



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
荣获2002年全国普通高等学校优秀教材二等奖

第2版

材料成形技术基础

西安交通大学 邢建东 陈金德 ○ 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TB3/120

2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
荣获 2002 年全国普通高等学校优秀教材二等奖

材料成形技术基础

第 2 版

主编 邢建东 陈金德
参编 郭 成 方 亮 薛 锦 王雅生
潘希德 高义民 王立忠
主审 吴浚郊



机械工业出版社

本书将理论与工艺融为一体,较全面地介绍了凝固成形、塑性成形、焊接成形、表面成形、粉末成形和塑料成型的基本原理、工艺方法和技术要点,适当反映当代科技在材料成形领域的新成就。全书共10章,第一章采用工艺形态学的方法,对整个材料加工过程作综合性描述,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;第二~四章着重阐述材料成形所涉及的若干共性理论问题,包括液态金属的凝固理论、材料成形的热过程、塑性成形的物理及力学基础等;第五~十章分别介绍各种材料成形的工艺方法、过程分析、技术要点及相关的工艺装备和模具等。

本书适应我国当前高等工科教育专业改革和按学科(专业大类)培养学生的需要,除作为机械设计制造及其自动化专业和机械工程及自动化专业教科书外,还可作为材料工程专业教学参考书及相关技术人员的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形技术基础/邢建东,陈金德主编. —2版. —北京:机械工业出版社,2007.6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-07931-6

I. 材… II. ①邢…②陈… III. 工程材料-成型-高等学校-教材
IV. TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第084018号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:冯春生 版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

封面设计:王伟光 责任印制:洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市明辉装订厂装订)

2007年8月第2版第1次印刷

184mm×260mm·22印张·540千字

标准书号:ISBN 978-7-111-07931-6

定价:32.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639、88379641、88379643

编辑热线电话:(010) 88379715

封面无防伪标均为盗版

第2版前言

本教材自1999年第1版出版以来,已被国内许多高等院校采用,并于2002年获全国普通高等学校优秀教材二等奖。在几年的广泛教学实践过程中,许多任课教师特别是西安交通大学材料加工工程专业的任课教师和同学对该教材相关内容的组织、章节编排、内容取舍等提出了许多宝贵的建设性意见。再者,考虑到材料成形技术的不断进步,一些逐渐成熟的新技术应该在教材中有适当的反映。故此,对该教材的相关内容进行了重新编排和修订。

修订后的教材保持了原教材的特点,即:将材料成形理论与工艺融为一体,综合介绍各种材料成形技术的基本原理、工艺方法和技术要点;适当反映当代科技在材料成形领域的新成就,注意增加了近年来材料成形新技术方面的原理性介绍。本次修订的内容主要包括:①在第三章中适当增加了焊接热过程物理概念的阐述,适当减少了数学推导过程;②在第四章中增加了塑性成形力学的基本方程和求解方法,适当删除了物理基础方面的内容;③第五章中删除了“凝固成形用金属材料”和“液态金属的获得”两节,增强了砂型铸造的内容,并增加了先进凝固成形方法的内容;④在第六章中更新了“计算机在塑性成形中的应用”一节;⑤在第七章中适当增加了A-TIG焊等目前应用较广的先进焊接技术;⑥在第十章中删除了“塑料的焊接”一节,增加了“塑料成型新技术简介”一节。

参加本教材修订工作的有陈金德教授(第一、四章及第三章部分)、邢建东教授(第五、八章)、郭成教授(第六、十章)、方亮教授(第二、九章)、薛锦教授、潘希德副教授(第三章)、王雅生教授(第七、十章第四节)、高义民教授(第五章部分内容)以及王立忠副教授(第十章第四节)。本教材在修订过程中得到了西安交通大学材料加工工程系全体同仁的大力支持和帮助。全书由邢建东和陈金德教授担任主编。

本教材由清华大学吴浚郊教授主审,在审阅中对书稿提出了许多宝贵意见,谨此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,不足之处恳请读者批评指正。

编者

2007年7月于西安交通大学

第1版前言

本教材是根据机械工程及自动化专业教学指导委员会所确定的技术基础课“材料成形技术基础”教学大纲而编写的，系原机械工业部普通高等学校机电类专业“九五”规划教材。

本教材将材料成形理论与工艺融为一体，综合介绍各种材料成形技术的基本原理、工艺方法和技术要点，适当反映当代科技在材料成形领域的新成就。全书共分十章，第一章采用工艺形态学的方法，对整个材料加工过程作综合性描述，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；第二~四章着重阐述材料成形所涉及的若干共性理论问题，包括金属的凝固理论、材料成形的热过程、塑性成形的物理、力学基础等；第五~十章分别介绍凝固成形、塑性成形、焊接成形、表面成形、粉末合金与陶瓷成形以及塑料成型的工艺方法、技术要点及相关的工艺装备和模具等。各章附有思考与练习题，全书末附有参考文献，以便于学生个性发展和深入钻研。

参加本教材编写工作的有陈金德教授（第一、四章及第三章部分）、邢建东教授（第五、八章）、郭成教授（第六、十章）、方亮教授（第二、九章）、薛锦教授（第三章）和王雅生副教授（第七章、第十章第四节）。此外，张建勋教授、杨秉俭副教授、李长久教授也参加了第一章中第二节及第八章中部分内容的编写工作。本教材在编写过程中还得到西安交通大学材料成形与控制工程系全体同仁的大力支持和帮助。全书由陈金德和邢建东教授任主编。

本教材由清华大学吴浚郊教授主审，西北工业大学吴诗惇教授、王震激教授参审，三位专家对书稿提出了许多宝贵意见，谨此表示衷心的感谢。

本教材适应我国当前高等工科教育专业改革和按学科（专业大类）培养学生的需要，除作为机械设计制造及其自动化专业和机械工程及自动化专业教科书外，还可作为材料工程专业教学参考书及相关技术人员的参考读物。

由于编者水平所限，书中定有许多缺点和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

于西安交通大学，1999年11月

目 录

第2版前言

第1版前言

第一章 绪论 1

第一节 材料加工概述 1

第二节 材料成形的一些基本问题和发展概况 7

第三节 材料成形技术基础课程的性质和任务 22

第二章 材料凝固理论 23

第一节 材料凝固概述 23

第二节 凝固的热力学基础 24

第三节 形核 27

第四节 生长 33

第五节 溶质再分配 37

第六节 共晶合金的凝固 44

第七节 金属及合金的凝固方式 47

第八节 凝固成形的应用 50

思考与练习 64

第三章 材料成形热过程 66

第一节 材料成形热过程的基本特点 66

第二节 材料加热过程的热效率 71

第三节 温度场 75

第四节 焊接热循环及冶金过程 86

思考与练习 108

第四章 塑性成形理论基础 109

第一节 金属塑性变形的物理基础 109

第二节 应力状态和应变状态分析 119

第三节 屈服准则 130

第四节 塑性变形时应力应变关系 132

第五节 应力状态对塑性和变形抗力的影响 134

第六节 真实应力-应变曲线 136

第七节 主应力法 138

思考与练习 141

第五章 凝固成形技术 143

第一节 凝固成形的的基本方法 143

第二节 先进凝固成形方法 165

第三节 凝固成形件的结构设计 175

第四节 计算机在凝固成形中的应用 180

思考与练习 183

第六章 塑性成形技术 184

第一节 板料成形方法及其模具 185

第二节 体积成形方法及其模具 198

第三节 数字化塑性成形技术 212

思考与练习 225

第七章 焊接成形技术 226

第一节 焊接本质及方法分类 226

第二节 典型弧焊方法 227

第三节 压焊及钎焊 246

第四节 常用金属材料焊接 253

第五节 焊接力学 265

思考与练习 275

第八章 表面成形及强化技术 276

第一节 金属表面的物理化学特点 277

第二节 金属的表面失效 279

第三节 热喷涂及表面堆焊成形 281

第四节 表面强化原理及应用 288

思考与练习 300

第九章 粉末合金及陶瓷成形技术 302

第一节 粉末合金及陶瓷成形过程概论 302

第二节 原材料加工 303

第三节 粉末成形 309

第四节 烧结 312

第五节 粉末合金及陶瓷成形技术的新发展 315

思考与练习 318

第十章 塑料成型技术 320

第一节 塑料的组成、分类及主要成型方法 320

第二节 塑料成型理论基础 322

第三节 注射成型及其模具 328

第四节 塑料成型新技术简介 334

思考与练习 338

参考文献 340

第一章 绪 论

本章采用工艺形态学方法，对整个材料加工过程作综合性描述，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

一、机器制造一般过程

任何机器或设备，大至船舶、飞机、汽车，小至仪器、仪表，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。材料的加工方法多种多样，归纳起来有以下几类：

(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、粉末压制成形和塑料成型等。

(2) 切除加工 用来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。

选择零件的加工方法，需要综合考虑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，以达到技术上可行、质量可靠和经济上合理。零件制成后再经过检验、装配、调试，最终得到整机产品。图 1-1 给出了机器（或设备）一般制造过程的示意。

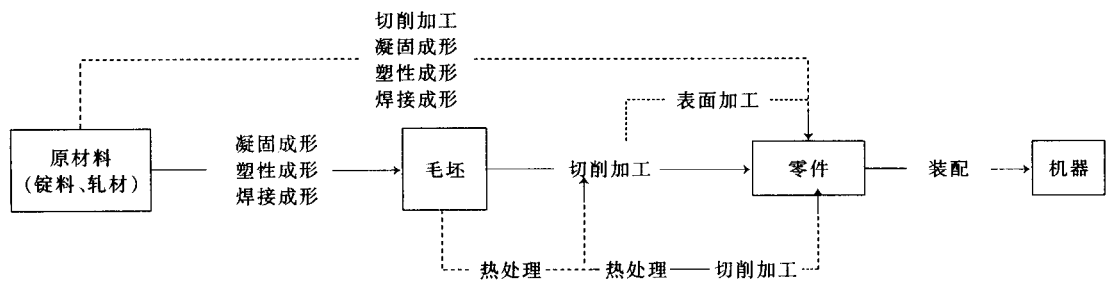


图 1-1 机器制造一般过程的示意

二、材料加工的基本要素和流程

材料加工方法种类繁多，但通过对每一种材料加工方法的过程分析表明，它们都可以用少数几个基本参数的统一模式来描述，这样就有利于对各种加工方法的综合分析和横向比较。

任何一种材料加工过程，都是为了达到材料的形状尺寸或性能的变化，或者二者兼而有之。而为了产生这种变化，必须具备三个基本要素，即材料、能量和信息。因而材料的加工过程，可以用相关的材料流程、能量流程和信息流程来描述。正是这三个流程按一定方式相互作用的结果，才产生形状尺寸或（和）性能的变化，而获得所需的零件或零件毛坯。图 1-2 给出了材料加工过程的一般模式。

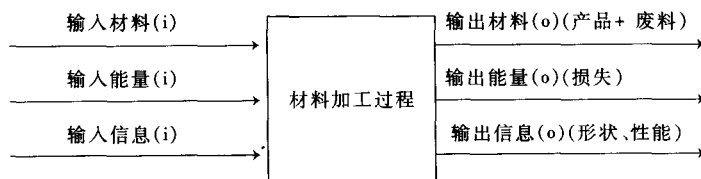


图 1-2 材料加工过程的一般模式

i—输入 o—输出

1. 材料流程

材料流程涉及：①表征加工过程特点的类型；②要改变形状尺寸和（或）性能的材料的状态；③能够用来实现这种形状尺寸和（或）性能变化的基本过程。简要介绍如下：

材料流程按照加工过程的质量变化情况可分为三种类型：直通流程（图 1-3a）、发散流程（图 1-3b）和汇合流程（图 1-3c）。不同类型的材料流程表示不同的加工过程特征。直通流程对应于质量不变过程，其特点是加工材料的初始质量等于或近似等于加工材料的最终质量，也就是说在此过程中，材料仅受控地改变自己的几何形状或（和）性能，各种凝固成形、塑性成形、粉末压制成形、塑料成型和热处理等均属于此。发散流程对应于质量减少过程，其特点是通过切除部分材料而获得形状尺寸的变化，但工件最终几何形状只能局限在输入材料的几何形体内，相应的加工方法有传统的切削加工，以及电火花加工、电解加工、热切割和冲裁等。汇合流程对应于质量增加过程，其特点是工件几何形状通过若干个“元件”装配、连接或焊接而获得，工件质量基本上等于各元件质量之和，而这些元件是用前述的一种或多种加工方法制成的。

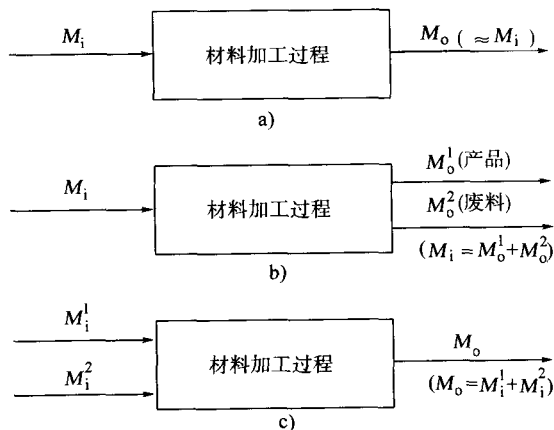


图 1-3 材料流程的三种类型

a) 直通流程 b) 发散流程 c) 汇合流程

M—材料 1、2—元件材料号码 i—输入 o—输出

材料流程与材料状态有关，不同的材料状态导致加工过程的结构差别。常见的材料状态有固态、液态和颗粒（粉末）态（颗粒态也可看成是固态的细分）。直通流程的材料状态可为固态、液态或颗粒态，发散流程的材料状态只能是固态，而汇合流程的材料状态可为固态，也可以是固态和液态兼而有之。

在每一种类型的材料流程中，用来产生形状和（或）性能变化的过程，称为基本过程。材料加工过程一般包含有三个典型阶段：

第一阶段：由一些使材料形状尺寸和（或）性能发生初步变化而处于适当状态的基本过程组成，如加热、熔化、下料等。

第二阶段：由一些用来产生所要求的形状尺寸和（或）性能变化的基本过程所组成，这种基本过程又可称为主要基本过程。

第三阶段：由一些使工件达到指定的最终状态的基本过程组成，如凝固、冷却、切飞边等。

不论处于哪个阶段的基本过程，根据该过程对材料作用性质的不同可分为三种类型：①机械过程，如弹性变形、塑性变形、脆性和韧性断裂、液体和粉末的流动、混合等；②热过程，如加热、冷却、熔化、凝固、汽化等；③化学过程，如溶解、燃烧、沉积、相变、扩散等。

任何一种材料加工过程通常由一系列的基本过程组成。例如材料成形加工中的模锻，其基本过程包括：毛坯下料（属机械过程：断裂）和加热（属热过程），模锻成形（属机械过程：塑性变形），锻后冷却（属热过程）和切飞边（属机械过程：断裂）等。

需要强调的是，材料加工中的任何一个基本过程，都与加工产品最终结果的优劣有着密切的关系，例如在凝固成形中，浇注后的凝固过程（属热过程）的合理控制，对于获得一个健全优质的铸件是至关重要的。

表 1-1 列出了一部分典型的材料加工过程，用材料流程（包括流程类型、材料状态和基本过程）表示其特征。

表 1-1 部分典型的材料加工过程的材料流程特征

材料加工过程	材料流程类型	（主要）基本过程	材料状态
凝固成形 塑性成形 粉末压制成形	质量恒定过程	机械过程：液体流动（浇注） 机械过程：塑性变形 机械过程：粉末流动（充填）和塑性变形	液 态 固 态 颗粒（粉末）态
压 焊 熔 焊 钎 焊	质量增加过程	机械过程：塑性变形 机械过程：液体流动 机械过程：液体流动	固 态 固态（焊缝为液态） 固态（钎料为液态）
切削加工 电火花加工 等离子弧切割 电解加工 火焰切割	质量减少过程	机械过程：韧性或脆性断裂 热过程：熔化及汽化 热过程：熔化 化学过程：溶解 化学过程：燃烧	固 态

2. 能量流程

为了实现上述的基本过程，必须通过传递介质向材料或工件提供能量。下面仅就机械过

程和热过程分别介绍其能量流程,包括能量的提供方法、传递介质和能源。

(1) 基本过程为机械过程的能量流程 实现此类基本过程的能量可以通过下列三种方法来提供。

1) 传递介质与加工材料之间的相对运动。传递介质的状态可以是刚性的、颗粒态的和流体状态的。切削加工中的刀具和塑性成形中的工模具即为刚性介质,通过它们与加工材料的相对运动而实现材料的切除或塑性变形,图 1-4 所示的模锻过程即为一个实例。在超声波加工中,传递介质为颗粒(磨粒)状的,通过磨粒的高速冲击而加工材料,如图 1-5 所示。静液挤压则是通过高压液体介质使金属挤压成形的,如图 1-6 所示。

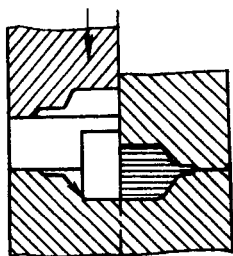


图 1-4 模锻成形

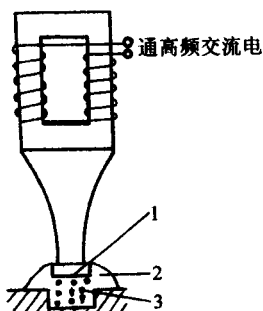


图 1-5 超声波加工
1—工具 2—悬浮液
3—刚性介质:磨粒

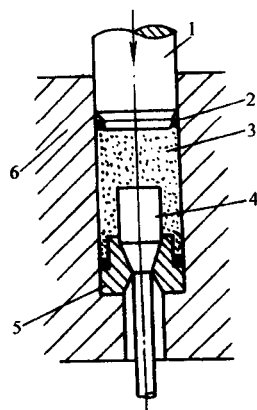


图 1-6 静液成形
1—冲头 2—密封圈 3—高压液体
4—坯料 5—凹模 6—挤压筒

2) 作用在加工材料上的压力差。板料成形中的气压胀形、液压胀形、橡胶胀形、超塑性板的气压成形、塑料的吹塑成型和真空成形等,都是借助压力差来实现的,它们的示意模型如图 1-7 所示。此时的传递介质可以是弹性体、液体和气体(包括真空状态)等。

3) 直接产生于加工材料中的质量力。此质量力可以是在重力场或磁场的作用下产生。在这种情况下,就无需考虑传递介质的问题。图 1-8 给出了由质量力产生的机械基本过程的示意。

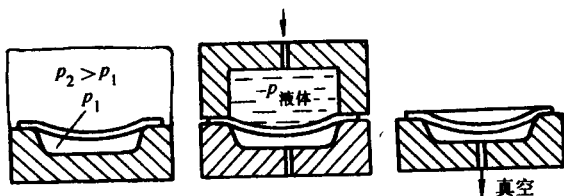


图 1-7 由压力差产生的机械基本过程

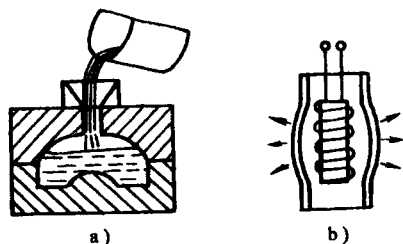


图 1-8 由质量力产生的机械基本过程
a) 浇注成形 b) 磁力成形

用来产生上述的相对运动、压力差或质量力,以实现机械基本过程的能源主要有电能

源、化学能源等。

对于电能源来说,常见的模式是电能通过电动机转变为机械能,再通过传动系统或工作机构,使刀具或工模具与加工材料发生相对运动,从而实现某一机械基本过程。许多材料加工设备即属于此范畴,图 1-9 给出了钻床进行钻削加工的示意。

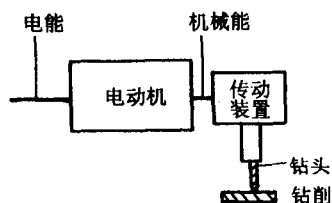


图 1-9 钻削加工示意

除此之外,电能源还可通过磁致伸缩效应而转变为机械能,使工具作高速振动,打击磨粒进行超声波加工(图 1-5);或通过液电效应产生高速冲击波,以压力差的方式作用于加工材料(图 1-10);以及通过电磁效应以质量力方式直接作用于加工材料(图 1-8b)。

化学能源(炸药、可燃液体、可燃气体等)通过爆炸或燃烧转变为机械能,使周围介质压力增加,所形成的高压或直接以压力差的方式,或以传递介质与加工材料相对运动的方式,使材料实现某种机械基本过程。前者如爆炸成形(图 1-11),后者如内燃锤上的高速成形(图 1-12)。

(2) 基本过程为热过程的能量流程 热基本过程所需热量通常由电能、化学能或机械能转化而得。热量可在加工材料内部直接产生(直接加热);也可在加工材料外部产生,然后以一定方式,如传导、对流、辐射等传递给加工材料(间接加热)。

电能转化为热能的方式方法有很多种。例如,使电流通过导电材料即可产生热,若导电材料本身即为被加工材料,则为直接加热;如果导电材料为特殊高电阻加热元件,产生的热量通过适当介质,以对流、辐射等方式传递给加工材料,则为间接加热。利用电磁感应亦可将电能转化为热能,图 1-13 所示的感应电加热,常应用于模锻前的毛坯加热。借助电弧放电可产生热量,电弧焊即是利用此原理而使填充材料和工件连接区的基体材料加热熔化,如图 1-14 所示。再者,火花放电亦可实现电能向热能的转化,火花放电产生的瞬时高温,可使金属熔化和汽化,图 1-15 所示的电火花加工即是利用此原理。

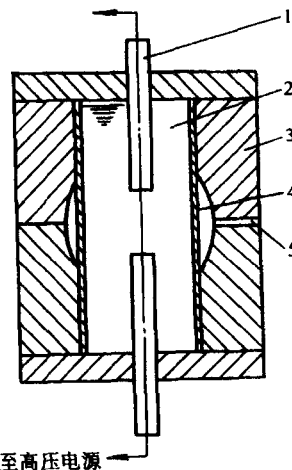


图 1-10 液电成形示意
1—电极 2—水 3—凹模
4—毛坯 5—排气孔



图 1-11 爆炸成形

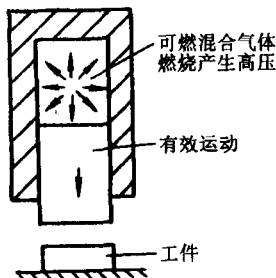


图 1-12 内燃锤高速成形

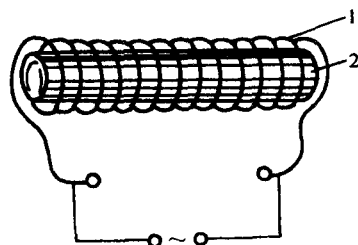


图 1-13 感应电加热原理
1—感应器 2—坯料

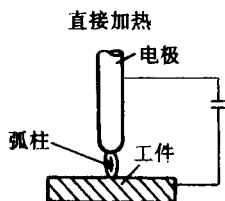


图 1-14 电弧加热示意

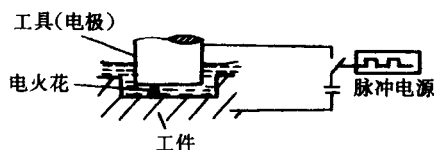


图 1-15 电火花加工

此外，通过电子束、激光，亦可使电能转化为热能，高能量密度的电子束和激光束足以使被加工材料熔化或汽化，从而实现材料加工中的热基本过程。

化学能源是通过可燃物质的燃烧而转化为热能的，例如熔焊中的气焊，即是利用可燃气体（如乙炔与氧的混合气体）的燃烧而熔化金属的；气割是利用可燃气体燃烧，将待切处金属加热到能在氧气流中燃烧的温度；而气体火焰的钎焊，则是利用可燃气体燃烧使钎料（填充金属）熔化的。

以机械能为基础的热源，热量由摩擦产生，如摩擦焊即是以焊接件接触面摩擦产生的热量为热源的，图1-16为摩擦焊原理示意。

3. 信息流程

信息流程包括形状信息和性能信息两个方面。在材料加工过程中，由于把形状变化信息施加于材料，最终的形状信息就等于材料的初始形状信息与加工过程中所施加的形状变化信息之和。形状变化信息是由具有一定形状信息量的刀具或工模具和加工材料与刀具、工模具之间的相对运动共同产生的。

也就是说，形状变化过程为借助能量流程把相应于信息流程中的形状变化信息施加于材料流程的过程。

形状变化信息可以通过一个或几个阶段加于材料，即

$$I_0 = I_i + \Delta I_{p1} + \Delta I_{p2} + \cdots + \Delta I_{pn}$$

式中 I_0 ——要求获得的几何形状信息；

I_i ——材料的初始形状信息；

ΔI_{p1} 、 $\cdots$ 、 ΔI_{pn} ——各个加工过程的形状变化信息。

所需的加工过程数，既取决于技术原因，也取决于经济原因。

一般地说，刀具或工模具所包含的形状信息量越少，则它们与加工材料的相对运动对于材料的形状变化所起的作用就越大，反之亦然。例如，模锻时锻模几乎已包含了所要求的全部形状信息量，因而锻模与加工材料的相对运动就变得很简单；而对于一般的车削加工，车刀所包含的形状信息量很少，为了获得所需形状的零件，甚至要求多个相对运动，如刀具沿工件轴向和径向的平移以及刀具与工件的相对转动等。

同样，性能信息流程涉及材料的初始性能和通过各种加工过程产生的材料性能的变化，

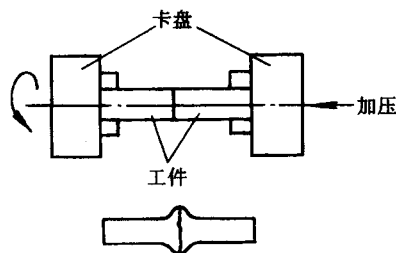


图 1-16 摩擦焊原理

工件最终的性能则是它们综合作用的结果。热处理加工的主要目的在于改变材料的性能而不改变其几何形状；而塑性成形在其改变材料形状的同时，一般都伴随有性能的变化。

第二节 材料成形的一些基本问题和发展概况

在第一节中，我们从宏观的角度对各种材料加工过程作了综合性的描述。下面转入对材料成形的主要加工方法从技术内容上作深层次的分析，从中归纳出一些共同性、基本性的问题，并就材料成形的发展现状作简要介绍。所有这些，对于以后各专题章的学习均具有指导意义，且可达到扩大视野和思路的目的。

一、凝固成型的基本问题和发展概况

1. 基本问题

凝固成型属液态金属质量不变过程，它是将满足化学成分要求的液态金属或合金在重力场或其他力作用下引入到预制的铸型中，经冷却使其结晶成为具有铸型型腔形状和相应尺寸的固体制品的方法。可见，凝固成型包含充填铸型和冷却凝固两个基本过程。充填（亦称浇注）主要是一种机械过程，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。在此过程中一方面使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）。

尽管凝固成型包含充填和凝固两个基本过程，但在多数情况下，凝固过程显得更为重要。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上的改变。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型，充填是否充分、平稳对最终质量仍有重要作用。

凝固成型方法种类繁多，但其最终目的都是为了获得健全的、满足各种使用要求的铸件。故此，下面的一些基本问题或关键问题应予以考虑。

（1）凝固组织的形成与控制 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型中的一个基本问题，能随心所欲地获得所希望的组织历来是人们所追求的目标之一。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、半固态、定向凝固、快速凝固等。

（2）铸造缺陷的防止与控制 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。由于凝固成型时条件的差异，缺陷的种类、存在形态和表现部位不尽相同。液态金属的结晶收缩可形成缩孔、缩松；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型中如何加以控制，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，出现在充填过程中，它们不仅与合金种类有关，而且还与具体成型工艺有关。总

之,在各种凝固成形方法中,如何与缺陷作斗争仍是一个重要的基本问题。

(3) 铸件尺寸精度和表面粗糙度控制 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越来越高,也正是这种要求促使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。故此,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,也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,这不仅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,而且还与物理化学工业、机械制造业、现代控制方法和技术等的发展密切相关。

(1) 凝固理论的发展 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,而且促使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。

(2) 凝固技术的发展 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。

所谓定向凝固技术,是使液态金属的热量沿着一定的方向排出,或通过对液态金属施行深过冷,从而使晶粒的生长(凝固)向着一定的方向进行,最终获得具有单方向晶粒组织或单晶组织的铸件的一种工艺方法。它经历了从功率降低法→快速凝固法→液态金属冷却法的发展过程。由于冷却及控制技术的不断进步,使热量排出的强度及方向性不断提高,从而使固液界面前沿液相中的温度梯度提高,这不仅使晶粒生长的方向性提高,而且组织更细长、挺直,并延长了定向区。定向凝固技术已广泛应用于铸造高温合金燃气轮机叶片的生产中,由于沿定向生长的方向上的力学性能优异,使叶片工作温度大幅度提高,从而使航空发动机性能水平上了一个台阶。定向凝固技术的最新发展是制取单晶体铸件,其突出的代表是单晶涡轮叶片,它比一般定向凝固柱状晶叶片具有更高的工作温度、抗热疲劳强度、抗蠕变强度和耐蚀性。这种高温合金的单晶叶片已用于新型航空发动机中,有效地增加了航空发动机的推力和效率,使航空发动机性能又上了一个档次。

快速凝固技术就是在比常规工艺条件下的冷却速度($10^{-4} \sim 10\text{K/s}$)快得多的冷却条件($10^3 \sim 10^9\text{K/s}$)下,使液态合金转变为固态的工艺方法。利用这种凝固技术还可使合金材料具有优异的组织 and 性能,如很细的晶粒(通常 $<0.1 \sim 0.01\mu\text{m}$,甚至纳米级的晶粒),合金无偏析缺陷和高分散度的超细析出相,材料的高强度、高韧性等。快速凝固技术可使液态金属脱开通常的结晶过程(形核和生长),直接形成非晶结构的固体,即所谓金属玻璃。此类

非晶合金为远程无序结构,具有特殊的电学性能、磁学性能、电化学性能和力学性能,目前已得到广泛的应用,如用作变压器铁心材料、计算机磁头及外围设备中零件的材料、钎焊材料等。总之,快速凝固是一种倍受人们青睐的技术。

凝固技术的另一发展是复合材料的制备。所谓复合材料,就是在非金属或金属基体中引入增强相或特殊成分,通过控制凝固使增强相按所希望的方式分布或排列的一种具有特殊性能的材料。由于复合材料的基体具有较高的断裂韧性,加上增强相的存在,故能表现出与普通单相组织材料不同的性能,如高强度、良好的高温性能和抗疲劳性能。目前已发展了多种制取复合材料的方法,如结合定向凝固技术制取定向复合材料。复合材料是一种很有发展前途的先进材料,也是目前的研究热点之一。

半固态金属铸造成形技术经过近 20 多年的研究及发展,目前已进入工业应用阶段。半固态铸造成形的原理是在液态金属的凝固过程中进行强烈搅拌(可以采用机械、电磁或其他方式),使普通铸造中易于形成的树枝晶网络骨架被打碎而保留分散的颗粒状组织形态。这样的显微组织(颗粒状、非树枝晶状)在固液相区仍具有很好的流动性,从而可利用常规的成形技术如压铸、挤压、模锻等实现半固态金属的成形。与传统成形技术相比,它具有以下优点:①在工艺方面:成形温度低(对于铝合金至少可降低 120°C),延长模具寿命(由于热冲击小),改善生产条件和环境;②在产品方面:铸件质量提高(减少气孔和凝固收缩),铸件精度提高,增加压铸合金的范围,并可发展金属基复合材料。

(3) 计算机的应用及发展 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,而且使过去许多不可能的事情变成了现实,同时又促使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技术),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。概括起来,计算机技术将在以下三个方面发挥着无可替代的作用。

1) 凝固过程数值模拟技术。所谓凝固过程数值模拟技术就是用数值计算方法求解凝固成形的物理过程所对应的数学离散方程,并用计算机显示其计算结果的技术。这项技术诞生于 30 年前,近 10 年来获得了很大的发展,在许多方面已达到实用化程度,是公认的可提高铸造业竞争能力的关键技术之一。它不仅可形象地显示液态金属在铸型型腔中冷却凝固过程,并可预测可能产生的缺陷,目前还用于模拟液态金属充填型腔过程和铸件热应力发展过程,预测因充填不当造成的缺陷和铸件中的裂纹。利用这些技术,人们可在铸造工艺现场实施前,以获得优质铸件为目标,综合评价各种工艺方案和参数,优化工艺方案,取代或减少现场试制。这对于大型复杂形状或贵重材料的凝固成形件的生产,其优越性和经济效益尤为突出。由于凝固过程数值模拟可以揭示许多物理本质和过程,所以也促进了凝固理论的发展,特别是近几年来研究和发展的微观组织模拟,可用于预测晶粒大小和力学性能,并可望在不久的将来用于生产实际。

2) 快速样件制造技术。它是近几年来发展起来的一项高新技术,又称快速成形技术。简单地讲,就是将 CAD 设计数据变成实物的过程,它集成了 CAD/CAM 技术、现代数控技术、激光技术和新型材料技术,无需图样、无需进行传统的模具设计和加工,极大地提高了生产效率。目前,该技术已进入铸造业,在砂型铸造、熔模铸造和实型铸造中快速制出形状复杂的模样。应用最成功的是在熔模铸造中,可直接制出精细复杂的熔模,以取代压制熔模

过程；也可制出熔模压型，甚至用激光束直接将覆膜砂制成铸型，以供浇注铸件。

3) 过程和设备运行的计算机控制。计算机作为生产过程和凝固成形的一种控制手段已得到了广泛应用。对于铸造这样一个工序繁多、劳动条件相对恶劣、影响因素复杂的行业来说，用计算机控制生产过程可带来诸多的好处。目前新一代的造型生产线已基本上采用计算机控制，以计算机为基础的自控系统已用于其他铸造工序和设备中，如熔化、浇注、砂处理、质量检验等工序和压铸件、定向凝固设备等。所有这些，对提高生产效率和获得质量均一、性能良好的铸件均具有重大的作用。

二、塑性成型的基本问题和发展概况

1. 基本问题

从第一节的阐述中已经知道，塑性成型属质量不变过程，材料状态一般为固态，主要的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，性能信息来自材料自身性质和成型过程中的转变特性。这样，尽管塑性成型方法多种多样，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性特征中引伸出一些基本问题。

1) 材料的塑性是塑性成型的前提条件，塑性好意味着材料对塑性成型的适应能力强，如果材料没有塑性，则塑性成型就无从谈起。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很有必要。

2) 塑性成型需要输入能量，即对加工材料施加外力和做功，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，并且通过对成形力的影响因素的分析，可为减小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内部的应力场，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。

3) 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时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。

4) 塑性成型需要输入形状信息，这些信息由含有形状信息量的工模具和工模具与加工材料的相对运动共同产生。对于给定的塑性成型件，采用什么工艺方法，形状信息分几个阶段输入，与其相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，都是十分重要的，这也是塑性成型需要研究的基本问题。

2. 发展概况

(1) 板料成型方面

1) 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 2000~3000 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本身的问题,行程次数高不一定生产率就高。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含多道工序,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,各工位之间由送料夹钳或机械手传递坯件。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 62000kN,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、出件、传递翻转、监控保护等辅助装置,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,某企业的一条由六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,又如电机行业中,也广泛用冲压自动线生产定子片和转子片。

2) 在小批量生产中多向简易化、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。

由某公司研制的冲压柔性加工单元,是由 1500kN 开式双柱宽台面压力机、机器人、模具自动仓库、供料装置、堆垛起重机、成品传送带、废料传送带、操纵台等组成,可加工 150 种左右的电器零件,最小批量 20 件,最大批量 4000 件,工件板厚为 0.5~8.0mm,工件长度为 30~200mm,宽度为 10~200mm,可完成各种落料、冲孔、拉深和弯曲等工序,生产率相当于 7 台小型机械压力机。

图 1-17 为一种多轴数控弯曲机非在线控制的示意。机床有两个模具——固定模和活动模,活动模有 5 个自由度,即沿 y 、 z 轴方向移动和绕 x 、 y 、 z 轴转动,如图 1-18 所示。待弯曲的型材穿入模具的封闭模孔内,借助活动模的各种运动,使型材弯曲和(或)扭转,以制成所需零件。由于零件的形状是由计算机指令控制活动模的运动、而不是由模具本身所决定,因此仅用一套模具,就可生产出相同断面型材的各种弯曲件。

在图 1-18 中,由 CAD 系统提供的指令输入数控弯曲机,以生产第一个弯曲件。一般情况下由于回弹难以准确预定,该弯曲件与所需形状会有偏差。通过三坐标测量仪检测,得出其形状误差,用以修正计算机的指令,直至所生产的弯曲件符合所需的形状。

单模成形只需凹模或凸模,因而简化模具结构与制造,如液压成形、聚氨酯成型等。图 1-19 给出一种多点模成形示意,当加工板件的曲面参数需要变化时,只需调整上下冲头的位置,点模成形可以实现数控化。粘性介质压力成形(VPF)可视为一种自适应软模成形;而无模成形则不需要借助任何模具而达到成形目的,如激光弯曲成形、超塑性无模拉拔等。