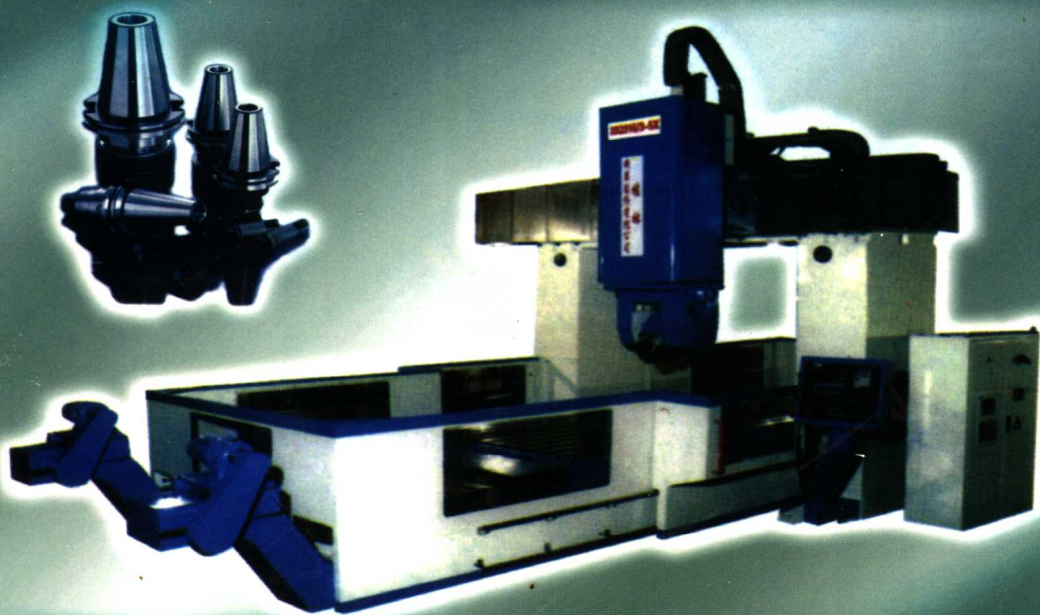


“工程材料及机械制造基础”系列教材

材料成形工艺基础

主 编 汤歆则
副主编 周增文 吴安如



中南大学出版社

“工程材料及机械制造基础”系列教材

材料成形工艺基础

主 编 汤猷则
副主编 周增文
吴安如

中南大学出版社

材料成形工艺基础

主编 汤猷则

责任编辑 谭平

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路 邮编:410083

发行科电话:0731-8876770 传真:0731-8710482

电子邮件:csucbs @ public. cs. hn. cn

经 销 湖南省新华书店

印 装 长沙市华中印刷厂

开 本 787×960 1/16 印张 16.25 字数 293千字

版 次 2003年6月第1版 2003年6月第1次印刷

书 号 ISBN 7-81061-739-7/TB·019

定 价 21.00元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内 容 提 要

本书是湖南省高等教育学会金工教学委员会组织编写的“工程材料及机械制造基础”系列教材之一。它是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》为指导进行编写的。

本书内容包括铸造成形、锻压成形、焊接成形、粉末冶金成形、非金属材料与复合材料的成形、快速原型制造技术、材料成形方法的选择等。它涉及了机械制造生产过程中除切削加工成形以外的大部分工程材料的成形方法与工艺。每节后附有适量的练习题。

本书在编写过程中认真总结了金工课程建设与教学改革的经验，在精选传统成形技术内容的基础上，还增加了现代工业制造工程中应用的新材料、新技术和新工艺。特别注重介绍了当前材料成形技术的新进展及发展趋势。

本书是高等工科院校机械工程类专业的教材，同时也可供高等工科院校近机类专业、高等职业技术学院、电视大学、函授大学、职工大学师生选用，也可作为相关工程技术人员的参考书。各使用学校可以根据教学计划和教学条件，对书中内容有所取舍。

《工程材料及机械制造基础》系列教材编写委员会

主任委员 胡昭如

副主任委员 刘舜尧

委 员 (以姓氏笔画为序)

刘舜尧 刘培德 朱起凡

何少平 陈永泰 张亮峰

汤猷则 郑哲文 周继伟

周增文 杨瑾珪 胡昭如

钟世金 贺小涛

序 言

湖南省高等教育学会金工教学委员会在总结本地区多年课程教学改革经验的基础上,认真吸取与借鉴国内兄弟院校的教学改革成果,组织一批经验丰富的骨干教师,几历艰辛,成功编写了8本一套《工程材料及机械制造基础》的系列教材。该套教材囊括了课堂教学、工程实践教学和教学指导三部分必备的内容,注重扩充制造领域的新材料、新技术和新工艺,重视零件设计的结构工艺性;使之既符合目前金工系列课程改革的发展方向,又体现了湖南地区高校课程改革的基本特色。

金工系列课程虽然属于工艺性技术基础课程的范畴,但在大学实现其整体教育目标中所起的作用,并不亚于任何一门其他重要课程。这是因为:

1. 它包含讲课、实习和实验三部分完整内涵,是工艺理论与工艺实践高度结合的课程,尤其是“实践”这一必须经历的重要过程,正是我国高校学生所普遍缺乏的。

2. 工程训练中心所提供的大工程背景和严格按照教学规划所实施的全面训练,使其不只是为后续课程打基础的一般性业务课程,而是全面贯彻落实素质教育综合性课程。

3. 工艺课程体现出很强的综合性。任何一个小的工艺问题,都必然涉及一系列相关的边界问题。因此,工艺问题的解决,实际上总是可以转化为类似于对一个多元方程求优化解,在解决问题的思维方法上可以给学生以启迪。

4. 设计创新与工艺创新是相互关联和密切联系的。事实上,工艺创新愈深入,设计创新就愈活跃。真正懂得工艺的人,才能更好地实施设计创新。在这里,零件的结构工艺性只是体现其中的一个方面,工艺方法本身的不停顿创新则显得更为重要。国内外的专家学者目前对此问题的看法已经基本趋于一致。

5. 当今的高等教育,旨在培养出一大批基础宽、能力强和素质高的复合性人才。从未来社会的发展趋势看,人文社会学科的学生应该具备一些工程技术方面的知识和经历;同样,理工学科的学生也应该具备更好的人文素质。金工系列课程中的工程训练则可以为实现这种交叉和融合提供一个良好的界面。

6. 要高质量、高效率地实现预定的教学目标,在教学中应该合理、适度地采用已经日趋成熟的现代教育技术。

7. 通过改革后的金工系列课程的教学过程,来实施新的课程教学目标:学习工艺知识,增强工程实践能力,提高综合素质,培养创新精神和创新能力。从全国金工同仁的实践看,这一目标是完全可以实现的。

教育部副部长吕福源同志于2000年11月在上海举办的“第一届国际机械工程学术会议”开幕式上的致辞中提出:“中国是一个拥有12亿人口的发展中国家,机械工程不仅影响和制约着国民经济其他工业的发展,而且还直接影响广大人民的衣、食、住、行和信息交流……大力发展高新技术,用高新技术改造传统制造业和其他产业,将设计创新与工艺创新紧密地结合起来,将是‘十五’期间我国机械工业发展的重要特点。”

工艺系列课程的重要性已经不容置疑,中南大学出版社出版的这套系列教材应时而出,期待它为培养新世纪的高质量人才作出新的贡献。

清华大学 傅水根

*傅水根:清华大学教授,国家教育部《工程材料及机械制造基础》课程教学指导组组长。

前 言

本书是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，在认真吸取国内兄弟院校教学改革和课程建设的基础上，结合编者多年的教学实践和教学经验而编写的。

《材料成形工艺基础》是研究金属和非金属工程材料成形工艺的重要技术基础课程。机械制造工程训练与金工实验是重要的实践教学环节。特别是在培养学生的工程意识、创新意识、运用规范的工程语言和解决工程实际问题的能力方面，该课程具有其他课程难以替代的重要作用。多年来它之所以成为各学科共同的技术基础课，究其原因是因为它涉及材料、材料加工工程和机械制造等多个学科的基础，而这些基础又是各学科培养有工程实践能力的高技术人才所必需的。

制造技术是指将原材料进行加工或再加工，以及对零部件进行装配的技术的总称。在世界发达国家，不但拥有先进的制造技术，而且制造业占据十分重要的位置，均为各国国民经济的支柱产业。目前，高新技术大量应用于制造业而形成先进制造技术。先进制造技术，就是传统制造技术不断吸收机械、电子、信息、能源及现代化管理领域的新成果，将其综合运用于产品设计、制造、检测、管理和售后服务全过程的技术。

材料应用与材料成形技术是机械制造生产过程中的重要组成部分。材料的选用与成形技术是密切相关的。材料只有经过各种加工，包括材料的成形、切削加工、改性处理、连接等，最后形成产品，才能体现其功能和价值。随着科学技术的飞速发展，以金属材料为主要加工对象的机械制造技术已发生了根本性的变化，金属在现代制造业中所占的比重日益下降，各种新材料所占的比重越来越大。材料成形技术已不再是仅仅涉及金属材料的成形，而是涉及各种不同工程材料的成形。因此，拓宽制造成形技术基础的研究领域，建设好以现代工程材料成形工艺为基础的课程，是适应当前工程教育和现代制造技术发展的必然趋势。

社会主义市场经济的发展对高等教育的人才培养提出了新的要求，既要注重培养学生获取知识的能力，更要注重学生全面素质的提高。基于这一原因，

本书以材料成分、成形工艺、结构、性能、应用为主线，系统阐述了材料成形工艺的基本原理、基本知识和工程应用三个层次的内容。在体系上，精选传统金属工艺学内容，增加先进制造技术及其工艺方法。在内容上突出材料成形的理论基础，强化综合分析与应用，增加了在制造业中普遍应用的新材料，增加了计算机应用等多方面的新工艺和新技术。在选材及选择成形方法方面安排了许多实例，给学生以一定的启发。还加强了质量、成本、环保、竞争意识教育。各章之后均附有练习题，以利于学生复习与扩展知识能力。书中还插入了部分英语常用制造工程专业术语词汇，以帮助学生学习科技外语。

全书采用法定计量单位。专业名词术语均采用最新国家标准和行业标准，插图采用计算机绘制。

本书由汤馥则任主编，周增文、吴安如任副主编。书中各部分内容分别由汤馥则（前言，第1、2、5章）、吴安如（第3章）、钟世金（第4章）、周增文（第6章）、何少平（第7章）编写。

本书由中南大学刘舜尧教授主审。他对本书的编写提出了许多宝贵的、建设性的意见，在此谨表示衷心的感谢。

本书是湖南省高等教育学会金工教学委员会组织编写的《工程材料及机械制造基础》系列教材之一。在编写出版过程中得到了湖南省教育厅和学会有关专家的指导和帮助。在本书的编写中，参考并引用了许多有关教材、手册、学术杂志上的文献资料，借鉴了兄弟院校和同行专家的教学改革成果。值此本书出版之际，特向以上专家、教授表示诚挚的感谢！

由于编者水平所限，加之时间仓促，书中的错误和不妥之处，恳请广大读者和师生指正。

目 录

| | |
|------------------------|-------|
| 1 铸造成形 | (1) |
| 1.1 金属液态成形工艺基础 | (1) |
| 1.2 砂型铸造 | (14) |
| 1.3 特种铸造 | (30) |
| 1.4 常用合金铸件的生产 | (41) |
| 1.5 铸件结构设计 | (64) |
| 1.6 液态成形新工艺、新技术 | (71) |
| 2 锻压成形 | (76) |
| 2.1 金属塑性变形基础 | (77) |
| 2.2 自由锻造 | (88) |
| 2.3 模型锻造 | (95) |
| 2.4 板料冲压 | (106) |
| 2.5 其他塑性成形方法 | (119) |
| 3 焊接成形 | (127) |
| 3.1 焊接的基本原理 | (127) |
| 3.2 常用电弧焊方法 | (135) |
| 3.3 其他焊接方法 | (147) |
| 3.4 常用金属材料的焊接 | (159) |
| 3.5 焊接件的结构工艺性 | (166) |
| 4 粉末冶金成形 | (174) |
| 4.1 粉末冶金工艺过程 | (174) |
| 4.2 粉末冶金制品的结构工艺性 | (180) |

| | | |
|----------|----------------------------|--------------|
| 4.3 | 粉末冶金新技术、新工艺 | (183) |
| 5 | 非金属材料与复合材料的成形 | (186) |
| 5.1 | 工程塑料及其成形 | (186) |
| 5.2 | 橡胶及其成形 | (205) |
| 5.3 | 胶粘剂及粘结成形工艺 | (210) |
| 5.4 | 工业陶瓷及其成形 | (212) |
| 5.5 | 复合材料及其成形 | (217) |
| 6 | 快速原型制造技术 | (221) |
| 6.1 | 快速原型制造技术的基本原理及应用特点 | (222) |
| 6.2 | 快速原型制造技术典型方法 | (223) |
| 6.3 | 快速原型制造技术展望 | (228) |
| 7 | 材料成形方法的选择 | (230) |
| 7.1 | 材料成形方法选择的基本原则 | (230) |
| 7.2 | 各类成形零件的特点 | (235) |
| 7.3 | 常用零件毛坯的成形方法 | (240) |
| | 英语专业词汇表 | (244) |
| | 主要参考文献 | (248) |

1 铸造成形

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毛坯或零件的方法,称为铸造(metal casting)。它是毛坯或机器零件成形的重要方法之一。

铸造在工业生产中获得了广泛应用,铸件所占的比重相当大。如在机床和内燃机产品中,铸件占总重量的70%~90%,在拖拉机和农用机械中占50%~70%。

铸造过程中,金属材料是在液态下一次成形,因而具有很多优点:

(1)适应性广泛。工业上常用的金属材料如铸铁、碳素钢、合金钢、非铁合金等,均可在液态下成形,特别是对于不宜压力加工或焊接成形的材料,铸造生产方法具有特殊的优势。并且铸件的大小、形状几乎不受限制,质量可从零点几克到数百吨,壁厚可从1mm到1000mm。

(2)可以形成形状复杂的零件。具有复杂内腔的毛坯或零件,如复杂箱体、机床床身、阀体、泵体、缸体等都能成形。

(3)生产成本较低。铸造用原材料大都来源广泛,价格低廉。铸件与最终零件的形状相似,尺寸相近,加工余量小,因而可减少切削加工量。

铸造成形也存在某些缺点。由于铸造涉及的生产工序较多,生产过程中难以精确控制,废品率较高。铸件组织疏松,晶粒粗大,内部常出现缩孔、缩松、气孔、砂眼等缺陷,导致铸件某些力学性能较低。铸件表面粗糙,尺寸精度不高。一般来说铸造工作环境较差,工人劳动强度大。但随着特种铸件方法的发展,铸件质量有了很大的提高,工作环境也有了进一步改善。

从造型方法来分,铸造可分为砂型铸造和特种铸造两大类。

1.1 金属液态成形工艺基础

合金在铸造过程中所表现出来的工艺性能,称为合金的铸造性能(castability),合金的铸造性能主要是指流动性、收缩性、偏析和吸气性等。铸件的质量与合金的铸造性能密切相关,其中流动性和收缩性对铸件的质量影响最大。

1.1.1 合金的流动性和充型能力

1. 流动性

液态合金本身的流动能力,叫做合金的流动性(fluidity),它是合金的主要铸造性能之一。合金的流动性差时,铸件容易产生浇不足、冷隔、气孔和夹杂等缺陷。流动性好的合金,充型能力强,便于浇铸出轮廓清晰、薄而复杂的铸件。有利于液态金属中的气体和非金属夹杂物的上浮,有利于对铸件进行补缩。

液态合金流动性的好坏,通常用螺旋形试样的长度来衡量。如图 1.1 所示,浇出的试样愈长,说明流动性愈好。

表 1.1 列出了常用铸造合金的流动性长度值,其中灰铸铁、硅黄铜的流动性最好,而铸钢最差。

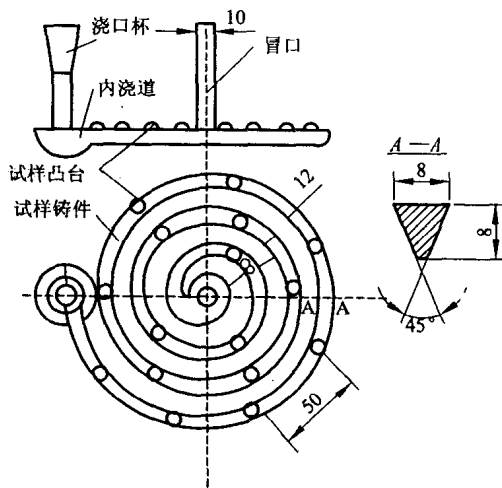


图 1.1 螺旋形金属流动性试样

表 1.1 常用合金的流动性(砂型,试样截面 8mm × 8mm)

| 合金种类 | 铸型种类 | 浇注温度(°C) | 螺旋线长度(mm) | |
|---|----------------------|-----------|-----------|------|
| 铸铁 | $w_{(c+si)} = 6.2\%$ | 砂型 | 1300 | 1800 |
| | $w_{(c+si)} = 5.9\%$ | 砂型 | 1300 | 1300 |
| | $w_{(c+si)} = 5.2\%$ | 砂型 | 1300 | 1000 |
| | $w_{(c+si)} = 4.2\%$ | 砂型 | 1300 | 600 |
| 铸钢 | $w_c = 0.4\%$ | 砂型 | 1600 | 100 |
| | | 砂型 | 1640 | 200 |
| 镁合金(含 Al 和 Zn) | 砂型 | 700 | 400 ~ 600 | |
| 锡青铜($w_{Sn} \approx 10\%$, $w_{Zn} \approx 2\%$) | 砂型 | 1040 | 420 | |
| 硅黄铜($w_{Si} = 1.5\% \sim 4.5\%$) | 砂型 | 1100 | 1000 | |
| 铝硅合金(硅铝明) | 金属型(300°C) | 680 ~ 720 | 700 ~ 800 | |

2. 影响合金流动性的因素

化学成分对合金流动性的影响最为显著。纯金属和共晶成分的合金,由于

是在恒温下进行结晶,液态合金从表层逐渐向中心凝固,固液界面比较光滑,因此对液态合金的流动阻力较小。同时,共晶成分合金的凝固温度最低,可获得较大的过热度,推迟了合金的凝固,故流动性最好。其他成分的合金是在一定温度范围内结晶的,由于初生树枝状晶体与液体金属两相共存,粗糙的固液界面使合金的流动阻力加大,合金的流动性大大下降。

Fe - C 合金的流动性与含碳量之间的关系如图 1.2 所示。由图可见,亚共晶铸铁随含碳量增加,结晶温度区间减小,流动性逐渐提高,越接近共晶成分,合金的流动性愈好。

3. 充型能力

充型能力 (mold - filling capacity) 是指金属液充满铸型型腔,获得轮廓清晰、形状准确的铸件的能力。若充型能力不强,则易产生浇不到、冷隔等缺陷,造成废品。

4. 影响充型能力的因素

合金的充型能力除了受合金本身流动性的影响外,还受到很多工艺因素的影响。

(1) 浇注条件 提高合金的浇注温度和浇注速度,增大静压头的高度都会使合金的充型能力提高。但浇注温度太高,将使合金的收缩量增加,吸气增多,氧化严重,铸件会产生严重的粘砂和胀砂缺陷。因此每种合金都有一定的浇注温度范围。一般铸钢为 1520 ~ 1620℃;铸铁为 1230 ~ 1450℃;铝合金为 680 ~ 780℃。

(2) 铸型 铸型的温度低,热容量大,表示铸型从合金中吸收并储存热量的能力越强。铸型的导热性越好,表示传导热量的能力越强,从而导致合金保持在液态时的时间越短,充型能力下降。当铸型的发气量大、排气能力较低时,合金的流动受到阻碍,会使合金的充型能力下降。浇注系统和铸型的结构越复杂,合金在充型时的阻力越大,充型能力也会下降。

1.1.2 铸件的凝固与收缩

1. 铸件的凝固方式

在铸件的凝固 (solidification) 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

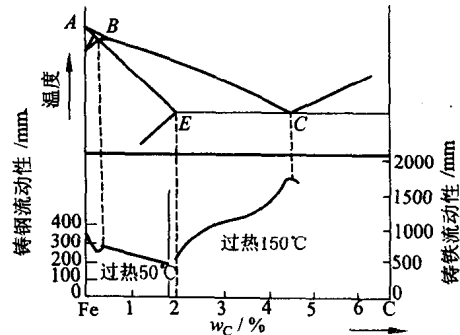


图 1.2 Fe - C 合金的流动性与含碳量的关系

固区的宽窄。铸件的“凝固方式”就是依据凝固区的宽窄[图 1.3(b)中 S]来划分的。

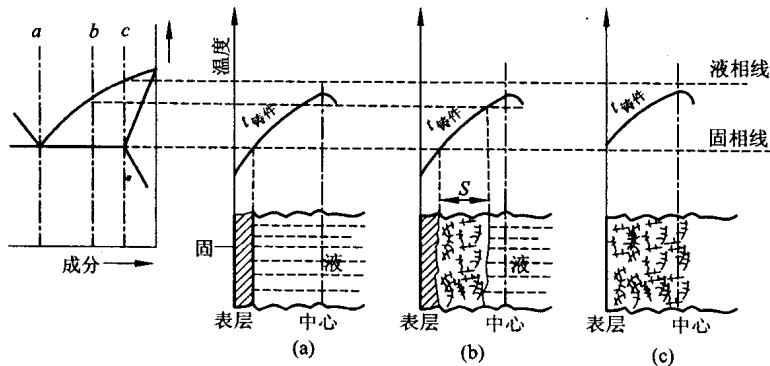


图 1.3 铸件的凝固方式

(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[图 1.3(a)],故断面上外层的固体和内层的液体由一条界限(凝固前沿)清楚地分开。随着温度的下降,固体层不断加厚,液体层不断减少,最后到达铸件的中心,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[图 1.3(c)]。由于这种凝固方式与水泥类似,即先呈糊状而后固化,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[图 1.3(b)],称为中间凝固。

铸件质量与其凝固方式密切相关。一般说来,逐层凝固时,合金的充型能力强,利于防止缩孔和缩松;糊状凝固时,难以获得结晶紧实的铸件。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,为获得紧实铸件常需采用适当的工艺措施,以便补缩或减小其凝固区域。

2. 铸造合金的收缩

液态合金在凝固和冷却过程中,体积和尺寸减小的现象称为液态合金的收

缩(contraction)。收缩是绝大多数合金的物理性质之一。收缩能使铸件产生缩孔、缩松、裂纹、变形和内应力等缺陷,影响铸件质量。为了获得形状和尺寸符合技术要求、组织致密的合格铸件,必须研究合金收缩的规律。

合金的收缩经历如下三个阶段,如图 1.4 所示。

(1)液态收缩。从浇注温度($T_{\text{浇}}$)到凝固开始温度(即液相线温度 T_1)间的收缩。

(2)凝固收缩。从凝固开始温度(T_1)到凝固终止温度(即固相线温度 T_2)间的收缩。

(3)固态收缩。从凝固终止温度(T_2)到室温间的收缩。

合金的收缩率为上述三个阶段收缩率的总和。

因为合金的液态收缩和凝固收缩体现为合金体积的缩减,故常用单位体积收缩量(即体积收缩率)来表示。合金的固态收缩不仅引起体积上的缩减,同时还使铸件在尺寸上缩减,因此常用单位长度上的收缩量(即线收缩率)来表示。

不同合金的收缩率不同。常用合金中,铸钢的收缩率最大,灰铸铁最小。几种铁碳合金的体积收缩率见表 1.2。常用铸造合金的线收缩率见表 1.3。

表 1.2 几种铁碳合金的体积收缩率

| 合金种类 | 含碳量 w_c (%) | 浇注温度 ($^{\circ}\text{C}$) | 液态收缩 φ (%) | 凝固收缩 φ (%) | 固态收缩 φ (%) | 总体积收缩 $\varphi_{\text{总}}$ (%) |
|------|------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 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 |

3. 缩孔和缩松

(1)缩孔和缩松的形成 液态合金在铸型内冷凝过程中,若其液态收缩和凝固收缩所缩减的容积得不到补足时,将在铸件最后凝固的部位形成孔洞。根

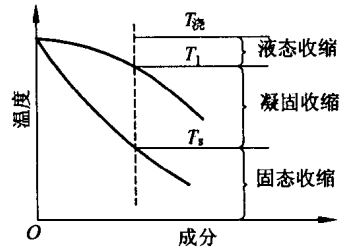


图 1.4 合金收缩的三个阶段

据孔洞的大小和分布,可将其分为缩孔和缩松两类。

缩孔(shrinkage hole)是指集中在铸件上部或最后凝固部位、容积较大的孔洞。缩孔多呈倒圆锥形,内表面粗糙。

缩松(dispersed shrinkage)是指分散在铸件某些区域内的细小缩孔。当缩松和缩孔的容积相同时,缩松的分布面积要比缩孔大得多。

① 缩孔的形成

假设铸件呈逐层凝固,则其形成过程如图 1.5 所示。液态合金充满型腔 [图 1.5(a)] 后,由于铸型的吸热,靠近型腔内表面的金属很快凝固成一层外壳,而内部仍然是高于凝固温度的液体 [图 1.5(b)]。温度继续下降,外壳加厚,内部液体因液态收缩和补充凝固层的凝固收缩,体积缩减,液面下降,使铸件内部出现了空隙 [图 1.5(c)]。至内部完全凝固,在铸件上部形成了缩孔 [图 1.5(d)]。继续冷至室温,整个铸件发生固态收缩,缩孔的绝对体积略有减小 [图 1.5(e)]。

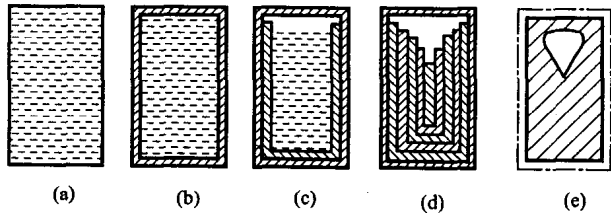


图 1.5 缩孔形成过程示意图

合金的液态收缩和凝固收缩越大,浇注温度越高,铸件的壁越厚,缩孔的容积就越大。

②缩松的形成 主要出现在呈糊状凝固方式的合金中或断面较大的铸件壁中,是被树枝状晶体分隔开的小液体区难以得到补缩所致。缩松大多分布在铸件中心轴线处、热节处、冒口根部、内浇道附近或缩孔下方,如图 1.6 所示。对气密性、力学性能、物理性能或化学性能要求很高的铸件,必须设法减少缩松。

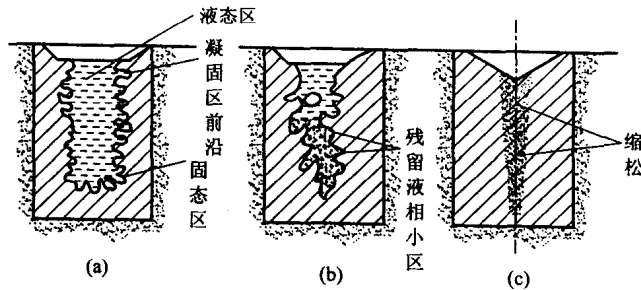


图 1.6 缩松示意图