



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



机械设计制造及其自动化

专业系列教材

材料成形 技术基础

(第二版)

西安交通大学 方 亮 王雅生 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
机械设计制造及其自动化专业系列教材

材料成形技术基础

Cailiao Chengxing Jishu Jichu

(第二版)

西安交通大学 方 亮 王雅生 主编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,教育部新世纪网络课程建设工程项目“材料成形技术基础”网络课程的配套教材,是在第1版基础上修订而成的。

本书全面介绍凝固成形、塑性成形、焊接成形、表面成形、粉末成形和塑料成形的基本原理、工艺方法和技术要点,内容上采用原理和技术并重、传统与创新兼顾的原则,力求反映当代材料成形领域的最新成就,以适应材料与机械工程领域高级人才培养的需要。

全书共分10章,第一章简要描述材料加工的分类与工艺概貌,并举例进行了说明;第二章至第四章重点分析材料加工的物理、化学基础及控制原理;第五章至第七章简要叙述传统的凝固成形、塑性成形和焊接成形的基本方法;第八章至第十章介绍表面成形、粉末成形、陶瓷成形和塑料成形方法以及这些成形技术的最新发展。各章均附有思考与练习题,书末附有参考文献。

本书可作为普通高等院校机械类各专业相关课程教材,并可与“材料成形技术基础”网络课程配合使用,进行网络教学,也可供相关工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形技术基础/方亮,王雅生主编. —2版. —北京:
高等教育出版社,2010.7

ISBN 978-7-04-029173-5

I. ①材… II. ①方…②王… III. ①工程材料-成
型-专业学校-教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第109506号

策划编辑	庚欣	责任编辑	李京平	封面设计	李卫青	责任绘图	尹莉
版式设计	张岚	责任校对	刘莉	责任印制	毛斯璐		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京机工印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 19.25
字 数 470 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2004年11月第1版
2010年7月第2版
印 次 2010年7月第1次印刷
定 价 32.30元(含光盘)

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 29173-00

第二版前言

本书是根据机械工程及自动化专业教学指导委员会确定的技术基础课程“材料成形技术基础教学大纲”,并吸取第一版的使用经验编写而成的。本书全面介绍了凝固成形、塑性成形、焊接成形、表面成形、粉末成形和塑料成形的基本原理、工艺方法和技术要点,内容上采用原理和技术并重、传统与创新兼顾的原则,力求反映当代材料成形领域的最新成就,以适应材料与机械工程领域高级人才培养的需要。

全书共分10章。第一章简要描述材料加工的分类与工艺概貌,并引出一些基本问题;第二章至第四章重点分析材料加工的物理、化学基础及控制原理;第五章至第七章简要叙述传统的凝固成形、塑性成形和焊接成形的基本方法;第八章至第十章介绍表面成形、粉末成形、陶瓷成形和塑料成形方法以及这些成形技术的最新发展。各章均附有思考与练习题,书末附有相关参考文献。

全书由方亮、王雅生主编。本书编写分工为:方亮(第一章部分、第二章、第五章、第九章)、王雅生(第一章部分、第三章、第七章、第八章)、程羽(第一章部分、第四章、第六章、第十章)。本书在编写过程中得到西安交通大学材料加工工程学科全体同仁的大力支持和热情帮助。

西北工业大学李金山教授审阅了本书,提出了非常宝贵的建议,在此表示衷心感谢。

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,主要为教育部新世纪网络课程建设工程项目“材料成形技术基础”网络课程的配套教材,用于辅助网络教学,也可作为本科、专科学生的教科书及相关技术工程人员的参考用书。

由于本书编者的水平有限,时间紧迫,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编者
2009年12月

再—版—修—订—说—明

根据前一版教材使用情况,新版教材对一些不适用的内容作了较多的增删:在绪论这一章,增加了对凝固成形、塑性成形及焊接成形工艺的概括叙述,并通过实例说明了工艺的流程和特点;第三章增加了对凝固成形和塑性成形热过程的分析与讨论;在第五章中,考虑到材料科学与工程和机械工程课程设置中有材料科学基础、机械工程材料的内容,为避免内容重复删去了凝固成形用金属材料的内容;此外在第五章、第六章和第七章中,分别增加了现代凝固成形技术、现代塑性成形技术及现代焊接成形技术的内容,同时加强了计算机在凝固成形、塑性成形和焊接成形中应用的内容。

为配合教师授课和学生学习,本书还附有一张课程教学光盘。

希望通过对相关内容的增减,使得本书更加满足教师授课和学生自学的需要。编者也希望读者能积极地对新版教材提出意见和建议,进一步改进和提高教材的质量。

编 者

2009年12月

目 录

第一章 绪论	1	五、微观偏析	31
第一节 材料加工概述	1	六、宏观偏析	32
一、材料加工概述	1	第六节 共晶合金的凝固	33
二、凝固成形、塑性成形、焊接成形特点和流程	2	第七节 金属及合金的凝固方式	35
第二节 材料成形的一些基本问题和发展概况	6	一、凝固区特性与凝固件质量的关系	35
一、凝固成型的基本问题和发展概况	6	二、凝固动态曲线与凝固方式	36
二、塑性成型的基本问题和发展概况	7	三、凝固方式的影响因素	36
三、焊接成型的基本问题和发展概况	10	第八节 凝固成型的应用	39
四、表面成型的基本问题和发展概况	12	一、铸造生产过程中的凝固控制	39
第三节 本课程的性质和任务	13	二、焊接生产过程中的凝固控制	45
第二章 材料凝固理论	14	三、陶瓷与粉末合金制备过程中的凝固现象	48
第一节 材料凝固概述	14	思考与练习	50
第二节 凝固的热力学基础	15	第三章 材料成形热过程	52
一、状态函数的概念	15	第一节 凝固成形热过程	52
二、状态函数间的关系	16	一、加热熔化的热过程特点及热效率	52
三、自发过程	16	二、冷却凝固的热过程特点及热效率	53
四、界面张力	16	第二节 塑性成形热过程	59
第三节 形核	18	第三节 焊接成形热过程	62
一、金属凝固的热力学条件	18	一、焊接热过程特点	62
二、自发形核	19	二、焊接过程热效率	63
三、非自发形核	21	三、焊接温度场	64
四、形核剂	22	四、焊接热循环	71
第四节 生长	23	思考与练习	81
一、固-液界面的结构	24	第四章 塑性成形理论基础	83
二、生长方式	25	第一节 金属冷态下的塑性变形	83
三、生长速度	27	一、冷塑性变形机理	84
第五节 溶质再分配	27	二、冷塑性变形特点	85
一、溶质再分配与平衡分配系数	27	三、冷塑性变形对金属组织和性能的影响	86
二、非平衡凝固时的溶质再分配	28	第二节 金属热态下的塑性变形	87
三、成分过冷判据	29	一、塑性变形时的软化过程	88
四、成分过冷与晶体生长形态	30	二、热塑性变形机理	89

三、塑性变形对金属组织和性能的影响	90	一、凝固成形 CAD	128
第三节 应力状态和应变状态分析	91	二、凝固成形 CAE	135
一、点的应力状态分析	91	三、凝固成形 CAM	138
二、点的应变状态分析	95	第六节 现代凝固成形技术	140
第四节 屈服准则	100	一、定向凝固	140
一、屈雷斯加屈服准则	100	二、快速凝固	143
二、密塞斯屈服准则	100	三、深过冷凝固	145
三、屈雷斯加屈服准则和密塞斯屈服准则的比较	101	四、连续铸造	146
第五节 应力状态及其影响	102	五、超常凝固	150
一、应力状态对塑性的影响	102	思考与练习	150
二、应力状态对变形抗力的影响	103	第六章 塑性成形技术	152
第六节 真实应力 - 应变曲线	103	第一节 板料成形方法	153
一、用拉伸试验绘制真实应力 - 应变曲线	104	一、冲裁	153
二、真实应力 - 应变曲线的近似数学表达式	104	二、弯曲	155
三、变形温度和应变速率对真实应力 - 应变曲线的影响	105	三、拉深	156
思考与练习	106	四、胀形	158
第五章 凝固成形技术	108	五、翻边	159
第一节 凝固成形概述	108	六、冲压模具及其结构	161
第二节 液态金属的获得	109	第二节 板料体积成形方法	162
一、铸铁合金的熔炼	109	一、锻造	162
二、铸钢的熔炼	110	二、挤压	167
三、有色合金的熔炼	111	第三节 计算机在塑性成形中的应用	170
第三节 凝固成形方法	112	一、塑性成形 CAD/CAE/CAM 概念	170
一、砂型铸造	112	二、塑性成形过程 CAE	170
二、金属型铸造	115	三、塑性成形过程模拟软件及应用	172
三、压力铸造	116	第四节 现代塑性成形技术	176
四、低压铸造	116	一、虚拟塑性成形技术	176
五、熔模铸造	117	二、基于知识的塑性成形技术	177
六、离心铸造	119	三、精密塑性成形技术	177
七、几种常用凝固成形方法评价	120	四、基于新能源、新介质和不同加载方式的塑性成形新技术	178
第四节 凝固成形件的结构设计	121	五、快速制模技术	178
一、铸造工艺对铸件结构的要求	122	思考与练习	179
二、合金的铸造性能对铸件结构的要求	124	第七章 焊接成形技术	180
第五节 计算机在凝固成形中的应用	128	第一节 典型弧焊方法	180
		一、手工电弧焊	180
		二、埋弧自动焊	183
		三、钨极氩弧焊	187
		四、熔化极气体保护焊	190
		第二节 高效弧焊技术	194

一、高效埋弧焊	194	一、固态表面强化	254
二、活性焊剂作用下钨极氩弧焊	195	二、液态表面强化	257
三、高效气体保护焊	196	思考与练习	259
第三节 压力焊及钎焊	200	第九章 粉末合金及陶瓷成形技术	260
一、电阻焊	200	第一节 粉末合金及陶瓷成形过程	
二、摩擦焊	202	概论	260
三、搅拌摩擦焊	203	一、制备原材料粉末	260
四、钎焊	206	二、成形过程	260
第四节 常用金属材料焊接	208	三、烧结过程	261
一、结构钢的焊接	209	第二节 原材料加工	261
二、不锈钢的焊接	212	一、雾化法及电解法	262
三、有色金属的焊接	216	二、粉末及其特性	263
第五节 焊接力学	219	第三节 粉末成形	266
一、焊接残余应力与焊接残余变形	219	第四节 烧结	271
二、减少及消除残余应力措施	222	第五节 粉末合金及陶瓷成形技术	
三、预防和消除残余变形措施	223	的新发展	273
四、焊接结构的脆性断裂	225	一、电火花烧结	273
五、焊接结构的疲劳强度	226	二、喷射成形	274
六、焊接结构的应力腐蚀破坏	228	三、粉末锻造	275
第六节 计算机在焊接成形中的		四、热挤压	276
应用	231	思考与练习	277
一、焊接专家系统	231	第十章 塑料成形技术	278
二、焊接数据库系统	233	第一节 塑料的组成、分类及主要成	
三、焊接数值模拟技术	234	形方法	278
四、焊接生产计算机辅助系统	236	一、塑料的组成及结构特点	278
五、焊接设备的计算机控制	237	二、塑料的分类	279
第七节 现代焊接成形技术	239	三、塑料的可加工性及主要成形方法	279
一、等离子弧焊	239	第二节 塑料成形理论基础	280
二、激光焊接	240	一、塑料的流变性	280
三、电子束焊接	241	二、塑料成形过程的物理和化学变化	281
思考与练习	242	第三节 注射成形及其模具	282
第八章 表面成形及强化技术	243	一、注射成形过程	282
第一节 表面涂层技术	243	二、典型注射模具结构	284
一、热喷涂技术	244	第四节 塑料的焊接	288
二、涂层结合机理、结构特点及喷涂		一、塑料的可焊性	288
材料	248	二、塑料的焊接成形方法	288
三、电镀、化学镀及堆焊	249	思考与练习	289
四、表面沉积	251	参考文献	291
第二节 表面改性技术	254		

第一章

绪 论

从广义的概念来说,凡囊括机械制造中零件成形的所有工艺技术都应该被称为材料成形技术,如凝固成形、塑性成形、焊接成形、机械加工、陶瓷及粉末压制和塑料成形等。习惯上,人们把机械切除加工排除在材料成形技术的范围之外,其主要依据是切除加工方法通过切除材料而成形,成形后机械零件的质量减少了;另一方面,机械加工是机械制造领域内很大的一个组成部分,从装备制造到各类加工工艺,已成为相对独立的工艺和学科门类。因此,在这里不对机械加工技术展开讨论和讲述,有兴趣者可以参考相关教材和著作。

本章首先对材料加工进行一般性的描述,然后进一步对材料成形中的凝固成形、塑性成形、焊接成形工艺概要叙述,并各举一个实例说明三种工艺的特点和主要内容,进而引出材料成形的一些基本问题,并简要介绍其发展现状。

第一节 材料加工概述

学习思考问题:

- 材料加工的基本概念是什么?
- 凝固成形、塑性成形和焊接成形的基本流程是什么?
- 本课程的性质和基本任务是什么?

一、材料加工概述

任何机器或设备都是由许许多多的零件装配而成的。这些零件所用材料有金属材料,也有非金属材料。零件或材料的加工方法多种多样,归纳起来有以下四类:

1) 成形加工 用来改变材料的形状尺寸,或兼有改变材料的性能。主要有凝固成形、塑性成形、焊接成形、粉末压制和塑料成形等。

2) 切除加工 用于改变材料的形状尺寸,主要有车、铣、刨、钻、磨等传统的切削加工,以及直接利用电能、化学能、声能、光能进行的特殊加工,如电火花加工、电解加工、超声波加工和激光加工等。

3) 表面成形加工 用来改变零件的表面状态和(或)性能,如表面形变及淬火强化、化学热处理、表面涂(镀)层和气相沉积镀膜等。

4) 热处理加工 用来改变材料或零件的性能,如退火、正火、淬火和回火等。

根据零件的形状尺寸特征、工作条件及使用要求、生产批量和制造成本等多种因素选择零件的加工方法,以达到技术上可行、质量上可靠和经济上合理。零件制成后再经过检验、装配、调试,最终得到整机产品(见图 1-1)。

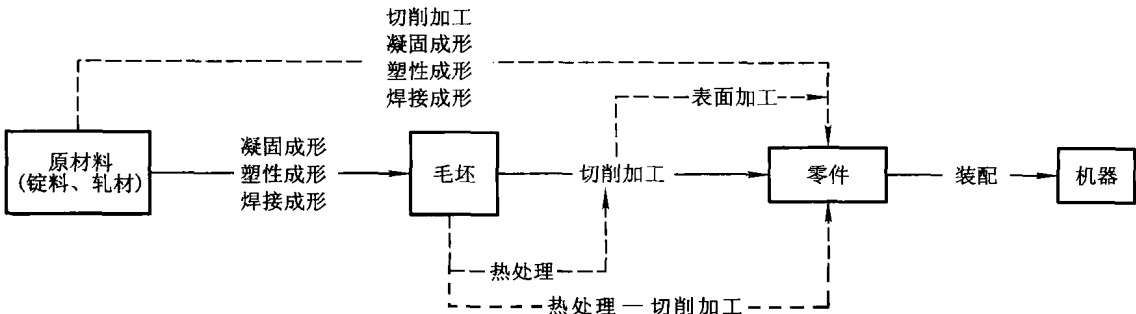


图 1-1 机械制造一般过程示意图

二、凝固成形、塑性成形、焊接成形的特点和流程

1. 凝固成形工艺

凝固成形俗称铸造(foundry),是将金属熔炼成符合一定要求的液体并浇进铸型内,经冷却凝固、清整处理后得到有预定形状、尺寸和性能的铸件的工艺过程。铸造是现代制造业的基础工艺之一。

铸造种类很多,按造型方法习惯上分为:以型砂为材料制备铸型的砂型铸造;有别于砂型铸造的其他铸造方法,例如金属型铸造、压力铸造、低压铸造、熔模铸造和离心铸造等,也称为特种铸造。

砂型铸造与特种铸造相比,其缺点是劳动条件较差,铸件质量欠佳,铸型只能使用一次,生产率也较低。优点是不受零件的形状、大小、复杂程度及合金种类的限制;造型材料来源较广,生产准备周期短,成本低。因此,砂型铸造是铸造生产中应用最广泛的一种方法,世界各国用砂型铸造生产的铸件约占铸件总产量的 80%。

铸造工艺可分为三个基本部分,即铸造金属准备、铸型准备和铸件处理。砂型铸造的铸造过程如图 1-2 所示。首先是铸造金属原料的准备以及熔炼。铸造金属原料可以是一种金属元素或加入其他金属/非金属元素而组成的合金,主要有铸铁、铸钢和铸造有色合金。金属熔炼不仅仅是单纯的熔化,还包括冶炼过程,使浇进铸型的金属在温度、化学成分和纯净度方面都符合预期要求。为了达到更高要求,金属液在出炉后还要经炉外处理,如球墨铸铁(简称球铁)的孕育、脱硫或变质处理等。熔炼金属常用的设备有冲天炉、电弧炉、感应电炉等。

与金属熔炼同时进行的是砂型的准备。常用的砂型有湿型、干型、表面干型和各种化学硬化砂型。制造砂型的工艺过程叫做造型;制造砂芯的工艺过程叫做制芯,也叫造芯。由于芯砂的工作条件比型砂更差,对芯砂的性能要求比型砂更严格,造型和造芯是铸造生产中最重要工艺过程之一。选择合适的造型(芯)方法和正确地进行造型(芯)工艺操作,以提高铸件质量、降低成本,对提高生产率有极其重要的意义。常用的混砂设备有碾轮式混砂机、逆流式混砂机和叶片沟槽式混砂机。后者是专为混合化学自硬砂设计的,连续混合,速度快。大型、重型以及质量要求高的铸件,普通砂型和砂芯均需经过烘干,以除去其水分,提高其强度和透气性,减少发气量,使

铸件不易产生气孔、砂眼、夹砂和粘砂等缺陷,从而保证铸件的质量。

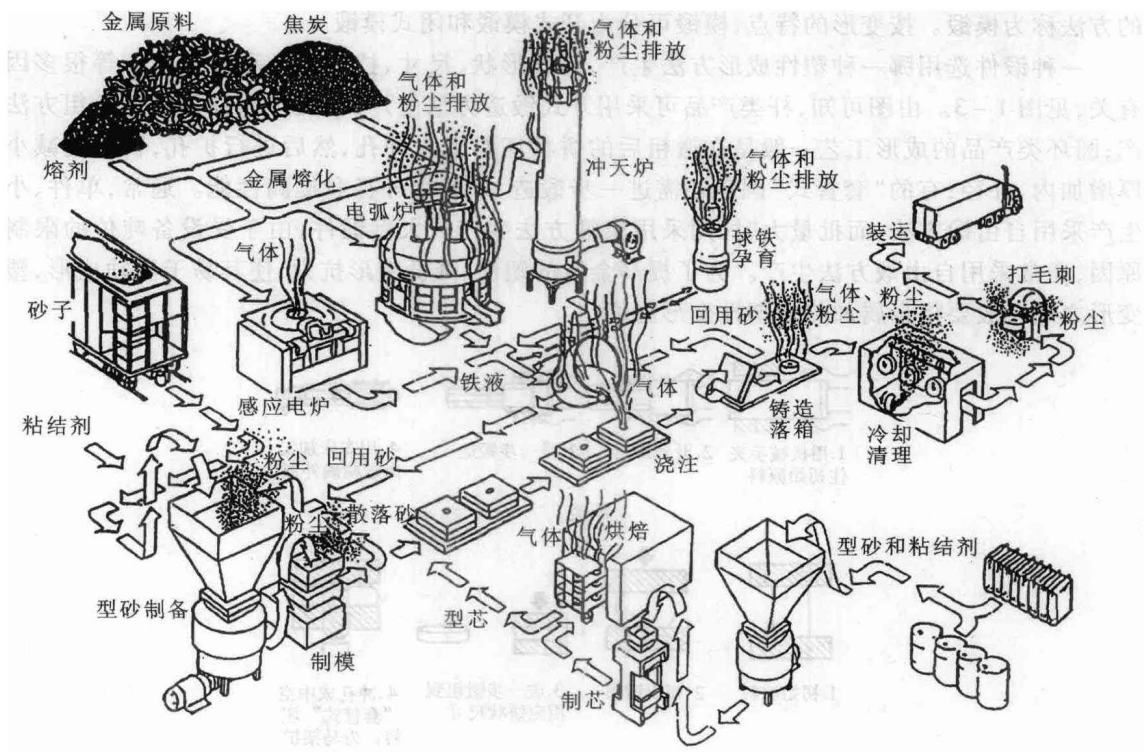


图 1-2 砂型铸造过程示意图

为了获得合格铸件,必须控制浇注温度、浇注速度,严格遵守浇注操作规程。铸件凝固冷却到一定温度后,把铸件从砂箱中取出,去掉铸件表面及内腔中的型砂和芯砂的工艺过程称为落箱。

为了提高铸件表面质量,还需进一步对铸件进行清理,切除浇冒口,打磨毛刺并进行吹砂。有些铸件因特殊要求,还要经铸件后处理,如热处理、整形、防锈处理、粗加工等。

最后装运出厂。

2. 塑性成形工艺

金属塑性成形(metal plastic forming)是利用金属材料的塑性性质进行加工,使之具有所需形状的过程。塑性成形技术可分为板料成形和体积成形两大类。具体成形方法有锻造、轧制、挤压、拉拔、冲孔、落料、弯曲、拉深、胀形和翻边等。

通过对金属坯料施加压力,使其产生塑性变形以获得具有一定力学性能、形状和尺寸锻件的加工方法称为锻造。使坯料高度减小,横截面增大的成形工序称为锻粗。使坯料横截面减小而长度增加的成形工序称为拔长。在坯料上锻制出通孔或不通孔的工序叫做冲孔。减小空心坯料壁厚而增加其内、外径的锻造工序叫做扩孔。使坯料弯成所规定外形的锻造工序称为弯曲。

目前,锻造的生产设备主要有自由锻锤、模锻锤、螺旋压力机、水压机、热模锻压力机、平锻机、无砧座锤、高速锤、扩孔机、冷锻机、热锻机、精锻机等。按所用工具的不同,锻造可分为自由锻和模锻两大类。只用简单的通用性工具,或在锻压设备的上、下砧间直接使坯料成形而获得所需锻件的方法称为自由锻。自由锻工艺过程的实质是利用简单的工具逐步改变坯料的形状、尺

寸和状态,以获得所要求形状、尺寸和性能的铸件的加工程序。利用模具使坯料变形而获得锻件的方法称为模锻。按变形的特点,模锻可分为开式模锻和闭式模锻。

一种锻件选用哪一种塑性成形方法生产,与其形状、尺寸、技术要求和批量大小等很多因素有关,见图 1-3。由图可知,杆类产品可采用开式锻造方法生产;饼类产品往往采用锻粗方法生产;圆环类产品的成形工艺一般是在锻粗后的饼状坯料上先冲孔,然后进行扩孔,目的是减小壁厚增加内、外径;有的“套管式”圆环还需进一步锻造,以减小外径和提高性能。通常,单件、小批生产采用自由锻方法;而批量大时,则采用模锻方法生产。大型锻件,由于受设备吨位的限制等原因,通常采用自由锻方法生产。为了提高金属的塑性、降低变形抗力,使其易于流动成形,塑性变形之前一般要将金属加热到塑性变形温度。

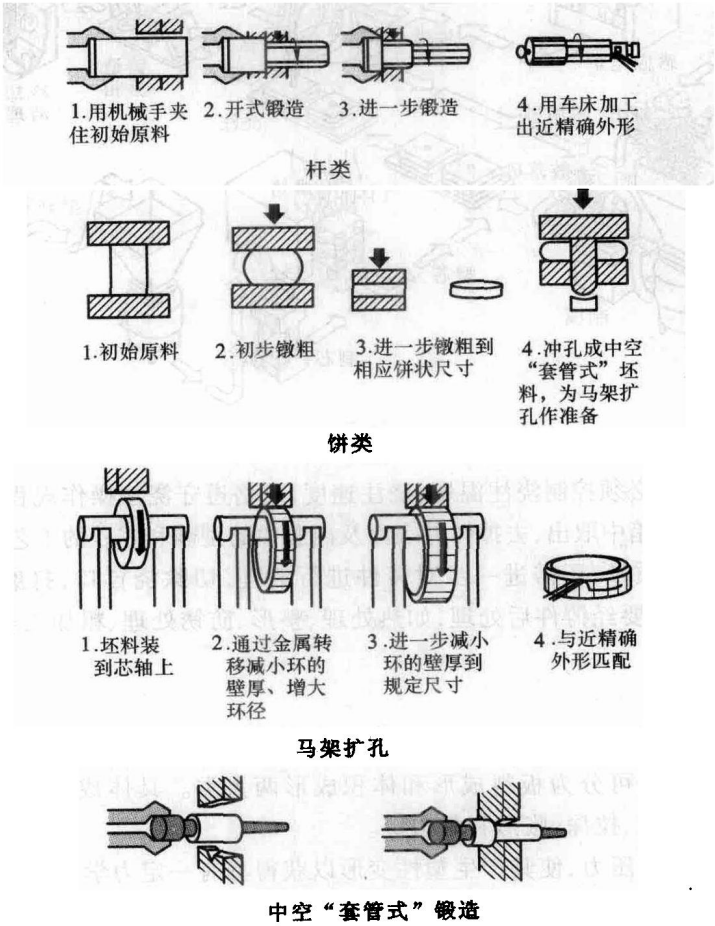


图 1-3 各种塑性成形方法

3. 焊接工艺

焊接(welding)是通过加热或加压,或两者并用,并且用或不用填充材料,使工件达到结合的一种方法。其实质就是通过适当的物理-化学方法过程,使两个分离固体表面的金属原子接近到晶格距离(0.3~0.5 nm),形成金属键,从而使两个分离的固体实现永久性的连接。

根据母材在焊接过程中是否熔化,可将焊接方法分为熔焊、固相焊和钎焊三大类。熔焊是在焊接过程中将工件接口加热至熔化状态,不加压力完成焊接的方法。熔焊时,热源将待焊两工件接口处迅速加热熔化形成熔池,熔池随热源向前移动,冷却后形成连续焊缝而将两工件连接成为一体。压焊是在加压条件下,使两工件在固态下实现原子间结合,又称固态焊接。常用的压焊工艺是电阻对焊,当电流通过两工件的连接端时,该处因电阻很大而温度上升,当加热至塑性状态时,在轴向压力作用下连接成为一体。钎焊是使用比工件熔点低的金属材料作为钎料,将工件和钎料加热到高于钎料熔点、低于工件熔点的温度,利用液态钎料润湿工件,填充接口间隙并与工件实现原子间的相互扩散,从而实现焊接的方法。

随着焊接工艺方法的发展及焊接结构形式的改进,现在不仅已经制成了各种机械化、自动化及有专门用途的自动焊机,还创造了大量的焊接辅助装置、单机自动化的焊接机械装置,焊接生产流水线和生产自动线早已成为现实。然而,由于焊接结构产品的多样化及生产过程的复杂性,目前国内焊接生产过程的机械化、自动化的程度还不是很,手工操作仍占有相当大的比例。

埋弧焊是以电弧作为热源的机械化熔焊方法,是一种常见的焊接方法。下面以埋弧焊为例介绍焊接的工艺流程。埋弧焊实施过程如图 1-4 所示,它由四个部分组成:①焊接电源接在导电嘴和工件之间用来产生电弧;②焊丝由焊丝盘经送丝机构和导电嘴送入焊接区;③颗粒状焊剂由焊剂漏斗经软管均匀地堆敷到焊缝接口区;④焊丝及送丝机构、焊剂漏斗和焊接控制盘等通常装在一台小车上,以实现焊接电弧的移动。

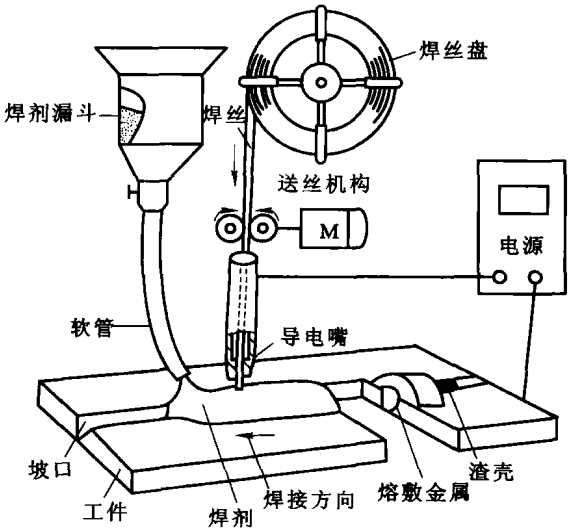


图 1-4 埋弧焊过程示意图

埋弧焊焊缝形成过程如图 1-5 所示。埋弧焊时,连续送进的焊丝在一层可熔化的颗粒状焊剂覆盖下引燃电弧。当电弧热使焊丝、母材和焊剂熔化以致部分蒸发后,在电弧区便由金属和焊剂蒸气构成一个空腔,电弧就在这个空腔内稳定燃烧。空腔底部是熔化的焊丝和母材形成的金属熔池,顶部则是熔融焊剂形成的熔渣。电弧附近的熔池在电弧力的作用下处于高速紊流状态,气泡快速溢出熔池,熔池金属受熔渣和焊剂蒸气的保护不与空气接触。随着电弧向前移动,电弧力将液态金属推向后并逐渐冷却凝固成焊缝,熔渣则凝固成渣壳覆盖在焊缝表面。焊接时焊

丝连续不断地送进,其端部在电弧热作用下不断地熔化,焊丝送进速度和熔化速度相互平衡,以保持焊接过程的稳定进行。依据应用场合和要求的不同,焊丝有单丝、双丝和多丝,有的应用中还以药芯焊丝代替裸焊丝,或用钢带代替焊丝。

埋弧焊焊剂的作用与焊条药皮相似,埋弧焊过程中,熔化焊剂产生的渣和气有效地保护了电弧和熔池,同时还可起到脱氧和掺合金的作用,与焊丝配合保证焊缝金属的化学成分和力学性能,防止焊缝中产生裂纹和气孔等缺陷。焊后未熔化的焊剂另行清理回收。

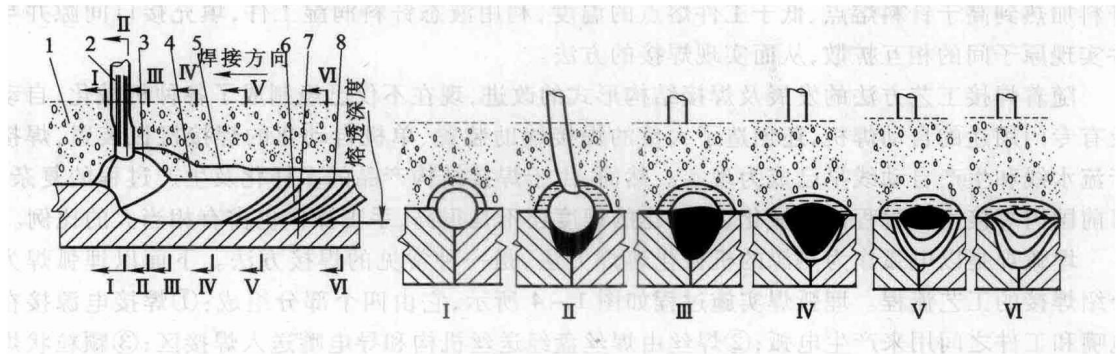


图 1-5 埋弧焊电弧和焊缝的形成

1—焊剂; 2—焊丝; 3—电弧; 4—熔池; 5—熔渣; 6—焊缝; 7—焊件; 8—渣壳

第二节 材料成形的一些基本问题和发展概况

一、凝固成型的基本问题和发展概况

1. 基本问题

凝固成形属液体金属质量不变过程,包括充填铸型和冷却凝固两个基本过程。充填(亦称浇注)是一种机械过程,而凝固则为热过程。

凝固过程中热量传递方式有传导、对流和辐射。材料所具有的热量通过这三种方式传递给铸型或环境,使其自身冷却。在此过程中,一方面将材料的几何形状固定下来,另一方面赋予材料所希望的性能信息。从微观来看,凝固就是金属原子由“近程有序”向“远程有序”或“远程无序”的过渡,成为按规则排列的晶体或无序排列的非晶体;从宏观来看,就是把液体金属所具有的热量传递给环境而凝固成一定形状和性能的固体(铸件)。

尽管凝固成形包括充填和凝固两个基本过程,但在多数情况下,凝固过程显得更重要。这是由于材料从液态一旦凝固成固体后,在后续的其他加工中几乎无法使其品质有本质的改变。但这并不等于忽视充填过程对铸件质量的影响,特别是对于某些形状的铸件或易氧化合金的成形,充填是否充分、平稳对最终质量仍有重要作用。

凝固成形方法种类繁多,但其最终目的都是为了获得健全的、满足使用要求的铸件。因此,下面的一些基本问题或关键问题应给予考虑:凝固组织的形成与控制、铸造缺陷的避免与控制、铸件尺寸精度和表面粗糙度的控制。

凝固组织包括晶粒的大小、方向和形态等,它们对铸件的物理性能和力学性能有着重大的影

响。控制铸件的凝固组织是凝固成形中的一个基本问题,能随心所欲地获得所希望的组织历来是人们追求的目标之一。但由于铸件组织的表现形式受诸多因素的影响和制约,欲控制凝固组织,就必须对其形成机理、形成过程和影响因素等有全面的了解。通过对控制原理的深入研究,目前已建立了许多控制组织的方法,如孕育、动态结晶、定向凝固等。

铸造缺陷对铸件质量是一个严重的威胁,是造成废品的主要原因。存在于铸件的缺陷五花八门,有内在缺陷和外观缺陷之分。由于凝固成形时条件的差异,缺陷的种类、存在形态和表现部位不尽相同。液态结晶收缩可形成缩孔、疏松;结晶期间元素在固相和液相中的再分配会造成偏析缺陷;冷却过程中热应力的集中可能会造成铸件裂纹。这些缺陷的成因对所有的铸造合金都相同,关键是在实际凝固成形中如何加以控制,以使铸件缺陷被消除或降至最低程度。此外,还有许多缺陷如夹杂物、气孔、冷隔等,出现在填充过程中,它们不仅与合金种类有关,还与具体成形工艺有关。总之,在各种凝固成形方法中,如何与缺陷斗争仍是一个重要的基本问题。

在现代制造的许多领域,对铸件尺寸精度和外观质量的要求愈来愈高,也正是这种要求促进了近净成形铸造技术的迅猛发展,它改变着铸造只能提供毛坯的传统观念。然而,铸件尺寸精度和表面粗糙度由于受到诸多因素(如铸型尺寸精度及型腔表面粗糙度、液体金属与铸型表面的反应、凝固热应力、凝固收缩等)的影响和制约,控制难度很大,在一种成形方法中很奏效的措施可能在另一种成形方法中毫无效果。因此,开展这方面的深入研究,以促进近净成品铸造技术的发展也是凝固成形中的一个重要问题。

2. 发展概况

凝固成形技术的发展,不仅推动着传统行业的技术进步,还为高科技产业的发展奠定了基础。从几千年前的铸造技术演变到今天的现代铸造技术或凝固成形技术,这无疑主要归功于金属凝固理论的发展、凝固技术的提高和计算机的应用。

凝固是铸件形成过程的核心,它决定着铸件的组织和缺陷的形成,因而也决定了铸件的性能和质量。近 30 年来,借助于物理、化学、金属学、非平衡热力学与动力学、高等数学和计算数学,从传热、传质和固液界面三个方面进行研究,使金属凝固理论有了很大的发展,这不仅使人们对许多条件下的凝固现象和组织特征有了深入的认识,还促进了许多凝固技术和铸件凝固成形方法的提出、发展和生产应用。例如,凝固理论已建立了铸件冷却速度和晶粒度以及晶粒度与力学性能之间的一些函数关系,从而为控制铸造工艺参数和铸件力学性能创造了条件。

控制凝固过程已成为开发新型材料和提高铸件质量的重要途径。关于凝固技术的发展,典型的代表就是定向凝固技术、快速凝固技术和复合材料的获得。此外,还有半固态金属铸造成形技术等。

计算机的应用正从各方面推动着铸造业的发展和变革,它不仅可提高生产效率和降低生产成本,还使过去许多不可能的事情变成了现实,同时又促进了新技术和新工艺的不断出现。从计算机辅助工艺设计到计算机辅助制造(凝固过程的数值模拟和快速样件制造),直至目前广泛研究的计算机组织和性能模拟等,都极大地推动着铸造业的发展。

二、塑性成形的基本问题和发展概况

1. 基本问题

塑性成形属质量不变过程,材料状态一般为固态,基本过程为机械过程——塑性变形,能源

类型主要是电能,能量传递介质一般为刚性介质——工模具,形状信息由工模具(含有一定的形状信息量)和工模具与加工材料的相对运动共同产生的,性能信息来自材料自身性质和成形过程中的转变特性。这样,尽管塑性成形过程方法多种多样,所要生产的零件或零件毛坯五花八门,都可以从上述的共同特征中引申出一些基本问题:材料的塑性、塑性成形力的评价、加工材料内部场变量的确定和形状信息的准确输入。

材料的塑性是塑性成形的前提条件,塑性好意味着材料塑性成形的适应能力强;如果材料没有塑性,则塑性成形就无从谈起。塑性除与材料自身的性质有关外,还与外部变形条件(变形温度、应变速率和应力状态等)有密切关系。因此,研究材料塑性变形的物理本质和机理、不同变形条件下材料的塑性行为和抗力行为以及塑性变形所引起的组织性能的变化等就很有必要。

塑性成形需要输入能量,即对加工材料施加外力和作功。只有对所需成形力和功的大小作出准确评价,才能正确选用加工设备和设计成形模具,并且通过对成形力影响因素的分析,可为减少成形力和节约能耗提供科学依据,求解所需的成形力,从根本上说就是确定工件的应力场,因为应力场的确定自然包括与工模具接触表面处应力分布的确定,进而就可求得成形力及模壁的压力分布。此外,应力场的确定对于分析工件内部裂纹的产生和空洞的愈合等也是必不可少的。

材料受到外力的作用而发生塑性流动时,其内部即存在位移场、应变场,这些物理场变量的确定,一方面可以用来分析材料的瞬间流动状态和形状尺寸的变化规律,为合理选择原毛坯、设计中间毛坯及模具型腔形状提供科学依据;另一方面可以分析工件的内部性能,如硬度分布、纤维组织的形成、碳化物和非金属夹杂物的破碎和再结晶晶粒度的变化等。将应力场与应变场相配合,再利用必要的判据则可进一步预测工件内部可能产生的缺陷,从而为控制产品质量提供理论依据。为确定应力场、位移场和应变场,就需要研究塑性成形力学的基本方程和求解方法等。

塑性成形需要输入形状信息,这些信息由含有形状信息量的工模具与加工材料的相对运动共同产生。对于给定的塑性成形件,采用什么工艺方法,形状信息分几个阶段输入,与其对应的模具结构和形状参数如何确定、设备系统如何选择和控制等,都将是十分重要的,也是塑性成形需要研究的基本问题。

2. 发展概况

根据加工材料的特点,塑性成形可分为板料成形和体积成形两大类。

对板料成形而言,主要向大批量生产中的高速化、自动化,小批量生产的简易化、通用化和万能化,工艺过程的模拟化和模具设计与制造的计算机化,成形零件的精密化等方向发展。

在大批量生产中着重向高速化、自动化发展,其主要表现有:①发展高速自动压力机。普通压力机的行程一般为每分钟几十次或上百次,而目前发展的高速压力机,小型的其行程高达2 000~3 000次/min,中型的也有600~800次/min。这样一台高速压力机,其生产效率相当于5~10台普通压力机,发展高速压力机并不单纯是设备自身的问题,行程次数高不一定生产效率就高。要实现生产高速化还需要解决一系列配套问题,如送料、出料、废料处理、模具寿命及监控保护、减振降噪等。②发展多工位压力机。一个板料成形件的生产总是包括多道工序,如落料、拉深、冲孔、翻边等。一般的方法是由几台设备和几套模具分别完成;而多工位压力机是将多道工序,在压力机的各个工位上由滑块的一次行程同时完成,各工位之间有送料夹钳和机械手传递坯件。在压力机的连续运转下,一次行程即可生产一个板料成形件。这样,一台多工位压力机便可代替几台甚至十几台普通压力机,目前多工位压力机吨位高达62 000 kN,它每分钟可生产十几个汽车车身零件。

③发展冲压自动线。由多台压力机配上自动装料、送料、出料、传递翻转、监控保护等辅导装置,组成一条冲压自动线。这种冲压自动线在汽车工业中得到普遍应用。例如,日本某株式会社的一条由6台压力机组成的汽车车门冲压自动线,每小时可生产汽车车门内板近800件,整条线由一人管理。又如,发电机制造行业中,也广泛用冲压自动线生产定子片和转子片。

在小批量生产中多朝简易化、通用化和万能化发展,尽量做到一机多能、一模多用,提高加工的“柔性”。在这方面可有两种基本途径:一是提高设备系统的功能,如多自由度加工机床、快换模系统和数控系统;二是从成形方法和模具着手,如采用单模、(多)点模、自适应软模甚至无模成形等。

板料成形的计算机模拟大多采用有限应变弹塑性有限元法。作为这方面的一个突出成就,是在20世纪80年代末实现了对汽车覆盖件成形过程的计算机模拟。通过计算机模拟,可以求出成形板坯的位移场、应变场、应力场、成形力,合理的原毛坯形状,预测成形缺陷和成形质量等。模具的加工和装配图样由计算机绘制,代替了手工设计的烦琐劳动。随着CAD/CAM一体化的完成,作为模具设计和制造之间的联系手段——图样,将逐渐失去其作用,由CAD系统输出的信息直接输入CAM系统,形成数控加工机床所需的信息,从而大大缩短产品的设计和制造周期,显著提高产品的质量。

为了减少后续加工、节约原材料和能源消耗,人们总是希望所加工的产品能最大限度接近成品零件。在普通冲裁中,冲裁件的尺寸精度和切面的表面粗糙度都较差,改用精冲工艺,其切面的表面粗糙度值高达 $0.8 \sim 0.2 \mu\text{m}$,尺寸精度可达IT8~IT6级。常用的精冲方法有带齿圈压板精冲、对向凹模冲裁等。板料的超塑性气压成形,可以生产形状复杂精确的壳体零件,如与扩散连接工艺相结合,还可生产形状复杂的板材结构件,用于航空航天上,使器件重量减轻。又如采用数控弯曲机的非在线控制,可及时补偿回弹,达到精密弯曲的目的。总之,开发新工艺、工艺过程的模拟化、工艺装备的数控化等都有利于提高成形件的精度。

对体积成形而言,根据不同的加工方法,其发展方向可分为自由锻方面、模锻方面和特种成形技术方面。

在自由锻方面,注意力主要集中在大型自由锻上,发展的重点是提高大锻件的质量。所采用的技术措施有:①改进冶炼和浇注技术,以提高钢锭的冶金质量,如采用真空精炼、电渣重熔、真空浇注、循环除气等。②改进锻造工艺,如采用“中心压实法”。③发展探伤技术,并用断裂力学原理计算允许的锻件裂纹尺寸或已知裂纹尺寸的安全服役期。④发展锻焊联合工艺,把大锻件分成几块锻制,然后拼焊成一体;或者将几个钢锭用电渣焊焊成一体,再锻成锻件,以解决由于电站设备容量不断加大使所需锻件和钢锭重量也相应加大的矛盾。⑤在水压机自由锻方面采用程控联动快锻,使水压机和操作机的动作按预先规定的程序相互配合、协调行动,以改善劳动条件、提高生产效率和减少的加工余量。⑥对于各种轴类锻件(包括实心轴和空心轴),发展了精密锻轴工艺和相应的具有较高自动化水平的径向锻轴机。

在模锻方面主要有:①压力机(曲柄压力机和螺旋压力机)模锻基本取代锤上模锻,因为压力机比模锻锤更适应工艺精化及实现机械化、自动化连线生产的要求。②模锻件的精度不断提高,其重要发展之一是精密模锻。精密模锻的工艺特点是对模锻的各个环节,如下料、毛坯处理、加热、冷却、模具材料和制造精度、模锻设备、工艺润滑等,都提出更加严格的技术要求,因而模锻件的形状尺寸及表面质量远比普通模锻件高。③模锻生产自动化程度日益提高,除了在热模锻