

高等学校“十二五”规划教材

金属锻造加工基础

程巨强 刘志学 编



YZLI0890155693

JINSHU DUANZHAO
JIAGONG JICHU



化学工业出版社

高等学校“十二五”规划教材

金属锻造加工基础

程巨强 刘志学 编



YZLI0890155693



化学工业出版社

·北京·

本书论述了金属锻造加工的基础知识,介绍金属塑性的变形及其影响因素、锻造原材料及其下料方法、锻造加热和锻后冷却规范、自由锻工艺及其方法、模锻工艺及磨具设计、主要的模锻设备及其工艺特点及锻造经济分析等,具体内容包括金属的塑性及其变形抗力,锻前加热和锻后冷却,锻造用原材料及下料方法,自由锻设备和工序,锤上模锻,模锻模具设计及材料选择,常用模锻设备及其特点,锻造加工经济性分析。

本书既可供大专院校金属锻造加工专业技术课程作教材使用,也可供从事金属锻造加工的科研人员、设计人员、质量检测人员及高等院校其他相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属锻造加工基础/程巨强,刘志学编. —北京:化学工业出版社, 2012. 2

高等学校“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-13165-2

I. 金… II. ①程…②刘… III. 锻造-教材 IV. TG31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 280584 号

责任编辑: 杨 菁 蔡 毅
责任校对: 陶燕华

文字编辑: 颜克俭
装帧设计: 史利平

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: 北京市振南印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 13 $\frac{1}{2}$ 字数 353 千字 2012 年 4 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: 27.00 元

版权所有 违者必究

前 言

锻造是金属材料塑性成形加工的重要方法之一，在现代制造业中占有重要的地位。锻件内部组织细小均匀、力学性能好，零件使用寿命长，锻造生产具有劳动生产率高、形成的锻造毛坯加工余量小、材料利用率高、节省材料等特点，广泛应用于冶金、机械、能源、汽车、宇航、船舶、军工、仪器仪表、电器、化工、日用五金等工业部门。

“金属锻造加工基础”是论述金属体积成形工艺方法和质量控制的一门技术科学。为使 学生了解锻件生产的特点和方法，满足金属材料及材料加工专业学生学习材料热加工基础的主干课程“材料加工基础Ⅱ”的需要，我们编写了该教材。

全书共九章内容，主要介绍金属塑性的变形及其影响因素、锻造原材料及其下料方法、锻造加热和锻后冷却规范、自由锻工艺及其方法、模锻工艺及模具设计、主要的模锻设备及其工艺特点及锻造经济分析等内容。

本书编写第一章到第五章由刘志学编写，第六章到第九章由程巨强编写。

由于编者学术水平所限，书中不当之处在所难免，欢迎读者指正。

编 者

2011年7月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 金属塑性成形的分类.....	1
一、体积成形.....	1
二、板料成形.....	3
第二节 金属锻造加工的特点及应用.....	3
第三节 锻造加工的基本环节.....	4
第四节 金属锻造加工的发展.....	4
第五节 课程的目的和任务.....	6
思考题与习题.....	6
第二章 金属的塑性及其变形抗力	7
第一节 金属的塑性及影响因素.....	7
一、塑性和塑性指标.....	7
二、影响金属塑性的因素.....	8
三、金属热加工状态的塑性变形.....	14
第二节 金属的变形抗力及影响因素.....	18
一、变形抗力的概念及其指标.....	18
二、影响变形抗力的因素.....	18
第三节 提高金属塑性的基本途径.....	20
思考题与习题.....	21
第三章 锻前加热和锻后冷却	22
第一节 金属锻前加热.....	22
一、锻前加热的目的.....	22
二、锻前加热的方法.....	22
第二节 金属加热过程发生的变化.....	24
一、金属及合金加热过程氧化与脱碳.....	24
二、金属及合金加热过程的过热与过烧.....	26
三、加热过程导热能的变化.....	27
四、金属及合金加热过程的应力与裂纹.....	28
第三节 金属锻造温度范围的确定.....	29
第四节 金属加热规范的制定.....	32
一、加热规范制定的原则和内容.....	33
二、钢的加热规范的制订.....	38
第五节 少无氧化加热.....	39
一、快速加热.....	39
二、介质保护加热.....	40
三、少无氧化火焰加热.....	40
第六节 金属的锻后冷却.....	40

一、锻后冷却缺陷产生的原因和防止措施	40
二、锻件的冷却方法	42
三、锻件的冷却规范	42
思考题与习题	43
第四章 锻造用原材料及下料方法	44
第一节 锻造用钢锭及型材	44
一、模铸钢锭的结构	44
二、钢锭的主要缺陷	45
三、连铸钢锭的常见缺陷	46
四、型材的常见缺陷	47
第二节 下料方法	48
一、剪切法	49
二、冷折法	51
三、锯切法	51
四、砂轮片切割法	51
五、气割法	51
六、其他下料方法	52
思考题与习题	52
第五章 自由锻设备和工序	53
第一节 概述	53
第二节 自由锻工序及锻件分类	54
一、自由锻工序	54
二、自由锻件的分类	54
第三节 自由锻基本工序分析	56
一、墩粗	56
二、拔长	60
三、冲孔	67
四、扩孔	70
五、弯曲	71
六、扭转	72
七、错移	73
八、切割	73
第四节 自由锻工艺规程的制定	73
一、自由锻工艺规程制订的原则及内容	73
二、自由锻锻件图的制订与绘制	74
三、坯料尺寸的确定	75
四、变形工艺和锻造比的确定	76
五、锻造设备的选择	77
六、自由锻工艺过程制定举例	79
第五节 大型自由锻锻件锻造的特点	81
一、锻造对钢锭组织和性能的影响	82
二、提高大型锻件质量的工艺方法	82
三、大型锻件锻造工艺实例	83

思考题与习题	86
第六章 锤上模锻	87
第一节 锤上模锻工艺特点	87
一、锤上模锻工艺特点	87
二、常用的模锻设备	88
第二节 锤上模锻方式及变形特征	88
一、开式模锻	88
二、闭式模锻	90
第三节 模锻件分类	91
第四节 模锻锻件图设计	92
一、分模面的确定	92
二、确定锻件的机械加工余量和公差	93
三、模锻斜度	95
四、圆角半径	96
五、冲孔连皮	98
六、技术条件	100
第五节 锤上模锻工艺过程	101
一、模锻工步的分类	101
二、圆饼类锻件制坯工步选择	101
三、长轴类锻件制坯工步选择	104
第六节 坯料尺寸的计算	109
一、长轴类锻件	109
二、圆饼类锻件	109
第七节 模锻吨位的计算	110
一、理论公式	110
二、经验公式	110
思考题与习题	111
第七章 模锻模具设计及材料选择	112
第一节 锻锤模型槽设计	112
一、终锻型槽的设计	112
二、预锻型槽设计	116
三、制坯型槽设计	120
第二节 锤锻模结构设计	130
一、模锻的型槽布排	130
二、错移力的平衡与锁扣设计	133
三、模块的尺寸、结构形式及其安装	135
第三节 锤锻模材料选择及使用维护	141
一、锻模材料的选择	141
二、锤锻模的使用和维护	143
三、锻锤模的失效形式及其提高使用寿命途径	144
第四节 锤锻模设计实例	146
思考题与习题	151
第八章 常用模锻设备及其特点	152

第一节 曲柄压力机模锻特点	152
一、设备结构及特点	152
二、锻件图设计特点	153
三、变形工步、工步图设计	154
四、坯料尺寸的计算	158
五、设备吨位的选择	158
六、锻模结构设计	159
第二节 螺旋压力机模锻特点	163
一、设备结构特点及模锻工艺特点	163
二、锻件图设计特点	164
三、模锻变形工艺特点	164
四、锻模结构设计	165
五、螺旋压力机吨位的确定	167
第三节 平锻机模锻特点	168
一、设备结构及模锻工艺特点	168
二、平锻机锻件分类及其锻件图设计	169
三、顶墩规则及其聚集工艺	171
四、模锻工艺	173
五、平锻机吨位选择	177
六、平锻机锻模结构及型槽设计	177
第四节 液压机模锻特点	183
一、设备及模锻工艺特点	183
二、锻件图及锻模设计特点	184
三、液压机吨位计算	185
第五节 模锻后续工序	185
一、切边与冲连皮	185
二、精压	193
三、校正	195
四、模锻件的表面清理	196
思考题与习题	197
第九章 锻造加工经济性分析	198
第一节 锻造工艺方案的确定与分析	198
第二节 锻件成本的构成及其计算	200
一、锻件成本的构成	200
二、单件成本	200
第三节 锻造工艺方案的经济性分析	202
参考文献	205

第一章 绪 论

第一节 金属塑性成形的分类

按照金属塑性成形的特点，一般将金属塑性加工分为体积成形和板料成形两大类，每类成形方法又包括各种的加工方法，形成各自的工艺领域。

一、体积成形

体积成形是在塑性变形过程中依靠坯料体积的转移和分配来实现的。这类成形又可分为一次加工和二次加工。

1. 一次加工

一次加工是冶金工业部门生产管材、板材、棒材、线材、型材等的加工方法。其塑性加工的主要方法有轧制、挤压和拉拔等。在这类成形过程中，金属变形区的形状随时间是不变的，属于稳定的变形过程，适用于大批量生产。一般大型钢厂的产品均以一次加工为主，一次加工可生产出各种形状的型材，如图 1-1 所示。下面简要介绍金属几种一次加工的成形

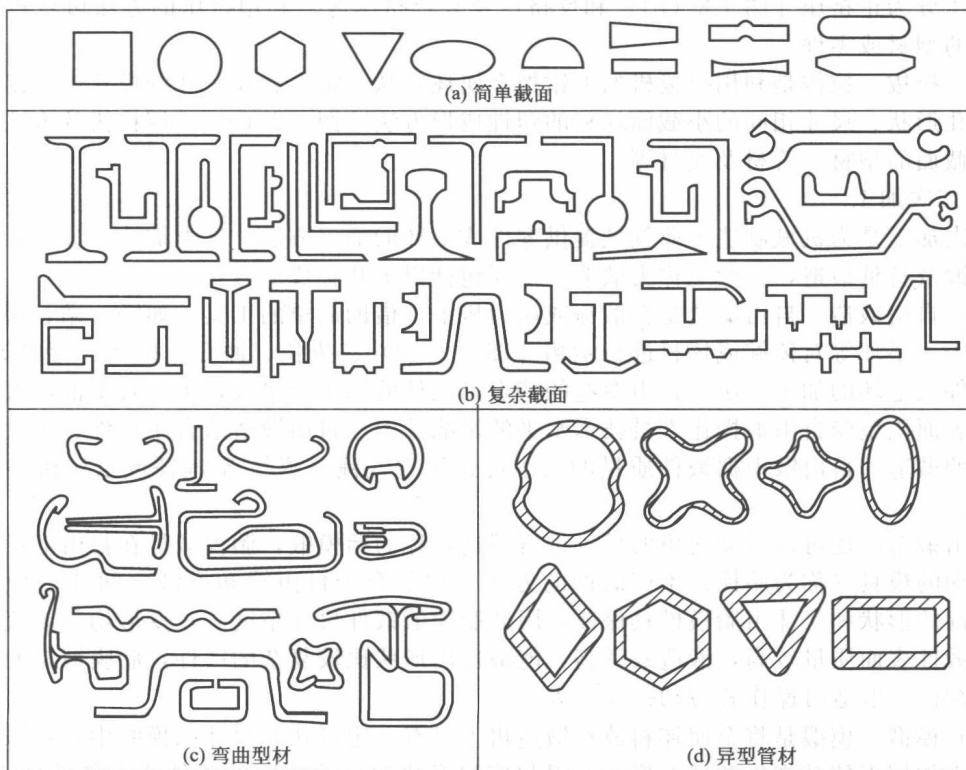


图 1-1 轧制材各种截面形式

方法。

(1) 轧制 轧制是将金属坯料通过两个旋转轧辊的特定空间使坯料产生塑性变形, 获得一定截面形状要求的塑性加工方法 [图 1-2 (a)], 是大截面坯料变为小截面坯料常用的加工方法之一。

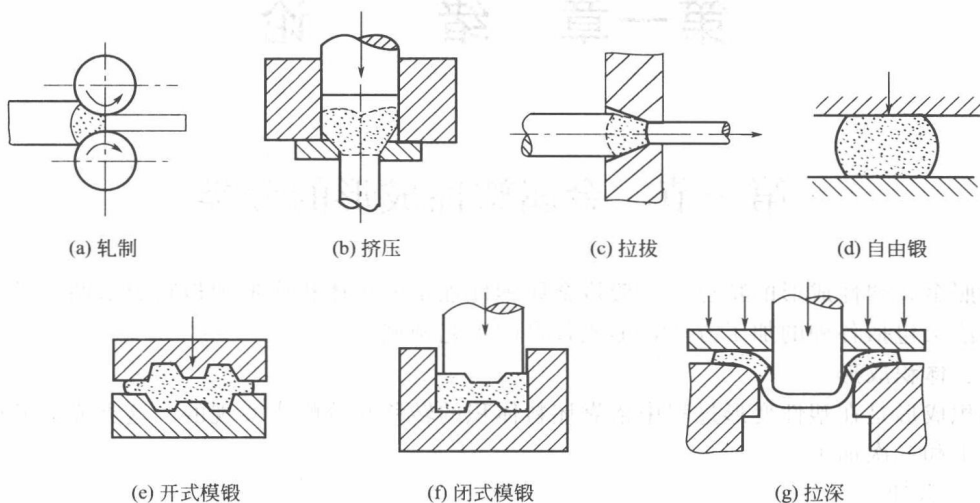


图 1-2 金属压力加工的方法和种类

(2) 挤压 挤压是在大截面坯料的后端施加一定的压力, 将金属坯料通过一定形状和尺寸的模孔使其产生塑性变形, 以获得符合模孔截面形状的小截面坯料或零件的塑性成形方法。挤压分为正挤压 [图 1-2 (b)] 和反挤压及复合挤压等。利用挤压的方法可获得各种复杂截面的型材或零件。

(3) 拉拔 拉拔是利用拉拔机的夹钳把金属坯料从一定形状及尺寸的模孔中拉出, 获得与其模孔形状、尺寸相同的小截面坯料的塑性成形方法 [图 1-2 (c)]。用拉拔的方法可以获得各种截面的型材、管材及线材等。

2. 二次加工

二次加工是为机械制造业领域提供零件或毛坯的加工方法。这类加工方法包括自由锻造、模锻及特种锻造, 一般统称为锻造, 主要包括以下几种成形方法。

(1) 自由锻造 自由锻造是在锻锤或压力机上, 借助简单的工具, 如锤、砧、型砧、棒子、冲子、垫环等对铸锭或棒材进行锻粗 [图 1-2 (d)]、拔长、冲孔、扩孔、弯曲等操作, 生产零件或毛坯的加工方法。自由锻造的特点是锻件的加工余量大, 生产效率低, 锻件力学性能和表面质量受自由锻操作人员技术水平的影响较大。自由锻造适合于单件、小批量和大型锻件的锻造。自由锻根据锻件质量的大小可选用空气锤、蒸气-空气锤或水压机等自由锻设备。

自由锻造时还可以借助简单的模具进行锻造, 称为胎模锻, 胎模锻是在自由锻设备上使用可移动的模具 (称为胎模) 生产锻件的方法。它是介于自由锻和模锻之间的一种锻造方法。锻件的形状和尺寸由胎模模具保证, 因此胎膜锻锻件尺寸精度高, 变形均匀, 流线分布合理, 锻件表面质量较高, 锻造效率高, 能锻造出形状比较复杂的锻件, 胎膜锻是通过人工搬模和翻模, 锻造时操作者劳动强度较大。

(2) 模锻 模锻是将金属坯料放在锻造机上具有一定形状和尺寸的模腔中, 在锻锤的打击或压力作用下使其产生塑性变形, 获得与模腔形状和尺寸相同的锻件或零件的加工方法。锻模的上、下模块分别固紧在锤头和砧座上, 模锻件加工余量小, 只需少量的机械加工或不

加工。模锻可分为开式模锻 [图 1-2 (e)] 和闭式模锻 [图 1-2 (f)]。由于金属成形是在一定的型腔内成形,因而模锻件外形和尺寸精度高,生产效率高,锻件内部组织均匀,锻件与锻件之间的性能变化范围小,锻件的形状和尺寸主要是靠模具保证,受模锻操作者技术水平的影响较小,模锻常用的设备有模锻锤、曲柄压力机、液压机、平锻机等。模锻生产必须借助于模锻设备和模具,对于曲柄压力机和液压机上模锻,模锻时还常需要配置自由锻或辊锻等设备制坯。模锻设备投资费用大,不适合单件和小批量锻件的生产,适用于大批量或机械化锻件的生产。

(3) 特种锻造 有些锻件采用专用设备锻造可以大幅度地提高生产率,锻件的尺寸、形状、性能等可以得到较好的保证。如螺钉、螺栓的生产采用镦头机和搓丝机,生产效率成倍地增长。利用摆动辗压生产盘形件或杯形件,可以节省设备吨位。利用旋转锻造生产棒材,其表面质量高,生产效率也较其他设备高,操作方便。特种锻造有一定的局限性,其锻造设备只能生产某一类型的产品,因此适合于生产批量大的锻件或零件生产。本书主要介绍金属锻造加工方面的基础知识。

二、板料成形

板料成形又称冲压,它是对一定厚度的板料,利用专门的模具,使金属板料通过模孔而产生塑性变形,获得所需的形状、尺寸或零件的方法。冲压类加工方法可进一步分为分离工序和成形工序两大类。分离工序用于冲压件与板料沿一定的轮廓线相互分离,包括落料、冲孔、修边等工序;成形工序用来使冲压件在不破坏的前提条件下发生塑性变形,成为所要求形状、尺寸的零件,成形工序包括弯曲、拉深 [图 1-2 (g)]、胀形、翻边等工序。板料冲压制件精度高,互换性高,生产效率高,有时用简单的机械设备能生产出其他加工方法难以生产的复杂形状的制件,如枪弹炮弹壳、行军水壶、高压气瓶等。

随着金属成形技术的进步和发展,不断涌现出新的塑性成形方法,如连铸连轧、液态锻造、等温锻造和超塑性成形等,进一步扩大了塑性成形的应用范围。

金属塑性加工按其成形温度范围可分为热成形、冷成形、温成形等。热成形是在充分进行再结晶温度以上完成的成形加工,如热轧、热锻、热挤压等;冷成形是在不产生回复与再结晶温度以下所完成的成形加工,如冷轧、冷冲压、冷挤压、冷锻等;温成形是介于冷、热成形之间的温度范围下进行的成形加工,如温锻、温挤压等。

第二节 金属锻造加工的特点及应用

金属锻造加工的实质是利用金属的塑性及其产生塑性变形的能力,借助工具或模具,在外加冲击力或压力的作用下,使坯料成形,成为具有一定的形状、尺寸,内部组织和力学性能满足要求的机械零件或毛坯的一种加工方法。

与金属的铸造、焊接、切削加工方法相比,锻造加工有如下特点。

(1) 锻件的组织、性能得到改善 金属经过锻造加工后,其内部组织发生显著的变化,如炼钢生产的钢锭,其内部常存在疏松、晶粒粗大、组织不均匀、成分偏析等缺陷,经过锻造等压力加工后组织中的疏松得到锻合,内部致密,打碎粗大的枝晶,细化晶粒,改善偏析。坯料通过锻造形成得到的锻件,形状、尺寸稳定性好、纤维组织合理、组织细化,改善第二相的分布,锻件的塑性、冲击韧度、疲劳性能等得到很大的提高,而且锻件与锻件之间性能变化幅度小。

(2) 材料的利用率高 锻造加工是利用金属在塑性状态下通过体积转移来实现成形,获得一定形状尺寸的锻件,不产生切削,只有少量的工艺废料,材料的利用率高。

(3) 尺寸精度高 金属锻造加工得到的工件可达到很高的尺寸精度，锻件的加工余量小，不少锻造成形方法已达到少或无切削的要求。如精密锻造的伞齿轮，其齿形部分的精度可达到不经切削加工而直接使用，精锻叶片的复杂曲面可达到只需磨削的精度。

(4) 锻造工艺灵活，既可单件生产，又可大批量生产，生产率高 对于自由锻，可进行批量较小或单件的锻造生产，目前自由锻是大型锻件主要的锻造加工方法。对于模锻，由于锻造加工设备的不断发展及机械化、自动化程度的提高，模锻生产具有较高的生产效率，适用于大批量生产。如在 120000kN 的热模锻压力机上锻造一根汽车用六拐曲轴仅需 40s；锻压工艺中的高速冲床行程次数已达到 1500~1800 次/min；在行星搓丝机上锻造加工 M5mm 的螺钉，生产效率高达 12000 件/min。

由于金属锻造加工的上述特点，金属锻造加工已广泛应用于各个工业部门零件的生产。如机床零件中，锻件重量占 60%，汽车零件中 60%~70% 由锻造加工而成，占重量的 80%，飞机制造业中锻造及其板料成形零件占 80%，如 A380 民航客机的起落架成形，需要在 750000kN 的压力机上锻造完成。电力工业中的大型发电机的转子、护环、汽轮机轴等均为锻件，冶金工业中的轧辊、模具等部件可由锻造加工而成，兵器行业的武器传动件，如坦克、航空发动机零件中锻件占 80%。目前，锻造生产能力的大小和设备及工艺的先进程度已经成为一个国家工业水平高低的重要标志之一。

第三节 锻造加工的基本环节

实现锻造加工的基本环节如图 1-3 所示。由图可见，锻造过程的根本目的是为了获得符合图纸要求的外形、尺寸及内部组织、性能合格的锻件。而锻造加工的基本条件主要有两个：一是在变形过程中坯料承受所需的变形量而不破坏；二是力量条件，即机器通过模具向坯料施加足够大的作用力，使坯料成形。

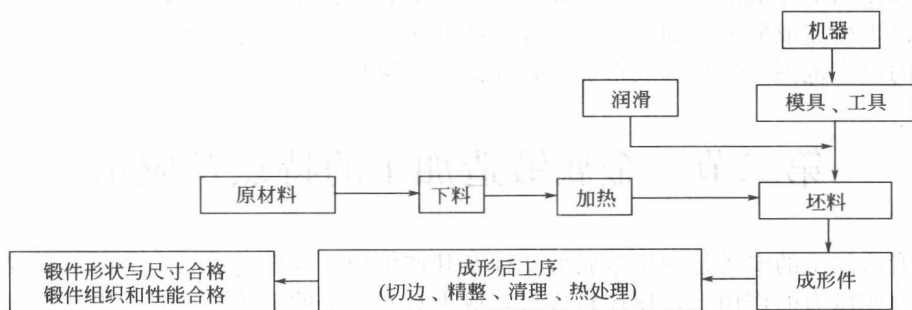


图 1-3 锻造加工过程基本环节

第四节 金属锻造加工的发展

锻造在机器制造业中有着不可替代的作用，锻造生产的锻件，其性能是其他加工方法难以与之匹敌的。一个国家的锻造水平，反映了该国家机器制造业的水平。

金属的锻造加工具有悠久的历史，锻造加工的发展主要经历了启蒙阶段、较大发展阶段，逐渐形成一门独立的应用学科。

启蒙阶段：随着人们对生产工具、日用品、武器需求而开始。从目前出土的文物判断，几千年前锻造技术就被人们所掌握，早期的锻造产品仅表现在武器、首饰及日用品方面。

较大发展时段：在工业化时期，特别是1860年第一台自由锻水压机的出现及金属塑性变形条件的屈服准则的提出，开始对金属的塑性及压力加工成形进行深入的研究，促进了锻造业的发展，如今，锻造加工业经过长期的发展，已成为一门综合性的技术学科。

我国在2500多年前的春秋时期就开始应用锻造方法制造生产工具和各类兵器，且已达到了较高的技术水平。新中国成立前，我国的锻造加工业非常落后，锻造生产基本上采用手工锻造，仅少数工厂采用小吨位的自由锻锤，生产一些形状简单的自由锻件。全国仅三四个铁路机车修理厂有几台3~5t的自由锻锤，锻造工人的劳动条件非常恶劣。

新中国成立后，锻造业是从无到有、从小到大逐步建立和发展起来的。随着国家工业体系的形成，在很多大、中型企业里建立了用近代锻压设备装备起来的锻压车间，较大的设备有5t自由锻锤、120000kN自由锻水压机、16t蒸汽-空气模锻锤、300000kN模锻水压机、10000kN螺旋压力机、120000kN热模锻压力机、20000kN平锻机、40000kN精压机、100kJ无砧座锤、63000kN液压螺旋压力机。并建造了与锻造设备相配套的加热设备，其中一些锻压车间采用了煤气和燃油加热炉，电加热炉也得到了越来越多的应用。此外，为了减轻工人的劳动强度，在一些锻造车间里还安装了锻造操作机和装、出料机械手等。目前我国工业、农业、国防产品中所需的各种锻件基本上都可以自给，其中大的自由锻件重量可达几百吨。精密锻造工艺已有了一定的发展。计算机辅助设计在锻造生产中已开始应用。

改革开放以来，我国锻造业实现了突飞猛进的发展，目前已成为锻件生产大国，锻件产量连续多年位居世界前列，现有各种锻造设备30000余台，其中自由锻设备26000余台，有万吨压力机。据2009年统计，各类锻件年产量突破770万吨，占全球产量的1/3。锻造厂家有万余家。未来几年，世界上最大的10万吨模锻液压机将落户在苏州昆山，8万吨模锻设备将落户在西安阎良国家航空产业基地。尽管如此，我国还不是锻件生产强国，部分锻造产品的高端核心技术尚未完全掌握，一些关键零部件和原材料还需要进口，综合来看，在整体产品质量、产量和技术水平方面与发达国家相比，尚存在一定差距，在我国的电站、船舶、大型机械、冶金与石化行业中，有些高端的大型锻件产品还依赖进口，严重制约了我国相关行业的发展。

与工业发达国家相比，我国的锻造生产的主要差距表现在：①装备水平差、厂家过多，力量分散，产品缺乏竞争力，科学研究投入少；②在锻造生产中模锻件所占的比重较低，如美国、英国、德国等发达国家模锻件占锻件总重量的70%以上，而我国尚不足20%；③我国锻件专业化生产线的数量和规模少于工业发达国家，而且机械化、自动化的水平也较低，在国外发达国家，锻造自动化生产发展较为迅速，现代化的大型锻造车间实现了锻造设备、操作机、吊车联动控制，并配有尺寸自动测量装置，锻造加热自动控制，计算机自动编程的自动锻造等。在锻造生产自动化方面，我国刚刚起步，需要很长的路要走。

目前锻造业发展的趋势为：①优质轻量化，主要表现为毛坯尺寸精确化、使用高强、高韧的锻件材料；②大型锻件整体化，生产专业化，主要表现在大件整体锻造成形，避免材料连接的薄弱面，建立地区性的专业化锻造中心，如轴承锻造中心、齿轮精锻中心、曲轴锻造中心、连杆锻造中心、火车轴锻造中心、台阶轴精锻中心和标准件锻造中心等，以利于企业进行技术改造及采用最新设计和先进工艺；③锻造功能剃度化，主要表现在根据工作环境、载荷大小，进行合理的锻件组织设计；④锻件精密净形化，主要表现在无余量精密成形，使锻件的形状、尺寸和表面质量最大限度地与产品零件相接近，以便进行少、无切屑加工。为此，应逐步发展和完善精密成形新技术，发展高效精密的锻压设备；⑤高效低成本化，主要表现在发展快速成形技术；⑥多学科复合化，主要表现为在材料科学、力学、数学之间广泛

交叉和复合,广泛使用 CAD/CAM 技术和计算机模拟技术。

第五节 课程的目的和任务

锻造加工基础是研究如何利用各种锻造方法有效地生产锻件或零件的一门技术学科。人们在长期锻造生产实践中,积累了丰富的经验,锻造加工基础反映了这方面的实践知识,并进行一定的理论分析,使理论知识和实际生产紧密结合,该课程内容实践性较强,要掌握本体系知识和技能,仅靠书本和课堂教学是不够的,必须结合生产实习、课程实验、练习和课程设计等来完成。

本课程学习的目的是让读者掌握金属锻造加工方面的基础知识,了解金属锻造加工的基本方法和工艺特点,为将来从事金属锻造加工的工艺设计、生产与研究及管理工作打下良好的基础。

本课程的任务是掌握金属锻造加工的基本方法,基本掌握自由锻工艺设计、模锻工艺设计及锻模设计的依据和方法;初步掌握锻造工艺分析的能力及分析和解决锻件质量问题的能力。

思考题与习题

1. 试述金属塑性成形的分类。
2. 试述金属锻造加工的特点及应用。
3. 试述锻造加工的基本环节。

第二章 金属的塑性及其变形抗力

第一节 金属的塑性及影响因素

一、塑性和塑性指标

金属的塑性是指金属在外力作用下发生永久变形而不破坏其完整性的能力。因此，塑性的高低反映金属变形能力的大小，是金属一种重要的加工性能指标。金属的塑性不是固定不变的，同一种材料在不同条件下会出现不同的塑性。影响金属塑性的因素主要有两个方面：一是金属材料本身的因素，如化学成分、变形时的组织及晶格类型等。二是外部施加的变形条件，如变形温度、变形速率、应力状态等。

衡量金属塑性高低的指标称为塑性指标。塑性指标以开始破坏时的塑性变形程度来表示，可通过各种试验来测定，如拉伸、镦粗、扭转试验等。塑性试验的方法不同，对应的塑性指标不同，塑性指标对于正确制定锻造工艺规范具有重要的参考价值。

单向拉伸对应的塑性指标是用拉伸试验测定的伸长率 $\delta\%$ 和断面收缩率 $\Psi\%$ 来表示。数学表达式如下：

$$\delta = \frac{l_K - l_0}{l_0} \times 100\%$$
$$\Psi = \frac{F_0 - F_K}{F_0} \times 100\%$$

式中 l_0, F_0 ——试样的原始标距，mm 和原始横截面面积， mm^2 ；

l_K, F_K ——试样断裂后的标距，mm 和试样断裂处的最小截面积， mm^2 。

单向拉伸试验的塑性指标中，延伸率的大小主要反映材料均匀变形的能力，延伸率越大，材料均匀变形的能力越大。断面收缩率的大小反映材料局部变形的能力，断面收缩率越大，局部变形的能力越大。材料的塑性指标越高，金属塑性越高，有利于塑性成形。

镦粗试验对应的塑性指标是用极限压缩变形程度 ϵ_K 来表示。由于比较接近锻压加工的实际变形，是一种常用的测试金属压缩变形或镦粗变形性能的方法。镦粗试验试样为圆柱体，高径比 (H/D) 为 1.5。镦粗时第一个出现表面裂纹试样的压缩程度 ϵ_K ，即为塑性指标，数学表达式为：

$$\epsilon_K = \frac{H_0 - H_K}{H_0} \times 100\%$$

式中 H_0 ——试样原始高度；

H_K ——镦粗时试样侧表面出现第一个裂纹时试样的高度。

扭转试验中材料的塑性指标是用试样破坏前的扭转角或扭转次数来表示，破坏前扭转角

越大或扭转次数越多，材料塑性越高。

金属的塑性可用塑性图来表示。塑性图是表示塑性指标（如 δ 、 ψ 、 ϵ 和冲击韧性 a_K 及扭转次数或力矩）随温度变化的曲线图，有些塑性图还给出了不同变形速度下塑性指标的变化。因此，塑性图是制定金属塑性加工温度规范的重要依据。图 2-1 是锻造试验测得的三种铝合金的塑性图。从图看出，LF21 合金在 300~500℃ 温度范围内具有很高的塑性，静载和动载下的压缩程度均在 80% 以上。中等硬度 LD5 合金在 350~500℃ 温度范围内亦具有良好的塑性，但对应变速率有一定的敏感性，静载下（实线）的压缩程度可达 80%，而动载（虚线）下约为 60%~65%。超硬铝合金 LC4 的变形温度范围较窄，且对应变速率有较大的敏感性，静载时最佳塑性温度范围为 350~450℃，相应的压缩程度为 65%~80%，而动载时最佳塑性温度范围约为 350~400℃，最大的压缩程度略低于 60%。图 2-2 是用热扭转试验所确定的几种结构钢和工具钢的塑性图。由图可见，在 900~1300℃ 范围内，三种碳含量较低的合金结构钢 30CrMnSiA、12CrNi3A 和 18CrNi4WA 的塑性随着温度的上升而提高。由于合金元素和含碳量的差异，三种低合金结构钢的高温塑性低于 15 钢，但大于三种工具钢和 GCr15 轴承钢。由图还可以看出，碳含量较低的合金结构钢最大塑性对应的温度比轴承钢、工具钢及高合金钢要高，这主要是由于后者液相点较低，过热和过烧温度较低所致。

对于一些模拟实际塑性加工过程成形性能的试验方法主要有板材的胀形试验、扩孔试验、拉深试验、弯曲试验等。通过这些实验，可获得评价各相关成形工序板料成形性能指标。

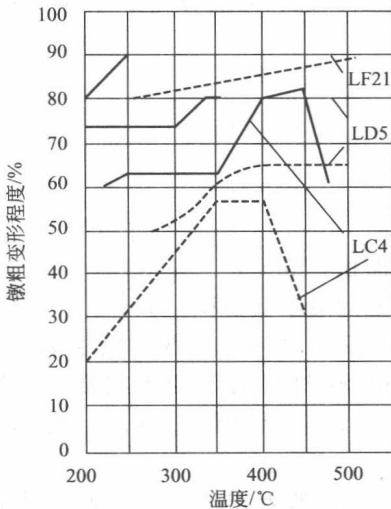


图 2-1 三种铝合金的塑性

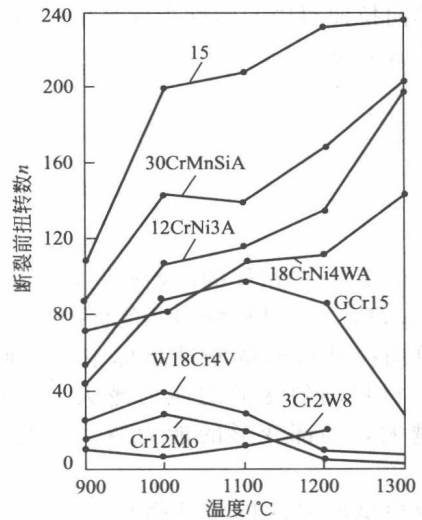


图 2-2 热扭转试验测得几种材料的塑性

二、影响金属塑性的因素

1. 化学成分对塑性的影响

化学成分对金属塑性的影响较为复杂。工业上使用的合金除基本元素外大都含有一定的杂质，有些为改善合金的使用性能而加入一些合金元素，合金元素的加入对金属塑性会产生影响。

金属的塑性随着其纯度的增加而提高，如纯度为 98% 的铝伸长率为 30% 左右，而纯度为 99.96% 铝伸长率可达 45%。

以钢为例，说明合金元素对其塑性的影响。

钢中加入的合金元素都能不同程度地溶入钢的基体形成固溶体，产生固溶强化，提高钢的变形抗力，而塑性指标有不同程度的降低。图 2-3 是一些合金元素对铁素体组织的伸长率和冲击韧度值的影响。

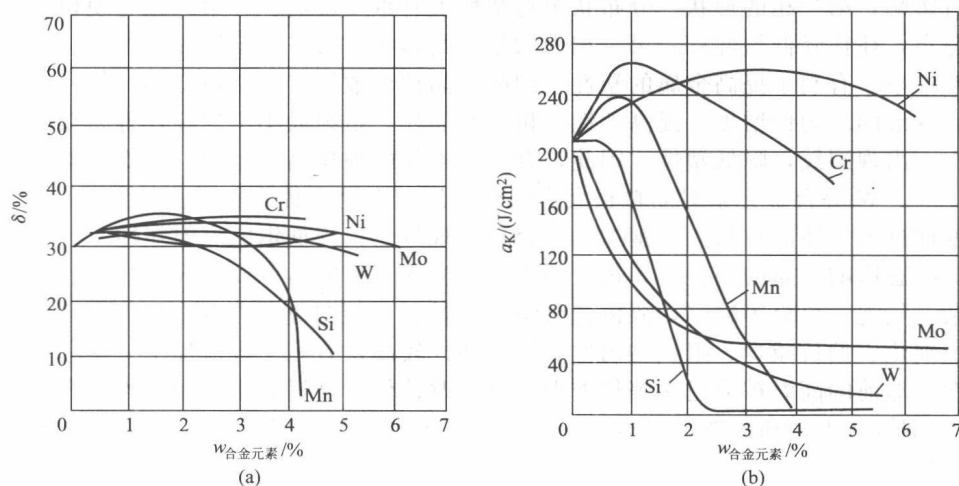


图 2-3 合金元素对铁素体组织伸长率 (a) 和韧度值 (b) 的影响

许多合金元素，如 Mn、Cr、Mo、W、Nb、V、Ti 等会与钢中的碳或氮形成硬而脆的化合物，使钢的强度提高，塑性下降。但是，这些化合物对材料强度及塑性的影响还与它们存在的形状、大小和分布状况有密切关系。如 Nb、Ti、V 等元素形成的化合物在钢中以高度弥散的细小颗粒分布时，可起到弥散强化的作用，提高钢的强度，而对塑性指标影响不大。但当化合物分布在晶界或在晶界以网状分布时，塑性降低。

碳钢中的杂质元素如硫、磷、氮、氢、氧等会产生热脆、冷脆、时效脆性及氢脆等，会使钢的塑性降低。杂质的有害作用，不仅与杂质的性质有关，而且与其存在状态及在金属基体中的分布状态有关。有些杂质元素如锡、铅、砷、锑、铋等几乎不溶于金属基体，而以单质的形式存在于晶界处，削弱晶界的结合力，降低晶界的强度，使金属热塑性变形能力显著下降，造成钢的热脆性。合金元素与杂质元素相互作用会对钢的塑性产生不同的影响。如硫在钢中常以 FeS 及 NiS 夹杂形式存在，FeS 的熔点为 1190℃，NiS 及 Ni-Ni₃S₂ 共晶体的熔点分别为 797℃ 和 645℃，Fe-FeS 及 FeS-FeO 共晶体的熔点分别为 985℃ 和 910℃。当热变形温度达到共晶体和硫化物的熔点时，晶界的共晶体会熔化，变形时容易引起开裂，产生热脆现象。若钢中加入少量的锰，改变硫化物形状，形成球状的硫化锰，因 MnS 的熔点较高 (1600℃)，可减小或避免热脆，提高钢的塑性。

加入的合金元素在塑性变形温度范围内促进单相固溶体的形成，特别是有利于获得面心立方结构的固溶体时，则改善合金的塑性。如果加入的合金元素含量及组成不合适，形成过剩相或多相组织，会引起变形的不均匀性，降低材料的塑性，如铁素体 (α) 或奥氏体 (γ) 不锈钢均为单相组织，具有良好的高温塑性，但如果成分不当，则会在铁素体组织中出现 γ 相或在奥氏体组织中出现 α 相，降低塑性，特别是在组织中形成金属间化合物或氧化物等脆性相时，塑性降低更为严重。

钢中的合金元素一般提高再结晶温度，降低再结晶速度，增加钢的硬化程度，降低塑性。

2. 组织对塑性的影响