



普通高等教育“十二五”规划教材

# 材料成形 工艺基础

温爱玲 主编

Fundamental of  
Materials Forming Process



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

# 材料成形工艺基础

主 编 温爱玲  
副主编 翟封祥  
参 编 李荣华 尹志华 曲宝章  
主 审 任瑞铭



机械工业出版社

本书以教育部颁布的“工程材料及机械制造基础课程教学基本要求”为依据,以零件的成形工艺为主线,注重成形理论基础知识的严谨性、各种工艺方法的实用性,通过典型的工程实例强化制订工艺和结构设计的综合能力。

本书在内容上以金属材料液态成形工艺、金属材料塑性成形工艺和金属材料连接成形工艺为主,还大量地引入了其他成形新技术、新工艺,以适应现代机械制造技术发展的需要。全书共5篇18章,在每章后都附有适量的复习思考题。

本书是高等工科机械类本科学生的通用教材,也可供工科近机类专业学生选用,同时可作为相关科研及工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

材料成形工艺基础/温爱玲主编. —北京:机械工业出版社,2013.12  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-111-43917-2

I. ①材… II. ①温… III. ①工程材料—成型—工艺—高等学校—教材  
IV. ①TB3

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第208752号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:丁昕祯 责任编辑:丁昕祯 章承林 冯 铨

版式设计:常天培 责任校对:申春香

封面设计:张 静 责任印制:李 洋

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2013年11月第1版第1次印刷

184mm×260mm·14.5印张·356千字

标准书号:ISBN 978-7-111-43917-2

定价:29.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

本书是高等院校机械工程类各专业学生必修的一门综合性专业技术基础课教材，按教育部面向 21 世纪本科机械类专业人才培养模式改革要求，根据国家教育部颁布的“工程材料及机械制造基础课程教学基本要求”和“工程材料及机械制造基础系列课程改革指南”的精神，结合作者多年的教学和实践经验，参阅了大量的国内外相关资料及教材编写而成。

社会需求是课程建设的依据，其需求的变化趋势则是课程建设的指导方针，快速发展的市场经济对高等教育的人才培养提出了新的要求和挑战。为了适应社会需求，本书注重工程实用性，通过引入大量的工程应用实例，力求把传授专业知识和培养专业技术人员的应用能力相结合，培养学生求真、求实、创新精神；注重成形理论基础知识的严谨性，各章节之间的衔接与对比性，不仅能将所学理论知识应用于实践，而且所选择的工艺方案具有最佳性能、最低成本，同时还具有创新意识。

本书分 5 篇（共 18 章）：金属材料液态成形工艺，金属材料塑性成形工艺，金属材料连接成形工艺，非金属材料成形工艺，工程材料及成形方法的选择。其主要内容包括金属材料的铸造成形、锻压成形和焊接成形的成形原理、成形方法、成形材料、成形工艺及结构要求，以及非金属材料的成形工艺。

本书由大连交通大学温爱玲任主编，翟封祥任副主编，大连交通大学任瑞铭教授主审。在编写过程中，参考并引用了相关手册、教材、学术杂志、文献资料等内容，在此一并表示由衷的感谢。

参加本书编写的有温爱玲（第 1、2 篇）、翟封祥（第 3、5 篇）、李荣华（第 4 篇）、尹志华（第 2 章部分）、曲宝章（第 9 章部分）。

本书涉及的专业面比较广，由于编者水平有限，书中难免有不足或疏漏之处，敬请读者和专家批评指正。

编 者

# 目 录

前言	
<b>第1篇 金属材料液态成形工艺</b>	
<b>第1章 液态成形理论基础</b> ..... 2	
1.1 合金的流动性和充型能力 ..... 2	
1.2 合金的凝固与收缩 ..... 4	
1.3 合金的吸气性 ..... 14	
1.4 铸件的常见缺陷及分析 ..... 15	
复习思考题 ..... 17	
<b>第2章 常用铸造合金及其熔炼</b> ..... 19	
2.1 铸铁件生产 ..... 20	
2.2 铸钢件生产 ..... 33	
2.3 铸造有色金属及其合金 ..... 35	
复习思考题 ..... 37	
<b>第3章 金属的铸造成形工艺方法</b> ..... 39	
3.1 砂型铸造 ..... 39	
3.2 特种铸造 ..... 44	
复习思考题 ..... 55	
<b>第4章 铸造工艺与铸件结构设计</b> ..... 56	
4.1 砂型铸造工艺设计 ..... 56	
4.2 铸造工艺方案及工艺图 ..... 63	
4.3 铸件结构设计 ..... 67	
复习思考题 ..... 76	
<b>第2篇 金属材料塑性成形工艺</b>	
<b>第5章 金属塑性成形理论基础</b> ..... 81	
5.1 金属塑性变形的实质 ..... 81	
5.2 金属塑性变形后的组织和性能 ..... 82	
5.3 金属的可锻性及其影响因素 ..... 86	
复习思考题 ..... 87	
<b>第6章 常用锻压成形工艺</b> ..... 88	
6.1 自由锻 ..... 88	
6.2 模锻 ..... 93	
6.3 胎模锻 ..... 102	
复习思考题 ..... 103	
<b>第7章 板料冲压成形工艺</b> ..... 106	
7.1 板料冲压的基本工序 ..... 106	
7.2 冲模及其结构 ..... 114	
7.3 冲压件的结构设计 ..... 116	
复习思考题 ..... 118	
<b>第8章 金属塑性成形新技术</b> ..... 120	
8.1 塑性成形新工艺 ..... 120	
8.2 计算机在塑性成形中的应用简介 ..... 124	
复习思考题 ..... 126	
<b>第3篇 金属材料连接成形工艺</b>	
<b>第9章 焊接工艺理论基础与焊接质量</b> ..... 128	
9.1 电弧焊的本质 ..... 128	
9.2 焊接接头的组织与性能 ..... 130	
9.3 焊接应力与焊接变形 ..... 132	
9.4 焊接质量 ..... 136	
复习思考题 ..... 140	
<b>第10章 焊接方法及其发展</b> ..... 141	
10.1 熔焊 ..... 141	
10.2 压焊 ..... 148	
10.3 钎焊 ..... 152	
10.4 焊接新方法 ..... 154	
10.5 计算机技术在焊接中的应用简介 ..... 158	
复习思考题 ..... 159	
<b>第11章 常用金属材料的焊接</b> ..... 161	
11.1 金属材料的焊接性 ..... 161	

11.2 钢的焊接 .....	163	15.1 常用橡胶材料添加剂 .....	195
11.3 铸铁的补焊 .....	165	15.2 橡胶的主要品种 .....	196
11.4 常用有色金属及其合金的焊接 .....	166	15.3 橡胶制品的成形工艺 .....	198
11.5 异种金属的焊接 .....	168	<b>复习思考题</b> .....	203
<b>复习思考题</b> .....	170	<b>第16章 工程陶瓷及其成形工艺</b> .....	204
<b>第12章 焊接结构与工艺设计</b> .....	171	16.1 陶瓷的种类 .....	204
12.1 焊接材料和焊接方法的选择 .....	171	16.2 工程陶瓷的成形工艺 .....	204
12.2 焊接结构工艺设计 .....	172	<b>复习思考题</b> .....	208
<b>复习思考题</b> .....	177	<b>第5篇 工程材料及成形方法的选择</b>	
<b>第13章 粘接</b> .....	179	<b>第17章 工程材料的选择</b> .....	210
13.1 粘接的基本原理与粘结剂 .....	179	17.1 零件的失效分析 .....	210
13.2 粘接的工艺特点与应用 .....	182	17.2 机械零件材料选择的一般原则 .....	211
<b>复习思考题</b> .....	185	17.3 定量选材方法简介 .....	212
<b>第4篇 非金属材料成形工艺</b>		<b>复习思考题</b> .....	214
<b>第14章 工程塑料及其成形工艺</b> .....	187	<b>第18章 材料成形方法的选择</b> .....	215
14.1 工程塑料的成分 .....	187	18.1 材料成形方法选择的依据 .....	215
14.2 工程塑料的成形性能 .....	188	18.2 材料成形方法选择举例 .....	218
14.3 工程塑料的成形方法 .....	190	<b>复习思考题</b> .....	222
14.4 工程塑料成形模具 .....	193	<b>参考文献</b> .....	225
<b>复习思考题</b> .....	194		
<b>第15章 橡胶及其成形工艺</b> .....	195		

# 第 1 篇 金属材料

## 液态成形工艺

将液态金属浇注到具有与零件形状、尺寸相适应的铸型型腔中，待其冷却凝固后获得一定尺寸形状与性能的毛坯或零件的方法称为铸造。

铸造是人类掌握比较早的一种金属热加工工艺，是生产机器零件或毛坯件的一种主要成形方法。我国的铸造技术历史悠久，早在 3000 多年前，青铜器铸件就有应用，2500 年前，铸铁工具已经相当普遍。如我国商朝的后母戊方鼎、战国时期的曾侯乙尊盘、明朝的永乐大钟等，都是古代铸造技术的代表产品。泥范、铁范（金属型铸造）和失蜡法（熔模铸造）被称为古代三大铸造技术。

进入 21 世纪，快速、高效、节能对制造业提出了更高的标准和要求，与此同时，材料及其成形技术也得到了长足的进步和发展。而铸造成形工艺依旧是机械制造业中重要的成形工艺之一而被大量应用。

### 1. 铸造成形的优点

1) 适应性广。适合制造形状复杂的铸件，如形状复杂的箱体、机床床身、机架、阀体、泵体、叶轮、气缸体等。适合各种材料，如铸铁、铸钢、铸造有色金属、铸造非金属材料等，特别是对于不适合压力加工或焊接成形的材料，该生产方法具有特殊的优势。

2) 铸件的大小几乎不受限制。铸件壁厚可由 0.5mm 到 1000mm，质量可从几克到几百吨，如小到几克的钟表零件，大到数百吨的轧钢机机架，均可铸造成形。

3) 生产成本低。铸造设备简单，原材料来源广泛，价格低廉，废品可再利用。铸造可以直接浇铸出形状复杂的毛坯件或零件，因此可减少切削加工量。

### 2. 铸造成形的缺点

1) 生产工序较多。生产过程中难以精确控制质量，因而废品率较高。实际生产中除了需要性能检查外还需要进行宏观和微观质量控制与检查。

2) 力学性能较差。铸件组织疏松、晶粒粗大，内部容易产生缩孔、缩松、气孔、砂眼等缺陷，而导致铸件的力学性能较差，特别是冲击韧度，比同样材料用其他成形方法的力学性能低，因此不适合铸造承受动载荷的零件。

3) 铸件表面粗糙，尺寸精度不高。尤其是应用比较多的砂型铸造，铸件表面粗糙，尺寸精度差，对于要求高精度的表面，一般铸造后要进行机加工。

4) 铸造工作环境较差，工人劳动强度大。浇注熔融金属温度高，型砂中粉尘对人体有伤害。

# 第 1 章 液态成形理论基础

本章主要介绍铸造成形理论，重点讲述铸造性能及铸造缺陷。

铸造成形过程主要分为充满型腔和冷却凝固成形两个过程，这两个过程决定铸件质量和性能，尤其是冷却凝固过程。液态金属充满型腔的过程会影响到铸件的形状和尺寸，与材料和铸件结构等有关；冷却凝固过程影响铸件的组织与性能，与液态金属的凝固方式和冷却速度等有关。

是否容易铸造出形状完整和性能优异的铸件，通常用铸造性能指标来表示。影响铸件性能的因素主要有：合金的流动性、合金的收缩性和合金的吸气性。以下主要从这三个方面分析铸造性能。

## 1.1 合金的流动性和充型能力

### 1.1.1 合金的流动性

#### 1. 流动性的概念

液态金属本身的流动能力称为“流动性”，是合金的铸造性能之一。同样浇注条件下，合金的流动性与金属的成分、温度、杂质含量及其物理性质有关。流动性差，则会造成铸件浇不到、冷隔、气孔、夹杂、缩孔、热裂等缺陷。流动性好的合金，充型能力强，便于浇注出轮廓清晰、薄而复杂的铸件。

合金流动性的好与坏，通常以“螺旋形标准试样”（图 1-1）的长度来衡量。在相同的浇注条件下，将液态合金浇注到螺旋形标准试样所形成的铸型中，在相同的铸型及浇注条件下，浇出的螺旋形试样越长，表示该合金的流动性越好。

#### 2. 影响合金流动性的因素

(1) 合金的种类 不同合金因其共晶特性、粘度不同，其流动性也不同。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。铸铁的结晶温度低、收缩小、气孔少，所以比铸钢的流动性好。

(2) 合金的成分 相同合金，其结晶特点对流动性影响很大，结晶温度范围小的合金流动性好，结晶温度范围宽的合金流动性差。纯金属和共晶成分合金的结晶温度范围趋于零，结晶的固体层内表面比较光滑（图 1-2a），对金属液的阻力较小。同时，共晶成分合金的凝固温度最低，相对说来，合金的过热度大，推迟了合金的凝固，故流动性最好。结晶温度范围宽，经过液、固并存的两相区，由于初生的树枝状晶体使已结晶固体层内表面粗糙（图 1-2b），因而其流动性变差。合金成分越远离共晶成分，结晶温度范围越宽，流动性越差。



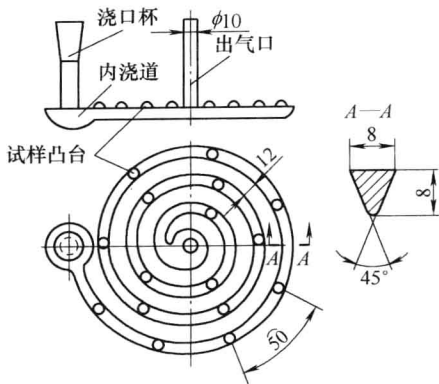


图 1-1 螺旋形标准试样

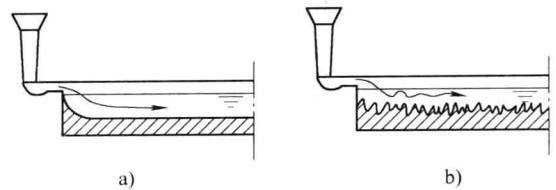


图 1-2 不同成分合金的流动性

### (3) 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，液态金属的粘度越低，且因其过热度高，金属液含热量多，保持液态时间长，有利于提高合金的流动性。但浇注温度过高，液态金属收缩越大、吸气越多、氧化越严重，流动性甚至降低。因此在保证充型能力足够的前提下，浇注温度不要过高。通常，灰铸铁的浇注温度为  $1200 \sim 1380^{\circ}\text{C}$ ，铸钢为  $1520 \sim 1620^{\circ}\text{C}$ ，铝合金为  $680 \sim 780^{\circ}\text{C}$ 。薄壁复杂件取上限，厚大件取下限。

2) 充型压力。在一定范围内，液态合金在流动方向上所受的的压力越大，充型能力越好。砂型铸造时，充型压力是由直浇道所产生的静压力形成的，故直浇道的压力必须适当。而压力铸造、离心铸造因增加了充型压力，充型能力较强，金属液的流动性也较好。但是压力过大，砂型铸造会造成夹砂等缺陷。

### (4) 铸型的充填条件

1) 铸型的蓄热能力。铸型的蓄热能力表示铸型从熔融合金中吸收并传出热量的能力。铸型材料的比热容和热导率越大，对熔融金属的激冷能力越强，合金在型腔中保持流动的时间减少，合金的流动性越差。

2) 铸型温度。浇注前将铸型预热到一定温度减少了铸型与熔融金属间的温度差，减缓了合金的冷却速度，延长了合金在铸型中的流动时间，提高了合金的流动性。

3) 铸型中的气体。在金属液的热作用下，型腔中的气体膨胀，型砂中的水分汽化，煤粉和其他有机物燃烧，将产生大量气体，如果铸型排气能力差，浇注时产生的大量气体来不及排出，气体压力将增大，阻碍熔融金属的充型。铸造时，为了减小气体的压力，一方面应尽量减少气体产生，另一方面要增加铸型的透气性或远离浇口的最高部位开设出气口，使型腔及型砂中的气体顺利排出。

4) 铸型结构。当铸件壁厚过小，壁厚急剧变化、结构复杂，或有大的水平面时，均会使合金充型困难。因此在设计铸件结构时，铸件的壁厚必须大于规定的最小允许壁厚值，形状应尽量简单。对于形状复杂、薄壁、散热面大的铸件，应尽量选择流动性好的合金或采取其他相应措施。

## 1.1.2 合金的充型能力

### 1. 充型能力的概念

液态合金充满型腔，形成轮廓清晰、形状准确的优质铸件的能力，称为“充型能力”。

能否获得尺寸精确、轮廓清晰的铸件，取决于充型能力。在液态合金的充型过程中，如果充型能力不足，在型腔被填满之前先结晶的固态金属会将充型的通道堵塞，金属液体被迫停止流动，于是铸件将产生浇不足或冷隔等缺陷。浇不足使铸件不能获得完整的形状；冷隔虽可获得完整的外形，但因存有未完全融合的接缝，铸件的力学性能严重受损。

### 2. 影响合金充型能力的因素

充型能力首先取决于合金本身的流动性，同时还受铸型性质、浇注条件、铸件结构等因素的影响。流动性好的合金充型能力强，流动性差的合金充型能力也就较差。但是，可以通过改善外界条件提高合金的充型能力。影响充型能力的因素和原因见表 1-1。

表 1-1 影响充型能力的因素和原因

序号	影响因素	定义	影响原因
1	合金的流动性	液态金属本身的流动能力	流动性好，易于浇注出轮廓清晰、形状完整的铸件；有利于非金属夹杂物和气体的上浮和排除；易于对铸件的收缩进行补缩
2	浇注温度	浇注时金属液的温度	浇注温度越高，充型能力越强
3	充型压力	金属液体在流动方向上所受的压力	压力越大，充型能力越强。但压力过大或充型速度过高会发生喷射、飞溅和冷隔现象
4	铸型中的气体	浇注时铸型中的水分被汽化	铸型中的气体会阻碍液体的流动，也容易形成气孔
5	铸型的传热系数	铸型从其中的金属吸取并向外传输热量的能力	传热系数越大，铸型的极冷能力就越强，金属保持液态的时间就越短，充型能力下降
6	铸型温度	铸型在浇注时的温度	铸型温度越高，液态金属冷却速度就越慢，充型能力越强
7	浇注系统的结构	各浇道的结构	浇注系统的结构越复杂，流动阻力越大，充型能力越差
8	铸件的折算厚度	铸件体积与表面积之比	折算厚度大，散热慢，充型能力好
9	铸件结构	铸件结构复杂程度	结构复杂，流动阻力大，充型能力差

## 1.2 合金的凝固与收缩

### 1.2.1 合金的凝固与凝固方式

#### 1. 合金的凝固过程与组织

铸造工艺是液态金属的凝固成形过程。金属的凝固过程也是一个结晶过程，包括形核和晶体长大两个基本过程。

凝固组织对铸件的力学性能影响很大，一般情况下，晶粒越细小均匀，铸件的强度、硬



度越高，塑性和韧性也越好。

影响凝固组织的主要因素有炉料、铸件的冷却速度和生产工艺等。炉料的成分与组织状态对凝固组织有直接影响。冷却速度快，形核数目多，晶粒细小。在铸造生产中，常采用孕育处理，即在浇注时向液态金属中加入一定量的孕育剂作为形核核心，细化晶粒。

## 2. 合金的凝固方式

在铸件凝固过程中，其断面上一般存在三个区域，即固相区、凝固区和液相区。其中，对铸件质量影响较大的主要是液相和固相并存的凝固区的宽窄。铸件的“凝固方式”就是依据凝固区的宽窄  $S$  来划分的，如图 1-3 所示。

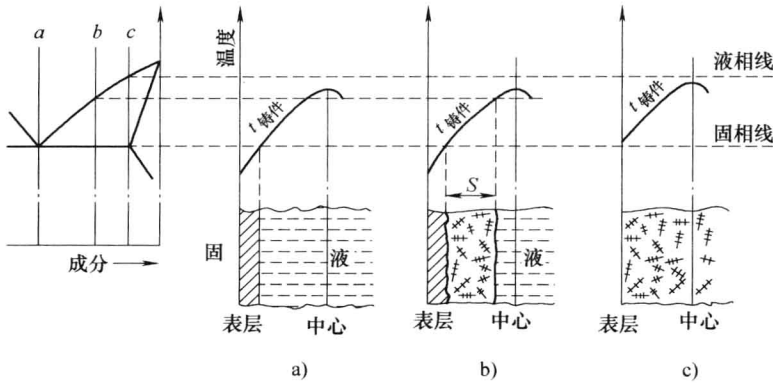


图 1-3 铸件的凝固方式

a) 逐层凝固 b) 中间凝固 c) 糊状凝固

(1) 逐层凝固 纯金属或共晶成分合金在凝固过程中因不存在液、固并存的凝固区，如图 1-3a 所示，故断面上外层的固相和内层的液相由一个界限（凝固前沿）清楚地分开。随着温度的下降，固相层不断加厚、液相层不断减少，直到铸件的中心，这种凝固方式称为逐层凝固。

(2) 糊状凝固 如果合金的结晶温度范围很宽，且铸件断面上的温度分布较为平坦，则在凝固的某段时间内，铸件表面并不存在固体层，而液、固并存的凝固区贯穿整个断面，如图 1-3c 所示。由于这种凝固方式与水泥类似，即先呈糊状而后凝固，故称为糊状凝固。

(3) 中间凝固 大多数合金的凝固介于逐层凝固和糊状凝固之间，如图 1-3b 所示，称为中间凝固方式。

铸件质量与其凝固方式密切相关。一般来说，逐层凝固时，即使外表层凝固成为固体，但心部依然是流动性好的液体，可以补充因收缩而造成的合金体积缺失，所以铸件质量好。而糊状凝固时，因收缩体积的缺失无法得到补充，难以获得结晶紧实的铸件，所以铸件质量不好，容易产生缺陷。

在常用合金中，灰铸铁、铝硅合金等倾向于逐层凝固，易于获得紧实铸件；球墨铸铁、锡青铜、铝铜合金等倾向于糊状凝固，为得到紧实铸件常需采用适当的工艺措施，以便于补缩或减小其凝固区域。

## 3. 影响铸件凝固方式的因素

(1) 合金的结晶温度范围 合金的结晶温度范围越小，凝固区域越窄，越倾向于逐层凝固。纯金属和共晶合金的结晶温度范围趋近于零，一般呈典型的逐层凝固方式。对结晶温

度范围宽的合金，当断面上的温度梯度较小时，铸件凝固区域较宽，甚至贯穿整个铸件断面，这时凝固呈典型的糊状凝固。大部分铸造合金都有一定的结晶温度范围，凝固区介于上述两种情况之间，为中间凝固。砂型铸造时，低碳钢为逐层凝固；高碳钢因结晶温度范围变宽，为糊状凝固；中碳钢为中间凝固。

(2) 铸件断面的温度梯度 在合金结晶温度范围已定的前提下，凝固区域的宽窄取决于铸件断面的温度梯度，如图 1-4 所示。若铸件的温度梯度由小变大（图中  $T_1 \rightarrow T_2$ ），则其对应的凝固区由宽变窄（ $S_1 \rightarrow S_2$ ），越趋于中间凝固甚至是逐层凝固。例如，高碳钢在金属型铸造中由于冷却速度快，温度梯度大，凝固情况趋近于中间凝固，则流动性相对较好。当温度梯度很小时，凝固区宽度一般较大，趋于糊状凝固。例如，工业纯铝在砂型铸造中由于冷却速度慢，温度梯度小，则为典型的糊状凝固，流动性比较差；而在金属型铸造时，冷却速度快，温度梯度大，则为逐层凝固，流动性比较好。

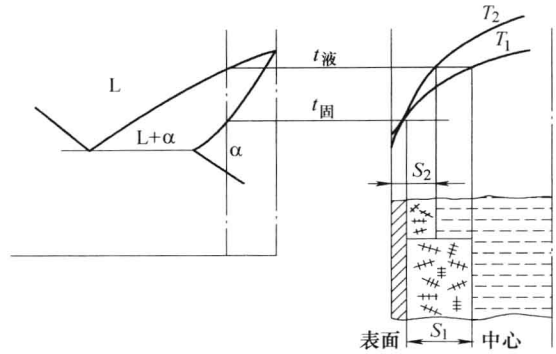


图 1-4 温度梯度对凝固方式的影响

铸件断面的温度梯度主要取决于合金的性质：合金的凝固温度越低、热导率越高、结晶潜热越大，铸件内部温度均匀化能力越大，铸件断面温度梯度越小（如多数铝合金）；铸型蓄热能力越强，对铸件的激冷能力越强，铸件断面温度梯度越大；浇注温度越高，因带入铸型中热量增多，铸件的温度梯度减小。

#### 4. 凝固方式对铸件质量的影响

铸件质量与其凝固方式密切相关。凝固方式对铸件的充型能力、补缩条件、缩孔类型、热裂纹愈合能力等有影响，所以影响铸件的致密性和合格程度。

逐层凝固的充型能力好，液体容易补缩，所以铸件的致密性好。糊状凝固凝固区域宽，枝晶发达给流动带来阻力，所以充型能力差，补缩困难，形成不容易消除分散的缩孔和疏松，热裂倾向严重，铸件的致密性差。

### 1.2.2 合金的收缩性

#### 1. 合金收缩的概念

铸造合金从浇注、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，在铸造过程中，因收缩可能会导致铸件产生缩孔、疏松、应力、变形和裂纹等缺陷。因此，必须研究收缩规律，采取工艺措施以获得合格铸件。

如图 1-5 所示，合金 I 从浇注温度冷却至室温的收缩过程中，其收缩经历三个阶段：

(1) 液态收缩 从浇注温度（ $T_{\text{浇}}$ ）到凝固开

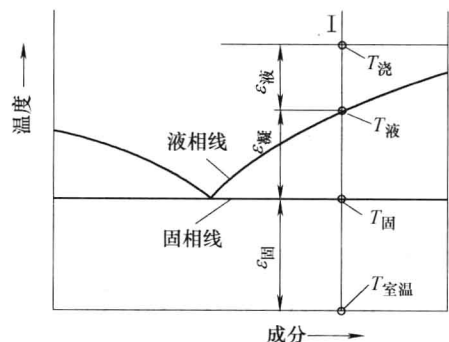


图 1-5 合金收缩的三个阶段



始温度（即液相线温度  $T_{液}$ ）间的收缩。

(2) 凝固收缩 从凝固开始温度到凝固终止温度（即固相线温度  $T_{固}$ ）间的收缩。

(3) 固态收缩 从凝固终止温度到室温（ $T_{室温}$ ）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主要原因。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小，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，铸钢熔点高收缩率最大，而灰铸铁较小。主要是因为灰铸铁一方面熔点低，另外主要是碳在凝固过程中以石墨态析出的缘故。石墨的比体积大，形成石墨过程中产生体积膨胀，部分抵消了合金的收缩。几种铁碳合金的体收缩率见表 1-2。常用铸造合金的线收缩率见表 1-3。

表 1-2 几种铁碳合金的体收缩率

合金种类	碳的质量分数 (%)	浇注温度 / $^{\circ}\text{C}$	液态收缩 $\psi_{液}$ (%)	凝固收缩 $\psi_{固}$ (%)	固态收缩 $\psi_{固}$ (%)	总体收缩 $\psi_{总}$ (%)
碳素铸钢	0.35	1610	1.6	3.0	7.86	12.46
白口铸铁	3.0	1400	2.4	4.2	5.4~6.3	12~12.9
灰铸铁	3.5	1400	3.5	0.1	3.3~4.2	6.9~7.8

表 1-3 常用铸造合金的线收缩率

合金种类	灰铸铁	可锻铸铁	球墨铸铁	碳素铸钢	铝合金	铜合金
线收缩率 (%)	0.8~1.0	1.2~2.0	0.8~1.3	1.38~2.0	0.8~1.6	1.2~1.4

## 2. 影响合金收缩的因素

(1) 化学成分 碳素钢的含碳量增加，其液态收缩增加，而固态收缩略减。灰铸铁中的碳、硅含量增多，其石墨化能力越强，石墨的比体积大，能弥补收缩，故收缩越小。硫可阻碍石墨析出，使收缩率增大。适当地增加锰，锰与铸铁中的硫形成  $\text{MnS}$ ，抵消了硫对石墨化的阻碍作用，铸铁收缩率减小。但含锰量过高，铸铁的收缩率又有所增加。

(2) 浇注温度 浇注温度越高，过热度越大，使液态收缩增加，合金的总收缩率加大。对于钢液通常浇注温度提高  $100^{\circ}\text{C}$ ，体收缩率增加约 1.6%，因此浇注温度越高，形成缩孔倾向越大。

(3) 铸件结构和铸型条件 铸件在铸型中的冷凝过程往往不是自由收缩，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（铸造热应力）；②铸型和型芯对收缩的机械阻力。因此，铸件的收缩率要受这两个因素的影响，比自由收缩率要小一些。铸件结构越复杂，铸型硬度越大，型芯骨越粗大，则收缩阻力也越大。

## 3. 铸件的缩孔与缩松

液态金属在铸型内的冷凝过程中，由于液态收缩和凝固收缩所引起的体积缩减，如得不到金属液体补充（称为补缩），则会在铸件最后凝固的部位形成一些孔洞。由此造成的中等集中孔洞称为缩孔，细小分散的孔洞称为缩松。

(1) 缩孔的形成 缩孔是在铸件最后凝固或者厚大部位形成容积较大而且集中的孔洞。缩孔多呈倒圆锥形，内表面粗糙，通常隐藏在铸件的内层，但在某些情况下，可暴露在铸件的上表面，呈明显的凹坑。

缩孔形成的条件是：金属在恒温或很窄的温度范围内结晶，铸件壁呈逐层凝固方式。

现以圆柱体铸件为例分析缩孔的形成原因与过程，如图 1-6 所示。

如图 1-6a 所示，合金液体充满圆柱形型腔，降温时发生液体收缩，收缩部分可从浇注系统得到补缩。

如图 1-6b 所示，当铸件表面散热条件相同时，表面层散热最快首先凝固结壳，此时内浇道被冻结无法提供补充液体。

如图 1-6c 所示，继续冷却时，内部液体不断发生液态和凝固收缩，使液面下降。同时外壳进行固态收缩，使铸件外形尺寸整体缩小。如果两者的减小量相等，则凝固外壳仍然和内部液体紧密接触。但由于液体收缩和凝固收缩远超过外壳的固态收缩，因此合金液体量减少造成液体与硬壳顶面脱离。

如图 1-6d 所示，随着温度降低，凝固层不断加厚，液面不断下降，当铸件全部凝固后，在液固脱离层形成一个倒锥形孔洞，也就是铸造缺陷——缩孔。

如图 1-6e 所示，继续降温至室温，整个铸件发生固态收缩，缩孔的绝对体积略有减小。

如图 1-6f 所示，如果在铸件顶部设置多余的厚大铸件体积（冒口），缩孔将移至冒口中，待凝固成形后切除这一多余部分。为了切除方便，冒口一般要求加到上部或外部。

由此可知，缩孔产生的基本原因是合金的液态和凝固收缩值大于固态收缩值，且得不到很好的补偿。缩孔产生的部位在铸件最后凝固区域，如壁的上部或中心处，以及最后凝固的热节处。

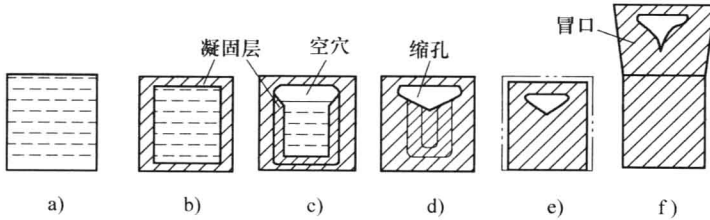


图 1-6 缩孔的形成过程

(2) 缩松的形成 细小而分散的孔洞称为缩松。缩松常分散在铸件壁厚的轴线区域、厚大部位、冒口根部和内浇口附近。当缩松与缩孔的容积相同时，缩松的分布面积要比缩孔大得多。缩松隐藏于铸件内部，外观上不易发现。缩松分为宏观缩松和显微缩松。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。

缩松的形成条件是：结晶温度范围宽，铸件呈糊状凝固方式或中间凝固方式。

现以圆柱体铸件为例分析缩松形成的原因与过程，如图 1-7 所示。

如图 1-7a 所示，合金液体充满圆柱形型腔，降温时发生液体收缩，收缩部分可从浇注系统得到补缩。

如图 1-7b 所示，铸件表面有一层先凝固成固体，内部有一个较宽的液相和固相共存凝





固区域。

图 1-7c、d 所示为继续凝固，固体不断长大，直至相互接触。此时合金液体被分割成许多小的封闭区。

图 1-7e 所示为封闭区内液体降温、凝固收缩时得不到补充，而形成多个小且多的孔洞。也就是铸造缺陷——缩松。

图 1-7f 所示为固态收缩。

凝固温度范围大的合金，结晶时为糊状凝固，凝固中树枝状晶体将金属液分隔成彼此孤立的小熔池，凝固时难以得到补缩，形成显微缩松。这种微观缩松很难消除，这也是铸件组织不致密、力学性能差的主要原因。

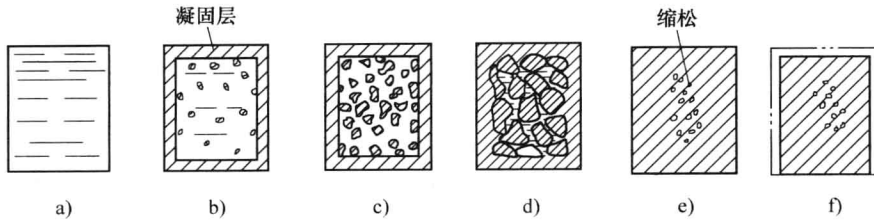


图 1-7 缩松的形成过程

### (3) 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。

防止铸件内部出现缩孔的工艺措施是使铸件实现定向凝固。所谓定向凝固（也称顺序凝固），就是在铸件上可能出现缩孔的厚大部位安放冒口，在远离冒口的部位安放冷铁，使铸件上远离冒口的部位先凝固，靠近冒口的部位后凝固，冒口本身最后凝固，如图 1-8 所示。定向凝固使铸件先凝固部位的收缩，由后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，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。冷铁的作用是加快铸件局部的冷却速度，实现铸件的定向凝固。

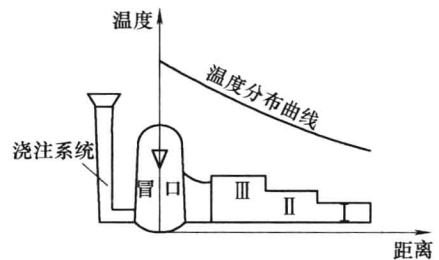


图 1-8 顺序凝固

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，为实现定向凝固，往往要采用多个冒口，并配合冷铁同时使用。如图 1-9 所示，阀体铸件断面上有五个热节，其底部凸台处热节安放冒口后不易切除，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，其余四个热节，分别由四个冒口（顶部明冒口及侧面暗冒口）对铸件断面上四个热节分别进行补缩，实现了定向凝固。如果没有按照定向凝固方向凝固的话，如图 1-10a 所示，就会在轮辐的厚大处产生缩孔，也就失去了冒口的意义。若将冒口改为补贴到铸钢件的结构上使其按照定向凝固的方向加厚铸件直到冒口处（图 1-10b），则缩孔产生于冒口处，消除了铸件中的缩孔。

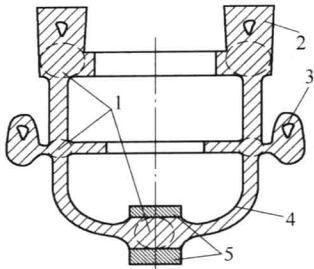


图 1-9 阀体铸件的顺序凝固

1—热节 2—明冒口 3—暗冒口 4—铸件 5—外冷铁

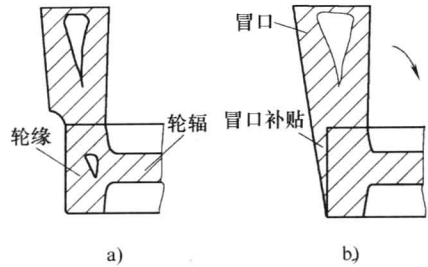


图 1-10 铸钢件冒口的补贴

2) 缩松的防止。缩松对铸件承载能力的影响比集中缩孔要小,但它数量之多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液压缸、阀体等承压铸件,必须采取工艺措施防止缩松。然而,防止缩松要比防止缩孔困难得多,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,由于发达的树枝状晶体堵塞了补缩通道,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,以加大铸件的冷却速度来减小结晶温度范围;加大结晶压力,以破碎树枝状晶体,减小其对金属液流动的阻力,从而达到部分防止缩松的目的。

#### 4. 铸造应力、变形和裂纹

铸件在凝固末期,其固态收缩若受到阻碍,铸件内部将产生内应力。这些内应力有时是在冷却过程中暂存的,有时则一直保留到室温,前者称为临时应力,后者称为残留应力。铸造应力是铸件产生变形和裂纹的根本原因。

(1) 铸造应力的分类 铸造应力按产生的原因不同,分为热应力和收缩应力两种。热应力主要是来自铸件本身的相互作用力,收缩应力主要是来自外界砂箱和型芯对铸件的反作用力。

1) 热应力。由于铸件壁厚不均,在凝固和冷却过程中,各部位由于收缩受到热阻碍而引起的。落砂后热应力仍存在于铸件内,是一种残留铸造应力。

为了分析热应力的形成过程,首先应了解固态金属从高温冷却到室温应力状态的变化。固态金属在弹-塑性临界温度  $T_{\text{临}}$  (钢和铸铁的  $T_{\text{临}} = 620 \sim 650^{\circ}\text{C}$ ) 以上处于塑性状态,在临界温度以下呈弹性状态。在应力作用下通过发生塑性变形,可自行消除其内应力,而在外力作用下,产生弹性变形后应力依然存在。

现以图 1-11 所示的应力框铸件来说明热应力的形成过程。应力框是由同一铸件不同结构中的长度相等的一根粗杆 I 和两根细杆 II 以及上、下横梁铸造而成的。图 1-11 所示上部表示了杆 I 和杆 II 的冷却温度曲线,由于杆 I 和杆 II 截面厚度不同,冷却速度不同造成冷却温度曲线不同。

第一阶段 ( $T_0 \sim T_1$ ) 铸件处于高温阶段,两杆均处于塑性状态,尽管杆 I 和杆 II 的冷却速度不同,收缩不一致要产生应力,但铸件可以通过两杆的塑性变形使应力很快自行消失。

第二阶段 ( $T_1 \sim T_2$ ) 此时杆 II 温度较低,已进入弹性状态,但杆 I 仍处于塑性状态。杆 II 由于冷却快,收缩大于杆 I,在横杆作用下将对杆 I 产生压应力,如图 1-11b 所示。处于塑性状态的杆 I 受压应力作用产生压缩塑性变形,使杆 I、杆 II 的收缩一致,应力随之消





失,如图 1-11c 所示。

第三阶段 ( $T_2 \sim T_3$ ) 当进一步冷却到更低温度时,杆 I 和杆 II 均进入弹性状态,此时杆 I 温度较高,冷却时还将产生较大收缩,杆 II 温度较低,收缩已趋停止,在最后阶段冷却时,杆 I 的收缩将受到杆 II 强烈阻碍,因此杆 I 受拉(拉应力用 + 表示),杆 II 受压(压应力用 - 表示),并保留到室温,形成了残留应力,如图 1-11d 所示。

由以上分析可以得出如下结论:

① 热应力的特点是,铸件冷却慢的部位(厚壁部位或心部)受拉伸——拉应力,冷却快的部位(薄壁部位或表层)受压缩——压应力。

② 铸件的壁厚差别越大,合金的线收缩率或弹性模量越大,热应力越大。顺序凝固时,由于铸件各部分冷却速度不一致产生较大的热应力,铸件容易出现变形和裂纹。

2) 收缩应力(又称机械应力)。铸件在固态收缩时,因受到铸型、型芯、浇冒口、砂箱等外力的阻碍而产生的应力称收缩应力。一般铸件冷却到弹性状态后,收缩受阻才会产生收缩应力。而且收缩应力常表现为拉应力或切应力,其大小取决于铸型及型芯的退让性,形成应力的原因一经消除(如铸件落砂或去除浇口后),收缩应力也就随之消失。所以收缩应力是一种临时应力。但是,在落砂前,如果铸件的收缩应力与热应力(特别是在厚壁处)共同作用,其瞬间内应力大于铸件的抗拉强度时,铸件会产生裂纹。图 1-12 所示为铸件产生收缩应力的示意图。

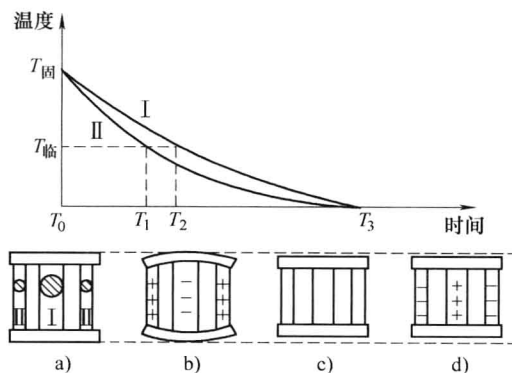
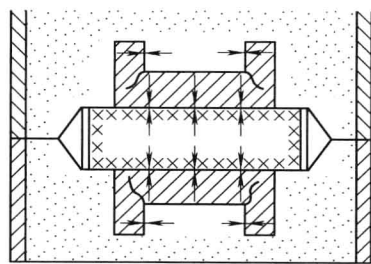


图 1-11 收缩应力



+ 表示拉应力; - 表示压应力

图 1-12, 热应力的形成

## (2) 减少和消除铸造应力的措施

1) 合理地设计铸件结构。铸件形状越复杂,各部分壁厚相差越大,冷却时温度越不均匀,铸造应力越大。因此,在设计铸件时应尽量使铸件形状简单、对称、壁厚均匀。

2) 尽量选用线收缩率小、弹性模量小的合金。

3) 采取同时凝固的工艺。所谓同时凝固,是指采取一定的工艺措施,使铸件各部位无温差或温差尽量小,各部位几乎同时进行凝固,如图 1-13 所示。

铸件如按同时凝固原则凝固,各部分温差较小,不易产生热应力 and 热裂,铸件变形较小。同时凝固时不必设置冒口,工艺简单,节约金属。但同时凝固的铸件中

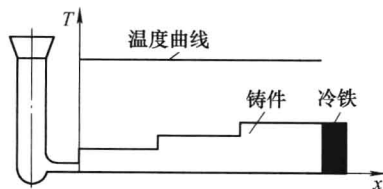


图 1-13 铸件同时凝固原则