

现代企业科学技术普及丛书之一

先进成形制造 实用技术

张人佶 主编

清华大学出版社

现代企业科学技术普及丛书之一

先进成形制造实用技术

主编：张人佶

副主编：单际国 辛俊兴 王秀玲

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是北京企业技术开发研究会主编的现代科学技术普及丛书之一。本书通俗地介绍了现代制造成形领域的 60 余种新技术、新工艺,以及其发展态势、主要成就、主要设备和主要应用,有助于现代企业的技术人员掌握现代制造技术的原理,开拓将这些技术用于企业生产和技术改造的思路,增加技术知识储备,提高业务水平和进行技术创新的能力。本书通俗易懂,注重深入浅出,基本概念清楚,理论联系实际,特别将重点放在如何将先进技术应用于生产实际上。本书可以作为各类企业工程技术人员和管理人员寻求高新技术的非常有益的读物。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

先进成形制造实用技术/张人佶主编. —北京:清华大学出版社,2009.7
ISBN 978-7-302-20331-5

I. 先… II. 张… III. 工程材料—成型—技术 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 093536 号

责任编辑:宋成斌 冯 昕

责任校对:赵丽敏

责任印制:

出版发行:清华大学出版社	地 址:北京清华大学学研大厦 A 座
http://www.tup.com.cn	邮 编:100084
社 总 机:010-62770175	邮 购:010-62786544
投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn	
质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn	

印 刷 者:

装 订 者:

经 销:全国新华书店

开 本:160×230 印 张:16.75 字 数:279 千字

版 次:2009 年 7 月第 1 版 印 次:2009 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1 ~ 000

定 价:.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:

编委会名单

主 编：张人佶

副主编：单际国 辛俊兴 王秀玲

编 委(排名以目录为序)：

荆 涛	闫双景	吕志刚	李文珍	张长利	沈厚发
李培杰	何良菊	吴伯杰	陈国学	方 刚	彭俊斌
颜永年	张浩然	刘长勇	雷丽萍	钟约先	袁朝龙
姚可夫	朱志明	蔡志鹏	赵海燕	常保华	邹贵生
白海林	鲁 立	马 啸	王延军	张文增	吴运新
朱跃峰	刘 源	周湘文	巩前明	梁 吉	张 弓
庄大明	刘 丰	李兆光	魏大忠	朱张校	王昆林
刘文今	卢清萍	张定军	唐果林	钟敏霖	林 峰
刘海霞	李生杰	唐光昕	熊 卓	刘 利	吴任东
姚 睿	祁 鹏	史廷春	陈 祥	张 伟	

策 划：辛俊兴 王秀玲

成形制造的主要任务就是采用先进的方法和技术将材料加工成具有所需组织性能和形状的零部件,以满足国民经济发展对制造业的需求,它的发展将直接影响国防装备水平的提高,影响新材料的应用和发展。这是因为全世界钢材的 75% 需要塑性加工,65% 需要焊接得以成形。而我国目前已成为世界上塑性成形、铸造和焊接的第一大国:据 2005 年的资料,我国铸件年产量已达到 1 800 万 t,塑性成形产品年产量达到 2 000 万 t,焊接结构年用钢量到达 1 亿 t,焊接材料年消耗 220 万 t,可以说中国已成为世界第一制造大国。

当今,世界各主要发达国家都十分重视先进成形制造的发展。美国在 20 世纪 90 年代末期制订了“下一代制造计划”,明确提出了人、技术与管理为未来制造业成功的三要素,确立了技术在制造业的关键地位,重新提出“制造业仍是美国的经济基础”,要“促进先进制造技术的发展”;2004 年年初,美国商务部发布的《美国制造业》报告中指出:“美国制造企业是美国经济的基础和美国价值的具体体现。它们不但增强了美国的竞争力,而且大大改善着公众的生活水准”。日本对制造业发展进行立法,颁布了“制造基本技术振兴基本法”,在 2002 年 6 月发表《日本制造业白皮书》中宣称:全国的 R&D 经费总额占到了 GDP 的 3.3%,而 R&D 经费总额的 85% 投向了制造业,制造业科研经费占销售额的比重达到 4% 左右。在中国,目前制造业的工业增加值占我国 GDP 的 35% 左右,其中工业税收的 90% 在制造业,约 90% 的工业就业岗位依靠制造业提供。我国在 2006 年制定的《国家中长期科学和技术发展纲要》中明确提出了要大力发展装备制造业和先进制造技术,许多技术,如极端制造、智能制造、高可靠性成套装备,将关系到我国经济命脉、国家核心竞争力和国家安全,对我国综合竞争力、国家经济、社会发展和国防都具有战略性、全局性和长远性的意义。因此,只有自主创新才是我国先进制造技术发展的唯一出路。

先进成形制造技术是在工程实践和应用的基础上发展起来的,既有系统的理论体系和自身的客观规律,又有很强的交叉性、集成性和应用性,它的核心就是控制材料的性能、控制材料的形状,以及相应的先进制造装备。目前该领域的发展趋势是:

- 向特大型件的成形制造方向发展；
- 向精密化、轻量化、洁净化成形制造方向发展；
- 新材料的成形制造技术；
- 激光成形技术；
- 基于建模与仿真的数字化成形制造；
- 绿色成形制造。

清华大学机械工程系是我国最早设立的该领域的院系之一，它的主要任务是培养该领域高级专门人才和开展该领域的科学研究，目前拥有“先进成形制造教育部重点实验室”。本书就是邀请该实验室中的一批活跃在先进成形制造前沿领域的专家学者，以通俗易懂的文笔撰写的读本，内容涉及先进的材料制备技术、材料成形工艺、材料性能控制、数字化技术、材料成形自动化技术、激光与快速成形技术、生物制造技术等几乎所有的前沿方向，反映了先进成形制造技术的现状和发展趋势。可以说，本书是目前图书市场上并不多见的实用技术读本。

希望通过本书，让我们的“先进成形制造教育部重点实验室”与企业界的同行建立一个沟通渠道，进一步加强相互之间的联系，使我们的技术能够真正找到用武之地。让我们共同努力，为提高我国制造业的自主创新能力作出贡献。



清华大学机械工程系系主任
先进成形制造教育部重点实验室主任
长江学者
2008 年 12 月

1 先进凝固成形技术 1

- 1.1 网络化铸造工艺 CAE 系统 荆涛 1
- 1.2 石膏型精密铸造技术 闫双景 4
- 1.3 熔模精密铸造技术 吕志刚 9
- 1.4 消失模铸造技术 闫双景 12
- 1.5 组芯造型铸造技术 李文珍 16
- 1.6 液态金属直接喷射成形技术 张人佶 20
- 1.7 薄板坯连铸连轧技术 张长利 沈厚发 23
- 1.8 镁合金压铸技术 李培杰 28
- 1.9 铝合金压铸技术 何良菊 30

2 先进塑性成形技术 33

- 2.1 塑性成形有限元模拟技术及其在应用 吴伯杰 33
- 2.2 精密塑性成形技术的发展与未来 陈国学 38
- 2.3 轿车车身覆盖件成形技术 方刚 42
- 2.4 重型液压机设计制造技术 彭俊斌 颜永年 张人佶 46
- 2.5 预应力钢丝缠绕技术 张浩然 颜永年 张人佶 50
- 2.6 预应力多峰坎合技术 刘长勇 颜永年 张人佶 53
- 2.7 铋系高温超导带材的制备工艺 雷丽萍 56
- 2.8 反向工程技术及应用 钟约先 59
- 2.9 内裂纹修复技术及其应用 袁朝龙 64
- 2.10 金属材料的电塑性加工技术 姚可夫 68

3 先进连接成形技术 74

- 3.1 激光焊接技术 单际国 74
- 3.2 铝合金脉冲电弧焊接技术 朱志明 79

3.3	微电子产品连接中的钎料	蔡志鹏 赵海燕	83
3.4	微电子封装中的引线键合技术	常保华	85
3.5	TLP 扩散连接技术	邹贵生 白海林	89
3.6	汽车车身制造中的先进连接技术	鲁立 马啸 赵海燕	93
3.7	高温超导材料的连接技术	邹贵生 白海林 王延军	97
3.8	焊接机器人应用技术	张文增	102

4 粉末成形制造技术 107

4.1	粉末冶金技术	闫双景	107
4.2	金属粉末注射成形技术	吴运新	111
4.3	多孔陶瓷及其制备技术	朱跃峰	113
4.4	超轻多孔金属的成形制造技术	刘源	117

5 新型材料成形制造技术 123

5.1	树脂基复合材料零件成形制造技术	张人佶	123
5.2	喷雾干燥法制备碳纳米管—粉末橡胶复合材料	周湘文 巩前明 梁吉	126
5.3	二氧化钛光催化降解薄膜的制备与应用	张弓	131
5.4	透明导电玻璃的性能与应用	庄大明	134
5.5	尖笔直写微纳堆积成形制造技术	刘丰 颜永年 张人佶	138
5.6	空间飞轮高速轴系长寿命关键制造技术	李兆光 张人佶	142
5.7	铝锂合金在航天器上的应用及其关键制造技术	李兆光 张人佶	145
5.8	压电驱动微滴喷射技术	魏大忠 张人佶	148

6 表面技术 151

6.1	高速钢离子氮碳共渗和中温离子渗硫复合处理技术	朱张校	151
-----	------------------------	-----	-----

6.2	热喷涂技术及其应用	王昆林	154
6.3	气相沉积技术	张人佶	160
6.4	激光表面改性技术	刘文今	163
6.5	化学气相渗(CVI)工艺制备炭/炭复合材料		
	巩前明	梁吉	167

7 快速成形制造技术 172

7.1	快速成形与快速制造技术	卢清萍	172
7.2	数字微滴喷射快速成形技术	张人佶	177
7.3	立体光固化快速成形技术	张定军 张人佶	181
7.4	熔融沉积制造快速成形技术	颜永年 唐果林	184
7.5	无木模铸型制造技术	颜永年	190
7.6	基于快速原型的快速模具制造技术	张人佶	194
7.7	快速成形技术中先进材料的应用	张人佶	199
7.8	激光快速直接制造技术	钟敏霖	202
7.9	金属零件的电子束选区熔化快速制造	林峰	206
7.10	航天飞机模型电铸模制造技术	李兆光 张人佶	211

8 生物制造技术 215

8.1	生物制造工程与技术	刘海霞 李生杰 颜永年	215
8.2	合成纳米纤维生物材料的制备	张人佶	220
8.3	骨修复生物材料——钛及其表面处理	唐光昕 张人佶	223
8.4	可降解聚酯—磷酸钙复合骨材料有望在近期进入临床		
	熊卓		228
8.5	骨—软骨组织工程新技术	刘利 熊卓 张人佶	230
8.6	气动尖笔直写技术及其在生物制造中的应用	吴任东	234
8.7	细胞微胶囊三维受控组装技术	姚睿 张人佶	237
8.8	激光引导直写技术	张人佶	239
8.9	透明牙颌畸形矫正器的设计与制造		
	祁鹏 颜永年 张人佶		242
8.10	人工外耳软骨支架快速制造技术	史廷春 张人佶	245

9 相关技术 249

- 9.1 定量金相分析技术 陈祥 249
 - 9.2 大型成形生产设备的监测、评价与维护技术 张伟 253
-

后记 256

先进凝固成形技术

1.1 网络化铸造工艺 CAE^{*1} 系统

随着互联网技术的飞速发展,出现了一种全新的运营模式——应用服务提供商(Application Service Provider, ASP)运营模式。利用互联网技术提供在线凝固过程数值模拟仿真技术服务,为中小型铸造企业提供专业化的技术支持成为可能。中小型铸造企业只需支付一定的使用费用,就可以通过互联网使用铸造过程数值模拟仿真系统,并且可以充分利用铸造过程数值模拟仿真技术方面最新的研究成果,为企业节约生产成本、优化工艺设计提供低成本、高性能、安全高效的服务。

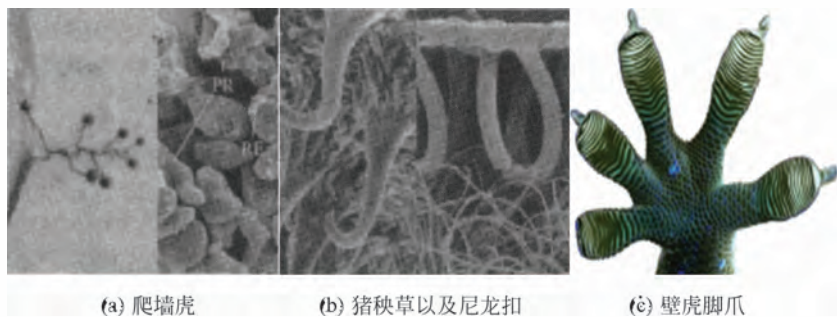


图 1.1.1 网络化铸造 CAE 系统平台

基于网络的铸造工艺 CAE 系统结构

系统采用 Apache + Tomcat 作为 Web 平台,MySQL 作为数据库,基于 Java

* CAE: 计算机辅助制造

作者联系方式: 荆涛, jingtao@tsinghua.edu.cn

Servlet 和 Jsp 技术,按照 Struts 框架建立。系统主要由以下模块组成:用户模块、文件模块、任务模块、计算模块、后处理模块、认证模块和材料数据库模块。图 1.1.1 为系统示意图。

(1) 用户模块:为企业用户提供注册、登录、退出系统的功能。为管理员提供查看用户注册信息、开通用户和删除用户的功能。

(2) 文件模块:文件模块为用户提供上传、下载、删除文件,建立、删除目录功能。每个用户都有相对独立的数据空间,用户只可以管理自己的文件。系统管理员可以管理所有文件。系统提供两种数据传送方式供用户选择使用。一种是 FTP 方式,系统采用 Proftpd 作为 FTP 服务器,认证采用数据库方式。另一种是 Web 方式,用户登录系统通过认证后,可在 Web 页面内使用文件管理功能。

(3) 任务模块:用户必须提交计算任务来启动模拟计算。任务模块给用户提供了一个操作和管理计算任务的界面。用户可以使用该模块实现添加任务、查看任务、删除任务的操作。当用户提交了一个新的任务后,该任务进入系统的计算任务队列。系统按照调度逻辑,在适当的时候,将计算任务分配给空闲的计算服务器,启动计算模块进行模拟计算。用户可随时查询计算任务的状态。

(4) 计算模块:模块使用 GNU C ++开发。它运行于计算服务器,负责进行模拟计算的工作。按照功能,计算模块分为两种:网格剖分模块和温度场模拟模块。网格剖分模块负责将 STL 文件剖切为有限差分网格格式。温度场模拟模块读取任务信息,根据用户提供的初始信息,比如浇注温度、材料热物性参数、界面热阻等,使用有限差分方法,对铸造凝固过程进行模拟仿真。

(5) 认证模块:由于系统是一个多用户的开放式系统,任何可以访问 Internet 的人都可以访问系统,所以必须提供用户认证和权限管理功能,控制不同用户的使用权限。一般访客,只可以浏览系统简介信息,并且可以进行简单的试算。注册用户可以按照其用户类型,使用不同的功能模块。

(6) 试算模块:为了让非注册用户对系统有一个感性的认识,提供了试算模块。系统访客可以进行简单的试算,体验和了解系统的功能特点。

(7) 后处理模块:以图片和在线可视化显示的方式,提供给用户分析计算结果。

(8) 材料数据库模块: 材料数据库分为系统数据库和用户数据库。系统数据库是由系统管理员维护的, 用户只能使用, 不能修改和删除。其中包括最常用的材料的数据, 比如密度、比热、液相线、固相线等。用户数据库是由用户自己管理维护的, 用户可以将自己经常使用的材料数据添加到数据库中, 并且可以对这些数据进行修改和删除。用户可以在建立新任务的时候, 直接选取这些材料, 避免每次都要手工输入参数的繁琐。

网络化铸造工艺 CAE 系统应用

基于 Web 的铸造凝固过程数值模拟仿真系统流程如图 1.1.2 所示。用户在完成三维 CAD 造型后, 转换成 STL 标准数据格式, 登录 Web 服务器, 建立新项目, 上传数据文件, 然后根据实际情况, 填写计算参数, 提交计算任务。服务器将用户的计算任务排队, 然后选择空闲的计算服务器进行计算, 产生计算结果文件。用户可随时查询计算的进度, 计算结束后, 下载计算结果文件, 或在线分析计算结果生产的图像文件, 分析缺陷, 改进设计。

图 1.1.3 显示了一个实际铸件进行网络化工艺分析的过程。企业无需购买商品化软件而只付少量服务费, 即可使用最新版的模拟仿真软件, 同时节省高端计算设备费用, 并享有诸多网络化服务的功能, 并且可以方便地转为台式系统用户。

结论

参照 ASP 运营模式开发的基于 Web 的铸造过程数值模拟仿真系统采用基于 Java 的多层结构, 成功地将传统的桌面计算模式下的铸造过程数值模拟仿真系统转换为 Internet 环境下 Browser/Server 计算模式。该系统为广大铸造企业节约生产成本、优化工艺设计、提高生产效率提供了网络应用平台。

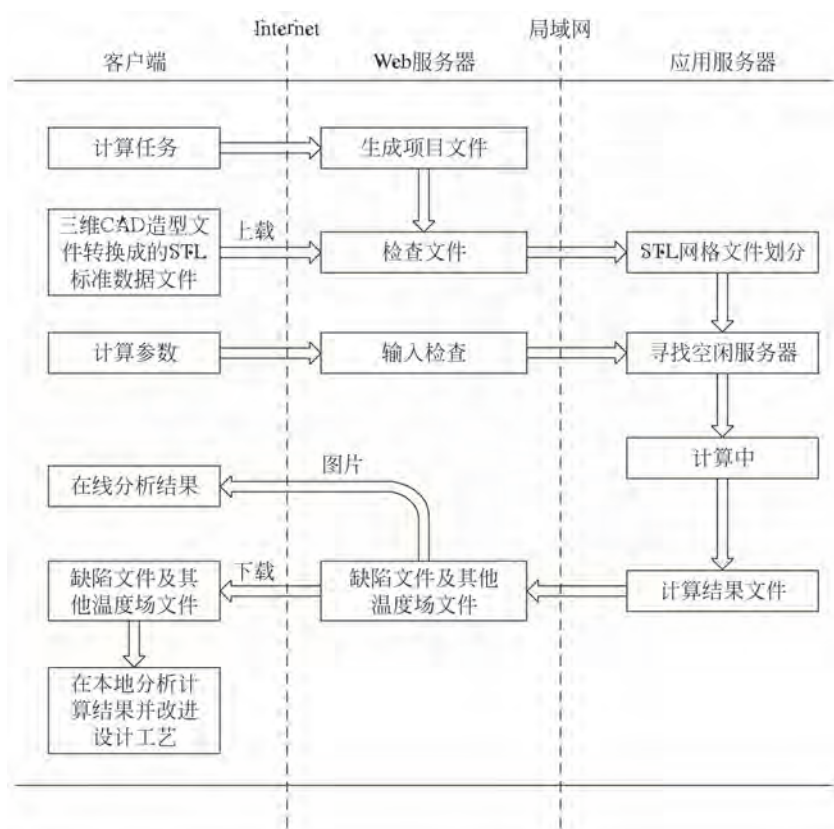


图 1.1.2 系统流程图

1.2 石膏型精密铸造技术^{* 1}

图 1.2.1 是一件价格非常昂贵的工艺品,是一个充满想象力的精妙绝伦的宝物。除了黄金,就是宝石,造型精妙,线条细密流畅,确实是价值连城。它是一个镶宝石的金戒指树。那么,它是如何制造出来的呢?让我在这里向您揭示这个秘密吧,它是由能工巧匠采用石膏型精密铸造工艺制造出来的。

* 作者联系方式: 闫双景, ysj46@126.com, ysj46@263.net

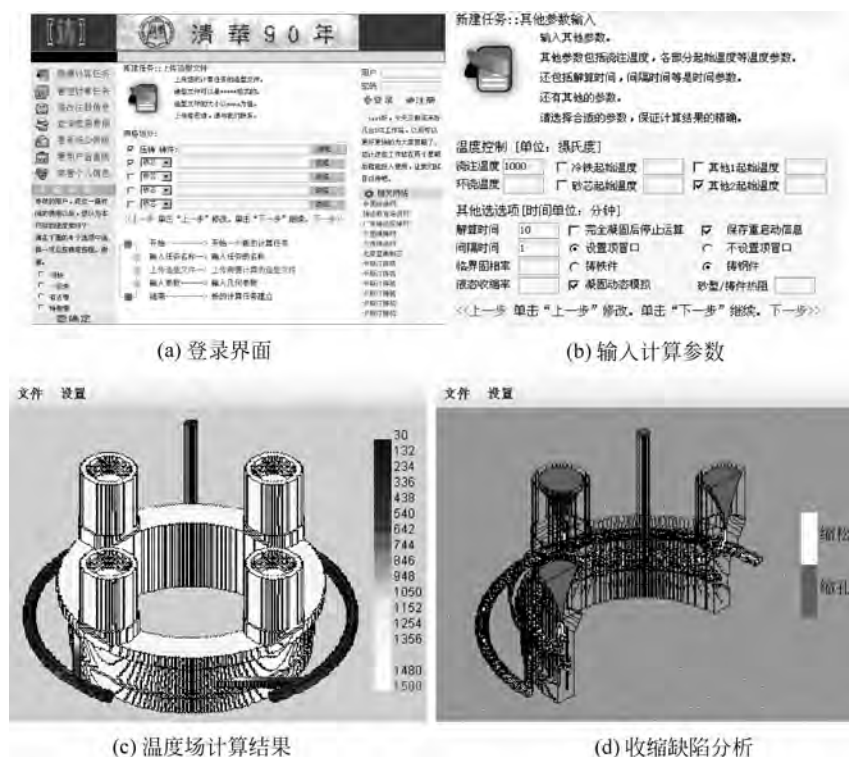


图 1.1.3 模拟计算结果显示

技术概述

石膏型精密铸造是用熔模、用石膏浆料灌制铸型,经干燥、脱蜡、焙烧、浇注金属液获得铸件的方法。与熔模铸造工艺类似,只是用石膏型代替熔模型壳,即铸型材料和制铸型方法不同。

1. 工艺过程

石膏型精密铸造的工艺过程:制蜡模→制石膏铸型→脱蜡→焙烧→浇注→清理。

2. 石膏型精密铸造特点

- (1) 采用易熔模:不用开箱取模,可生产复杂铸件,尺寸精确;
- (2) 采用液体浆料:可作出 0.2mm 间隔内的凹凸;
- (3) 热型浇注:可浇注薄壁(0.6mm)铸件。

石膏型的溃散性好,但不足之处为:透气性差,浇注时不易充型,一般在振动、真空或离心条件下浇注;厚壁件易产生缩陷缺陷。

3. 应用

石膏型精密铸造一般生产大型、薄壁、精密、复杂件,熔点低于 1 100℃ 铝、金、银等合金,以铝合金为主。典型件见图 1. 2. 2。其中图(a)为波音 767 飞机上用的燃油增压器泵壳:重 63kg 的 356 铝合金,由 22 个蜡模和 12 个可溶芯形成蜡模;图(b)为雷达用波导管:铝合金,内通道尺寸要求严格,表面粗糙度 Ra 约为 $1.6\mu\text{m}$;图(c)为发动机增压器,叶片呈扭曲状,最小壁厚 0.5mm。

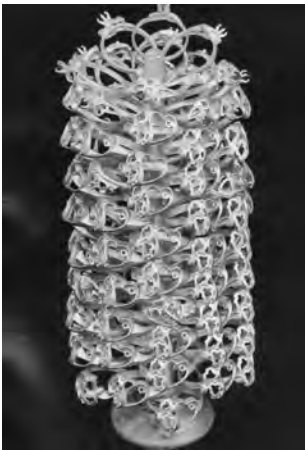


图 1. 2. 1 镶宝石的金戒指树

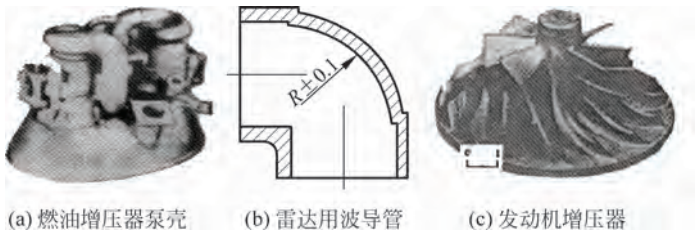


图 1. 2. 2 典型的石膏型精密铸件

石膏型铸造工艺

1. 模料

对一般中小铸件可使用熔模铸造用模料,但对大中型复杂铸件尺寸精度和表面粗糙度要求严格时,应使用熔模石膏型专用模料。

生产无法用金属芯形成的复杂内腔时,就先采用如尿素模料、无机盐模料、羰芯水溶性模料等制水溶芯,在制熔模时放入模具内腔在制蜡模。

2. 制蜡模、模组

熔模压制工艺同熔模铸造。一般水溶尿素模料、无机盐模料及羰芯都是灌注成形的。组蜡树(模组)时,将多个蜡模组焊到浇注系统上。焊接时应注意:焊接应牢固;无缝隙;足够高的压头;直浇道底部一定要留集渣窝;在保证补缩情况下可制作尽量多的蜡模。浇注系统的作用包括:导入

金属；留脱蜡通道；补缩；提高工艺出品率即金属利用率。

3. 制石膏铸型

石膏铸型制作工艺：准备→混浆→抽真空→灌浆→固化。

1) 石膏的选择

石膏有七种变体：天然石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 为生石膏，加热条件不同除去水后生成 α 、 β 两种半水（熟）石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型三种无水石膏， CaSO_4 为硬石膏。生石膏力学性能很差，硬石膏难溶于水，不能形成浆料，所以均不能用于制石膏铸型。使用较多的为半水熟石膏，其中 α 熟石膏比 β 熟石膏性能更好，性能比较见表 1.2.1。

表 1.2.1 两种熟石膏性能比较

种类 \ 性能	晶粒 平均粒径 / 10^{-10}m	密度 / (g/cm^3)	总比 表面积 / (m^2/g)	石膏型性能		
				加水（流动 性相同） / $(\text{g}/100\text{g})$	石膏浆料 凝结时间 / min	干燥后抗 压强度 / MPa
α 型半水石膏	940	2.73 ~ 2.75	1	40 ~ 50	15 ~ 25	40 ~ 43
β 型半水石膏	388	2.62 ~ 2.64	8.2	65 ~ 75	8 ~ 15	13 ~ 15

2) 石膏浆料

(1) 石膏铸粉组成

为改善石膏铸粉性能，常加入耐火材料、增强剂、促凝剂、缓凝剂、悬浮剂、润湿剂、消泡剂、减水剂、保水剂、改性剂等。为进一步提高石膏浆料的强度及抗裂能力，在石膏铸粉中常加入石英、高岭土等耐火材料作为填料；为提高石膏浆料的透气性，可加入硅藻土等。

(2) 石膏浆料配比（见表 1.2.2）

(3) 石膏浆混制和灌浆

为防止石膏浆料卷气，混制和灌浆均需在真空下进行：混制时真空度约 0.05MPa；灌浆时真空度约 0.06MPa。

表 1.2.2 石膏浆料配比 质量分数/%

序号	α 熟石膏 /%	硅石粉砂 /%	石英玻璃 /%	其他材料 /%	水* / $(\text{g}/100\text{g})$	备 注
1	30	70	—	—	33 ~ 35	一般铸件
2	30	35	—	铝矾土粉砂 35	60	中等精度铸件
3	30	20	—	上店土粉砂 50	31 ~ 43	中等精度铸件
4	30	—	—	莫来石粉砂 70	45	中等精度铸件