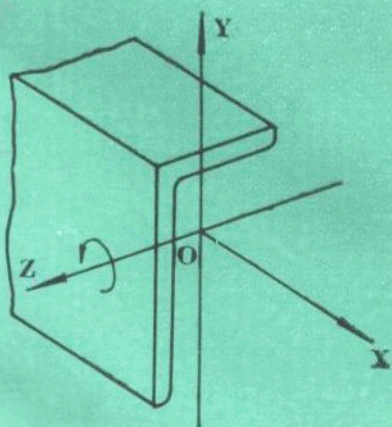


船舶钢料加工原理

王呈方 编著



大连海运学院出版社

前 言

船舶钢料加工属金属塑性加工范畴。金属塑性加工是金属加工的方法之一。它是利用金属的塑性，即金属产生塑性变形的能力，使金属在外力作用下成形的一种加工方法，因而也称为金属压力加工。通常金属塑性加工分为以下三种类型：

- (1) 锻造。由金属毛坯体积成形，加工成各种锻件；
- (2) 坯料成形。指板料轧制、管、棒及型材等的拉拔、挤压等；
- (3) 钣金成形。由板、管、型材等原料再成形为各种金属制品。

船舶及海洋结构物是一种大型金属结构物，其中大部分结构零件是用钢板和型材等通过金属压力加工方法获得的。船舶制造中习惯地把属于压力加工的一些工序方法称为钢料加工。

船舶钢料加工对船舶制造质量和速度都有直接影响。因此从事船舶与海洋结构物工程的技术人员必须掌握船舶钢料加工的基本原理和方法，以便能够正确理解船舶钢料加工过程中出现的各种现象，确定有关工艺参数，提高加工质量；或者改进现有工艺过程，寻求新的、更为完善的工艺方法，以及进行工艺设备设计与选型等。

有关塑性加工、金属压力加工、板料冲压方面的书籍颇多，但适合于船舶与海洋结构物的却没有。为此，作者曾根据船舶类专业特点，编写了《船体构件成形加工原理》讲义，从1986年起在教学中使用。积累几年来对本科生和研究生教学的实践经验和作者的一些研究成果，对原讲义作了修改与补充，编著成现在的《船舶钢料加工原理》一书。考虑到船舶类专业没有设置塑性力学课程的情况，撰写教材中力求通俗易懂。只要读者具备材料力学的知识就能学习阅读本书。

本书第一章为绪论；第二章介绍了金属塑性变形的物理概念；第三章至第七章较详细地介绍了金属塑性变形的基本理论；第八章介绍了板料的成形性能和实验方法；第九章至第十九章较详细地分析了船舶钢料加工各主要工序的理论和计算。学习本书，除了应掌握金属塑性变形的基本理论外，尤应注意运用这些基本原理来分析船舶钢料加工各工序的方法和有关结论。

本书由武汉水运工程学院造船工艺及设备教研室王呈方教授编著，茅云生同志参与了部分编写工作，全书插图由常志谊同志描绘。

本书承上海船舶工艺研究所伍国炎高级工程师审阅。

目 录

第一章 绪论.....	(1)
第一节 塑性加工概念.....	(1)
第二节 船舶钢料加工概念.....	(1)
第三节 船舶钢料加工原理课程目的与任务.....	(1)
第二章 金属的结构和塑性.....	(4)
第一节 金属的结晶构造.....	(4)
第二节 金属塑性变形机构.....	(5)
第三节 加工过程中的硬化与软化.....	(8)
第四节 金属的冷变形和热变形	(10)
第五节 金属的塑性	(11)
第六节 金属的断裂	(13)
第三章 真实应力应变曲线	(15)
第一节 拉伸图和条件应力应变曲线	(15)
第二节 拉伸时的真实应力应变曲线	(16)
第三节 真实应力应变曲线的简化模型	(20)
第四节 压缩试验曲线	(23)
第四章 应力状态分析	(25)
第一节 外力和应力	(25)
第二节 坐标面上的应力	(26)
第三节 任意斜面上应力的确定	(27)
第四节 主应力和应力张量不变量	(28)
第五节 主剪应力和最大剪应力	(31)
第六节 应力球张量和应力偏张量	(33)
第七节 八面体应力和应力强度	(34)
第八节 应力状态的图解分析	(35)
第九节 微体的静力平衡方程式	(37)
第十节 平面应力状态	(38)
第十一节 板料轴对称变形的平衡微分方程	(40)
第五章 应变状态分析	(42)
第一节 微体的应变状态	(42)
第二节 过已知点任意线素的应变	(45)
第三节 主应变和应变张量不变量	(46)
第四节 主剪应变和最大剪应变	(48)
第五节 八面体应变和应变强度	(50)
第六节 应变球张量和应变偏张量	(51)

第七节	塑性变形应变状态的图解分析	(51)
第八节	平面变形问题	(53)
第六章	屈服准则	(55)
第一节	最大剪应力理论	(55)
第二节	常数形变能量理论	(56)
第三节	米塞斯屈服准则的物理意义	(58)
第四节	屈服准则的几何图形——屈服轨迹和屈服表面	(60)
第五节	中间主应力的影响	(62)
第六节	屈服准则的实验验证	(63)
第七节	应变硬化材料的屈服准则	(64)
第七章	塑性应力应变关系	(66)
第一节	弹性变形的应力应变关系	(66)
第二节	塑性变形时应力应变关系的特点	(68)
第三节	塑性变形的应力应变关系理论	(70)
第四节	塑性应力应变关系的实验验证	(73)
第五节	求解板料加工问题的切取微体法	(73)
第六节	求解板料加工问题的塑性材料力学法	(79)
第七节	最小阻力定律	(81)
第八章	板料的成形性能及试验方法	(82)
第一节	板料的成形性能	(82)
第二节	金属机械性能与板料成形性能间的关系	(83)
第三节	金属板料双向拉伸(胀形)试验与实际应力曲线的作法	(85)
第四节	用纯弯曲实验求材料常数 A, n 值的方法	(87)
第五节	板料成形性能的工艺试验	(87)
第九章	板料压弯成形加工	(89)
第一节	概述	(89)
第二节	塑性弯曲应力应变状态分析	(90)
第三节	无应变刚板的立体纯塑性弯曲	(91)
第四节	有应变刚板的纯塑性弯曲	(97)
第五节	马尔柯威兹公式	(98)
第六节	弯曲回弹	(99)
第七节	横向力作用下的弯曲	(100)
第八节	弯曲加工极限	(103)
第十章	型材压弯成形加工	(105)
第一节	梁的弹塑性弯曲	(105)
第二节	梁截面上残余应力的分布	(109)
第三节	简支梁弯曲的塑性变形区及曲率分布	(110)
第四节	莫施宁公式	(112)
第五节	型材塑性弯曲的变形特点	(115)
第六节	型材弯曲自动控制的回弹模型	(120)

第十一章	板材滚弯成形加工	(125)
第一节	有关塑性弯曲理论	(125)
第二节	板材滚弯过程与几何关系	(127)
第三节	板材滚弯塑性变形区的分布	(129)
第十二章	管子弯曲成形加工	(132)
第一节	弯曲应力分析	(132)
第二节	弯矩与弯曲力	(134)
第三节	弹性回跳	(136)
第四节	最小弯曲半径	(137)
第五节	缠绕式弯管机上管子的回弹与伸长规律	(138)
第十三章	型材的拉弯加工	(141)
第一节	拉弯时型材截面上的应力与应变分布	(141)
第二节	回弹量的计算	(142)
第三节	拉力与弯曲顺序不同的效果分析	(143)
第十四章	板材与型材的矫正	(145)
第一节	压力矫平	(145)
第二节	在辊式矫平机上对板材变形进行矫正	(146)
第三节	辊式矫平与拉伸滑移的防止	(148)
第十五章	双向曲度板材构件的冷弯加工	(149)
第一节	多压头方式弯板	(149)
第二节	三列式油压机弯板	(158)
第三节	拉形	(161)
第十六章	板料压延与局部成形加工	(164)
第一节	压延的基本原理	(164)
第二节	局部成形加工	(168)
第十七章	板料剪切加工	(172)
第一节	剪切加工机理	(172)
第二节	精密剪切	(174)
第三节	斜刀片剪切	(175)
第四节	圆盘剪切	(177)
第十八章	其它成形加工方法	(179)
第一节	板材加热弯曲与模压	(179)
第二节	水火弯板与矫形	(181)
第三节	喷丸成形加工	(184)
第十九章	锻造	(187)
第一节	锤上锻造与压力机锻造	(187)
第二节	锻件的组织和性能	(188)
第三节	锻造过程中的摩擦	(189)
参考文献		(193)

第一章 绪 论

第一节 塑性加工概念

金属塑性加工是金属加工方法之一。它是利用金属的塑性,即金属产生塑性变形的能力,使金属在外力作用下成形的一种加工方法。

金属加工包括金属塑性加工和金属切削加工。从毛坯上切去多余的金属,以获得符合预定技术要求的工件或半成品的机械加工叫作切削加工。切削加工通常是使用切削刀具在金属切削机床上进行的。而金属塑性加工则是利用压力将金属素材变成所需要的形状并在实用中永久保持该状态。因为金属塑性加工所用设备大都是压力机,所以金属塑性加工又可称为金属压力加工,但也往往把使用锤和轧机的加工方法包括在内。

金属压力加工包括锻造和冲压两大方面。锻造属体积成形,就是通过金属体积的转移和分配来获得零件的塑性成形方法。为使金属易于成形和有较好的塑性,锻造多在热态下进行,所以锻造也常称为热锻。冲压和体积成形方法不同,是一种利用专门的模具对材料、型材进行塑性加工的方法,故也称为板料冲压。板料冲压一般是在室温下进行,其厚度基本上不发生变化。

在汽车、飞机、船舶、仪表、电器和日用产品的零件总量中板料冲压的零件占有很大比重。采用板料冲压工艺生产零件的优点是生产效率高,生产费用低,适于大批量生产,操作简单,而且可获得强度高、性能好、形状复杂的工件。

第二节 船舶钢料加工概念

船舶是大型金属结构物,其船体等零部件主要是用钢板和型材经过冲压加工获得的。这种将钢板和型材通过金属压力加工(主要是板料冲压)方法变为船体构件的成形加工方法,在船舶制造中习惯地被称为船舶钢料加工。

船舶钢料加工的常用工序如表 1-1 所示。根据其加工特点,钢板校平和型材校直属于钢材预处理范围;剪切与冲裁属于构件边缘加工范围;而弯曲、压延、拉弯和爆炸成形等属于构件成形加工范围。

近年来,船舶钢料加工技术有很大发展,表现在以下几方面:

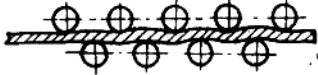
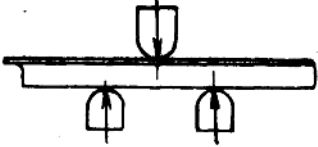
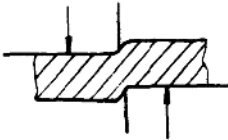
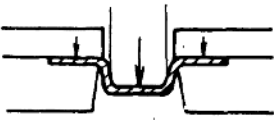
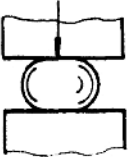
- (1) 研制和应用数控或自动加工机床,以实现船舶构件成形加工机械化与自动化;
- (2) 引用大吨位和多用途的液压机床;
- (3) 建立自动化流水生产线。

这些发展使船舶钢料加工的机械化与自动化程度进一步得到提高,增强了造船生产能力。

第三节 船舶钢料加工原理课程目的与任务

船舶钢料加工在船舶制造中占有一定比重,是一个重要方面。作为从事船舶制造的技术人员,应该对船舶钢料加工的各工序和原理有所了解。钢料加工中的成形方法虽然多种多样,

表 1-1 船舶钢料加工常见工序

钢料加工 工序名称	简 图	说 明
钢板校平		用多辊矫平机或压力机将轧制的钢板校平
型材校直		用型钢矫直机校直型材
剪 切		用剪板机或冲剪机剪断钢板或获得零件
冲 裁		用冲床等在工件上冲出有某种形状孔的零件
弯 曲		用压力机或专用机床将钢板型材弯曲加工成所需要的零件形状
压 延		用压力机和模具在钢板上制成各种形状的突起或凹陷的零件
拉 弯		在有切向拉力情况下, 将钢板或型材弯曲, 从而获得弯曲形状构件
爆炸成形		用炸药爆炸时产生高压进行板料成形加工
锻 造		在锻锤或压力机上, 用简单工具, 将热坯钢料高度压缩水平展宽, 制成各种锻件

各具特点，但它们在塑性变形的金属学和力学方面有着共同的基础和规律。本课程将阐述这些基础和基本规律，为学习后续的工艺、设备等课程作理论准备，也为合理制定成形工艺奠定理论基础。所以本课程的任务是：

- (1) 介绍金属塑性变形的金属学基础，研究外部条件对塑性变形的影响；
- (2) 介绍应力、应变、应力应变关系和屈服准则等塑性理论的基础知识。
- (3) 分析研究船舶钢料加工中各工序成形力学问题的解法及其在具体工序中的应用，从而确定构件成形时的应力、应变分布和所需要的变形力等，为选择设备吨位和设计模具、机床等提供依据；
- (4) 介绍金属板料等的成形性能和实验方法。

第二章 金属的结构和塑性

金属的结构和塑性是研究金属成形加工所必须掌握的基础理论,因为金属塑性成形是以塑性为依据而进行的。本章从微观角度叙述金属的结构情况,介绍单晶体和多晶体的塑性变形机构,分析塑性本质和影响塑性的各种因素。

第一节 金属的结晶构造

所有的固态金属,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。这种小颗粒称为晶粒或单晶体。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有一定的位置,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。于是我们可利用图 2-1 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。这种格网我们称为单晶体的空间品格。单晶体的空间品格又可看作是许多相同的品格单元积累叠合而成,如图 2-1 影线所示。

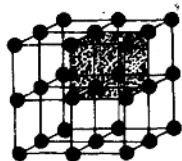


图 2-1 单晶体的空间品格

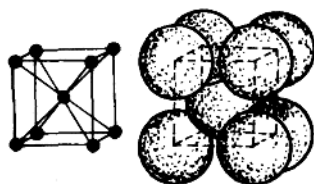


图 2-2 体心立方品格

一般金属的品格单元多为以下三种形式。

- (1) 体心立方品格 (图 2-2)。具有该品格的金属如 α -铁、 β -铁、铬等。
- (2) 面心立方品格 (图 2-3)。具有该品格的金属 γ -铁、铜、铝、镍、铅等。
- (3) 密排六方品格 (图 2-4)。具有该品格的金属如镁、钛、锌等。

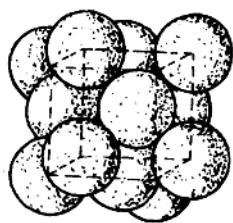


图 2-3 面心立方品格

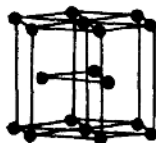
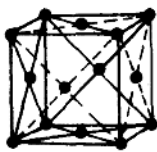


图 2-4 密排六方品格

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

单晶体中沿不同的结晶面和结晶方向,原子分布的密度不同。

三种形式的品格中,原子分布最密的结晶面和结晶方向如图 2-5 所示。其互不平行的晶面在体心立方品格中共有六个,面心立方品格中共有四个,密排六方品格中只有一个。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二个，面心立方晶格中是三个，密排六方晶格中也是三个。

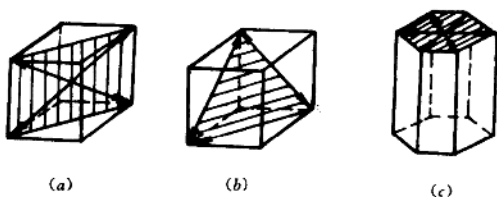


图 2-5 单晶体的结晶面和结晶方向

a. 体心立方晶格；b. 面心立方晶格；c. 密排六方晶格

单晶体由于沿着不同的结晶面和结晶方向上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样，表现出各向异性。多晶体则是由许许多多不同方位的晶粒嵌合而成，所以每一单晶体的各向异性就会互相抑制抵消。这样一般金属就可以看作是各向同性的物体。

第二节 金属塑性变形机构

工业上使用的金属一般都是由无数单个晶粒构成的多晶体。要了解多晶体塑性变形的性质，必须先了解单个晶粒或单晶体的塑性变形机构。

一、单晶体塑性变形

单晶体塑性变形的最主要方式是滑移。

滑移是指晶体在外力作用下，其中一部分沿着一定晶面（原子密排晶面）和这个晶面上的一定晶向（原子密排晶向）对其另一部分产生的相对滑移。此晶面称为滑移面，此晶向称为滑移方向。滑移时原子移动的距离是原子间距的整数倍，滑移后晶体各部分的位向仍然一致。滑移结果，使大量原子逐步地从一个稳定位置移到另一个稳定位置，晶体则产生宏观的塑性变形。图 2-6 所示是晶体以滑移方式进行的塑性变形。

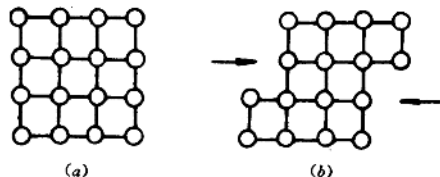


图 2-6 晶体滑移示意图

a. 滑移前；b. 滑移后

滑移面与滑移方向的数值的乘积称为滑移系，金属晶体内存在着滑移系，仅说明金属产生滑移的可能性。若要使晶体产生滑移，只有在作用于滑移面及其滑移方向上的剪应力达到一定数值时才开始。开始滑移时作用于滑移方向上的剪应力称为临界剪应力，以 τ_s 表示。以

拉伸为例，当以外力 P 拉伸晶体时，滑移面上剪应力 τ 的大小是由滑移面相对于拉力方向的取向所决定（图 2-7）。设晶体的横断面为 F_0 ，滑移面面积为 F ，外力 P 与滑移面法线夹角为 φ ，作用力 P 与滑移方向的夹角为 λ 。

作用在横断面 F_0 上的正应力 σ 为：

$$\sigma = \frac{P}{F_0}$$

作用在滑移面上，沿作用力 P 方向的应力为：

$$S = \frac{P}{F} = \frac{P}{F_0} \cos \varphi = \sigma \cdot \cos \varphi$$

作用在滑移面上，沿滑移方向的分切应力为：

$$\tau = S \cdot \cos \lambda = \sigma \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda$$

由上式可知，当外力 P 增加时，作用在滑移方向的分切应力 τ 也增加。当 τ 达到临界切应力 τ_s 时，晶体产生滑移，这时垂直于横截面的应力 σ 达到拉伸的屈服极限 σ_s 。这样上式又可

写成：

$$\tau_s = \sigma_s \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda$$

当外力 P 与滑移面和滑移方向都成 45° 角时，即 $\varphi = \lambda = 45^\circ$ ，则：

$$\tau_s = \frac{\sigma_s}{2}$$

上式说明当滑移面和滑移方向与作用力都成 45° 角时，在该滑移面和滑移方向上的分切应力最大。由于 τ_s 一定，此时较小的拉伸应力在此滑移面和滑移方向上所产生的分切应力就能达到 τ_s ，而使晶体滑移。此时 σ_s 值为最小，且 $\sigma_s = 2\tau_s$ 。

影响临界切应力的因素主要有以下几点：

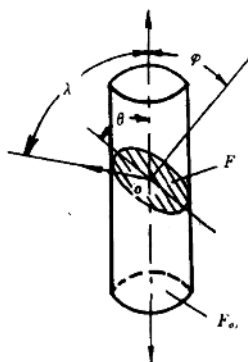


图 2-7 单晶体滑移时的应力分析

(1) 临界剪应力即滑移阻力起源于原子间的结合力，而结合力与金属晶体的原子结构、晶格结构等有关，即首先取决于金属的本质。

(2) 晶体的纯度对临界剪应力的影响很大，金属的纯度越高，其临界剪应力越低，少量的杂质原子或溶质原子可使临界剪应力大幅度增加。

(3) 金属晶体结构的完整性也对临界剪应力有很大影响。无缺陷的晶体可以有很高的临界剪应力。

(4) 金属晶体变形时，随着变形温度的提高，临界剪应力下降。这是由于温度升高，原子的动能增大，从而原子间结合力减弱，使滑移容易产生。对不同的滑移系来说，随着温度的升高，临界剪应力下降的幅度不一样，晶面之间的结合力也发生变化。所以高温变形时可能出现新的滑移系。

晶体变形时，随着滑移的进行，滑移面会向拉力方向发生旋转，使滑移面可能处于不利的受力方位。这些因素使继续滑移所需的剪应力增加，这种现象称为变形硬化或加工硬化。

二、多晶体的塑性变形

多晶体是由许多微小的单个晶粒杂乱组合而成。其组织结构上的特点是：各个晶粒的形状和大小是不同的，化学成分和力学性能也不均匀；各相邻晶粒的取向一般是不一样的；多晶体中存在大量的晶界，晶界的结构和性质与晶粒本身不同，晶界上聚集着杂质。所有这些都使多晶体的许多性质不同于单晶体。因此，当其中某一个晶粒变形时总受到晶界和周围晶粒的限制。多晶体塑性变形的特点有：

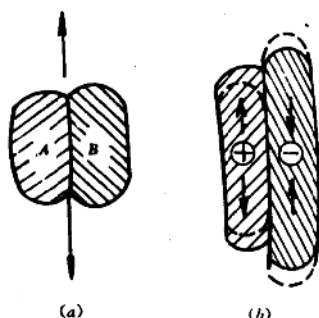


图 2-8 晶粒机械性能不同的影响

a. 变形前；b. 变形后

1. 变形与应力的不均匀分布增强

如图 2-8 所示，若多晶体内某相邻两晶粒的机械性能不同（假设 A 晶粒的屈服点高， B 晶粒的屈服点低），在外拉力作用下产生塑性变形时，屈服强度低的 B 晶粒将比屈服强度高的 A 晶粒产生更大的延伸变形。若是两个晶粒互无约束，则其变形后的位置应如图 2-8 (b) 中虚线所示。但这两个晶粒是彼此紧密结合的完整体，在变形中屈服强度高的 A 晶粒将给屈服强度低的 B 晶粒施加压力；反之， B 晶粒给 A 晶粒施加拉力。在

A 晶粒内产生附加拉应力，在 B 晶粒内产生附加压应力。其结果在 A 和 B 晶粒间增强了变形与应力的不均匀分布。

多晶体中各晶粒的取向不同，会使变形与应力的不均匀分布增强。在多晶体内通常存在软取向（滑移面和滑移方向与外力成 45° 角 of 的有利方位）和硬取向（不利方位）的晶粒。如图 2-9 所示。当逐渐增加外力时，切应力首先在软取向的晶粒中达到临界值，而优先产生滑移变形。对其相邻的硬取向晶粒，由于没有足够的切应力使之滑移，而不能产生塑性变形。这样，硬取向晶粒将阻碍软取向晶粒产生塑性变形，于是在硬取向和软取向的晶粒间产生了应力的不均匀分布。同样，在多晶体内也将出现变形的不均匀性。

2. 变形抗力提高

多晶体在塑性变形中出现了变形与应力的不均匀分布，将会使多晶体的变形抗力升高，塑性降低。

多晶体晶粒的大小对变形抗力有显著的影响。晶粒的大小一般介于 $1.0 \sim 0.01\text{mm}$ 之间，或更小一些。这样在多晶体中，自然存在着大量的晶粒间界。晶粒间界的结构和性质与晶粒本身不同。晶界上的原子是不规则排列的（图 2-10），并聚集有其杂质。相邻的晶粒彼此相互影响，晶粒间的取向也不同。这就使滑移在晶界处受阻，变形困难。要想使滑移由晶内通过晶界传到另一个晶粒，就必须加大外作用力来克服晶界阻力。如图 2-11 所示：当拉伸几个相接连的晶粒试样时，其晶界的变形甚小。由此可见，晶界的晶粒本身难于变形，即晶界变形抗力比晶粒本身的变形抗力大。因为多晶体是由许多晶粒所组成，各个晶粒通过晶界而互相紧密的连接着。这样，晶粒越细小，晶界所占的区域相对就越大，对变形的阻碍作用也就越大。因此，多晶体的变形抗力也就越大。很多金属实验结果表明，屈服极限 σ_s 随着晶粒的大小而变化。晶粒越细小，屈服极限值越高。

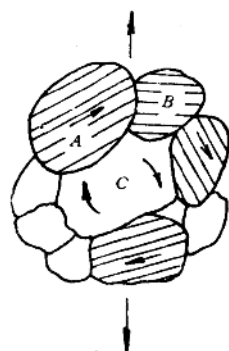


图 2-9 晶粒之间的相互作用

A. 软取向晶粒；B. 硬取向晶粒；
C. 变形中转动

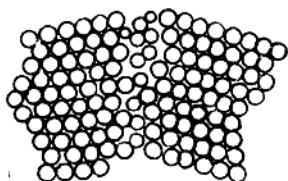


图 2-10 晶粒间的原子结构



图 2-11 晶界对变形的影响

此外，晶粒越细小，在一定体积内的晶粒数目越多，于是在一定的变形量下，变形会分散在很多的晶粒内进行。这样，就使变形分布得比较均匀，应力集中较小。会使金属具有较高的塑性和韧性。此规律只适用于低温情况，而在高温时就有所不同。由于在晶粒间界处，原子的排列是很不规则的，所以存在着大量的由点缺陷、线缺陷等所引起的晶格畸变。在高温下畸变晶格的原子将获得较大的能量，当受外力作用时会出现沿晶粒界面的粘滞性流动，而使晶粒间界的强度降低。因此，一般说来，高温时粗晶粒材料要比细晶粒材料有更高的高温强度。

3. 出现方向性

在塑性变形中晶粒形状和取向将发生变化。晶粒的某一同类晶面和晶向沿一定方向排列

(出现择优取向),就产生了所谓织构,使金属产生各向异性。

4. 在晶界上发生变形

多晶体金属塑性变形过程中,在晶粒的形状和取向发生改变的同时,晶粒彼此间也发生相对的移动。就是说除晶粒内部变形外,在晶界上也发生变形。因为晶界上变形会导致晶粒间的联系破坏,所以应尽量避免发生晶界变形。

第三节 加工过程中的硬化与软化

一、加工硬化过程

多晶体塑性变形将导致金属的机械、物理及化学性能改变。随着变形程度的增加,变形抗力的所有指标(如屈服极限、强度极限和硬度)都增大,而塑性指标(如延伸率、断面收缩率)都减小,同时还使电阻升高,抗腐蚀性和导热性下降。金属在塑性变形过程中产生这些机械性能和物理化学性能变化的综合现象叫作加工硬化。这是金属塑性变形的重要特点。

产生加工硬化的原因很多,大致可归纳为如下几点:

(1) 几何硬化。由于在滑移过程中,滑移面的方位改变,使产生滑移的滑移面偏离有利的滑移方向(与外力成 45° 角的方向),为使金属继续变形则必须加大外力。

(2) 物理硬化。在滑移过程中原子的滑移层晶格畸变及破坏,阻碍了滑移面进一步滑移而使变形抗力增加。

(3) 在多晶体中,由于在变形过程中晶粒间相对转动,使晶界遇到破坏而造成塑性指标下降,或由于晶粒转动的结果产生几何硬化。当晶粒转至滑移面上且分剪应力等于零时,使晶内变形处于极不利的地位。特别是当法向拉应力达到一定值时,则可能使物体产生脆性破坏。

(4) 在多晶体中,由于组织(晶粒大小、相组成、化学成分偏析等)不均匀和不均匀变形引起的附加应力及残余应力,从而使其塑性降低而变形抗力增加。

影响加工硬化的因素也很多,主要有以下几方面:

(1) 金属本身的性质。不同的金属其晶格不同、化学成分不同、组织不同,所含杂质的多少及成分亦不同,所以对加工硬化的敏感性亦不相同。

(2) 变形程度大小。变形程度增加,则加工硬化的程度也随之增加。

(3) 变形速度的高低。当变形速度增加时,加工硬化程度加剧。但是,当变形速度达到一定数值时,由于热效应的作用使金属温度升高而产生了软化现象,此时所呈现的加工硬化反而下降。

加工硬化现象有其重要的实际意义。从变形角度看,如果金属仅有塑性变形而无加工硬化,就难以得到截面均匀一致的冷变形。这是因为凡是出现变形的地方必然会有硬化,从而使变形分布到其它暂时没有变形的部位。从改善性能的角度看,加工硬化对那些用一般热处理方法无法使其强化的无相变的金属材料是一种重要的强化手段。另外,加工硬化也有不利的一面,即由于冷加工过程中变形抗力升高和塑性下降,往往使继续加工发生困难,需在工艺过程中增加退火工序,以消除加工硬化。

加工硬化,其金属组织的特点之一是晶粒被拉长。金属与合金在冷变形中随着外形的改变,其内部晶粒形状也大体发生相应的变化,即都沿最大主应变的方向被拉长、拉细或压扁。如图 2-12 所示。晶粒被拉长的程度取决于主应变图示和变形程度。双向压和一向拉伸的主应变图示最有利于晶粒的拉长。其次是一向压缩和一向拉伸的主应变图示。变形程度越大,晶

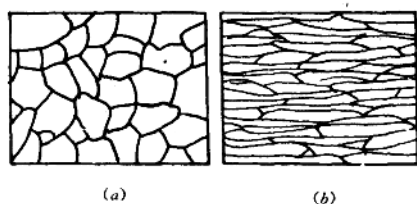


图 2-12 冷轧前后的晶粒形状变化

a. 变形前退火状态; b. 冷轧变形后组织

后, 由于在各晶粒内晶格取向发生了转动, 使其特定的晶面和晶向趋于排列成一定方向, 如图 2-13(b)所示。从而使原来位向紊乱的晶粒出现有序化, 并有严格的位向关系。金属所形成的这种组织结构叫作变形组织。当变形方向一致时, 变形程度越大, 位向越明显。

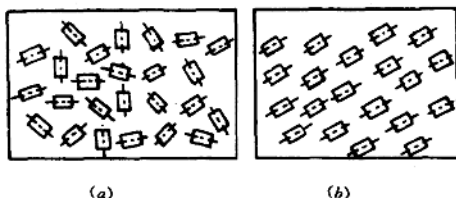


图 2-13 多晶体、晶粒的排列情况

a. 晶粒的紊乱排列; b. 晶粒的整齐排列

加工硬化金属的机械性能的改变是多方面因素造成的。由于在变形中产生晶格畸变, 晶粒的拉长与细化及

不均匀变形等使金属的变形抗力指标随变形程度的增加而增加。又由于在变形中产生晶内和晶间的破坏以及不均匀变形等, 使金属塑性指标随着变形程度的增加而降低。

二、加工软化过程

金属的回复和再结晶过程就是软化过程。

1. 回复

回复现象是靠对变形金属加热, 而使其原子运动的动能增加, 借以增加其热振动, 使偏离稳定位置的原子恢复到稳定位置。回复的结果, 部分地恢复了由变形所改变的机械、物理及物理化学性质。如电阻大部分得到回复, 而机械性能(如强度和硬度指标)只能部分回复(降低 20%~30%)。由于回复温度不高, 原子不能发生很大位移, 因此回复不能改变晶粒的形状和方向性, 同时也不能回复晶粒内及晶间的破坏现象。

2. 再结晶

由于加热温度升高, 原子获得了巨大的活动能力, 金属的晶粒开始发生变化, 由破碎的晶粒变为整齐的晶粒, 由拉长的晶粒变为等轴晶粒。此结晶过程称为金属的再结晶, 如图 2-14 所示。

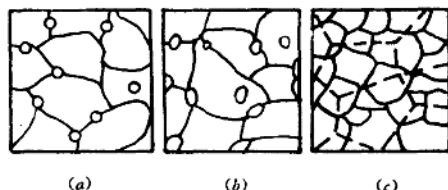


图 2-14 再结晶过程

晶内和晶间的破坏, 消除了变形过程中金属内产生的某些裂纹和空洞; 加强了变形扩散而使金属化学成分的不均匀性得到改善; 恢复了金属的机械性能(变形抗力降低, 塑性升高)和物理化学性质。

粒形状变化亦越大, 同时金属中的夹杂物等也在延伸方向被拉长或破碎而呈链条状排列。这种组织称为纤维组织。由于纤维组织的存在, 使变形金属的横向(垂直于延伸方向)机械性能降低。另一组织的特点是形成变形组织。如图 2-13(a)所示。金属的多晶体是由许多不规则排列的晶粒所组成。但在加工变形过程中, 当达到一定的变形程度以

通常把开始再结晶的最低温度称为再结晶温度 (T_r)。它受许多因素的影响,主要有:

(1) 变形程度影响。变形程度越大,再结晶温度越低(图 2-15)。随着变形程度的增大,金属的开始再结晶温度将趋近于某一恒定值,即所谓金属的最低再结晶温度。最大变形程度的再结晶温度与金属熔点之间存在着一定的关系:

$$T_r = (0.35 \sim 0.4) T_f$$

式中: T_r ——以绝对温度表示的再结晶温度;

T_f ——以绝对温度表示的金属熔点温度。

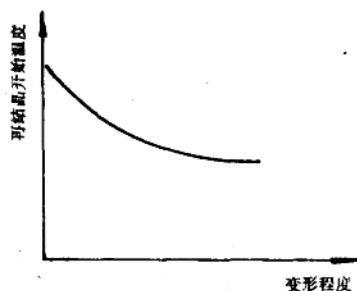


图 2-15 再结晶温度与变形程度的关系

(2) 保温时间的影响。在一定的变形程度和变形温度下,保温时间越长,再结晶温度越低。

(3) 合金元素越多,杂质含量越大,一般说来再结晶温度越高。高合金的再结晶温度一般较高。

在再结晶过程中,由于新晶粒的增大,解除了变形金属的加工硬化现象。但是应当注意,再结晶只是在塑性变形的物体中发生,在未达到某一变形程度之前,再结晶一般是不可能发生的。

第四节 金属的冷变形和热变形

金属在塑性变形中,随着变形程度增加,根据变形温度和变形速度不同,在变形中可能产生硬化、回复和再结晶等程度的不同,亦即变形结果是不同的。为此把金属的塑性变形分为冷变形、热变形、不完全冷变形和不完全热变形。

一、冷变形

金属塑性变形过程中,只有加工硬化作用而无回复与再结晶现象的变形过程,叫作冷变形。冷变形在低于再结晶温度 ($<0.3T_r$) 的条件下发生。

冷变形后强度指标 (σ_b 、 σ_s) 增加,塑性指标 (δ 、 ψ) 降低,致使金属严重硬化。欲想继续进行塑性变形,则必须加以软化退火。

二、热变形

将在再结晶温度以上,且再结晶的速度大于加工硬化速度的变形过程,即在变形过程中,由于完全再结晶的结果而全部消除加工硬化现象的变形过程称为热变形。这种变形过程不但能提高金属的塑性,降低变形抗力,同时,变形后可使金属获得等轴的再结晶组织。热变形通常发生在 ($0.9 \sim 0.95$) T_r 的温度范围内。

三、不完全冷变形

在金属塑性变形过程中只具有加工硬化及回复现象,而无再结晶现象的变形称为不完全冷变形。不完全冷变形发生于 $0.3T_r$ 以上、 $0.4T_r$ 以下的温度范围内。由于回复作用的结果,加工硬化现象和残余应力减少,变形抗力降低,塑性提高了,这种变形可在室温下采用高变形速度(靠变形热升高)来获得。这种变形过程是一种合理的变形过程。它不仅提高了设备的生产能力,同时由于使金属达到较高的变形程度时不必经过中间退火而降低了成本。故在

塑性加工中，常常采用这种变形方式。

四、不完全热变形

金属在变形过程中，除有加工硬化外，同时尚有回复与部分再结晶的形过程，叫作不完全热变形。不完全热变形发生在 $(0.5 \sim 0.7) T_s$ 的温度范围内。这种形过程使金属组织不均，因而使金属塑性降低，变形抗力升高。金属中可能有部分破裂而未恢复，并且有使设备破坏的可能。因此，在实际生产中应尽量避免不完全热变形。

第五节 金属的塑性

一、金属塑性的概念

金属塑性是指在外力作用下发生永久变形而不损害其整体性的性能。在这里不要把塑性和柔性混为一谈，因为柔性是表示金属的软硬程度（即变形抗力大小），而塑性则表示金属能产生多大变形而不破坏的性能。例如铅既柔软而塑性也很好。又如奥氏体不锈钢，在冷状态下塑性很好，但是它却很硬，具有很大的变形拉力，所以说它具有很小的柔软性。一般来说，金属和合金在高温区域的变形抗力小，具有良好的柔软性，但不能同时具有良好的塑性。因为若过热，则变形时就要产生裂纹或破坏，表明塑性很差。

塑性不仅取决于金属的自然性质，而且也取决于塑性变形过程中的外界条件。也就是说，金属和合金的塑性，不是一种固定不变的性质，而是随着许多外界因素而变化的。实验证明，塑性变形外部条件比金属本身的性质对塑性的影响更大。例如铝，一般来说是塑性很好的金属，但若使其在三向等拉应力状态下变形，铝就不可能产生塑性变形，在应力达到铝的强度极限时，它就象脆性物质一样破坏。

金属和合金的塑性，并非是固定不变的一种性能，则完全有可能靠控制变形时的各种条件加以改变，使其有利于进行塑性变形。所以，过去认为是难以甚至是不可能进行塑性成形加工的低塑性金属和合金，现已能够顺利地进行加工。

二、塑性指标

在生产中，塑性需要用一种数量指标来表示，这就是塑性指标。由于塑性是一种依各种复杂因素而变化的加工性能，因此很难找出一个单一的指标来反映其塑性特征。到目前为止，在大多数情况下，还只能用依靠某种变形方式的试验而确定的破坏前试样的变形程度来表示。常用的主要指标有下列几种：

(1) 在材料试验机上进行拉伸试验求得的破断前总延伸率 δ ：

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0}$$

或者是破断时断面积的总收缩率 ψ ：

$$\psi = \frac{F_0 - F}{F_0}$$

式中： l_0 ——拉伸试样原始标距长度；

l ——拉伸试样断裂后标距长度；

F_0 ——拉伸试样原来的横断面面积；

F ——拉伸试样断裂处横断面面积。

(2) 在材料试验机上等作压缩试验时所得的出现第一个裂纹前的总压缩率 ϵ ：

$$\epsilon = \frac{H_0 - H}{H_0}$$

式中： H_0 ——压缩前的高度；

H ——压缩出现第一个裂纹时的高度。

(3) 用冲击试验所获得的冲击韧性指数 a_k 值以表示在冲击力作用下使试样破坏所消耗的功。在同一变形力作用下，消耗于金属破坏的功越大，则金属破坏时所产生的变形程度就越大。

(4) 用扭转试验时破坏前扭转 360° 角的次数来表示金属塑性的大小。

(5) 工艺弯曲试验中，以破坏前的弯曲次数来表示金属塑性大小。

三、影响金属塑性的因素

1. 金属的成分与组织影响

(1) 化学成分对塑性的影响。纯金属及呈固溶体状的合金塑性最好，而呈化合物或机械混合物状态的合金塑性最差。例如纯铁有很好的塑性，碳在铁中的固溶体（奥氏体）的塑性也很好，而当铁中存在大量化合物 Fe_3C 时金属就变脆。钢中含碳量增加时，钢的强度极限升高，而塑性指标下降，延伸性能降低。

(2) 金属组织结构对塑性影响。晶粒界面强度及金属密度越大、晶粒大小、晶粒形状、化学成分、杂质分布越均匀和金属可能的滑移面与滑移方向越多时，则金属的塑性越高。例如铸造组织是最不均匀的，所以塑性较低。

2. 温度对金属塑性的影响

一般来说，随温度升高，金属塑性增加。当温度升至低塑性区（蓝脆区、相变区和过烧温度）时，金属塑性反而降低。如图 2-16 的曲线表示随温度升高金属及合金的塑性增加。大多数碳素钢、合金钢属于这一类型。

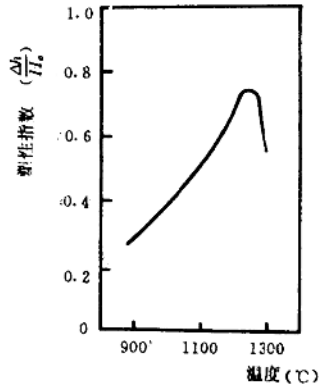


图 2-16 温度对金属塑性的影响

3. 变形速度对塑性的影响

变形速度对金属塑性影响较为复杂。一方面，当增加变形速度时，由于变形的加工硬化及滑移面的封闭，使金属的塑性降低；另一方面，随着变形速度的增加，由于消耗于金属变形的能量大部分转变为热能，而来不及散失，因而使变形金属的温度升高，使加工硬化部分地或全部得到回复而使金属的塑性增加。

根据实验结果知道变形速度对金属塑性的影响如图 2-17 所示。

4. 应力状态对金属塑性的影响

应力状态的改变，将会在很大程度上改变金属的塑性，甚至会使脆性材料产生塑性变形，或者使塑性很好的材料发生脆性破坏。当压应力越强，特别是在显著的三向压应力状态下，由于三向压应力妨碍了晶间变形，减少了晶间破坏的可能性，使塑性提高。反之，当拉应力数值越大、数目越多，特别是在显著三向拉应力状态下，由于增加了晶间破坏的可能性，而使塑性降低。

5. 变形程度对塑性的影响

冷变形时，变形程度越大、加工硬化越严重，则金属塑性降低；热变形时，随着变形程度增加，晶粒

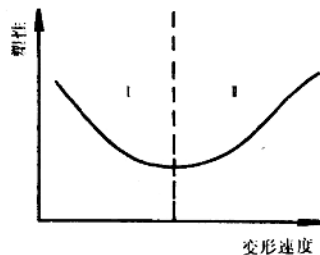


图 2-17 变形速度对塑性的影响