



“十三五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

金属热塑性成形 基础理论与工艺

Basic Theories and Processes of
Metal Thermoplastic Forming

● 张 鹏 主编

● 张存生 秦鹤勇 副主编

哈尔滨工业大学出版社



“十三五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列

金属热塑性成形 基础理论与工艺

Basic Theories and Processes of
Metal Thermoplastic Forming

● 张 鹏 主编

● 张存生 秦鹤勇 副主编

常州大学图书馆
藏书章

哈尔滨工业大学出版社

内容简介

本书系统地介绍了金属热塑性成形基础理论与工艺的有关内容,包括金属热塑性变形物理基础、金属热塑性变形行为、金属本构关系理论、热加工图理论及应用、热成形极限图理论及应用、热塑性成形工艺方法和热塑性成形工艺规范。书中注重阐明基本理论及其应用,在内容上尽量照顾到各层次读者需要,便于掌握热塑性成形基础理论要领与工艺应用。

本书可作为高等学校材料成型及控制工程专业本科生或材料加工工程研究生教材或教学参考书,也可供从事材料塑性加工研究或生产的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属热塑性成形基础理论与工艺/张鹏主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2017.8

ISBN 978-7-5603-6644-9

I. ①金… II. ①张… III. ①金属材料—热塑性—成型—工艺—研究 IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 111925 号



责任编辑 何波玲

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江艺德印刷有限责任公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 18.5 字数 425 千字

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-6644-9

定 价 44.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

金属热塑性成形基础理论与工艺是材料成型及控制工程专业本科生和材料加工工程专业研究生需要掌握的重要内容。本书注意理论联系实际,以提高学生运用基本理论知识分析和解决实际问题的能力,在编写时遵循循序渐进的原则,注重概念、突出重点、强化应用,内容处理力求清晰阐述金属热塑性成形基础理论及工艺应用。

全书共分8章。第1章绪论,简要介绍金属热塑性概念、工艺分类及发展概况;第2章金属热塑性变形物理基础,介绍金属热塑性变形最基本的机制(滑移变形、孪生变形、晶界滑移变形和扩散蠕变等),重点阐述与热塑性变形机制有关的最基本概念和规律;第3章金属热塑性变形行为,重点介绍金属热塑性变形过程中的材料微观组织与性能之间的变化规律;第4章金属本构关系理论,主要介绍几种典型的本构关系理论;第5章热加工图理论及应用,介绍热加工图基本理论、构建及分析应用等;第6章热成形极限图理论及应用,介绍热成形极限图基本理论、构建及分析应用;第7章热塑性成形工艺方法,介绍常见的热加工工艺的基本特点及应用等;第8章热塑性成形工艺规范,介绍金属的加热及热加工工艺操作规范。

本书由哈尔滨工业大学(威海)材料科学与工程学院张鹏任主编,山东大学材料科学与工程学院张存生、钢铁研究总院秦鹤勇任副主编,哈尔滨工业大学(威海)材料科学与工程学院材料工程系王传杰、陈刚、刘洪伟以及材料科学系陈刚参与编写。本书在编写过程中,参引了本领域著名专家学者的著作及研究资料,在此表示衷心感谢!

由于编者水平所限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2017年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 金属热态成形技术的作用与地位	1
1.2 金属热态成形技术的发展趋势和方向	2
1.3 本书基本内容	2
第 2 章 金属热塑性变形物理基础	4
2.1 位错理论基础	4
2.2 热塑性变形机制	18
2.3 热塑性变形机制图及其应用	32
第 3 章 材料热塑性变形行为	43
3.1 热塑性变形时材料的软化过程	43
3.2 热塑性变形对材料组织的影响	67
3.3 热塑性变形对材料性能的影响	73
第 4 章 金属本构关系理论	77
4.1 Rice—Hill 本构关系理论	77
4.2 Simo—Ortiz 本构关系理论	101
4.3 应变梯度本构关系理论	109
4.4 晶体塑性本构关系理论	131
第 5 章 热加工图理论及应用	138
5.1 热加工图基础理论	138
5.2 热加工图的构建	144
5.3 热加工图的应用	156
第 6 章 热成形极限图理论及应用	158
6.1 板料成形极限	158
6.2 分散和局部性失稳准则及成形极限图预测	164
6.3 正交异性板的塑性拉伸失稳特征及成形极限图右部预测	174
第 7 章 热塑性成形工艺方法	186
7.1 热塑性体积成形工艺方法	186

7.2	热塑性板材冲压成形工艺方法	190
7.3	特种热塑性成形工艺方法	192
第 8 章	热塑性成形工艺规范	214
8.1	金属的加热	214
8.2	自由锻造工序的操作要点和规则	236
8.3	常用材料的锻造要点	252
8.4	模锻工序	262
8.5	其他锻造工序	273
参考文献		288

第1章 绪 论

1.1 金属热态成形技术的作用与地位

钛合金、高温合金、高强钢等特种材料因其强度高、耐蚀性好、耐热性高、比强度高特点被广泛应用于航天发动机、大型涡轮机、车体骨架、承压容器等关键结构。然而特种材料在表现出优异的使用性能的同时也给加工制造增加了难度。该类材料在 600 ℃ 以上仍具有很高强度,所以其塑性加工需要在高温下进行。随着航空、航天、舰船、汽车、核电、化工等行业的高速发展,特种材料的需求量不断增加,对相应加工工艺的要求也趋于严格。以钛合金为例,为了进一步提高航天飞行器的性能、强度、结构刚性、轻量化等性能,钛合金精密成形技术正成为航空航天制造技术的研究重点。跨尺度、薄壁曲面、变厚度和一体成形等正在成为特种合金热塑性加工工艺设计的准则。

金属热态成形的实质是金属在成形过程中有一段时间处于较高温度状态。常温下金属材料的变形能力有限,如果将其加热到一定温度,其塑性变形能力将大幅提高。金属热态成形具有以下特点:

(1)生产效率较高。金属热态成形技术具有较高的生产率,这在金属锻造、轧制、挤压等工艺中表现尤为明显。随着生产机械化的推广,机械零件的生产效率也会进一步提升。

(2)产品精度较高。热态成形工艺得到的工件可以达到较高的精度。近年来,通过使用先进技术和设备,不少零件的生产已经实现成形后较少切削或无切削的目标,实现了近净成形。例如,精密锻造伞齿轮的齿形部分已经达到无须切削直接使用的精度;精锻叶片的复杂曲面也已达到了成形后仅需磨削后处理的精度。

(3)原材料消耗少。金属热态成形主要是通过金属在塑性状态下的体积转移实现的。因为无须切除加工而实现了材料高利用率,同时因为形成合理分布的流线而提高制件的强度。

(4)能够有效改善金属组织性能。金属铸锭在热加工过程中须通过锻造、轧制或挤压等塑性变形,从而实现坯料结构致密并形成合理分布的流线组织,从而提高制件的强度。相对于原始铸造组织,制件组织性能得到明显提升。

因此,金属热态成形工艺不仅能获得强度高、性能好、精度高、形状复杂的工件,而且具有生产率高、材料消耗少等优点,因而在国民经济中得到广泛应用,并且在各类成形工艺中所占的地位得到逐渐提高。在热态塑性成形过程中,由于金属受到高温和变形力的共同作用,材料的微观组织会发生明显变化,例如动态、静态回复与再结晶及晶粒长大等,这些微观组织变化又会影响材料的宏观性能。因此,掌握金属热态成形技术的相关理论对于实际生产过程中的产品设计和工艺制定是十分必要的。

1.2 金属热态成形技术的发展趋势和方向

目前金属热态成形技术主要朝着轻量化、整体化、微型化、超大构件、柔性成形、自动化、超精密化等几个方面发展。

(1)轻量化成形是“精密成形”或“净成形”发展的新阶段,要求成形产品尽可能接近成品零件形状,切削余量小、成形精度高,直接通过热成形工艺形成轻量化特征结构。

(2)整体化成形是将若干原来分别加工再组装的构件成形为一个整体化结构,从而解决连接可靠性差的问题,同时也是实现装备轻量化的重要途径。由于构件尺寸的增加和模具型面复杂程度的提升,该技术的最大难点在于需要大吨位成形力。因此,省力成形技术的研究是该技术的关键方向。

(3)微成形是指加工的零件至少在两个维度上尺寸小于1 mm的成形技术。该技术主要用于大批量、低成本的制造微型零件。由于介观尺度下材料本征和非本征尺度效应耦合作用的影响,导致微成形工艺的成形规律不同于传统塑性成形,需要进一步研究工艺机理和关键技术。

(4)超大构件成形是通过先进技术利用相对小的设备或模具加工出尺寸较大的构件,从而解决构件尺寸或吨位超过现有制造设备能力的问题的成形技术。由于这类零件存在尺寸大或质量大、批量小、运输困难等问题,需要根据不同的结构特点选择不同的工艺方案。

(5)柔性成形技术适合于多品种、小批量零件的加工。多点成形技术、数控增量加载、无模成形是柔性成形的重要途径。目前柔性成形技术已在薄板成形的基础上,向中厚板和复杂型面成形方向发展。

(6)自动化技术不仅可以把工人从繁重的体力劳动和脑力劳动以及恶劣和危险工作环境中解放出来,而且通过编写相关程序进行程控加工有利于提高加工精度、工艺稳定性、生产效率等。

(7)超精密成形的加工精度可以比传统精密成形提高一个数量级以上。该技术对工件材质、加工设备、工具、测量和加工环境等条件都有特殊要求,需要综合应用精密机械、精密测量、精密伺服系统、计算机控制等先进技术。工件材质也必须较为细致均匀。合理控制和消除内部残余应力是保证高成形精度和尺寸稳定性的关键。避免残余变形对制件加工精度的影响是本技术的重要研究课题之一。

1.3 本书基本内容

本书共8章,书中系统阐述了材料热加工过程中金属塑性成形的基本原理及其应用。第1章绪论,介绍金属热成形工艺的应用特点及前景,同时介绍了本书的主要内容及章节结构等;第2章金属热塑性变形物理基础,介绍了金属热加工塑性变形机理及几类典型金属热塑性变形机制图的相关概念与理论;第3章材料热塑性变形行为,列举了热加工过程中材料的组织变化,即回复、再结晶、晶粒长大等行为,同时分析了热态塑性变形对材料组

织性能等影响;第4章金属本构关系理论,阐述了 Rice—Hill 本构关系、Simo—Ortiz 本构关系、应变梯度本构关系、晶体塑性本构关系等主要本构关系理论的建立过程和应用;第5章热加工图理论及应用,介绍了热加工图建立的相关基础理论及构建流程与应用范围,并以 GH4698 高温合金为例建立热加工失稳图且进行验证;第6章热成形极限图理论及应用,总结了成形极限图建立的基础理论及建立流程,介绍了成形极限图的应用及工艺指导意义;第7章热塑性成形工艺方法,介绍了热塑性体积成形和板材成形的主要工艺方法及成形机理,并列举介绍了目前主要的几种特种成形工艺机理及应用情况;第8章热塑性成形工艺规范,介绍了金属热塑性成形的工序及工艺要点,为读者进行金属热塑性成形工艺的制定提供了一定的经验及规范参考。本书可作为普通高等院校“材料成型与控制工程专业”塑性加工方向本科生的教材,同时也可作为材料加工塑性成形方向研究生的参考书,还可作为金属材料工程、热加工以及机械等工程专业师生和工程技术人员的参考用书。

金属热塑性成形是金属物理、材料化学、材料力学、弹塑性力学、材料热力学与动力学、机械、计算机等多学科的交叉,该方向主要研究金属材料在热力耦合作用下相应行为。掌握热塑性成形的相应理论将为热塑性成形工艺过程中坯料制备与处理、工艺设计与控制、成形机理分析等奠定基础。金属热塑性成形是一门既有相当理论深度又对实际生产有重要指导意义的课程。

学习本书的目的大致可归结如下:

- (1)了解金属热塑性变形的基本理论,为以后的理论分析奠定基础。
- (2)掌握金属材料热塑性变形规律,能够合理优化模具及工艺设计。
- (3)掌握热塑性成形方法及简单工艺流程,能够合理优化工艺结构。

(4)为材料综合工艺性的深入研究、分析材料成形过程中的组织演变及进行材料设计与工艺优化打下基础。

第 2 章 金属热塑性变形物理基础

早期大量的试验表明,实际测得的铜单晶体的屈服应力是 1 N/mm^2 ,银是 0.6 N/mm^2 ,锌是 1 N/mm^2 ,而根据理想晶体滑移面上的原子同时滑动的假设,计算出的铜的屈服极限是 $5\,200 \text{ N/mm}^2$,银是 $3\,300 \text{ N/mm}^2$,锌是 $3\,500 \text{ N/mm}^2$ 。理论屈服应力也比实际的屈服应力大几千倍。这说明滑移面上这种刚性整体的彼此滑动的假设与试验结果不相符,是错误的。在 1934 年,G. I. Taylor、E. Orowan 和 M. Polanyi 分别提出位错的运动引起滑移这个观念,这个理论已被试验所证明。位错理论说明了许多有关滑移塑性变形的机理,其发展很快,应用范围已远远超出滑移塑性变形的领域。

金属塑性变形最基本的机制包括滑移变形、孪生变形、晶界滑移变形和扩散蠕变等。变形机制的不同与变形材料及其变形条件(变形温度、应变速率等)有关。本章将重点阐述与热塑性变形机制有关的最基本概念和规律。

2.1 位错理论基础

2.1.1 位错的基本类型

位错,又称错排,即晶体内部原子局部不规则排列,是晶体原子排列的一种特殊组态。从位错的几何结构来看,可将它们分为两种基本类型,即刃型位错和螺型位错。已滑移区与未滑移区在滑移面上的交界线,称为位错线。

1. 刃型位错

刃型位错的晶体结构如图 2.1 所示。设该晶体结构为简单立方晶体,在其晶面 ABCD 上半部存在有多余的半原子面 EFGH,这个半原子面中断于 ABCD 面上的 EF 处,它好像一把刀刃插入晶体中,使 ABCD 面上下两部分晶体之间产生了原子错排,故称为刃型位错,多余半原子面与滑移面的交线 EF 就称为刃型位错线。

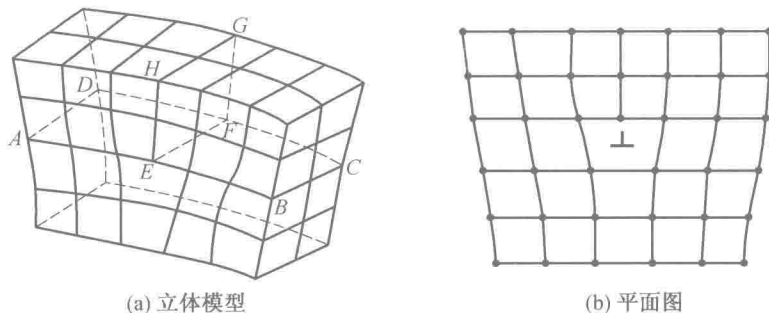


图 2.1 刃型位错的晶体结构

刃型位错的特征如下:

(1) 刃型位错有一个多余的半原子面。一般把多余的半原子面在滑移面上的边称为正刃型位错,记为“ $\perp$ ”;而把多余的半原子面在滑移面下边的称为负刃型位错,记为“ $\dashv$ ”。其实这种正、负之分只具相对意义,而无本质的区别。

(2) 刃型位错线可理解为晶体中已滑移区与未滑移区的边界线。它不一定是直线,可以是折线或曲线,但它必与滑移方向垂直,也垂直于滑移矢量。

(3) 滑移面必是同时包含有位错线和滑移矢量的平面,在其他面上不能滑移。由于刃型位错中,位错线与滑移矢量互相垂直,因此由它们所构成的平面只有一个。

(4) 晶体中存在刃型位错之后,位错周围的点阵发生弹性畸变,既有切应变又有正应变。就正刃型位错而言,滑移面上方点阵受到压应力,下方点阵受到拉应力;负刃型位错与此相反。

(5) 在位错线周围的过渡区每个原子具有较大的平均能量,但该区只有几个原子间距宽,所以它是线缺陷。

2. 螺型位错

螺型位错的晶体结构如图 2.2 所示。设立方晶体右侧受到切应力 τ 的作用,其右侧上下两部分晶体沿滑移面 $ABCD$ 发生了错动,如图 2.2(a) 所示,这时已滑移区和未滑移区的边界线 bb' 平行于滑移方向。图 2.2(b) 是 bb' 附近原子排列的俯视图,图中圆点“ $\bullet$ ”表示滑移面 $ABCD$ 下方的原子,圆圈“ $\circ$ ”表示滑移面 $ABCD$ 上方的原子。可以看出,在 aa' 右边的晶体上下层原子相对错动了一个原子间距,而在 bb' 和 aa' 之间出现一个约有几个原子间距宽的、上下层原子位置不吻合的过渡区,原子的正常排列遭到破坏。如果以 bb' 为轴线,从 a 开始,按顺时针方向依次连接此过渡区的各原子,则其走向与一个右螺旋线的前进方向一样,如图 2.2(c) 所示。这就是说,位错线附近的原子是按螺旋形排列的,所以把这种位错称为螺型位错。

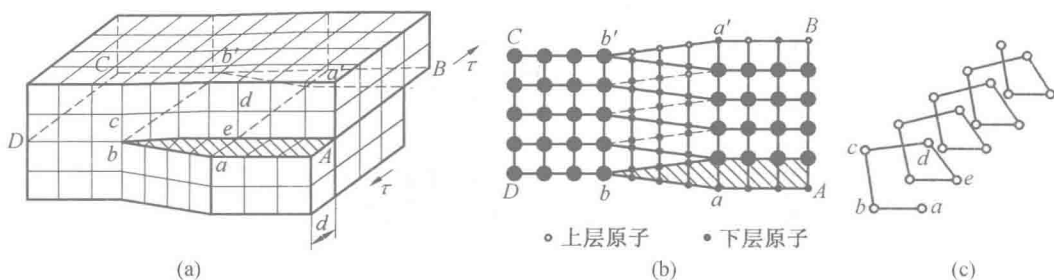


图 2.2 螺型位错的晶体结构

螺型位错的特征如下:

(1) 螺型位错无多余半原子面,原子错排是呈轴对称的。根据位错线附近呈螺旋形排列的原子旋转方向不同,螺型位错可分为右旋螺型位错和左旋螺型位错。

(2) 螺型位错线与滑移矢量平行,因此一定是直线。

(3) 纯螺型位错的滑移面不是唯一的。凡是包含螺型位错线的平面都可以作为它的滑移面。但实际上,滑移通常是在那些原子密排面上进行的。

(4) 螺型位错线周围的点阵也发生了弹性畸变,但是只存在平行于位错线方向的切应变,即不会引起体积膨胀和收缩,且在垂直于位错线的平面投影上,看不到原子的位移,看不到有缺陷。

(5) 螺型位错周围的点阵畸变随其与位错线距离的增加而急剧减少,是包含几个原子宽度的线缺陷。

3. 混合型位错

除了上面介绍的两种基本型位错外,还有一种形式更为普遍的位错,其滑移矢量与位错线相交成任意角度,这种位错称为混合型位错,如图 2.3 所示。混合型位错线是一条曲线,在 A 处位错线与滑移矢量平行,属于螺型位错;而在 C 处位错线与滑移矢量垂直,为刃型位错。A 与 C 之间,位错线既不垂直也不平行于滑移矢量,每一小段位错线都可分解为刃型和螺型两个部分。

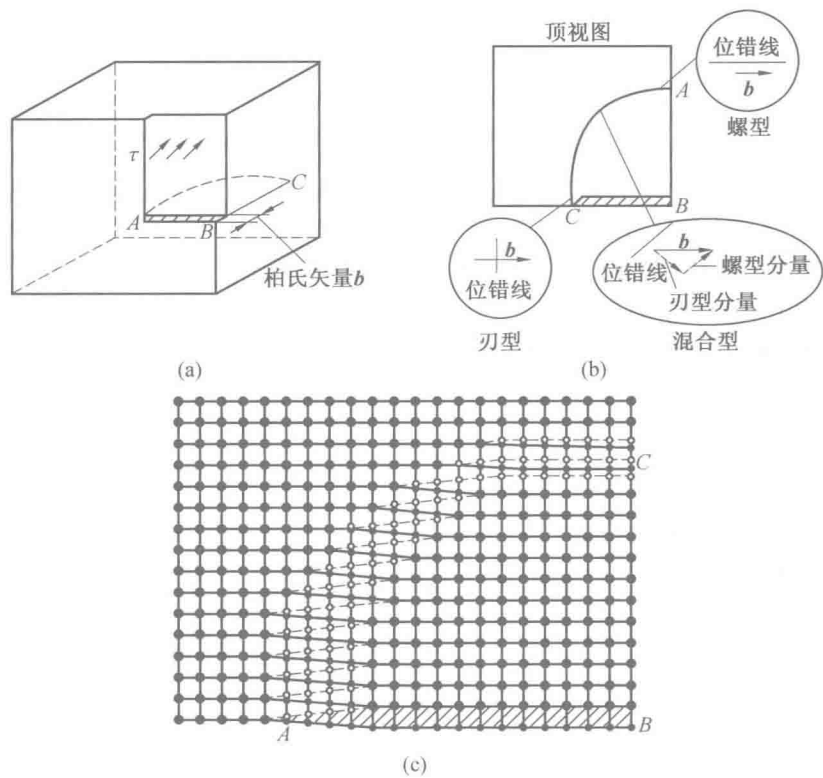


图 2.3 混合型位错

由于位错线是已滑移区与未滑移区的边界线,因此一根位错线不能终止于晶体内部,而只能露头于晶体表面或晶界。若其终止于晶体内部,则必与其他位错线相连接,或在晶体内部形成封闭线即位错环,如图 2.4 所示。图中的阴影区是滑移面上一个封闭的已滑移区即位错环,位错环各处的位错结构类型可按各处的位错线方向与滑移矢量的关系分析,如 A、B 两处是刃型位错,C、D 两处是螺型位错,其他各处均为混合型位错。

值得注意的是,位错环只存在纯刃型位错环,无纯螺型位错环,即刃型位错线可以是直线或曲线,而螺型位错线只能是直线。

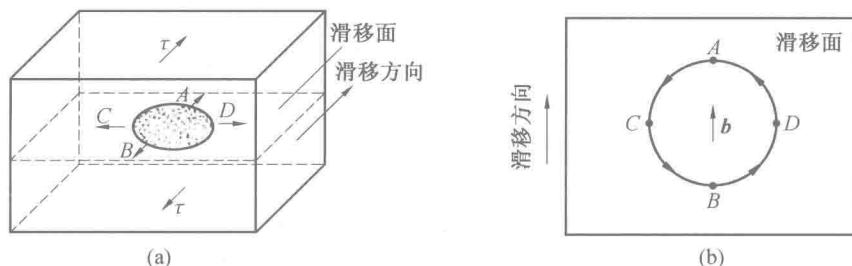


图 2.4 晶体中的位错环

2.1.2 位错的运动

一般退火晶体的位错密度达 10^6 cm^{-2} ，而经过大量的冷变形后，位错密度可达到 10^{12} cm^{-2} 。这说明晶体在塑性加工过程中会增殖位错，提高其密度。

在应力作用下，位错很容易产生运动。位错运动有两种基本形式，即沿平行于其柏氏矢量的滑移面上滑移运动和垂直于其柏氏矢量方向的攀移运动。滑移运动不需要原子的扩散，与物质迁移过程无关，故称为位错的保守运动，而攀移则需要原子或空位的扩散过程参加才能进行，所以攀移运动称为位错的非保守运动。

1. 位错运动的阻力

实际晶体中，位错的滑移要遇到许多阻力。当一个柏氏矢量的位错在晶体中移动时，将由一个对称位置移动到另一个对称位置。在这些位置，位错处在平衡状态，能量较低。而在对称位置之间，能量增高，造成位错移动的阻力。因此，在位错移动时，需要一个力克服晶格阻力，越过势垒，此力称为派—纳力(P-N力)。公式 2.1 为其计算公式，图 2.5 所示为计算公式参数示意图。

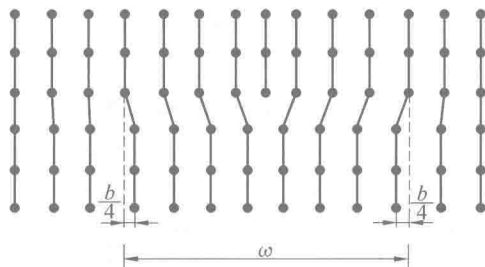


图 2.5 P-N 计算公式参数示意图

$$\tau_{P-N} \approx \frac{2G}{1-\nu} e^{-\frac{2\pi a}{(1-\nu)b}} \approx \frac{2G}{1-\nu} e^{-\frac{2\pi a}{b}} \left(\omega = \frac{a}{1-\nu} \right) \quad (2.1)$$

式中 b —— 柏氏矢量的模；
 G —— 剪切模量；
 ν —— 泊松比；
 a —— 滑移面间距。

由此可见 P-N 力的大小取决于位错的宽度，宽度越小，P-N 力越大；然而位错宽度主要取决于结合键的本质和晶体结构。同时，P-N 力计算公式也指出了实际的屈服强

度可远低于理论的屈服强度,解释了为什么金属中的滑移面和滑移方向是原子排列最密排的面和方向;位错在不同的晶面和晶向上运动,其位错宽度是不一样的,由公式看出,只有当 b 最小、 a 最大时,位错宽度才最大,因而 $P-N$ 力最小。这就是说,位错只有在原子排列最紧密的面及原子密排方向上运动,阻力才最小。

2. 刃型位错的滑移运动

如果在刃型位错的滑移面上施加一个垂直于位错线的切应力,这个位错线就很容易在滑移面上运动起来,当然这种运动只牵涉靠近位错心部不多的一些原子,而离位错心部较远的原子不受位错移动的影响,因此使位错移动的切应力是很小的。

图 2.6 所示为刃型位错滑移的示意图。在外加切应力 τ 的作用下位错中心附近的原子由“ $\bullet$ ”位置移动小于一个原子间距的距离到达“ $\circ$ ”的位置,使位错在滑移面上向左移动了一个原子间距。如果切应力继续作用,位错将继续向左逐步移动。当位错线沿滑移面滑移通过整个晶体时,就会在晶体表面沿柏氏矢量方向产生宽度为一个柏氏矢量大小的台阶,即造成了晶体的塑性变形,如图 2.6(b) 所示。从图中可知,随着位错的移动,位错线所扫过的区域 $ABCD$ 逐渐扩大,未滑移区逐渐缩小,两个区域始终以位错线为分界线。在滑移时,刃型位错的运动方向始终垂直于位错线而平行于柏氏矢量。刃型位错的滑移面是由位错线与柏氏矢量所构成的平面,且是唯一的。

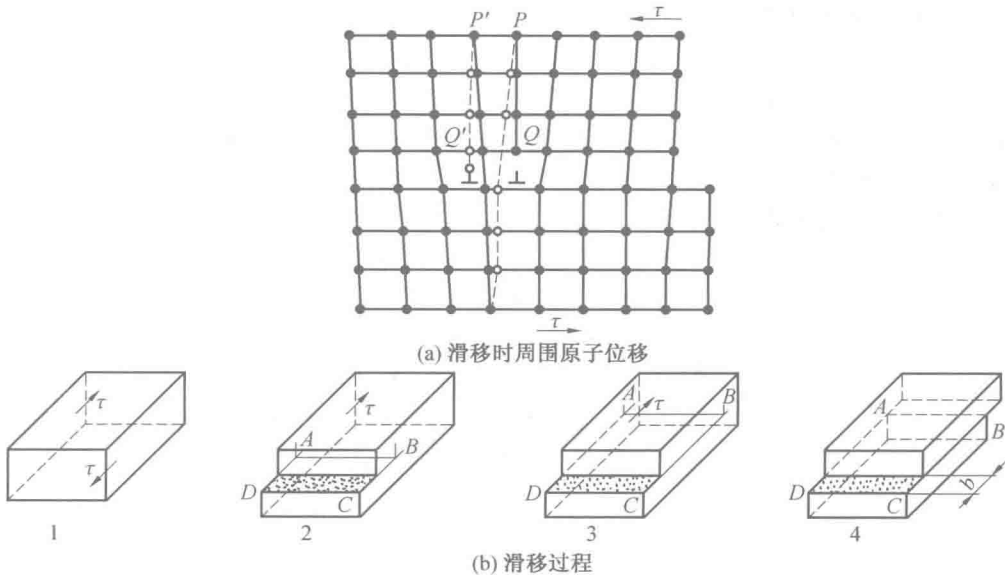


图 2.6 刃型位错滑移的示意图

在相同外加切应力的作用下,正、负刃型位错的运动方向相反,但产生的变形却完全相同。两排符号相反的刃型位错,在距离小于 1 nm 的两个滑移面上运动,相遇后对消而产生裂纹萌芽,如图 2.7 所示。

3. 刃型位错的攀移运动

攀移运动是位错线垂直于其柏氏矢量方向的运动。刃型位错的攀移过程是这样进行的:当半原子面下端的一个原子经扩散离开了该半原子面,或者说半原子面下端的一个原

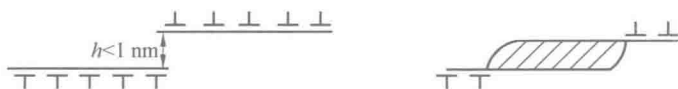


图 2.7 裂纹萌芽的产生

子被扩散来的空位代替,则位错线上就有长度为一个原子间距的线段上升一个原子间距,到了一个新的与原来滑移面平行的滑移面上去,如图 2.8 所示。这一过程继续下去,整条位错线就上升一个原子间距,由原来的滑移面上升到另一个与它平行的新滑移面上去。

同样,如果近邻点阵结点上的原子或间隙位置上的原子扩散到半原子面下端边沿上,并继续这一过程,位错就要向下移动到另一个新的与原来平行的滑移面上去。这个过程就称攀移或爬升。

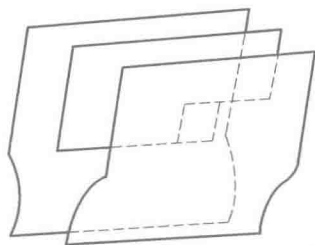


图 2.8 刃型位错的攀移过程

刃型位错的攀移过程需要原子扩散才能进行,显然比刃型位错的滑移过程要困难。攀移可以改变位错线所在的滑移面,这对塑性变形有很大影响,特别是在温度较高的时候。

位错在攀移过程中,已攀移部分和未攀移部分之间存在一段长度为一个原子间距的位错线,它仍与柏氏矢量垂直,仍为刃型位错,但不在原来的滑移面内,通常称为割阶。位错的堆移过程可看成是割阶的运动过程。

4. 螺型位错的交滑移运动

螺型位错和刃型位错的滑移,有其不同之处。刃型位错只能在其位错线和柏氏矢量所决定的唯一的(即原来所在的)滑移面上滑移,滑移过程中不能改变其所在滑移面。而螺型位错的位错线因为是平行于其柏氏矢量的,位错线和其柏氏矢量不能决定一个唯一的滑移面。对于螺型位错,由于所有包含位错线的晶面都可成为其滑移面,因此,当某一螺型位错在原滑移面上运动受阻时,有可能从原滑移面转移到与之相交的另一滑移面上去继续滑移,这一过程称为交滑移。

螺型位错的滑移也是很容易的。由图 2.9 可见,在柏氏矢量方向上的切应力 τ 作用下,位错线附近的原子在柏氏矢量方向上只要一个很小的移动(小于一个原子间距),螺型位错就可以在垂直于其柏氏矢量的方向上移动一个原子间距。外力如果停止作用(卸载),螺型位错就新的位置上停留下来,保持不动。如果外力继续作用,位错就一直移动到晶体表面为止。这时在晶体表面上,就留下了一个高度为一个原子间距的台阶。如果螺型位错线从晶体的一端扫过到另一端,则整个晶体在柏氏矢量方向上就产生了一个原子间距的位移,如图 2.10 所示。当大量的螺型位错线扫过晶体时,在垂直于其柏氏矢量的晶体表面(更一般地说,是在不平行于其柏氏矢量的晶体端表面)上,就可观察到滑移台阶很高的滑移线。

如果交滑移后的位错再转回与原滑移面平行的滑移面上继续运动,则称为双交滑移,如图 2.11 所示。

面心立方晶体中的交滑移是由不同的 $\{111\}$ 面沿同一 $\langle 110 \rangle$ 方向滑移,如图 2.12 所

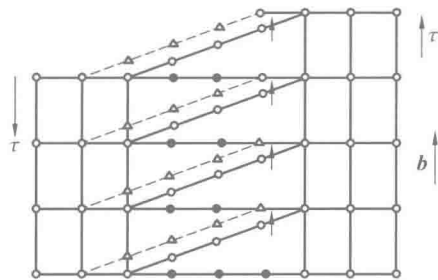


图 2.9 螺型位错的滑移

○—上层原子的位置；●—下层原子的位置；▲—上层原子移动后的位置

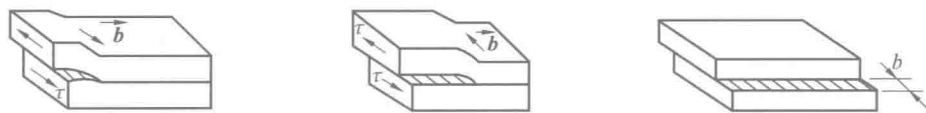


图 2.10 螺型位错的滑移过程

示, $[\bar{1}01]$ 是 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 和 (111) 两个密排面的共同方向。在 (111) 面上有一小位错环, $b = \frac{1}{2}[\bar{1}01]$, 在切应力作用下, 这个位错环不断扩大, 位错线的方向是 $WXYZ$, W 处为正刃型位错, Y 处为负刃型位错, X 处为左螺型位错, Z 处为右螺型位错。如果应力适宜, 当右螺型位错 Z 接近交线 $[\bar{1}01]$ 时, 可转移到 $(\bar{1}\bar{1}1)$ 面上进行滑移, A 、 B 、 C 位置为交滑移, D 位置位错又回到 (111) 面上滑移, 即为双交滑移。

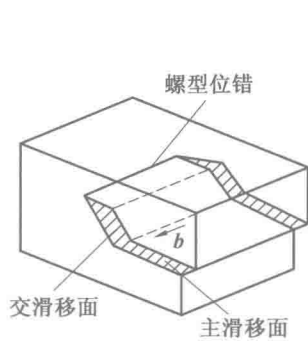


图 2.11 螺型位错的双交滑移

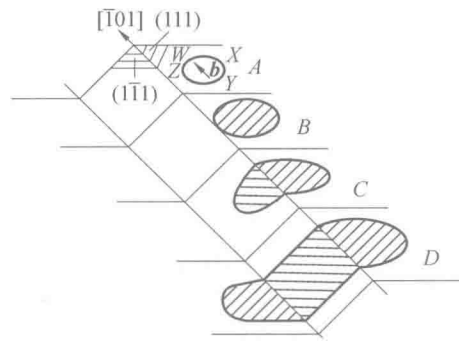


图 2.12 面心立方晶体中的双交滑移示意图

体心立方晶体中的螺型位错也有交滑移, 它是 $\{110\}$ 、 $\{112\}$ 和 $\{123\}$ 面同时沿 $\langle 111 \rangle$ 方向滑移, 如纯铁的 $(\bar{1}\bar{1}0)$ 、 $(11\bar{2})$ 和 $(2\bar{1}\bar{3})$ 面可同时沿 $[111]$ 方向滑移, 如图 2.13 所示, $ab \parallel a'b' \parallel a''b'' \parallel [111]$, ab 为 $(2\bar{1}\bar{3})$ 面上的 $[111]$ 方向, $a'b'$ 为 $(11\bar{2})$ 面上的 $[111]$ 方向, $a''b''$ 为 $(\bar{1}\bar{1}0)$ 面上的 $[111]$ 方向。因此晶体中的滑移线常呈波浪形。

5. 螺型位错及混合型位错的滑移运动

因螺型位错有无数多个滑移面, 所以它的位错线在晶体中可以平行于其柏氏矢量作任意移动。图 2.14 所示为螺型位错的滑移过程。图 2.14(a) 表示螺型位错运动时, 位错线周围原子的移动情况, 图中“○”表示滑移面以下的原子, “●”表示滑移面以上的原子。

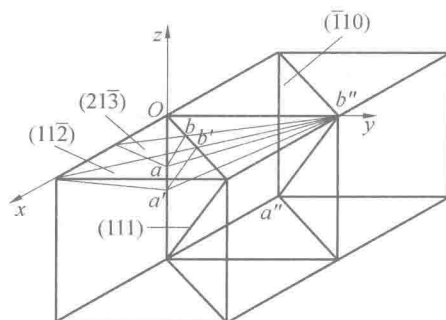


图 2.13 体心立方晶体中的交滑移

由图可知,同刃型位错一样,滑移时位错线附近原子的移动量很小,所以使螺型位错运动所需的力也很小。当位错线沿滑移面滑过整个晶体时,同样会在晶体表面沿柏氏矢量方向产生宽度为一个柏氏矢量的台阶,如图 2.14(b) 所示。在滑移时,螺型位错的移动方向与位错线垂直,也与柏氏矢量垂直,其滑移过程如图 2.14(c) 所示。

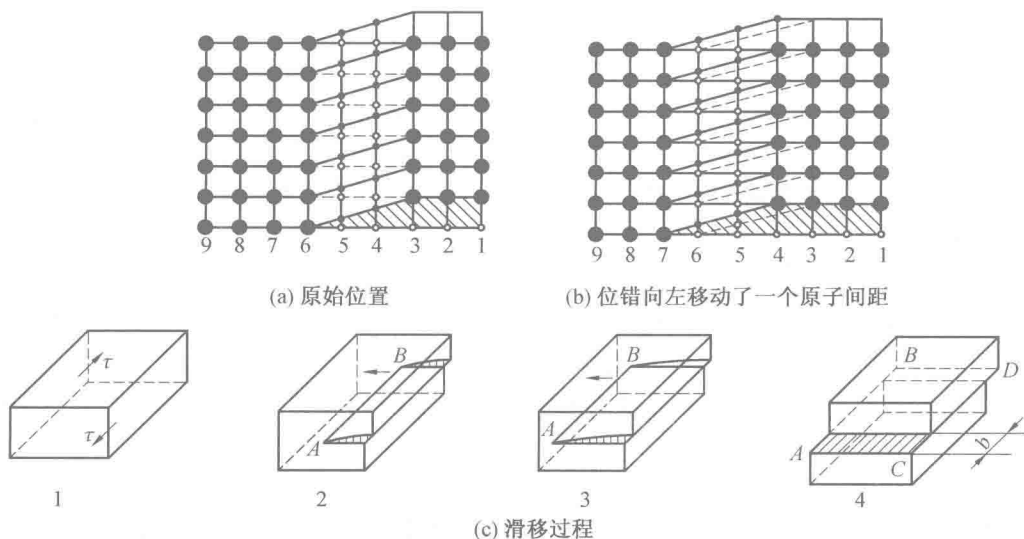


图 2.14 螺型位错的滑移过程

混合型位错的滑移过程如图 2.15 所示。根据确定位错线运动方向的右手法则,即以拇指代表沿着柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 移动的那部分晶体,食指代表位错线方向,则中指就表示位错线移动方向,该混合位错在外加切应力 τ 作用下,将沿其各点的法线方向在滑移面上向外扩展,最终使上、下两块晶体沿柏氏矢量方向移动一个 b 大小的距离。

通过上述分析可知,不同类型位错的滑移方向与外加切应力和柏氏矢量的方向不同,如图 2.16 所示。刃型位错的滑移方向与外加切应力 τ 及柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 一致,正、负刃型位错方向相反;螺型位错的滑移方向与外加切应力 τ 及柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 垂直,左、右螺型位错方向相反;混合型位错的滑移方向与外加切应力 τ 及柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 成一定角度,晶体的滑移方向与外加切应力 τ 及柏氏矢量 $\mathbf{b}$ 相一致。