

MUDUAN GONGYI

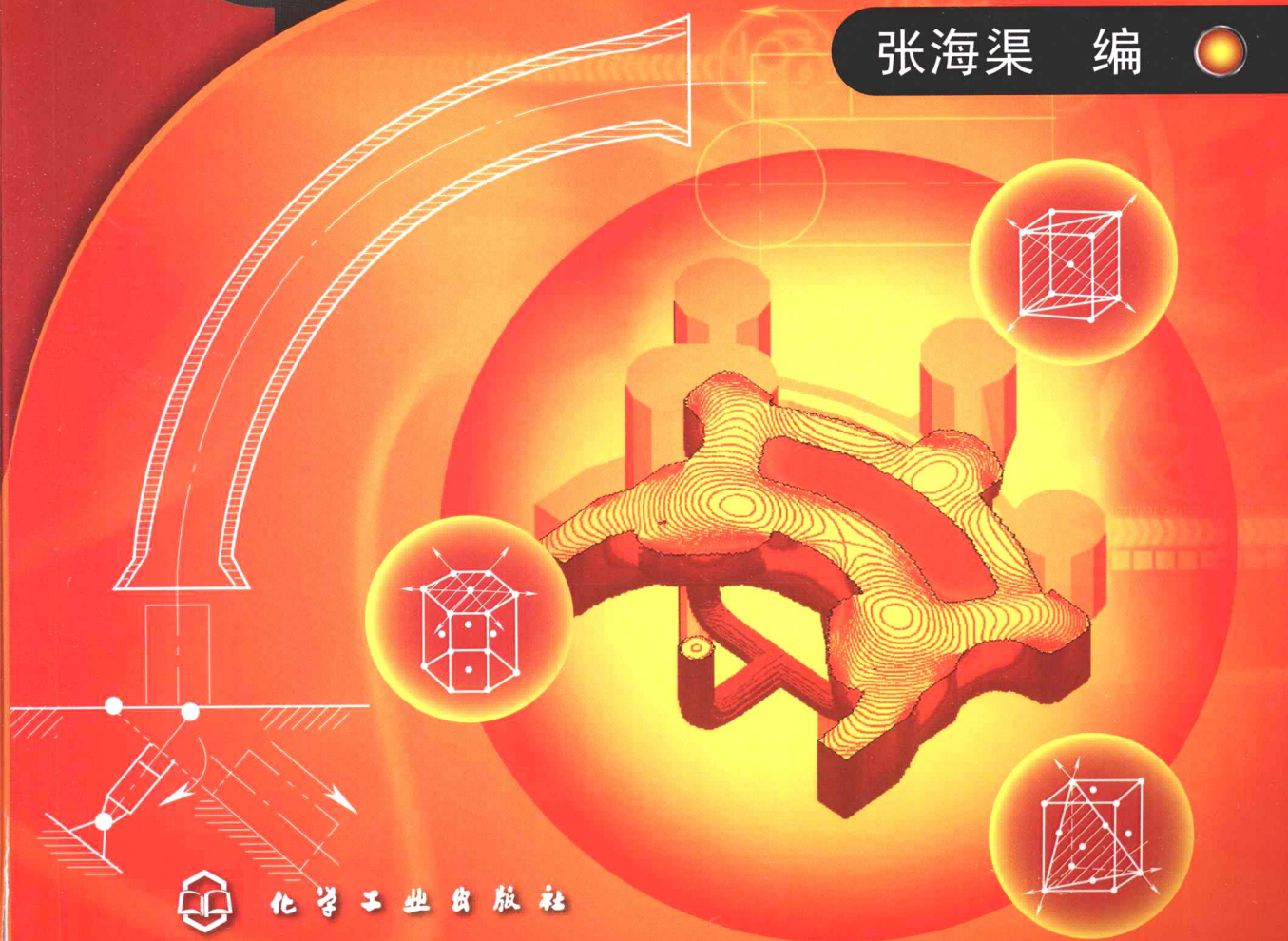
YU MUJU SHEJI

模锻工艺

与

模具设计

张海渠 编



化学工业出版社

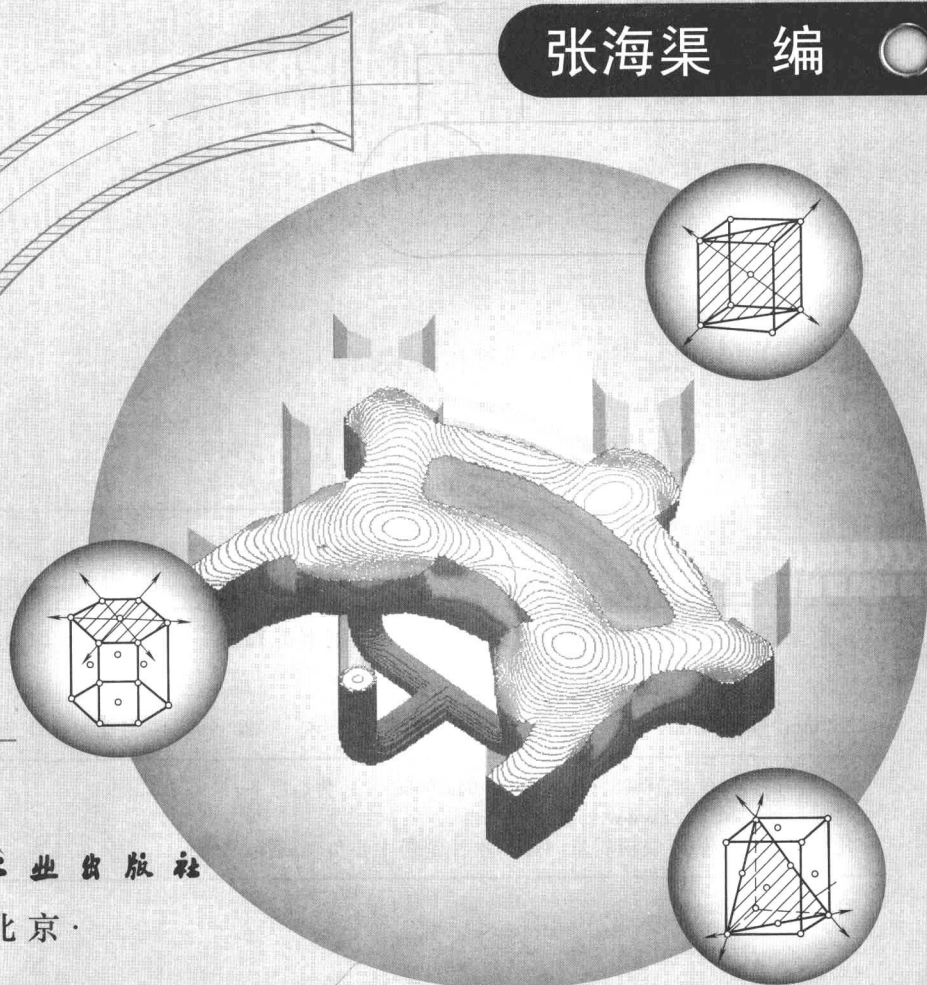
MUDUAN GONGYI
YU MUJU SHEJI

模锻工艺

与

模具设计

张海渠 编



化学工业出版社

· 北京 ·

模锻是金属材料加工方法之一,在现代制造业中占有重要的地位。本书系统地介绍了模锻加工的原理和方法、模锻设备、典型模锻工艺和模具设计、多种难锻金属的模锻工艺、特种模锻工艺以及模锻生产的优化等内容。

本书注重理论与实践结合,将经典理论与作者多年来的科研与教学成果和经验完美结合,适宜从事锻造加工生产的工程技术人员阅读,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

模锻工艺与模具设计/张海渠编. —北京:化学工业出版社, 2009.10
ISBN 978-7-122-06479-0

I. 模… II. 张… III. ①模锻②模具-设计 IV. TG316.3
TG76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 141039 号

责任编辑:邢 涛
责任校对:宋 夏

文字编辑:冯国庆
装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张21 $\frac{3}{4}$ 字数554千字 2009年10月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:58.00 元

版权所有 违者必究

前 言

锻造是金属材料加工方法之一，在现代制造业中占有重要的地位。锻造一般属于体积成形，是通过金属体积的转移和分配，来获得机器零件或接近于零件尺寸的毛坯，锻造的产品称为锻件。模锻是适合于大批量生产锻件的锻造方法。模锻时，使用特制的、开设有与锻件形状一致或相近的型腔（模膛）的锻模，将锻模安装在锻造设备上，金属毛坯置于锻模的模膛中，锻造设备通过锻模对毛坯施加载荷，使毛坯产生塑性变形，同时变形流动又受到模膛空间的限制。

金属材料通过模锻塑性成形，可以获得形状尺寸精确、表面光洁程度较高的锻件，同时其内部组织能够得到显著改善，使用性能得到提高。并且，模锻具有很高的生产率，模锻件机械加工余量较小，材料利用率较高；锻件流线分布合理，零件使用寿命长；生产操作简便。在工程应用中承受较大或复杂载荷的零件，常采用模锻方法进行大批量生产。

模锻成形在国民经济各个领域得到了广泛应用。例如汽车、拖拉机、机械、航空、航天、军工等领域，某些需要考虑形状尺寸和内部质量的稳定性，以及有某些特殊性能要求的零件，也经常采用模锻方法生产。由于社会需求和生产技术的进步，各种先进的、特殊的模锻方法不断产生和发展。例如精密模锻、液态模锻、粉末锻造、摆动辗压、自动辗环、高速模锻、超塑模锻等，所加工的材料，也从普通钢和一般的有色金属，发展到特殊钢、高温合金、铝镁合金、钛合金、复合材料等。

锻造是历史久远的生产行业，也是飞速发展的学科领域，从依靠简单机械装置驱锤的古老锻造模式，发展到以高压蒸汽、压缩空气、液体等多种介质驱动多种锻造机器，使用多样化模具体系进行的近现代模锻生产，进而到采用计算机控制的、全自动的、集成化模锻生产线或柔性锻造加工系统，传统的生产方式正在被先进生产方式改造、取代。因此锻造工作者需要不断“充电”来适应学科、行业的发展，本书正是针对这种需求而编写的。

本书共分九章，分别介绍了模锻加工的变形力学、金属学原理；在基本模锻设备上进行的模锻工艺和模具设计；多种难锻金属的模锻特点；多种具有某些特点，能够实现普通模锻难以达到要求的模锻方法；现代模锻生产中常见的优化方法，包括模锻机械化、模锻过程模拟仿真以及模具 CAD/CAM 技术。

本书编写过程中得到许多同行的指点和建议，陈川、张照璇、梁悦参与了本书资料的收集整理工作，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中不足之处恳请读者批评指正。

张海渠

2009 年 7 月

目 录

第一章 模锻成形原理	1	第三节 锻造加热规范	54
第一节 模锻变形的力学、金属学		一、锻造温度范围	54
基础	1	二、加热规范曲线	56
一、模锻力学中的基本概念和规律	1	第四节 少无氧化加热	59
二、金属单晶体的塑性变形	5	一、快速加热	59
三、多晶体及合金的塑性变形	8	二、介质保护加热	60
四、金属的热塑性变形行为	11	三、少、无氧化火焰加热	62
第二节 金属的塑性	15	第五节 火焰加热炉与加热温度测定	64
一、塑性和塑性指标	15	一、火焰加热炉的基本组成	64
二、影响塑性的主要因素	16	二、生产中常用的火焰加热炉	66
第三节 模锻基本变形方式	19	三、加热温度的测定	67
一、镦粗变形	19	第三章 模锻基本设备	70
二、压入变形	20	第一节 锤类模锻设备	70
三、拔长变形	20	一、蒸汽-空气模锻锤的结构与工作	
四、冲孔变形	21	原理	70
五、弯曲变形	23	二、蒸汽-空气模锻锤的主要零	
六、扭转变形	23	部件	73
七、挤压变形	23	三、液气锤	75
八、开式模锻	25	第二节 热模锻压力机	77
九、闭式模锻	27	一、工作原理和特点	77
第四节 模锻变形流动的控制	29	二、结构类型	78
一、模锻时金属的流动方向	29	三、工作部件	79
二、变形的不均匀性与协调性	32	第三节 平锻机	84
三、变形区和刚端金属的互相影响	33	一、结构和工作原理	84
四、主作用内力理论	35	二、主要技术规格	88
五、折叠	36	第四节 螺旋压力机	88
六、摩擦与润滑	38	一、工作原理和特点	88
第二章 模锻变形前工序	41	二、摩擦压力机	89
第一节 模锻原毛坯的制备	41	三、液压螺旋压力机	93
一、模锻原材料	41	第五节 模锻液压机	94
二、模锻的下料方法	43	一、工作原理	94
第二节 加热的目的、方法和质量		二、工作特点	97
控制	47	三、主要技术参数	97
一、加热的目的	47	四、主要部件	98
二、加热的方法	48	第四章 锤上模锻	101
三、加热缺陷及防止措施	50	第一节 锤上模锻概述	101

一、锤上模锻的特点	102	一、模锻工艺特点	165
二、锤上模锻工艺制订的主要 内容	103	二、模锻件分类和锻件图	165
三、模锻件分类	103	三、模锻变形工艺	166
第二节 模锻件图设计	104	四、锻模设计	167
一、分模面设计	104	五、螺旋压力机规格	170
二、加工余量、锻件公差和锻造 余块	105	六、典型锻件工艺举例	171
三、模锻斜度	109	第三节 平锻机上模锻	171
四、圆角半径	110	一、模锻工艺特点	171
五、冲孔连皮	111	二、模锻件分类和锻件图	172
六、技术条件	112	三、顶锻规则和聚集工步	174
第三节 模锻模膛设计	113	四、平锻件的模锻工艺	176
一、模锻变形工步和模膛的分类	113	五、平锻机吨位选择	181
二、终锻模膛设计	114	六、平锻模	181
三、预锻模膛设计	117	七、典型锻件平锻工艺举例	187
第四节 制坯模膛设计	120	第六章 模锻变形后工序	189
一、制坯工步选择	120	第一节 锻件的冷却	189
二、制坯模膛设计	125	一、锻后冷却缺陷	189
第五节 原毛坯计算与设备吨位 选择	133	二、锻件的冷却规范	191
一、原毛坯计算	133	第二节 切边和冲孔	192
二、模锻锤吨位选择	134	一、切边和冲孔的方式	192
第六节 锤锻模结构设计	135	二、切边模	193
一、模膛的布排	135	三、冲孔模和切边冲孔复合模	198
二、错移力的平衡与导向	138	四、切边和冲孔力的计算	200
三、模块的结构及尺寸	140	五、切边、冲孔模材料	200
四、锻模的结构形式与安装	143	第三节 模锻件热处理	200
第七节 锤锻模设计实例	144	一、普通热处理方法	201
一、短轴类锻件设计实例	144	二、锻件形变热处理	201
二、长轴类锻件设计实例	147	第四节 校正	203
第五章 其他设备上模锻	152	一、校正及分类	203
第一节 热模锻压力机上模锻	152	二、校正模膛的设计特点	204
一、模锻工艺特点	152	第五节 精压	204
二、模锻件分类	153	一、精压与精压机	204
三、锻件图设计的特点	154	二、精压工艺	205
四、变形工步及工步图设计	155	三、精压件图和精压毛坯图	207
五、确定原毛坯尺寸	158	第六节 表面清理	207
六、设备吨位选择	159	一、表面清理的作用	207
七、锻模结构特点	160	二、表面清理方法	208
八、典型锻件工艺举例	164	第七节 模锻件的质量检验	209
第二节 螺旋压力机上模锻	165	一、影响模锻件质量的主要因素	209
		二、模锻件质量检验的主要方法	211
		第七章 特殊金属模锻	214
		第一节 不锈钢的模锻	214

一、不锈钢的分类和可锻性	214	速锤	261
二、不锈钢的锻造特点	215	三、高速锤模锻工艺	261
三、不锈钢模锻生产要点	216	第四节 辊锻	263
四、锻造不锈钢的锻模材料	218	一、辊锻概述	263
第二节 铜合金的模锻	218	二、辊锻机	264
一、铜合金及其可锻性	218	三、辊锻变形流动过程	266
二、铜合金的加热	219	四、辊锻工艺和模具设计	268
三、铜合金模锻生产要点	221	五、辊锻模的结构及模具材料	269
第三节 铝合金的模锻	223	第五节 横轧	269
一、铝合金及其可锻性	223	一、楔横轧	270
二、铝合金模锻生产要点	223	二、螺旋横轧	271
三、粗晶问题	225	第六节 环形件辗压	273
第四节 钛合金的模锻	226	一、特点和工作原理	273
一、钛合金及其可锻性	226	二、变形流动和工艺参数	274
二、锻造温度和变形参数	227	第七节 径向锻造	275
三、锻模设计特点	229	一、工作原理及金属变形流动	275
四、钛合金模锻生产要点	230	二、径向锻造设备	276
第五节 高温合金的模锻	232	第八节 粉末锻造	278
一、高温合金及其可锻性	232	一、工艺过程和特点	278
二、高温合金的晶粒尺寸	234	二、粉末锻造实例	279
三、高温合金模锻生产要点	235	三、高温合金的粉末锻造	279
第六节 镁合金的模锻	237	第九节 摆动辗压	280
一、镁合金及其可锻性	237	一、工作原理和特点	280
二、镁合金锻造生产要点	238	二、摆辗机	281
三、镁合金特殊模锻技术	240	三、摆辗技术参数	283
第八章 特殊模锻	242	四、摆辗时金属的变形流动	284
第一节 精密模锻	242	第十节 液态模锻	285
一、精密模锻的特点和方法	242	一、成形方法和特点	285
二、精密模锻的变形温度	243	二、成形机理	286
三、锻件的精度	244	三、工艺参数	287
四、精密模锻的模具设计	245	四、液态模锻用的模具	288
五、精密模锻实例	248	第十一节 等温模锻	291
第二节 挤压	249	一、成形机理和特点	291
一、挤压变形流动	249	二、成形设备和模具	291
二、挤压件的质量	250	三、润滑	292
三、挤压工艺参数	252	第十二节 超塑性模锻	292
四、挤压模具设计	253	一、金属的超塑性	292
五、径向挤压	256	二、超塑性的力学特性	293
六、静液挤压	257	三、影响超塑性的主要因素	294
第三节 高速模锻	258	四、超塑性变形机理	295
一、高速成形对变形流动的影响	258	五、超塑性模锻的应用	296
二、专用的高速模锻设备——高		第九章 模锻生产优化技术	298

第一节 模锻机械化与自动化	298	第二节 模锻成形过程模拟仿真	321
一、剪切下料的机械化	298	一、物理模拟	321
二、毛坯加热的机械化	300	二、数值模拟	322
三、锤上模锻机械化	305	第三节 锻模 CAD/CAM 技术	328
四、压力机上模锻机械化	309	一、锻模 CAD/CAM 特点	328
五、锻件切边机械化	313	二、锻模 CAD 系统的组成	329
六、平锻机上锻造机械化	316	三、锻模数控加工原理	332
七、辊锻机械化与自动化	317	参考文献	336

模锻成形原理

模锻成形的实质，是通过锻模对毛坯施加外力的作用，毛坯吸收能量，内部产生应力分布，发生材料质点的位移和变形流动；对于热模锻，毛坯还由于被加热而吸收热能，内部产生相应的温度分布；在力能和热能的驱动下，毛坯产生外观形状尺寸以及内部组织性能的改变。

制订模锻工艺和设计锻造模具的目的，就是建立起合适的模锻热、力学条件，从而控制材料的变形流动与组织演变行为，使之向着预期的结果发展，获得优质的模锻产品。因此，正确地制订模锻工艺和设计锻造模具，首先需要了解模锻成形的理论基础，包括：模锻变形的力学、金属学基础；模锻基本的变形方式以及模锻时金属流动的规律。

第一节 模锻变形的力学、金属学基础

一、模锻力学中的基本概念和规律

1. 基本物理量

(1) 外力（载荷） 外力是重要的模锻工艺参数，外力由模锻设备借助于模具施加给毛坯。选择模锻设备、进行模具设计都需要考虑外力及其对成形的影响。

外力按照工艺作用，可以分为作用力和摩擦力。作用力按施加的速度可以分为冲击力和静压力。锻锤的作用力为冲击力；机械压力机、液压机的作用力为静压力。毛坯变形流动时，表面和模具之间产生摩擦力，摩擦力作用于接触面的切线方向，并和金属的流动方向相反。

外力又可以按照力学特征分为体力和面力（图1-1）：体力是作用在毛坯中每一个质点上的力。例如重力、磁力、惯性力等。面力是作用在毛坯表面上的力，包括集中力和分布力。

(2) 应力 金属是通过原子间的结合力而结合成为整体的。要使金属产生变形，外力就必须克服原子间的相互作用力，使原子离开平衡位置向另一个平衡位置移动。这时原子间将出现相斥或者相吸的内力来与外力抗衡。内力的微观金属学实质，是

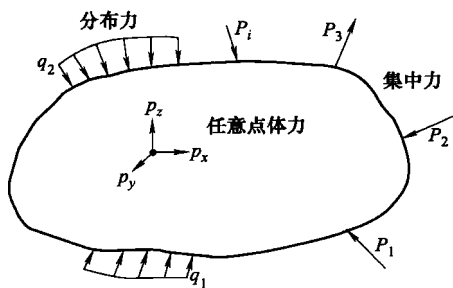


图 1-1 作用于毛坯上的外力

原子离开平衡位置，是原子间距改变的结果。从力学角度，内力定义为：各质点间的相互作用力。

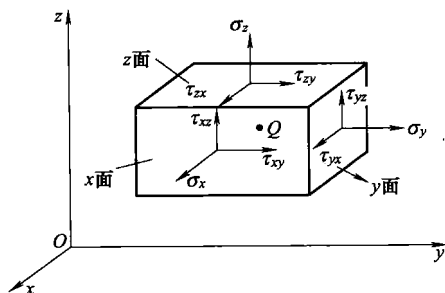


图 1-2 毛坯内某质点处的应力

如图 1-2 所示，毛坯受到外力 p_1 、 p_2 、 $\dots$ 、 p_n 的作用。设想在毛坯内某质点 Q 处，切取一个微小的平行六面体单元体，各边边长分别为 dx 、 dy 、 dz 。单元体的每个表面（微分面）上都受到内力的作用。单位面积上的内力称为应力。应力是一个矢量，可以按照坐标轴方向分解：垂直于微分面的分量称为正应力，用符号 σ 表示；平行于微分面的分量称为剪应力，用符号 τ 表示。于是，每个微分面作用有一个正应力分量和两个剪应力分量。取单元

体三个互相垂直的微分面，共有 9 个应力分量： σ_x 、 σ_y 、 σ_z ； $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ 、 $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ 、 $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ 。

各应力分量符号下面的两个角标，第一个角标表示该应力分量作用面的法线方向，第二个角标表示该应力分量的作用方向。例如： τ_{xy} 是作用在法线为 x 方向的微分面上，沿 y 轴方向的剪应力。正应力的作用面法线方向与该正应力的作用方向总是一致的，因此简写为一个角标即可，例如 σ_x 。

这 9 个应力分量代表了质点 Q 处的受内力情况，称为“应力状态”，简记为 σ_{ij} 。

(3) 应变 毛坯内某质点处发生的变形大小用“应变”表示。如图 1-3 所示，在质点 P 点处取单元体，毛坯变形后，单元体的位置从 P 移到了 P_1 处，同时，棱边尺寸发生伸长或缩短，棱边之间夹角也发生改变。

棱边单位长度的伸长称为正应变，例如 x 方向的棱边原长为 r_x ，变形后伸长了 δr_x ，则 x 方向的正应变为 $\epsilon_x = \frac{\delta r_x}{r_x}$ ，同理， y 方向的正应变为 $\epsilon_y = \frac{\delta r_y}{r_y}$ 。变形后， x 、 y 方向棱边之间的夹角变化了 ϕ_{xy} ，设： $\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{\phi_{xy}}{2}$ ，称为剪应变，单位是弧度。角标： γ_{xy} 表示 x 方向的棱边向 y 方向偏转的角度。推广到三维，共有 9 个应变分量： ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_z ； $\gamma_{xy} = \gamma_{yx}$ 、 $\gamma_{yz} = \gamma_{zy}$ 、 $\gamma_{zx} = \gamma_{xz}$ 。

这 9 个应变分量代表了质点 P 处的变形情况，称为“应变状态”，简记为 ϵ_{ij} 。

(4) 位移 位移是毛坯内质点位置的移动。如图 1-4 所示，设毛坯内质点 M ，变形后移到了 M' 处，则位移矢量为 MM' 。它在坐标轴 xyz 方向的投影称为质点 M 的 3 个位移分量，分别用 u 、 v 、 w 表示，简记为 u_i 。

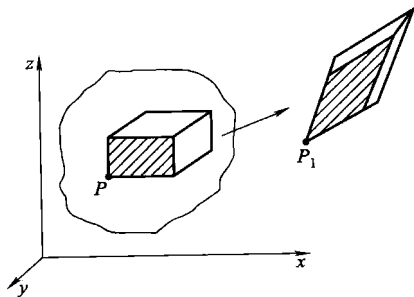


图 1-3 毛坯内某质点处的应变

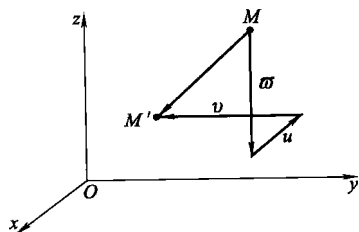


图 1-4 毛坯内质点的位移

2. 主应力、主剪应力和最大剪应力

如图 1-5 所示, 在一个质点处, 如果取不同的坐标系 (即变换不同方位切取单元体), 则 9 个应力分量的值将随之发生变化。但是, 在一定的外力条件下, 该质点的应力状态是确定的, 不会因坐标轴转换而改变。就像测量温度, 可以用华氏温度, 也可以用摄氏温度, 得到的数值不同, 但是表示的是同一个冷热状态。又像测量速度, 可以向不同方向分解分量, 但是表示的是同一个快慢状态。

在某质点 Q 处, 一定会存在着某一个方位的坐标系, 按照此坐标系方位切取的单元体上, 只有正应力, 没有剪应力。这个坐标系叫做应力主轴系。应力主轴系的三个坐标轴称为应力主轴, 用 1、2、3 轴标记; 应力主轴的方向称为应力主方向; 应力主轴系中的三个正应力称为主应力, 记作 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 。对于一个应力状态, 应力主轴系必存在且唯一。

在某质点 Q 处, 变换不同方位切取微分面, 可以找到使剪应力取极值的微分面, 称为主剪应力平面。主剪应力平面上作用的剪应力称为主剪应力。主剪应力平面共有三对, 如图 1-6 所示, 它们分别与一个主平面垂直而与另外两个主平面成 45° 角。

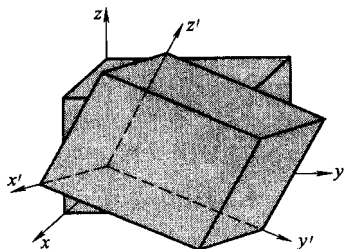


图 1-5 坐标轴转换

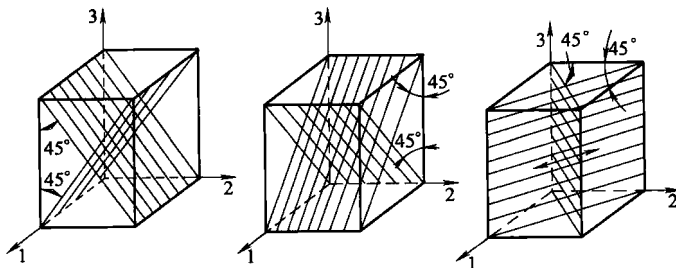


图 1-6 主剪应力平面

三个主剪应力中绝对值最大的, 就是过质点 Q 的所有方位微分面上, 剪应力最大者, 称为最大剪应力, 表示为 $\tau_{\max} = \max(|\tau_{12}|, |\tau_{23}|, |\tau_{31}|)$ 。

3. 屈服准则 (塑性条件)

材料质点处于单向应力状态 (如单向拉伸) 时, 此单向应力达到屈服极限 σ_s 时发生屈服, 开始产生塑性变形。但是当材料处于复杂受力条件下, 质点处于多向应力状态时, 就必须考虑所有方向的应力分量综合作用的效果。实验研究表明: 只有当各应力分量之间符合某一关系时, 质点才能进入塑性状态, 这种关系称为屈服准则。

目前常用的屈服准则是密席斯准则: “当材料质点处的等效应力达到 σ_s 时, 质点发生屈服。”

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = \sigma_s$$

也可以写成:

$$|\sigma_1 - \sigma_3| = \beta \sigma_s \quad (\text{设代数值 } \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3, \beta \text{ 为与 } \sigma_2 \text{ 有关的系数})$$

4. 塑性变形体积不变条件

塑性变形的机理是金属在剪应力作用下产生滑移, 原子离开原来的位置到达新的平衡位置。塑性变形不产生体积的变化。可以描述为:

$$\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = 0$$

可见塑性变形时, 三个正应变分量不可能全为正。

5. 位移速度与应变速率

材料发生了变形，从变形开始到变形结束，叫做一个变形过程。在变形过程中，每个时刻都有一个位移速度。位移速度表示为 $\dot{u}$ 、 $\dot{v}$ 、 $\dot{w}$ ，简记为 u_i 。

一个质点处所取的单元体，在变形过程中，某个极短时间阶段 dt 发生的微小应变，叫做“应变增量”，用 $d\epsilon_{ij}$ 表示。单位时间内发生的应变增量 $\frac{d\epsilon_{ij}}{dt} = \dot{\epsilon}_{ij}$ ，称为“应变速率”。

6. 真实应力-真实应变曲线

采用标准试样，在标准的材料试验机上，在恒定的变形温度、变形速度等条件下做单向拉伸试验，可以得到如图 1-7 所示的载荷 P -伸长 Δl 曲线。将纵坐标 P 除以试样瞬时真实截面积 F ，就得到真实应力（也称真实流动应力）：

$$\sigma_s = \frac{P}{F}$$

材料开始塑性变形时的真实应力称为屈服应力 σ_{s0} 。也可以将 σ_{s0} 用同一个符号 σ_s 表示，即认为材料进入初始屈服 σ_{s0} 后，继续变形就是继续屈服，后继屈服应力按照真实应力 σ_s 上升。

如图 1-8 所示，真实应变定义为：

$$\epsilon = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_1}{l_0}$$

式中 l ——试样某时刻长度；

dl ——微小时间阶段的长度改变量。

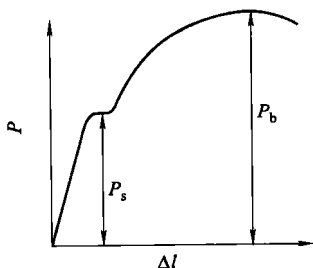


图 1-7 载荷-伸长曲线

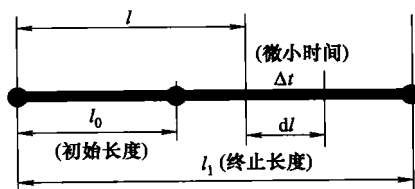


图 1-8 真实应变定义

显然，真实应变是各微小时间阶段的应变的累加。

通过拉伸实验得到的真实应力-应变曲线（ σ_s - ϵ ）形式如图 1-9 所示。一般情况下，初始屈服以后，随着塑性变形的进行，应力持续上升，即发生材料的加工硬化。应该指出，真实应力-应变曲线关系同时就是多向应力状态下，等效应力-等效应变之间的关系 $\bar{\sigma}$ - $\bar{\epsilon}$ ，实际上，拉伸试验的单向应力状态就是多向应力状态的特例。

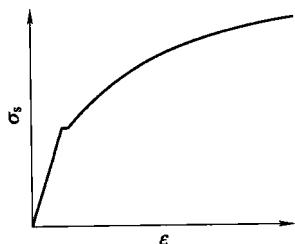


图 1-9 真实应力-应变曲线

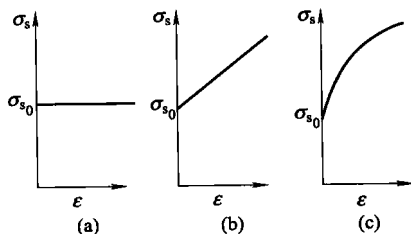


图 1-10 刚塑性模型

为了便于建立数学模型进行研究计算,常将曲线进行简化,如图 1-10 所示。一般情况下,模锻时,塑性变形程度远大于弹性变形,弹性变形可以忽略,称为刚塑性模型。钢在高温下较缓慢进行变形时,由于产生回复和再结晶,能够及时消除加工硬化,可以采用理想刚塑性的材料模型;在再结晶温度以下进行变形时,一般产生明显的硬化现象,可以采用硬化刚塑性的材料模型。

① 理想刚塑性材料模型是一条水平线:

$$\sigma_s = \sigma_{s_0}$$

② 硬化刚塑性材料模型是一条斜直线:

$$\sigma_s = \sigma_{s_0} + B\epsilon$$

③ 很多金属(例如经过退火的铁、铜、铝等)的真实应力-应变曲线可以用指数曲线表示:

$$\sigma_s = \sigma_{s_0} + B\epsilon^n$$

式中 B ——与材料有关的常数;

n ——硬化指数。

B 、 n 可以根据试验得到的真实应力-应变曲线经过数据处理得到。

二、金属单晶体的塑性变形

1. 晶体结构和缺陷

模锻成形的金属材料都是晶体。原子在晶体空间中按照几何规律做周期性的排列,用直线将各原子的中心连接起来构成空间格子,称为晶格。从晶格中选取能反映晶格特征的最小几何单元来表示原子排列规律,称为晶胞。最常见的金属晶体结构有:面心立方、体心立方和密排六方。

位向相同的一群晶胞聚合在一起,组成金属单晶体。单晶体在各方向上的原子密度不同,因此各方向上的物理、化学和力学性能也不相同,具有方向性。

实际金属的晶体内部,原子的有规律排列不像理想晶体那样完整,存在着各种缺陷。晶体中的缺陷可分为点缺陷、线缺陷、面缺陷三类。

(1) 点缺陷 点缺陷包括空位和间隙原子。在晶体中,原子以其平衡位置为中心发生振动,温度越高,振动能量越大。各原子的振动能量并不相等,呈现能量起伏的现象。能量高的原子可能跳离平衡位置,形成空位,同时可能产生一个间隙原子;空位周围的原子由于热振动获得足够的能量时,也可能跳入空位,这就使空位产生移动。空位常移向位错等其他缺陷;当空位移向表面时即消失;间隙原子与空位相遇时,两者便同时消失。如图 1-11 所示是这一类点缺陷的示意图。在一定温度下,晶体内的空位浓度保持一定的平衡值。空位和间隙原子的迁移运动,构成了金属晶体中原子的扩散,金属的热处理、蠕变和高温变形等都和原子的扩散有关。

(2) 位错 位错是晶体中的线缺陷。最简单的位错是刃型位错和螺型位错。

如图 1-12 所示,有一原子平面中断在晶体内部,像刀刃一样,使位于 ABC 面上下两部分的晶体产生错排,称为刃型位错, EF 线为位错线。中断的半原子平面如果在上部,称为正刃型位错,在下部称为负刃型位错。实际晶体中,符号相反的位错经常是同时存在的,当它们相遇时,便彼此抵消。

如图 1-13 所示,在晶体中 BC 线的右边,晶体的上、下两部分原子排列,上部相对于下部错动一个原子间距,造成上、下层原子错排的过渡地带,此地带即为螺型位错, BC 为

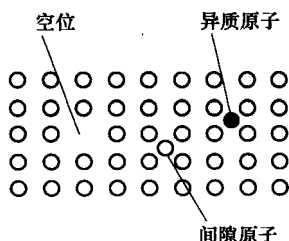


图 1-11 晶体中的点缺陷

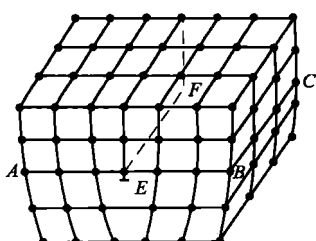


图 1-12 刃型位错

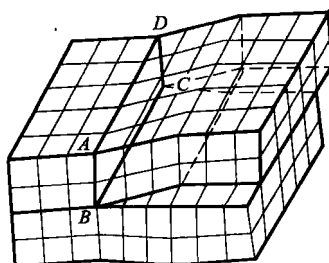


图 1-13 螺旋位错

螺旋位错线，位错线附近的晶格发生畸变。图示为右旋螺旋位错，如果错排区发生在 BC 线的左边，则形成左旋螺旋位错。

单位体积中所包含位错线的总长度称为位错密度。超纯单晶体金属的位错密度很低，经过强烈变形的金属，位错密度显著增加。

(3) 层错 层错是原子的堆积次序中出现的错排，是从正常层序中抽走一层或插入一层。层错在某些金属中容易产生，而在另一些金属中则较难产生。这是由于某些金属产生层错需要较多的能量，产生层错的概率就少，如 Al 、 Ni 等，称为高层错能金属；有些金属产生层错所需要的能量少，则容易产生层错，称为低层错能金属，如 α 黄铜、不锈钢等。

2. 单晶体的塑性变形

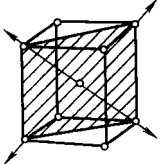
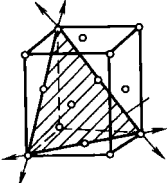
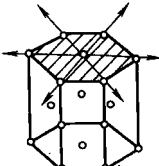
主要通过滑移和孪晶两种方式进行。

(1) 滑移 滑移是晶体的一部分沿一定的晶面和晶向相对于另一部分发生相对移动。这一晶面和晶向称为滑移面和滑移方向。滑移使大量原子从一个稳定位置移到另一个稳定位置，产生宏观的塑性变形。

一般来说，滑移总是沿着原子密度最大的晶面和晶向发生。这是因为原子密排面之间的距离较大，晶面之间的结合力较弱，滑移阻力较小。通常每一种晶胞可能存在几个滑移面，而每一滑移面又同时存在几个滑移方向。一个滑移面和其上的一个滑移方向，构成一个滑移系。每一个滑移系表示晶体滑移时可能采取的空间位向。

金属晶体的滑移系越多，则可能出现的滑移位向就越多，塑性就好。表 1-1 列出一些金属晶体的主要滑移面、滑移方向和滑移系。一般来说，面心立方和体心立方金属的滑移系较多，因此比密排六方金属塑性好。

表 1-1 一些金属的主要滑移面、滑移方向和滑移系

晶格	体心立方晶格		面心文方晶格		密排六方晶格				
滑移面	$ 110 \times 6$		$ 111 \times 4$		$ 0001 \times 1$				
滑移方向	$\langle 111 \rangle \times 2$		$\langle 110 \rangle \times 3$		$\langle 1120 \rangle \times 3$				
滑移系	$6 \times 2 = 12$		$4 \times 3 = 12$		$1 \times 3 = 3$				
金属	α -Fe、Cr、W、V、Mo		Al、Cu、Ag、Ni、 γ -Fe		Mg、Zn、Cd、 α -Ti				

滑移系的存在说明金属晶体产生滑移的可能性，要使滑移能够发生，还需要沿滑移面的滑移方向上作用有一定大小的剪应力，称为临界剪应力。临界剪应力的大小，取决于金属的类型、纯度、晶体结构的完整性、变形温度、应变速率和预变形程度等。

金属晶体受力时, 由于各个滑移系相对于外力的空间位向不同, 其所作用的剪应力分量的大小也不同, 达到临界剪应力的难易程度也不同。

(2) 孪晶 孪晶是晶体的一部分对应于一定的晶面(孪晶面)沿一定方向进行相对移动, 并且晶体位向发生变化, 以孪晶面为对称面与未移动部分构成镜面对称关系, 如图 1-14 所示。发生变形的那部分晶体称为孪晶带。当外力在孪晶面和孪晶方向所引起的剪应力达到孪晶临界剪应力值时, 便产生孪晶变形。

金属晶体究竟以何种方式进行塑性变形, 取决于哪种方式所需要的剪应力更低。一般情况下, 大多数体心立方金属, 滑移的临界剪应力小于孪晶的临界剪应力, 所以优先的变形方式是滑移。当金属滑移变形剧烈进行并受到阻碍时, 往往在高度应力集中处会诱发孪晶变形。孪晶变形后由于变形部分位向改变, 可能变得有利于滑移, 于是晶体又开始滑移, 两者交替地进行。密排六方金属, 由于滑移系少, 滑移变形难以进行, 所以经常靠孪晶方式变形; 体心立方结构金属, 如 α -Fe, 在冲击作用下或低温变形时产生孪晶; 面心立方结构金属一般不发生孪晶变形; Sb、Bi 等菱方结构金属几乎全为孪晶变形。

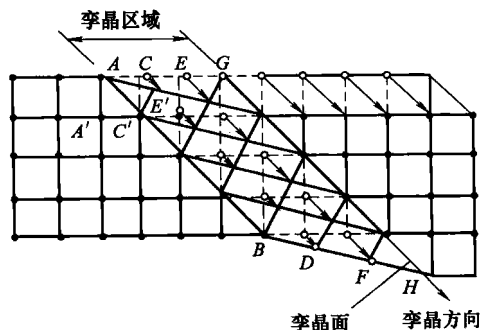


图 1-14 孪晶过程

3. 位错运动形式

晶体的滑移, 是在剪应力作用下, 通过滑移面上的位错运动进行的。一个位错移到晶体表面时, 便形成了一个原子间距的滑移量。同一滑移面上有大量的位错移到晶体表面时, 则形成一条滑移线。如图 1-15 所示是刃型位错移动时造成滑移的示意图。如图 1-16 所示是螺型位错运动时造成滑移的示意图。

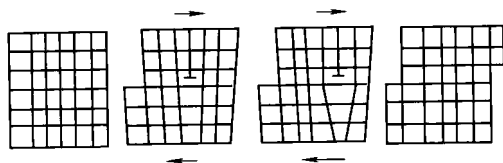


图 1-15 刃型位错运动造成滑移

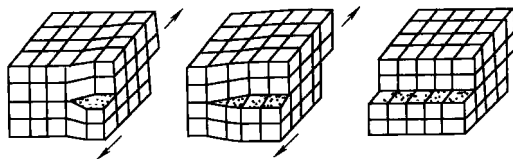


图 1-16 螺型位错运动造成滑移

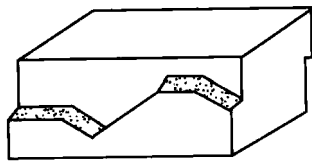


图 1-17 交滑移

刃型位错除了沿滑移面滑移外, 还可以垂直于滑移面运动, 称为攀移。位错攀移是在空位或间隙原子的扩散迁移过程中发生的, 比滑移要困难得多, 只有在较高的温度下才会发生。在滑移面上移动的螺型位错遇到相交的滑移面时, 能够在相交滑移面上继续滑移, 称为交滑移(图 1-17)。

滑移会在不同滑移平面内同时进行, 位错线在运动过程中会与其他位错线相遇而发生交割。两根刃型位错线在各自的滑移面上移动, 相遇后交割形成割阶。割阶会给位错运动造成不同的阻力。

位错线在金属晶体中经常成立体位错网络, 网络结点可能成为固定的钉扎点。晶体中两端被钉住的位错线段, 在应力作用下由于滑移而变弯, 并这种弯曲不断向前扩展, 最终形成一个位错环和一段短的位错线段。而短的位错线段在外力作用下又继续扩展, 形成位错环, 如此反复形成了位错的增殖。

移动着的位错经常会受到晶界、亚晶界、第二相或固定位错的阻碍而停留在晶体内部。跟随这个被阻位错后面的一系列位错堆积起来,叫做位错塞积。有很多位错塞积时,领先位错处可能达到破坏极限应力,成为断裂的核心。

三、多晶体及合金的塑性变形

1. 多晶体的晶体结构的特点

金属绝大部分是多晶体。多晶体是由许多结晶方向不同的晶粒组成,每个晶粒可以看成是一个单晶体,相邻晶粒晶体结构相同,但是位向不同。金属中大量不同位向的晶粒,其方向性互相抵消,因而从宏观上看,多晶体一般不显示出方向性。

多晶体中,晶粒之间由于彼此位向不同而出现晶界。实际金属材料中,相邻两晶粒的位向差一般都大于 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$,称为大角度晶界。晶界是原子排列混乱的区域,存在着大量的空位、位错及杂质等。晶界表现出许多不同于晶内的性质,如室温时晶界的强度和硬度高于晶内,而高温时则相反。

晶界处的晶格畸变大,原子偏离平衡位置,因此晶界上原子的平均能量高于晶内原子,高出的能量称为晶界能。高的晶界能有自发地向低能状态转化的趋势。晶粒的长大和晶界的平直化都能减小晶界的总面积,从而降低晶界能。温度越高,原子动能越大,有利于晶粒长大和晶界的平直化。

在实际晶体内,每个晶粒其内部的结晶学取向并不严格一致,而是存在着尺寸很小、位向差也很小的小晶块,这称为亚晶粒,其边界称为亚晶界,亚晶界是一系列位错所组成的小角度晶界。经过变形或热处理,亚晶粒的细化可以使金属强度提高。

2. 多晶体塑性变形的特点

多晶体的塑性变形比单晶体复杂,包括晶内变形和晶间变形两种方式。

晶内变形的形式也是滑移和孪晶。其中滑移变形是主要的,但在体心立方、特别是密排六方金属中,孪晶变形也起着重要作用。

晶间变形的的主要方式是晶粒之间相互滑动和转动。多晶体受力时,沿晶界处可能产生剪应力,当此剪应力克服晶粒间相对滑动的阻力时,便发生相对滑动。由于各晶粒位向不同,其变形难易程度和效果也不相同,于是在相邻晶粒间可能产生力偶,造成晶粒间的相互转动。

(1) 晶界和晶粒位向的影响 多晶体受到外力作用时,由于各晶粒位向不同,塑性变形不能在所有晶粒内同时发生,而是首先在那些位向有利、滑移系上的剪应力分量优先达到临界值的晶粒内进行。已经开始变形的晶粒中,位错将沿着最有利的滑移面运动,移到晶界处停止,一般不能直接穿过晶界,于是方向相反的位错在滑移面两端接近晶界的区域塞积起来,如图 1-18 所示。

(2) 多晶体变形的不均匀性 晶界的结构、性能不同于晶内,因此晶内和晶界之间的变形是不均匀的;各个晶粒的位向不同,软、硬取向的晶粒变形先后不一致,晶粒之间的变形也不均匀。

晶界处于不同位向晶粒的中间区域,对变形的连续性起到协调作用:抑制容易变形晶粒的变形,同时促进不利于变形晶粒的变形。多晶体变形的不均匀性,会在晶内和晶间产生不同的内应力,并在变形结束后,残留下来成为残余应力。

如图 1-19 所示是不同的总变形程度下,多晶体

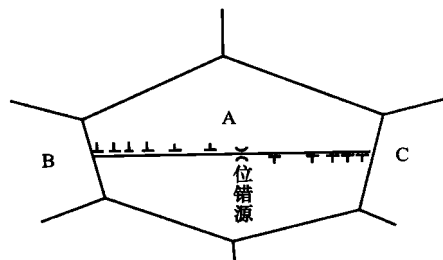


图 1-18 晶界和晶粒位向的影响

铝中一部分晶粒的变形程度。可见，不同晶粒之间的变形程度以及一个晶粒不同部位的变形程度都有相当大的差别，对一个晶粒来说，中心部位变形程度大，而晶界附近的变形程度小。

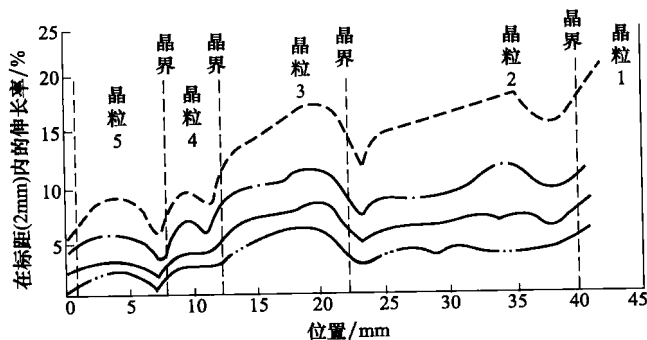


图 1-19 多晶体铝中部分晶粒的变形程度分布
总变形量：-----15%———10%——7%——4%

(3) 晶粒尺寸对性能的影响

① 晶粒细小，金属的屈服强度大。滑移由一个晶粒转移到另一个晶粒的难易，取决于晶界处位错塞积群所产生的应力场，能否激发相邻晶粒中的位错源开动起来。塞积的位错数目 n 越大，应力场就越强，而 n 值又与位错塞积群到晶内位错源的距离有关，晶粒越大，这个距离也越大，位错源开动的时间就越长， n 值也就越大。因此，粗晶粒金属的晶粒间变形转移相对容易，而细晶粒金属则需要更大的外力作用，才能使相邻晶粒发生塑性变形。如图 1-20 所示是低碳钢的晶粒大小与屈服强度的关系。

② 晶粒细小，金属的塑性好。在一定的体积内，细晶粒金属的晶粒数目比粗晶粒金属的多，因而位向有利于变形的晶粒也多，变形能较均匀地分散到各个晶粒上；细晶粒金属中晶界所占的体积比例较大，晶界的影响区域相对加大，使得晶粒心部变形与晶界处变形的差异减小。于是细晶粒组织的变形相对均匀，金属可以承受的变形程度大。如图 1-21 所示是几种钢的平均晶粒直径和断面收缩率的关系。

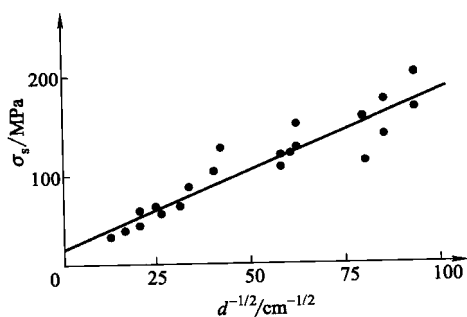


图 1-20 晶粒尺寸与屈服强度的关系

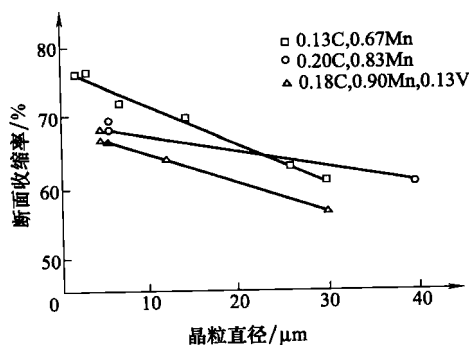


图 1-21 晶粒直径与断面收缩率的关系

因此模锻生产中通常要尽量获得具有细晶粒组织的锻件。

3. 多晶体变形后的组织和性能

(1) 组织的变化 除了出现滑移带和孪晶带等组织特征外，还有多种组织变化。

① 晶粒形状的变化 当变形程度很大时，多晶体晶粒沿同一方向显著拉长，呈现为纤维状的条纹，称为纤维组织。当金属中有夹杂或第二相质点时，它们会沿变形方向拉长成细