



普通高等教育“新工科”系列规划教材  
暨智能制造领域人才培养“十三五”规划教材

# 材料成形工艺基础

(第二版)

CAILIAO CHENGXING GONGYI JICHU

主编◎童幸生

普通高等教育“新工科”系列规划教材  
暨智能制造领域人才培养“十三五”规划教材

# 材料成形工艺基础

(第二版)

主 编 童幸生  
副主编 帅玉妹 余竟成  
参 编 余小红 叶喜葱

华中科技大学出版社  
中国·武汉

## 内 容 简 介

本书是在教育部深化工程教育改革,推进“新工科”的建设与发展的背景下,参照《普通高等学校工程材料及机械制造基础系列课程教学基本要求》,在普通高等学校“新工科”视域下的课程与教材建设小组的指导下编写而成的。

全书共六章,内容包括铸造成形工艺、金属的压力加工成形、焊接成形工艺、非金属材料的成形、材料成形方法的选择以及快速成形技术。每章附有适量的复习思考题。

本书力求内容简明扼要,突出实用性,并注重理论与实践的结合,可作为高等学校机械类、近机械类及非机械类专业的教材,也可供其他工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

材料成形工艺基础/童幸生主编. —2版. —武汉:华中科技大学出版社,2019.8  
普通高等教育“新工科”系列规划教材暨智能制造领域人才培养“十三五”规划教材  
ISBN 978-7-5680-5515-4

I. ①材… II. ①童… 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(2019)第 164098 号

### 材料成形工艺基础(第二版)

童幸生 主编

Cailliao Chengxing Gongyi Jichu(Di-er Ban)

策划编辑:余伯仲

责任编辑:戴凤平

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉华工鑫宏印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:16.75

字 数:438千字

版 次:2019年8月第2版第1次印刷

定 价:49.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

## 第二版前言

---

---

为了适应我国高等教育的发展特别是“新工科”建设与发展的需要,根据新时期人才培养模式的新变化,针对“普通高等学校工程材料及机械制造基础创新人才培养系列教材”在近几年使用的情况,我们对原教材进行了修订和补充,以适应高等学校对人才培养的需要。

“材料成形工艺基础”是一门机械类专业和近机械类专业重要的专业基础课程,它系统阐述了常用工程材料成形的基本原理和基本工艺。按照《普通高等学校工程材料及机械制造基础系列课程教学基本要求》的最新要求,本书在内容体系上保留了金属工艺学的基本内容,增加了消失模铸造、机器人焊接、常用的快速成形技术等新内容,对非金属材料、复合材料的成形也做了必要的阐述。本书在编写过程中,力求理论和实践、工艺与生产相结合,突出基本理论、基本概念,强化成形工艺和生产实际,注重新知识、新技术、新工艺的引入,列举了许多和实际生产中相关的应用实例,选用了最新的国家标准,包括名词术语、符号、单位等,内容充实,结构合理,体系完整。通过本书的学习,学生可掌握常用工程材料成形的基本原理、基本方法,了解和掌握材料成形中的基本生产工艺过程。

参加本书编写的有江汉大学童幸生(前言、第1章、第5章),长江大学帅玉妹(第2章),江汉大学余竟成(第3章),江汉大学余小红(第4章),三峡大学叶喜葱(第6章)。本书由童幸生任主编,帅玉妹和余竟成任副主编。

由于编者的水平有限,书中难免有不足之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2019年4月

# 目 录

---

---

<b>第 1 章 铸造成形工艺</b> .....	(1)
1.1 铸造成形的理论基础 .....	(1)
1.2 铸造成形方法.....	(11)
1.3 铸造成形件的工艺设计.....	(23)
1.4 铸造成形件的结构设计.....	(30)
复习思考题 .....	(35)
<b>第 2 章 金属的压力加工成形</b> .....	(38)
2.1 压力加工理论基础.....	(38)
2.2 金属热锻成形工艺.....	(45)
2.3 板料冲压成形工艺 .....	(67)
2.4 特种压力加工技术简介 .....	(87)
复习思考题.....	(108)
<b>第 3 章 焊接成形工艺</b> .....	(110)
3.1 焊接成形理论基础 .....	(110)
3.2 焊接方法及工艺 .....	(120)
3.3 金属材料的焊接性 .....	(134)
3.4 焊接结构工艺设计 .....	(142)
3.5 工业机器人与焊接机器人简介 .....	(151)
复习思考题.....	(161)
<b>第 4 章 非金属材料的成形</b> .....	(163)
4.1 高分子材料的成形 .....	(163)
4.2 陶瓷材料的成形 .....	(178)
4.3 复合材料的成形 .....	(186)
4.4 粉末冶金成形简介 .....	(194)
4.5 成形技术的新进展 .....	(199)
复习思考题.....	(208)
<b>第 5 章 材料成形方法的选择</b> .....	(209)
5.1 材料成形方法选择的原则 .....	(209)
5.2 常用成形件的成形特点 .....	(213)

---

5.3 常用机械零件的成形方法 .....	(218)
复习思考题 .....	(220)
<b>第6章 快速成形技术</b> .....	<b>(221)</b>
6.1 快速成形技术概述 .....	(221)
6.2 光固化成形法 .....	(228)
6.3 分层实体成形法 .....	(236)
6.4 熔丝沉积成形法 .....	(242)
6.5 选择性激光烧结成形法 .....	(249)
6.6 其他快速成形技术 .....	(257)
复习思考题 .....	(260)
<b>参考文献</b> .....	<b>(262)</b>

# 第 1 章 铸造成形工艺

将金属液浇注到与零件形状、尺寸相适应的铸型型腔中,待其冷却凝固后,获得一定形状的毛坯或零件的方法称为铸造,也称金属的液态成形。铸造是生产机器零件、毛坯的主要方法之一,在机械制造中占有很重要的地位,应用极其广泛,各种类型的现代机器设备中铸件所占的比重很大。例如,以重量计算,铸件在机床、内燃机、重型机械中占机器的 70%~90%,在风机、压缩机中占 60%~80%,在拖拉机中占 50%~70%,在农业机械中占 40%~70%,在汽车中占 20%~30%。铸造之所以得到广泛应用,是因为它具有以下优点。

(1) 能够制成形状复杂、特别是具有复杂内腔的毛坯,如各类箱体、阀体、缸体等,还有机床的床身、机械设备中的底座、支座等。

(2) 铸造的适应性广,铸件的大小几乎不受限制,重量可从几克到几百吨。尺寸由小到大,铸造金属可以是钢、铁和非铁合金。

(3) 铸造所用原材料来源广泛,价格低廉,铸件成本低。一般不需要昂贵的设备。

(4) 采用特种铸造方法生产的铸件,部分可直接成为零件,能节省金属,提高效率。

铸造生产也存在不足:铸造组织疏松、晶粒粗大,内部易产生缩孔、缩松、气孔等缺陷,铸件的力学性能差;同时铸造工序多,铸件质量不够稳定,废品率较高;劳动条件差,劳动强度比较大。

随着铸造技术的发展,铸造生产的不足正在不断得到克服和改进。现代技术的发展推动了铸造生产的机械化、自动化和信息化,各种铸造新工艺、新技术和新材料的出现,形成了优质、高效、低能耗的铸造生产态势,使得铸造成品率和铸件质量大为提高,工人的劳动强度减小,劳动条件也大为改善。铸造生产正朝着专业化、智能化、精密化方向发展。

## 1.1 铸造成形的理论基础

铸造成形过程主要是金属液在铸型里从高温到室温的凝固结晶、冷却的过程,它涉及铸造金属的工艺性能,也称铸造性能,通常是指金属液的流动性、收缩性、吸气性及偏析性等性能。不同的铸造金属的铸造性能是不同的,它直接影响着铸件的质量,在进行铸造材料选择、铸造工艺及铸件结构设计时必须充分考虑铸造金属的铸造性能。

### 1.1.1 金属液的充型能力

金属液填充铸型的过程简称充型。金属液充满铸型型腔,获得形状准确、轮廓清晰的铸件的能力,称为金属液的充型能力。充型能力首先取决于金属液本身的流动性,同时又受外界条件,如铸型性质、浇注条件、铸件结构等因素影响。因此,充型能力是上述各种因素的综合反映。这些因素通过两个途径发生作用:一是影响金属与铸型之间的热交换条件,从而改变金属

液的流动时间;二是影响金属液在铸型中的流体动力学条件,从而改变金属液的流动速度。延长金属液的流动时间、加快流动速度,都可以改善充型能力。

影响金属液充型能力的主要因素如下。

### 1. 金属液的流动性

流动性是指熔融金属自身的流动能力,它是影响充型能力的主要因素之一,是金属液固有的属性。流动性仅与金属本身的化学成分、温度、杂质的量及物理性质有关。金属液的流动性好,充填铸型的能力就强,易于获得形状准确、轮廓清晰的铸件,可避免产生铸造缺陷。金属液的流动性用浇注流动性试样的方法来衡量。流动性试样的种类很多,如螺旋形、球形、真空试样等,应用最多的是螺旋形试样,如图 1-1 所示。

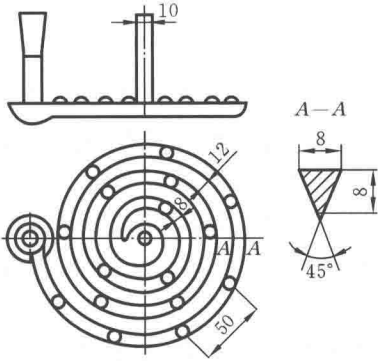


图 1-1 螺旋形标准试样

决定金属液流动性的因素主要如下。

(1) 铸造金属的种类 金属液的流动性与其黏度及铸造金属的熔点、热导率等物理性能有关。如铸钢熔点高,在铸型中散热快、凝固快,故流动性差。

(2) 铸造金属的成分 同种铸造金属中,成分不同,结晶特点就不同,金属液的流动性也不同。例如,纯金属和共晶成分合金的结晶是在恒温下进行的,结晶时从表面开始向中心逐层凝固。由于凝固层的内表面比较平滑,对尚未凝固的金属液流动的阻力小(见图 1-2a),有利于金属液充填型腔。此外,在相同浇注温度下,共晶成分的合金凝固温度最低,相对来说,金属液的过热度(即浇注温度与金属凝固点(熔点)温度之差)大,推迟了金属液的凝固,因此共晶成分的金属液流动性最好。其他成分金属液的结晶是在一定温度范围内进行的,即结晶区域为一个液相和固相并存的两相区。在此区域初生的树枝状枝晶使凝固层内表面参差不齐,会阻碍金属液的流动。而且因固态晶体的热导率大,使液体冷却速度加快,故流动性差(见图 1-2b)。合金结晶温度范围愈宽,液相线和固相线距离愈大,凝固层内表面愈参差不齐,这样流动阻力就愈大,流动性也愈差。因此,选择铸造金属时,在满足使用要求的前提下,应尽量选择靠近共晶成分的合金。

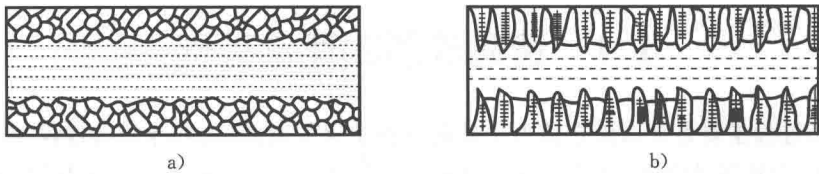


图 1-2 结晶特性对流动性的影响

a) 纯金属及共晶成分合金在恒温下结晶 b) 非共晶合金在一定温度范围内结晶

### 2. 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影响。浇注温度高,金属液所含的热量多,在同样冷却条件下,保持液态的时间长,所以流动性好。浇注温度越高,金属液的黏度越低,传给铸型的热量多,保持液态的时间长,流动性好,充型能力强。但浇注温度过高,会使金属液的吸气量和总收缩量增大,从而增加铸件产生其他缺陷的可能性(如缩孔、缩松、黏砂、晶粒粗大等)。因此,在保证流动性足够的条件下,浇注温度应尽可能低些,在实际生产中掌握的原则是“高温出炉,低温浇注”。

(2) 充型压力 金属液在流动方向上所受的壓力愈大,充型能力愈强。砂型铸造时,充型压力是由直浇道的静压力产生的,适当提高直浇道的高度,可提高充型能力。但过高的砂型浇注压力,易使铸件产生砂眼、气孔等缺陷。在低压铸造、压力铸造和离心铸造时,因人为加大了充型压力,故充型能力较强。

### 3. 铸型条件

金属液充型时,铸型的阻力及铸型对金属液的冷却作用,都将影响金属液的充型能力。

(1) 铸型的蓄热能力 铸型的蓄热能力是指铸型从金属液中吸收热量并储存的能力。铸型材料的热容和热导率愈大,对金属液的冷却作用越强,金属液在型腔中保持流动的时间缩短,金属液的充型能力越弱。

(2) 铸型温度 铸型温度越高,则金属液与铸型温差越小,充型能力越强。

(3) 铸型中的气体 浇注时因金属液在型腔中的热作用而产生大量气体。如果铸型的排气能力差,则型腔中气体的压力增大,会阻碍金属液的充型。铸造时,除应尽量减小气体的来源外,应增加铸型的透气性,并开设出气口,使型腔及型砂中的气体顺利排出。

(4) 铸件结构 当铸件壁厚过小,壁厚急剧变化,结构复杂时,金属液的流动阻力就增大,铸型的充填就困难。因此在进行铸件结构设计时,铸件的形状应尽量简单,壁厚应大于规定的最小壁厚。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 铸造合金的凝固与收缩

### 1. 合金的凝固

物质由液态转化为固态的过程称为凝固,合金的凝固过程又称结晶。铸造的实质是金属液逐步凝固冷却而形成铸件的过程。在铸件凝固过程中,其截面上一般存在三个区域,即固相区、凝固区和液相区(见图 1-3),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”依据凝固区的宽窄分为以下三种。

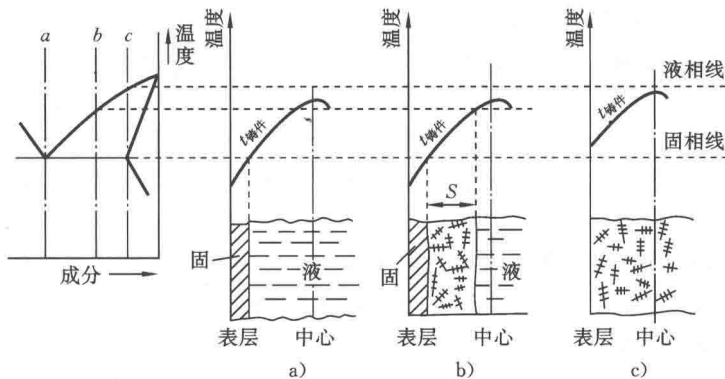


图 1-3 铸件的凝固方式

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(见图 1-3a),故截面上外层的固体和内层的液体由一个界面(凝固前沿)清楚地分开。随着温度的下降,固体层不断加厚、液体层不断减薄,直达铸件的中心,这种凝固方式称为逐层凝固。

(2) 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(见图 1-3b),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,便于防止缩孔和缩松;糊状凝固时,难以获得结晶紧实的铸件。

(3) 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截面(见图 1-3c)。由于这种凝固方式与水泥类似,即先呈糊状而后固化,故称糊状凝固。

铸件的凝固方式决定了铸件的组织结构形式,是影响铸件质量的内在因素。

影响铸件凝固方式的主要因素有合金的结晶温度范围和铸件的温度梯度。

(1) 合金的结晶温度范围 如前所述,合金的结晶温度范围愈小,凝固区域愈窄,愈倾向于逐层凝固。如砂型铸造时,低碳钢为逐层凝固;高碳钢结晶温度范围甚宽,为糊状凝固。

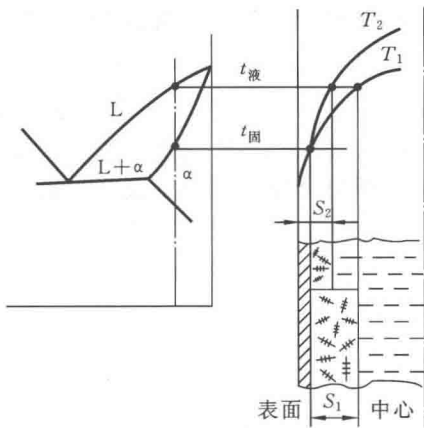


图 1-4 温度梯度对凝固区域的影响

(2) 铸件的温度梯度 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内外层间的温度梯度(见图 1-4)。若铸件的温度梯度由小变大,则其对应的凝固区由宽变窄。铸件的温度梯度主要取决于以下三个因素。

① 合金的性质 合金的凝固温度愈低、热导率愈高、结晶潜热愈大,铸件内部温度均匀化能力愈大,而铸型的激冷作用变小,故温度梯度小(如多数铝合金)。

② 铸型的蓄热能力 铸型蓄热能力愈强,激冷能力愈强,铸件温度梯度愈大。

③ 浇注温度 浇注温度愈高,带入铸型中热量增多,

铸件的温度梯度减小。

通过以上讨论可以得出:具有逐层凝固倾向的合金(如灰铸铁、铝硅合金等)易于铸造,应尽量选用。当必须采用有糊状凝固倾向的合金(如锡青铜、铝铜合金、球墨铸铁等)时,需考虑采用适当的工艺措施,例如,选用金属型铸造等,以减小其凝固区域。

## 2. 合金的收缩

(1) 收缩的概念 液态合金在凝固和冷却过程中,其体积或尺寸缩小的现象称为收缩。收缩是绝大多数合金的物理本性。它是影响铸件几何形状、尺寸、致密性,甚至造成某些缺陷的重要铸造性能之一。

合金的收缩量常用体收缩率或线收缩率来表示。合金从液态到常温的体积改变量称为体收缩。合金在固态由高温到常温的线尺寸改变量称为线收缩,分别以单位体积和单位长度的变化量来表示,即体收缩率

$$\varepsilon_V = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\% = \alpha_V (t_0 - t_1) \times 100\%$$

线收缩率

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

式中  $t_0, t_1$ ——合金在常态和液态时的温度( $^{\circ}\text{C}$ );

$V_0, V_1$ ——合金在  $t_0, t_1$  时的体积( $\text{m}^3$ );

$l_0, l_1$ ——合金在  $t_0, t_1$  时的长度(m);

$\alpha_v, \alpha_l$ ——合金在  $t_0$  至  $t_1$  温度范围内的体积收缩系数、线收缩系数( $K^{-1}$ )。

合金的收缩可分为三个阶段(见图 1-5)。

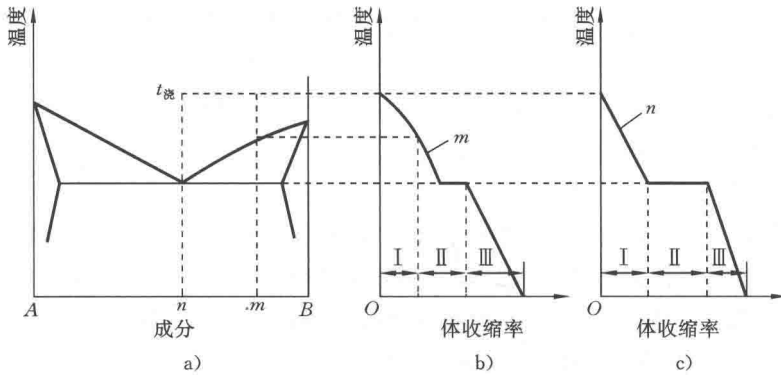


图 1-5 铸造合金收缩过程示意图

a) 合金状态图 b) 一定温度范围合金(m)的收缩过程 c) 共晶合金(n)的收缩过程

I—液态收缩 II—凝固收缩 III—固态收缩

- ① 液态收缩 从浇注温度冷却到凝固开始温度(液相线温度)的收缩。
- ② 凝固收缩 从凝固开始温度冷却到凝固终止温度(固相线温度)的收缩。
- ③ 固态收缩 从凝固终止温度冷却到室温的收缩。

合金的液态收缩和凝固收缩表现为合金的体积缩小,通常以体收缩率来表示。它们是铸件产生缩孔、缩松缺陷的基本原因。合金的固态收缩尽管也是体积变化,但它只引起铸件各部分尺寸的变化。因此,通常用线收缩率来表示。固态收缩是铸件产生内应力、裂纹和变形等缺陷的主要原因。

合金的总体收缩为上述三个阶段收缩之和。它与合金的成分、温度和相变有关。不同合金收缩率是不同的,表 1-1 给出了几种铸造合金的体收缩率。常用铸造合金的线收缩率如表 1-2 所示。

表 1-1 几种铸造合金的体收缩率

合金种类	碳的质量分数 /(%)	浇注温度 /°C	液态收缩 /(%)	凝固收缩 /(%)	固态收缩 /(%)	总体积收缩 /(%)
碳钢	0.35	1 610	1.6	3.0	7.86	12.46
白口铸铁	3.0	1 400	2.4	4.2	5.4~6.3	12.0~12.9
灰铸铁	3.5	1 400	3.0	0.1	3.3~4.0	6.9~7.8

表 1-2 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) 影响收缩的因素 主要体现在以下三个方面。

① 化学成分 不同的合金,其收缩率不同,碳素钢随含碳量增加,凝固收缩增加,而固态收缩略减。灰铸铁中,碳是形成石墨化元素,硅是促进石墨化元素,所以碳、硅含量增加,收缩率减小。硫阻碍石墨的析出,使铸铁的收缩率增大。适量的锰可与硫合成  $MnS$ ,抵消硫对石

墨的阻碍作用,使收缩率减小。但含锰量过高,铸铁的收缩率又有增加。

② 浇注温度 浇注温度主要影响液态收缩。浇注温度愈高,过热度愈大,合金的液态收缩增加。

③ 铸件结构和铸型条件 铸件在铸型中冷却时,因形状和尺寸不同,各部分的冷却速度不同,铸件各部分相互制约也会对其收缩产生阻碍。又因铸型和型芯对铸件的收缩也会产生机械阻力,铸件的实际线收缩率比自由线收缩率小。所以设计模样时,应根据合金的种类、铸件的形状、尺寸等因素,选取适合的收缩率。

### 3. 缩孔和缩松

铸型内的金属液在凝固过程中,由于液态收缩和凝固收缩所缩减的体积得不到补充,在铸件最后凝固部位将形成孔洞。按孔洞的大小和分布可分为缩孔和缩松。大而集中的孔洞称为缩孔,细小而分散的孔洞称为缩松。缩孔和缩松可使铸件的力学性能、气密性和物理化学性能大大降低,严重时会导致铸件报废,必须设法防止。

#### 1) 缩孔和缩松的形成

(1) 缩孔 缩孔是在铸件最后凝固的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 inner 层,但在某些情况下,也可暴露在铸件的表面,呈明显的凹坑。缩孔产生的条件是合金在恒温或很小的温度范围内结晶,铸件壁以逐层凝固的方式进行凝固。

缩孔的形成过程如图 1-6 所示。液态合金充满铸型(见图 1-6a)后,因铸型吸热,靠近型腔表面的合金很快就降到凝固温度,凝固成一层外壳(见图 1-6b),同时,内浇道也被封堵;温度下降,合金逐层凝固,凝固层加厚,内部的剩余液体,由于液态收缩和补充凝固层的凝固收缩,体积缩减,液面下降,铸件内部出现空隙(见图 1-6c);最后,铸件内部完全凝固,在铸件上部形成缩孔(见图 1-6d)。已经形成缩孔的铸件继续冷却到室温时,因固态收缩使铸件的外形轮廓尺寸略有缩小(见图 1-6e)。

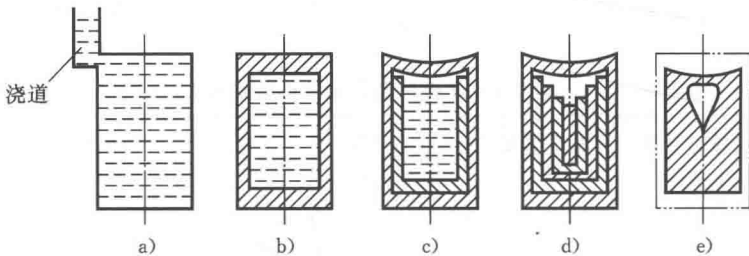


图 1-6 缩孔的形成过程示意图

a) 充满铸型 b) 凝固成一层外壳 c) 出现空隙 d) 形成缩孔 e) 外形轮廓尺寸略有缩小

(2) 缩松 形成缩松的基本原因和形成缩孔的相同,但形成的条件不同。缩松主要出现在结晶温度范围宽、以糊状凝固方式凝固的合金或厚壁铸件中。

缩松形成过程如图 1-7 所示。一般合金在凝固过程中都存在液-固两相区,树枝状晶在其中不断扩大。枝晶长到一定程度(见图 1-7a),枝晶分叉间的熔融金属被分离成彼此孤立的状态,它们继续凝固时也将产生收缩(见图 1-7b),这种凝固方式称为糊状凝固。这时铸件中心虽有液体存在,但由于树枝晶的阻碍使之无法补缩,在凝固后的枝晶分叉间就形成许多微小的孔洞(见图 1-7c)。这些孔洞有时只有在显微镜下才能辨认出来,通常称这种很细小的孔洞为疏松或显微缩松。

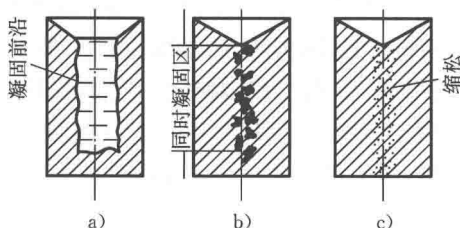


图 1-7 缩松的形成过程示意图

a) 枝晶生长 b) 糊状凝固 c) 显微缩松

由以上缩孔和缩松的形成过程,可得到以下规律:

- ① 合金的液态收缩和凝固收缩愈大(如铸钢、白口铸铁、铝青铜等),铸件愈易形成缩孔;
- ② 合金的浇注温度愈高,液态收缩愈大,愈易形成缩孔;
- ③ 结晶温度范围宽的合金,倾向于糊状凝固,易形成缩松;
- ④ 纯金属和共晶成分合金倾向于逐层凝固,易形成集中缩孔。

## 2) 防止缩孔和缩松形成的措施

缩孔和缩松都会使铸件的力学性能下降,缩松还会使得铸件因渗漏而报废。因此必须采取适当的工艺措施,防止缩孔和缩松的形成。主要工艺措施如下。

(1) 按照定向凝固原则进行凝固 定向凝固原则是指采用各种工艺措施,使铸件上从远离冒口的部分到冒口之间建立一个逐渐递增的温度梯度,从而实现由远离冒口的部分向冒口的方向顺序地凝固,如图 1-8 所示。这样铸件上每一部分的收缩都得到稍后凝固部分的液态合金的补充,缩孔转移到冒口部位,切除后即可得到无缩孔的致密铸件。

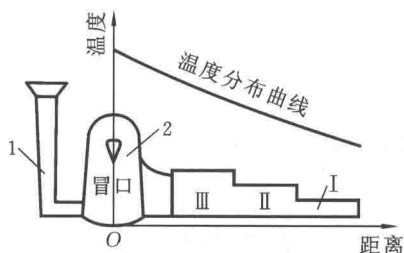


图 1-8 顺序凝固原则示意图

1—浇注系统 2—冒口

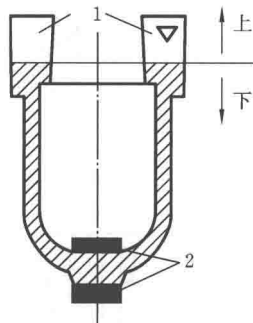


图 1-9 冒口和冷铁的应用

1—冒口 2—冷铁

(2) 合理地确定内浇道位置及浇注工艺 内浇道的引入位置对铸件的温度分布有明显影响,应按照定向凝固的原则确定。例如,内浇道应从铸件厚实处引入,尽可能靠近冒口或由冒口引入。

(3) 合理地应用冒口、冷铁和补贴等工艺措施 冒口、冷铁和补贴的综合运用是消除缩孔、缩松的有效措施。图 1-9 所示为冒口和冷铁的应用。

### 1.1.3 铸造内应力及铸件的变形与裂纹

#### 1. 铸造应力

铸件在凝固、冷却过程中,由于各部分体积变化不一致、彼此制约而使其固态收缩受到阻

碍引起的内应力,称为铸造应力。按阻碍收缩原因的不同,铸造内应力分为热应力和收缩应力。铸造内应力是液态成形件产生变形和裂纹的基本原因。铸件各部分由于冷却速度不同、收缩量不同而引起的阻碍称热阻碍,铸型、型芯对铸件收缩的阻碍,称机械阻碍。由热阻碍引起的应力称热应力,由机械阻碍引起的应力称收缩应力(机械应力)。铸造应力可能是暂时的,当引起应力的原因消除以后,应力随之消失,称为临时应力,也可能是长期存在的,称残余应力。

1) 热应力

热应力是由于铸件壁厚不均,各部分收缩受到热阻碍而引起的。落砂后热应力仍存在于铸件内,是一种残余铸造应力。

现以图 1-10 所示的框形铸件来说明热应力的形成过程。它由一根粗杆 I 和两根细杆 II 组成,图 1-10 上部表示杆 I 和杆 II 的冷却曲线, $t_{固}$  表示金属弹塑性临界温度。当铸件处于高温阶段时, $T_0 \sim T_1$  间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,但两杆都是塑性变形,不产生内应力。继续冷却到  $T_1 \sim T_2$  间,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,在横杆的作用下将对杆 I 产生压应力而杆 I 反过来给杆 II 以拉应力(见图 1-10b)。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、II 的收缩趋于一致,也不产生应力(见图 1-10c)。当进一步冷却至  $T_2 \sim T_3$  间,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,杆 II 受压。到室温时形成残余应力(见图 1-10d)。

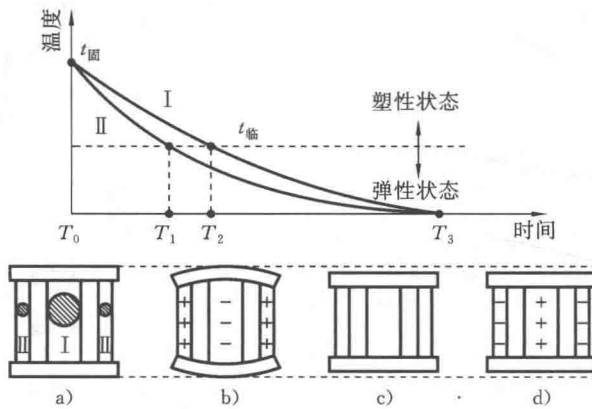


图 1-10 热应力的形成

+-拉应力 - -压应力

热应力使冷却较慢的厚壁处受拉伸,冷却较快的薄壁处或表面受压缩,铸件的壁厚差别愈大,合金的线收缩率或弹性模量愈大,热应力愈大。定向凝固时,由于铸件各部分冷却速度不一致,产生的热应力较大,铸件易出现变形和裂纹,采用时应予以考虑。

2) 收缩应力

铸件在固态收缩时,因受铸型、型芯、浇注系统和冒口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,收缩受阻都会产生收缩应力,如图 1-11 所示。收缩应力常表现为拉应力,与铸件部位无关。形成原因一经消除(如铸件落砂或去除浇冒口后),收缩应力也随之消失,因此收缩应力是一种临时应力。但在落砂前,如果铸件的收缩应力和热应力共同作用,其瞬间应力大于铸件的抗拉强度时,铸件会产生裂纹。

### 3) 减小和消除铸造应力的措施

(1) 合理地设计铸件的结构 铸件的形状愈复杂,各部分壁厚相差愈大,冷却时温度愈不均匀,铸造应力愈大。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) 合理选材 尽量选用线收缩率小、弹性模量小的合金,设法改善铸型、型芯的退让性,合理设置浇注系统和冒口等。

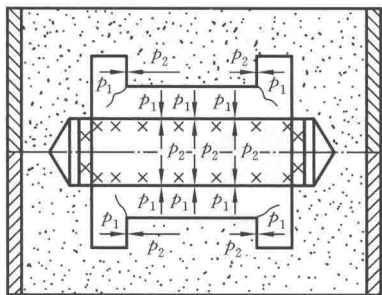


图 1-11 收缩应力的形成

$p_1$ —铸件对砂型的作用力

$p_2$ —砂型对铸件的反作用力

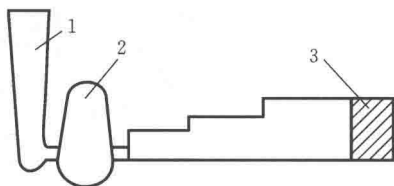


图 1-12 同时凝固原则

1—直浇道 2—暗冒口 3—外冷铁

(3) 采用同时凝固的工艺 所谓同时凝固是指采取一些工艺措施,使铸件各部分温差很小,几乎同时进行凝固(见图 1-12)。因各部分温差小,不易产生热应力和热裂,铸件变形小。

(4) 对铸件进行时效处理是消除铸造应力的有效措施 时效处理分自然时效、热时效和共振时效等。所谓自然时效,是将铸件置于露天场地半年以上,让其内应力自然消除。热时效(人工时效)又称去应力退火,是将铸件加热到  $550 \sim 650^\circ\text{C}$ ,保温  $2 \sim 4$  h,随炉冷却至  $150 \sim 200^\circ\text{C}$ ,然后出炉。共振时效是将铸件在其共振频率下振动  $10 \sim 60$  min,以消除铸件中的残余应力。

## 2. 铸件的变形与防止

当残留铸造应力超过铸件材料的屈服强度时,铸件将发生塑性变形,带有残留应力的铸件是不稳定的,会自发地变形使应力减小而趋于稳定。

对于厚薄不均匀、截面不对称及具有细长特点的杆类、板类及轮类等铸件,当残留铸造应力超过铸件材料的屈服强度时,往往产生翘曲变形。如前述框形铸件,粗杆 I 受拉伸,细杆 II 受压缩,但两杆都有恢复自由状态的趋势,即杆 I 总是力图压缩,杆 II 总是力图伸长,如果连接两杆的横梁刚度不够,结果会出现如图 1-13 所示的翘曲变形。变形使铸造应力重新分布,残留应力会减小一些,但不会完全消除。图 1-14 所示 T 形梁铸钢件,当板 I 厚、板 II 薄时,浇注后板 I 受拉、板 II 受压。各自都有力图恢复原状的趋势,板 I 力图缩短一点,板 II 力图伸长一点。若铸钢件刚度不够,将发生板 I 内凹板 II 外凸的变形;反之,当板 I 薄,板 II 厚时,将发生反向翘曲。

对于形状复杂的铸件,也可应用上述分析方法来确定其变形方向。图 1-15 所示车床床身的导轨部分厚,侧壁部分薄,铸造后导轨产生拉应力,侧壁产生压应力,导轨面往往下凹变形。有的铸件虽无明显变形,但经切削加工后,破坏了铸造应力的平衡,将产生变形。

前述防止铸造应力的方法,也是防止变形的根本方法。此外,工艺上还可采取某些措施,如反变形法,即在模样上做出与挠度相等但方向相反的预变形量来消除床身导轨的变形,对某些重要的易变形铸件,可采取提早落砂,落砂后立即将铸件放入炉内焖火的办法消除应力与变

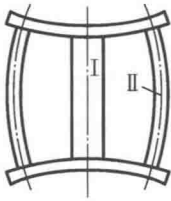


图 1-13 框形铸件的变形

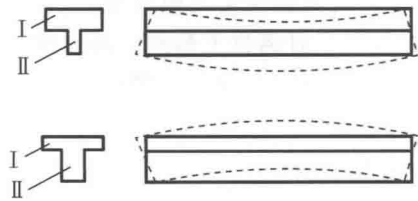


图 1-14 T形梁铸钢件的变形

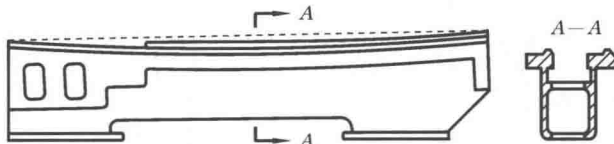


图 1-15 车床床身导轨面的变形

形。

### 3. 铸件的裂纹与防止

当铸造应力超过材料的抗拉强度时,铸件便产生裂纹,裂纹是严重的铸造缺陷,多使铸件报废,必须设法防止。按裂纹形成的温度范围可分为热裂和冷裂两种。

(1) 热裂 热裂是铸件在凝固后期在接近固相线的高温下形成的。因为金属的线收缩并不是在完全凝固后开始的,在凝固后期,结晶出来的固态物质已形成了完整的骨架,开始了线收缩,但晶粒间还存有少量液体,故金属的高温强度很低。在高温下铸件的线收缩若受到铸型、型芯及浇注系统的阻碍,机械应力超过了其高温强度,即发生热裂。热裂的形状特征是:裂纹短,缝隙宽,形状曲折,缝内呈氧化色。

防止热裂的措施有:① 尽量选择凝固温度范围小,热裂倾向小的合金;② 提高铸型和型芯的退让性,以减小机械应力;③ 浇注系统和冒口的设计要合理;④ 对于铸钢件和铸铁件,必须严格控制硫的含量,防止热脆性。

(2) 冷裂 冷裂是在较低温度下,由于热应力和收缩应力的综合作用,铸件内应力超过金属的抗拉强度而产生的。冷裂多出现在铸件受拉应力的部位,尤其是具有应力集中处(如尖角、缩孔、气孔及非金属夹杂物等的附近)。冷裂的特征是裂纹细小,呈连续直线状,缝内有金属光泽或轻微氧化色。

壁厚差别大,形状复杂,特别是大而薄壁的铸件,容易产生冷裂纹。不同铸造合金的冷裂倾向不同。灰铸铁、白口铸铁、高锰钢等塑性差的合金较易产生冷裂;塑性好的合金因内应力可通过其塑性变形来自行缓解,冷裂倾向小。铸钢中含磷量愈高,冷裂倾向愈大。

#### 1.1.4 铸件的常见缺陷

在铸造过程中特别是砂型铸造中经常产生的缺陷除缩孔、缩松、变形、裂纹外,还有黏砂、夹砂、砂眼、胀砂、气孔、浇不足与冷隔等(见图 1-16)。

(1) 黏砂 铸件表面上黏附有一层难以清除的砂粒称为黏砂。黏砂不仅影响铸件的外观,而且增加铸件清理和切削加工的工作量。如不及时清理干净,将直接影响零件的表面质量,甚至影响机器的寿命。

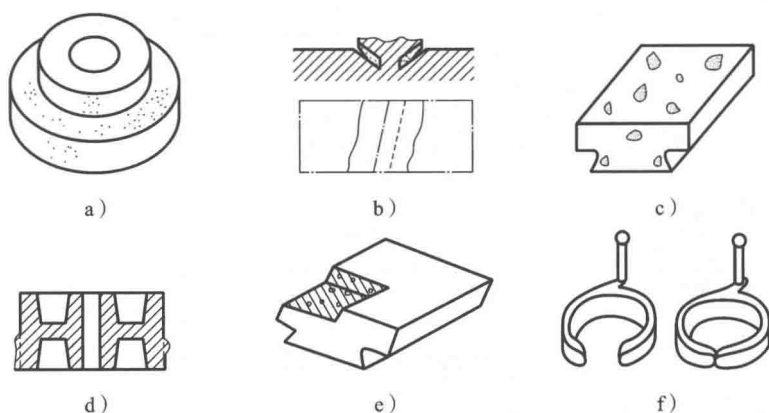


图 1-16 常见的铸造缺陷

a) 黏砂 b) 夹砂 c) 砂眼 d) 胀砂 e) 气孔 f) 浇不足与冷隔

(2) 夹砂 夹砂是铸件表面形成的沟槽和疤痕缺陷,在铸造厚大平板件时容易产生。夹砂产生的部位大多是与砂型上表面相接触的地方,型腔上表面受到金属液的辐射热,容易拱起和翘曲,翘曲的砂层受金属液流不断冲刷而断裂破碎,留在或被带入其他部位形成夹砂。

(3) 砂眼 砂眼是铸件内部或表面出现的一些孔洞。它是造型、合型和浇注过程中,砂粒砂块剥落或冲落留在铸件内部造成的。

(4) 胀砂 胀砂是浇注时在金属液的压力作用下,铸型型壁移动、铸件局部胀大形成的。它主要发生在水分过高和湿态强度不足的砂型铸型中。

(5) 气孔 气孔是气体在金属液结壳前未及时逸出而在铸件内生成的孔洞。气孔的内壁光滑,明亮或带有轻微的氧化色。铸件有了气孔,将会减少其有效的承载面积,且在气孔周围会引起应力集中而降低铸件的抗冲击力和抗疲劳性,还会降低铸件的致密性。

(6) 浇不足与冷隔 当金属液充型能力不足或充型条件较差时,在型腔被填满之前金属液便会停止流动,使铸件形成浇不足与冷隔。浇不足时,铸件不能获得完整的形状;冷隔时,铸件虽可获得完整的外形,但因存在未完全融合的接缝,其力学性能严重受损。

## 1.2 铸造成形方法

### 1.2.1 砂型铸造成形

以型砂为材料制备铸型的铸造方法称为砂型铸造。铸型主要包括外型和型芯两大部分,外型也称砂型,用来形成铸件的外部轮廓;型芯也称砂芯,用来形成铸件的内腔。从广义上讲,砂型包括砂芯。

砂型铸造是应用最为广泛的金属液态成形方法。目前,世界各国砂型铸件占铸件总产量的80%以上。掌握砂型铸造方法是合理选择铸造方法和正确设计铸件的基础。砂型铸造的基本工艺过程如图1-17所示。

#### 1. 造型材料的选择

制造铸型的材料为造型材料,主要由砂、黏土、有机或无机黏结剂和其他附加物组成。造