



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

成形工艺与模具设计

鄂大辛 编著

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书针对当前先进制造技术现状,并根据未来工业制造技术的发展趋势,系统地介绍了金属冷冲压成形工艺、热锻工艺、冷锻工艺及塑料的成形基本原理、成形方法及其模具设计。其中,包括金属材料 and 塑料的基本性能、成形过程、工艺方案的制定、模具设计及其设备的选用等。特别是选入了金属塑性成形技术亟待发展的部分内容,如管材弯曲成形、非回转对称拉深成形等的研究结果,对于发展塑性成形技术,具有相应的启发意义。

本书可作为高等学校材料工程类、机械工程类、化工工程类本科及高职高专教材,也可作为从事各种金属、非金属成形加工及模具设计、制造的工程技术人员和科研人员的参考用书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

成形工艺与模具设计/鄂大辛编著. —北京:北京理工大学出版社,
2007. 8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5640 - 1255 - 7

I. 成… II. 鄂… III. ①成型 - 工艺 - 高等学校 - 教材 ②模具 -
设计 - 高等学校 - 教材 IV. TG39 TG76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 063704 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / [http: // www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 29. 5

字 数 / 700 千字

版 次 / 2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 4000 册

定 价 / 38. 00 元

责任校对 / 张 宏

责任印制 / 吴皓云

C 目 录

Contents



第一篇 材料变形基础

第一章 金属冷塑性变形	1
第一节 金属塑性变形的物理基础	1
第二节 金属塑性变形的力学基础	9
思考题	13
第二章 金属热塑性变形	14
第一节 金属热变形过程	14
第二节 热变形对金属组织和性能的影响	17
第三节 金属可锻性	18
思考题	20
第三章 工程塑料成型的基本知识	21
第一节 塑料的组成与分类	21
第二节 塑料的特性及其应用简介	22
第三节 塑料制品的成型工艺	24
思考题	27

第二篇 冲压工艺与模具设计

第四章 冲压工艺基础	28
第一节 冲压工艺概述	28
第二节 冲压工艺分类及特点	30
第三节 冲压材料	33
第四节 冲压设备	44
思考题	49
第五章 冲裁工艺与冲模设计	50
第一节 冲裁工艺分析	50
第二节 冲裁间隙	55
第三节 冲裁模刃口尺寸的计算	59

第四节	冲裁件的排样与搭边	64
第五节	冲裁力分析及计算	67
第六节	冲裁工艺设计	73
第七节	冲裁模结构设计	78
第八节	精密冲裁与其他冲裁工艺及模具简介	99
思考题		114
第六章	弯曲成形工艺与模具设计	115
第一节	板材弯曲成形及其变形分析	115
第二节	弯曲力矩及弯曲力	123
第三节	板材弯曲加工极限	127
第四节	弯曲回弹	130
第五节	弯曲板坯尺寸的展开	136
第六节	弯曲工艺设计	138
第七节	弯曲模工作部分设计计算	142
第八节	弯曲模的典型结构	144
第九节	管材弯曲成形	148
思考题		162
第七章	拉深工艺及模具设计	163
第一节	拉深过程的力学分析	163
第二节	拉深成形极限及拉深系数	168
第三节	拉深力、拉深功及压料力计算	176
第四节	旋转体拉深	180
第五节	盒形件拉深	195
第六节	拉深件工艺设计	209
第七节	其他拉深方法简介	211
思考题		215
第八章	其他板料成形工艺及模具设计	216
第一节	胀形工艺及模具	216
第二节	翻边工艺及模具	223
第三节	缩、扩口成形工艺及模具	230
第四节	旋压及模具	234
第五节	先进成形工艺简介	239
思考题		245
第三篇 锻造工艺与锻模设计		
第九章	锻造工艺概述	246
第一节	锻造工艺分类及特点	246
第二节	锻造工艺流程	249
第三节	锻造设备	251

思考题	256
第十章 热锻工艺及模具设计	257
第一节 锻造加热	257
第二节 自由锻造工艺	262
第三节 胎模锻造工艺及胎模具	275
第四节 模锻工艺及模具	278
第五节 模锻后续工序	318
思考题	324
第十一章 冷锻工艺及模具设计	325
第一节 冷锻工艺概述	325
第二节 冷锻工艺	326
第三节 精压工艺及模具	331
第四节 冷态模锻工艺	334
第五节 冷挤压工艺及模具	336
思考题	355
第十二章 其他金属体积成形方法简介	356
第一节 材料及零件体积成形工艺技术	356
第二节 特种成形工艺	367
第三节 快速原型制造技术简介	379
思考题	382

第四篇 塑料成型及模具设计

第十三章 塑件设计简介	383
思考题	388
第十四章 塑料注射成型工艺及模具设计	389
第一节 注射成型模的组成及分类	389
第二节 注射参数计算	391
第三节 浇注系统设计	394
第四节 成型零部件设计	404
第五节 其他辅助机构设计	415
思考题	428
第十五章 热固性塑料成型工艺及模具设计	429
第一节 热固性塑料及成型工艺简介	429
第二节 热固性塑料注射成型及模具设计	431
第三节 热固性塑料压缩成型及模具设计	437
第四节 压注成型工艺及模具设计	452
思考题	459
参考文献	460

P 序

reface



材料成形是先进加工技术的重要组成部分，属于少、无切屑加工，制造方法简单、生产效率高，特别是经过成形加工后的金属零件具有优越的力学性能，可满足工程需要。因此，成形加工在未来制造业技术发展中，将占有举足轻重的地位。而目前的成形加工，都需要采用相应的模具才能实现，模具工业的发展和提高是材料成形加工的必要保证。

在现代化基础建设中，模具工业已经逐渐形成为制造业的基础核心产业。越来越多的工业产品制造与模具有关，根据国际生产协会的专家预测，在 21 世纪末，50%~75%的机械加工（主要是切削加工）产品都将利用模具进行加工制造。模具是工业的基础工艺装备，用模具生产制件所表现出来的高精度、高复杂程度、高一致性、高生产力和低消耗，是其他加工制造方法所不能比拟的，工业发达国家的模具工业产值早已超过机床工业产值。因此，模具工业已经成为现代制造业的重要支柱性产业。特别是近些年来，模具设计制造的需求量以及高速度化、高效率化已经成为汽车制造业亟待提高的一项重要技术。模具生产技术水平的高低不仅是衡量一个国家产品制造水平高低的重要标志，而且在很大程度上决定着这个国家产品质量、效益及新产品的开发能力。

模具技术，既是先进制造技术的重要组成部分，又是先进制造技术的重要应用领域，其技术水平与先进制造技术的发展与应用密切相关。模具对于一般产品来说属于工具范畴，精度高、结构复杂，并有较高的材质要求，是典型的高附加值、高风险产品。其制造过程复杂，涉及产品设计、模具设计、毛坯制造、电加工、机械加工、测量技术、表面工程、热处理和快速原型制造技术等方面，需要多种技术装备，而且使用率极不平衡。

随着社会经济的发展，对于工业产品的品种、数量、质量及款式等都提出了越来越高的要求，因此，也促进了模具工业的快速发展。许多新产品的开发和生产，在很大程度上依赖于模具制造技术，特别是在汽车、轻工、电子和航天的行业中尤显重要。模具制造能力的强弱和模具制造水平的高低，已经成为衡量一个国家机械制造技术水平的重要标志之一，直接影响国民经济中许多部门的发展。

模具工业是国民经济发展的基础工业之一。模具的质量精度、寿命对其他工业的发展起着十分重要的作用，其在现代化工业生产中的重要地位不容忽视，并且随着模具技术的不断发展，其在国民经济建设中将发挥越来越重要的作用。因此，模具的内涵需要发展和丰

富，需要在实践的基础上不断进行研究、挖掘和补充，为这门实用技术注入新的理论和技术内容，使其在现代化制造领域中发挥更重要的作用。

作者曾在一汽集团长期从事模具研发工作，之后在国外留学工作期间一直围绕着材料成形机理及模具进行了广泛深入的研究和实践。作者从材料成形工艺与模具设计岗位走上高等学府讲台，是国内该领域中为数不多的既具有深厚的理论基础、又具有丰富实践经验的专家，对于材料成形及模具设计持有较深刻的理解和认识。教材的编写是对材料成形和模具技术发展进行系统研究和浓缩的结晶，内容基本涵盖了工程应用中最基本的成形方法和模具特征，既适用于高等学校教学需求，又可作为相关专业工程技术人员的参考用书，具有一定的理论探索意义和实际应用价值。

该书经教育部专家委员会评审遴选为高等学校国家级“十一五”规划教材，并向全国高等学校相关专业做出推荐，实为模具行业造就高素质创新人才提供了良师益友，希望该书能够受到广大读者的喜爱，并对热衷于学习和研究材料成形及模具设计的读者有所助益。

中国模具协会理事长 褚克辛
一汽模具有限公司总经理



前言

Introduction



材料成形及模具技术在现代工业中占有越来越重要的地位，并且将成为未来制造业的支柱性行业。这一点，已为诸多工业发达国家率先认识。因此，在新时代理工科大学、高职高专等学校的专业教学内容中，应尽快将这一门专业技术介绍给学生，使他们能够初步认识现代制造工业的发展趋势，在自己所学专业基础知识的基础之上，拓宽认识视野和明确发展方向。目前，材料成形工艺与模具设计课程已为许多大学及高职高专机械制造、材料成形、化工等专业的学生在校学习的主要学习内容之一。

成形工艺与模具设计是一个实践性很强的专业，需要从理论教学和实验教学两方面入手培养学生。教材中既要有成形的基础理论，还要有模具的基本结构，使学生在学习这门课程时，即了解材料的变形机理，又产生控制材料变形的理念，进而才能开发并创造新的成形工艺方法和新型成形模具。本书根据作者在国内、外多年生产实践和科研，以及大学及高职高专学校的教学经验积累的基础上，综合了国内、外的先进技术并吸取了现有类似教材或科技书籍的精华和长处，系统编著而成。书中深入浅出地融入了作者近 30 年在板材、管材成形及其模具设计制造工作中的真实试验研究成果，增添了既有基础性技术又有研究性启示的内容，既适合于理工科大学本科生，也适合于高职高专学生的技术基础教学使用，也可作为相关专业选修课教学使用，同时，还可供有关工程技术人员参考使用。

由于本书部分章节是有关试验研究现状的提示性内容，因此，不属于教学大纲范围内所规定的内容，可供相关技术人员及感兴趣的学生参考，教师在授课时可根据学科专业需求进行适当取舍选择。全书分为四篇，主要介绍材料成形基础知识、冲压工艺及模具、锻造工艺及模具、塑料成型工艺及模具。其中，还插入了一些新的成形原理、工艺及部分模具知识。

作者最近在机械工业出版社出版了一套音像教学光盘《模具设计系列 VCD 教程》，其中包括《冲裁工艺与模具设计》、《拉深工艺与模具设计》、《弯曲工艺与模具设计》、《挤出吹塑气压成型工艺与模具设计》、《热塑性塑料成型工艺与模具设计》和《热固性塑料成型工艺与模具设计》。本书相关内容可与之配套使用。

本书在编写过程中，经吉林大学宋玉泉教授（科学院院士）悉心指教，并提出许多建设性意见，在此深表感谢。另外，借此机会对为本书编写完稿做了大量工作的刘小亦、李悦、王立石、贾震、丁洁、古涛、魏乐愚等人士以及所参考文献的作者表示深厚的谢意，同时，

前 言

对曾经工作 20 年始终保持合作研究并对本书成稿给予大力支持的一汽集团公司深表谢意。

本书于 2006 年 8 月经教育部专家委员会评审，遴选为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。本书的出版得到了北京理工大学和北京理工大学出版社“十一五”国家级规划教材的项目资助，作者在此表示衷心的感谢！

由于时间仓促，加之作者水平所限，书中不妥之处敬请读者不吝指正。

编著者

4. 粉末锻造工艺及模具

(1) 粉末锻造工艺

粉末锻造是将粉末冶金和精密模锻相接合,并综合了二者优点的一种成形工艺(1964年美国 GM 公司首先开发了粉末锻造汽车连杆工艺)。粉末锻造是将金属粉末压制成形,之后进行烧结、加热至锻造温度后放入粉末锻造模中进行挤压或模锻(无飞边模锻)以制成锻件的加工方法。

一般,制件形状尺寸精度适合在刚性模具中压制成形。易于脱模的零件,可采用传统粉末冶金工艺方法。对于形状复杂且需批量生产的小型零件,采用传统粉末冶金工艺不很经济,可以选择金属注射成形。对于材料力学性能要求较高的精密零件,则应选用粉末锻造加工。

粉末锻造工艺流程前序与传统粉末冶金工艺相同,即经过物料准备、成形压制及烧结等工艺过程。对于合金粉末预成形坯,直接加热至锻造温度后,利用锻模进行闭式模锻或挤压成形。通常有三种工艺方法:粉末锻造是直接加热至锻造温度后进行锻造;烧结锻造是将预成形坯烧结后再进行加热锻造;锻造烧结则是将预成形坯加热锻造后再进行烧结。锻造过程中,模具的冷却润滑采用压缩空气和胶体石墨,良好润滑有利于克服粉锻件表面低密度层的形成。

根据粉锻零件的设计要求,有时还需要进行锻后热处理、切边、去毛刺等工序。

由于粉末锻造材料中已不存在微小孔隙,经过热锻成形后的金属制件提高到金属理论密度的 95%~100% (粉末冶金成形后的制件密度一般在 $6.2\sim 6.8\text{ g/mm}^3$),接近于一般模锻件的密度,克服了各向异性影响,所以与普通金属锻造制件相比,机械性能显著提高。

(2) 粉末锻造模具

粉末锻造用模具与精锻模具较为相似,图 12-32 所示为典型粉末锻造模具的结构形式。

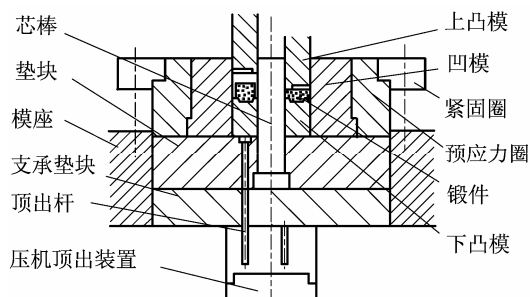


图 12-32 粉末锻造模具基本结构

锻造加工时,金属压坯产生径向变形,为保证凹模承压强度,通常需设置预应力圈。考虑到锻件脱模,采用整体浮动式下凸模。下垫块厚度应根据锻造打击力大小及下凸模承压面积选用相应材料和确定厚度尺寸。

对于等高型粉锻件,如能严格控制压坯质量,可采用闭式锻模结构。设计和制造时应保证上、下凸模与芯棒和凹模之间的滑配间隙,避免产生纵向毛刺。如果两个不同断面部分需要靠锻粗成形时,可以采用浮动凹模结构,设计时需要考虑浮动凹模内外壁与接合件的间隙合理。当锻件两头大中间小时,如圆锥齿轮等,通常采用开式锻模。粉末锻造模具常采用单型腔模锻,这时,应设置顶出装置或采用可翻转脱模的模具结构。粉锻模工作前,为减小模具与高温压坯之间的温差并提高模具使用寿命,应进行适当预热,通常预热温度为 $200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。用于连续生产的粉锻模,应设置模温自动调控装置。

图 12-33 所示为用于摩擦压力机的汽车行星齿轮粉

锻件,如能严格控制压坯质量,可采用闭式锻模结构。设计和制造时应保证上、下凸模与芯棒和凹模之间的滑配间隙,避免产生纵向毛刺。如果两个不同断面部分需要靠锻粗成形时,可以采用浮动凹模结构,设计时需要考虑浮动凹模内外壁与接合件的间隙合理。当锻件两头大中间小时,如圆锥齿轮等,通常采用开式锻模。粉末锻造模具常采用单型腔模锻,这时,应设置顶出装置或采用可翻转脱模的模具结构。粉锻模工作前,为减小模具与高温压坯之间的温差并提高模具使用寿命,应进行适当预热,通常预热温度为 $200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。用于连续生产的粉锻模,应设置模温自动调控装置。

对于等高型粉锻件,如能严格控制压坯质量,可采用闭式锻模结构。设计和制造时应保证上、下凸模与芯棒和凹模之间的滑配间隙,避免产生纵向毛刺。如果两个不同断面部分需要靠锻粗成形时,可以采用浮动凹模结构,设计时需要考虑浮动凹模内外壁与接合件的间隙合理。当锻件两头大中间小时,如圆锥齿轮等,通常采用开式锻模。粉末锻造模具常采用单型腔模锻,这时,应设置顶出装置或采用可翻转脱模的模具结构。粉锻模工作前,为减小模具与高温压坯之间的温差并提高模具使用寿命,应进行适当预热,通常预热温度为 $200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。用于连续生产的粉锻模,应设置模温自动调控装置。

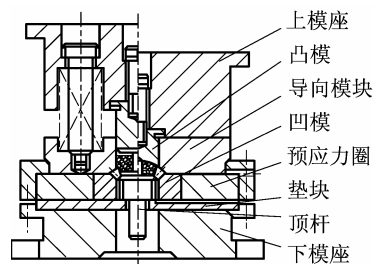


图 12-33 行星齿轮粉末锻造模具

锻模结构。粉末锻造也可在热模锻压力机或高速锤上完成。

二、摆动辗压成形

摆动辗压是利用圆锥面或其他曲面的辗压模绕轴心转动，使坯料产生连续地局部压缩变形，加工轴对称盘形零件的一种塑性成形方法，通常称作摆辗。图 12-34 所示为利用摆辗工艺加工的金属零件。

1. 摆辗工艺特点

摆辗是典型的压缩成形，其最主要特点是使坯料连续地产生局部变形，成形过程是小变形的逐步积累。摆辗过程中，不论圆柱体或圆环体制件与模具型面的接触面积都只是一部分，且由于金属与模具型面之间的摩擦约束小，金属极限变形程度较大。冷摆辗的加工极限可提高 10%~20%，所需成形力很小。与锻造加工相比，所用设备吨位要小得多。摆辗制件的金属纤维连续，流线沿制件轴线形成，可提高零件的使用性能。为了提高成形效率，还可将坯料加热后进行摆辗，通常称之为温热摆辗。

金属制件经冷辗后产生显著的冷作硬化，可使制件强度、硬度大为提高。据资料介绍，摆辗过程中辗沟的显微硬度比车沟高 1.9 倍。经冷摆辗加工的推力轴承套圈等环类零件，金属纤维连续，流线与制件工作时的受力方向垂直，可获得很好的使用性能，较磨削套圈的使用寿命高 2 倍以上。

2. 摆辗成形过程

摆辗上模通常固定于辗压机摆头上，辗压模工作表面的母线与被加工盘类制件上表面的中心射线一致。如图 12-35 所示，摆头轴线与机床主轴有一夹角 α ，称为摆角，摆头摆动的运动形式因设备结构不



图 12-34 摆动辗压产品

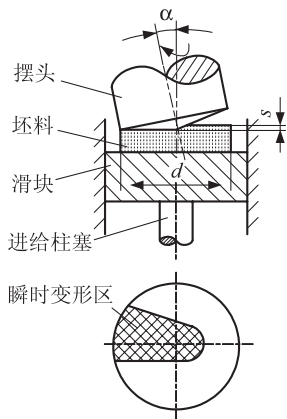


图 12-35 摆动辗压工作原理

同而异。当摆头带动辗压模绕轴心摆动时，向置于辗压机滑块或下模上的辗压坯料施加压力，随着摆头的往复滚动辗压，坯料上表面逐渐被辗压成具有与辗压模母线形状相同的中心射线形状。上模工作表面的母线是一直线，摆辗后的制件上表面即为平面；当上模工作表面的母线是曲线时，摆辗制件的表面将形成母线与上模相同的曲面形状。如果下模带有型腔，在上模不断滚动辗压下，金属材料充入型腔，摆辗成形后，制件下表面将成形为与下模型腔一致的形状。摆辗成形时，圆柱体接触面的单位压力分布不均匀，上模各点轴向压力一般大于下模对应点的压力。

摆辗成形时，上模摆动辗压使锻坯在一个较小的区域内产生塑性变形，变形区随辗压模的摆动而沿锻坯周向移动，呈螺旋面逐渐扩展，从而使整个锻坯形状改变。金属在逐渐变形过程中可能产生相应的弹性回复和材料流动，且摆头的摆动精度有限，成形中的上模工作表面每次与锻坯接触的表面是变化的。因此，应尽可能使上模工作表面形状简单，以减轻

成形过程中的接触摩擦，降低非成形部分材料的变形抗力。尽可能将复杂形状置于下模侧，有利于材料充满型腔。

如图 12-36 所示，利用摆头母线与下模形状的不同组合，可以实现摆辗镦挤、摆辗反挤、辗扩反挤和正反复合辗挤等复合摆辗成形。考虑到降低材料流动摩擦的影响，摆辗模工作表面的粗糙度应较低，另外，在成形中需根据具体情况进行润滑。

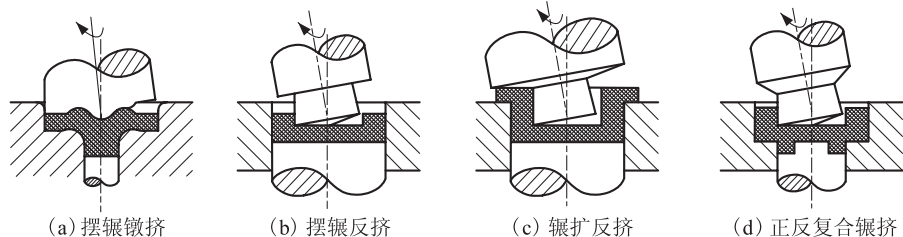


图 12-36 复合摆辗成形

3. 摆辗模具

根据所用摆辗机类型，可将摆辗模分为立式摆辗机用模具和卧式摆辗机用模具两种。一般短轴类和盘类零件摆辗时采用立式摆辗模，图 12-37 所示为立式摆辗镦粗-反挤模结构。由于锻件底部有一凸台，为便于成形后脱模，设置了顶出机构及顶杆。设计立式摆辗机用模具时，通常将锻件形状复杂的部分，特别是非回转体部分，置于固定凹模中成形，而形状简单部分放在摆动凸模内成形。

对于带法兰的长轴类锻件，可采用如图 12-38 所示用于卧式摆辗机的模具结构。这种模与平锻模结构相似，由凸模、活动凹模和固定凹模三部分组成。摆动凸模由压紧圈和螺钉紧固在摆头上。活动凹模用压板和螺钉紧固在夹紧块上，固定凹模则紧固在工作台上，两部分组成一个完整的凹模。当锻件形状复杂时，可将容易磨损或开裂的部分做成镶块，以便于维修、更换。对于硬质材料摆辗成形，考虑到凹模强度不足，应加设预应力圈。

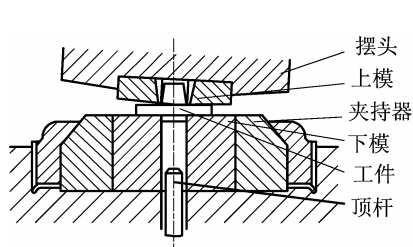


图 12-37 立式摆辗模结构

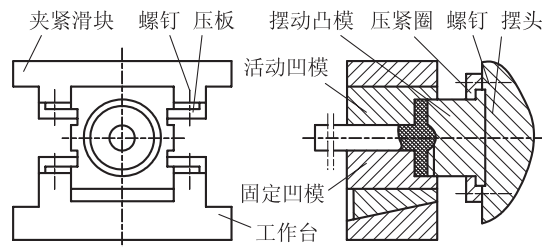


图 12-38 卧式摆辗模结构

三、径向锻造及多向模锻

径向锻造和多向锻造都是在普通锻造基础上发展起来的先进锻造工艺方法，它们的共同特点是锻造成形时对金属坯料进行多向同时锻击，以获得高质量锻件并提高锻造生产率。

1. 径向锻造

径向锻造是在拔长锻造的基础上发展起来用于锻造轴类零件的锻造工艺，有时也称旋转锻造。

(1) 径向锻造的工作原理

径向锻造是指利用两个或多个锤头对金属坯料进行反复径向锻击，减小坯料横截面积或改变其断面形状的锻造方法，如图 12-39 所示。

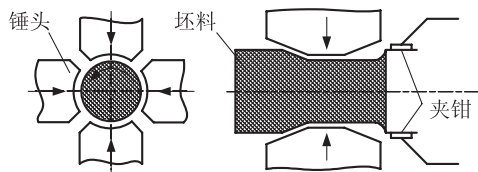


图 12-39 径向锻造加工原理

锻造时，分布于坯料横截面周围的数个锤头，对坯料进行高速同步对称锻击，坯料与锤头既有相对轴向移动又有相对转动。

径向锻造的方式有三种：一种是锤头旋转径向锻造，锻造时坯料不转，锤头每次锻击都要绕坯料轴旋转；另一种是坯料回转式，即锤头只做

打击，而坯料旋转；还有一种称为非回转式径向锻造，锻造时坯料和锤头都不旋转。前两种径向锻造适用于锻打横截面对称的锻件，使坯料作旋转式轴向延伸，多用于冷锻或热锻阶梯形或锥形实心轴或管件。当锻造具有非回转对称截面的锻件时，通常采用最后一种方式，使坯料只作轴向移动。可用于锻造方形、矩形及多角形截面的型材。而只作转动没有轴向移动的径向锻造方法，适用于锻制气瓶收口形状或管件缩颈形状等。

(2) 径向锻造的工艺特点

1) 径向锻造时，坯料受到多向同时锻击，在变形瞬间限制了金属径向流动，迫使其只能沿轴向流动，因而有效提高了轴向延伸效率。此外，在径向多角度同时加压，金属径向变形均匀，可消除单向锻击时坯料横截面上可能产生的径向拉应力，提高金属塑性，因而可用于塑性较差金属的锻造成形。

2) 由于多向同时锻击，使径向锻造时金属的变形量较小，变形区及金属移动的体积也很小。因此，相对减小了锻造变形功，可降低设备吨位。

3) 径向锻造类似脉冲加载，尽管每次锻击变形量较小，但锻击频率较高，仍然具有较高的生产效率。据资料介绍，对于低塑性合金，采用脉冲锻击方式要比连续加载时的工艺塑性提高 2~3 倍。

4) 由于径向锻造用的锤头形状简单，具有较强的工艺适应性，便于更换产品，大大简化了工装准备工作量。所以既适用于大批量生产，也适用于单件小批量生产。

5) 采用径向锻造工艺成形的锻件尺寸精度高，表面质量好。热锻时锻件外径精度可达 $\pm 0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$ 表面粗糙度达 $Ra 3.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$ ，冷锻件粗糙度可达 $0.4 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 。

径向锻造可以采用冷锻、热锻和温锻三种工艺方式。其中，冷锻可强化锻件表面，提高锻件的尺寸精度和表面质量。径向锻造通常可在滚柱式旋转锻造机、曲柄连杆径向锻造机、曲柄摇杆旋转锻造机和液压万能锻造机上实现，图 12-40 所示为四锤头锻造机锻造阶梯轴。

(3) 径向锻造的应用

由于径向锻造具有锻件质量高、材料消耗低、生产效率高及劳动条件好的优点，已被广泛应用于各种机床、汽车、飞机等行业中。它的主要产品是实心阶梯轴、空心轴、各种横截面形状的杆类零件，还可用于锻造各种气瓶、筒形件缩颈等。

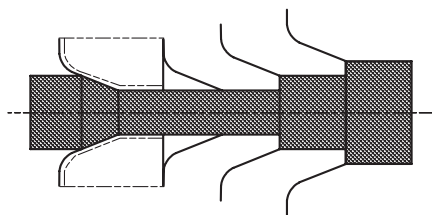


图 12-40 四锤头径向锻造机锻造阶梯轴

2. 多向模锻

多向模锻是利用模具，对金属同时或依次在垂直和水平两个方向上进行挤压成形的模锻工艺方法。

(1) 多向模锻工艺过程

多向模锻具有水平和垂直两套锻模，成形过程如图 12-41 所示。将坯料置于下模上，如图 (a) 所示上模下行对坯料进行锻造成形；当上、下模处于闭合状态时，水平冲头横向压入，对已基本成形的锻坯侧向挤压，如图 (b) 所示；锻件成形后，水平冲头先退出，然后上模回程，开模取件，如图 (c) 所示。

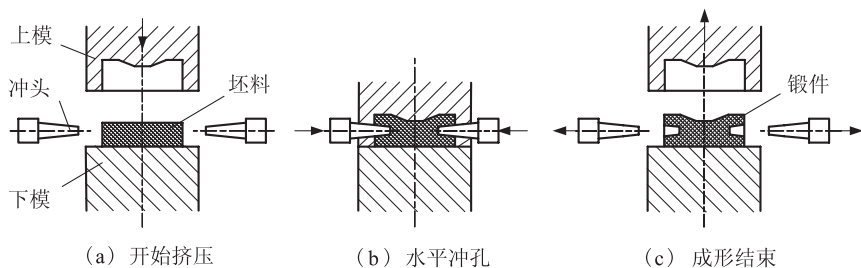


图 12-41 多向模锻成形过程

多向模锻类似于闭式模锻与挤压的复合工艺，变形过程可分为基本成形、充满及形成毛刺阶段。在基本成形阶段中，金属的变形特点是反挤—镦粗和径向挤压；进入充满阶段时，金属变形抗力增大，但变形量较小，变形主要集中在型腔难充满的局部区域，该区域内金属处于三向压应力状态；金属充满型腔进入形成飞边阶段时，只产生少量变形，金属沿冲头挤入的反方向流动形成飞边。如果合模力不足，可能会产生横、纵两个方向的毛刺。在最后阶段的金属变形中，有利于使锻件组织密实，锻合内部缺陷。但如果坯料体积过大，产生较大毛刺，给后处理造成困难，而且影响模具使用寿命。

(2) 多向模锻的工艺特点

1) 多向模锻过程中，金属坯料在模具闭合状态下进行横向挤压变形，受到三向压用力作用，可使塑性大为提高，有利于低塑性合金锻造成形。

2) 多向模锻锻模有多个分型面，可使金属坯料在任意水平方向上进行变形，与普通模锻相比，可以锻造形状更为复杂的锻件。特别是采用多向模锻锻造带有横、纵孔形的锻件，可简化锻造工艺并减少热锻火次，减少金属烧损及脱碳等，使生产效率提高并降低生产成本。

3) 金属在封闭模具内变形，一般不会产生较大毛刺或飞边，从而避免了锻件的金属流线终端外露，可提高锻件机械性能，特别是提高了表面抗腐蚀性能。

为了提高多向模锻件的锻造质量，不致形成毛刺或飞边，要求下料体积应精确。另外，要求设备具有较好的刚性、精度和足够的吨位，以增大合模力。如果条件允许，还应进行少、无氧化加热。

(3) 多向模锻的应用

多向模锻件一般具有典型的成形特征，如带有多向形状的中空零件，如管接头、各种锻造阀体以及凿岩机缸体等。对于一些难成形金属制品也正在或已经开发出多向模锻成形工艺，如飞机起落架、发动机机匣及各种盘轴组合锻件等。

四、半固态成形及液态模锻简介

1. 半固态成形

半固态成形是指金属或合金材料处于固-液相交区间时,将其以很小的外力压入模具型腔中,进行常规压铸、挤压或锻造的一种新型金属塑性成形方法。

20世纪70年代,美国麻省理工学院的学者(M.Flemings和D.Spencer)在实验过程中发现,金属和合金材料在固相与液相转化状态下进行连续搅拌后,可以产生较低的表现黏度,并且生成大量粒状晶代替了原有的枝状晶。由此,对这种半固态金属和合金材料进行了一系列的压力加工实验,开发了半固态成形技术。

(1) 半固态金属制坯

在普通铸造过程中,首先生成枝晶,然后逐渐长大。当固相比例达到20%左右时,枝状晶开始形成大量的网状骨架,并失去了宏观流动性。

在金属液态向固态转化的结晶过程中,进行强烈地搅拌,可以打碎树枝晶网架,使分散的粒状组织悬浮于液相中。因此,可以采用机械搅拌、电磁搅拌或应变诱发熔化激活法来制备上述粒状组织。机械搅拌法如图12-42所示。

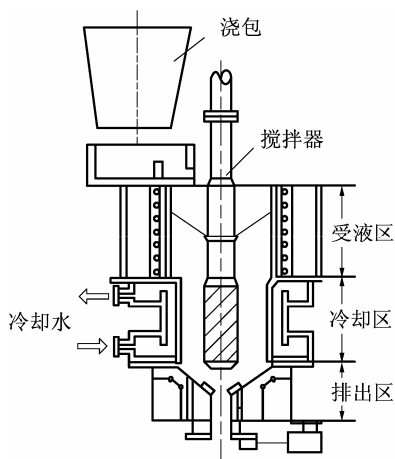


图 12-42 螺旋式金属搅拌器

(2) 成形方法及应用

半固态成形主要有流变铸造、触变铸造和注射成形三种方法。流变铸造是指在一定固相成分时,将经过强烈搅拌后的半固态金属浆液压铸或挤压成形的加工方法;触变铸造是将经过预成形或特殊制备的非枝晶组织锭坯重新加热到液固转化区,当半固态金属浆液达到适当黏度时进行压铸或挤压成形。由于对坯料的

加热、输送都易于实现自动化,因此,这种方法成为半固态成形的主要工艺方法。注射成形是使熔融状态的金属液冷却至适当温度,然后直接压射入模具中进行成形的方法。

半固态成形是最具发展前途的近净成形和新材料制备技术之一。对于各种合金,只要有固、液相同时存在的温度区间,都可以进行半固态成形加工。半固态成形主要用于汽车、军用车辆零部件的生产,由半固态成形加工的金属零部件可以提高相应的机械性能,并减轻质量。

2. 液态模锻

液态模锻是对液态金属进行模锻的一种工艺方法,实质上是铸造与锻造的组合成形工艺。模锻时,将液态金属直接浇入模具型腔中,以一定压力作用于液态或半液态金属并保压一定时间即完成锻造。

(1) 液态模锻的工艺特点

液态模锻时,金属在压力作用下结晶凝固并成形,组织和性能都得到相应改善。已凝固金属在压力作用下,产生局部塑性变形,锻件紧贴模具型腔表面,传热快且凝固时间短,因而锻件表层晶粒细密。液态模锻与压力铸造不同,压铸时金属是靠散热冷却完成结晶过程的,而液态模锻是在压力作用下使金属结晶,并具有强制性补缩作用。因此,其结晶组织和相应

的力学性能比铸件好，甚至可以超过轧制件。与普通锻造相比，液态模锻提高了金属充型性，容易获得轮廓清晰、形状复杂的锻件，并且尺寸精度和表面精度都较好。液态模锻兼有铸造工艺简单、成本低、又有锻造产品性能好、质量可靠的优点。据资料介绍，液态模锻的金属凝固时间不足普通铸造的 $1/3$ ，成形时的压力只有模锻的 $1/5$ 左右，因而在某种情况下，液态模锻可以提高生产效率和降低能源消耗。

液态模锻时，金属液体温度很高，且需要在模具型腔中停留一段时间，要求模具材料具有较高的红硬性和抗热疲劳强度。对有色金属及其合金，当其熔点不高时，采用液态模锻效果比较显著。而对于黑金属及其合金的液态模锻成形，由于模具的使用寿命很低，应用受到一定限制。

(2) 液态模锻工艺及其应用

液态模锻通常需要经过原材料配制、熔炼、浇注、加压成形、保压凝固及锻后处理等工艺流程。如图 12-43 所示，液态模锻时，先将熔融金属液注入锻模型腔内，在金属液处于固相与液相混合状态下施加压力，使金属充满型腔。凸模施加压力，压合金属在凝固过程中因收缩而产生的空洞和各种铸造缺陷，并产生相应的塑性变形。金属凝固过程中，在较大面积上受到较高的压力作用，提高了金属结晶成核率，加快了凝固时间。成形后的制品组织致密，减少和消除了内部缩松和缩孔等缺陷。

液态模锻适用于高温下塑性较好的金属材料，特别是有色金属及其合金，包括铸造合金，甚至有些变形合金的液态模锻也已经开始应用。液态模锻主要适用于锻造各种形状复杂、尺寸精度要求较高的金属零件，如炮弹引信、波导管弯头、油泵壳体等有色金属零件以及缸体等铁碳合金零件。

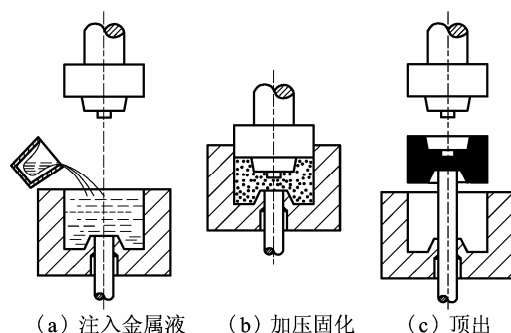


图 12-43 液态模锻工艺过程

第三节 快速原型制造技术简介

一、快速原型制造技术

20 世纪 80 年代末期，在日本和美国开发了一种全新概念的制造技术，即快速原型制造技术 (Rapid Prototyping Manufacturing, 简称 RPM)，目前已迅速扩展到世界各国。快速原型制造技术是计算机技术、激光技术、材料科学与工程技术的集成。它综合应用各种现代技术，直接将计算机设计数据快速地转化为实物，从而实现对产品进行快速评估、修改设计、工装准备及投产。目前，快速原型制造技术脱离了最初的“原型”概念，已经广泛应用于快速模型制造、快速模具制造和快速功能零件制造等领域，发挥了巨大的工业推动作用。图 12-44 所示即为利用快速原型技术制作的产品。

1. 快速原型制造方法简介

快速原型制造技术突破了传统加工方式的理念，采用“增材制造”取代了传统的“去除材料”加工方法。概略地讲，快速原型制造属于添加成形，即利用各种机械、物理及化学手

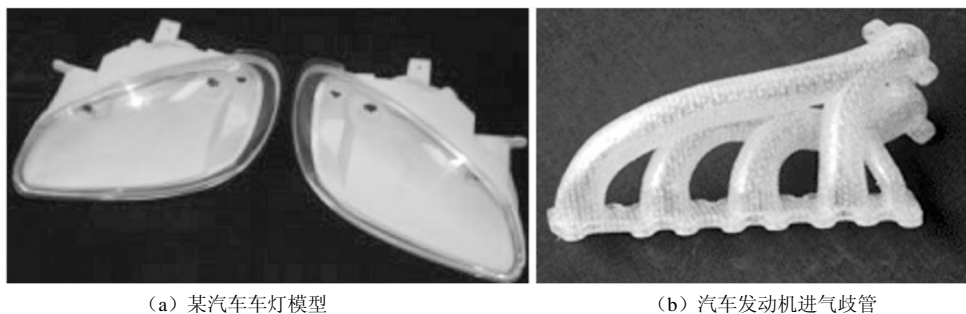


图 12-44 快速原型产品

段通过有序地添加材料来实现零件加工，或者称之为离散—堆积成形加工。它将在计算机上设计的三维零件模型，进行网格化处理和分层处理，通过成形软件获得各层截面的二维轮廓信息，并自动生成加工路径，控制成形头有选择性地固化、切割、喷涂或烧结一层层材料，从而形成零件各不同截面并逐步叠加成三维原型，再将其进行相应的后处理获得最终零件。

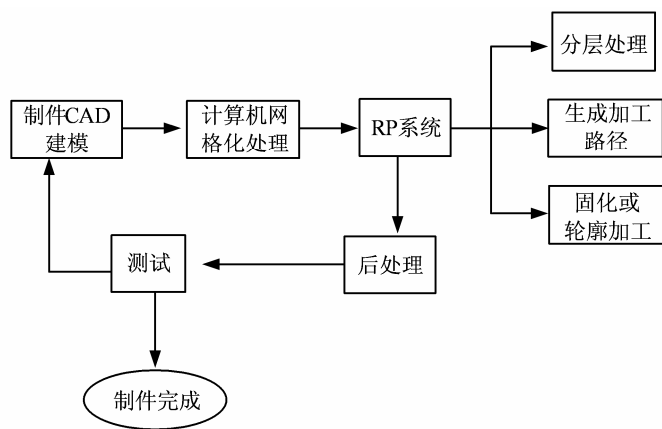


图 12-45 快速原型技术原理

快速原型制造的工艺过程如图 12-45 所示。

(1) 快速原型制造工艺过程
进行快速原型制造生产首先需要在三维 CAD 造型系统中完成产品原型的设计，即三维建模。然后对模型所具有的一些不规则自由曲面进行近似处理，生成 STL 格式文件。根据产品模型的结构特征选择合适的加工方向，在该方向上对模型进行分层处理，即用具有一定间隔的平面切割

近似处理后的模型，以提取模型截面的轮廓信息。然后利用相应的控制软件指令快速原型制造机床的成形头根据分层处理后的各截面轮廓信息做扫描运动。成形头在工作台上逐层地堆积并黏结材料，最终形成三维立体零件。最后，对成形后的零件表面进行打磨、抛光、涂挂，或放在加热炉中进行必要的高温烧结，获取具有一定精度和强度的成形产品。

(2) 快速原型制造方法及其分类

1) 按构型材料分类。

可将快速原型制造分为液态材料固化成形、线材熔融黏结成形、膜材黏结成形以及粉末烧结成形等。

2) 按制造工艺原理分类。

① 立体光刻成形 (Stereo Lithography Apparatus, SLA) 又称光造型，是一种以光敏树脂为构型原材料的选择性液体固化成形工艺，其工作原理如图 12-46 所示。液态

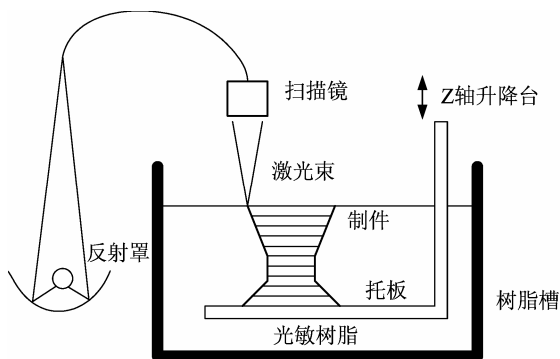


图 12-46 立体印刷成形工艺原理

成形工艺与模具设计