

面向 21 世纪

材料成型 工艺基础

工程制图与机械基础系列教材

主 编/沈其文
副主编/周世权

华中理工大学出版社

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

http://www.hustp.com

图书在版编目(CIP)数据

材料成型工艺基础/沈其文主编
武汉:华中理工大学出版社,1999年9月
ISBN 7-5609-1970-7

- I. 材…
- II. ①沈…②周…
- III. 材料-成型-工艺
- IV. TH 14

材料成型工艺基础

主 编 沈其文
副主编 周世权

责任编辑:李 德
责任校对:欣 欣

封面设计:潘 群
监 印:张正林

出版发行:华中理工大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87542624

经销:新华书店湖北发行所

印刷:中国科学院武汉分院科技印刷厂

开本:787×1092 1/16

印张:22.75

字数:532 000

版次:1999年9月第1版

印次:1999年9月第1次印刷

印数:1—2 000

ISBN 7-5609-1970-7/TH·103

定价:26.80元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行科调换)

内 容 简 介

本书属“国家教委面向 21 世纪《机械制图及机械基础》教学体系及教学内容改革”重大教改课题中的系列教材之一。本书根据 1997 年本学科课程指导小组工作会议的最新指导思想和全国专业调整会议关于通才教育等精神，并在参考了各种《金属工艺学》及《机械制造基础》等教材的基础上，以扩大知识面，加强三新，提高起点，满足大机械口径教学要求为原则，进行了重新编写。

本书对传统的金属工艺进行了精选，并以零件形体结构设计与成型工艺可行性为主线贯穿全书，大幅度增加了新材料、新工艺、新技术及反映当今最新高科技成果的快速成型技术等内容。还新编了工程塑料、橡胶、粉末冶金、陶瓷及复合材料等成型工艺，以符合市场经济发展的需求，全书论述新工艺的篇幅约占 1 / 3。

本书分为五篇（二十章）：金属的液态成型工艺，金属的塑性成型工艺，材料的连接成型工艺，材料的其它成型工艺，材料成型工艺的选择。

本书图例新颖、规范，其中 96% 以上的插图用 CAD 绘制。复习思考题较为丰富，并有难度等级，以供不同层次人员选用。还在重点章节中编入了工艺设计参数的参考资料。本书内容丰富，可作为教改后高等工科院校机类及机电类各专业教材，也可供工程技术人员参考。

序 言

21 世纪的核心是科技,关键是人才,基础是教育。世界经济发展中最激烈的竞争,将不仅表现在生产和科技领域,同时也集中在培养人才的教育领域。教育部于 1996 年制定并实施的《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》,是迎接新世纪挑战的重要战略部署,是一项富有远见的教育改革计划,对我国高等教育具有深远的重大的意义。《工程制图与机械基础系列课程教学内容和课程体系改革的研究与实践》是这一改革计划中的一个项目,与它紧密相关的还有一个项目为《机械类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践》。可以预计,这两个项目的实施,将会对机械学科的培养目标、培养模式、课程体系、教学内容与教学方法产生重大的改革,为我国机械工业的人才培养和产业发展作出贡献。

“教育要面向现代化,面向世界,面向未来”是邓小平同志对我国社会主义教育事业提出的总体要求,也是我们开展机械学科两个教改项目的指导方针。华中理工大学作为这两个项目的牵头单位,和全国 20 余所高校的师生一起,遵循“解放思想”、“实事求是”的原则,努力争取教改项目的突破性进展。

在机械类人才培养中,工程制图与机械基础系列课程教学内容和课程体系的改革占有极为重要的地位,是机械学科教学改革的重点和难点。结合我校教学、科研和产业的特点,我们提出“以创新设计为根本、以数控加工为龙头、以 CAD/CAM 为主线、加强基础、注重实践”的机械基础教学改革思路。正如江泽民同志所指出的:“创新是一个民族的灵魂,是国家兴旺发达的不竭动力”。创新永远是教育改革的重要课题,培养高层次创造性人才是教育的根本任务。现代科学技术,特别是信息技术融于教学,是使教育改革充满活力的重要途径。数控和 CAD/CAM 技术是信息革命的产物,既是改造传统机械产业的重要手段,也是机械学科教育改革不可缺少的重要组成部分。为了适应现代社会对机械设计与制造的高要求,加强数学、物理、力学、电工电子学及外语等基础知识显得更为重要;同时还要重视实践,包括实验、实习等操作性实践和作业、课程设计等思考练习性实践。体现在机械基础系列课程体系的设置上,我们打破原 4 门课程(制图、金工、机械原理和机械设计)封闭的学科界限,对机械设计相关课程进行整体优化,改善课程体系结构。作为课程体系核心的系列课程教材,由《画法几何及机械制图》、《计算机图形学》、《工程材料及应用》、《材料成型工艺基础》、《机械制造技术基础》、《机械原理》、《机械设计》、《机构与机械零部件 CAD》、《机械系统创新设计》等组成。通过构建课程体系、改革教学内容,以达到从整体上优化学生的知识、能力、素质,特别是设计思想、设计方法与创新思维能力培养的目的。

呈献给大家的这套系列教材,是华中理工大学教改课题组师生们多年工作的初步成果,还需要在教改实践中去反复锤炼。我们殷切希望得到广大读者以及兄弟院校同行们的关心、支持和帮助,以推进教改工作的进行。

高等学校工科机械基础课程教学指导委员会主任委员
《工程制图与机械基础系列课程教学
内容和课程体系改革的研究与实践》 课题负责人

周济 教授

1999 年 1 月于华中理工大学

前 言

《材料成型工艺基础》是一门以研究常用工程材料坯件及机器零件的成型工艺原理为主的综合性技术基础课教材，它是在原《金属工艺学》热加工工艺内容的基础上，去粗取精、拓宽与加深后编写的。它几乎涉及机器制造中除切削加工成型工艺以外的所有工程材料的成型工艺，包括金属的液态成型，金属的塑性成型，材料的连接成型，粉末冶金成型，塑料、橡胶、陶瓷等非金属材料成型及复合材料成型等各个方面。

为了加强对学生的素质教育及面向 21 世纪飞速发展的市场经济形势的适应性，并开阔学生对现代成型新技术发展的超前意识，为此，本教材内容取材广泛，并有一定深度，删除了传统成型工艺中的陈旧内容，突出成型工艺方法及与之相关的主要设备原理和实质，而淡化机械设备及工艺装备的详细结构，并以培养学生分析零件结构工艺性和选择成型工艺方法的基本素质为本教材的主线，每章后面都附有难度级别不等的复习思考题，供不同课时数及不同层次学生复习使用。在本教材的重点章节中，如铸造、冲压、焊接及注塑成型等，均附有综合性工艺设计作业题，并与相应的计算机工艺设计软件配套使用，使学生在有限的学时内能生动有效地应用教材的知识，可在计算机上完成工艺设计任务。本教材还大幅度地增加了新技术、新工艺，特别是当今世界领先的相关高科技内容，并增加了材料成型工艺综合选择篇章，对各种材料的成型工艺方法进行了归纳和总结，从而为使学生学习其它后续课程、进行专业课程设计及今后的工作奠定较为扎实的基础。

本材料插图丰富、规范，并用 CAD 绘制，各章内容的学与教都考虑了与电教手段相配合。

本教材考虑了前后相关课程的连贯与衔接，故要求学习本教材之前应修完《工程制图》、《金工实习》、《工程材料》及《互换性与技术测量》等先行课程。凡前述课程已阐述的内容，除与材料成型密切相关的材料内容以外，原则上本教材不再赘述。但考虑学生对材料成型工艺有完整的总体概念，本书增加了钢铁冶炼的内容。

本教材内容提高了起点，以适应飞速发展的工业形势的需要。本书可作为机械类和机电类专业本科相应的教改教材，亦可供有关工程技术人员自学使用。

本书主编沈其文，副主编周世权，参加编写人员有：沈其文（内容简介、前言、第一、二、三、四、五、六、十七、十九、二十章），周世权（第十、十一、十二、十三章），龚文权（第七、八章），褚衡（第十四、十五章），安平（第九章），彭江英（第十六章），李远

才（第十八章）。全书由沈其文统稿，王平菊协助打印及整理。

由于编者水平有限，在教改中探索的经验还有待进一步完善，书中难免存在错误或欠妥之处，敬请读者指正。

编 者

1999年1月

目 录

第一篇 金属的液态成型工艺

| | |
|-------------------------------|------|
| 第一章 金属液态成型工艺理论基础..... | (1) |
| § 1-1 概 述..... | (1) |
| § 1-2 液态合金的工艺性能..... | (2) |
| 第二章 工业中常用的液态成型合金及其熔铸..... | (13) |
| § 2-1 钢铁的冶炼..... | (13) |
| § 2-2 工业中常用铸造合金及其熔铸工艺简介..... | (16) |
| 第三章 液态金属的成型工艺方法..... | (33) |
| § 3-1 重力作用下的液态成型工艺..... | (33) |
| § 3-2 外力作用下的液态成型工艺..... | (46) |
| 第四章 液态成型金属件的工艺设计..... | (53) |
| § 4-1 铸造工艺方案的确定..... | (53) |
| § 4-2 工艺参数的确定..... | (58) |
| § 4-3 浇、冒口系统..... | (61) |
| § 4-4 液态成型件的铸造工艺方案及工艺图示例..... | (65) |
| 第五章 液态成型金属件的结构设计..... | (71) |
| § 5-1 铸件的结构工艺性..... | (71) |
| § 5-2 铸件设计的内容..... | (71) |
| § 5-3 铸件结构设计应考虑的其他方面..... | (79) |
| 第六章 液态成型工艺的最新发展..... | (84) |
| § 6-1 铸件近净形化技术及其发展..... | (84) |
| § 6-2 快速成型技术(RPT)的类型及应用..... | (85) |

第二篇 金属的塑性成型工艺

| | |
|------------------------|-------|
| 第七章 金属塑性成型的工艺理论基础..... | (92) |
| § 7-1 塑性变形理论及假设..... | (93) |
| § 7-2 冷变形及热变形..... | (94) |
| § 7-3 纤维组织的利用原则..... | (95) |
| § 7-4 影响塑性变形的因素..... | (95) |
| 第八章 金属的塑性成型方法及工艺..... | (98) |
| § 8-1 模膛锻造成型工艺..... | (98) |
| § 8-2 锻模模膛及其功用..... | (99) |
| § 8-3 锤上模锻成型工艺设计..... | (102) |
| § 8-4 压力机上模膛成型工艺..... | (105) |
| § 8-5 模锻件的缺陷..... | (108) |
| 第九章 薄板的冲压成型工艺..... | (110) |

| | | |
|------------|--------------------|--------------|
| § 9-1 | 概 述 | (110) |
| § 9-2 | 分离工序 | (110) |
| § 9-3 | 变形工序 | (115) |
| § 9-4 | 冲模的分类和构造 | (119) |
| § 9-5 | 冲压工艺过程的制定 | (121) |
| 第十章 | 其它金属的塑性成型工艺 | (130) |
| § 10-1 | 零件的挤压 | (130) |
| § 10-2 | 零件的轧制 | (132) |
| § 10-3 | 精密模锻 | (135) |
| § 10-4 | 多向模锻 | (135) |
| § 10-5 | 液态模锻 | (137) |
| § 10-6 | 粉末锻造 | (138) |
| § 10-7 | 超塑性成型 | (139) |
| § 10-8 | 高能高速成型 | (140) |

第三篇 材料的连接成型工艺

| | | |
|---------------|--------------------|--------------|
| 第十一章 | 机械连接成型的工艺过程 | (144) |
| § 11-1 | 机械连接的分类、特点及应用 | (144) |
| § 11-2 | 机械连接工艺过程 | (146) |
| 第十二章 | 冶金连接(焊接)成型 | (149) |
| § 12-1 | 概 述 | (149) |
| § 12-2 | 熔化焊原理及过程 | (151) |
| § 12-3 | 焊接接头的组织与性能 | (160) |
| § 12-4 | 焊接变形和焊接应力 | (162) |
| § 12-5 | 焊接缺陷 | (166) |
| § 12-6 | 焊接检验 | (169) |
| § 12-7 | 熔化焊方法及工艺 | (172) |
| § 12-8 | 压力焊 | (183) |
| § 12-9 | 金属材料的焊接性 | (194) |
| § 12-10 | 焊接结构设计 | (206) |
| 第十三章 | 物理化学连接成型 | (215) |
| § 13-1 | 物理和化学连接的原理及分类 | (215) |
| § 13-2 | 钎 焊 | (215) |
| § 13-3 | 封接 | (217) |
| § 13-4 | 粘接技术及其应用 | (229) |

第四篇 其它材料的成型工艺

| | | |
|-------------|----------------|--------------|
| 第十四章 | 工程塑料的成型 | (237) |
| § 14-1 | 工程塑料的选用 | (237) |
| § 14-2 | 塑料制件的成型方法 | (241) |

| | |
|-----------------------------|--------------|
| § 14-3 塑件结构的工艺性..... | (251) |
| § 14-4 浇注系统对塑件性能的影响..... | (255) |
| 第十五章 橡胶及其模塑成型工艺..... | (265) |
| § 15-1 常用橡胶材料添加剂..... | (265) |
| § 15-2 橡胶材料的主要品种..... | (269) |
| § 15-3 橡胶模塑制品的成型工艺..... | (273) |
| 第十六章 粉末冶金成型..... | (282) |
| § 16-1 粉末冶金成型工艺简介..... | (282) |
| § 16-2 粉末冶金成型的应用..... | (291) |
| § 16-3 粉末冶金制品的结构工艺性..... | (293) |
| § 16-4 常见粉末冶金成型件缺陷分析..... | (297) |
| 第十七章 陶瓷材料的成型工艺..... | (299) |
| § 17-1 概 述..... | (299) |
| § 17-2 特种陶瓷粉体的性能及制备..... | (299) |
| § 17-3 特种陶瓷的成型方法..... | (302) |
| § 17-4 特种陶瓷的烧结..... | (309) |
| 第十八章 复合材料的成型工艺..... | (311) |
| § 18-1 概述..... | (311) |
| § 18-2 纤维增强塑料的成型..... | (313) |
| § 18-3 陶瓷基复合材料的制备及成型..... | (315) |
| § 18-4 金属基复合材料的制备及成型..... | (318) |

第五篇 材料成型工艺的选择

| | |
|-----------------------------------|--------------|
| 第十九章 常用材料成型工艺分析..... | (325) |
| § 19-1 材料成型工艺的确定程序及选择原则..... | (325) |
| § 19-2 材料成型工艺选择的依据..... | (326) |
| § 19-3 材料的主要成型工艺特点..... | (328) |
| 第二十章 材料成型工艺方案的变更及选用举例..... | (340) |
| § 20-1 经济性对材料成型方案的影响..... | (340) |
| § 20-2 产品质量对材料成型工艺的影响..... | (343) |
| § 20-3 材料成型工艺的选择举例..... | (345) |

第一篇 金属的液态成型工艺

第一章 金属液态成型工艺理论基础

§ 1-1 概 述

金属液态成型工艺有铸造、液态冲压和液态模锻等多种方法，其中历史最悠久，应用最广泛的是铸造。它是将液态金属浇入铸型型腔，使其冷却凝固，而获得毛坯或零件的成型工艺。古代铸造主要用于艺术品、各种器皿及农具的铸造，后来发展到镶牙中的假牙及医疗器械的制造，至今铸造已成为工业中的重要生产部门。

一、液态金属成型方法的特点

铸造是利用液态金属直接凝固成型，其特点是：

① 最适合铸造形状复杂、特别是复杂内腔的铸件，如复杂的箱体、机架、阀体、泵体、叶轮、汽缸体、螺旋桨等等。

② 铸件的大小几乎不受限制，如小到重几克的钟表零件，大到重数百吨的重型机械，如轧钢机机架等。

③ 铸造适用的材料范围广，几乎凡能熔化成液态的金属材料均可用于铸造。对于某些塑性很差的材料（如铸铁等），铸造是制造其零件或毛坯的唯一成型工艺。液态金属直接凝固成型的零件，一般内部组织均匀性、致密性较低，其机械性能低于塑性成型件。

二、液态金属成型方法的分类

1. 铸造

铸造方法依其铸型材料、铸造工艺和浇注方法不同，可分为砂型铸造和特种铸造两大类。砂型铸造能适于各种金属材料及大小形状和批量不同的铸件，成本低廉，其应用占铸件总产量的 90%以上。特种铸造是指砂型铸造以外的其它铸造工艺方法，常用的有熔模铸造、金属型铸造、压力铸造、低压铸造和离心铸造等。与砂型铸造相比，特种铸造在铸件质量、生产率等方面优于砂型铸造，但它们的适用面均有局限性，成本也高于砂型铸造。

2. 液态模锻

它兼有液态和塑性成型工艺特点，按传统成型工艺分类，将其列在第二篇第十章中。

§ 1-2 液态合金的工艺性能

液态合金的工艺性能是指符合某种生产工艺要求所需要的性能。就铸造而言，其工艺性能表征为其铸造性能，通常是指合金的流动性、收缩性、吸气性及偏析等性能，它们对获得健全铸件有很大的影响。因此，合金铸造性能是选择铸造金属材料，确定铸件的铸造工艺方案及进行铸件结构设计的依据。

一、合金的流动性

1. 合金流动性概念

合金的流动性是指液态金属的流动能力，在铸造时是指液态合金充填铸型型腔的能力。合金的流动性愈好，充填铸型的能力愈强，就易于铸出轮廓清晰、薄壁的复杂铸件，利于液态合金中的气体和熔渣上浮与排除，有助于对液态合金在凝固过程中所产生的收缩进行补缩。反之，若流动性不好，则易使铸件产生浇不到、冷隔等缺陷，并且，流动性差也是引起铸件气孔、夹渣和缩孔的间接原因。

合金流动性的测定，是将液态合金浇注到螺旋形标准试样（图 1-1）所形成的铸型中，浇注冷凝后，测出其实际螺旋线长度。为便于测定，在标准试样上每 50mm 长做出凸台标记，在相同的浇注工艺条件下，测得的螺旋线长度越长，合金的流动性越好。常用铸造合金中灰铸铁、硅黄铜的流动性最好，铝合金次之，铸钢最差。

2. 影响合金流动性的因素

影响合金流动性的因素很多。凡影响铸型中液态合金保持流动时间长短和流动速度的因素，均能影响其流动性，其中主要因素是合金的化学成分、浇注温度和铸型的充填条件。

(1) 化学成分

不同化学成分的合金因其结晶特性（图 1-2）、粘度不同，其流动亦不同。共晶成分合金的结晶特性是在恒温下以共晶团进行结晶，结晶时从表层开始向中心逐层凝固，结晶前沿（已结晶固体层与剩余液体的界面）较平滑（见图 1-3a），对尚未凝固金属液的流动阻力小；

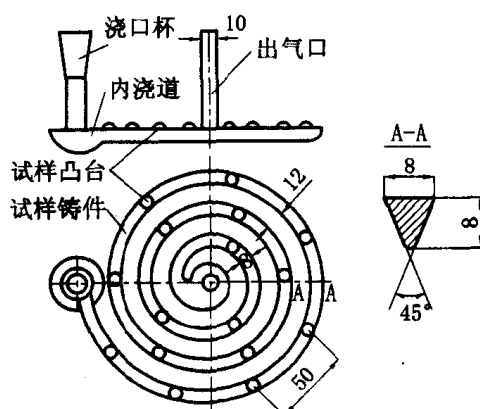


图 1-1 螺旋型标准试样

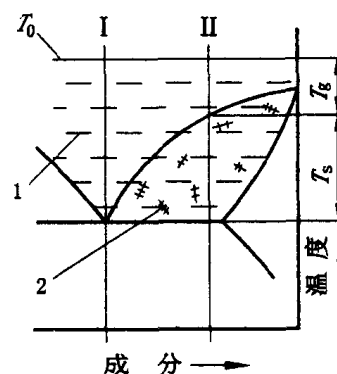


图 1-2 结晶特性不同的合金
1—液相；2—树枝晶固相； T_0 —浇注温度； T_s —凝固温度范围

同时，在状态图上共晶成分合金的熔点最低，在相同浇注温度下，其过热度（浇注温度与合金熔点之间的温度差）最大，保持液态时间长，加上共晶结晶过程中放出大量的潜热，也有利于推迟金属的凝固，故共晶成分合金的流动性最好。其它成分合金（见图 1-2 II）的结晶特性是，其凝固过程是在一定凝固温度范围内完成，即经过液、固两相共存区。因区中液相与固相界面不清晰，成为糊状（称为糊状凝固区）。糊状凝固区中的固相为树枝晶，它使凝固前沿界面粗糙（见图 1-3b），增加了对合金流动的阻力，加上树枝晶的表面积大，热传导快，加速了金属液的凝固。凝固温度范围越大的合金，树枝晶越发达，其流动性也越差。此外，凡能降低金属液粘度的成分均有助于提高流动性，如铸铁中的磷可降低铸铁凝固温度和粘度，可提高流动性。但磷可引起铁的冷脆性，所以一般仅用于机械性能要求不高的小件、薄件和艺术铸件。为了防止浇不到和冷隔并获得轮廓清晰的铸件，可将含磷量提高至 0.5%~1.0%。铸铁中的硫能形成悬浮于铁水中的 MnS 质点，增加铁水的内摩擦，使其粘度增高，还使铁水表面形成氧化膜，这些均会引起合金流动性下降。

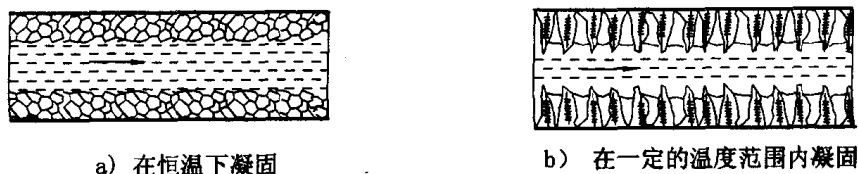


图 1-3 结晶特性对流动性的影响

(2) 浇注条件

① 浇注温度。浇注温度对合金流动性的影响很显著。浇注温度越高，液态金属的粘度越下降，且因其过热度高，金属液含热量多，保持液态时间长，故有利提高合金的流动性。但浇注温度过高，会导致金属的收缩增大，吸气增多，氧化严重，使铸件产生缩孔、缩松、气孔和粘砂等缺陷，故只对薄壁复杂铸件或流动性较差的合金才允许适当提高浇注温度来提高流动性。一般在保证液态合金有足够充型能力的前提下，浇注温度不宜过高，通常控制的浇注温度为：灰铸铁 1200~1380 °C，铸造碳钢 1520~1620 °C，铝合金 680~780 °C，视铸件大小、壁厚、复杂程度及合金成分而定。

② 浇注压力。增大浇注压力显然可改善流动性。如生产中常采用增加直浇口高度或应用压力铸造、离心铸造来增大浇注压力，以提高金属液的流动性。

(3) 铸型充填条件

① 铸型导热能力。用金属型浇注铸件时，因金属型导热能力强，容易降低合金的流动性。而用干砂型，特别是将铸型在加热状态下浇注金属液时，其合金的流动性将显著增加。

② 铸型的阻力。铸型型腔狭窄、复杂，或铸型材料的发气量大，使型腔内气体含量增加，而铸型排气又不通畅，造成铸型内反压力增大，以上这些因素将导致铸型对金属液流动的阻力增加，从而降低合金流动性。

二、合金的收缩性

1. 合金收缩的概念

合金从浇注、凝固直至冷却到室温的过程中，其体积或尺寸缩减的现象，称为收缩。收缩是合金的物理本性，但如果在铸造过程中，不能对收缩进行控制，常常会导致铸件产生

缩孔、缩松、应力、变形和裂纹等缺陷。必须研究收缩规律，以获得健全铸件。

合金 I 从浇注温度冷却至室温的收缩过程中，其收缩经历如下三个阶段（见图 1-4）：

(1) 液态收缩 $\epsilon_{液}$

$\epsilon_{液}$ 是从浇注温度 ($T_{浇}$) 到凝固开始温度 (即液相线温度 $T_{液}$) 间的收缩。

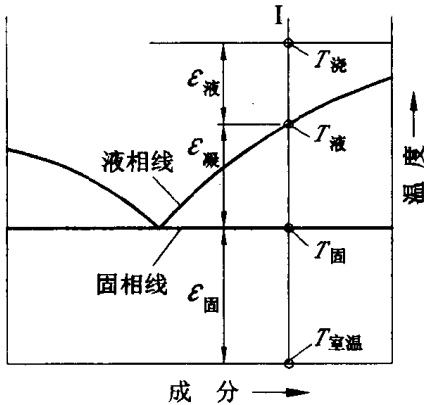


图 1-4 收缩三阶段

(2) 凝固收缩 $\epsilon_{凝}$

$\epsilon_{凝}$ 是从凝固开始温度到凝固终了温度 (即固相线温度 $T_{固}$) 间的收缩。

(3) 固态收缩 $\epsilon_{固}$

$\epsilon_{固}$ 是从凝固终了温度到室温 ($T_{室温}$) 间的收缩。

合金的总收缩率为上述三种收缩的总和。

合金的液态收缩和凝固收缩表现为合金体积的缩减，常用体收缩率表示，它们是形成铸件缩孔和缩松的基本原因。合金的固态收缩，虽然也是体积缩小，但直观地表现为铸件轮廓尺寸的减少，因此，用铸件单位长度上的收缩量，即线收缩率来表示。固态收缩是铸件产生内应力、变形和裂纹的基本原因。

不同合金其收缩率不同。在常用铸造合金中，铸钢收缩率最高，而灰铸铁最小。这是由于灰铸铁中的碳在凝固过程中，以石墨析出，石墨的比容大，引起体积膨胀，抵消了合金的部分收缩。

不同合金其收缩率不同。在常用铸造合金中，铸钢收缩率最高，而灰铸铁最小。这是由于灰铸铁中的碳在凝固过程中，以石墨析出，石墨的比容大，引起体积膨胀，抵消了合金的部分收缩。

2. 影响合金收缩的因素

合金的实际收缩率与其化学成分、浇注温度、铸件结构和铸型条件有关。

(1) 化学成分

碳素钢的含碳量增加，其 $\epsilon_{凝}$ 增加，而 $\epsilon_{固}$ 略减。灰铸铁中的碳、硅含量增多，其石墨化能力越强，石墨的比容大，能弥补收缩，故收缩越小。硫可阻碍石墨析出，使收缩率增大。

(2) 浇注温度

浇注温度越高，过热度越大，使 $\epsilon_{液}$ 增加，合金的总收缩率加大。

(3) 铸件结构和铸型条件

铸件在铸型中的凝固过程中往往不是自由收缩，而是受阻收缩。其阻力来源于：①铸件各部分的冷却速度不同，引起各部分收缩不一致，相互约束而对收缩产生阻力。②铸型和型芯对收缩的机械阻力。因此，铸件的收缩率比自由收缩率要小一些。铸件结构愈复杂，铸型硬度愈大，芯骨越粗大，则收缩阻力亦越大。

3. 铸件中的缩孔与缩松

(1) 缩孔和缩松的形成

液态金属在铸型内的凝固过程中，由于液态收缩和凝固收缩所引起的体积缩减，如得不到金属液以补充（称为补缩），则会在铸件最后凝固的部分形成孔洞。由此造成的集中孔洞称为缩孔，细小分散的孔洞称为缩松。

① 缩孔的形成。缩孔形成过程如图 1-5 所示。液态金属充满铸型后（图 1-5a），由于铸型吸热，近型壁的一层金属冷却快，先凝固而形成铸件外壳，壳中金属液的收缩因被外壳阻碍，不能得到补缩，故其液面开始下降（图 1-5b）。铸件继续冷却，凝固层加厚，内部剩

余的液体由于液态收缩和补充凝固层的收缩，使体积缩减，液面继续下降（图 1-5c），如此过程一直延续到凝固终了，结果在铸件最后凝固的部位形成了缩孔（图 1-5d, e）。缩孔形状呈倒锥形，内表面粗糙。依凝固条件不同，缩孔可隐藏在铸件表皮下（此时缩孔顶上表皮呈凹陷），亦可露在铸件表面（明缩孔）。

纯金属和共晶成分的合金，易形成集中的缩孔。

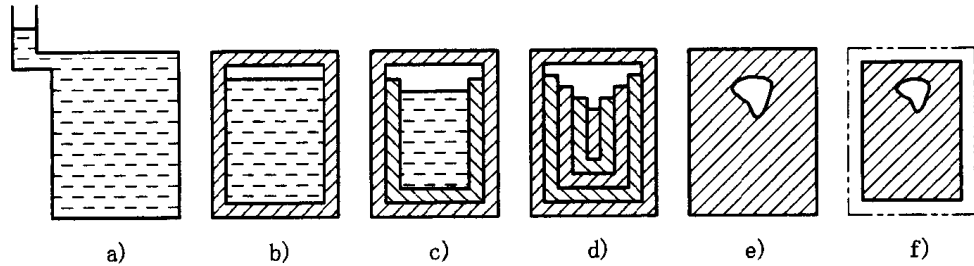


图 1-5 缩孔的形成过程

② 缩松的形成。缩松的形成过程如图 1-6 所示。铸件首先从外层开始凝固，因凝固前沿凹凸不平（图 1-6a），当两侧的凝固前沿向中心汇聚时，汇聚区域形成一个同时凝固区。在此区域内，剩余液体被凹凸不平的凝固前沿分隔成许多小液体区（图 1-6b）。最后，这些数量众多的小液体区，在凝固收缩时，

因得不到补缩而形成了缩松（图 1-6c）。缩松隐藏于铸件内部，外观上不易发现。凝固温度范围大的合金，结晶时为糊状凝固，凝固中树枝晶将金属液分隔成难以得到补缩的小液体区，故其缩松倾向更大。

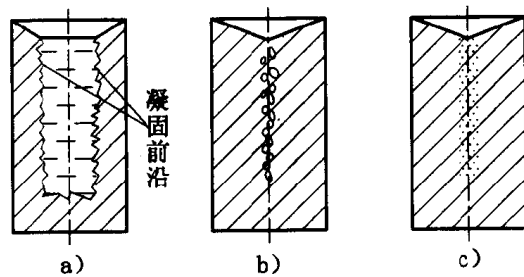


图 1-6 缩松的形成过程

缩松分为宏观缩松和显微缩松两种。宏观缩松是用肉眼或放大镜可以看出

的分散细小缩孔。显微缩松是分布在晶粒之间的微小缩孔，要用显微镜才能观察到，这种缩松分布面积更为广泛，甚至遍布铸件整个截面。

(2) 缩孔和缩松的防止

① 缩孔的防止。铸件上的缩孔将削减其有效截面积，大大降低铸件的承载能力，必须根据技术要求，采取适当的工艺措施，予以防止。

尽管收缩是合金的物理本性，铸造时一定会有缩孔产生，然而只要采用合理的工艺措施，恰当控制铸件的凝固顺序，仍可以获得无缩孔的致密铸件。其具体办法是：采用冒口和冷铁，控制铸件顺序凝固。

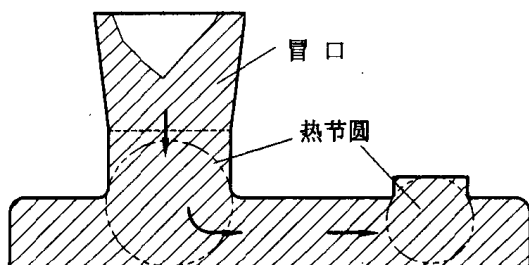


图 1-7 用冒口补缩实现顺序凝固

所谓顺序凝固就是在铸件上可能出现缩孔的厚大部位（如图 1-7 所示铸件截面上内接圆直径最大的部位）安放冒口，使铸件上远离冒口的部位先凝固，靠近冒口的部位次凝固，冒口本身最后凝固。顺序凝固使铸件凝固部位的收缩，由次凝固部位的金属液来补缩；后凝固部位的收缩由

冒口中的金属液补缩（如图 1-7 中箭头所示），将缩孔转移到冒口之中。

冒口为铸件的多余部分，清理铸件时予以去除，即可得到无缩孔的致密铸件。形状复杂有多个热节（铸件上热量集中，内接圆直径较大的部位）的铸件，实现顺序凝固时，往往要采用多个冒口并配合冷铁同时使用。如图 1-8 所示阀体铸件，有三个热节（一半铸件），其底部凸台处热节不便安放冒口，上部的冒口又难以对该处进行补缩，故在该处设置外冷铁，相当于局部金属型，因冷却快，使厚大凸台反而先凝固，其余两个热节，分别由二个冒口（明冒口及暗冒口）将铸件上、下两部分别进行顺序凝固。冷铁仅仅是加快铸件局部的冷速，以控制铸件的凝固顺序，本身并不起补缩作用。冷铁分为外冷铁和内冷铁两类：外冷铁多用铸钢和铸铁制造，安放在砂型中时，与金属液接触面应涂刷耐火涂料，以防止与铸件熔粘，外冷铁可重复使用；内冷铁要熔合在铸件内，其材质应与铸件材质相同，由于熔合时易产生气孔，粘不牢等缺陷，故内冷铁限于应用在不重要的铸件，如图 1-9 所示为铸铁砧座应用内冷铁减小冒口的实例。

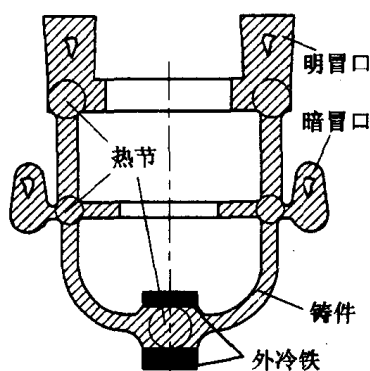


图 1-8 阀体铸件的顺序凝固

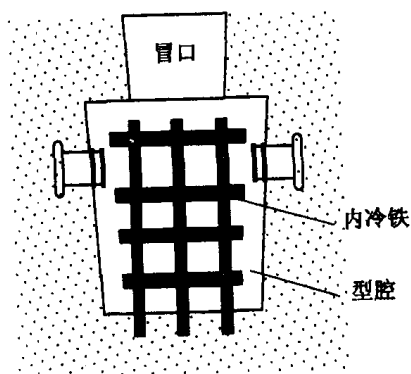


图 1-9 内冷铁的应用

② 缩松的防止。缩松是细小分散的缩孔，它对铸件承载能力的影响比集中缩孔要小，但它易影响铸件的气密性，使铸件渗漏，因此，对于气密性要求高的油缸、阀体等承压铸件，必须采取工艺措施防止缩松。然而，防止缩松比防止缩孔要困难得多，不仅因它难以发现，且因缩松常出现在凝固温度范围大的合金所制造的铸件中，即使采用冒口对其热节处补缩，但由于发达的树枝晶堵塞了补缩通道，而使冒口难以发挥补缩作用。目前生产中多采用在热节处安放冷铁或在局部砂型表面涂激冷涂料，加大铸件的冷却速度；或用加大结晶压力，以破碎枝晶，减少其对金属液流动的阻力，从而达到部分防止缩松的效果。

4. 铸造内应力、变形和裂纹

铸件的固态收缩受到阻碍时，将会在铸件内部产生内应力，称为铸造内应力。当铸造应力方向与铸件所受外力方向相同时会降低铸件的承载能力；此外，铸造应力还是引起铸件产生变形和裂纹的基本原因。

(1) 内应力的形成

铸造内应力按其产生的原因不同，可分为热应力和机械应力两类。

① 热应力。热应力是由于铸件各部分冷却速度不同，以致在同一时间内铸件各部分收缩不一致，导致相互约束而引起的内应力。

为了分析热应力的形成，首先应了解固态金属自高温冷却到室温时力学状态的变化。固态金属在再结晶温度（钢和铸铁为 $620\sim 650^{\circ}\text{C}$ ）以上时，处于塑性状态，此时，在较小的应力作用下，便可发生塑性变形（即永久变形），其内应力在变形后可自行消失。在再结

晶温度以下，金属呈弹性状态，此时，在应力作用下，仅能产生弹性变形，而变形后应力仍继续存在。图 1-10a 所示的铸件是，由长为 l_0 的一根粗杆 I 和两根细杆 II 及上、下两横梁铸成一体的框形铸件，用它来分析热应力的形成过程，故称它为应力框。应力框中粗、细杆的冷却曲线如图 1-11 所示。由图可见，因杆 I 与 II 的截面厚度不同，冷却速快慢不一，使两杆的收缩不一致而产生了内应力，其具体形成过程可按如下三个阶段进行：

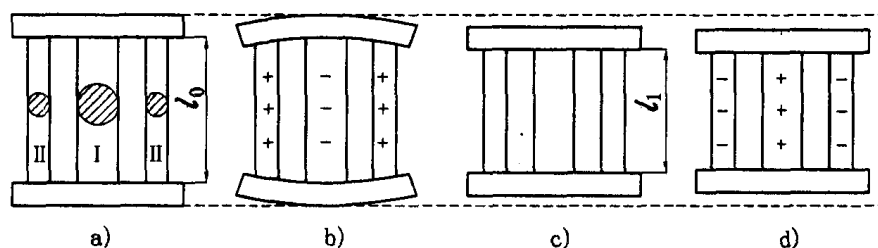


图 1-10 热应力的形成
+ 表示拉应力； - 表示压应力

第一阶段 ($t_0 \sim t_1$)。两杆温度均高于再结晶温度 $T_{再}$ ，均处于塑性状态，尽管两杆的冷却速不同，收缩不一致，但瞬时的应力均可通过塑性变形而自行消失。

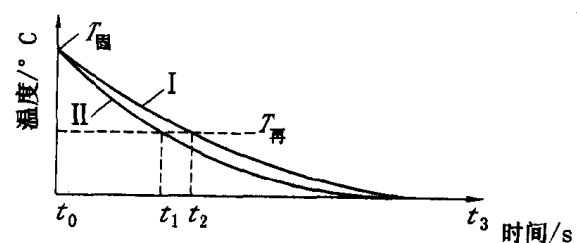


图 1-11 应力框的冷却曲线

第二阶段 ($t_1 \sim t_2$)。杆 II 已冷却至 $T_{再}$ 以下，进入弹性状态，杆 I 仍在 $T_{再}$ 以上，呈塑性状态。此时因细杆 II 的冷速大于粗杆 I，收缩亦大于杆 I，使细杆 II 受拉伸，粗杆 I 受压缩，形成了暂时的内应力（图 1-10b），但内应力随即被粗杆 I 的塑性变形（压短）而消失，使杆 II 与 I 同时缩短至 l_1 （图 1-10c），使内应力又自行消失。

第三阶段 ($t_2 \sim t_3$)。已被塑性压短的粗杆 I 也冷却至 $T_{再}$ 以下弹性状态。此时，粗杆 I 的温度较高，还需进行较大的收缩；而细杆 II 的温度较低，收缩已趋停止。因此，粗杆 I 的收缩必然受到细杆的强烈阻碍，使杆 I 受弹性拉伸，杆 II 受弹性压缩，直到室温，形成了残余内应力（图 1-10d）。

由以上分析可以得出：

a) 热应力的性质是：铸件缓冷处（厚壁或心部）受拉伸；快冷处（薄壁或表层）受压缩。

b) 铸件冷却时各处的温差越大，顺序凝固愈明显，合金的固态收缩率越大，弹性模量愈大，则热应力愈大。

预防应力的基本途径是减少铸件各处的温差，使其均匀冷却。具体措施有：尽量选择弹性模量小的合金；设计壁厚均匀的铸件；在铸造工艺上，控制铸件各部位同时凝固。如图 1-12 所示壁厚不均匀的阶梯形铸件，若将内浇口开在薄壁处，而在远离浇口的厚壁处放冷铁，这样因薄壁处被高温金属液加热可减缓凝固，而厚壁被冷铁激冷加快凝固，从而达到按中间壁厚的冷速同时凝固。实际生产中，使铸件同时凝固是减少铸造内应力，防止铸件变形和裂纹的有效工艺措施，尤适合形状复杂的薄壁铸件。

② 机械应力（又称收缩应力）。它是铸件的固态收缩受到铸型或型芯等机械阻碍而形

成的内应力，如图 1-13 所示轴套铸件在冷却收缩时其轴向受砂型阻碍，径向受型芯阻碍，将使铸件产生机械应力。显然，机械应力将使铸件产生拉伸或剪切应力，其大小取决于铸型及型芯的退让性，当铸件落砂后，这种应力可局部甚至全部消失。然而若机械应力在铸型中与热应力共同起作用，则将增大某部位的拉伸应力，促进铸件产生裂纹的倾向。

(2) 铸件的变形与防止

残余内应力使铸件内的晶体结构被拉伸或压缩，好像被拉伸或压缩的弹簧一样，处于一种不稳定状态，有自发通过铸件变形来缓解其应力，以回到稳定的平衡状态。显然，只有原来受拉伸部分产生压缩变形、受压缩部分产生拉伸变形，才能使铸件中的残余内应力减少或消除。根据此规律，可预计铸件变形的方向。

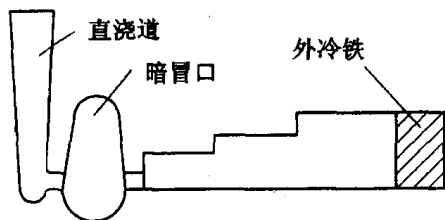


图 1-12 阶梯形铸件同时凝固示意图

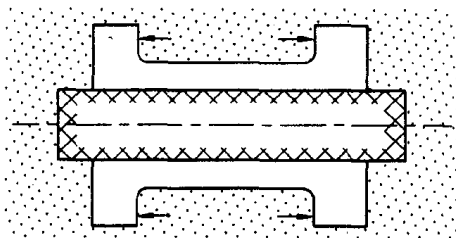


图 1-13 机械应力

铸件变形多以“杆”件和“板”件上的弯曲变形最为明显，所谓“杆”件是指其长度尺寸大大超过其宽度和高度尺寸的件，而“板”件是指其平面尺寸大大超过其高度尺寸的件，梁、床身等可视为“杆”件，而平板等则视为“板”件。图 1-14 所示 T 形梁铸件，其上边厚，冷却慢，受拉应力，将产生压缩变形来缓解应力。因此，最后出现了上边短（内凹），下边长（外凸）弯曲变形（如图中虚线所示）。

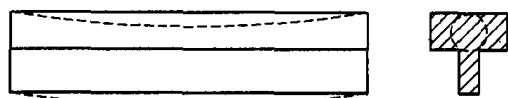


图 1-14 梁形铸件的弯曲变形

同理，图 1-15 所示床身铸件，其导轨较厚，冷却慢受拉应力，床壁较薄受压应力，最后使床身产生导轨内凹的挠曲变形。

图 1-16 所示平板铸件虽厚薄均匀，但由于平板中心部位比四周边缘冷却慢，致使中心部位受拉应力，周边受压应力，且铸型上面又比下面散热冷却快，于是平板产生如图所示方向的变形。

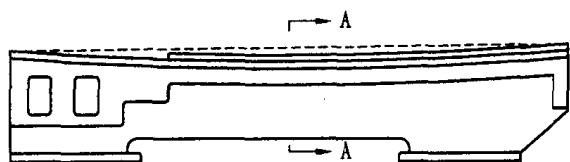


图 1-15 床身铸件的变形

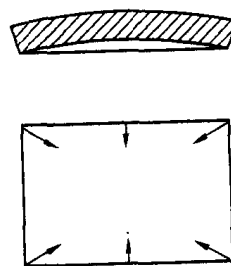


图 1-16 平板铸件的变形

为了防止铸件变形，除减少应力外，最好设计对称结构的铸件，使其内应力互相平衡而不易变形。铸造生产中防变形最有效的方法是采用反变形法。它是在统计某类铸件变形规律的基础上，在模型上预先作出相当于铸件变形量的反变形量，用以抵消铸件的变形。如长