

高等学校“十一五”规划教材

材料成形工艺

MATERIALS FORMING PROCESS

杜丽娟 主编
邢忠文 主审



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

高等学校“十一五”规划教材

材料成形工艺

MATERIALS FORMING PROCESS

杜丽娟 主编

邢忠文 主审

哈尔滨工业大学出版社

内 容 提 要

本书是依据教育部机械基础课程教学指导金工分委员会《重点高等工科院校金工系列课程改革指南》编写。全书共7章,主要内容有金属液态成形、金属塑性成形、连接成形、粉末冶金成形、高分子材料成形、陶瓷及复合材料成形、成形工艺的选择等。

本书根据机械工程类专业的实际需求,以原理、工艺、结构、新工艺及发展为一条主线,脉络清晰,并附有适当的案例分析及思考题,以培养学生分析问题及解决问题的能力。本书突出了“少而精”,实用性强,方便教学。

本书可作为普通高等院校机械工程类专业的基本教材,也可供高等职业教育、高等专科学校教育及相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形工艺/杜丽娟主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2009.2

ISBN 978-7-5603-2810-2

I. 材… II. 杜… III. 工程材料—成型—工艺
IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 014749 号

责任编辑 孙 杰
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 肇东粮食印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 12.5 字数 304 千字
版 次 2009 年 2 月第 1 版 2009 年 2 月第 1 印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-2810-2
印 数 1~4 000 册
定 价 24.80 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

本书是为适应机械制造及其自动化专业基础课程教学,根据教育部机械基础课程教学指导金工分委员会《重点高等工科院校金工系列课程改革指南》编写的。在编写过程中,结合目前教学改革的基本指导思想和原则,根据机械工程类专业的实际需要,删除了陈旧的和现代制造中已较少使用的操作方法及工艺,做到了以基础工艺为主线,适当介绍学科前沿的新技术、新成果。本书突出了“少而精”,实用性更强,方便了教学。

本书主要包括金属液态成形、金属塑性成形、连接成形、粉末冶金成形、高分子材料成形、陶瓷及复合材料成形、成形工艺的选择等内容。各章内容相对独立,均以成形原理、成形工艺、结构及工艺设计、新工艺及其发展为一条主线,层次分明,并在每章后面备有思考题,以便于学生课后复习思考。

本书由杜丽娟主编,参加编写的人员有哈尔滨工业大学杜丽娟(内容提要、前言、绪论、第3章、第5章的5.1~5.3节)、黑龙江科技学院毛新宇(第1章)、哈尔滨工业大学包军(第2章)、哈尔滨工业大学胡秀丽(第4章、第7章)、黑龙江大学刘国华(第6章)、哈尔滨工业大学王少纯(第5章的5.4节),全书由邢忠文教授担任主审。

本书可作为普通高等院校机械工程类专业的基本教材,也可供高等教育、高等专科学校教育及相关技术人员参考。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不当之处,敬请读者批评指正。

编 者

2008年12月于哈工大

目 录

绪论	(1)
第1章 金属液态成形	(3)
1.1 液态成形理论基础	(3)
1.2 液态成形工艺	(19)
1.3 液态成形件工艺及结构设计	(33)
1.4 液态成形新工艺及发展	(44)
思考题	(47)
第2章 金属塑性成形	(48)
2.1 塑性成形原理	(48)
2.2 塑性成形工艺	(53)
2.3 塑性成形件工艺及结构设计	(76)
2.4 塑性成形新工艺及发展	(88)
思考题	(91)
第3章 连接成形	(93)
3.1 焊接成形理论基础	(93)
3.2 焊接成形工艺	(101)
3.3 焊接件结构及工艺设计	(116)
3.4 胶接成形工艺	(129)
3.5 连接成形新工艺及发展	(134)
思考题	(136)
第4章 粉末冶金成形	(137)
4.1 粉末冶金特点及应用	(137)
4.2 粉末冶金工艺过程	(139)
4.3 粉末冶金制品结构的工艺性	(147)
4.4 粉末冶金新工艺及发展	(149)
思考题	(151)
第5章 高分子材料成形	(152)
5.1 高分子材料的工艺性能	(152)
5.2 塑料成形工艺	(153)
5.3 橡胶成形工艺	(161)

5.4 高分子材料快速成型.....	(165)
思考题	(171)
第6章 陶瓷及复合材料成形	(172)
6.1 陶瓷成形特点及工艺.....	(172)
6.2 复合材料成形特点及工艺.....	(179)
思考题	(184)
第7章 成形工艺的选择	(185)
7.1 常用成形工艺比较分析.....	(185)
7.2 成形工艺的选择原则.....	(186)
7.3 常用毛坯的成形工艺.....	(188)
思考题	(191)
参考文献	(192)
(1)	顾学恩
(2)	张新 曾强 周金 章 2 章
(3)	张新 张如 张壁 1.5
(4)	张新 张如 张壁 1.5
(5)	张新 张如 张壁 1.5
(6)	张新 张如 张壁 1.5
(7)	张新 张如 张壁 1.5
(8)	张新 张如 张壁 1.5
(9)	顾学恩
(10)	张新 张如 张壁 1.5
(11)	张新 张如 张壁 1.5
(12)	张新 张如 张壁 1.5
(13)	张新 张如 张壁 1.5
(14)	张新 张如 张壁 1.5
(15)	张新 张如 张壁 1.5
(16)	顾学恩
(17)	张新 张如 张壁 1.5
(18)	张新 张如 张壁 1.5
(19)	张新 张如 张壁 1.5
(20)	张新 张如 张壁 1.5
(21)	张新 张如 张壁 1.5
(22)	张新 张如 张壁 1.5
(23)	张新 张如 张壁 1.5
(24)	张新 张如 张壁 1.5
(25)	张新 张如 张壁 1.5
(26)	张新 张如 张壁 1.5
(27)	张新 张如 张壁 1.5
(28)	张新 张如 张壁 1.5
(29)	张新 张如 张壁 1.5
(30)	张新 张如 张壁 1.5
(31)	张新 张如 张壁 1.5
(32)	张新 张如 张壁 1.5
(33)	张新 张如 张壁 1.5
(34)	张新 张如 张壁 1.5
(35)	张新 张如 张壁 1.5
(36)	张新 张如 张壁 1.5
(37)	张新 张如 张壁 1.5
(38)	张新 张如 张壁 1.5
(39)	张新 张如 张壁 1.5
(40)	张新 张如 张壁 1.5
(41)	张新 张如 张壁 1.5
(42)	张新 张如 张壁 1.5
(43)	张新 张如 张壁 1.5
(44)	张新 张如 张壁 1.5
(45)	张新 张如 张壁 1.5
(46)	张新 张如 张壁 1.5
(47)	张新 张如 张壁 1.5
(48)	张新 张如 张壁 1.5
(49)	张新 张如 张壁 1.5
(50)	张新 张如 张壁 1.5
(51)	张新 张如 张壁 1.5
(52)	张新 张如 张壁 1.5
(53)	张新 张如 张壁 1.5
(54)	张新 张如 张壁 1.5
(55)	张新 张如 张壁 1.5
(56)	张新 张如 张壁 1.5
(57)	张新 张如 张壁 1.5
(58)	张新 张如 张壁 1.5
(59)	张新 张如 张壁 1.5
(60)	张新 张如 张壁 1.5
(61)	张新 张如 张壁 1.5
(62)	张新 张如 张壁 1.5
(63)	张新 张如 张壁 1.5
(64)	张新 张如 张壁 1.5
(65)	张新 张如 张壁 1.5
(66)	张新 张如 张壁 1.5
(67)	张新 张如 张壁 1.5
(68)	张新 张如 张壁 1.5
(69)	张新 张如 张壁 1.5
(70)	张新 张如 张壁 1.5
(71)	张新 张如 张壁 1.5
(72)	张新 张如 张壁 1.5
(73)	张新 张如 张壁 1.5
(74)	张新 张如 张壁 1.5
(75)	张新 张如 张壁 1.5
(76)	张新 张如 张壁 1.5
(77)	张新 张如 张壁 1.5
(78)	张新 张如 张壁 1.5
(79)	张新 张如 张壁 1.5
(80)	张新 张如 张壁 1.5
(81)	张新 张如 张壁 1.5
(82)	张新 张如 张壁 1.5
(83)	张新 张如 张壁 1.5
(84)	张新 张如 张壁 1.5
(85)	张新 张如 张壁 1.5
(86)	张新 张如 张壁 1.5
(87)	张新 张如 张壁 1.5
(88)	张新 张如 张壁 1.5
(89)	张新 张如 张壁 1.5
(90)	张新 张如 张壁 1.5
(91)	张新 张如 张壁 1.5
(92)	张新 张如 张壁 1.5
(93)	张新 张如 张壁 1.5
(94)	张新 张如 张壁 1.5
(95)	张新 张如 张壁 1.5
(96)	张新 张如 张壁 1.5
(97)	张新 张如 张壁 1.5
(98)	张新 张如 张壁 1.5
(99)	张新 张如 张壁 1.5
(100)	张新 张如 张壁 1.5

绪 论

在机械制造业中,将工程材料制造成一台机器,需要经过很多的加工环节,如图所示。

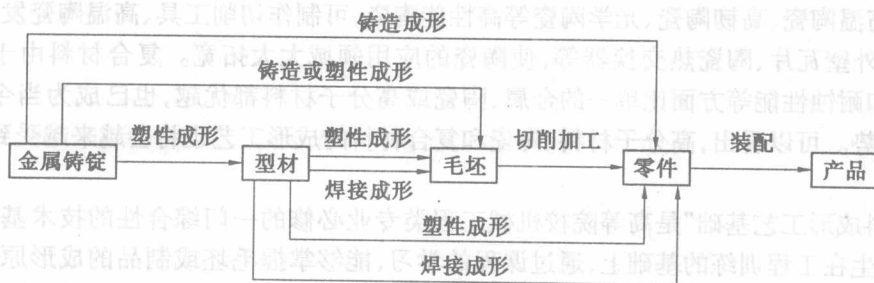


图 0.1

一个机械产品的制造过程是先将材料制成毛坯,再经过切削加工制成所需要的零件,最后将合格的零件组装成机器。因此,从材料到毛坯又由毛坯到零件的工艺过程是贯穿整个机械制造过程中的一条主线,其中,材料制成毛坯的过程称为材料成形。常用的材料成形方法很多,如铸造成形、塑性成形、连接成形、粉末冶金成形等。只有合理的成形工艺、先进的成形技术才能使材料成为所需的毛坯或制品。

随着人类社会的进步,生产力的发展,材料的成形技术也经历了从简单的手工操作到复杂化、大型化、智能化和机械化生产的发展过程。我国古代劳动人民对材料及其成形技术的研究远远超过同时代的欧洲。

1939 年,河南省安阳出土的司母戊大方鼎,是一个重达 875 kg 的青铜祭器,说明我国早在 3000 多年前就有了铸造技术;另外,陕西临潼秦始皇陵出土的大型彩绘铜马车,八匹马造型非常逼真,两辆马车装饰华丽,也充分反映出 2000 多年前古人铸造技术的成熟与精湛。

1977 年,北京平谷县出土的商朝铁刃铜钺,经化验,其刃部不是冶铸的铁,而是用陨铁锻造成薄刃后,与青铜柄部铸焊而成。1965 年,湖北荆州出土的越王勾践剑,出土时剑身丝毫不见锈斑,锋利如初。1950 年,河南辉县战国墓中出土的大量铜器,其本体、耳、足都是采用锡钎焊和银钎焊连接的。这些都说明我国的锻造和焊接技术的悠久历史。

我国还是最早使用胶黏剂的国家之一,在秦始皇陵出土的大型彩绘铜马车,其材料以青铜为主,并配以金银饰品,而金银饰品之间的连接采用的是无机胶黏剂胶接技术,说明了早在 2000 多年前,我们的祖先已掌握了无机胶接技术。

在非金属材料方面,大量出土文物反映了我国古代的染料、油漆、陶瓷、丝绸等技术同样具有较高的水平。

北宋沈括的《梦溪笔谈》和明朝宋应星的《天工开物》一书,详细记载着冶铁、铸钟、锻

铁、淬火等各种金属成形及加工的方法,是世界上有关金属工艺最早的科学著作之一。

随着科学技术的日新月异,金属和非金属的新材料不断涌现,材料成形技术也得到长足的发展。目前,现代精密铸造、精密锻造和粉末冶金技术等先进成形技术,使零件的加工可以实现无切削或少切削,毛坯生产向着优质、精化、高效、低耗、无害等技术方向发展。另外,奥运会“鸟巢”的建设,大量焊接新技术,如厚板焊接、仰焊技术、低温焊接技术等,在建筑钢结构焊接工程中得到推广。

近年来,有机高分子材料和陶瓷材料的发展速度已经超过金属材料,新近研制的高强度陶瓷、高温陶瓷、高韧陶瓷、光学陶瓷等高性能陶瓷,可制作切削工具、高温陶瓷发动机、航天飞机外壁瓦片、陶瓷热交换器等,使陶瓷的应用领域大大拓宽。复合材料由于在强度、韧性和耐蚀性能等方面比单一的金属、陶瓷或高分子材料都优越,也已成为当今材料发展的趋势。可以看出,高分子材料、陶瓷和复合材料的成形工艺也将会越来越受到人们的关注。

“材料成形工艺基础”是高等院校机械工程类专业必修的一门综合性的技术基础课。其要求学生在工程训练的基础上,通过课程的学习,能够掌握毛坯或制品的成形原理、成形工艺及特点,具有综合运用工艺知识进行零件结构设计的初步能力,并能了解有关新材料、新工艺、新技术及其发展趋势,为今后从事机械设计与制造方面的工作,以及其他相关课程的学习奠定必要的基础。

第1章 金属液态成形

金属液态成形主要是指铸造成形,是将液态金属在重力或外力作用下充填到型腔中,待其凝固冷却后获得所需形状和尺寸的毛坯或零件的方法。液态成形是成形毛坯或机器零件的重要方法之一。

液态成形适应性强,工艺灵活性大。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,特别是对不宜塑性成形或焊接成形的材料,该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,质量从零点几克到数百吨,壁厚从1 mm到1 000 mm均可。适合形状复杂,特别是具有复杂内腔的毛坯或零件的成形,如复杂箱体、机架、阀门、泵体、缸体等。因铸造用原料来源广泛,价格低廉,铸件与最终零件的形状相似、尺寸相近,节省材料,故成本较低。

但液态成形也存在某些问题,如铸造组织疏松,晶粒粗大,铸件内部常有缩孔、缩松、气孔等缺陷产生,导致铸件力学性能,特别是冲击性能较低。另外,大多数铸件只是毛坯件,需经过切削加工才能成为零件。

铸造在工业生产中应用广泛,而且,随着特种铸造方法的发展,更可以生产出少或无切削加工的、力学性能更高的铸件。

铸造可分为砂型铸造和特种铸造两大类。砂型铸造是最基本的工艺方法,在生产中占的比例很大,占铸件总产量的90%以上。特种铸造方法种类较多,有熔模铸造、金属型铸造、压力铸造、离心铸造、陶瓷型铸造、实型铸造、磁型铸造等。

1.1 液态成形理论基础

1.1.1 熔融合金的流动性及充型

液态合金充满型腔是获得形状完整、轮廓清晰合格铸件的保证,铸件的很多缺陷都是在此阶段形成的。因此,必须研究液态合金充满型腔的规律,以便掌握和控制这个过程。

1. 熔融合金的流动性

(1) 流动性

液态合金充满型腔,形成轮廓清晰、形状和尺寸符合要求的优质铸件的能力,称为液态合金的流动性。

当合金流动性差时,铸件易产生浇不足、冷隔、气孔和夹杂等缺陷。流动性好的合金,易于充满型腔,有利于液态金属中的气体和非金属夹杂物上浮,也有利于对铸件进行补缩。

在常用铸造合金中,灰铸铁、硅黄铜的流动性最好,铸钢的流动性最差。常用合金的

流动性数值见表 1.1。合金流动性的差异,通常用螺旋形流动性试样来衡量,如图 1.1 所示。在相同的浇注条件下,浇出的试样越长,合金的流动性越好。

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	铸型材料	浇注温度/℃	螺旋线长度/mm
铸铁 $w_{C+Si}=6.2\%$	砂型	1 300	1 800
铸铁 $w_{C+Si}=5.9\%$	砂型	1 300	1 300
铸铁 $w_{C+Si}=5.2\%$	砂型	1 300	1 000
铸铁 $w_{C+Si}=4.2\%$	砂型	1 300	600
铸钢 $w_C=0.4\%$	砂型	1 600	100
铸钢 $w_C=0.4\%$	砂型	1 640	200
铝硅合金(硅铝明)	金属型(300℃)	680 ~ 720	700 ~ 800
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	1 040	420
硅黄铜($w_{Si}=1.5\% \sim 4.5\%$)	砂型	1 100	1 000

(2) 影响合金流动性及充型的因素

①化学成分 其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,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,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。合金的结晶温度区间越宽,流动性越差。

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,合金的流动性越好。

②浇注条件 提高合金的浇注温度和浇注速度,以及增大直浇口的高度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,铸件有时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

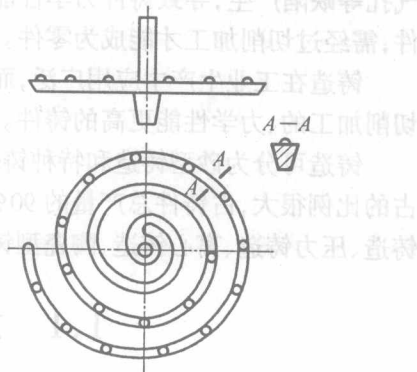


图 1.1 螺旋形试样

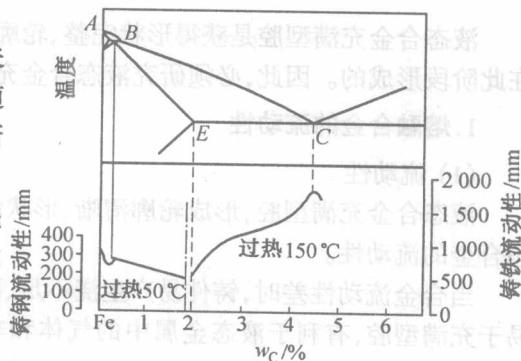


图 1.2 Fe-C 合金的流动性与含碳量的关系

1 520 ~ 1 620℃; 铸铁为 1 230 ~ 1 450℃; 铝合金为 680 ~ 780℃。

③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, 这会使合金保持在液态的时间缩短, 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, 充型能力也就会下降。

2. 铸件的凝固方式

铸件在凝固过程中, 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固区的宽窄。

铸件的凝固方式就是依据凝固区的宽窄来划分的, 如图 1.3 所示。

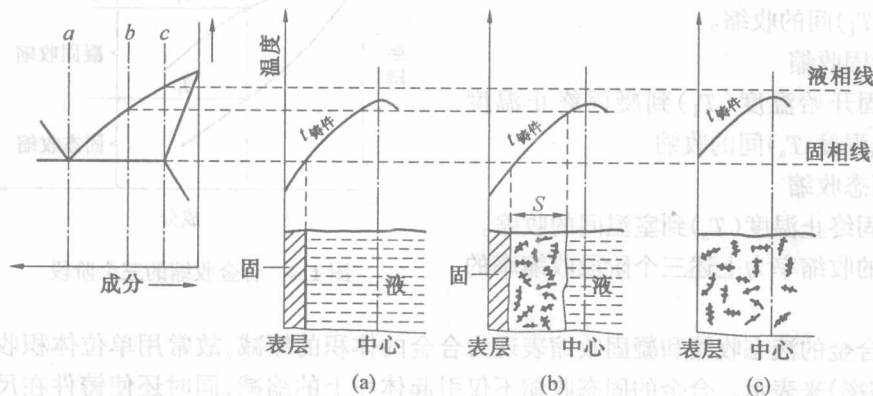


图 1.3 铸件的凝固方式

(1) 逐层凝固

纯金属或共晶成分合金在凝固过程中不存在液、固并存的凝固区, 如图 1.3(a) 所示, 断面上外层的固体和内层的液体有一条界限(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, 直达铸件的中心, 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, 铸件的表面并不存在固体层, 而液固并存的凝固区贯穿整个断面, 如图 1.3(c) 所示。这种凝固方式与水泥类似, 即先糊状而后固化, 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, 如图 1.3(b) 所示, 称为中间凝固方式。

铸件质量与其凝固方式密切相关。一般而言, 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, 难以获得组织致密的铸件。在常用合金中, 灰铸铁、铝硅合金等倾向于逐层凝固, 易于获得致密铸件; 球墨铸铁、锡青铜、铝铜合金等倾向于糊状凝固, 为获得紧实的铸件常需采取适当的工艺措施, 以便补缩或减小其凝固区域, 提高铸件的致密程度。

1.1.2 铸造合金的收缩

1. 收缩的概念

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合金的收缩。收缩是绝大多数合金的物理特性之一。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_s)间的收缩

(3) 固态收缩

从凝固终止温度(T_s)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。

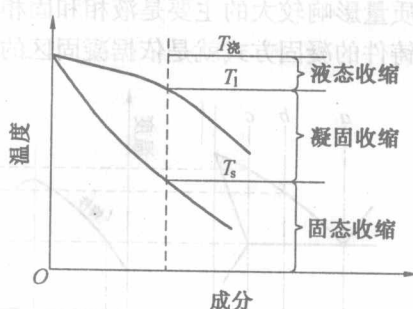


图 1.4 合金收缩的三个阶段

因为合金的液态收缩和凝固收缩表现为合金的体积的缩减,故常用单位体积收缩量(即体收缩率)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减小,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	碳的质量分数 $w_c/\%$	浇注温度 / $^{\circ}\text{C}$	液态收缩率 / $\%$	凝固收缩率 / $\%$	固态收缩率 / $\%$	总体积收缩率/ $\%$
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

对于同一种合金来说,化学成分不同,其收缩率也略有差别。例如,碳素铸钢随含碳量的增加,其结晶温度范围变宽,凝固收缩率增大。几种铸造碳钢的凝固时体积收缩率见表 1.4。

表 1.4 铸造碳钢凝固时体积收缩率

%

碳的质量分数 w_C	0.10	0.25	0.35	0.45	0.70
凝固时体积收缩率	2.0	2.5	3.0	4.3	5.3

灰铸铁在凝固时有石墨化膨胀,故随碳含量增加,凝固时体积收缩减小,如图 1.5 所示。

2. 铸件的缩孔和缩松

(1) 缩孔和缩松的形成

液态合金充满型腔后,在冷却凝固过程中,若液态收缩和凝固收缩所缩减的体积得不到补足,则在铸件的最后凝固部位会形成一些孔洞。按照孔洞的大小和分布,可将其分为缩孔和缩松两类。

缩孔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。

缩松是指分散在铸件某些区域内的细小孔洞。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 缩孔主要出现在金属在恒温或很窄温度范围内结晶、铸件壁呈逐层凝固方式的条件下,如图 1.6 所示。液态合金充满型腔(见图 1.6(a))后,由于铸型的吸热,靠近型腔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(见图 1.6(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(见图 1.6(c))。至内部完全凝固,在铸件上部形成缩孔(见图 1.6(d))。继续冷却至室温,整个铸件产生固态收缩,缩孔的绝对体积略有减小(见图 1.6(e))。

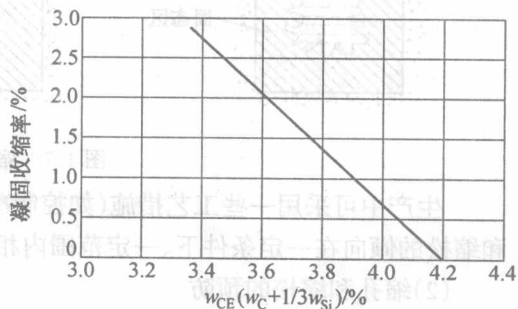


图 1.5 灰铸铁的凝固收缩率与碳含量的关系

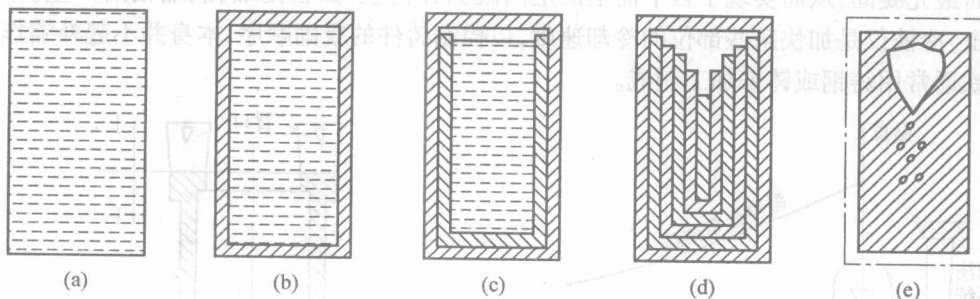


图 1.6 缩孔形成过程示意图

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 缩松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 1.7 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。

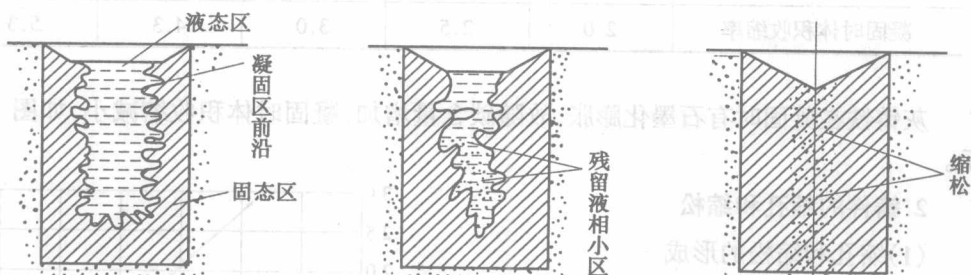


图 1.7 缩松形成示意图

生产中可采用一些工艺措施(如控制冷却速度)来控制铸件的凝固方式,使产生缩孔和缩松的倾向在一定条件下、一定范围内相互转化。

(2) 缩孔和缩松的预防

缩孔和缩松都会使铸件的力学性能下降,缩松还可使铸件因渗漏而报废。因此,必须采取适当的工艺措施,防止缩孔和缩松的产生。

防止产生缩孔的有效措施,是使铸件实现“定向凝固”。所谓定向凝固,是在铸件可能出现缩孔的厚大部位,通过安放冒口等工艺措施,使铸件上远离冒口的部位最先凝固,如图 1.8 I 区,然后是靠近冒口的部位凝固,如图 1.8 II、III 区,冒口本身最后凝固。按照这样的凝固顺序,先凝固部位的收缩,由后凝固部位的金属液来补充;后凝固部位的收缩,由冒口中的金属液来补充,从而使铸件各个部位的收缩均能得到补充,而将缩孔转移到冒口之中。冒口为铸件的多余部分,在铸件清理时去除。

为了实现定向凝固,在安放冒口的同时,还可在铸件上某些厚大部位增设冷铁。如图 1.9 所示,铸件的厚大部位不止一个,仅靠顶部冒口,难以向底部的凸台补缩,因此,在该凸台的型壁上安放了两块冷铁。冷铁加快了铸件在该处的冷却速度,使厚度较大的凸台反而最先凝固,从而实现了自下而上的定向凝固,防止了凸台处缩孔、缩松的产生。可以看出,冷铁仅是加快某些部位的冷却速度,以控制铸件的凝固顺序,本身并不起补缩作用。冷铁通常用铸钢或铸铁加工制成。

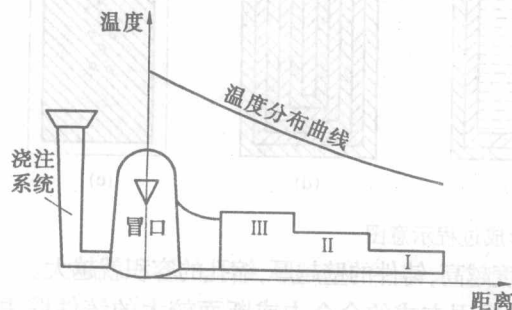


图 1.8 定向凝固示意图

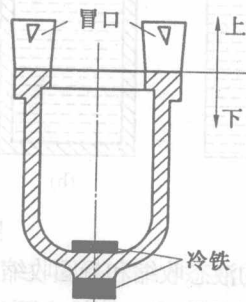


图 1.9 冷铁的应用

正确判断铸件上缩孔或缩松可能产生的部位,是合理设置冒口和冷铁的重要依据。在实际生产中,常以“凝固等温线法”和“内切圆法”近似找出缩孔的部位,如图 1.10 所示,图中等温线未曾通过的铸件中心部位和内切圆直径最大处,即为容易产生缩孔的热节。近年来,日趋成熟的计算机凝固数值模拟技术,可以帮助预测缩孔或缩松产生的位置。

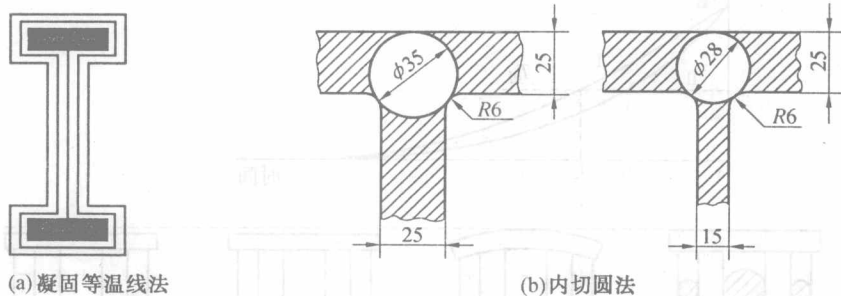


图 1.10 缩孔位置的确定

采用定向凝固,虽然可以有效防止铸件产生缩孔,但却耗费许多金属和工时,增加铸件成本。同时,定向凝固加大了铸件各部分之间的温度梯度,使铸件的变形和裂纹倾向加大。因此,定向凝固主要用于体收缩大的合金,如铝青铜、硅合金和铸钢等。

对于结晶温度范围很宽的合金,由于倾向于糊状凝固,结晶开始之后,发达的树枝状骨架布满了整个截面,使冒口的补缩通道严重受阻,因而难以避免缩松的产生。因此,选用近共晶部分或结晶温度范围较窄的合金,是防止缩松产生的有效措施。此外,加大铸件的冷却速度,或加大结晶压力,可达到部分防止缩松的效果。

3. 铸造应力

铸件在凝固之后的继续冷却过程中,若固态收缩受到阻碍,将会在铸件内部产生内应力。这些内应力有的是在冷却过程中暂存的,有的则一直保留到室温,称为残余内应力。铸造内应力有热应力和机械应力两类,它们是铸件产生变形和裂纹的基本原因。

(1) 热应力的形成

由于铸件壁厚不均匀,各部分冷却速度不同,以致在同一时期铸件各部分收缩不一致而引起。

为了分析热应力的形成,首先必须了解金属自高温冷却到室温时应力状态的变化。固态金属在弹-塑临界温度以上的较高温度时,处于塑性状态,在应力作用下会产生塑性变形,变形之后,应力可自行消除。而在弹-塑临界温度以下,金属呈弹性状态,在应力作用下发生弹性变形,变形之后,应力仍然存在。

如图 1.11(a)所示,该铸件中的杆I较粗,杆II较细。当铸件处于高温阶段(图中 $t_0 \sim t_1$ 间),两杆均处于塑性状态,尽管两杆的冷却速度不同,收缩不一致,但瞬时的应力均可通过塑性变形而自行消失。继续冷却后,冷却较快的杆II已进入弹性状态,而粗杆I仍处于塑性状态(图中 $t_1 \sim t_2$ 间)。由于细杆II冷却快,收缩大于粗杆I,所以细杆II受拉伸,粗杆I受压缩(见图 1.11(b)),形成了暂时内应力,但这个内应力随粗杆I的微量塑性变形(压短)而消失(见图 1.11(c))。当进一步冷却到更低温度时(图中 $t_2 \sim t_3$),已被塑性压短的粗杆I处于弹性状态,此时,尽管两杆长度相同,但所处的温度不同。粗杆I的温度较高,还会进行较大的收

缩,细杆II的温度较低,收缩已趋停止。因此,粗杆I的收缩必然受到细杆II的强烈阻碍,于是,细杆II受压缩,粗杆I受拉伸,直到室温,形成残余内应力(图 1.11(d))。

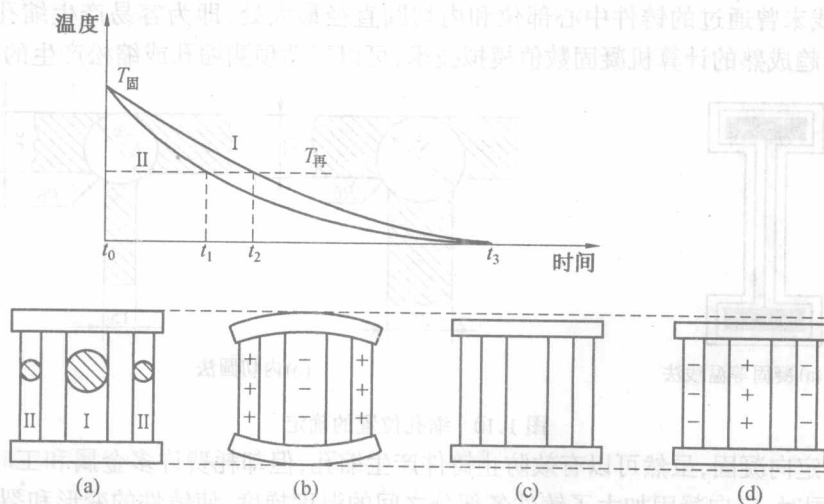


图 1.11 热应力的形成

+ 表示拉应力 - 表示压应力

由此可见,不均匀冷却使铸件的厚壁或心部受拉应力,薄壁或表层受压应力。铸件的壁厚差别越大,合金的线收缩率越高,弹性模量越大,热应力也越大。

(2) 机械应力的形成

机械应力是合金的线收缩受到铸型或型芯的机械阻碍而形成的内应力,如图 1.12 所示。机械应力使铸件产生拉伸或切应力是暂时存在的,在铸件落砂之后,这种内应力便可自行消除。但机械应力在铸型中可与热应力共同起作用,增大了某些部位的拉应力,增加了铸件产生裂纹的倾向。

(3) 减小应力的措施

在铸造工艺上采用“同时凝固原则”,尽量减小铸件各部位间的温度差,使铸件各部位同时冷却凝固,可有效地减小热应力。如在铸件的厚壁处加冷铁,并将内浇道设在薄壁处,如图 1.13 所示。

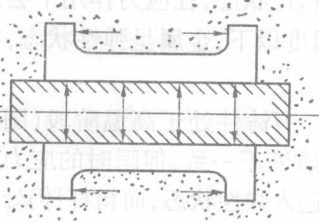


图 1.12 机械应力

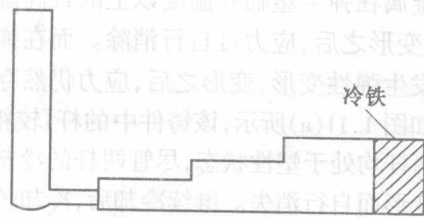


图 1.13 铸件的同时凝固原则

采用该原则容易在铸件中心区域产生缩松,组织不致密,所以该原则主要用于凝固收缩小的合金(如灰铸铁),以及壁厚均匀、结晶温度范围宽、但对致密性要求不高的铸件等。

改善铸型和型芯的退让性,以及浇注后早开型,可以有效减小机械应力。另外,将铸件加热到 $550 \sim 650^{\circ}\text{C}$ 之间,进行去应力退火可消除残余内应力。

4. 铸件的变形

对于厚薄不均匀、截面不对称,以及细长的杆类、板类及轮类铸件,当铸造应力超过铸件材料的屈服点时,往往产生翘曲变形。如图 1.14 所示的框架型铸件,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 总是力图缩短,杆 II 总是力图伸长,如果连接两杆的横梁刚度不够,便会出现翘曲变形。变形使铸造应力重新分布,残留应力会减小一些,但不可能完全消除。

如图 1.15 所示的 T 形梁铸钢件,当板 I 厚、板 II 薄时,浇注后板 I 受拉伸、板 II 受压缩。各自都有力图恢复原状的趋势,板 I 力图缩短,板 II 力图伸长,若铸钢件刚度不够,将发生板 I 内凹、板 II 外凸的变形(见图 1.15(a))。反之,当板 I 薄、板 II 厚时,将发生反向翘曲(见图 1.15(b))。

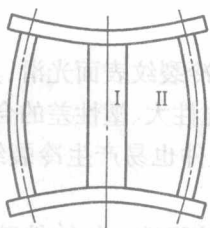


图 1.14 框架铸件的变形

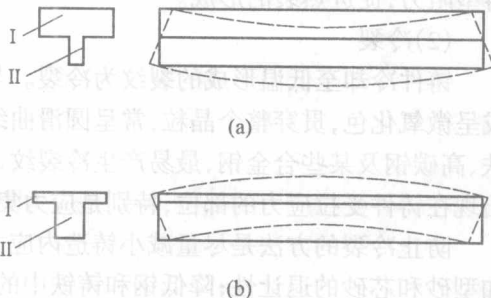


图 1.15 T 形梁铸钢件的变形示意图

为了防止铸件翘曲变形,在制造模样时,按铸件可能产生变形的反方向做出模样,使铸件变形后的结果正好将模样的变形量抵消,得到符合设计要求的铸件。这种在模样上做出的预变形量称为反变形量。

如图 1.16 所示的箱体,壁厚虽均匀,但内部冷却较慢,外部冷却较快,因此箱体壁将发生向外突出变形,模样反变形量 f 应向内侧凸起。

铸后去应力退火可以有效防止铸件在随后的机加工过程中产生变形。

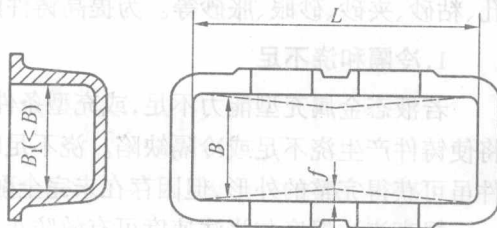


图 1.16 箱体件反变形量方向

5. 铸件的裂纹

当铸造内应力超过金属材料的抗拉强度时,铸件便产生裂纹,裂纹是严重的铸件缺陷,必须设法防止。根据产生裂纹温度的不同,裂纹可分为热裂和冷裂两种。

(1) 热裂

凝固后期,高温下的金属强度很低,如果金属较大的线收缩受到铸型或型芯的阻碍,