



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工程材料及机械制造基础 (II)

——热加工工艺基础

(第三版)

清华大学金属工艺学教研室 编
严绍华 主编



高等教育出版社
Higher Education Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工程材料及机械制造基础(Ⅱ) ——热加工工艺基础

Gongcheng Cailiao ji Jixie Zhizao Jichu(Ⅱ)
——Rejiagong Gongyi Jichu
(第三版)

清华大学金属工艺学教研室 编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书是在第二版的基础上,吸取了多年来高等工科院校本课程教育教学改革成果和教学经验以及读者对本书的使用意见,依据教育部高等学校机械基础课程教学指导分委员会工程材料及机械制造基础(金工)课指组 2009 年修订的《工程材料及机械制造基础教学基本要求》的精神,并考虑更好地适应新世纪对高等学校工科本科机械类专业人才培养需要而全面修订的。

本次修订在原有基础上进一步更新教学内容,精简传统内容,适度增加热加工新技术、新工艺以及非金属材料成型的内容,力求体现工艺性课程教材的鲜明特色,突出实用性和综合性。本书保持了第二版叙述清晰简练、语言通顺流畅、图文配合紧密的特点,并贯彻在完成金工实习(工程训练)的基础上对课程内容拓宽、加深和应用的原则。

全书共分 7 章,内容包括铸造、金属塑性成形、焊接与切割、非金属材料 and 复合材料的成形、热加工工艺自动化、毛坯选择和金属材料基础知识等。第七章金属材料基础知识的内容是学习铸造、金属塑性成形、焊接与切割的基础,若在学习热加工工艺基础课程之前已学习工程材料课程,则此章可不讲授。

本书可作为高等工科院校机械类专业教材,也可供有关工程技术人员参考。

本书第一版曾获国家教委优秀教材一等奖和教育部科技成果三等奖,第二版为普通高等教育“十五”国家级规划教材,并获评北京市高等教育精品教材。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料及机械制造基础(Ⅱ)——热加工工艺基础
/严绍华主编;清华大学金属工艺学教研室编. —3 版.
—北京:高等教育出版社,2010.5
ISBN 978-7-04-029171-1

I. ①工… II. ①严…②清… III. ①工程材料—高等学校—教材 ②机械制造—高等学校—教材③热加工—工艺学—高等学校—教材 IV. ①TG

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第049701号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	咨询电话	400-810-0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京机工印刷厂		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×960 1/16	版 次	1991 年 5 月第 1 版
印 张	19.75		2010 年 5 月第 3 版
字 数	360 000	印 次	2010 年 5 月第 1 次印刷
		定 价	27.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 29171-00

第三版前言

本书是工程材料及机械制造基础课程(简称金工课程)教材之一。金工课程是研究机器零件常用材料和加工方法(即从选择材料、制造毛坯到加工出零件)的综合性课程,是一门高等工科院校机械类专业必修的技术基础课。在高等工科院校机械类专业人才培养的过程中,金工课程所涉及的工艺理论、工艺方法和基础知识是必不可少的,它是培养从事机械设计和机械制造的工程技术人才的重要基础,也是培养复合型人才和构建多学科知识结构的重要基础。自2004年本书第二版出版以来,我国金工课程改革又取得诸多重要成果,金工教师在多年的教学实践中积累了新的教学经验。为进一步适应高等工科院校机械类专业教学对该课程的需求,特对原教材进行修订。

本次修订体现以下特点:

1. 符合我国高等工科院校机械类专业人才的培养目标,以及教育部高等学校机械基础课程教学指导分委员会工程材料及机械制造基础(金工)课指组2009年修订的《工程材料及机械制造基础课程教学基本要求》的精神,体现多年来本课程的教学改革成果和教学经验。

2. 总结近年来本课程深化教学改革的实践经验,在第二版的基础上进一步更新教学内容,精简传统内容,适度增加热加工新技术、新工艺以及非金属材料成形的内容,以适应现代机械制造技术的发展。

3. 不仅注重学生获取知识、分析问题与解决工程技术实际问题能力的培养,而且力求体现对学生工程素质与创新思维能力的培养。

4. 体现工艺性课程教材的鲜明特色,引入部分新的有实用价值的工艺设计图表资料,突出实用性与综合性。教材中名词术语和计量单位均采用最新国家标准和行业标准。

5. 注重与机械类金工实习(工程训练)教材的分工配合,体现课程内容在金工实习基础上贯彻“拓宽、加深、应用”的原则。

6. 保持第二版叙述清晰简练、语言通顺流畅、图文密切配合的特点。考虑部分高校工程材料课程设置在本课程之后,本书附加了第七章金属材料基础知识,作为学习铸造、金属塑性成形、焊接与切割的基础,若在学习热加工工艺基础课程之前已学习工程材料课程,则此章可不讲授。

本书由清华大学金属工艺学教研室组织修订,严绍华担任主编,参加第三版

修订工作的教师有:易又南(第一章)、李家枢(第二、六章)、龚国尚(第三章)、汤彬(第四章)、李双寿(第五章)、严绍华(第七章)。

本书由天津大学陈金水教授、四川大学刘胜青教授审阅,他们对本书提出了不少宝贵的意见,在此谨表示衷心的感谢。

本书修订过程中参考了部分国内外有关教材和科技文献,在此特向有关作者和单位表示深切的谢意。

由于编者水平所限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2009年11月

目 录

第一章 铸造	1
第一节 概述	1
第二节 金属的液态成形	2
一、铸件的凝固	2
二、液态合金的充型能力	4
三、铸件的收缩	6
四、铸造应力、铸件变形和裂纹	10
五、铸件中的气体	14
六、合金铸造性能的概念	15
第三节 砂型和砂芯的制造	15
一、手工造型	15
二、机器造型	16
三、机器造芯	21
第四节 砂型铸件的结构工艺性	22
一、铸造工艺对铸件结构的要求	22
二、合金铸造性能对铸件结构的要求	24
第五节 砂型铸造工艺方案的确定	27
一、浇注位置的确定	27
二、分型面的选择	28
三、铸造工艺参数的确定	30
四、型芯设计	32
五、铸造工艺图的绘制	33
第六节 常用合金铸件生产	35
一、铸铁件生产	35
二、铸钢件生产	46
三、有色合金铸件生产	48
第七节 特种铸造	52
一、熔模铸造	52
二、金属型铸造	54
三、压力铸造	55
四、离心铸造	57
五、消失模铸造	58

第八节 各种铸造方法比较	60
复习思考题	62
第二章 金属塑性成形	66
第一节 概述	66
第二节 金属塑性成形原理	67
一、金属塑性变形的实质	67
二、塑性变形对金属组织与性能的影响	69
三、金属的塑性成形性能	73
第三节 常用锻造方法	74
一、自由锻	74
二、模锻	82
三、胎模锻	92
第四节 板料冲压	93
一、板料冲压的特点与应用	93
二、冲裁	94
三、弯曲	96
四、拉深	98
五、其他冲压工序	100
六、典型冲压件工艺实例	102
第五节 其他塑性成形方法	103
一、轧制成形	103
二、挤压成形	106
三、径向锻造	107
四、精密模锻	108
五、精密冲裁	110
六、液态模锻	111
七、粉末锻造	112
八、超塑性成形	114
九、高速高能成形	115
复习思考题	117
第三章 焊接与切割	120
第一节 概述	120
第二节 常用焊接与切割方法	123
一、焊条电弧焊	123
二、埋弧焊	127
三、气体保护电弧焊	130
四、等离子弧焊接与切割	134

五、电阻焊	136
六、摩擦焊	140
七、钎焊	141
第三节 现代焊接与切割方法	143
一、电子束焊	144
二、激光焊接与切割	146
三、扩散焊	148
第四节 常用金属材料的焊接	150
一、金属焊接性	150
二、碳钢的焊接	151
三、低合金钢的焊接	152
四、奥氏体不锈钢的焊接	154
五、铸铁的焊补	155
六、有色金属的焊接	156
第五节 焊接结构工艺性设计	157
一、焊接结构工艺性设计	157
二、焊接结构工艺性设计实例	166
复习思考题	168
第四章 非金属材料 and 复合材料的成形	170
第一节 塑料的成形	170
一、塑料的工艺性能	170
二、塑料的成形	174
第二节 橡胶的成形	187
一、压制成形	188
二、注射成形	189
三、挤出成形	190
四、压铸成形	190
第三节 陶瓷材料的成形	191
一、现代陶瓷制件的生产过程	191
二、现代陶瓷的主要成形方法	192
第四节 复合材料的成形	196
一、复合材料的组成及应用	196
二、树脂基复合材料的成形	197
三、金属基复合材料的成形	200
四、陶瓷基复合材料的成形	201
复习思考题	202
第五章 热加工工艺自动化	203

第一节 快速原型技术	203
一、快速原型技术简介	203
二、快速原型工艺	205
三、快速原型技术的应用	209
第二节 热加工计算机技术	210
一、模拟技术	211
二、专家系统	217
三、热加工 CAD/CAM	220
第三节 热加工自动设备及系统	223
一、工业机器人	223
二、热加工 CNC 系统	232
三、热加工柔性制造系统	235
四、热加工自动生产线	238
复习思考题	243
第六章 毛坯选择	245
第一节 机械零件毛坯类型及其制造方法的比较	245
第二节 机械零件毛坯选择的原则	247
一、适用性原则	247
二、经济性原则	247
三、可行性原则	248
第三节 常用机械零件毛坯的选择	249
一、轴杆类零件	249
二、盘套及饼块类零件	250
三、支架箱体类零件	252
四、毛坯选择实例	252
复习思考题	255
第七章 金属材料基础知识	256
第一节 金属材料的力学性能	256
一、强度与塑性	256
二、硬度	259
三、韧性	261
四、疲劳强度	262
第二节 金属的晶体结构与结晶	263
一、金属的晶体结构	263
二、金属的结晶	264
三、金属的同素异构转变	266
第三节 合金的相结构与相图	267

一、合金的相结构	267
二、二元合金相图的概念	269
第四节 铁碳合金	270
一、铁碳相图	270
二、典型铁碳合金的组织转变	273
三、铁碳相图的应用	278
第五节 钢的热处理	279
一、钢在加热时的组织转变	280
二、钢在冷却时的组织转变	281
三、钢的普通热处理工艺	282
四、钢的表面热处理工艺	285
第六节 常用钢材	288
一、化学成分对碳钢力学性能的影响	288
二、钢的分类、牌号和用途	289
复习思考题	297
参考文献	300

第一章 铸 造

第一节 概 述

铸造是将液态金属浇注到铸型型腔中,待其冷却凝固后,获得一定形状的毛坯或零件的成形方法。铸造获得的产品称为铸件。

铸造的实质是液态金属凝固而成形,因而具有下列特点:
① 可以铸造出内腔、外形很复杂的毛坯,甚至接近零件最终形状。② 工艺灵活性大,几乎各种合金,各种尺寸、形状和质量的铸件都能生产。如铸件质量可由几克到几百吨,壁厚可由 0.3 mm 到 1 m 左右。③ 铸造成本较低。原材料大都来源广泛,价格较低;工艺装备及设备的投资费用较低。这些突出优点使铸造成为制造具有复杂结构零件的最灵活而经济的成形方法,在工业生产中得到广泛的应用。在各类机械产品中,铸件质量占整机质量的比重很大,例如在机床、内燃机、重型机器中为 70% ~ 90%,在风机、压缩机中为 60% ~ 80%,在拖拉机中为 50% ~ 70%。铸造的不足之处是铸件组织较疏松,力学性能较差;铸造工序多,难以精确控制。

砂型铸造适应性广、生产准备简单,是目前最主要的铸造方法。此外,还有各种特种铸造方法,如熔模铸造、金属型铸造、压力铸造、低压铸造、离心铸造、消失模铸造、陶瓷型铸造及壳型铸造等,广泛用于某些特定领域。

我国铸造技术历史悠久,大量历史文物显示着我国古代人民在青铜、铸铁铸造技术上的精湛创造。泥型、金属型和失蜡型是我国创造的三大铸造技术。

近几十年来,我国铸造技术发展迅速。在砂型铸造方面,机器造型技术的不断发展,使得用湿型粘土砂可制出高密度、精确的铸型;快干自硬型砂如树脂砂的不断应用,可制出精确

型芯及铸型,从而获得高精度的铸件。在铸造合金方面,发展了高强度、高韧性的球墨铸铁和各种合金铸铁,使某些锻钢件得以成功地用铸铁件代替。在铸造设备方面,已建立起许多先进的机械化、自动化高密度砂型造型生产线。在新工艺、新技术方面,各种特种铸造或精确铸造方法得到发展和应用。所有这些都使铸件质量和生产效率不断提高,劳动条件不断改善。

第二节 金属的液态成形

铸件在成形过程中主要进行金属液的充填和凝固,同时还伴随收缩、吸气和偏析等现象,这些都将极大地影响铸件质量和铸造工艺的设置。

一、铸件的凝固

合金从液态转变为固态的过程称为凝固。凝固时,合金液中原子由无序排列逐渐成为规则排列的固态晶体,又称为一次结晶。了解凝固过程的规律对于防止缩孔、缩松、热裂等铸造缺陷,获得优质铸件有十分重要的意义。

1. 铸件的温度场

在凝固和冷却的过程中,铸件横断面上的温度分布状况称为铸件的温度场,一般以温度分布曲线来表示。如图 1-1b 所示,纵坐标表示温度,横坐标表示断面上某点至铸件表面的距离(即铸件壁厚)。当型壁四周的散热条件相同时,横

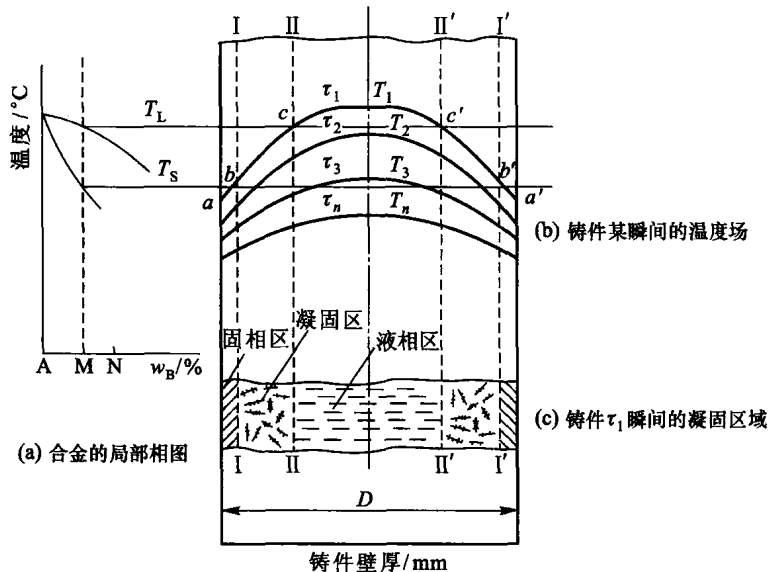


图 1-1 铸件的温度场及 τ_1 瞬间的凝固区域

断面上铸件表面的温度低,中心温度高,在某一瞬间(τ_1)的温度分布曲线(T_1)对于断面中心线是对称的。铸件的温度场是随时间变化而变化的,在随后的 τ_2 , $\tau_3, \dots, \tau_n$ 等瞬间,温度场不断下移,如 $T_2, T_3, \dots, T_n$ 。温度场的变化速率称温度梯度,即温度分布曲线的斜率,反映铸件的冷却速度。

2. 铸件的凝固区域

铸件在凝固过程中断面上一般都存在三个区域:液相区、凝固区和固相区。图1-1c所示为根据铸件断面温度场 T_1 确定的 τ_1 瞬间的凝固区域。图1-1a是相图的一部分,合金M的液相点为 T_L (凝固开始温度),固相点为 T_S (凝固结束温度),其结晶温度范围为 $T_L \sim T_S$ 。 τ_1 时刻,铸件断面温度场 T_1 上的 b 及 b' 点的温度到达 T_S ,铸件上从I-I和I'-I'等温线至表面的区域内,合金温度低于 T_S 的均凝固为固体,此区域称为固相区;与 c 和 c' 点对应的II-II和II'-II'线至中心线的区域,温度高于 T_L ,合金仍处于液态,称为液相区;而 bc 线与 $b'c'$ 线所对应的区域,温度在 $T_L \sim T_S$ 的范围内,此区内合金处于液相和固相共存状态,称为凝固区。三个区域宽度随温度的下降不断变化,液相区逐渐缩小、凝固区不断向中心推进,固相区逐步扩大,直至占据铸件整个断面。

3. 铸件的凝固方式

铸件的凝固方式即铸件断面上的凝固特征,主要取决于凝固区的宽度,可分为以下三种类型:

(1) 逐层凝固方式

图1-2a所示为纯金属和共晶成分合金的凝固情况。如图1-1a中的合金A,在恒温下结晶,凝固温度范围 $T_L - T_S = 0$,即铸件凝固区的宽度为零。 τ_1 时刻铸件断面上只有固相区和液相区,固、液相之间界限分明;此后随着温度的不断

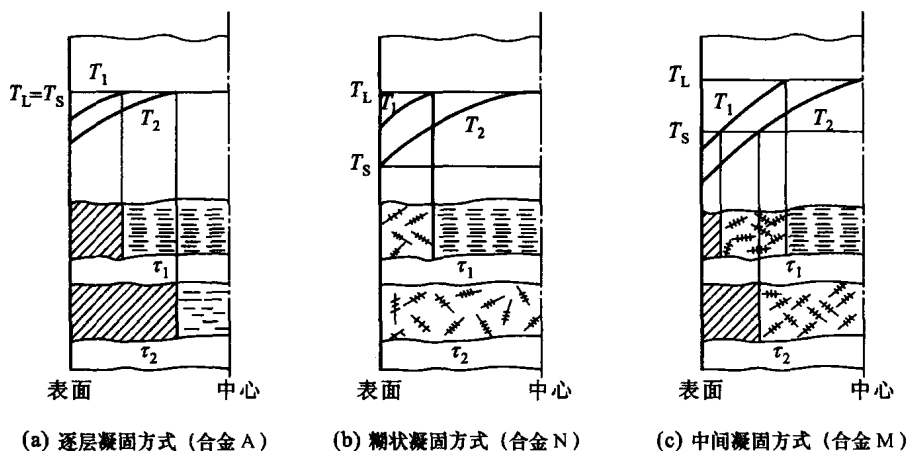


图1-2 铸件的凝固方式

降低,固相区不断加厚,直至铸件中心。这种无凝固区,固相区由表面向中心,层层发展的凝固特征称为逐层凝固方式。如果合金的结晶温度范围很小,铸件断面的凝固区域很窄,也属于逐层凝固方式。

(2) 糊状凝固方式

如图 1-2b 所示,如果合金结晶温度范围 $T_L \sim T_S$ 很宽(图 1-1a 中的合金 N), τ_1 时刻,铸件表面至内部有一较宽的区域温度在 $T_L \sim T_S$ 内,断面上为宽凝固区和液相区; τ_2 时刻,整个断面温度仍在 $T_L \sim T_S$ 内为凝固区; τ_2 时刻以后,表层温度逐渐低于 T_S ,开始结壳为固相。这种凝固区很宽甚至贯穿整个铸件断面,表层温度高于凝固终止温度 T_S 的凝固特征称为糊状凝固方式。

(3) 中间凝固方式

对于很多中等凝固温度范围的合金(如图 1-1a 中的合金 M),铸件断面上的凝固区域宽度介于前两者之间,凝固初期类似逐层凝固,但凝固区域较宽,并迅速扩展至中心(图 1-2c),凝固后期类似糊状凝固,称为中间凝固方式。

铸件的凝固方式除了与合金的结晶温度范围有关外,还与铸件断面温度场的温度梯度有关。如结晶温度范围宽的高碳钢一般是糊状凝固方式,但在金属型中凝固时,温度梯度很大,铸件冷却很快,可成为中间凝固方式,甚至变为逐层凝固方式。而共晶成分的灰铸铁通常呈逐层凝固方式,但当壁厚很大、温度场的温度梯度很小(温度曲线平缓、铸件冷却速度缓慢)时,可变为中间凝固或糊状凝固方式。

二、液态合金的充型能力

液态合金充满型腔,获得形状完整、轮廓清晰的铸件的能力称为充型能力。浇不到、冷隔、砂眼及气孔等缺陷都是在充型不利的情况下产生的。而充型能力强的合金液,有利于对铸件的凝固收缩进行补充。

影响液态合金的充型能力的因素主要有:

1. 合金的流动性

合金的流动性是指合金本身的流动能力,它直接影响合金的充型能力。流动性可用金属液在流动性试样铸型内流动的最大长度来表示(图 1-3)。

合金的化学成分是影响合金流动性的主要因素。图 1-4a 所示的纯金属和共晶合金具有逐层凝固方式,在铸件壁的断面上固、液相界面平滑,对液流阻力小,使前端的液体流动距离 L_f 长,合金流动性好,充型能力强。

对于宽结晶温度范围的合金,呈糊状凝固方式(图 1-4b),在液流前端较早出现液、固共存凝固区,固态小晶体不断增加,使金属液流速下降,较早停止流动,流动距离 L_f 变短,合金的流动性变差。合金结晶温度范围越宽,凝固区就越

宽,小晶体越多,金属液越早停止流动,充型能力越差。

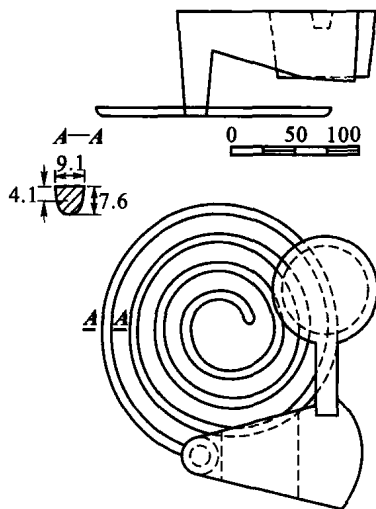


图 1-3 流动性试样

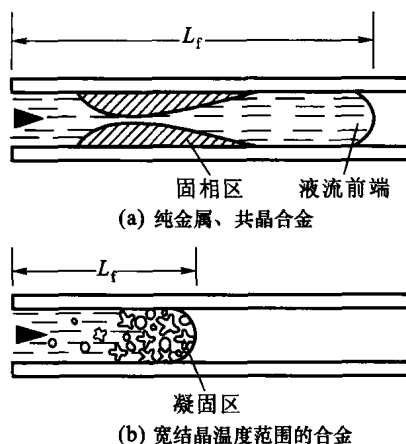


图 1-4 不同成分合金的流动性

图 1-5 所示为铁碳合金的流动性与相图的关系。图中表明,碳钢随着碳含量、一次结晶温度范围的增加,流动性变差;亚共晶铸铁随碳含量的增加,流动性变好。表 1-1 列出一些常用铸造合金的流动性,其中铸铁和硅黄铜的流动性最好,铸钢最差。

2. 铸型和浇注条件

金属铸型的导热速度比砂型大,故液态合金在金属型中的充型能力比在砂型中差;若砂型含水分过多、排气不好,浇注时会产生大量气体,增加对金属液流动的阻力,也使合金的充型能力变差。

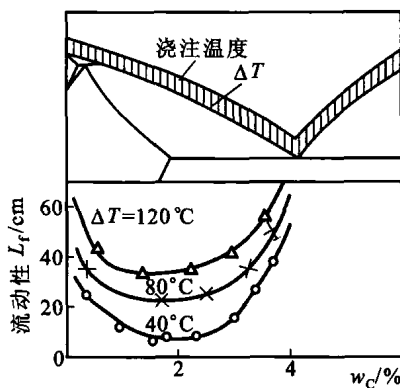


图 1-5 铁碳合金的流动性与相图的关系

通常,浇注温度愈高,合金的充型能力愈好(见图 1-5 中曲线,过热度 ΔT 愈高,流动性愈好)。但浇注温度愈高,液态合金收缩愈大、吸气愈多、氧化愈严重,充型能力就会降低。一般铸钢合适的浇注温度为 $1520 \sim 1620^\circ\text{C}$,铸铁为 $1230 \sim 1450^\circ\text{C}$,铝合金为 $680 \sim 780^\circ\text{C}$ 。此外,提高金属液的压头可使充型能力增强(如增加直浇口高度、采用压力铸造和真空吸铸等方法)。

3. 铸件结构条件

铸件结构常用铸件模数(折算厚度)衡量之,它是以铸件体积和散热表面积之比(cm)来表示的。铸件模数大,表示型腔散热表面积小,合金液的充型能力

较强;模数越小,散热表面积越大,越不易充满型腔。因此,在设计铸件结构时,铸件的壁厚应大于规定的最小允许壁厚值(表 1-2)。

表 1-1 常用合金的流动性(砂型;试样截面 8 mm × 8 mm)

合金种类	铸型种类	浇注温度 $T/^\circ\text{C}$	螺旋线长度 L_t/mm
铸铁 $w_{\text{C}} + w_{\text{Si}} = 5.9\%$	砂型	1 300	1 300
$w_{\text{C}} + w_{\text{Si}} = 4.2\%$	砂型	1 300	600
铸钢 $w_{\text{C}} = 0.4\%$	砂型	1 640	200
铝硅合金	金属型(300 $^\circ\text{C}$)	680 ~ 720	700 ~ 800
锡青铜($w_{\text{Sn}} \approx 10\%$, $w_{\text{Zn}} \approx 2\%$)	砂型	1 040	420
硅黄铜($w_{\text{Si}} = 1.5\% \sim 4.5\%$)	砂型	1 100	1 000

表 1-2 砂型铸件最小允许壁厚

mm

铸件轮廓尺寸	碳素铸钢	灰铸铁	球墨铸铁	可锻铸铁	铝合金	黄铜
< 200	5	3 ~ 4	3 ~ 4	2.5 ~ 4.5	3 ~ 5	6 ~ 7
200 ~ 400	6	4 ~ 5	4 ~ 5	4 ~ 5.5	5 ~ 6	7
400 ~ 800	8	5 ~ 6	8 ~ 10	5 ~ 8	6 ~ 8	8

三、铸件的收缩

1. 合金的收缩

合金液浇入铸型后,在液态、凝固态和固态冷却过程中所发生的体积减小现象称为收缩。合金的收缩特性是以单位体积或长度的收缩量,即收缩率 $\varepsilon(\%)$ 来表示的。收缩是缩孔、缩松、应力、变形、热裂和冷裂等缺陷产生的基本原因。

合金的收缩可分为三个阶段:

1) 液态收缩 指合金液由浇注温度 $T_{\text{浇}}$ 冷却至液相线温度 T_L 期间的体积收缩。液态收缩仅表现为型腔内液面的降低,可以从浇注系统中获得液体补充。

2) 凝固收缩 指合金从凝固开始到凝固终止温度($T_L \sim T_S$)之间的体积收缩。恒温下凝固的合金有确定的凝固体收缩率,仅包括液、固状态转变的收缩,而一般合金的凝固收缩包括液、固状态改变和温度下降两部分收缩。合金凝固收缩若得不到金属液的及时补充,会形成缩孔,缩松等缺陷。

3) 固态收缩 指合金凝固为固体后冷却至室温时所产生的体积收缩。固态体收缩通常表现为合金各方向线尺寸的缩小,常用线收缩率来表示。固态收缩受阻碍时会使铸件产生铸造应力、变形和裂纹等缺陷,并影响铸件尺寸精度和形状准确性。

合金的总体积收缩为上述三个阶段收缩之和。不同成分的铁碳合金收缩率列于表 1-3。

表 1-3 几种合金的自由收缩率

%

合金种类	体收缩率	线收缩率
碳素铸钢	10 ~ 14.5	2.165
白口铸铁	12 ~ 14	2.180
灰铸铁	5 ~ 8	1.082

2. 铸件的收缩

铸件的收缩比合金的收缩复杂得多,当合金成分和温度一定时,铸件的收缩会受到铸型、型芯及本身结构的影响。有实验得出,某铸钢直杆件自由收缩时,测出的线收缩率为 2.4%,若两端加上横杆成为 I 字形,则直杆的自由收缩受到阻碍,测出的线收缩率变成 0.92%。生产中,对尺寸精度要求较高或结构复杂的成批、大量生产的铸件,其线收缩率必须经过多次实测来决定;对单件、小批生产的大型铸件的线收缩率,需根据收缩受阻情况参考类似产品的经验来确定。

3. 缩孔、缩松的形成和防止方法

(1) 缩孔的形成

图 1-6 所示圆柱体铸件呈逐层凝固方式时,形成缩孔的过程如下:

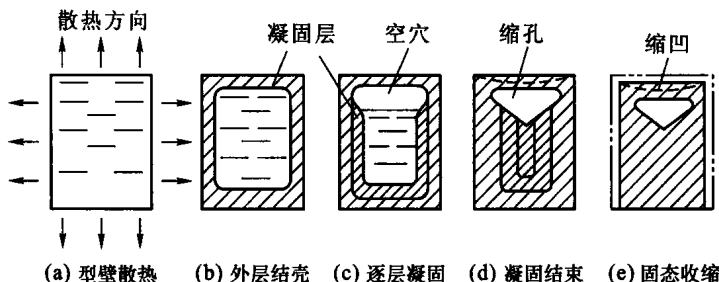


图 1-6 缩孔形成过程示意图

- 1) 液态合金充满型腔,型壁的散热作用使表层液体温度不断下降(图 1-6a);
- 2) 至凝固温度时,铸件外表凝固形成薄壳(图 1-6b);
- 3) 固体外壳不断增厚并发生凝固收缩,内部合金液随温度的下降产生液态收缩,液面下降,铸件顶部出现空穴(图 1-6c);
- 4) 硬壳继续加厚,液面不断下降,直至凝固结束,铸件上部形成倒锥形的空洞,即为缩孔(图 1-6d);
- 5) 继续冷却至室温,铸件外形及缩孔尺寸均有缩小。顶部高温外壳较薄弱时,在大气压力作用下出现凹陷,这是暗缩孔的外部表现形式。当铸型散热方向不均匀、顶面合金液不结壳时,形成明缩孔(图 1-6e)。

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。此外,铸件两