



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

胡世光 陈鹤峥 李东升 王秀凤 编著

钣金冷压成形的工程解析 (第2版)



北京航空航天大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

钣金冷压成形的工程解析 (第2版)

胡世光 陈鹤峥 李东升 王秀凤 编著

北京航空航天大学出版社

内容简介

本书以数学塑性力学的工程应用为线索编撰而成,少量涉及金属物理及金相学方面内容。内容由以下三部分组成。第一部分:金属塑性变形的基本原理;第二部分:典型冷压工序分析;第三部分:钣金成形的基本变形方式、变形稳定性与成形性能。

本书可作为高等学校航空、宇航制造工程专业、金属塑性加工(钣金冲压)专业的教材,也可供其他有关专业学生与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钣金冷压成形的工程解析(第2版)/胡世光等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2009.3

ISBN 978-7-81124-545-5

I. 钣… II. 胡… III. 钣金—冷冲压—研究 IV. TG38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 025042 号

钣金冷压成形的工程解析(第2版)

胡世光 陈鹤峥 李东升 王秀凤 编著

责任编辑 蔡 喆 罗晓莉

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100191) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail: bhp@263.net

北京市媛明印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:17.75 字数:398 千字

2009 年 3 月第 2 版 2009 年 3 月第 1 次印刷 印数:3 001~6 000 册

ISBN 978-7-81124-545-5 定价:32.00 元

第1版 序

钣金冷压成形作为金属塑性加工的一个重要分支,在许多工业领域(特别是产品为薄壁结构的飞行器制造业)有着极为广泛的应用。因此,“冷压技术”成为1952年北京航空航天大学建校时最初建立的四个专业之一——“飞机工艺”专业的一门必修课,多年来一直作为教改的剖析重点。结合教学、科研和生产实践,反复推敲琢磨最终形成了《钣金冷压成形原理》教材,是本书——《钣金冷压成形的工程解析》的蓝本。其基本任务是:揭示钣金在不同变形条件和变形方式下的塑性变形性质,使读者深入理解钣金成形中出现的各种现象,正确拟定有关的工艺参数,以提高零件的成形极限与成形质量,寻求新的更为完善的工艺方法,由“认识世界”进而“改造世界”。

这种以钣金塑性成形作为研究对象的书籍国外并不多见,在国内同类书籍中,本书也是较为突出的。其特色在于:立足于集体深厚的教学科研与生产实践积累,凝结了许多教师的智慧与心血,充分表达了他们自身的体验;选材精细,避免庞杂;阐述塑性理论,由一般(材料)到特殊(钣金),尤其注重针对性(如板的各向异性);论述钣金成形,则先分解(典型工序分析)而后综合(板的基本变形方式,变形稳定性与成形性能),还介绍了学科前沿的动态(成形极限图的建立与应用);习题丰富,大多源于科研生产实践,避免浅显,以启迪读者深入思考。全书编撰始终考虑了人对间接知识的获取规律。

近年来,钣金成形虽有长足发展,但大多为计算机技术在钣金成形中的应用,至于基本原理则没有太大的变化。本书蓝本(国防工业出版社,1979年)1979年初版曾获国家教委首届高校优秀教材奖,1989年修订再版又获航空部优秀教材一等奖,受到广大读者的欢迎。本书对从事本门学科学习、研究的本科生及研究生,科研生产单位的技术人员来说,都不失为一本实用的参考书。目前,蓝本虽翻印多次但已告罄,多方求索而不可得。作者为使既有教学成果能物尽其用,使厚积薄发,在继承的基础上开发创新,这一治学理念彰明较著,乃不揣冒昧,对原书加以修改,推出《钣金冷压成形的工程解析》一书。谬误之处,欢迎读者不吝指正。

王秀凤博士建议并推动了本书的出版,校阅了全书,在此谨致谢意。



2008年10月

第2版 序

出土文物证明:金属钣金成形技术历史悠久。但它一直被人视为一种能工巧匠的手艺,谈不上是科学。1864年法国工程师兼力学家屈斯加(H. Tresca)在金属的挤压试验中观察到金属塑性流动的痕迹与最大剪应力的方向一致,提出了最大剪应力屈服理论。虽然这一学说的出现,可以看做是金属塑性变形理论的发轫,但直到20世纪40年代,第一批有关钣金成形分析的著述才见诸文献。经过几代工匠的艰辛琢磨和学者们的潜心研究,通过系统严谨的论述与丰富成功的实践,才使其跻身于科学的殿堂,实现了由手艺到科学的飞跃。

金属塑性加工(包括钣金成形)的研究是变形力学研究的扩展与延伸,在20世纪的后期得到了蓬勃发展。许多塑性加工领域的知名学者都是变形力学的专家,他们的研究成果集中反映在1983年问世的由E·翁克索夫(前苏联)、W·约翰逊(英)、工藤英明(日)等教授合作撰写的《金属塑性变形理论》一书中。哈尔滨工业大学王仲仁教授主持翻译了此书(中文版于1992年由机械工业出版社出版发行)。本人应邀翻译了E. A. 波波夫教授撰写的钣金冲压成形部分。鉴于该书的主要研究对象是块体成形,而钣金成形部分显得不够突出,乃萌生了以教材《钣金冷压成形原理》为蓝本,编写《钣金冷压成形的工程解析》的想法。该书在各方热心的赞助下,于2004年以专著的形式问世。北京航空航天大学飞行器制造工程专业,在讲授有关钣金成形课程时,仍以本书作为教材。2008年,本书有幸入选“普通高校‘十一五’国家级规划教材”,这是对《钣金冷压成形的工程解析》一书的肯定,也是对作者们的鼓励。近年来,钣金成形虽有很大的发展,但多属工艺与设备方面的创新与计算机技术在钣金成形中的开发应用,如充液成形、轴压胀形、柔性多点冲压与拉形、钣金成形的计算机数值模拟软件和人工智能技术的开发等,而钣金成形的基本原理则很少变化。作者经过调研,对本书进行了部分调整,由李东升教授(采用本书执教多年)、王秀凤副教授(执教“冷冲压模具设计与制造”课程多年)基于拾遗、侧重原理和跟踪学科发展的考量,根据新的教学、科研实践,增编了以下内容:剪切与冲裁、变压边力拉深、变薄拉深、成形极限曲线(FLC)的经验模型、简易成形极限应力曲线(FLSC, s. e)的建立以及钣金各向异性屈服准则的发展(附录)等。王秀凤副教授还协助本人对全书作了章节调整、修改和校订。李东升教授和王秀凤副教授的加盟将有助于本书今后的推陈出新。本书不仅可以作为有关专业本科生的教材,也可作为有关专业领域的工程技术人员入门读物。

在美国底特律从事钣金成形技术领域开发研究的资深学者刘军华博士,也很关心本书的出版,发表了许多颇有见解的看法,并提供了不少新鲜信息与资料,在此谨致谢意。

本书挂漏谬误之处,欢迎读者不吝指正。

于世光

2008年10月

目 录

第3章 材料成形工程材料

第一部分 金属塑性变形的基本原理

第1章 金属塑性变形的物理概念

§ 1.1 金属的结晶构造	1
§ 1.2 金属的变形	3
§ 1.3 影响金属塑性变形的因素	8

第2章 金属塑性变形的力学规律

§ 2.1 板条的单向拉伸试验	12
§ 2.2 变形物体的应力应变状态分析	21
§ 2.3 任意应力状态下的切应力和屈服准则	23
§ 2.4 流动规则——塑性应力应变关系	28
§ 2.5 塑性流动与屈服表面的相关性——法向性原则	30
§ 2.6 最小阻力定律	32
习 题	34

第3章 钣料的各向异性

§ 3.1 屈服条件和应力应变关系	38
§ 3.2 厚向异性板的屈服轨迹	41
§ 3.3 钣料一般性实际应力曲线的另一试验方法——液压胀形	42
习 题	46

第4章 钣料成形问题的求解方法

§ 4.1 主应力法(Slab method)	48
§ 4.2 塑性材料力学法(СМПП)	49
习 题	53



第二部分 典型冷压成形工序分析

第5章 剪切与冲裁

§ 5.1 普通冲裁的基本原理	55
§ 5.2 间隙——一个重要的冲裁工艺参数	58
§ 5.3 合理间隙的确定	60
§ 5.4 精密冲裁	61
习 题	62

第6章 弯 曲

§ 6.1 基本原理	63
§ 6.2 最小相对弯曲半径	75
§ 6.3 弯曲回弹	77
§ 6.4 拉 弯	83
习 题	86

第7章 拉 深

§ 7.1 基本原理	90
§ 7.2 起皱与防皱措施	99
§ 7.3 厚向异性对拉深过程受力的影响	102
§ 7.4 拉断与极限拉深系数	105
§ 7.5 多次拉深	108
§ 7.6 其他形状零件的拉深	112
§ 7.7 改进拉深过程的工艺措施	117
§ 7.8 变压边力拉深	126
§ 7.9 变薄拉深	128
习 题	134

第8章 局部成形和翻边

§ 8.1 局部成形	137
§ 8.2 翻 边	141
习 题	149



第 9 章 拉形和胀形

§ 9.1 拉 形	150
§ 9.2 胀 形	154
习 题	160

第 10 章 旋压、旋薄和冷挤压

§ 10.1 旋压与旋薄	162
§ 10.2 冷挤压	171
习 题	174

第三部分 钣料成型的基本变形方式、变形稳定性与成形性能

第 11 章 钣料成型的基本变形方式

§ 11.1 钣料成型过程中毛料区域的划分	175
§ 11.2 变形区应力应变状态的特点	176
§ 11.3 钣料成型的基本变形方式	178
习 题	180

第 12 章 钣料变形的受压失稳

§ 12.1 板条受压的塑性失稳、折减模数与切线模数	182
§ 12.2 筒形件拉深不用压边的界限	185
§ 12.3 筒形件用压边拉深时压边力的确定	189
习 题	193

第 13 章 钣料塑性变形的拉伸失稳

§ 13.1 板条的拉伸失稳	194
§ 13.2 钣料的拉伸失稳	196
§ 13.3 钣料拉伸变形的集中性失稳	203
习 题	208

第 14 章 钣料的成形性能

§ 14.1 鉴定钣料成形性能的基本试验	209
§ 14.2 鉴定钣料成形性能的模拟试验	228



§ 14.3 基本成形性与模拟成形性的相关性.....	232
习 题.....	233

第 15 章 网格技术和成形极限图

§ 15.1 概 述.....	235
§ 15.2 网格技术与成形极限图.....	236
§ 15.3 网格应变分析法和成形极限图的应用.....	246
§ 15.4 简易成形极限应力图 FLSD(s, e)的建立	251

附录一 钣料的各向异性屈服准则的发展

附录二 例 题

主要参考文献

1. 钣料冷压成形的工程解析(第2版). 机械工业出版社, 2010.
2. 钣料冷压成形的工程解析(第1版). 机械工业出版社, 2008.
3. 钣料冷压成形的工程解析(第3版). 机械工业出版社, 2012.
4. 钣料冷压成形的工程解析(第4版). 机械工业出版社, 2014.
5. 钣料冷压成形的工程解析(第5版). 机械工业出版社, 2016.
6. 钣料冷压成形的工程解析(第6版). 机械工业出版社, 2018.
7. 钣料冷压成形的工程解析(第7版). 机械工业出版社, 2020.
8. 钣料冷压成形的工程解析(第8版). 机械工业出版社, 2022.
9. 钣料冷压成形的工程解析(第9版). 机械工业出版社, 2024.
10. 钣料冷压成形的工程解析(第10版). 机械工业出版社, 2026.

第一部分

金属塑性变形的基本原理

第1章 金属塑性变形的物理概念

§ 1.1 金属的结晶构造

通过金相显微镜可以看到:通常一块光亮均匀的金属,实际上是由许许多多形状极不规则的小颗粒杂乱地嵌合而成。这种小颗粒,我们称之为晶粒或单晶体。显然,为了深入剖析金属的微观世界,还必须对每个单晶体的结晶构造加以研究。

X光研究表明:单晶体是金属原子按照一定的规律在空间排列而成的。每个原子都在晶体中占据一定的位置,排列成一条条的直线,形成一个个的平面,原子之间都保持着一定的距离。于是,可以利用如图 1.1 所示的空间格网来描述单晶体的结晶构造。在格网的每一个节点上,都排列着一个原子。这种格网称为单晶体的空间晶格。

单晶体的空间晶格,又可以看作是许多相同的晶格单元积累叠合而成,如图 1.1 中影线所示,其中 a, c 表示原子的间距。

一般金属的晶格单元,多为以下三种形式:

(1) 体心立方晶格,如图 1.2 所示。具有这种晶体的金属如 α -铁、铬等。

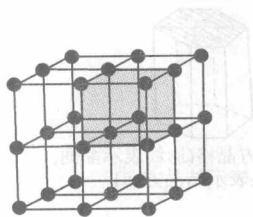


图 1.1

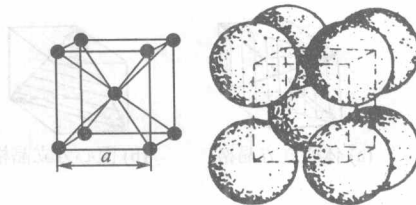


图 1.2

(2) 面心立方晶格,如图 1.3 所示。具有这种晶格的金属如 γ -铁、铜、铝、镍和铅等。

(3) 密排六方晶格,如图 1.4 所示。具有这种晶格的金属如镁、钛和锌等。

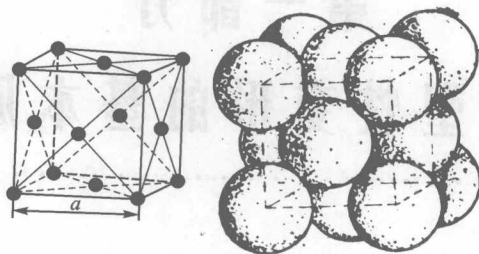


图 1.3

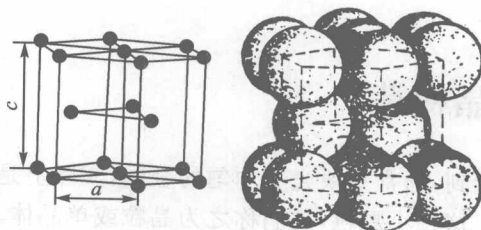


图 1.4

不同金属的原子之所以各自按照一定的规律在空间集结,是因为原子之间物理化学力的作用结果,取决于金属本身的性质。

从晶格单元的构成不难看出:单晶体中沿着不同的结晶面和结晶方向,原子分布的密度是不同的。各种类型的晶格,原子分布最密的结晶方向如图 1.5 所示。而互不平行的这种晶面在体心立方晶格中共有六个,面心立方晶格共有四个,密排六方晶格只有一个。而在每一个这种晶面上,互不平行的原子分布最密的结晶方向在体心立方晶格中是两个,面心立方晶格中是三个,密排六方晶格中也是三个。

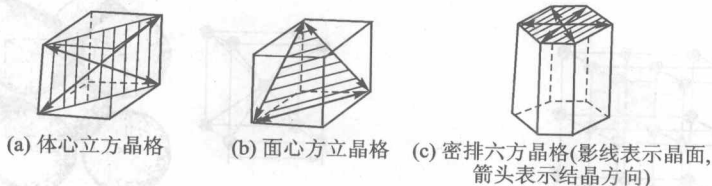


图 1.5

单晶体由于沿着不同的结晶面和结晶方向,原子分布的密度不同,所以单晶体各个方向的物理、化学及机械性质也不一致,表现出各向异性的现象。多晶体既然是由许许多多不同方位的晶粒机械嵌合而成,所以每一个单晶体的各向异性就会互相抑制抵消,而一般金属就可以看



作是各向同性的物体了。

以上简要地说明了金属的结晶构造。下面就在这个基础上,对金属受力变形的物理性质作一说明。

§ 1.2 金属的变形

金属在外力作用下产生的变形包括弹性变形和塑性变形两个发展阶段。两个发展阶段既相互区别又相互关联。

一、弹性变形

没有外力时,金属晶格中的原子处于稳定的平衡状态。外力的作用破坏了这种平衡,引起了原子间距离的改变,造成了晶格的畸变,如图 1.6(a)、(b)及图 1.13(a)、(b)所示,使晶格中的原子处于不稳定的状态。晶格的畸变必然表现为整个晶体的变形。外力除去以后,晶格中的原子即因为内力的作用,立即恢复到原来稳定平衡的位置,晶格的畸变和整个晶体的变形也就立即消失了。这就是金属弹性变形的实质。弹性变形,既然是原子间距离变化的结果,因此其变形量是微小的。

二、塑性变形

如果外力继续加大,金属晶格的弹性畸变程度也随之而加大,当外力和畸变到达一定程度时,晶格的一部分即相对另一部分产生较大的错动,如图 1.6(c)及图 1.13(c)所示。错动以后的晶格原子,就在新的位置与其附近的原子组成新的平衡。这时如果卸去外力,原子间的距离虽然仍可恢复原状,但是错动了的晶格却不再回到其原始位置了,如图 1.6(d)及图 1.13(d)所示。于是,晶体产生了一种不可恢复的永久变形——塑性变形。塑性变形既然是晶格错动造成的,因此可以产生比弹性变形大得多的变形量。

由此可见,金属在塑性变形过程中必须首先经过弹性变形阶段,即在外力作用下金属晶格先产生晶格的畸变。外力继续加大时,才产生晶格之间的错动。由于在晶格的错动过程中晶格的畸变依然存在,因此在塑性变形过程中弹性变形和塑性变形是同时存在的。外力消除后,总变形量中的弹性变形也就消失了。

三、塑性变形的两种方式

晶格的错动实质上是因为切应力引起的。错动通常采取滑移与孪动两种形式。

1. 滑 移

当切应力达到某一临界值时,晶体的某一部分即沿着一定的晶面,向着一定的方向,与另



一部分之间作相对移动。这种现象称为滑移。而上述晶面称为滑移面,上述方向称为滑移方向。图 1.6 为晶格滑移的示意图。

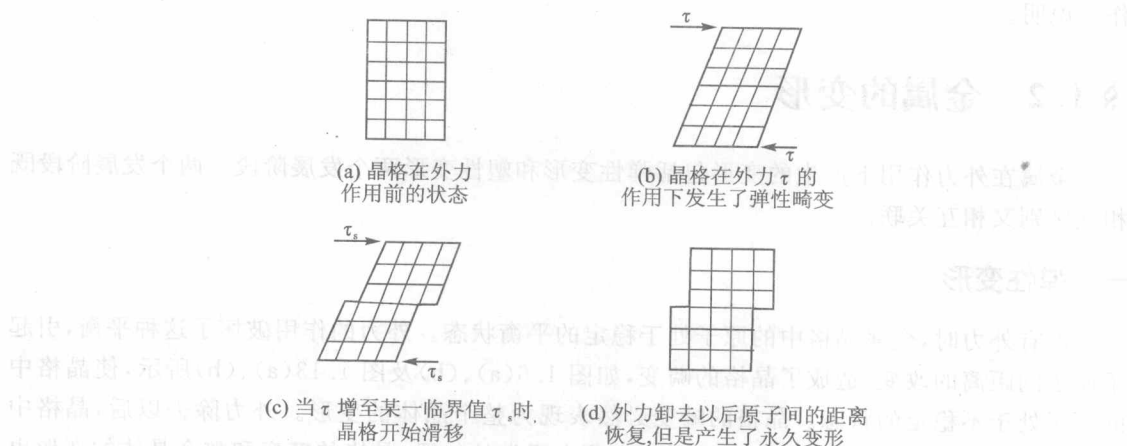


图 1.6

金属的滑移面,一般都是晶格中原子分布最密的晶面,滑移方向则是原子分布最密的结晶方向。因为沿着原子分布最密的面和结晶方向滑移的阻力最小。金属晶格中,原子分布最密的晶面和结晶方向愈多,产生滑移的可能性也愈大,金属的可塑性就愈好。各种晶格,其滑移面与滑移方向的数量见表 1.1(参见图 1.5)。

表 1.1

晶格种类	不平行 滑移面的数量	滑移面上不平行 滑移方向的数量	滑移系统(滑移可能性) 总 数
体心立方晶格	6	2	$6 \times 2 = 12$
面心立方晶格	4	3	$4 \times 3 = 12$
密排六方晶格	1	3	$1 \times 3 = 3$

镁、钛及其合金具有密排六方晶格,滑移系统(滑移可能性)数量少,因此可塑性差,属于低塑性材料。

实际上现实金属的滑移过程要复杂得多。首先,滑移并非只是在一个单一的晶面上进行的,同时参加滑移的有若干个平行的晶面——滑移层。滑移层的厚度可达 50 nm 左右。而在滑移层之间形成一种阶梯状。当变形程度很大时,两个滑移层间的阶梯可达 120 nm 左右,如图 1.7 所示。于是,塑性变形时,我们可以在金属表面观察到滑移的痕迹——无数互相平行的线条。这种线条就是所谓滑移线。



其次,单晶体在滑移过程中,由于滑移层内晶格逐渐破碎,附近的晶格逐渐畸变,使滑移面出现起伏歪扭,如图 1.8 所示,于是晶体的滑移阻力即变形抵抗力逐渐加大。变形愈发展,阻力也愈大,这种现象称为冷作硬化或应变强化。

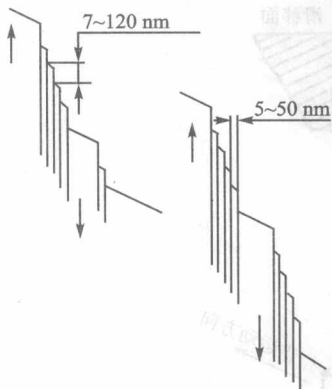


图 1.7

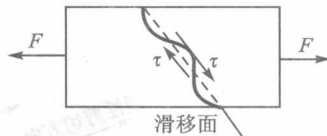


图 1.8

最后,晶体在外力的作用下,各个滑移系统或滑移面上的切应力是不相同的。其中必然有一个滑移面上的切应力最先达到临界值,最先开始滑移。但是在滑移过程中,阻力逐渐加大,因此外力也必须相应地增加。这时,其他方位的晶面上,切应力也加大起来。当某个新的晶面上切应力达到临界值时,这个新的晶面亦将参加滑移了。由此可见,在塑性变形过程中,滑移实际上是由许多滑移系统参差交替进行的,称为交错滑移。

前已述及,单晶体的滑移是因为滑移面上的切应力达到某一临界值后,两部分晶格之间出现的一种相对移动。临界切应力的大小,可以根据金属物理理论推算出来。但是这种理论计算值往往要比现实金属的实际数值大 100~1 000 倍,甚至更大。理论和实际之间的这种矛盾,可以用位错理论来解释。

单晶体在成长过程中,由于受到各种因素的影响,结晶组织的规律性就会遭到破坏。于是,有的结晶面上就有可能多出一个原子或缺少一个原子。原子的排列即不再是有规则的直线格网,产生了错移。这种错移,结晶学上称为位错。

图 1.9 和图 1.10 分别画出了简单立方晶体中存在刃型位错和螺型位错时,在位错周围原子的排列情况。从图中可以看出,在距离位错线较远地区,它发生很小的弹性畸变,原子排列接近完整晶体。但在位错线附近,则产生了严重的错排,弹性畸变也很厉害,存在很大的应力集中,因此晶体能在比较低的应力作用下开始滑移。位错在滑移时,并不像完整晶体滑移那样需要整排(代表整个晶面)的原子一起顺着外力方向移动一个原子间距,而是通过位错线或位错附近的原子逐个移动很小的距离来完成的。这样,推动一系列原子比起同时推动许多列原子所需要的外力要小得多;另一方面,推动一个位错线上的原子也比推动一个处于平衡位置上的



原子所需要的外力要小得多。

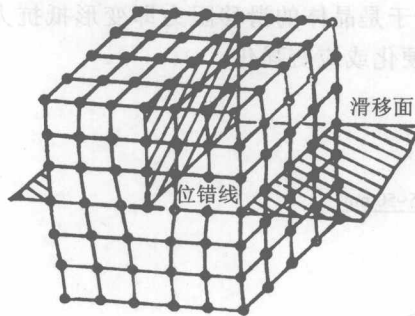


图 1.9

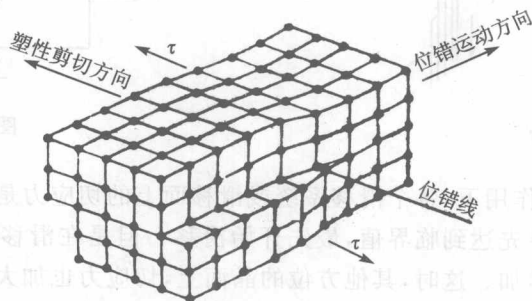


图 1.10

刃型位错和螺型位错的滑移过程如图 1.11 和图 1.12 所示。

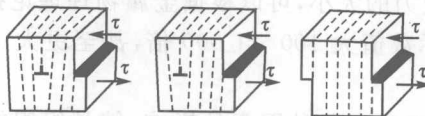


图 1.11

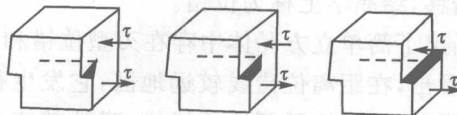


图 1.12



2. 孪 动

晶体另一种塑性变形方式称为孪动。孪动也是在一定的切应力作用下,晶体的一部分相对于另一部分,沿着一定的晶面和方向发生转动的结果,其过程如图 1.13 所示。

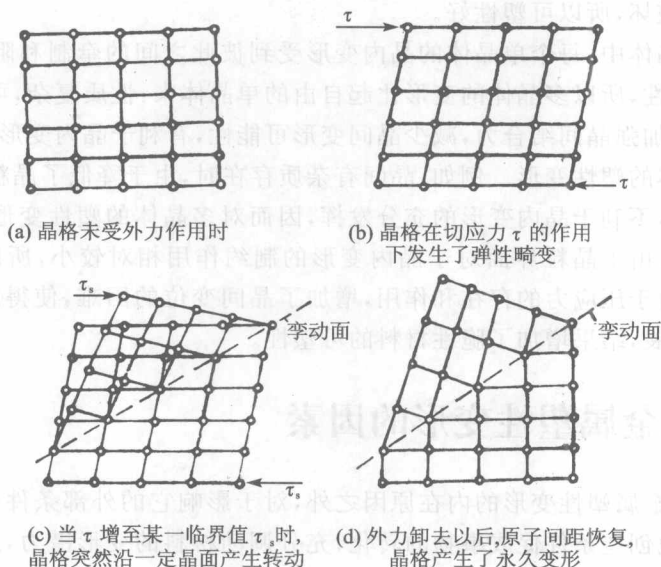


图 1.13

孪动与滑移的主要差别是:

(1) 滑移过程是渐进的,而孪动过程是突然发生的。例如金属锡孪动时,还可听到一种清脆的声音,称为“锡鸣”。其他的金属孪动时,也可听到类似的声音。由于孪动进行得非常迅速,因此从试验中很难了解其详细过程。目前一般认为六方与体心立方晶格易于产生孪动,在低温与冲击载荷下易于产生孪动。

(2) 孪动时原子位置不能产生较大的错动,因此晶体取得较大永久变形的的方式主要是滑移作用。

(3) 孪动后,晶体内部出现空隙,易于导致金属的破坏。

四、晶间变形

以上我们讨论了晶体塑性变形的两种方式——滑移与孪动。这两种变形方式都是在每个晶体的内部进行的,称为晶内变形。现实金属的变形,情形就要复杂得多。

首先,金属是一个多晶体,多晶体中的每个单晶体(晶粒),都要受到四周单晶体(晶粒)的



牵制,因此其变形不如自由单晶体单纯,可塑性也不易充分发挥。

其次,除了每个单晶体本身的变形以外,单晶体(晶粒)之间也会在外力的作用下相对移动而产生变形,这种变形称为晶间变形。但是,晶粒之间的相对移动,破坏了晶粒的界面,降低了晶粒之间的机械嵌合,从而易于导致金属的破坏。因而晶间变形的变形量是有限的。脆性材料由于其晶间结合力弱,易于产生晶间破坏,所以可塑性差。而韧性材料由于其晶间结合力强,不易产生晶间破坏,所以可塑性好。

总之,由于多晶体中,每个单晶体的晶内变形受到彼此之间的牵制和阻挠,而且存在着晶间变形破坏的可能性,所以多晶体的变形比起自由的单晶体来:性质复杂,可塑性差,变形抵抗力大。而凡是加强晶间结合力,减少晶间变形可能性,有利于晶内变形的产生与发展的因素,均有利于多晶体的塑性变形。例如:晶间有杂质存在时,由于降低了晶粒之间的结合力,使晶间变形容易发生,不利于晶内变形的充分发挥,因而对多晶体的塑性变形不利;当多晶体的晶粒为均匀球状时,由于晶粒界面对于晶内变形的制约作用相对较小,所以具有较好的可塑性。又如,变形时由于压应力的存在和作用,增加了晶间变位的困难,使得脆性材料的晶内变形有可能产生与发展,结果增加了脆性材料的可塑性。

§ 1.3 影响金属塑性变形的因素

除了应该研究金属塑性变形的内在原因之外,对于影响它的外部条件也应进行分析和研究,以便主观能动地创造条件促成事物的转化,充分调动材料的变形潜力,达到改进钣料成形工艺的目的。

金属的塑性变形性质,表现为屈服、应变强化和破坏三个方面。影响金属塑性变形的因素很多,大致可以归纳为以下两类:

第一类:机械因素。通常把这类因素称为变形方式,即金属塑性变形时的应力状态与应变状态。

第二类:物理因素。通常把这类因素称为变形条件,例如金属塑性变形时的变形温度与速度等。

以下分别加以讨论。

一、变形方式对于金属塑性变形的影响

成形时,金属的受力和变形情况是非常复杂的。但是归纳起来,不外乎是在拉、压的综合作用下,产生一定的拉应变与压应变,以达到预期的成形目的。

关于应力状态与应变状态的表示与确定方法,我们将在以后的章节里,结合具体的例子进行分析和讨论。这里仅就变形方式对于金属塑性变形的影响作一大概说明。

一般说来,变形方式对金属的屈服与应变强化即金属的变形抵抗力影响不大,但是对金属