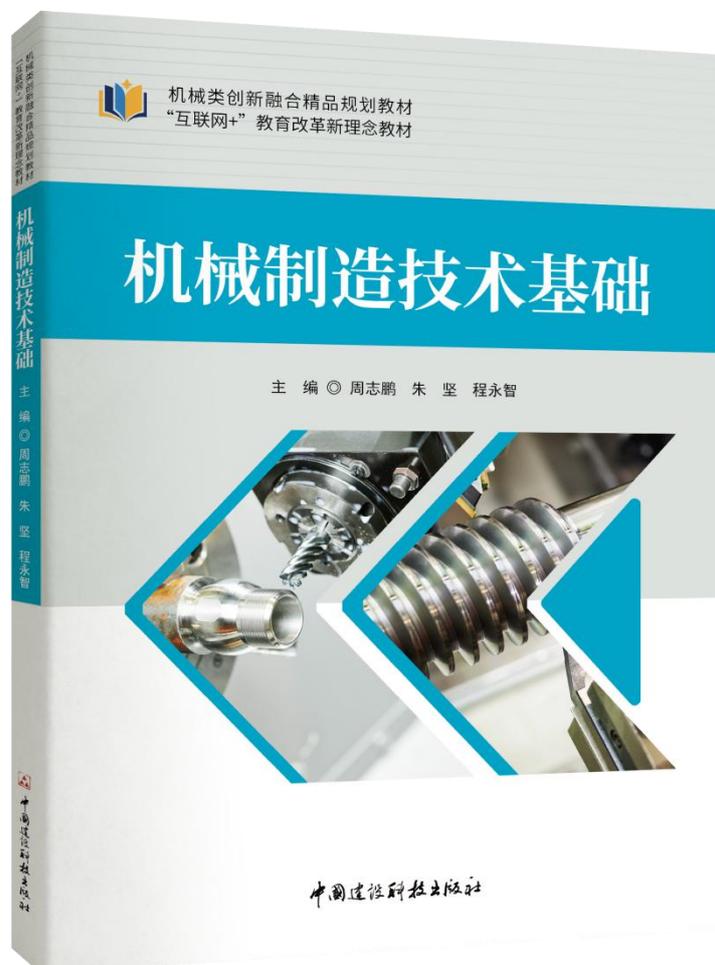


机械制造技术基础



类目：机械类

书名：机械制造技术基础

主编：周志鹏 朱坚 程永智

出版社：中国建设科技出版社

开本：大 16 开

书号：978-7-5160-4271-7

使用层次：通用

出版时间：2025 年 2 月

定价：49.80 元

印刷方式：双色

是否有资源：有

策划编辑:李亚博
责任编辑:汪永涛
封面设计:旗语书装

机械类创新融合精品规划教材
“互联网+”教育改革新理念教材



机械类创新融合精品规划教材
“互联网+”教育改革新理念教材



机械制造技术基础

机械制造技术基础

主编◎周志鹏 朱坚 程永智

机械制造技术基础

主编◎周志鹏 朱坚 程永智



专·精·志·远
为您提供专业服务
编辑部:010-63567684
读者服务:010-63567692
网上书店:www.jccbs.com



中国建材工业出版社

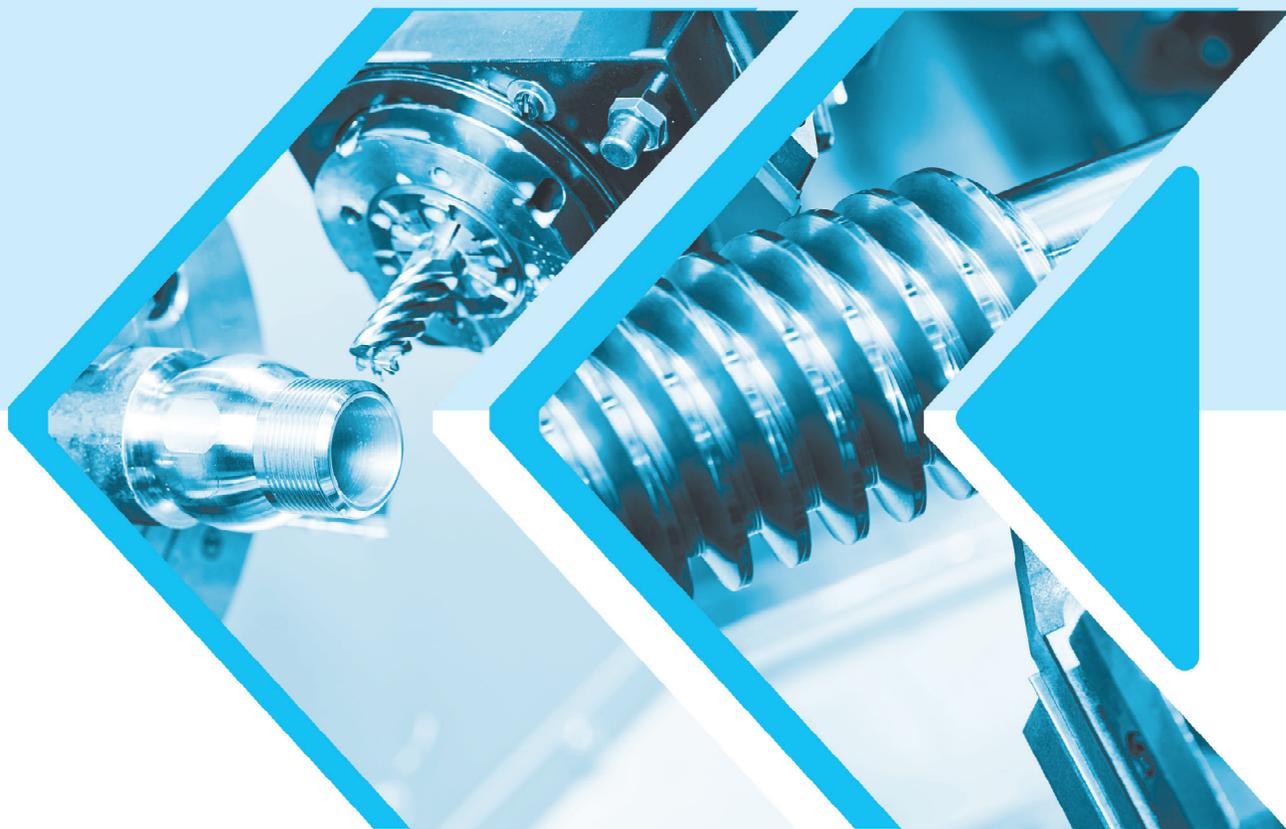
中国建材工业出版社



机械类创新融合精品规划教材
“互联网+”教育改革创新理念教材

机械制造技术基础

主 编 © 周志鹏 朱 坚 程永智



中国建设科技出版社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

机械制造技术基础 / 周志鹏, 朱坚, 程永智主编.
北京: 中国建设科技出版社, 2025. 2. -- (机械类创
新融合精品规划教材“互联网+”教育改革新理念教材).
ISBN 978-7-5160-4271-7

I. TH16

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2024BX7689 号

机械制造技术基础

JIXIE ZHIZAO JISHU JICHU

周志鹏 朱 坚 程永智 主 编

出版发行:  中国建设科技出版社

地 址: 北京市西城区白纸坊东街 2 号院 6 号楼

邮 编: 100054

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 唐山唐文印刷有限公司

开 本: 889mm×1194mm 1/16

印 张: 14.5

字 数: 350 千字

版 次: 2025 年 2 月第 1 版

印 次: 2025 年 2 月第 1 次

定 价: 49.80 元

本社网址: www.jskjcs.com, 微信公众号: [zgjskjcs](https://weixin.qq.com/r/zgjskjcs)

请选用正版图书, 采购、销售盗版图书属违法行为

版权专有, 盗版必究。本社法律顾问: 北京天驰君泰律师事务所, 张杰律师

举报信箱: zhangjie@tiantailaw.com 举报电话: (010) 63567684

编 委 会

主 编	周志鹏	朱 坚	程永智	
副主编	殷雪艳	石晨迪	王小艳	王启然
	王丽霞	迟 欢	李 敏	申月华
	杜旭红	李 晶	赵茹嫦	孙梦珣
	姚煜岚	刘文锦		

前言

PREFACE

本书作为机械类专业不可或缺的技术基础课程教材，具有极其重要的地位。本书在继承传统教材扎实的理论根基与基础知识的同时，紧密贴合生产实践，融入本专业技术人员在日常工作中的核心任务与流程。为确保内容的丰富性与实用性，本书经过精心筛选，在编排上层层递进、由浅入深，并注重运用图示、表格与具体实例进行直观阐述，使之与设计手册、国家标准保持一致。此外，本书还特别强调理论与实践的紧密结合，力求使读者在掌握理论知识的同时，能够将其灵活应用于实际生产中。

全书共 10 章，分别为机械制造基础导论、铸造、锻造、焊接、金属切削的基础知识、常用金属切削刀具、常用金属切削机床、机床夹具原理与设计、机械加工工艺规程的设计、先进制造技术。

为巩固学习成果，帮助读者深入理解并掌握核心知识点，3~10 章每章开头设置有“内容要点与学习目标”，列举了本章需要掌握的重要知识点，结尾处都设有适量的习题。这些习题旨在引导学生将所学知识应用于实际情境中，以检验他们的学习成果。

在本书编写过程中，我们参考并汲取了众多同类教材和宝贵文献的精髓。这些教材和文献的作者们以其深厚的学术造诣和辛勤的付出，为本书提供了丰富的知识资源和启示。在此，谨向这些作者表达由衷的感谢和敬意。同时，衷心感谢参与本书编写、审稿以及出版工作的教师和工作人员。他们不辞辛劳，精益求精，为本书的完成付出了大量的时间和精力。

本书可作为学校机械类及相关专业的理想教材，同时也可作为工程技术人员业务指导的参考用书。鉴于能力有限，书中可能有疏漏或不足之处，诚挚地邀请各位同行和读者不吝赐教，以帮助我们不断完善和提升本书的质量。

编者

2024 年 12 月

目录

CONTENTS

1	机械制造基础导论	1
1.1	机械制造技术的发展和作用	1
1.2	机械制造的要素和过程	3
1.3	机械制造设备	4
	思考与练习	4
2	铸造	5
2.1	铸造成型简介	5
2.2	砂型铸造	7
2.3	特种铸造	13
2.4	铸造成型工艺设计	15
	思考与练习	17
3	锻造	18
3.1	塑性成型基本原理	18
3.2	锻造方法及其应用	22
3.3	锻压工艺设计及结构工艺性	27
3.4	锻造成型新技术	34
	思考与练习	36
4	焊接	37
4.1	焊接成型基本原理	37
4.2	焊接方法及其应用	45
4.3	焊接结构与工艺性	55
4.4	焊接成型新技术	58
	思考与练习	59

5	金属切削的基础知识	61
5.1	金属切削刀具基础	62
5.2	金属切削过程基本原理	75
5.3	切削力与切削功率	79
5.4	切削热与切削温度	82
5.5	刀具寿命与材料的切削加工性	85
	思考与练习	93
6	常用金属切削刀具	94
6.1	车刀	94
6.2	孔加工刀具	96
6.3	铣刀	100
6.4	刨刀、拉刀	103
6.5	齿轮刀具	106
6.6	砂轮	109
6.7	数控刀具	110
	思考与练习	115
7	常用金属切削机床	116
7.1	机床的分类	116
7.2	机床的型号编制	119
7.3	机床的基本结构	122
7.4	常用金属切削机床	124
	思考与练习	129
8	机床夹具原理与设计	130
8.1	概述	130
8.2	工件的定位	133
8.3	定位误差的分析	144
8.4	工件的夹紧	147
	思考与练习	154
9	机械加工工艺流程的设计	156
9.1	概述	156
9.2	定位基准的选择	165
9.3	毛坯尺寸及加工余量的确定	167
9.4	工艺路线的拟定	174
	思考与练习	181

10	先进制造技术	182
10.1	概述	182
10.2	柔性化制造系统	183
10.3	精密加工与超精密加工	191
10.4	特种加工	197
10.5	数字化制造	206
10.6	绿色制造	212
10.7	智能制造	216
	思考与练习	221
	参考文献	222

1

机械制造基础导论

1.1 机械制造技术的发展和作用

1.1.1 机械制造业在国民经济中的作用

机械制造业是指从事生产各种动力机械、起重运输机械、农业机械、冶金矿山机械、化工机械、纺织机械、机床、仪器仪表等机械设备的行业。机械制造业为整个国民经济提供技术装备，其发展水平是国家工业化的主要标志之一，也是国家的重要支柱产业。

机械制造业一直是我国国民经济的支柱产业，机械制造技术在国民经济中具有十分重要的地位和作用，无论是传统产业还是新兴产业，都离不开各种各样的机械设备。国民经济中的任何行业发展，必须要依靠机械制造业来提供装备与技术支持，在国民经济生产力的构成中，制造技术的作用占 60% 以上。

机械制造业在许多国家，特别是发达国家的国民经济中占有非常重要的地位，是国民经济的支柱，美国 68% 的财富来自制造业，而日本国总产出的 49% 是由制造业创造的。我国制造业也占工业总产值的 40%。从就业人口比例来看，大约有 1/4 的人口从事制造业，在非制造业部门，大约有 1/2 的雇员的工作与制造业密切相关。可以说，没有发达的制造业收入，就不可能有国家真正的繁荣和强大。

1.1.2 我国机械制造业的现状与面临的挑战



我国机械制造业
的现状与面临的挑战

中华人民共和国成立前,受历史原因的影响,我国机械制造技术的起步就远远落后于西方国家,这也导致了我国部分基础制造技术的掌握熟练度低于国外。自中华人民共和国成立后,尤其是改革开放以来,我国制造业有了突飞猛进的发展,其得益于充分利用国内外的资源和技术优势,通过引进、吸收和再创新,我国的制造业发展令人瞩目。2016年国家开始推行供给侧结构性改革,我国制造业进入新的发展阶段。

目前,机床领域的尖端产品,如五轴联动叶片加工、大型车削中心及柔性加工线,在我国都已实现了产业化;复合式板材加工中心、液压式回转头数控压力机等,在我国都已达到国际先进水平;我国的工具行业在超硬材料、复杂刀具等方面也取得了长足进步,高精度、高效率、高寿命的刀具、磨具市场占有率不断提高。

虽然我国已成为制造业大国,但离制造强国仍有一定距离。例如,机械制造业的工艺主要依靠制造工艺。由于我国机械制造行业的发展比发达国家起步较晚,导致我国机械设计和制造水平与国际先进水平存在很大差距,无论是在规模方面还是在设备方面,尤其是精细加工和微加工方面差距都较大。我国的机械制造业中自动化技术运用较少,相比国外先进的智能制造水平还有很大不足。此外,在现场管理、生产运营等管理方面,我国的管理工具和管理思想与经验也仍有较大进步空间。

因此,如何在生产能力、技术水平等方面赶超国外先进国家,如何大力发展机械制造业技术能力,是机械制造业需要思考的首要问题。

1.1.3 机械制造技术的发展趋势

我国机械制造业今后的发展方向,是智能化、集成化、精细化、微观化以及多元化,应以基础机械的关键制造技术,柔性化、自动化制造技术,重大成套技术装备及大批量制造技术为重点,研究开发优质、高效、精密工艺与装备,为新一代产品投产和规模生产提供新工艺、新装备作为总目标。

在生产管理方面,应不断提升精益生产能力,总结出标准化、通用化、系统化等切合实际生产需要的管理经验与思想方法,来进行降本增效,提升生产管理水平。

此外,由于人工智能的快速发展,机械制造技术也呈现网络化趋势。如果说自动化趋势为未来的机械控制提供了无限可能,那么网络化趋势将会成为自动化趋势发展的主要推动力。即使是自动化控制技术,其本身也会受到时间和空间的限制。而在网络化技术加入后,网络技术的相关属性能够使自动化控制技术超越这两个属性的限制。未来网络化会渗透至社会的各个方面,这也意味着机械制造能够与其他环境产生更加紧密的联系。网络化还能够帮助机械制造领域链接研发与使用人员,如能够通过实时的信息收集捕捉社会对机械制造的实际需求等。

1.2 机械制造的要素和过程

1.2.1 机械制造的要素

机械制造包括机械零件的制造、设备及其他附件的组装和加工，还包含油漆、焊接、夹紧、喷涂等一系列的操作步骤。通常机械制造要素包括机器工具、材料处理、测试和检验、大型设备、机械设计、数字技术、计算机控制、人机交流等。

对于机械加工，其要素包括机床、刀具、夹具、工件及其他相关设备；加工方法，如车削、钻孔、铣削、切断等；加工技术，包括刀具的选择、刀具的参数及机床的控制；加工参数，如进给速度、切削深度和进给量等。

1.2.2 机械制造的生产过程

机械制造的生产过程是一项以人工设计，机器加工，机械装配，电子控制，测试等多个环节组成的工艺流程，它是将原材料及部件加工成满足客户要求的机械零件和装配单元的过程。

机械制造的生产过程主要包括材料准备、加工制造、检测测量、装配以及产品包装等。其主要步骤如下。

- (1) 材料准备：选择合适的原材料，将其放置在机床旁边。
- (2) 加工制造：采用铸造、机械切削等方式制作出零件。
- (3) 检测测量：使用测量工具和仪器，对零件的尺寸精度、外观等进行检测。
- (4) 装配：将多个零件进行装配，使之协调配合。
- (5) 产品包装：将完成的产品进行包装，以确保其质量。

1.2.3 机械制造的工艺

机械制造的工艺包括铣削加工、钻孔加工、锻造加工、外圆磨削加工、内圆磨削加工、齿轮加工、热处理等。

机械加工的工艺性是指对金属、塑料等材料进行切削、冲压、铸造或其他形式的机械加工，以达到特定的尺寸与几何形状的一系列技术操作。机械加工的工艺性包含了加工材料的选择、工艺路线的选择以及刀具、机床及其附件、传动装置等加工因素的选择。



机械制造的
要素和过程



1.3 机械制造设备



机械制造设备是指用于机械制造和加工的各种设备，机械制造设备是机械制造企业的核心，也是机械制造业的重要载体。

常见的机械制造设备包括数控机床、铣床、磨床、冲床、刨床、车床、剪床、锯床、折弯机、钻床、滚压机、铸造机、压力机、切断机等。

此外，机械制造设备还包括加工中心以及其他特殊用途的机械设备以及一些辅助设备，如测量仪器、液压气动元件、控制器等。



机械制造设备



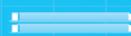
思考与练习



1. 机械制造技术发展的趋势是什么？
2. 机械制造的生产过程有哪些？
3. 什么是机械加工的工艺性？

2

铸 造



2.1 铸造成型简介



2.1.1 铸造概念

铸造是一种基本的热加工成型方法，通过熔炼金属，将熔融的金属液浇注、压射或吸入铸型中，待凝固后获得具有一定形状、尺寸和性能的零件或零件毛坯。通过铸造获得的毛坯和零件称为铸件。铸造成型应用广泛，在机械产品中，铸件占有比较大的比例，如在普通机床中，铸件的质量占比达 60%~80%，在重型机械中也达到 60%以上。按照铸造成型工艺方法，一般将铸造分为砂型铸造和特种铸造两大类。

2.1.2 铸造成型主要特点

1. 铸造成型的优点

(1) 铸造成型方便、适应能力强。铸造利用的是液态金属流动成型，因而适用于制造形状复杂，尤其是有复杂内腔的零件。铸造成型方法对工件的尺寸形状原则上来说几乎没有限制。只要将材料熔化，制造出铸型，就能生产出各种各样的铸件。此外，铸件的材料不局限于金属材料，也可以是高分子材料或者陶瓷材料等。目前采用铸造方法，可以生产出的铸件质量范围广，尺寸范围大，如质量从几克到几百吨，长度从几厘米到几十米，厚度为 0.5~

500 mm 的各种铸件。常见的有气缸体、机床床身等。

(2) 生产成本较低廉。铸造所用原材料来源广泛,甚至可以直接利用报废的零件和废料等。并且铸件的形状尺寸与零件很接近,从而节省了材料和加工工时。若为精密铸件,还可以省去切削加工,直接用于装配。

(3) 铸造的设备往往较为简单,投资成本低。

2. 铸造成型的缺点

一般情况下,铸造成型的精度不高,铸件易产生铸造缺陷,如铸件组织晶粒粗大,内部常出现缩孔、气孔、砂眼等,其力学性能不如锻件,因而铸件多用于受力不大的零件。

铸件表面粗糙,尺寸精度不高。砂型铸造生产工序较多,有些工艺过程难以控制,铸件质量不够稳定,废品率较高。

近年来随着精密铸造的发展,以及新工艺、新设备的不断开发,铸件的质量有了很大的提高。

2.1.3 铸造成型工艺概念与基础

合金的铸造性能,是指合金在铸造过程中所表现出来的工艺性能。铸造性能与铸件的质量息息相关。合金的铸造性能主要包括流动性、收缩性、偏析和吸气性等,其中流动性和收缩性对铸件的质量影响最大。



铸造成型工艺
概念与基础

1. 流动性

流动性是指液态金属的流动能力,与金属的成分、温度、杂质含量及物理性质有关。流动性是熔融合金充满铸型的能力,能直接影响铸件的质量。

若合金的流动性好,则其充型能力就强,易获得形状尺寸完整准确、轮廓清晰且形状复杂的铸件。若流动性不好,充型能力就差,铸件就容易产生浇不到、冷隔、夹渣、气孔和疏松等缺陷。因此,在铸件设计和制订铸造工艺时,必须考虑合金的流动性。

影响流动性的因素主要有合金种类、成分、结晶特征和其他物理性能。

不同的铸造合金具有不同的流动性。灰铸铁流动性最好,硅黄铜、铝硅合金次之,铸钢流动性最差。

同种合金的成分不同,具有不同的结晶特点,其流动性也不同。如纯金属和共晶成分合金的结晶是在恒温下进行的,结晶过程对液态合金流动阻力小,所以流动性好。而其他成分合金的结晶是在一定温度范围内进行的,结晶区域是液相和固相并存的两相区,阻碍液态合金的流动。合金结晶温度范围越宽,流动阻力越大,流动性越差。

此外,影响合金流动性的因素还有合金液的黏度、结晶潜热、热导率等物理性能。

2. 收缩性

收缩是指液态金属在冷却凝固过程中,体积和尺寸减小的现象。收缩是铸件中许多缺陷产生的基本原因。整个收缩过程可分为三个阶段。

(1) 液态收缩,即合金液从浇注温度冷却到凝固开始温度之间的体积收缩。液态收缩时型腔内液面会降低。合金液体的过热度越大,则液态收缩也越大。

(2) 凝固收缩, 即合金从凝固开始温度冷却到凝固终止温度之间的体积收缩, 一般情况下, 此阶段仍表现为型腔内液面的降低。

(3) 固态收缩, 即合金从凝固终止温度冷却到室温之间的体积收缩。固态体积收缩表现为三个方向的线收缩。

液态收缩和凝固收缩主要引起铸件产生缩孔和缩松, 而固态收缩主要引起铸件产生内应力、变形和裂纹等缺陷。

影响合金收缩的因素主要有合金的化学成分、铸件结构与铸型条件、浇注温度等。

3. 合金的吸气性和氧化性

合金在熔炼和浇注时吸收气体的能力称为合金的吸气性。如果合金在液态时吸收的气体多, 则在凝固时, 气体会来不及逸出, 使铸件产生气孔、白点等缺陷。可以通过缩短熔炼时间, 选用烘干过的炉料等措施, 来提高铸型与型芯的透气性, 这样可以减少合金的吸气性。

合金液与空气接触, 被空气中的氧气氧化, 形成氧化物, 称为合金的氧化性。合金的氧化物会影响铸件质量, 需要及时清除, 否则会导致在铸件中出现夹渣缺陷。

2.2 砂型铸造

砂型铸造是用型砂紧实成型的铸造方法, 是实际生产中应用最广泛的一种铸造方法, 用砂型铸造的铸件, 约占铸件总质量的 90%。

砂型铸造主要工序包括制造模样、制备造型材料、造型、造芯、合型、熔炼、浇注、清理与检验等。

2.2.1 模样与芯盒

造型时需要模样和芯盒。模样是用来形成铸型型腔的工艺装备, 用来形成铸件的外部轮廓。芯盒是用来制造型芯的工艺装备, 用来制造砂芯, 形成铸件的内部轮廓。

制造模样和芯盒时, 一般根据铸件大小和生产规模的大小来进行材料的选择。小批量生产时, 一般用木材制作模样和芯盒。大批量生产时, 可用金属或塑料制作模样和芯盒。

制造模样与芯盒时必须注意以下几个方面。

(1) 选择分型面。分型面是指铸型组元间的接合面, 分型面的选择要恰当, 如应具有最大水平投影尺寸, 尽量为平面等。

(2) 起模斜度。为了使模样容易取出, 在模样平行于起模方向会设置斜度, 一般为 $0.5^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 。

(3) 铸造圆角。为了造型方便, 并防止铸件尖角出现裂纹, 需要将模样和芯盒的相邻表面交角处都做成圆角。

(4) 芯头。为了能安放型芯，模样上要考虑设置芯座头。芯头是型芯的外伸部分，用以定位和支撑型芯。

(5) 铸件收缩量和加工余量。冷凝过程中铸件的体积会收缩，因此模样的尺寸应比铸件的图样尺寸大一个收缩量。铸件上需要机械加工的部分，都需要在模样上增加加工余量，加工余量数值与加工表面的精度、加工面尺寸、造型方法以及加工面在铸件中的位置有关。制造模样和芯盒时，应该将收缩量和加工余量考虑在内。

2.2.2 造型

造型是砂型铸造的最基本工序，是用造型材料及模样等工艺装备来制造铸型的过程。造型通常可分为手工造型和机器造型。

1. 手工造型

手工造型，是指用手工或者手动工具，完成造型的工序。手工造型的优点是操作灵活，适应性强，成本比较低，生产准备时间短。但手工造型的缺点也很明显，其铸件的质量不高，质量稳定性差，且生产率低，劳动强度大。因此，手工造型主要用于单件、小批量生产，特别是大型和形状复杂的铸件。根据不同铸件的形状尺寸和批量与使用要求，可以选择不同的手工造型方法。常见的手工造型方法，包括有箱造型、脱箱造型、地坑造型、刮板造型等。表 2-1 为主要手工造型方法及其特征与适用范围。

表 2-1 主要手工造型方法及其特征与适用范围

造型方法	特征	适用范围
有箱造型 (图 2-1)	用砂箱作为铸型组成部分，可分为整体模造型和分开模造型	整体模造型适用于形状简单的铸件；分开模造型适用于较复杂的铸件
脱箱造型 (图 2-2)	在可脱砂箱内造型，在合型后浇注前脱去砂箱，可以减少合箱时间，提高生产效率	用于大批量小型铸件的铸造
地坑造型 (图 2-3)	在地面以下砂坑中或特制地坑中制造下型，可以仅用或不用上箱造型，减少制造砂箱成本。其缺点是生产效率低，操作麻烦，生产周期较长	主要用于大中型铸件的单件或小批量生产
刮板造型 (图 2-4)	用刮板代替模样来造型，能节省制造模样的成本，缩短生产准备时间，但生产率低，对工人的技术水平要求较高	主要用于大中型尺寸的回转体铸件小批量生产

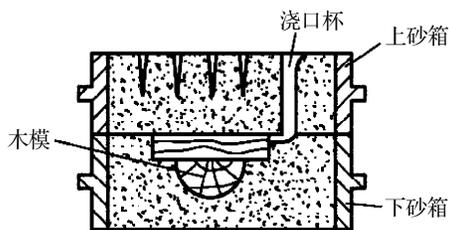


图 2-1 有箱造型

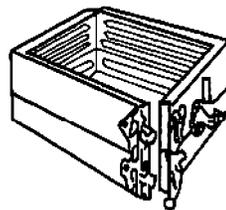


图 2-2 脱箱造型

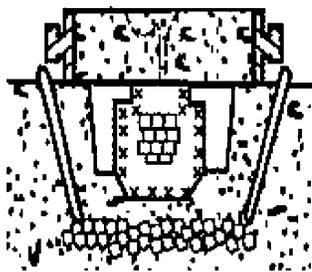


图 2-3 地坑造型

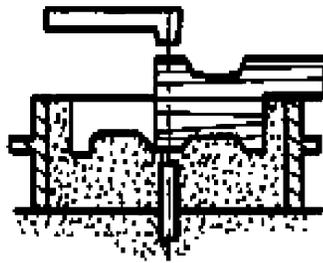


图 2-4 刮板造型

2. 机器造型

机器造型是使用机器全部或至少完成紧砂操作的造型工序。按照不同的紧砂方式分为振实、压实、振压、抛砂、射砂造型等多种方法，其中以振压式造型和射砂造型应用最广。

图 2-5 所示为射砂造型的原理图。利用压缩空气将型砂高速射入芯盒或砂箱，可以预紧实，然后用压实法进一步紧实，它是一种快速高效的砂型造型法。

机器造型可以提高生产效率，提高铸件的表面精度与质量，适用于大批量流水线生产。

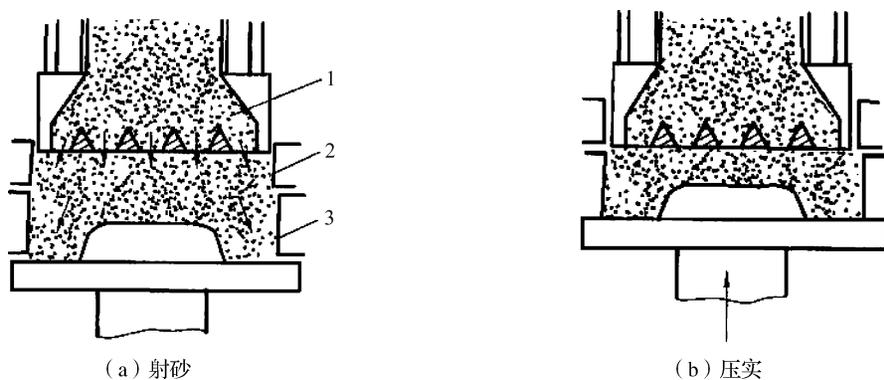


图 2-5 射砂造型的原理图

1—射砂头；2—辅助框；3—砂箱

2.2.3 造芯

造芯也称为制芯，分为手工造芯和机器造芯。手工制芯主要用芯盒造芯，适用于小批量生产，使用广泛。在大批量生产时采用机器造芯比较合理，利用机器来完成填砂、紧砂与取芯。图 2-6 为整体式芯盒造芯的示意图。

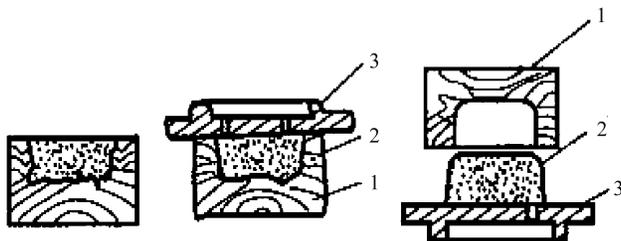


图 2-6 整体式芯盒造芯

1—芯盒；2—砂芯；3—烘干板

型芯成型后一般需要烘干。在适当温度下加热型芯，可提高型芯强度与透气性。为了提高型芯强度，造芯时可以在砂芯中放入铁丝或铸铁制成的芯骨。在砂芯里做出通气孔，可提高砂芯的透气性。

为了提高型芯的耐火性和化学稳定性，可以在型芯表面刷一层涂料，增强其抵抗高温金属熔融液的侵蚀能力。

2.2.4 浇注系统

浇注系统是指金属液流入铸型的一系列通道，也称浇口，一般由浇口盆、直浇道、横浇道和内浇道组成，如图 2-7 所示。浇注系统的作用是使熔融金属液能平稳均匀的充满型腔，阻止杂质如砂粒、气体等进入型腔。此外，还可以在铸件冷凝收缩时补充金属溶液，即补缩。

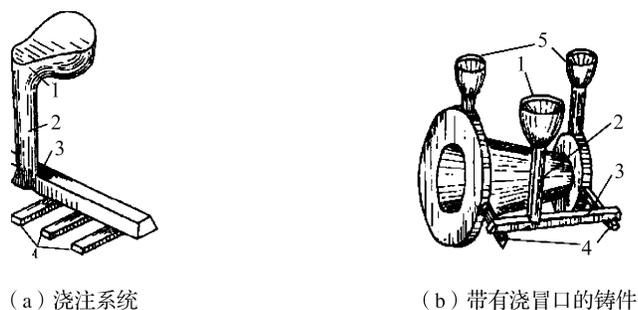


图 2-7 浇注系统及铸件

1—外浇口；2—直浇道；3—横浇道；4—内浇道；5—冒口

2.2.5 合型

合型是指将铸型各个部件装配成一个完整铸型的过程，也称合箱。合型前需要对砂型和砂芯进行检查，确认没有损坏与污染后再进行安装。合型时要注意保证型芯的稳固，上下箱需压紧，避免浇注时熔融金属液顶起上箱，出现抬箱、跑火等事故。



合型

2.2.6 浇注

浇注是指将熔融金属从浇包注入铸型的操作过程。其中，浇包是用来容纳和输送熔融金属液的容器。铸件的质量，与浇注温度和浇注速度也有很大关系。

(1) 浇注温度，指金属液浇入铸型时的温度，是铸型过程重要的质量指标。当浇注温度过高时，会导致铸件产生缩孔、缩松、黏砂和气孔等缺陷。因此，在保证金属液流动性足够的前提下，尽可能做到“高温出炉，低温浇注”。

(2) 浇注速度，指单位时间内浇入铸型中的金属液质量，单位为千克/秒 (kg/s)。当浇注速度过快时，金属液会强烈冲刷铸型，导致冲砂缺陷。在生产中，浇注速度要视具体情况而定，对于薄壁铸件可采取快速浇注，若为厚壁铸件可按“慢-快-慢”的原则浇注。

2.2.7 落砂和清理

(1) 落砂，指用手工或机械使铸件与型砂、砂箱分开的操作过程，可以分为手工落砂和机械落砂。

落砂时铸件应先冷却充足，铸件温度应低于 500 ℃，否则会导致内应力过大，发生变形、开裂等缺陷。

小批量生产可以使用手工落砂，大批量生产应尽量采用机械落砂，可用落砂机和水爆清砂。水爆清砂是指将浇注后尚有余热的铸件，连同砂型和砂芯一起投入水池中，水进入砂中发生急剧汽化和增压而产生爆炸，将砂型和砂芯振落，达到清砂的目的。

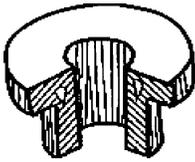
(2) 清理，是指对铸件表面进行清理的过程，包括表面黏砂和多余的金属，如冒口、飞边等。根据材料的特性不同，去除冒口可以采用锤击、锯割、氧气切割和电弧切割等方法。清砂可以使用钢刷和扁铲等工具手工清理，也可以使用振动机械、喷砂、喷丸等设备来进行机械清理。

2.2.8 铸件常见缺陷与修补

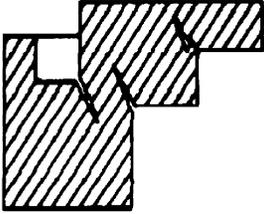
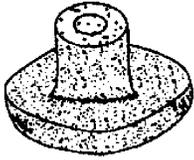
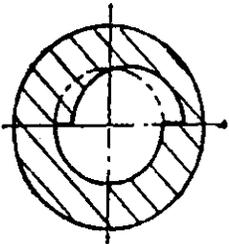
铸件在制造过程中可能产生缺陷，因此铸件清理后需要进行质量检验，检验的基本项目是外观检验和内部缺陷检验。此外，根据产品要求，还有尺寸、金相组织、力学性能、化学成分检验等。

常见的铸件缺陷包括气孔、缩孔、砂眼、黏砂、裂纹、偏芯等，具体参见表 2-2。

表 2-2 常见的铸件缺陷

缺陷类型	特征	主要产生原因
 气孔	铸件内部或表面的孔眼，孔洞内壁光滑，多呈圆形或椭圆形。大气孔一般单独出现，小气孔成群出现	1. 造芯材料含水过多； 2. 型砂透气性差或通气孔堵塞； 3. 浇注速度过快
 缩孔	在铸件截面处出现的形状不规则孔洞，孔洞内壁粗糙，常出现在铸件厚截面处或最后凝固的部位处	1. 补缩不良； 2. 浇注温度过高； 3. 合金成分不良，收缩过大
 砂眼	铸件表面或内部有砂粒的孔洞，形状不规则	1. 型砂强度或紧实度不够； 2. 浇注系统不合理或浇注过快； 3. 型腔等内部散砂未清理干净

续表

缺陷类型	特征	主要产生原因
 <p style="text-align: center;">裂纹</p>	<p>裂纹包括冷裂和热裂。冷裂纹一般呈长条形，表面未氧化，有金属光泽，裂口常常延伸到整个断面；热裂纹断面氧化，无金属光泽，裂口常常曲折不规律</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 铸件设计不合理，壁厚差别太大； 2. 砂型（芯）退让性差，使铸件收缩时产生较大应力； 3. 浇注系统开设不当，使铸件各部分冷却收缩不均，产生较大应力
 <p style="text-align: center;">粘砂</p>	<p>铸件表面粘附一层砂粒或由砂粒与金属氧化物等反应生成的化合物，难以清除，导致铸件表面粗糙不易加工</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 浇注温度过高； 2. 型砂耐火性差； 3. 涂料涂刷不够
 <p style="text-align: center;">偏芯</p>	<p>由于砂芯位置偏移，导致铸件局部尺寸和形状变化</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 砂芯变形； 2. 下芯时放置偏移； 3. 砂芯固定不良，浇注时受冲力偏移

铸件的缺陷往往无法完全避免，但若铸件的缺陷经修补后能达到技术要求，仍可作合格品使用。大部分表面的小缺陷，如小的气孔和砂眼，通过机加工可以去除；此外，还可以用焊补、金属喷镀、浸渍法等方法进行缺陷修补。

(1) 焊补修复，包括气焊和电焊修补，常用于修补裂纹、气孔、缩孔、砂眼等。焊补修复因采用了金属填充料（焊材一般与铸件材质相匹配），焊补处性能基本可以达到母材的标准，且操作简单，焊补效率高。

(2) 金属喷镀修补，通过在缺陷处喷镀一层金属对缺陷进行修补。使用先进的等离子喷镀修补效果较好。

(3) 浸渍法修补，将稀释后的酚醛清漆、水玻璃等浸渍材料通过真空吸入法或压力注入法渗入铸件缝隙，然后使之固化，硬化后即可将空隙填塞堵死。浸渍法常用来修补由于内裂、气孔、氧化、夹渣等缺陷而造成的铸件渗漏。

2.3 特种铸造

随着铸造技术的发展,在砂型铸造技术之外,又发明了许多新的铸造方法,这些方法统称为特种铸造。常用的特种铸造包括金属型铸造、熔模铸造、离心铸造、压力铸造和低压铸造等。这些特种铸造的创新点,主要是改变了铸型的制造工艺或材料,或者改善液体金属充填铸型及随后的冷凝条件等。

2.3.1 金属型铸造

金属型铸造又称硬模铸造,是一种将液体金属浇入用金属材料制成的铸型中,以获得铸件的方法。金属型根据分型面的位置不同可分为水平分型式、垂直分型式和复合分型式。

金属型生产的铸件,其机械性能比砂型铸件高。铸件的精度和表面光洁度比砂型铸件高,而且质量和尺寸稳定,液体金属耗量减少,一般可节约15%~30%。但是由于金属型不透气,而且无退让性,易造成铸件浇不足、开裂或铸铁件白口等缺陷。因此,为了获得优质铸件,必须严格控制工艺。

金属型铸造主要适用于大批量生产的非铁合金铸件,要求铸件形状不能太复杂,壁厚应较均匀且不宜过薄。如气缸盖、油泵壳体等。



金属型铸造

2.3.2 熔模铸造

熔模铸造是用易熔材料(如蜡料)制成模样,然后在表面涂覆若干层耐火材料制成型壳,待硬化干燥后,将蜡模熔去,从而获得具有与蜡模形状相应空腔的型壳,再经焙烧后进行浇注而获得铸件的一种方法。由于模样广泛采用蜡质材料来制造,因此常将熔模铸造称为“失蜡铸造”。

熔模铸造的一般工艺流程:标准铸件作为母模制造压型→制造蜡模→结壳、熔化蜡模→焙烧→浇注金属液→铸件清理与热处理。

熔模铸造的特点是铸件的精度及表面质量高,减少了切削加工工作量,节约了金属材料。熔模铸件的形状一般都比较复杂,铸件上铸出孔的最小直径可达0.5 mm,铸件的最小壁厚为0.3 mm。

熔模铸造能铸造各种合金铸件,尤其是熔点高、难切削加工和用别的加工方法难以成型的合金,可单件也可大批量生产。但是熔模铸造生产工序繁多,生产周期长,工艺过程复杂,影响铸件质量的因素多,必须严格控制才能稳定生产。

熔模铸造主要用于生产汽轮机、涡轮机的叶片或叶轮，切削刀具，以及小型零件等。

2.3.3 离心铸造

离心铸造是将液体金属注入高速旋转的铸型内，使金属液做离心运动充满铸型和形成铸件的技术和方法。根据旋转空间位置不同，离心铸造机可分为立式和卧式两类。

立式离心铸造机的铸型是绕垂直轴旋转的，铸件的内表面是抛物线形，主要用于生产高度小于直径的圆环类铸件。卧式离心铸造机的铸型是绕水平轴旋转的，主要用于生产长度大于直径的套筒类或圆环类铸件。

由于离心运动使液体金属在径向能很好地充满铸型并形成铸件的自由表面，不用型芯能获得圆柱形的内孔。金属中的气体、熔渣等夹杂物由于密度较小而集中在铸件内表层，金属的结晶则从外向内呈方向性结晶，有助于液体金属中气体和夹杂物的排除，从而改善铸件的机械性能和物理性能。

用离心铸造法铸造空心圆筒形铸件时可以省去型芯和浇注系统，离心铸造还便于制造筒、套类复合金属铸件，如钢背铜套等，其结合面牢固、耐磨，节约金属材料。

离心铸造的不足之处在于铸件的內孔直径不准确，內孔表面比较粗糙，质量较差，但不会妨碍一般管道的使用要求，对于內孔需要加工的机器零件，则可采用加大內孔加工余量的方法来解决。

2.3.4 压力铸造

压力铸造是指将熔融或半熔融的金属以高速压射入金属铸型内，并在压力下结晶的铸造方法，简称压铸。

压力铸造的特点是能得到致密的细晶粒铸件，其强度比砂型铸造提高 25%~30%，铸件质量高，可不经切削加工直接使用。可以压铸形状复杂的薄壁铸件，在所有铸造方法中生产效率最高。

压铸机是压铸生产最基本的设备。一般分为热压室压铸机和冷压室压铸机两大类。由于压铸机投资大，且受到压铸机锁模力及装模尺寸的限制，不适宜生产大型压铸件。压铸型制造周期长，故只适用于大批量生产。此外，压铸合金种类受限制，主要应用于大批量生产的非铁合金铸件，铁合金熔点高，压型使用寿命短，故目前铁合金压铸难以用于实际生产中。

在压铸件产量中，占最大比重的是铝合金压铸件，其次为锌合金压铸件，铜合金压铸件占 1%~2%。应用压铸件最多的是汽车、拖拉机制造业，其次为仪表制造和电子仪器工业。用压铸法生产的零件有发动机气缸体、气缸盖、变速箱箱体、发动机罩、仪表和照相机的壳体与支架、管接头、齿轮等。

除上述特种铸造外，还有低压铸造、悬浮铸造、磁型铸造等铸造新工艺与新技术，随着铸造技术的发展，传统的铸造技术不断在改进，新的铸造技术也在不断推陈出新。

2.4 铸造成型工艺设计

铸件的工艺设计主要包括分型面的选择原则、浇注位置的选择原则、铸造工艺参数确定、铸造图纸绘制等。

1. 分型面的选择原则

分型面是铸型之间的结合面，对铸件质量影响很大。分型面若选择不当，还会影响制模、造型、造芯、合型或清理等工序。因此，在选择铸型分型面时应考虑如下原则。

(1) 分型面应选择铸件最大截面处，以便于起模。起模是指模样或模板与铸型分离以及型芯与芯盒分离的操作，是造型、造芯的关键工序。

(2) 分型面的选择应尽量简化工序。应选择简单、最少、平直的分型面，使造型工艺简单。若只选择一个分型面，则可以采用简单的两箱造型方法。在大批量生产中，可增芯以减少分型面，采用机械造型。

(3) 尽可能使铸件的基准面置于同一砂箱中，以避免产生错箱、披缝和毛刺等。

(4) 尽量使型腔及主要型芯位于下型，以便造型、下芯、合型和检验壁厚。但下型型腔也不宜过深，并应尽量避免使用吊芯。

(5) 尽量减少型芯和活块的数量，以简化制模、造型、合型等工序。

2. 浇注位置的选择原则

浇注位置是指在浇注时铸件在铸型中所处的空间位置。浇注位置是否正确对铸件质量有很大的影响，选择时应考虑以下原则。

(1) 铸件的重要加工面应朝下或位于侧面。因为铸件上部凝固速度慢，晶粒较为粗大，上表面容易产生砂眼、气孔、夹渣等缺陷，应将较大的平面朝下；铸件下部的晶粒细小，组织致密，质量优于上部。车床床身导轨面和锥齿轮的锥面，都是主要工作面，是关键表面，要求组织均匀致密和硬度高，所以浇注时应朝下。

(2) 铸件的宽大平面应朝下。由于在浇注过程中，高温金属液对型腔的上表面产生强烈辐射，会导致上表面的型砂急剧膨胀而拱起或开裂，金属液进入表层裂缝中，形成夹砂缺陷，因此平板类、圆盘类铸件的大平面应朝下。

(3) 面积较大的薄壁部分应朝下或垂直。将薄壁部分置于铸型上部，易产生浇不足和冷隔等缺陷，因此应置于下部，以防止产生冷隔或浇不到等缺陷。

(4) 易形成缩孔的铸件，其较厚的部分应置于分型面附近的上部或侧面，以便在铸件厚壁处直接安装冒口，使之实现自上而下的定向凝固。

(5) 应尽量减少型芯的数量，且应便于安放型芯、固定和排气。

3. 铸造工艺参数确定

铸造工艺参数包括加工余量、收缩率、起模斜度、铸造圆角、芯头、芯座等。

(1) 机械加工余量的确定。铸件为进行机械加工而在表面加大的准备切削的金属层厚度，称为机械加工余量，根据铸件的大小、生产批量、合金种类、铸件复杂程度以及加工面在铸型中的位置来确定。机械加工余量过大，会浪费金属和机械加工工时，增加零件成本；过小，则不能完全去除铸件表面的缺陷，甚至露出铸件表皮，达不到设计要求。

灰铸铁表面光滑平整精度高，加工余量小；机器造型铸件精度高，加工余量小。手工造型误差大，余量应加大。铸钢表面粗糙，表面加工余量应加大。铸件的尺寸越大或加工面与基准面的距离越大，加工余量也应越大。

(2) 收缩率的确定。由于合金凝固时产生收缩，铸件的实际尺寸要比模样的尺寸小，因此必须按合金收缩率放大模样的尺寸，通常以铸件的线收缩率来考虑。通常灰铸铁的线收缩率为 $0.7\% \sim 1.0\%$ ，铸钢的为 $1.6\% \sim 2.0\%$ ，非铁金属及其合金的为 $1.0\% \sim 1.5\%$ 。

(3) 起模斜度的确定。为使模样容易从铸型中取出或型芯从芯盒中脱出，平行于起模方向在模样或芯盒壁上的斜度，称为起模斜度。起模斜度的大小取决于立壁的高度、造型方法、模型材料等因素。一般来说，垂直壁越高，斜度越小，为了使型砂能从模样内腔中脱出，形成自带“型芯”，模样内壁的起模斜度应比外壁大，一般外壁为 $15' \sim 3^\circ$ ，内壁为 $3^\circ \sim 10^\circ$ 。机器造型比手工造型的斜度要小一些，金属模比木模的斜度要小一些。

(4) 确定铸造圆角。设计制作模样时，壁间连接或拐角处都要做成圆弧过渡，称为铸造圆角。一般中、小型铸件的铸造圆角半径为 $3 \sim 5 \text{ mm}$ 。

(5) 确定型芯头。型芯头主要用于定位和固定砂芯，使砂芯在铸型中有准确的位置。芯头分为垂直芯头和水平芯头两类。垂直芯头一般都有上、下芯头，但短而粗的型芯也可以不留芯头。芯头高度 H 主要取决于芯头直径水平，芯头的长度 L 主要取决于芯头的直径 d 和型芯的长度。为便于下芯和合型，铸型上的芯座端部也应有一定的斜度。为便于铸型的装配，芯头、芯座之间应留有 $1 \sim 4 \text{ mm}$ 的间隙。

(6) 最小铸出孔及槽。零件上的孔、槽、台阶等，是否要铸出，应从工艺、质量及经济等方面综合考虑。一般来说，较大的孔、槽等应铸出，以便节约金属和加工工时，提高铸件质量，若孔、槽尺寸较小而铸件壁较厚，不易铸孔，直接依靠加工反而方便。有些特殊要求的孔，如弯曲孔，无法实现机械加工，则一定要铸出。可用钻头加工的孔最好不要铸出，否则很难保证铸孔中心位置准确，再用钻头扩孔时无法纠正中心位置。

4. 绘制铸造图纸

铸造图纸一般包括铸造工艺图、铸件图、铸件装配图等。

(1) 铸造工艺图是表示铸型分型面、浇注位置、型芯结构、浇注系统、控制凝固措施的图纸，是指导铸造生产的主要技术文件。分型线、加工余量、浇注系统都用红色表示。分型线用红色写出“上、下”字样；芯头边界用蓝色线表示；型芯用蓝色“×”标注，铸件上不能铸出的孔用红色线打“×”。

(2) 绘制铸件图。铸件图是指反映铸件实际形状、尺寸和技术要求的图样，是铸造生产、

铸件检验与验收的主要依据。铸件图可根据铸造工艺图绘出。

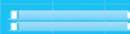
(3) 铸件装配图是生产准备、合箱、检验以及工艺调整的依据,通常在完成砂箱设计后画出,需要表示出浇注位置、型芯数量、固定和下芯顺序,浇冒口和冷铁布置、砂箱结构和尺寸大小等。

思考与练习

1. 什么是铸造成型,其主要特点及应用有哪些?
2. 合金的铸造性能有哪些?
3. 简述砂型铸造的主要工序。
4. 主要手工造型方法有哪些?简述其特征。
5. 在设计和制造模样与芯盒时,必须考虑哪些问题?
6. 砂型铸造时须确定哪些主要工艺参数?
7. 熔模铸造的特点及应用范围如何?
8. 铸件常见缺陷有哪些?如何防止?
9. 铸件的修补方法有哪些?
10. 什么是离心铸造?它分为哪两类?
11. 压力铸造的特点及应用范围如何?
12. 铸造性能对零件结构的要求有哪些?
13. 铸造的工艺参数有哪些?如何确定?
14. 特种铸造有哪些?
15. 简述浇注位置的选择原则。

3

锻造



【内容要点与学习目标】

- (1) 掌握塑性成型的基本原理。
- (2) 熟悉常见锻造方式的工艺过程、特点及应用范围。
- (3) 具有较合理选择锻造方法的能力。
- (4) 熟悉锻件的结构工艺性，对其具备一定的分析能力。
- (5) 了解塑性成型新工艺。



3.1 塑性成型基本原理



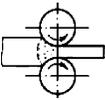
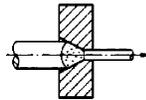
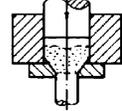
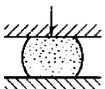
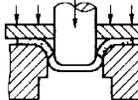
塑性成型是在外力作用下使金属坯料产生塑性变形，从而获得具有一定形状、尺寸和力学性能的原材料、毛坯或零件的一种加工方法，它是锻造和冲压成型的总称。这种加工方式要求金属材料必须具有良好的塑性，因此只适应于加工塑性材料，如钢和大多数非铁金属；而不适应于加工脆性材料，如铸铁、青铜等，也不适应于加工形状太复杂的零件。

锻压成型技术是国民经济可持续发展的主体技术之一。据统计，全世界 75% 的钢材需经塑性成型。在汽车生产中，70% 以上的零部件是利用金属塑性成型加工而成的。

3.1.1 塑性成型的方法

根据坯料的几何特征，金属塑性成型的方法一般分为两大类：体积成型和板料成型。体积成型是将金属板料、棒料和厚板料等在高温条件或室温下加工成型，如锻造（自由锻与模锻）、轧制、挤压、拉拔等；板料成型则是对金属板材的加工成型，如冲压。常见的金属塑性成型方法见表 3-1。

表 3-1 塑性成型方法的分类

轧制	拉拔	挤压
		
自由锻	模锻	板料冲压
		

3.1.2 金属塑性变形

金属在外力作用下，内部产生应力，金属中的原子受应力作用而偏离原来的平衡位置，使金属发生变形。如果外力比较小，当外力去除后，原子间的引力将使原子恢复到原来的平衡位置，变形也随之消失，这种变形称为弹性变形。如果外力超过了金属的屈服点，金属的变形将不限于弹性变形，即表现为当外力去除后，金属将不能完全恢复原来的形态和尺寸，而留下一部分永久变形，这一部分变形就是塑性变形。

金属塑性变形是金属晶体每个晶粒内部的变形和晶粒间的相对移动、晶粒转动的综合结果。单晶体的塑性变形主要通过滑移的形式来实现，即在切应力的作用下，晶体的一部分相对于另一部分沿着一定的晶面产生滑移，如图 3-1 所示。

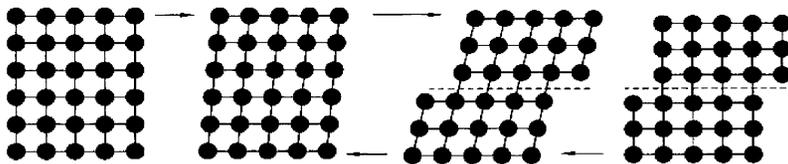


图 3-1 晶体滑移

单晶体的滑移是通过晶体内的位错运动来实现的，而不是沿滑移面所有的原子同时做刚性移动的结果，所以滑移所需要的切应力比理论值低很多。位错运动滑移机制的示意图如图 3-2 所示。

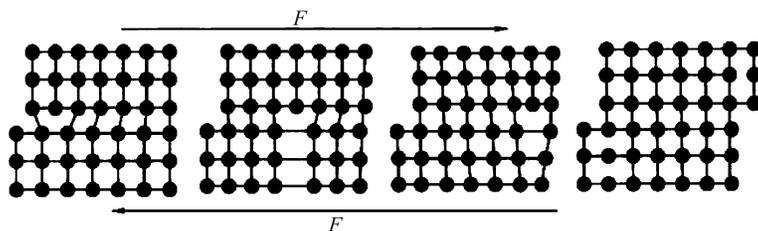


图 3-2 位错运动引起塑性变形示意图

3.1.3 塑性成型加工件的组织与性能

1. 冷变形加工与热变形加工

通常以金属的再结晶温度为界，将塑性变形加工分为两种，即冷变形加工和热变形加工。这两种加工方式生产出来的工件的组织 and 力学性能呈现明显不同的特点。

(1) 冷变形加工。金属在再结晶温度以下进行的塑性变形称为冷变形加工。如钢在常温下进行的冷冲压、冷挤压等。在变形过程中，有冷变形强化现象而无再结晶组织。冷变形工件没有氧化皮，可获得较高的公差等级，较小的表面粗糙度，其强度和硬度较高。由于冷变形金属存在残余应力和塑性差等缺点，因此需要中间退火，才能继续变形。

(2) 热变形加工。热加工是在结晶温度以上进行的，变形后只有再结晶组织而无冷变形强化现象，如热锻、热轧、热挤压等。热变形与冷变形相比，其优点是塑性良好，变形抗力低，容易加工变形，但高温下，金属容易产生氧化皮，所以锻件的尺寸精度低，表面粗糙。

金属经塑性变形及再结晶，可使原来存在的不均匀、晶粒粗大的组织得以改善，或将铸锭组织中的气孔、疏松等压合，得到更致密的再结晶组织，提高金属的力学性能。

(3) 冷变形强化。金属在塑性变形过程中，随着变形程度的增加，强度和硬度提高而塑性和韧性下降的现象称为冷变形强化或加工硬化。变形后形成的组织称为加工硬化组织。

加工硬化组织是一种不稳定的组织状态，具有自发向稳定状态转变的趋势。但在常温下多数金属的原子扩散能力很低，使得加工硬化组织能够长期维持，并不发生明显的变化。因此，冷变形强化在生产中具有非常重要的意义，它是提高金属材料强度、硬度和耐磨性的重要手段之一。如冷拉高强度钢丝、冷卷弹簧、坦克履带等。但冷变形强化后导致的塑性和韧性的降低会给进一步变形带来困难，甚至导致开裂和断裂。另外，冷变形的材料各向异性，还会引起材料的不均匀变形。

2. 回复与再结晶

对加工硬化组织进行加热，变形金属将相继发生回复、再结晶和晶粒长大三个阶段的变化，如图 3-3 所示。

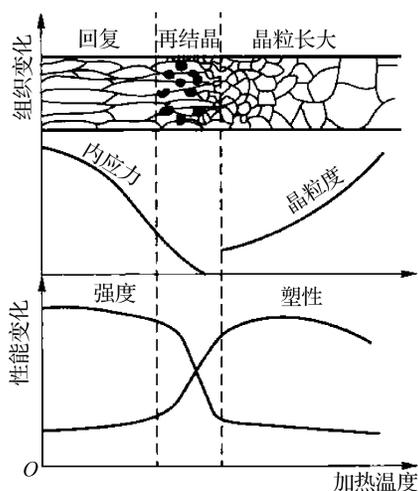


图 3-3 金属在加热时组织与性能的变化

(1) 回复。当加热温度较低（绝对温度小于 40% 金属熔点的绝对温度），原子的活动能力较小，变形金属的显微组织无显著变化，金属的强度、硬度略有下降，塑性、韧性有所回升，内应力有较明显下降。这种变化过程称为回复。

(2) 再结晶。当加热温度达到比回复阶段更高的温度时，变形金属的显微组织将发生显著的变化，金属的性能恢复到变形以前的水平，在金属内开始以碎晶或杂质为核心结晶出新的晶粒，这个过程称为再结晶。金属开始再结晶的温度称为再结晶温度，一般为该金属熔点绝对温度的 40%。

(3) 晶粒长大。再结晶过程完成后，如再延长加热时间或提高加热温度，则晶粒会明显长大，成为粗晶粒组织，导致材料力学性能下降，使锻造性能恶化。因此，必须严格控制再结晶温度。

3. 锻造流线及锻造比

(1) 锻造流线。热加工时，金属的脆性杂质被打碎，沿着金属主要伸长方向呈碎粒状分布，塑性杂质则随金属变形沿着主要伸长方向呈带状分布。热加工后的金属组织就具有一定的方向性，通常称为锻造流线。流线使金属性能呈现异向性。

在设计和制造机械零件时，必须考虑锻造流线的合理分布。使零件工作时的正应力与流线方向一致，切应力与流线方向垂直，这样才能发挥材料的潜力。使锻造流线与零件的轮廓相符合而不切断，是锻压成型工艺设计的一条原则。

(2) 锻造比。在锻压生产中，金属的变形程度常以锻造比 Y 来表示，即以变形前后的截面比、长度比或高度比表示。当锻造比 $Y=2$ 时，原始铸态组织中的疏松、气孔被压合，组织被细化，锻件各个方向的力学性能均有显著提高。当 $Y=2\sim 5$ 时，锻件的组织中流线明显、各向异性，沿流线方向的力学性能略有提高，但垂直于流线方向的力学性能开始下降。当 $Y>5$ 时，锻件沿流线方向的力学性能不再提高，垂直于流线方向的力学性能显著下降。

4. 影响金属锻造性能的因素

金属在压力加工时获得优质零件的难易程度称为合金的锻造性能。金属良好的锻造性能体现在低的塑性变形抗力和良好的塑性。低的塑性变形抗力使设备耗能少，良好的塑性使产品获得准确的外形而不遭受破坏。影响金属锻造性能的因素有以下几点。



影响金属锻造性能的因素

(1) 化学成分及组织。

①一般来说，纯金属的锻造性能优于合金。对钢来讲，含碳量越低，锻造性能越好；含合金元素越多，锻造性能越差；含硫量和含磷量越多，锻造性能越差。

②纯金属与固溶体锻造性能好，金属化合物锻造性能差，粗晶粒组织的金属比晶粒细小而又均匀组织的金属难以锻造。

③细晶组织的锻造性能优于粗晶组织。

(2) 工艺条件。其主要指变形温度、变形速度和应力状态的影响。

①变形温度对塑性及变形抗力影响很大。一般来说，提高金属的变形温度，会使原子的动能增加，从而削弱原子之间的吸引力，减少滑移所需要的力，使塑性增大，变形抗力减少，改善金属的锻造性能。因此，适当提高变形温度对改善金属的锻造性能有利。但温度过高会使金属产生氧化、脱碳、过热等缺陷，甚至使锻件产生过热而报废，所以应严格控制锻造温度。

②变形速度对锻造性能的影响有两个方面。一方面当变形速度较大时，由于再结晶过程来不及完成，冷变形强化不能及时消除，而使锻造性能变差。因此，一些塑性较差的金属，如高合金钢或大型锻件，宜采用较小的变形速度，设备选用压力机而不用锻锤。另一方面，当变形速度很高时，变形功转化的热来不及散发，锻件温度升高，又能改善锻造性能，但这一效应除高速锻锤或特殊成型工艺以外难以实现。因而，利用高速锻锤可以锻造在常规设备上难以锻造成型的高强度低塑性金属。

③金属在挤压变形时，应力状态呈三个方向受压状态，表现出良好的锻造性能。在拉拔时则呈两个方向受压一个方向受拉的状态，锻造性能下降。实践证明，三个方向中压应力数目越多，锻造性能越好，拉应力数目越多，锻造性能越差。根据坯料的几何特征在机械制造过程中，经常需要将相同或不同材质的构件以一定方式连接起来，组合成一个整体，称为连接成型。



3.2 锻造方法及其应用



金属塑性成型加工的基本方法有锻造、冲压、轧制、挤压、拉拔等。其中，轧制主要用于生产板材、型材和无缝管材等原材料；挤压主要用于生产低碳钢和非铁金属的型材或零件；

拉拔主要用于生产低碳钢和非铁金属的细线材、薄壁管或特殊形状的型材等；而锻造和冲压（合称锻压）则主要用来生产各种机械零件及其毛坯。锻造大多在坯料加热后进行，按使用设备和变形方式的不同，锻造可又分为自由锻和模锻两大类。

力学性能要求高的重要零件，如机器的主轴、曲轴、连杆，重要的齿轮、凸轮、叶轮，以及炮筒、枪管、起重吊钩、容器法兰、换热器管板等，通常选用锻件做毛坯。冲压生产广泛用于制造各类薄板结构零件，其制品具有强度高、刚性好、结构轻等特点。

3.2.1 自由锻

自由锻是利用简单的通用工具或直接将加热好的金属坯料放在锻造设备上、下砧铁之间，施加冲击力或压力，使之产生塑性变形，从而获得所需锻件的一种锻造方法。自由锻有手工锻造和机器锻造两种。手工锻造生产率低，劳动强度大，锤击力小，在现代工业生产中机器锻造是自由锻的主要生产方式。

1. 自由锻的特点及应用

自由锻工艺灵活，所用设备和工具有很大的通用性，且工具简单；生产的锻件范围大，可锻造质量从不到 1 kg 至几百吨的锻件；但生产率低，工人劳动强度大，锻件精度低，材料消耗较多，锻件形状不能过于复杂，因而适用于在品种多、产量不大的生产中。

2. 自由锻工序

自由锻工序可分为基本工序、辅助工序和精整工序（修整工序）。基本工序有镦粗、拔长、冲孔、扩孔、弯曲、扭转、错移等。辅助工序为使基本工序操作方便而进行的预变形工序，如压钳口、切肩等。修整工序是用以减少锻件表面缺陷而进行的工序，如校正、滚圆、平整等。

（1）镦粗。在外力作用下使坯料高度减小、横截面面积增大的工序称为镦粗。镦粗主要用于锻制齿轮、法兰盘之类的饼状零件，它能增大坯料横截面面积的平整端面，提高后续拔长工序的锻造比，提高锻件的力学性能和减少力学性能的各向异性等。

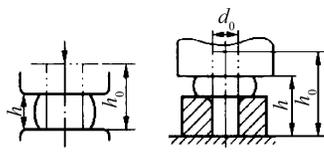
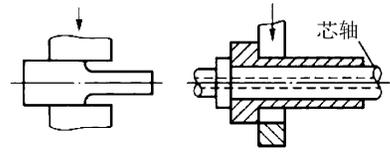
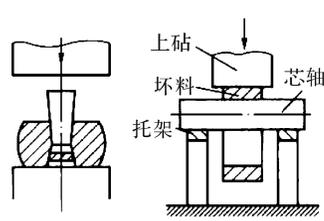
坯料镦粗时，随着高度减小，金属不断向四周流动，由于工具及砧面与坯料的接触面上存在摩擦力和冷却作用，使坯料内部的应力分布和变形极不均匀。镦粗后坯料的侧面将成鼓形。

（2）拔长。拔长是使坯料的横截面面积减小、长度增加的锻造工序。拔长除用于轴类、杆类锻件成型外，还常用来改善锻件内部质量。拔长从垂直于轴线方向对坯料进行逐段压缩变形，是锻件成型中耗费工时最多的一种锻造工序。

（3）冲孔。用冲头将坯料冲出通孔或不通孔的锻造方法称为冲孔。对于直径小于 25 mm 的孔一般不予冲出。冲孔主要用于锻造空心锻件，如齿轮环、圆环、套筒等。

自由锻常用基本工序及应用见表 3-2。

表 3-2 自由锻常用基本工序及应用

工序名称	变形特点	图例	应用
镦粗	高度减小，截面积增大		用于制造高度小截面大的工件，如齿轮、圆盘、叶轮等；作为冲孔前的准备工序；增加以后拔长的锻造比
拔长	横截面面积或壁厚减小，长度增加		用于制造长而截面小的工件，如轴、拉杆、曲轴等；制造空心件，如炮筒、透平主轴、套筒等
冲孔与扩孔	形成通孔或不通孔（扩孔有冲头扩孔和芯轴扩孔）		制造空心工件，如齿轮坯、圆环、套筒等；质量要求高的大锻件，如大透平轴，可用空心冲孔，以去除质量较低的中心部分

3.2.2 模锻

模型锻造是在高强度金属锻模上预先制出与锻件形状一致的模膛，使坯料在模膛内受压变形，由于模膛对金属坯料流动的限制，因此锻压终了时能得到与模膛形状相符的锻件。模型锻造简称模锻，模锻按使用设备的不同可分为锤上模锻、胎膜锻、压力机上模锻。

与自由锻相比，模锻有下列特点：

- ①操作简便，劳动强度低，生产率较高，一般比自由锻高 10 倍以上；
- ②锻件的尺寸和精度比较高，机械加工余量较小，节省加工工时，材料利用率高；
- ③锻件内部流线分布合理，可以锻造形状复杂的锻件；
- ④模锻生产由于受到模锻设备吨位的限制，锻件质量不能太大，一般在 150 kg 以下；
- ⑤制造锻模比较困难，成本很高。因此，模锻不适合于单件小批量生产，而适合于中小型锻件的大批量生产。

1. 锤上模锻

锤上模锻是将上模固定在模锻锤头上，下模紧固在砧座上，通过上模对置于下模中的坯料施以直接打击来获得锻件的模锻方法。根据模膛功用的不同，锻模模膛可分为模锻模膛和制坯模膛两大类。模锻模膛可分为终锻模膛和预锻模膛两种。

(1) 终锻模膛的作用是使坯料最后变形到锻件所要求的形状和尺寸，因此其形状应与锻

件的形状相同。但是由于锻件冷却时要收缩，终锻模膛的尺寸应比锻件尺寸放大一个收缩量。钢件的收缩量取 1.5%。沿模膛四周有飞边槽。锻造时部分金属先压入飞边槽内形成毛边，毛边很薄，最先冷却，可以阻碍金属从模膛内流出，以促使金属充满模膛，同时容纳多余的金属。对于具有通孔的锻件，由于不可能靠上、下模的凸起部分把金属完全挤压，因此终锻后在孔内留下一薄层金属，称为冲孔连皮。把冲孔连皮和飞边冲掉后，才能得到有通孔的模锻件。

(2) 预锻模膛的作用是使坯料变形到接近锻件的形状和尺寸，这样再进行终锻时，金属容易充满终锻模膛，同时减少了终锻模膛的磨损，延长了锻模的使用寿命。预锻模膛的尺寸和形状与终锻模膛的相似，只是模锻的斜度和圆角半径稍大，没有飞边槽。对于形状简单或批量不大的模锻件可不设飞边槽。

对于形状复杂的模锻件，原始坯料进入模锻模膛前，先放在制坯模膛内制坯，按锻件最终形状做初步变形，使金属合理分布和很好地充满模膛。制坯模膛有拔长、滚压和弯曲几种，如图 3-4 所示。

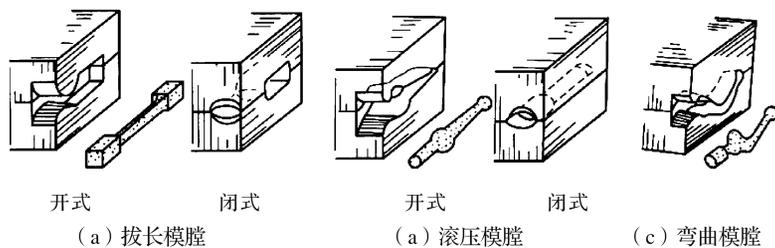


图 3-4 几种常用的制坯膛

①拔长模膛。用它来减少坯料某部分的横截面面积，以增加该部分的长度。操作时一边送进坯料，一边翻转。

②滚压模膛。用它来减少坯料某部分的横截面面积，以增加另一部分的横截面面积，使其按模锻件的形状来分布。操作时须不断翻转坯料。

③弯曲模膛。对于弯曲的杆状锻件需用弯曲模膛来弯曲坯料。

④切断模膛。它由设在上模与下模间锻模角上的一对刃口组成，用它从坯料上切下已锻好的锻件，或从锻件上切下钳口。

2. 胎模锻

胎模锻是在自由锻设备上使用可移动模具生产模锻件的一种锻造方法。所用模具称为胎模，其结构简单，形式多样，但不固定在上下砧铁上。一般选用自由锻方法制坯，然后在胎模中终锻成型。常用的胎模结构主要有以下三种类型，如图 3-5 所示。

(1) 扣模。用来对坯料进行全面或局部扣形，主要生产杆状非回转体锻件。

(2) 套模。锻模呈套筒形，主要用于锻造齿轮、法兰盘等回转体锻件。

(3) 合模。通常由上模和下模两部分组成。为了使上、下模吻合及不使锻件产生错模，经常用导柱等定位。合模多用于生产形状较复杂的非回转体锻件，如连杆、叉形件等。

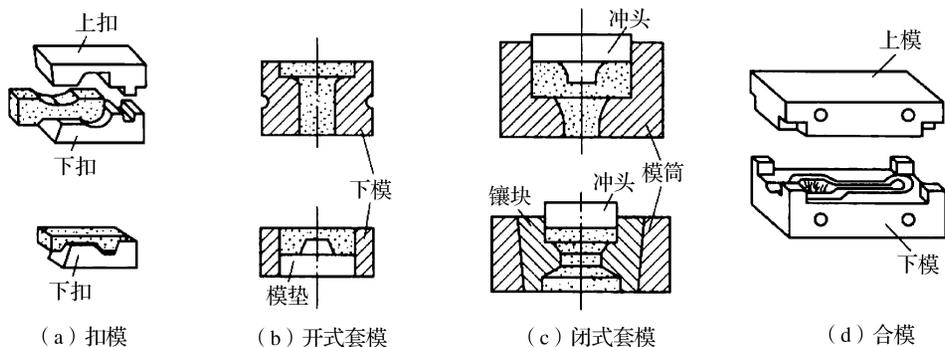


图 3-5 胎膜种类

3. 压力机上模锻

由于模锻锤在工作中存在振动大、噪声大、劳动条件差和能源消耗大等缺点，特别是大吨位的模锻锤有被压力机取代的趋势，用于模锻生产的压力机有摩擦压力机、平锻机等。



压力机上模锻

(1) 摩擦压力机上模锻。摩擦压力机是靠飞轮、螺杆和滑块向下运动所积蓄的能量使坯料变形的，其特点如下：

①适应性好，行程和锻压力可自由调节，因而可实现轻打、重打，或在一个模膛内进行多次锻打。不仅能满足模锻各种主要成型工序的要求，还可以进行弯曲、热压、切飞边、冲连皮及精压、校正等工序。

②滑块运行速度低，锻击频率低，金属变形过程中的再结晶可以充分进行。其适合于再结晶速度慢的低塑性合金钢和有色金属的模锻。

③摩擦压力机承受偏心荷载能力低，通常只适用于单模膛模锻。

④生产率低，主要用于中小型锻件的批量生产。

⑤摩擦压力机结构简单、造价低、使用维修方便，适用于中小型工厂的模锻生产。

(2) 曲柄压力机上模锻。曲柄压力机上的动力是电动机，通过减速和离合器装置带动偏心轴旋转，再通过曲柄连杆机构，使滑块沿导轨做上下往复运动。下模块固定在工作台上，上模块则装在滑块下端，随着滑块的上下运动，就能进行锻造。曲柄压力机上模锻有以下特点。

①曲柄压力机作用于金属上的变形力是静压力，且变形抗力由机架本身承受，不传给地基。因此，曲柄压力机工作时振动与噪声小，劳动条件好。

②曲柄压力机的机身刚度大，滑块导向精确，行程一定，装配精度高。因此，能保证上下模膛准确对合在一起，不产生错模。

③锻件精度高，加工余量和公差小，节约金属。在工作台及滑块中均有顶出装置，锻造结束可自动把锻件从模膛中顶出，因此锻件的模锻斜度小。

④因为滑块行程速度低，作用力是静压力，有利于低塑性金属材料的加工。

⑤曲柄压力机上不适宜进行拔长和滚压工步，这是由于滑块行程一定，无论用什么模膛都是一次成型，金属变形量过大，不易使金属填满终锻模膛。因此，为使变形逐渐进行，终锻前常采用预成型、预锻工步。

⑥曲柄压力机设备复杂，造价高，生产率高，锻件精度高，适合于大批量生产。

(3) 平锻机上模锻。平锻机的主要结构与曲柄压力机相同，但其滑块水平运动，故称为平锻机。平锻机上模锻有如下特点。

①锻件尺寸精确，表面粗糙度值小，生产率高。

②节省金属，材料利用率高。

③扩大了模锻的范围，可以锻出锤上模锻和曲柄压力机上模锻无法锻出的锻件，还可以进行切飞边、切断和弯曲等工步。

④对非回转体及中心不对称的锻件较难锻造。平锻机的造价也较高，适用于批量生产。

3.3 锻压工艺设计及结构工艺性

3.3.1 自由锻工艺设计

自由锻工艺规程是锻造生产的依据。生产中根据零件图绘制锻件图，确定锻造工艺过程并制订工艺卡。工艺卡中规定了锻造温度、尺寸要求、变形工序和程序及所用设备等。

自由锻工艺规程主要包括以下几方面。

1. 锻件图的绘制

锻件图是以零件图为基础，结合自由锻工艺特点绘制而成的图形，它是工艺规程的核心内容，是制订锻造工艺过程和锻件检验的依据。

绘制锻件图应考虑以下内容：

(1) 敷料（余块）。为简化锻件形状而增加的那部分金属称为敷料。零件上不能锻出的部分，或虽能锻出，但从经济上考虑不合理的部分均应简化，如某些台阶、凹槽、小孔、斜面、锥面等。因此，锻件的形状和尺寸均与零件不同，需在锻件图上用双点划线画出零件形状，并在锻件尺寸下用括号注上零件尺寸。

(2) 加工余量。自由锻件的精度及表面质量较差，表面应留有供机械加工的一部分金属，即机械加工余量，又称锻件余量。余量的大小主要取决于零件形状、尺寸、加工精度及表面粗糙度的要求，其数值的确定可查阅锻工手册。

(3) 锻造公差。由于锻件的实际尺寸不可能达到公称尺寸，因此允许有一定的误差。为了减小其误差，经常给出其公差，称为锻造公差。

2. 坯料计算

锻造时应按锻件形状、大小选择合适的坯料，同时还应注意坯料的质量和尺寸，使坯料经锻造后能达到锻件的要求。坯料质量可按下式计算：

$$G_{\text{坯}} = G_{\text{锻}} + G_{\text{烧损}} + G_{\text{料头}} \quad (\text{kg})$$

式中 $G_{\text{坯}}$ —— 坯料质量；

$G_{\text{锻}}$ —— 锻件质量；

$G_{\text{烧损}}$ —— 加热过程中坯料表面氧化烧损的金属的质量（一般以坯料质量的百分比 K 表示，第一次加热，对室式油炉 $K = 2.5\% \sim 3.0\%$ ，对煤气炉 $K = 1.5\% \sim 2.5\%$ ，对电阻炉 $K = 1.0\% \sim 1.5\%$ ；以后各次加热坯料， K 可减半）；

$G_{\text{料头}}$ —— 锻造时被切掉的金属质量及修切端部时切掉的料头的质量。

坯料质量确定后，还须确定坯料的尺寸，以保证锻造时金属得到必须的变形程度及锻造的顺利进行。坯料尺寸与锻造工序有关，若采用镦粗工序，为防止镦弯和便于下料，坯料的高度与直径之比应为 $1.5 \sim 2.5$ 。若采用拔长工序，则应满足锻造比要求。典型锻件的锻造比见表 3-3。

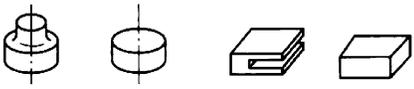
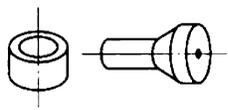
表 3-3 典型锻件的锻造比

锻件名称	计算部位	锻造比	锻件名称	计算部位	锻造比
碳素钢轴类锻件	最大截面	2.0~2.5	锤头	最大截面	≥ 2.5
合金钢轴类锻件	最大截面	2.5~3.0	水轮机主轴	轴身	≥ 2.5
热轧辊	辊身	2.5~3.0	水轮机立柱	最大截面	≥ 3.0
冷轧辊	辊身	3.5~5.0	模块	最大截面	≥ 3.0
齿轮轴	最大截面	2.5~3.0	航空用大型锻件	最大截面	6.0~8.0

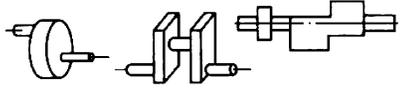
3. 选择锻造工序

自由锻造工序是根据具体锻件形状和工序特点来确定的。其中包括确定锻件所必需的基本工序、辅助工序和精整工序；确定工序顺序，设计各工序工件的尺寸等。另外，毛坯加热次数（火次）与每一火次中毛坯成型所经工序都应明确规定，并写在工艺卡上。对不同类型的锻件所需的工序见表 3-4。

表 3-4 锻件分类及相应锻造工序表

序号	类别	图例	锻造工序	实例
1	饼块类		镦粗（或镦粗及拔长）、冲孔	圆盘、齿轮、模块、锤头等
2	轴杆类		拔长（或镦粗及拔长）、切肩和锻台阶	主轴、传动轴、连杆等
3	空心类		镦粗、冲孔、扩孔（或心轴上拔长）	空心轴、圆筒、齿圈、圆环、法兰等

续表

序号	类别	图例	锻造工序	实例
4	曲轴类		拔长（或墩粗及拔长）、 错移、锻台阶扭转	曲轴、偏心轴等
5	弯曲类		拔长、弯曲	吊钩、弯杆、轴瓦 盖等

4. 选择设备

一般根据锻件的变形面积、锻件材质、变形温度等因素选择设备吨位。空气锤头落下部分的质量表示其吨位。空气锤的吨位一般为 650~1500 N。合理地选择设备吨位，可提高生产率，降低消耗。

除上述内容外，锻造工艺规程还应包括加热规范、加热火次、冷却规范和锻件的后续处理等。

3.3.2 模锻工艺设计

模锻工艺规程包括绘制模锻件图、确定模锻工序步骤、计算坯料、选择设备吨位及确定修整工序等。

1. 绘制模锻件图

锻件图是锻造生产的基本技术文件，是设计和制造锻模、计算坯料和检查锻件的依据。其中模锻件的敷料、加工余量和锻造公差与自由锻件相同，但由于模锻时金属坯料是在锻模中成型的，模锻件的尺寸较精确，所需敷料少，加工余量和锻造公差均较自由锻件小，具体数值的确定可参考锻工手册。另外，在绘制模锻件图时，还应考虑下列内容。

(1) 选择分模面。上模和下模在锻件上的分界面称为分模面。分模面的选择将影响锻件的成型质量、材料利用率和成本等问题，对比图 3-6 中锻件的四种分模方案，可说明其选择原则。

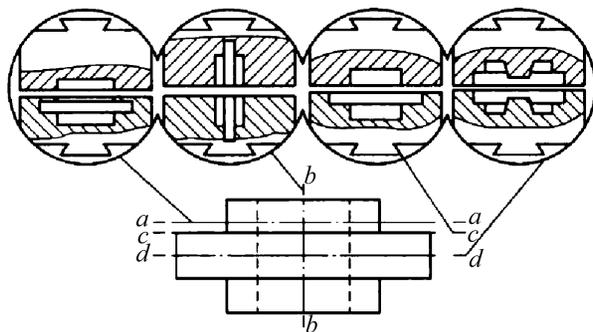


图 3-6 分模面的选择

①锻件应能从模膛中顺利取出，以 $a-a$ 面为分模面，锻件无法取出。一般情况下，分模面应选在锻件最大截面处。

②应使上、下模沿分模面的模膛轮廓一致，便于发现在模锻过程中出现的上、下模间错移， $c-c$ 面不符合要求，通常分模面应选在锻件外形无变化处。

③应尽量减少敷料，以降低材料消耗和减少切削加工工作量，若以 $b-b$ 作分模面，则孔不能锻出，需加敷料。

④模膛深度应尽量小，以利于金属充满模膛，便于取出锻件，且利于模膛的加工，因此 $b-b$ 面不适宜作分模面。

⑤分模面应为平直面，以简化模具加工。

综上所述，图 3-6 所示锻件宜选用 $d-d$ 断面为分模面。

(2) 模锻斜度。为便于从模膛中取出锻件，锻件上垂直于分模面的表面均应有斜度，称为模锻斜度，如图 3-7 所示锻件外壁上的斜度 α_1 称外壁斜度，锻件内壁上的斜度 α_2 称内壁斜度。锻件的冷却收缩使其外壁离开模膛，但内壁收缩会把模膛内的凸起部分夹得更紧。因此，内壁斜度 α_2 应比外壁斜度 α_1 大，钢件的模锻斜度一般为 $\alpha_1 = 5^\circ \sim 7^\circ$ ， $\alpha_2 = 7^\circ \sim 12^\circ$ 。

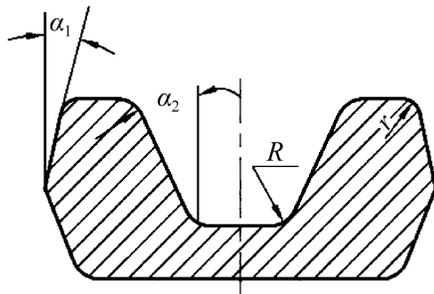


图 3-7 模锻斜度与圆角半径

(3) 圆角半径。锻件上凡是面与面的相交处均应呈圆角过渡，如图 3-7 所示。这样在锻造时，金属易于充满模膛，减少模具的磨损，提高模具的使用寿命。外凸的圆角半径 r 称外圆角半径，内凹的圆角半径 R 称内圆角半径。圆角半径的数值与锻件的形状、尺寸有关，通常取 $r = 1.5 \sim 12 \text{ mm}$ ， $R = (2 \sim 3)r$ 。模膛越深，圆角半径取值越大。

(4) 冲孔连皮。孔径 $d > 30 \text{ mm}$ 的孔可以锻出，但不能锻出通孔，必须留有一层金属，称为冲孔连皮，锻后冲去冲孔连皮，才能获得通孔锻件。

冲孔连皮的厚度 S 应适当，厚度太小，增大了锻造力，加速了模具的磨损；厚度太大，不仅浪费金属，且使冲力增加。冲孔连皮厚度的数值与孔径、孔深有关，当 $d = 30 \sim 80 \text{ mm}$ 时，一般取 $S = 4 \sim 8 \text{ mm}$ 。

模锻锻件图可根据上述内容绘制，图 3-8 为齿轮坯的模锻件图。图 3-8 中双点画线为零件轮廓外形，分模面选在零件高度方向的中部。零件轮辐部分不加工，故不留加工余量，内孔中部两直线为冲孔连皮切掉后的痕迹。