



高等学校“十三五”重点规划
工 程 训 练 系 列

CAILIAO CHENGXING JISHU JICHU

材料成形技术基础

主 编◆赵立红
副主编◆吴 滨 王利民 李 翀
主 审◆任正义



哈尔滨工程大学出版社



高等学校“十三五”重点规划
工 程 训 练 系 列

CAILIAO CHENGXING JISHU JICHU

材料成形技术基础

主 编◆赵立红

副主编◆吴 滨 王利民 李 翀

主 审◆任正义

常州大学图书馆
藏书章

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书的内容主要包括:铸造成形技术、塑性成形技术、焊接成形技术、陶瓷及粉末冶金成形技术、高分子材料成形技术和复合材料成形技术。几乎涉及了机械制造生产过程中除机械加工以外所有的工程材料成形技术。每章附有一定数量的复习思考题。尤其值得一提的是,本书在介绍传统成形技术的同时,着意介绍了国内外材料成形技术方面的新进展及新动向。

本书可作为高等工科院校机械类专业学生学习本课程的通用教材,也可供高校近机类专业、高等工业专科学校、职业大学、电大师生及有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形技术基础/赵立红主编. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社, 2018.2
ISBN 978 - 7 - 5661 - 1799 - 1

I. ①材… II. ①赵… III. ①工程材料—成型
IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 004084 号

选题策划 张 玲
责任编辑 马佳佳
封面设计 博鑫设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区南通大街 145 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印刷有限公司
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 13
字 数 340 千字
版 次 2018 年 2 月第 1 版
印 次 2018 年 2 月第 1 次印刷
定 价 32.00 元
<http://www.hrbeupress.com>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

本书内容是根据国家教育部机械基础课程教学指导委员会、工程材料及机械制造基础课程指导组《工程材料及机械制造基础等系列课程指导改革》的精神,基于《工程材料与机械制造基础课程知识体系和能力要求》,参考各高校教学改革的有益经验,汲取了国内外众多优秀学者的智慧,融入了丰富的工程经验,结合工程训练中心运行模式及其发展趋势,由具有多年工程实践经历及教学改革经验的教师编写而成。

本书在继承前版教材特点的基础上,对传统内容做了大量的压缩、调整及精选,以材料成形工艺方法的过程、特点、应用范围为主线,在分析零件结构工艺性、选择成形工艺方法及制定零件成形工艺过程中培养学生具备基本的分析与解决工程技术实际问题的能力。本书的内容实践性强,插图丰富、规范且图文并茂,名词术语和计量单位采用最新国家标准和行业标准。本书在坚持以常规成形工艺为主的同时,增加了工程材料成形的新方法、新工艺及新技术的内容,反映材料成形领域当今最新科技成果及发展动态。本书保持工程实践性课程教材的特色,使学生在对本课程基本内容的同时开阔视野,激发学生勇于探索、乐于创新的欲望,以适应学科发展需求,成长为专业知识丰富、解决问题能力强、综合素质高的工程技术人员。

参加本书编写工作的有:吴滨(第1章)、赵立红(第2章)、王利民(第3章)、李翀(第4章、第5章和第6章)。全书由赵立红主编和统稿,任正义主审。

本书在编写过程中,参阅了国内外相关资料、文献和教材;一些老师也对本书的编写提供了宝贵的意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在错误或疏漏之处,恳请专家和读者批评指正。

编 者

2018年1月

目 录

第1章 铸造成形技术	1
1.1 铸件形成理论基础	2
1.2 常用合金的铸造性能	18
1.3 铸造方法	23
1.4 砂型铸造工艺设计	41
1.5 铸件结构工艺性	55
复习思考题	66
第2章 塑性成形技术	70
2.1 金属塑性成形理论基础	70
2.2 金属塑性成形方法	80
2.3 锻造工艺设计	101
2.4 锻件结构工艺性	110
2.5 冲压件结构工艺性	113
复习思考题	116
第3章 焊接成形技术	118
3.1 焊接理论基础	118
3.2 常用焊接方法	129
3.3 材料的焊接性	143
3.4 焊接结构工艺设计	151
3.5 焊接工艺设计实例	161
复习思考题	163
第4章 陶瓷及粉末冶金成形技术	165
4.1 陶瓷及粉末冶金成形工艺过程	165
4.2 粉末的制取	165
4.3 粉末的性能	166
4.4 粉末的预处理	167
4.5 粉末的成形	167
4.6 粉末烧结	175
4.7 后处理	176
复习思考题	177

第 5 章 高分子材料成形技术..... 178

5.1 高分子材料成形理论基础 178

5.2 塑料成形工艺 181

5.3 橡胶的成形工艺 187

复习思考题..... 190

第 6 章 复合材料成形技术..... 191

6.1 聚合物基复合材料成形 191

6.2 金属基复合材料成形 193

6.3 陶瓷基复合材料成形 197

复习思考题..... 199

参考文献 200

第1章 铸造成形技术

铸造是制造机器零件毛坯的主要成形方法之一。作为区别于其他成形方法的基本特点,铸造是一种液态金属成形的方法,即将金属熔化后,使其具有流动性,然后浇入具有一定形状的型腔的铸型中,液态金属在重力场或外力场(压力、离心力、电磁力、振动惯性力、真空等)的作用下充满型腔,冷却并凝固成具有型腔形状的铸件。

对于尺寸精度和表面粗糙度要求不高的零件,铸件可以不经过机械加工直接使用。但对于大多数有装配要求的铸件,还需要进行机械加工才能使用。随着少余量和无余量铸造方法的发展,有许多种铸件无须机械加工即可满足对零件精度和粗糙度的要求。铸造具有下列优点。

(1)能够制造形状复杂的铸件,其不仅可以有复杂的外形,而且可以有复杂形状的内腔,这是其他金属成形方法极难办到的。如机床床身、箱体、机架、机座、阀体、泵体、叶轮、气缸体、船用螺旋桨等。

(2)工艺适应性强,铸件质量、大小、形状及所用合金种类几乎不受限制。如,铸件质量可小至几克,大至数百吨;壁厚可从0.5 mm至1 m多;长度可由几毫米至十几米;所用材料可以是铸铁、铸钢(碳钢、合金钢)及有色金属(铝、铜、镁、锌、钛及其合金等)。

(3)所用的大部分原材料来源广、价格低,而且铸件的形状和尺寸与零件非常接近,因而节约金属,减少了后续加工费用。铸造生产中产生的金属废料、铸件废品以及各种外来废钢和金属切屑等,均可回炉重熔加以利用。

(4)铸造生产既能适应单件小批生产,也能适应成批大量生产。

由于铸造生产工艺的特点是液态成形,因此存在一些不足。如用同样金属材料制造的铸件,其力学性能不如锻件;铸造工序繁多,且难以精确控制,故铸件质量有时会不够稳定,铸件在浇注、凝固和固态冷却过程中常常会产生一些缺陷,如晶粒粗大、缩孔、气孔、夹渣,或是劳动条件较差等。随着相关科学技术的发展,这些问题正在逐步得到解决。

铸造是一门古老而年轻的学科,我国古代劳动人民在铸造方面的成就是辉煌的。根据文献记载和实物考察,证明我国铸造生产技术至少有四千年以上的悠久历史,大致可以划分为两个大的发展阶段。第一个发展阶段——前两千年是以青铜铸造为主,发展冶铸技术,形成了灿烂的商周青铜文化,典型的代表文物有商代的司母戊大鼎、六十四件编钟、秦始皇陵出土的大型彩绘铜车马;第二个发展阶段——后两千年是以铸铁生产为主,推动了铸造技术的发展,典型的代表文物有西汉铁铤的球状石墨组织、沧县五代铁狮、山西阳城犁镜、当阳北宋铁塔、明朝永乐大钟等。

在现代工业生产中,铸造方法占有极其重要的地位,为农业、工业、国防、交通和科学研究提供大量必需的机械和设备。例如,汽车、拖拉机、精密机床、精密仪表、飞机、船舶、重型机械等行业大量应用到铸造技术和工艺方法。据统计,在机床、内燃机、重型机器制造中,铸件占总质量的70%~90%,风机、压气机中占总质量的60%~80%,拖拉机中占总质量的

50% ~ 70%, 农业机械中占总质量的 40% ~ 70%, 汽车中占总质量的 20% ~ 30%。

铸造方法种类繁多, 虽然各具特点, 但其本质是相同的, 即为了获得铸件或铸锭, 首先必须熔配出符合化学成分要求的液态金属, 然后使其在铸型中凝固、冷却, 形成铸件。因此, 铸件形成过程对能否获得健全铸件以及铸件的使用性能关系极大。

一般来讲, 在金属制品中, 除了粉末冶金法、电铸法和 3D 打印技术制成的特殊金属制品外, 几乎所有的金属制品都必须经过一次金属熔炼(或熔配)和金属的凝固过程。因此, 铸件的性能以及铸锭经过塑性加工制成的棒材、板材、线材和各种型材的性能, 无疑都受铸件或铸锭最初凝固组织的决定性的影响。

近年来, 随着科学技术和生产的发展, 铸造生产得到长足的发展, 表现为铸造合金、铸造工艺和检测手段等有了极大的进步。新材料、新工艺、新技术、新设备的采用, 尤其是计算机技术的应用, 正迅速地改变着铸造生产的面貌。例如, 利用计算机辅助生产工艺设计分析铸造方法、优化铸造工艺、估算铸造成本、确定设计方案并绘制铸造工艺图等, 将计算机的快速性、准确性与设计人员的思维、综合分析能力结合起来, 从而极大地提高了产品的设计质量和速度, 使铸件的质量和性能有了显著的提高, 铸造的应用范围也日益扩大。

1.1 铸件形成理论基础

铸件形成过程就是液态金属充填铸型, 并在铸型中冷却, 产生一系列结构和性质的变化过程。因此, 铸造过程中合金的行为表现所体现的铸造性能, 对获得优质铸件至关重要。合金的铸造性能, 是指在一定的铸造工艺条件下某种合金获得优质铸件的能力, 即在铸造生产中呈现出的工艺性能, 如充型能力、收缩性、偏析倾向性、氧化性和吸气性等。了解常用合金的铸造性能, 是合理设计铸件结构和正确进行铸造工艺设计的重要条件。

1.1.1 液态金属的充型能力

1. 液态金属的特性

铸造生产中熔化得到的液态金属在熔点以上过热不高(高于熔点 100 ~ 300 °C)。在整个固-液-气三态中, 这种温度的液态靠近于固态而远离气态。

实验表明, 金属的熔化是从晶界开始的, 是原子间结合的局部破坏。熔化后得到的液态金属是由许多近程有序排列的“游动的原子集团”所组成的, 在集团内可看作空位等缺陷较多的固体, 其中原子的排列和结合与原有的固体相似, 但是存在很大的能量起伏和剧烈的热运动。原子集团有大有小, 原子集团间存在空穴。温度越高, 原子集团越小, 游动越快。因此, 液态较固态在物理性质上有一个很大特点, 即液体具有很好的流动性, 只要在重力场的作用下, 其外形就能随容器而变化。

2. 液态金属充型能力及其对铸件质量的影响

熔化金属填充铸型的过程, 简称充型。熔融金属充满铸型, 获得形状完整、尺寸精确、轮廓清晰铸件的能力, 称为液态金属的充型能力。

熔融金属充型过程是铸件形成的第一个阶段。其间存在着液态金属的流动及其与铸

型之间的热交换等一系列物理、化学变化,并伴随着合金的结晶现象,以及型腔中气体的反压力有碍液态金属的顺利填满。因此,充型能力首先取决于液态金属本身的流动能力,即流动性,同时又受外界条件影响,如铸型性质、浇注条件、铸件结构等因素的影响。

液态金属的充型能力越强,越容易获得薄壁而复杂的铸件,越容易获得轮廓清晰的铸件,避免浇不足、冷隔等缺陷;越有利于金属液中气体和非金属夹杂物的上浮、排出,减少气孔、夹渣等缺陷;越能提高补缩能力,减小产生缩孔、缩松的倾向性,以及铸件在凝固末期受阻而出现的热裂得到液态金属的充填而弥合,因此,有利于防止这些缺陷的产生。

3. 影响液态金属的充型能力的因素

(1) 液态金属的流动性

熔融金属的流动能力称为流动性。它是液态金属固有的属性,仅与合金种类、化学成分、结晶特点、杂质含量以及其他物理性质有关。如黏度越小,热容量越大;热导率越小,结晶潜热越大;表面张力越小,流动性越好。

为了比较不同金属的流动性,常用浇注标准螺旋线试样的方法进行测定,如图 1-1 所示。在相同的铸型(一般采用砂型)和浇注条件(如相同的浇注温度或相同的过热温度)下获得的流动性试样长度,即可代表被测金属的流动性。

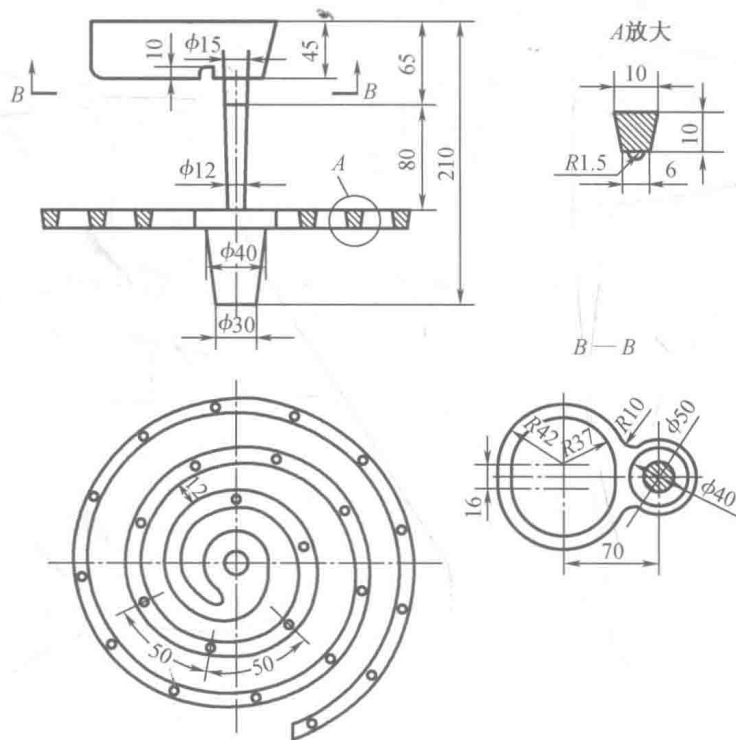


图 1-1 螺旋线试样

决定金属流动性的因素主要有:

① 合金的种类

金属的流动性与合金的熔点、热导率、合金液的黏度等物理性能有关。铸钢熔点比灰铸铁的高,在铸型中散热快、凝固快,因此,流动性相对于铸铁的差。常用铸造合金的流动性数据如表 1-1 所示,其中灰铸铁、硅黄铜最好,铸钢最差。

表 1-1 常用合金流动性

合金种类		铸型	浇注温度/℃	螺旋线试样长度/mm
铸钢	$w(\text{C}) = 0.4\%$	砂型	1 600	100
			1 640	200
灰铸铁	$w(\text{C}, \text{Si}) = 6.2\%$	砂型	1 300	1 800
	$w(\text{C}, \text{Si}) = 5.9\%$		1 300	1 300
	$w(\text{C}, \text{Si}) = 5.2\%$		1 300	1 000
	$w(\text{C}, \text{Si}) = 4.2\%$		1 300	600
锡青铜	$w(\text{Sn}) = 9\% \sim 11\%$	砂型	1 040	420
	$w(\text{Zn}) = 2\% \sim 4\%$		1 040	420
硅黄铜	$w(\text{Si}) = 1.5\% \sim 4.5\%$	砂型	1 100	1 100

对于同一种合金,也可以用流动性试样来考察各种铸造工艺因素的变动对其充型能力的影响。

所得的流动性试样长度是液态金属从浇注开始至停止流动时的时间与流动速度的乘积。所以凡是对以上两个因子有影响的因素都将对流动性(或充型能力)产生影响。

②合金的成分

同种合金中,成分不同的铸造合金具有不同的结晶特点,对流动性的影响就不同。图 1-2 为铅锡合金的流动性与化学成分的关系曲线。纯金属和共晶合金是在恒温下进行结晶的,结晶时从表面向中心逐层凝固。凝固层的表面比较光滑,对尚未凝固的合金的流动阻力小,因此流动性好。特别是共晶合金的熔点最低,因而流动性最好(图 1-3(a));除共晶合金和纯金属以外,其他成分合金的结晶是在一定温度范围内进行的,铸件截面中存在液、固并存的两相区,先产生的树枝状晶体对后续金属液的流动阻力较大,故流动性有所下降(图 1-3(b))。

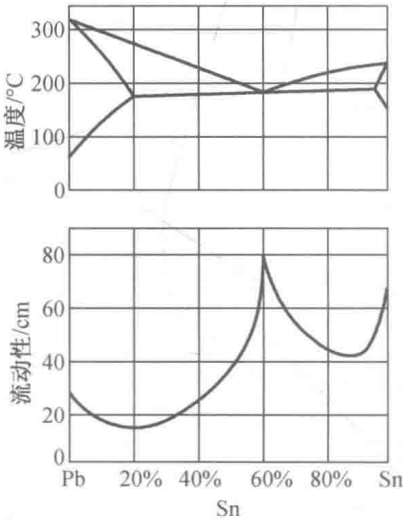


图 1-2 流动性和成分的关系

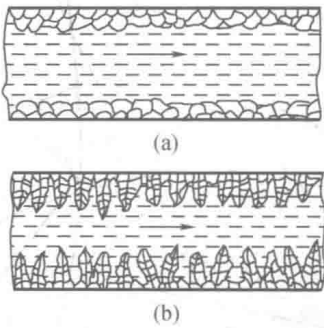


图 1-3 结晶特点对流动性的影响示意图
(a) 共晶成分合金;(b) 非共晶成分合金

③杂质与含气量

熔融合金中出现的固态夹杂物,将使液体合金的黏度增大,导致合金的流动性下降。如灰铁中锰和硫,多以 MnS (熔点 $1\ 650\ ^\circ\text{C}$) 的形式悬浮在铁液中,阻碍铁液的流动,使流动性下降。熔融合金中的含气量越低,合金的流动性越好。

(2) 铸型的条件

熔融合金充型时,铸型的阻力及铸型对合金的冷却作用,都将降低合金的充型能力。

①铸型的蓄热能力。表示铸型从熔融的合金中吸取并存储热量的能力。铸型材料的热导率、比热容和密度越大,其蓄热能力越强,对合金液体的激冷能力就越强,合金液体保持流动的时间就越短,充型能力就越差。例如,金属型铸造比砂型铸造更容易产生浇不足、冷隔等缺陷。

②铸型温度。预热铸型能减小它与合金液体之间的温差,降低换热强度,减缓了合金的冷却速度,延长了合金在铸型中的流动时间,从而提高合金液体的充型能力。例如,在金属型铸造铝合金铸件时,将铸型温度由 $340\ ^\circ\text{C}$ 提高到 $520\ ^\circ\text{C}$,在相同的 $760\ ^\circ\text{C}$ 浇注温度下,螺旋线试样长度由 $525\ \text{mm}$ 增至 $950\ \text{mm}$ 。因此,预热铸型是金属型铸造中必须采取的工艺措施之一。

③铸型中的气体。浇注时因熔融的合金在型腔中的热作用而产生大量气体。若铸型中有一定的发气量,能在合金液体与铸型之间形成气膜,则可以减小流动阻力,有利于充型。但若发气量过大,铸型排气不畅,在型腔内产生气体的反压力,则会阻碍合金液体的流动。因此,为提高型(芯)砂的透气性,在铸型上开设通气孔是十分必要且经常应用的工艺措施。

(3) 浇注条件

①浇注温度。浇注温度对金属液的充型能力有决定性的影响。浇注温度提高,液态合金所含的热量增多,在同样的冷却条件下,保持液态的时间长,可使合金液的黏度下降,则保持流动的时间增长,故充型能力增强;反之,充型能力就会下降。对于薄壁铸件或流动性差的合金,利用提高浇注温度以改善充型能力的措施,在生产中经常采用也比较方便。但是,随着浇注温度的提高,合金的吸气、氧化现象严重,总收缩量增加,反而易产生气孔、缩孔、粘砂等缺陷,铸件结晶组织也变得粗大。因此,原则上说,在保证足够流动性的前提下,应尽可能降低浇注温度。

②充型压力。熔融的合金在流动方向上所受的压力越大,则流速越大,充型能力就越好。砂型铸造时,充型压力是由直浇道的静压力产生的。因此,常采用增加直浇道的高度或人工加压的方法(如压力铸造、低压铸造、离心铸造等)来提高液态合金的充型能力。

(4) 铸件结构

当铸件的壁厚过小,壁厚急剧变化,结构复杂,或有较大的水平面时,会使合金液充型困难。因此,设计铸件结构时,铸件的形状应尽量简单,铸件的壁厚必须大于规定的最小允许壁厚值;有的铸件则需要设计流动通道;有的在大平面上设置肋条。这不仅有利于合金液的顺利充型,也可防止夹砂、变形等缺陷的产生。

1.1.2 铸件的凝固方式及其影响因素

1. 铸件的凝固方式

金属由液态转变为固态的过程称为凝固。

铸件的凝固通常是铸件断面上由外向内进行的,在凝固过程中,除纯金属和共晶成分合金外,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”依据凝固区的宽窄(见图1-4(b)中S)来划分,有如下三类。

(1) 逐层凝固

纯金属或共晶成分合金(例如图1-4中的a成分)在凝固过程中不存在液、固相并存的凝固区(图1-4(a)),故断面上外层的固体和内层的液体由一条界线(凝固前沿)清楚地分开。随着温度的下降,固体层不断加厚,液体层不断变薄,凝固前沿不断向中心推进,直至中心。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(例如图1-4中的c成分),并且铸件内的温度分布曲线(图1-4中的t曲线)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、固相并存的凝固区贯穿整个断面(图1-4(c)),即先呈糊状而后固化,因此,称为糊状凝固。

(3) 中间凝固

大多数合金(例如图1-4中的b成分)的凝固方式介于上述两者之间(图1-4(b)),称为中间凝固。

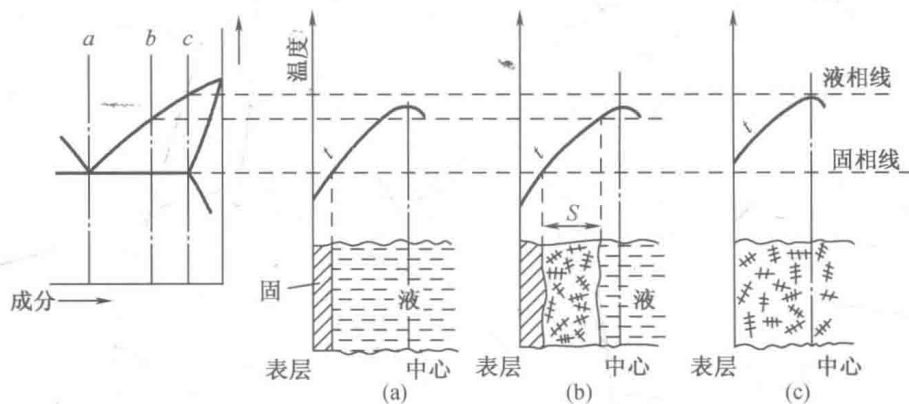


图1-4 铸件的凝固方式

(a) 逐层凝固; (b) 中间凝固; (c) 糊状凝固

2. 影响铸件凝固方式的主要因素

铸件的质量与其凝固方式密切相关。一般来说,逐层凝固有利于合金的充型和补缩,便于防止缩孔和缩松;糊状凝固时,难以获得组织致密的铸件。

(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。例如,砂型铸造时,低

碳钢为逐层凝固;高碳钢因结晶温度范围甚宽,为糊状凝固。

(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1-5所示。若铸件的温度梯度由小变大(图1-5中 $T_1 \rightarrow T_2$),则其对应的凝固区由宽变窄(图1-5中 $S_1 \rightarrow S_2$)。铸件的温度梯度主要取决于:

① 合金的性质。合金的凝固温度越低、导热系数越大、结晶潜热越大,铸件内部温度均匀化能力就越大,温度梯度就越小(如多数铝合金)。

② 铸型的蓄热能力。铸型蓄热系数越大,对铸件的激冷能力就越强,铸件温度梯度就越大。

③ 浇注温度。浇注温度越高,因带入铸型中热量增多,铸件的温度梯度就越小。

④ 铸件的壁厚。铸件壁厚越大,温度梯度就越小。

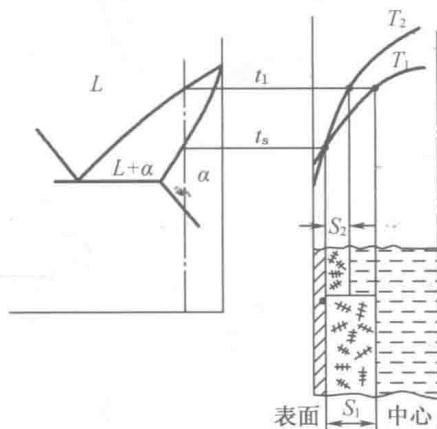


图1-5 温度梯度对凝固区域的影响

综上所述,倾向于逐层凝固的合金,例如灰铸铁、铝硅合金等,便于铸造,应尽量选用;倾向于糊状凝固的合金,例如锡青铜、铝铜合金、球墨铸铁等,铸造质量不易保证,当必须选用这些合金时,应该采取适当的工艺措施,以减小其凝固区域,例如,选用金属型铸造,通过提高铸型的蓄热能力,增强对铸件的激冷能力,使得铸件温度梯度变大,缩小其凝固区间,从而获得组织致密的铸件。

1.1.3 铸件的收缩及其影响因素

铸件在凝固、冷却过程中所发生的体积减小现象称为收缩。收缩是铸造合金本身的物理性质,是铸件中许多缺陷(如缩孔、缩松、裂纹、变形、残余应力等)产生的基本原因。

1. 合金收缩的原理及过程

近于熔点的液态合金的结构是由原子集团和空穴组成的。原子集团内部的原子呈有序排列,但原子间距比固态时大。将液态合金浇入铸型后,温度不断下降,空穴减少,原子间距缩短,合金液的体积要减小。合金液凝固时,空穴消失,原子间距进一步缩短。凝固后继续冷却至室温的过程中,原子间距还要缩短。因此,合金由浇注温度冷却到室温的收缩经历了以下三个阶段,如图1-6所示。

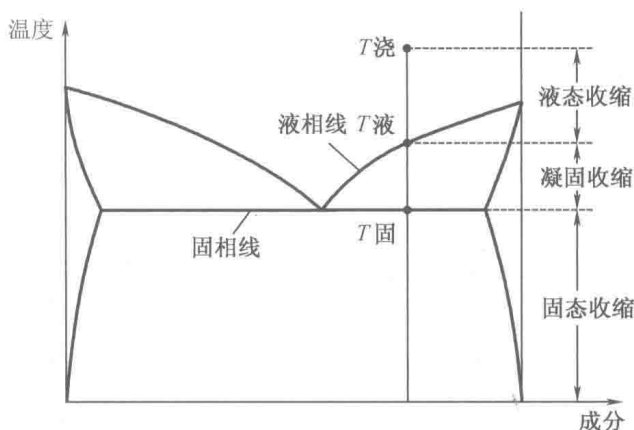


图 1-6 合金收缩的三个阶段

(1) 液态收缩

即从浇注温度到开始凝固的液相线温度之间,合金处于液态下的收缩。它使型腔内液面下降。

(2) 凝固收缩

即从凝固开始温度到凝固终了温度之间,合金处于凝固过程的收缩。在一般情况下,凝固收缩仍主要表现为液面的下降。

(3) 固态收缩

即从凝固终了温度至室温之间,合金处于固态下的收缩。此阶段的收缩表现为铸件线性尺寸的减小。

合金的液态收缩和凝固收缩是铸件产生缩孔、缩松的主要原因;而固态收缩是铸件产生铸造应力、变形、裂纹的根本原因,并直接影响铸件的尺寸精度。

合金从液态到室温的体积改变量称为体收缩,以体收缩率(ε_v)表示;对于合金在固态时的收缩,常需要了解其三维尺寸的改变量,称为线收缩,常以线收缩率(ε_l)表示。体收缩率和线收缩率的表达式为

$$\varepsilon_v = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\% = \alpha_v(t_0 - t_1) \times 100\% \quad (1-1)$$

$$\varepsilon_l = \frac{l_0 - l_1}{l_0} \times 100\% = \alpha_l(t_0 - t_1) \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 V_0, V_1 ——合金在温度 t_0, t_1 时的体积;

l_0, l_1 ——合金在温度 t_0, t_1 时的长度;

α_v, α_l ——合金在 t_0 至 t_1 温度范围内的体收缩系数和线收缩系数。

铸件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。

2. 影响合金收缩的主要因素

(1) 合金的化学成分

不同种类的合金,其收缩率不同;同类合金中,化学成分不同,其收缩率也不同。在铁碳合金中,铸钢和白口铸铁的收缩率大,灰口铸铁的收缩率小。灰口铸铁收缩率小的原因

是其凝固过程中碳大部分是以石墨状态存在的,石墨的比容大,在结晶过程中石墨析出所产生的体积膨胀抵消了合金的部分收缩。表1-2所示为几种铁碳合金的体积收缩率。

表1-2 几种铁碳合金的体积收缩率

合金种类	碳的质量分数	浇注温度/℃	液态收缩率	凝固收缩率	固态收缩率	总体积收缩率
铸造碳钢	0.35%	1 610	1.6%	3%	7.8%	12.46%
白口铸铁	3.00%	1 400	2.4%	4.2%	5.4% ~ 6.3%	12% ~ 12.9%
灰口铸铁	3.50%	1 400	3.5%	0.1%	3.3% ~ 4.2%	6.9% ~ 7.8%

(2) 浇注温度

浇注温度主要影响液态收缩。提高浇注温度,合金的液态收缩量增大。

(3) 铸型条件和铸件结构

铸件的实际收缩与合金的自由收缩不同,它会受到铸型及型芯的阻碍。铸件的结构对收缩也有影响,如果铸件结构复杂及壁厚不均,冷却时各部分相互牵制也会阻碍收缩。

图1-7为不同结构铸件的收缩情况。由图可知,受阻特别大的线收缩率仅为自由收缩时的1/5,故在设计和制造模样时,不应直接采用合金的线收缩率,而应根据铸件收缩的受阻情况,采用实际的收缩率。

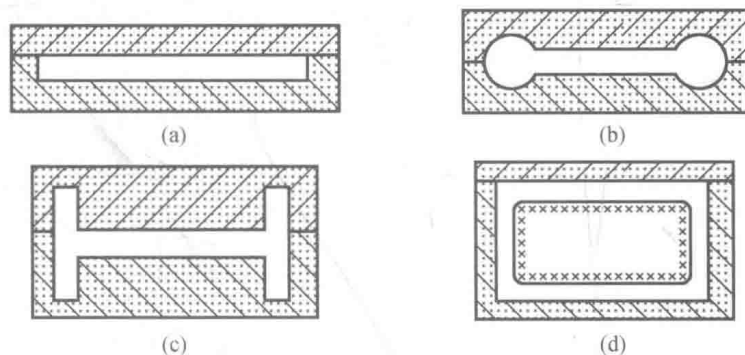


图1-7 不同结构铸件的收缩情况

- (a) 自由线收缩率为2.5%; (b) 受阻较小的线收缩率为1.5%;
(c) 受阻较大的线收缩率为1.0%; (d) 受阻特别大的线收缩率为0.5%

3. 铸件中的缩孔与缩松

铸型内的熔融合金在凝固过程中,如果合金的液态收缩和凝固收缩得不到液态合金的补充,就会在最后凝固的部位形成孔洞。容积大而集中的称为缩孔,细小而分散的称为缩松。

(1) 缩孔的形成

趋向于逐层凝固方式结晶的合金,如纯金属、共晶合金和结晶温度范围窄的合金,易产生集中的缩孔。缩孔的形成如图1-8所示。将液态合金浇入圆柱形型腔中,由于铸型的冷却作用,液态合金的温度逐渐下降,其液态收缩不断进行,但是当内浇口未凝固时,型腔总是充满的(图1-8(a));随着温度的下降,铸件表面凝固成一层硬壳,同时内浇口封闭(图

1-8(b));进一步冷却时,硬壳内的液态金属继续液态收缩,并对形成硬壳时的凝固收缩进行补充,由于液态收缩和凝固收缩远大于硬壳的固态收缩,故液面下降并与壳顶脱离(图1-8(c));依此进行下去,硬壳不断加厚,液面不断下降,待金属全部凝固后,在铸件上部就形成一个倒锥形的缩孔(图1-8(d));在铸件继续冷却至室温时,其体积有所缩小,使缩孔体积也略有减小(图1-8(e))。如果在铸件顶部设置冒口,则缩孔将移到冒口中(图1-8(f))。

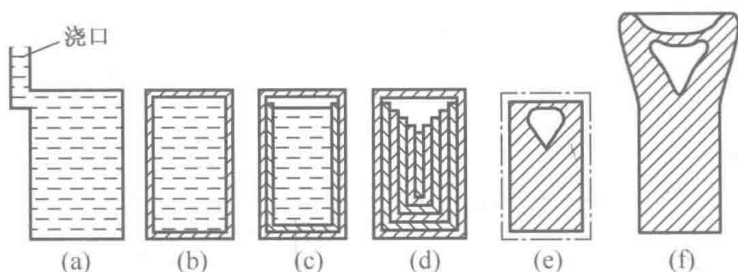


图 1-8 缩孔形成过程示意图

缩孔一般出现在铸件最后凝固的区域,如铸件的上部或中心处、铸件上壁厚较大及内浇口附近等处。

(2) 缩松的形成

缩松的形成也是由于铸件最后凝固区域的收缩未能得到补足;或者因合金呈糊状凝固,被树枝状晶体分隔开的液体小区得不到补缩所致,如图1-9所示。在凝固后的枝晶分叉间就形成许多微小的孔洞。

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见的小孔洞,多分布在铸件中心轴线处或缩孔下方(图1-10)。显微缩松是分布在晶粒之间的微小孔洞,要用显微镜才能看见(图1-11)。这种缩松分布更为广泛,有时遍及整个截面。显微缩松难以完全避免,对于一般铸件多不作为缺陷对待;但对气密性、力学性能、物理性能或化学性能要求很高的铸件,则必须设法减少。

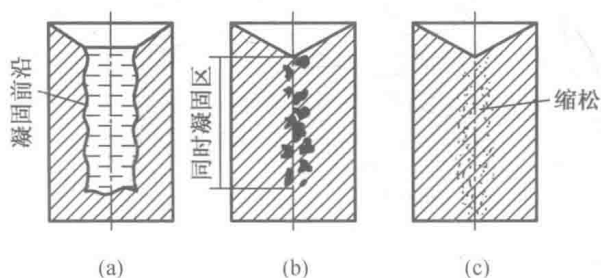


图 1-9 缩松形成示意图

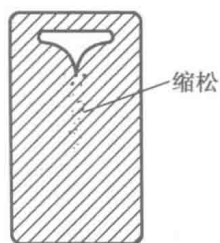


图 1-10 宏观缩松

不同的铸造合金形成缩孔和缩松的倾向不同。逐层凝固合金(纯金属、共晶合金或窄结晶温度范围合金)的缩孔倾向大,缩松倾向小;糊状凝固的合金缩孔倾向虽小,但极易产生缩松。由于采用一些工艺措施可以控制铸件的凝固方式,因此,缩孔和缩松可在一定范围内互相转化。

(3) 缩孔和缩松位置的确定

为了防止缩孔和缩松的产生,必须在制定铸造工艺方案时正确判断它们在铸件中的位置,以便采取必要的工艺措施。

确定缩孔和缩松位置一般采用等温线法或内接圆法。

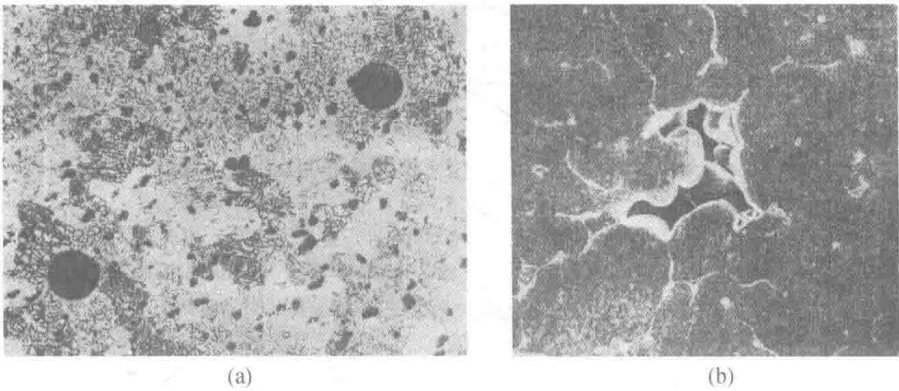


图 1-11 Al-4.5% Cu 合金中的显微缩松

(a) 含气量高时出现的显微缩松和球形孔洞 $\times 30$; (b) 枝晶间的显微缩松 $\times 350$

① 等温线法

此法是根据铸件各部分的散热情况,把同时到达凝固温度的各点连接成等温线,逐层向内绘制,直到最窄的截面上的等温线相互接触为止。这样,就可以确定铸件最后凝固的部位,即缩孔或缩松的位置。图 1-12(a) 所示为用等温线法确定的缩孔位置,图 1-12(b) 所示为铸件上缩孔的实际位置,两者基本上是一致的。

② 内接圆法

此法常用来确定铸件上相交壁处的缩孔位置,如图 1-13(a) 所示。在内接圆直径最大的部分(称为“热节”),有较多的金属积聚,往往最后凝固,容易产生缩孔或缩松(图 1-13(b))。

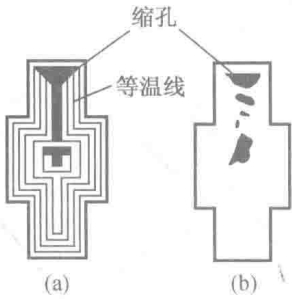


图 1-12 等温线法

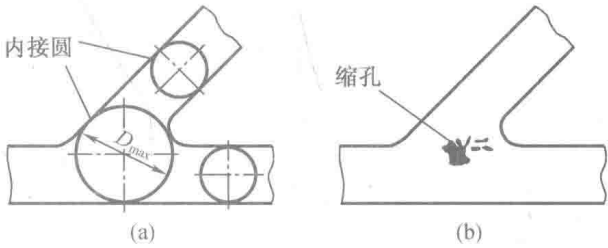


图 1-13 内接圆法

(4) 缩孔和缩松的防止

缩孔和缩松会减小铸件的有效承载面积,并在该处造成应力集中,从而降低力学性能。对于要求气密性的零件,缩孔、缩松还会造成渗漏而严重影响其气密性,所以缩孔和缩松是危害很大的铸造缺陷之一。

① 采取“顺序凝固”的原则

“顺序凝固”原则是指利用各种工艺措施,使铸件从远离冒口的部分到冒口之间建立一