

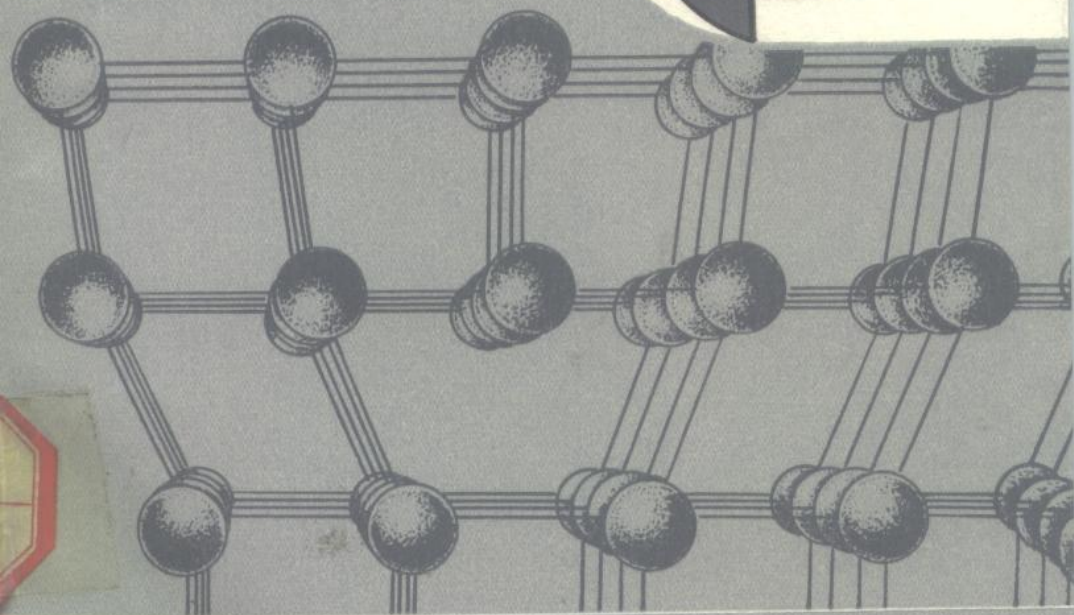
高等工业学校教材

位错理论

及其在金属切削中的应用

范继美
万光珉

编著



上海交通大学出版社

位错理论及其在金属切削中的应用

范继美 万光珉 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

全书共九章，前五章系统介绍位错的基础理论，从金属的晶体结构出发，引入位错概念，首先阐述位错的基本结构和基本性质，如位错的几何性质和弹性性质，然后系统地讨论晶体特别是金属的塑性变形、硬化和断裂等物理现象以及和它们相关的力学性质；后四章将位错理论应用于金属切削过程，建立了切削过程的位错模型，论述了切削过程中金属塑性变形、加工硬化和断裂的位错机理，从而在原子级水平上揭示金属切削过程的物理本质，提出改善难加工材料的加工和切削过程的优化，以提高切削加工质量和生产率的途径。

本书可作为有关专业本科生和研究生的教材，亦可供材料科学和制造科学等学科的教师、研究人员和工程技术人员参考。

位错理论及其在金属切削中的应用

出 版：上海交通大学出版社

（淮海中路1984弄19号）

发 行：新华书店上海发行所

印 刷：江苏太仓印刷厂

开 本：850×1168（毫米）1/32

印 张：10.5

字 数：277,000

版 次：1991年5月 第1版

印 次：1991年7月 第1次

印 数：1—2,000

ISBN7-313-00890-2/TG·5

定 价：3.30元

序

1982年我接受原第一机械工业部机制专业教材编审委员会的任务，编写《金属切削原理及刀具设计》全国统一教材第三章“金属切削过程”，有许多同志提出意见，希望增加有关位错理论在金属切削中的应用的內容。同志们的意见我能理解，因为这体现了金属切削研究向微观领域发展的新途径，很有启发性。可是在教材中写起来很困难，不但因为教学时数太少，而且由于位错理论应用到金属切削的研究还刚开始，国外这方面资料也不多，因此，我未能满足同志们的愿望。

也许对这一专题写一本书，多用些篇幅倒可以讲清楚些，但是这本书也是颇难写的，因为搞金属切削的人大都对金属物理没有深入的研究，同样，金属物理界人士对金属切削也不熟悉，所以好几年过去了，此种专著仍未问世。昆明工学院机械系万光珉副教授和云南师范大学物理系范继美副教授有鉴于此，担当起这一任务，埋头工作多年，写出了《位错理论及其在金属切削中的应用》一书，将由上海交通大学出版社出版，这是我国金切界的一个喜讯。这不仅对机械系机制专业的广大师生（包括研究生）是拓宽知识面的一本专业参考书，同时也将为我国金属切削研究开辟一个新的领域，我想广大从事金属物理科学、材料科学和金属切削科学的同志们都有先睹为快的迫切心情，愿本书早日出版。

本书作者万光珉副教授对金属切削学有较深的造诣，他擅长用有限元法进行金属切削原理和刀具的研究；范继美副教授对金属物理和理论物理有多年的教学和科研经验，对位错理论作过较系统的研究，他们合写的这本书是一本很好的专著。书中从金属的晶体缺陷讲起，联系塑性变形与位错，介绍了位错的基础理论，阐明金属硬化和断裂的位错机理，使读者对位错理论有了较好的理解之后，将其应用于切削过程的各个方面，用位错理论来解释切削过程的塑性变形、硬化和断裂，并将位错理论和生产实践结合起来，提出解

决难加工材料的切削和切削过程优化等问题的途径，这个思路是正确的。

我衷心地祝贺他们二位在我国金属切削和位错理论结合的新园地上，开出了第一朵美丽的鲜花。

中国高校金属切削研究会名誉理事长 **刘培德**
大连理工大学机械工程系 教 授

1989 年 1 月于大连凌水河

前 言

人类文明是随着生产工具的发展而发展的，金属切削加工的历史是非常悠久的，根据历史记载，1668 年我国已使用了马拉铣床和砂轮机；1775 年英国制成了加工蒸汽机汽缸的镗床；1818 年美国发明了铣床；1865 年以后各种车床、镗床、冲床、螺纹机床和齿轮机床应运而生，近一百多年来，切削加工发展迅速。

作为切削加工理论的研究，1851 年法国柯克优哈特 (Cocoquilhat) 研究了钻削石头、钢和铁时所需的功率；1864 年法国乔塞尔 (Joessel) 研究了刀具几何参数对切削力的影响，1875 年前后俄国基麦 (Тима, И. А) 研究了切屑形成，切屑的种类和切屑的收缩；1905 年前后美国泰勒 (Taylor, F. W) 研究了刀具耐用度与切削速度的关系。这些是切削理论方面早期的主要研究成果。近几十年来，金属切削的实践和理论又有了较大发展，各国学者在刀具材料、加工方法、刀具结构、加工表面质量、切削机理等许多方面取得了众多的研究成果。但是在切削的根本问题——切削机理方面尚未更深入更准确地揭示金属切削过程的物理本质，并未从微观上阐明被加工材料塑性变形、硬化和破坏的物理本质。

1934 年法国的蒲南毅 (Polanyi, M)，匈牙利的奥罗万 (Orowan, E) 和英国的泰勒 (Taylor, G. I) 各自发表论文设想一种特殊形式的晶体缺陷，称为位错，并将位错这一概念引入晶体塑性变形机理，半个世纪以来，伯格 (Burgers, T. M)、弗兰克 (Frank, F. C)、柯垂尔 (Cottrell, A. H) 以及我国葛庭燧、钱临照、陈能宽、冯端等科学家的卓越工作，建立了位错的理论模型，圆满地解决了晶体的理论切变强度和实测的临界切应力之间的严重差异问题。本世纪 50 年代以来由于电子显微镜等先进测试手段的应用，使位错理论建立在可靠的实验基础之上，得以不断发展，逐步完善，并开始应用到各种领域。

研究表明：位错作为一种特殊的晶体缺陷，存在于实际金属晶体之中，位错在金属晶体中的存在和运动，不仅影响金属的力学特性（特别是强度），而且影响金属的电学、磁学、光学、热学和化学特性，因此对金属的强度、塑性变形、硬化和断裂起着决定性的影响。

近年来，位错理论已用于发展现代科学技术要求的新型材料，还用于金属加工包括铸锻加工和切削加工机理的研究以及工艺问题的解决。用位错理论来研究材料在切削过程中的塑性变形、硬化和断裂，就可以在原子级的水平上揭示金属切削过程的物理本质，建立更准确更符合实际情况的切削过程的物理模型；优化切削过程以及提高加工效率和加工质量。

本书共九章，第一章至第五章系统的介绍位错的基础理论，由范继美执笔；第六章至第九章讨论位错理论在金属切削中的应用，由万光珉执笔。书中以难加工材料的切削为例加以探讨。由于位错理论是一种新的正在发展的理论，又才开始应用于金属切削，这方面的资料匮乏，编者撰写此书旨在将位错理论及其应用介绍给从事金属物理科学、材料科学以及金属切削科学的同志们，以期引起大家的兴趣和重视，为金属切削理论和应用的研究提出一条新的途径。由于编者水平所限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者不吝指正。

本书曾作为讲义在研究生中试用，在本书出版的时候，编者怀着崇敬的心情感谢业师刘培德教授，他建议并多次鼓励编者完成此书，现又为之作序；编者还要衷心感谢支持本书编写和出版的各位同志。

万光珉
范继美

1988 年 12 月于昆明虹山

目 录

第一章 金属的晶体结构

§ 1-1 点阵 晶胞 晶系	1
一、点阵	3
二、晶胞	4
三、晶系	5
四、晶体结构与空间点阵	10
§ 1-2 晶向指数和晶面指数	11
一、晶向与晶面	11
二、晶面指数与晶面间距	11
三、晶向指数	16
四、六方晶体的晶面指数与晶向指数	18
§ 1-3 晶体对称性	19
一、对称要素	19
二、点群和空间群	20
§ 1-4 金属的晶体结构	22
一、典型的金属晶体结构	22
二、晶体中原子的堆垛方式	28
§ 1-5 合金相结构	40
一、固溶体	40
二、中间相	44

第二章 晶体的塑性变形与位错

§ 2-1 晶体中的缺陷	48
一、点缺陷	48
二、线缺陷	52

三、面缺陷	52
§ 2-2 晶体的弹性和塑性	53
一、金属晶体的应力-应变曲线	53
二、晶体中原子间的相互作用	56
三、金属晶体的切变	59
§ 2-3 单晶体的塑性变形	60
一、滑移带和滑移系	61
二、塑性变形的切变过程	63
三、滑移的临界分切应力	66
四、晶体的理论剪切强度	68
§ 2-4 滑移和位错	72
一、位错概念的提出	72
二、位错运动引起晶体的滑移	73
三、位错理论的形成和发展	76
第三章 位错的基本性质	
§ 3-1 位错的结构和几何性质	79
一、位错环和 Burgers 矢量	79
二、刃型位错	81
三、螺型位错	86
四、Burgers 回路	90
五、混合型位错	93
六、位错密度与晶体的切变速率	95
§ 3-2 位错的交截与割阶	97
一、位错交截时所产生的割阶	97
二、位错割阶的运动	100
§ 3-3 位错和晶体生长	102
一、晶体从蒸汽或溶液中生长	102
二、晶体从熔体中生长	106
§ 3-4 晶体中位错的观测	107

一、浸蚀法	108
二、缀饰法	110
三、电镜法	110
第四章 位错的弹性理论	
§ 4-1 应力和应变分量	113
§ 4-2 螺型位错的应力场和应变能	115
一、螺型位错的应力场	116
二、螺型位错的应变能	118
§ 4-3 刃型位错的应力场和应变能	119
一、刃型位错的应力场	119
二、刃型位错的应变能	121
三、小角晶界能	121
§ 4-4 位错滑移的动力和阻力	122
一、应力场对位错的作用力	122
二、位错在点阵中滑移的临界切应力——Peierls 力 ...	124
§ 4-5 位错的线张力	128
§ 4-6 位错间的弹性相互作用	130
一、螺型位错的相互作用	131
二、刃型位错的相互作用	132
§ 4-7 位错动力学	135
一、位错运动速度	135
二、运动位错的应力场	136
三、运动位错的阻尼机制	141
四、位错线的振动——位错的弦线模型	143
§ 4-8 实际晶体结构中的位错	145
一、实际晶体结构中的单元位错	145
二、堆垛层错和不全位错	147
三、位错反应及扩展位错	149
§ 4-9 位错的萌生与增殖	151

一、位错的萌生	151
二、弗兰克(Frank)-瑞德(Read)源 ——位错增殖机制	153
第五章 金属硬化和断裂的位错机理	
§ 5-1 晶体中位错运动的障碍	159
一、滑移的障碍	160
二、位错塞积群	163
三、温度和应变速度对位错克服障碍的影响	167
§ 5-2 多晶体的塑性变形	167
一、多晶体塑性变形的特点	167
二、晶界的影响	169
三、屈服现象	171
§ 5-3 金属塑性变形后的组织与性能	174
一、塑性变形对金属组织的影响	174
二、塑性变形后金属性能的变化	176
三、形变织构	178
§ 5-4 加工硬化的位错机理	178
一、单晶体加工硬化的实验规律	179
二、加工硬化的位错理论	181
三、多晶体的加工硬化	186
§ 5-5 合金强化的位错机理	187
一、固溶体的塑性变形	187
二、多相合金的塑性变形	188
§ 5-6 金属的理论断裂强度与 Griffith 理论	190
一、断裂类型	190
二、金属的理论断裂强度与 Griffith 脆性断裂理论	192
§ 5-7 金属断裂的位错机理	197
一、裂纹形核和扩展的位错机理	198
二、裂纹的扩展速度	204

第六章 切削过程的位错分析

§ 6-1 切削过程优化和模型化的物理原则	206
一、切削过程的参变量	206
二、切削过程优化和模型化的物理原则	206
§ 6-2 切削区域中的位错结构	209
一、切削区域中位错结构的实验研究方法	209
二、切削区域的塑性变形	214
三、切削区域中新位错的产生和分布	216
四、切削过程中位错分析的特点	217
§ 6-3 切削过程中位错结构的统计分析	219
一、滑移带分布的统计分析	219
二、切削区域位错结构的统计均匀性	223
§ 6-4 切削区域中的位错特征量	228
一、滑移带密度的变化	228
二、位错密度的变化	229
三、位错的产生强度	230
四、位错运动速度和滑移带传播速度	231
§ 6-5 切削区域中的硬化机理	232
一、切削区域中位错结构的演化	232
二、切削时零件表面层的硬化结构	234
§ 6-6 切削加工的硬化动力学	236
一、位错运动受到局部障碍时金属硬化的动力学	237
二、位错与局部障碍相互作用的概率模型	242
§ 6-7 切削过程的位错机理	245
一、已加工表面硬化深度的改变	247
二、切屑外表面的宏观轮廓	247
三、已加工表面的微观轮廓	248

第七章 切削过程中的位错-能量模型

§ 7-1 切削区域的应力-应变状态	249
--------------------------	-----

一、作用应力	249
二、切屑变形系数	249
三、相对变形	250
§ 7-2 切削过程的塑性变形能	251
一、变形潜能	251
二、位错运动能	252
§ 7-3 新表面的形成能	253
一、切削时的有效表面能	253
二、粗糙表面的真实面积	254
§ 7-4 切削耐热合金时塑性变形和破坏的能量模型	257
一、刀具和被加工金属的接触长度	259
二、切削塑性变形区域的应力	261
三、切削塑性变形区域的范围	264
四、位错密度	266
五、相对变形	269
六、切屑变形系数	271
七、变形潜能	271
八、位错运动能	272
九、破坏能	273
十、切削区域的能量平衡	274

第八章 改善难加工材料切削过程的途径

§ 8-1 难加工材料的切削特点	277
一、耐热钢和耐热合金的分类	277
二、难加工材料的切削加工特点	279
三、改善刀具材料的切削性能	280
§ 8-2 位错运动障碍的合理大小	282
§ 8-3 被切层外表面的状态对切削过程的影响	286
§ 8-4 塑性变形过程中表面层溶解时金属的软化	289
§ 8-5 切下层外表面的溶解对切削过程的影响	292

§ 8-6	超声波切削	294
§ 8-7	改善切削过程的位错-能量原理	298
第九章 用能量指标优化切削过程		
§ 9-1	优化切削过程的能量指标	300
§ 9-2	Monte Carlo 法优化切削工艺参数的程序	305
§ 9-3	优化计算方法的工艺可能性	310
一、	根据给定的刀具耐用度来制订工艺规程	310
二、	根据走刀次数分配加工余量	310
三、	计算在车刀耐用度周期内被加工零件的合理数量(或 走刀次数)	311
四、	机床的选择	311
§ 9-4	非稳定工艺条件下切削过程的优化	312
参考文献		316
附录		318

第一章 金属的晶体结构

科学技术和工业生产的发展要求更有效的使用金属材料，这就必需了解影响金属材料性能的各种因素，掌握提高金属材料性能的途径。长期的实践和研究表明：决定金属及合金性能的基本因素是它们内部的微观构造。所以我们应该从金属及合金内部微观结构和组织状态的探索来寻找改善和发展金属材料的途径。

金属及合金在固态时通常都是晶体，它们的许多特性都与其结晶状态有关。要了解金属材料内部的微观构造，就必须首先掌握其晶体结构情况，包括晶体中原子的相互作用和结合方式、原子的聚集状态和分布规律、各种晶体的特点和彼此之间的差异等等。因此，研究固态物质的微观构造和它的各种物理性质的相互关系及其变化规律，利用组成固体的大量微观粒子运动的集体行为来探索固态物质的各种宏观特性，对于发展现代各种新型固体材料，特别是金属材料具有极大的促进和指导作用。

§ 1-1 点阵 晶胞 晶系

自然界的物质总是以气态、液态、固态的形式存在，而物质的三种形态的主要区别在于分子间的距离、分子间的相互作用力以及分子热运动方式的不同。而且物质呈什么形态还与外界条件密切相关，因此在适当的条件下，这三种形态可以互相转化，例如大多数气体和液体，在足够低的温度下通常都可以凝聚成固体。

物质能形成固态主要是依靠化学键把大量原子或分子紧密结合在一起，而固态物质按其原子聚集的状态又可分为晶态固体和非晶

态固体。晶态固体从宏观上来看，其外形都具有规则的几何形状。从最简单的立方体到非常复杂的多面体，不论晶体的外形怎样，它在各个方向上的物理性质（导热性、导电性、热膨胀性、弹性、强度以及外表面的化学性质等）是不同的，称为各向异性。这些宏观特征是其内部微观粒子规则排列的反应。从微观结构来看，晶体具有长程有序性，也就是说在一定方向的直线上，粒子均作有规则的长程周期性排列。

非晶态固体（如：玻璃、塑料、橡胶等）又叫过冷状态的液体，只是其物理性质不同于通常的液体而已。从液态到非晶态固体的转变是逐渐过渡的，没有明显的凝固点和明显的熔点，而从液态转变到晶态固体则是突变的，有一定的凝固点和熔点。从微观结构看，非晶体中粒子的分布只具有短程有序性，即只有邻近的一些粒子才形成有规则的结构，不存在长程的周期性排列。非晶态固体的另一特点是其物理性质各向同性。

非晶体在一定条件下可转化为晶体，例如玻璃经高温长时间加热可能形成玻璃晶体。而通常的晶体如将它从液态快速冷却时，也可得到非晶体。金属因其晶体结构比较简单，很难阻止其结晶过程，故一般情况下得不到非晶态固体金属。

由一个核心（称为晶核）生长而成的晶体称为单晶体，在单晶体中原子都是按同一取向排列的，天然单晶体有金刚石、水晶等，人工培育的单晶体有单晶硅、锗、红宝石以及金属和合金单晶等。但金属材料通常是由许多不同取向的小单晶体组成为多晶体，这些小晶体往往是颗粒状，不具有规则外形，称为晶粒。多晶体材料一般不显示出各向异性，这是因为它包含大量的彼此取向不同的晶粒，虽然每个晶粒有异向性，但整块金属的性能则是它们性能的平均值，故表现为假等向性。在某些条件下，如定向凝固、稳定的轧制退火等可使晶粒的取向趋于一致，则其异向性又会显示出来。

现代的切削加工材料有晶态固体，也有非晶态固体。但主要是金属材料，故本书主要以晶态固体中的金属及其合金为研究对象。

一、点阵

1912年劳厄 (Laue, M.V) 发现: 晶体可以作为 X 射线的衍射光栅, 这就是说晶体的内部结构可以看成是由相同的结构单元 (称基元) 在空间作周期性的重复排列而成的。而且应用 X 射线衍射、电子衍射等实验方法不仅可以证实晶体中原子 (或分子) 在三维空间作有规则的周期性重复排列; 还能确定各种晶体中原子排列的具体方式即晶体结构的类型、原子间距以及有关晶体的其它许多重要参数。为了便于分析研究晶体中原子或分子的排列情况, 可以把基元抽象为规则排列于空间的无数个几何点, 或者说作为几何的抽象可把一个理想晶体看作是一系列周期重复的点的无限分布。这些点可以是原子或分子的中心, 也可以是彼此等同的原子群或分子群的中心, 但各个点的周围环境都必须相同, 这些点的空间排列称为空间点阵, 这些点称为结点。

在简单晶体中, 如铜、银、金以及碱金属, 它们的基元只包含一个原子, 而一般晶体的基元可能包含多个原子, 它们的重心位于结点上, 例如蛋白质晶体的基元包含 10^4 个原子。在表达空间点阵的几何形象时, 为了观察方便起见, 可作许多平行的直线把结点连接起来构成三维几何格架,

称为晶格, 如图 1-1 所示。显然, 在某一空间点阵中各结点在空间的位置是一定的, 而通过点阵所作的空间格架则因直线的取向不同可有多种形式, 可见结点是构成空间点阵的基本要素。

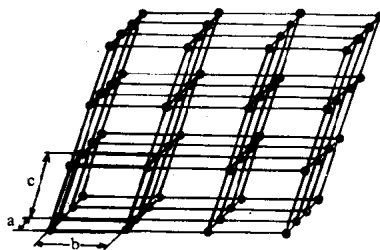


图 1-1 空间点阵

如果一个空间分布的无限点阵, 不论从哪一点看它, 都具有完全相同的一种排列和取向, 则这个点阵称为布拉菲 (Bravais) 点阵 (格子), 其特点是各结点周围的情况都相同。如果是同种原子组成的晶体, 则这些原子组成