶体中的种种形态，位错在晶体中的反应，以及位错对晶体的结构、组织和性能的影响上，在应用位错解释和解决材料力学性能的问题上，表现更为活跃。

从五十年代末、六十年代初开始的位错电学性质的研究^[32,33]和半导体中带电荷的位错的研究^[34]，有关位错对磁性材料磁性的影响^[35-37]，非晶态金属中的位错对光谱的影响^[38]，位错运动产生热效应^[39]，位错的催化作用^[40]，以及位错对晶体的光学、热学、化学性质的影响等方面的研究工作，迅速开拓了位错的研究领域，使位错理论发展成为现代金属材料科学中的一门应用甚广的科学。

三、现状

现在，我们已经能够应用位错理论成功地、系统地解释金属晶体的屈服强度，密排金属晶体的加工硬化、脆性、断裂和蠕变等等强化理论中的诸方面问题。

人们从位错理论认识了材料强化的正确途径。通过位错对晶体结构的影响，及其在晶体变形中的行为认识到，一方面位错的存在限制了原子间结合力的发挥，使金属晶体的实际强度，从其应该达到的理论强度水平上下降了几个数量级。从这个意义上讲，提高材料强度的最根本途径应该是消灭晶

体中的位错。在这个设想下所产生的金属胡须，其强度接近了理论强度，应该是一个有力的验证。但是，作为大量应用材料的制作，目前尚缺乏现实性。另一方面，晶体中大量的、纵横交错的位错本身又阻碍着位错的运动，使其难以运动，从而提高了材料的强度。现实应用材料的生产加工中，都是通过这个途径，达到材料强化的目的的，在这个方向上，位错理论则已经起到了很好的指导作用。

从阻止位错的运动出发，至今人们已经创造出千百种强化的技术手段，但都不外利用了如下几个阻止位错运动的强化机制：

其一是加工硬化机制。使晶体材料在加工变形中产生新的位错，使多的位错形成纵横交错的障碍，互为运动的障碍。在生产加工中，变形加工与退火就是一对可控制的矛盾过程。

二是合金的固溶强化机制。合金固溶体中的溶质与位错的交互作用将对位错有钉扎作用，阻碍位错运动（包括滑移和交滑移），从而提高材料强度。在这方面，科垂尔、史诺克、铃木等不同作用的溶质气团机制，已经得到了很好的验证与应用，成为位错理论应用于材料强化中最为活跃、成果最为突出的一个分支。在探讨溶质原子钉扎与脱钉的机理和规律上，研究工作还大有用武之地。

三是合金弥散第二相强化机制。过饱和固溶体的时效与脱溶所析出的沉淀弥散相或半析出型的过渡相，都会成为位错运动的障碍而使材料强化。因此生产上常通过合金化或新的热处理工艺来控制过饱和固溶体析出过程与组织，以达到强化的目的。