



普通高等院校机械工程学科“十二五”规划教材

材料成形工艺基础

主编 刘斌 副主编 储伟俊

CAILIAO CHENGXING GONGYI JICHU



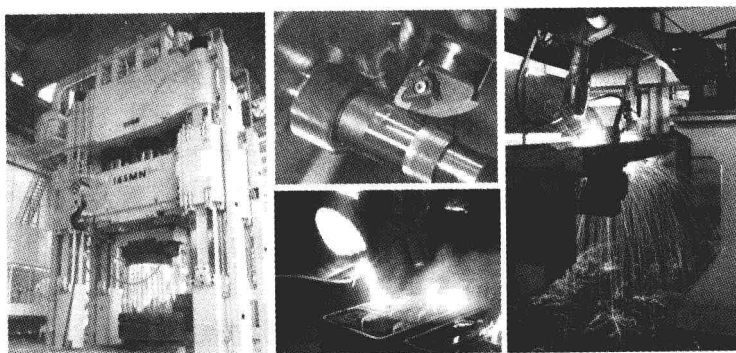
国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等院校机械工程学科“十二五”规划教材

材料成形工艺基础

主编 刘斌 副主编 储伟俊



国防工业出版社

National Defense Industry Press

内 容 简 介

全书分为六章:液态金属凝固成形工艺、金属塑性成形工艺、焊接成形工艺、金属切削成形、精密加工和特种加工、机械加工工艺流程。内容涵盖传统机械制造技术、先进制造工艺技术,体现材料科学和现代信息技术与机械制造技术的联系与融合。注重学生获取知识、分析问题与解决工程技术问题能力的培养,以及学生工程素质与创新思维能力的提高。

本书可作为高等工科院校机械类及近机械类专业的教材,还可作为相关专业工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形工艺基础 / 刘斌主编. —北京:国防
工业出版社,2011.9
普通高等院校机械工程学科“十二五”规划教材
ISBN 978 - 7 - 118 - 07716 - 2

I. ①材… II. ①刘… 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(2011)第 182137 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 12 字数 259 千字
2011 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 25.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

按照高等院校大机械类学科本科专业相关课程教学要求和教学改革指南,结合自身多年的教学经验,将多门课程相关知识进行整合和重组,使之有机地融合在一起,构成优化的课程体系,编写了机械制造基础系列教材——《材料成形工艺基础》、《机械精度设计与检测基础》和《工程训练》,更好地理顺了课程内容之间的衔接,剔除相关课程内容中的重复部分。

本书内容简洁、够用,重点突出,文字表达精炼,配有大量的图形演示、实物照片展示及相关知识的表格,加深对相关知识的理解。每章均附有阅读材料,增加学生学习的兴趣。在介绍传统工艺方法的基础上,紧贴现代机械制造技术的发展,系统介绍了各种成形新工艺、新技术,体现机械制造技术与材料科学、现代信息技术的联系与融合。

本书在内容组织上以“成形理论基础→成形工艺方法→结构工艺性”为主线构建材料成形工艺基础知识体系,做到内容循序渐进,依次展开,符合教学规律和认知规律。每章开头安排有学习目标、要求和重点难点提示,每章末安排有复习思考题,供学生进行复习和综合应用训练。

本书是机械制造基础立体化教材的组成部分,与它配套的有电子课件、网络课程、自主学习系统,包含丰富的例题、习题和综合训练题、模拟试卷、图库和视频资料,可供读者选用,相关课程的网络课程在2009年获得第九届全国多媒体课件大奖赛二等奖。

全书共分6章,由刘斌担任主编,储伟俊担任副主编,许婷、刘安心参与了本教材的编写工作。本书编写时参考了大量的文献资料,在此向文献资料的作者致以诚挚的感谢。

对于本书中存在的疏漏之处,敬请广大读者批评指正。

编 者
2011年7月

目 录

第 1 章	液态金属凝固成形工艺	1
1.1	概述	2
1.2	液态金属凝固成形理论基础	3
1.2.1	液态金属的充型能力	3
1.2.2	金属的凝固与收缩	5
1.2.3	铸造内应力	8
1.2.4	常用铸造合金的铸造性能	9
1.3	液态金属凝固成形工艺方法	10
1.3.1	砂型铸造	10
1.3.2	特种铸造	13
1.4	铸件结构工艺性	20
1.4.1	铸件结构应利于简化铸造工艺	20
1.4.2	铸件结构应利于避免产生铸造缺陷	21
	复习思考题	23
	阅读材料	24
第 2 章	金属塑性成形工艺	29
2.1	概述	30
2.2	金属塑性成形理论基础	31
2.2.1	金属的塑性变形	31
2.2.2	金属的可锻性	34
2.2.3	金属的加热	35
2.3	金属塑性成形加工方法	37
2.3.1	锻造	37
2.3.2	板料冲压	43
2.3.3	金属塑性成形新工艺简介	46
2.4	金属塑性成形结构工艺性	50
2.4.1	锻件的结构工艺性	50
2.4.2	冲压件的结构工艺性	53
	复习思考题	54
	阅读材料	55

第3章	金属焊接成形工艺	57
3.1	概述	58
3.2	焊接成形理论基础	59
3.2.1	焊接的分类	59
3.2.2	电弧焊的冶金过程	59
3.2.3	焊接接头的组织与性能	60
3.2.4	金属材料的焊接性能	62
3.2.5	焊接应力与变形	64
3.3	焊接成形工艺方法	68
3.3.1	熔化焊	68
3.3.2	压力焊	76
3.3.3	钎焊	79
3.4	焊接结构工艺性	80
3.4.1	焊接结构件材料的选择	80
3.4.2	焊接方法的选择	80
3.4.3	焊接接头工艺设计	81
复习思考题		81
阅读材料		82
第4章	金属切削成形工艺	85
4.1	概述	86
4.2	金属切削加工工艺理论基础	88
4.2.1	切削加工的运动分析和切削要素	88
4.2.2	切削刀具	92
4.2.3	切削过程	98
4.3	金属切削加工方法综述	102
4.3.1	车削	102
4.3.2	钻孔、扩孔和铰孔	105
4.3.3	镗削	108
4.3.4	刨削	110
4.3.5	拉削	112
4.3.6	铣削	115
4.3.7	磨削	120
4.4	金属切削加工零件结构工艺性	123
4.4.1	提高零件结构的标准化程度	123
4.4.2	零件结构应便于工件在机床或夹具上安装	124

4.4.3	零件结构应便于工件的加工和测量	125
4.4.4	零件结构应利于提高切削效率和保证加工质量	127
4.4.5	合理采用零件的组合	131
复习思考题	132
阅读材料	133
第5章	精密加工和特种加工	135
5.1	概述	136
5.2	精整和光整加工	136
5.2.1	研磨	137
5.2.2	珩磨	138
5.2.3	超级光磨	140
5.2.4	抛光	142
5.2.5	超精密加工概述	143
5.3	特种加工	145
5.3.1	电火花加工	145
5.3.2	电解加工	147
5.3.3	超声波加工	148
5.3.4	激光加工	150
5.3.5	电子束加工	151
5.3.6	离子束加工	152
复习思考题	153
阅读材料	154
第6章	机械加工工艺过程	157
6.1	概述	158
6.2	机械加工工艺过程的基础知识	159
6.2.1	生产过程和工艺过程	159
6.2.2	机械加工工艺过程的组成	160
6.2.3	生产纲领、生产类型及其工艺特征	163
6.2.4	零件在机床上加工时的安装	164
6.2.5	基准	166
6.3	机械加工工艺规程的制定	170
6.3.1	机械加工工艺规程的概念与格式	170
6.3.2	制定机械加工工艺规程的步骤	174
6.3.3	制定机械加工工艺规程时要解决的主要问题	174

6.4 典型零件的加工工艺.....	176
6.4.1 轴类零件	176
6.4.2 套类零件	177
6.4.3 轮盘类零件	178
6.4.4 箱体类零件	180
复习思考题.....	181
阅读材料.....	181
参考文献	184

第1章

液态金属凝固成形工艺

液态金属凝固成形理论基础

液态金属凝固成形工艺方法

铸件结构工艺性

目的要求

1. 理解液态金属凝固成形的概念和影响铸件质量的工艺因素；
2. 理解砂型铸造、特种铸造方法的工艺过程、特点和应用；
3. 掌握铸件结构合理选择的一般原则。

重点难点

液态金属凝固成形理论基础知识和铸件结构工艺性的合理设计。

1.1 概述

液态金属凝固成形工艺习惯上称为铸造。铸造(casting)通常是将液态金属浇注到与零件的形状、尺寸相适应的铸型型腔中,待其冷却凝固后,以获得毛坯或零件的生产方法。铸造成形工艺具有如下特点:

1. 较强的适应性

① 铸件形状不受限制。最适合制造形状复杂、特别是具有复杂内腔的毛坯,如发动机的缸体、缸盖、曲轴以及变速箱箱体、液压阀阀体、潜艇和军舰的螺旋桨等。

② 铸件质量不受限制。从几克的钟表零件到数百吨的汽轮机缸体、轧钢机机架,都可以铸造。

③ 铸件尺寸不受限制。铸件的壁厚可以为1mm~1m。

④ 铸件材料不受限制。工业上常用的金属材料,如铸铁、碳素钢、合金钢、铝合金、铜合金、锌合金等,都可以用于铸造生产。

2. 良好的经济性

铸造一般不需要昂贵的设备;铸造可以直接利用成本低廉的废机件和切屑;铸件的形状和尺寸接近零件,节省金属材料和切削加工费用,因此铸件的成本低,经济性好。

3. 铸件力学性能较差、质量不够稳定

铸造生产工序多、过程复杂,影响铸件质量的因素多,部分工艺过程难以控制,因此铸件容易产生缺陷,废品率一般较高。铸件内部成分偏析较重,内部组织晶粒粗大,其力学性能一般不如相同材料的锻件好。随着生产技术的不断发展,铸件性能和质量正在进一步提高。

4. 铸造生产条件和环境差

铸造生产过程中,混砂、造型、清砂过程中产生大量的粉尘;熔炼、浇注的温度很高;另外铸造过程中还有大量的烟雾、刺激气体产生;工人的劳动强度很大。

铸造生产中,最常用的工艺方法是砂型铸造,此外还有熔模铸造、金属型铸造、压力

铸造、低压铸造和离心铸造等特种铸造方法。

铸造在机械制造业中占有重要地位。在一般的机械设备中,铸件占机器总重的45%~90%,而铸件成本仅占机器总成本的20%~25%。铸件被广泛应用于国防军工、航空航天、矿山冶金、交通运输工具、石化通用设备、农业机械、建筑机械等领域。

近年来,从制造系统工程的角度出发,铸造技术与自动化、计算机、新能源、新材料等高新技术的结合,以达到净成形或近似净成形为目标,以精化、强化毛坯件为核心,兼顾高效、节能节材、少污染的综合效果,正逐步摆脱传统模式而形成精密成形技术。在铸型材料方面,推广快速硬化的水玻璃砂及各类自硬砂,成功地应用树脂砂快速制造高强度砂型和砂芯。在铸造合金方面,发展了高强度、高韧性的球墨铸铁和各类合金铸铁。在汽车发动机上,成功地应用球墨铸铁曲轴代替锻钢曲轴。在铸造设备方面,已建立起先进的机械化、自动化高压造型生产线。在新技术方面,各种各样的特种铸造、绿色铸造方法得到发展和应用。所有这些都提高了铸件的品质,并且节能节材,生产效率不断提高,生产成本不断降低,劳动条件不断改善,符合我国循环经济发展的需要。随着生产技术的不断发展,目前铸造生产的劳动条件正逐步改善。

1.2 液态金属凝固成形理论基础

铸造生产中,能否获得没有任何缺陷的薄壁铸件、形状复杂的铸件或大尺寸铸件,这完全取决于合金的铸造性能。金属材料的铸造性能是指它在铸造过程中表现出来的工艺性能,如流动性、线收缩率和体收缩率、吸气倾向性、形成裂纹的倾向性、各部位的成分不均匀性(偏析)等。铸件的质量与合金的铸造性能密切相关,合金的铸造性能好,是指熔化时不易氧化,熔液不易吸气,浇注时合金液易充满型腔,凝固时铸件收缩小,且化学成分均匀,冷却时铸件变形和开裂倾向小等。合金的铸造性能好,铸件质量容易保证;合金的铸造性能差,铸件则容易产生缺陷,但只要采取相应的工艺措施,仍可保证铸件的质量。

1.2.1 液态金属的充型能力

液态金属充满铸型型腔,获得形状完整、轮廓清晰的铸件的能力,叫液态金属的充型能力。液态金属的充型能力强,则能浇注出壁薄而形状复杂的铸件;充型能力差,则易产生冷隔、浇不足等缺陷。影响充型能力的因素主要有金属液本身的流动性、铸型性质、浇注条件及铸件结构等。

1 液态金属的流动性

液态金属的流动性是指其本身的流动能力,是金属的固有性质,金属液的流动性越好,充型能力越强。影响流动性的因素很多,但以化学成分的影响最为显著。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,试样长度大,说明流动性好。表1.1列出了常用铸造合金的流动性,其中灰口铸铁和硅黄铜最好,铸钢最差。

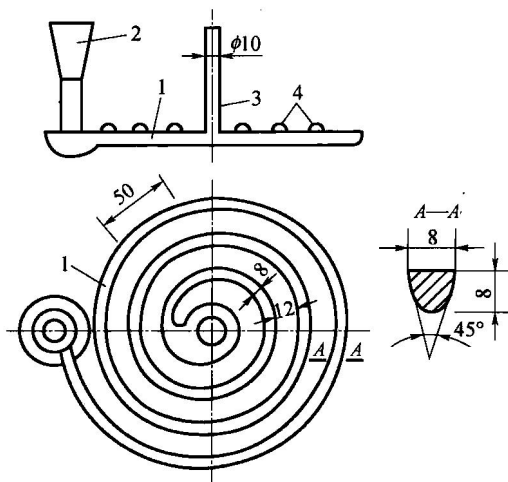


图 1.1 金属流动性试样

1—试样；2—浇口；3—出气口；4—试样凸点。

表 1.1 常用铸造合金流动性

铸造合金种类	造型材料	浇注温度/℃	螺旋线长度/mm
灰铸铁 $w_{(C+Si)} = 6.2\%$ $w_{(C+Si)} = 5.2\%$ $w_{(C+Si)} = 4.2\%$	砂型	1300	1800
铸 钢 $w_{(C)} = 0.4\%$	砂型	1600 1640	100 200
锡青铜 $w_{Sn} = (9\% \sim 11\%)$ $w_{Zn} = (2\% \sim 4\%)$	砂型	1040	420
硅黄铜 $w_{Si} = (1.5\% \sim 4.5\%)$	砂型	1100	1000
铝合金 硅铝明	金属型(300℃)	680 ~ 720	700 ~ 800

纯金属和共晶成分的合金在恒温下结晶,流动性好。共晶成分的合金往往熔点低,保持液态的时间长,其流动性最好。非共晶成分的合金,在一定的温度范围内结晶,流动性差,而且合金的结晶温度范围越大,枝晶越发达,其流动性越差。图 1.2 所示为 Fe - C 合金的流动性与成分的关系。

2. 浇注条件

提高浇注温度,可使液态金属黏度下降,流速加快。还能使铸型温度升高,金属散热速度变慢,从而大大提高金属液的充型能力。但浇注温度过高,容易产生粘砂、缩孔、气孔、粗晶等缺陷。灰铸铁的浇注温度一般为 1250℃ ~ 1350℃,铸钢浇注温度为 1500℃ ~ 1550℃。

液态金属液充型压力越大,充型能力越好。如压力铸造、低压铸造和离心铸造时,因充型压力较砂型铸造提高很多,铸件容易获得精细的轮廓。

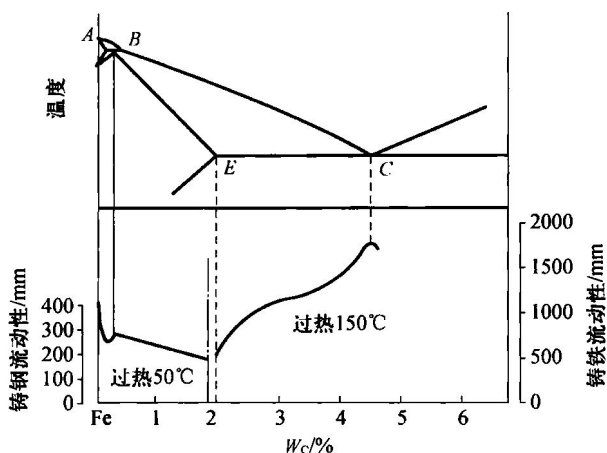


图 1.2 Fe-C 合金流动性与含碳量的关系

3. 铸型条件

液态金属充型时,铸型的型腔结构、表面粗糙度、浇注系统的结构和尺寸,都有可能增加金属液流动阻力,影响合金的流动速度。为改善铸型的充填条件,在设计铸件时必须保证其壁厚不小于规定的“最小壁厚”(见表 1.2),在铸造工艺上也要采取相应的措施。

表 1.2 一般砂型铸造条件下,铸件的最小壁厚

(单位:mm)

铸件尺寸	铸钢	灰铸铁	球墨铸铁	可锻铸件	铝合金	铜合金
<200 × 200	8	4~6	6	5	3	3~5
200 × 200 ~ 500 × 500	10~12	6~10	12	8	4	6~8
>500 × 500	15~20	15~20	—	—	6	—

铸型材料的导热系数和比热容越大,对液态合金的激冷能力越强,合金的充型能力越差,如金属型铸造较砂型铸造容易产生浇不足和冷隔缺陷。

在金属型铸造、压力铸造和熔模铸造时,铸型被预热到数百度,减缓了金属液的冷却速度,使得液态金属的充型能力得到提高。

在铸造时,铸型在高温液态金属的作用下,产生大量的气体,如果铸型的透气性差,型腔内的压力增大,阻碍了液态金属的充型。

1.2.2 金属的凝固与收缩

金属从液态到固态的状态转变为凝固(solidification)或一次结晶(crystallization)。许多常见的铸造缺陷,如缩孔、缩松、热裂、气孔、夹杂、偏析等,都是在凝固过程中产生的,认识铸件的凝固特点对获得优质铸件有着重要意义。

1. 金属的凝固方式

在铸件凝固过程中,其断面上一般存在固相区、凝固区和液相区三个区域,其中凝

固区是液相和固相共存的区域,凝固区的大小对铸件质量影响较大,按照凝固区的宽窄,分为以下三种凝固方式:

1) 逐层凝固

纯金属或共晶成分合金在恒温下结晶,凝固过程中铸件截面上的凝固区域宽度为零,截面上固液两相界面分明,随着温度的下降,固相区不断增大,逐渐到达铸件中心,这种凝固方式称为“逐层凝固”,如图 1.3(a)所示。

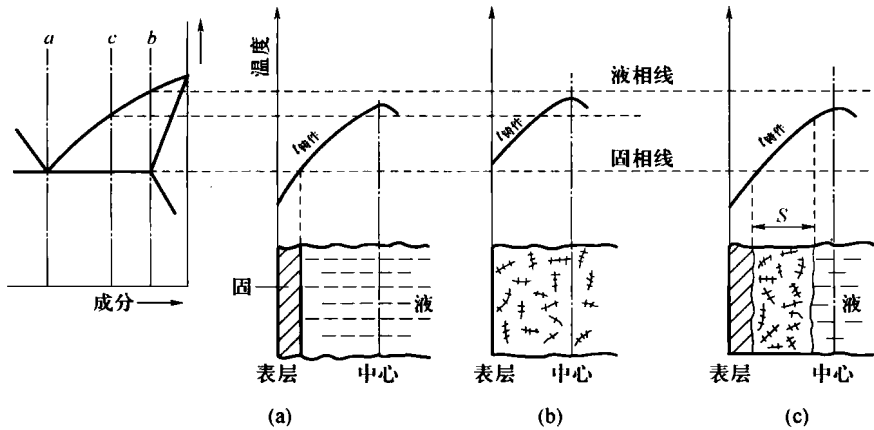


图 1.3 凝固方式

(a) 逐层凝固; (b) 中间凝固; (c) 体积凝固。

2) 中间凝固

金属的结晶温度范围较窄,或结晶温度范围虽宽,但铸件截面温度梯度大,铸件截面上的凝固区域宽度介于逐层凝固与体积凝固之间,称为“中间凝固”方法,如图 1.3(b)所示。

3) 体积凝固

当合金的结晶温度范围很宽,或因铸件截面温度梯度很小,铸件凝固的某段时间内,其液固共存的凝固区域很宽,甚至贯穿整个铸件截面,这种凝固方式称为“体积凝固”(或称糊状凝固),如图 1.3(c)所示。

影响铸件凝固方式的主要因素是合金的结晶温度范围和铸件的温度梯度。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;对于一定成分的合金,结晶温度范围已定,凝固方式取决于铸件截面的温度梯度,温度梯度越大对应的凝固区域越窄,越倾向于逐层凝固,如图 1.4 所示,高温温度梯度条件下的凝固区域的宽度 S_2 小于低温温度梯度条件下的凝固区域的宽度 S_1 。温度梯度又受合金性质、铸型的蓄热能力、浇注温度等因素影响。合金的凝固温度越低、热导率越高、结晶潜热越大,铸件内部温度均匀倾向越大,而铸件的冷却能力下降,铸件温度梯度越小;铸型的蓄热系数大,则激冷能力强,铸件温度梯度大;浇注温度越高,铸型吸热越多,冷却能力降低,铸件温度梯度减小。

凝固方式影响铸件质量。通常,逐层凝固时,合金的充型能力强,产生冷隔、缩孔、浇不足、缩松、热裂等缺陷的倾向小。因此,当采用结晶温度范围宽的合金(如有些有

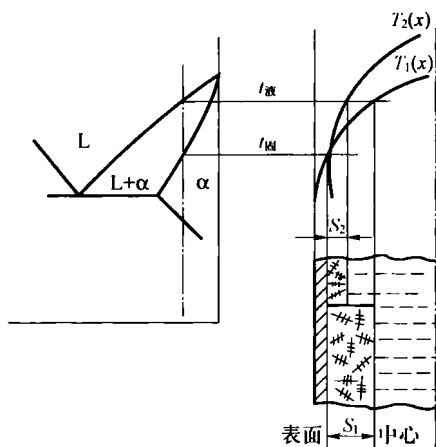


图 1.4 温度梯度对凝固区域的影响

色金属、球墨铸铁等)时,应采取适当的工艺措施,增大铸件截面的温度梯度,减小其凝固区域,防止某些铸造缺陷的产生。

2. 液态金属的收缩性

铸件在冷却过程中,其体积和尺寸缩小的现象叫做收缩(contraction),它是铸造合金固有的物理性质。金属从液态冷却到室温,要经历三个相互联系的收缩阶段:

液态收缩——从浇注温度冷却至凝固开始温度之间的收缩。

凝固收缩——从凝固开始温度冷却至凝固结束温度之间的收缩。

固态收缩——从凝固完毕时的温度冷却至室温之间的收缩。

金属的液态收缩和凝固收缩,表现为合金体积的缩小,使型腔内金属液面下降,通常用体收缩率来表示,它们是铸件产生缩孔(shrinkage hole)和缩松(shrinkage porosity)(见图 1.5、图 1.6)缺陷的根本原因;固态收缩虽然也引起体积的变化,但在铸件的各个方向上都表现出尺寸的减小,对铸件的形状和尺寸精度影响最大,故常用线收缩率来表示,它是铸件产生内应力以至引起变形和产生裂纹的主要原因。表 1.3 列出了几种铁碳合金的体积收缩率。

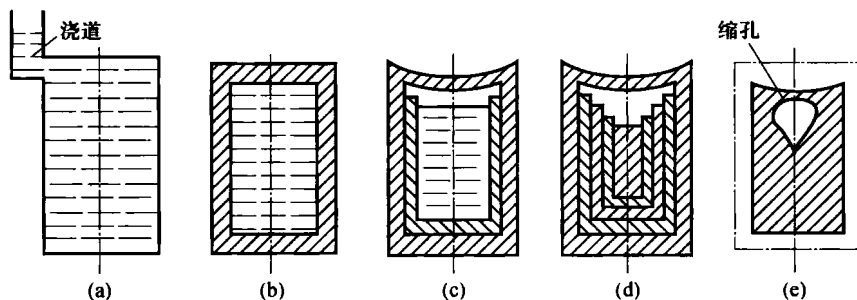


图 1.5 缩孔形成过程

(a) 充满; (b) 形成硬壳; (c) 形成真空; (d) 真空增大; (e) 形成缩孔。

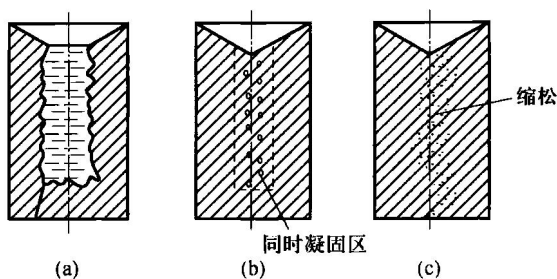


图 1.6 缩松形成过程

(a) 锯齿形凝固前沿；(b) 形成液体小区；(c) 形成缩松。

表 1.3 几种铁碳合金的收缩率

合金种类	$w_C/\%$	浇注温度 / $^{\circ}\text{C}$	液态收缩率 / $\%$	凝固收缩率 / $\%$	固态收缩率 / $\%$	总体收缩率 / $\%$
碳素铸钢	0.35	1610	1.6	3.0	7.86	12.46
白口铸铁	3.00	1400	2.4	4.2	5.4~6.3	12~12.9
灰铸铁	3.50	1400	3.5	0.1	3.3~4.2	6.9~7.8

影响铸件收缩的主要因素有化学成分、浇注温度、铸件结构与铸型条件等。

1.2.3 铸造内应力

铸件在凝固和冷却过程中,由于收缩不均匀、收缩受阻、相变等因素,在铸件的内部会产生应力,这种铸造内应力在铸件冷却过程中,有时是暂存的,有时会一直残留到室温。铸造内应力分为热应力、相变应力和收缩应力。

热应力是铸件在凝固和冷却过程中,不同部位由于收缩不均衡而引起的应力,只有当铸件的薄壁和厚壁都进入弹性状态才会产生热应力,热应力使铸件厚壁处或心部受拉伸,薄壁或表层受压缩,铸件固态收缩越大,壁厚差越大,形状越复杂,产生的热应力越大。热应力是铸件产生变形和开裂的主要原因。为了能减少热应力的产生,基本途径是尽量减少铸件各部分的温度差,使铸件尽可能均匀冷却。设计铸件时应尽量使其壁厚均匀,这样,铸件在冷却过程中各部位的冷却速度基本一致,避免了较大的温度差。在铸造工艺上,采用同时凝固的原则是减少和消除铸造应力的主要措施。

收缩应力是由于铸型、型芯等阻碍铸件的收缩产生的内应力,收缩应力一般使铸件产生拉伸或剪切应力。

相变应力是由于固态相变,各部分体积发生不均衡变化引起的应力。

铸件在铸造内应力作用下,如果内应力达到或超出材料的屈服极限,铸件会发生不同程度的变形,细而长或薄而大的铸件,尤其容易变形。铸件变形后,会丧失原有的精度,会给后续工艺过程中的装夹、加工带来困难,严重变形会导致铸件报废。防止铸造

变形的根本措施是减小铸造应力。铸件结构要设计合理,力求铸件形状对称,壁厚均匀;铸造工艺上采用同时凝固原则,合理设计浇冒口、冷铁等,使铸件冷却均匀;改善型砂和芯砂的退让性;不允许变形的重要铸件,如车床的床身,必须采用自然时效或人工时效的方法将残余应力消除掉。

当铸造内应力超过铸件材料的强度极限时,铸件会产生裂纹,这是一种严重的铸造缺陷,它有冷裂和热裂两种。

热裂是在铸件凝固末期高温下形成的裂纹,它沿晶界产生和发展,外观形状曲折而不规则,裂纹断面高温下与空气接触而被氧化,呈氧化色而无金属光泽。热裂一般在铸件的尖角、断面突变处等应力集中部位或热节处产生。热裂是铸钢件、可锻铸铁件和铝合金铸件的常见缺陷。

冷裂是铸件在低温时形成的裂纹,它穿过晶粒,外形规则呈圆滑曲线或直线状,表面光滑而具有金属光泽或微显氧化色。冷裂是在较低的温度下形成的,常出现在铸件受拉应力的部位,尤其是应力集中的部位。壁厚差别大、形状复杂或大而薄的铸件容易产生冷裂;脆性大、塑性差的合金,如白口铸铁、高碳钢及部分合金钢铸件最容易产生冷裂。

防止冷裂和热裂的主要方法是减小铸造内应力。如果熔炼时,减少钢和铸铁中硫的含量,可以减小热裂产生的倾向;减少钢和铸铁中磷的含量,可以改善合金的冲击韧性;降低合金的脆性,可以减小冷裂产生的倾向。

1.2.4 常用铸造合金的铸造性能

不同的铸造合金具有不同的铸造性能,在铸件结构设计及零件的结构设计时,应充分注意到各种不同的铸造合金的特点,并采取相应的合理结构和工艺措施。表 1.4 为常用铸造合金的铸造性能和结构特点。

表 1.4 常用铸造合金的性能和结构特点

合金	性能特点	结构特点
灰铸铁	熔点较低,凝固温度范围小,流动性好,凝固收缩小,具有良好的铸造性能。综合力学性能低,抗压强度比抗拉强度高 3 倍~4 倍。缺口敏感性低,铸件的残余应力小。吸振性好,比钢约高 10 倍。弹性模量较低	可设计薄壁(但不能太薄以防产生白口组织)、形状复杂的铸件。不宜设计很厚大的铸件,常采用非对称截面,以充分利用其抗压强度。如发动机缸体和缸盖、机床床身、机架、支座
球墨铸铁	流动性线收缩与灰铸铁基本相同,体收缩及形成内应力倾向比灰铸铁大,易产生缩孔、缩松和裂纹。球化处理时铁水温度有所降低,易产生浇不足、冷隔缺陷,铸造性能介于灰铸铁与铸钢之间。强度、塑性、弹性模量均比灰铸铁高,抗磨性好,吸振性比灰铸铁差	一般设计成均匀壁厚,尽量避免厚实断面。对于某些厚大断面的铸件可采用空心结构或带加强筋的结构。如柴油机曲轴、凸轮轴、减速器壳、阀体