

 高职高专“十二五”规划教材

金属热成形技术基础

杜 伟 公永建 主 编

UNSHU
RECHENGXING JISHU JICHU



化学工业出版社

高职高专“十二五”规划教材

金属热成形技术基础

杜 伟 公永建 主 编
程 芳 崔国明 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是根据教育部制定的《高职高专教育专业人才培养目标及规格》和《教育部关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》等文件精神,结合相关教学大纲及高职高专学生实际情况编写而成的。

本书从高职高专教育培养应用型人才的目标出发,按照职业岗位群应掌握的知识 and 能力的需要进行编写,以能力培养为核心,以企业生产铸造件、锻压件及焊接件的生产过程所需知识为主线,内容包括铸造成形、锻压成形、焊接成形、机械零件的选材及毛坯的选择四部分,每章包括教学目标、本章小结及课后复习题。

本书主要作为高等专科学校、高等职业学校、成人高校、普通本科院校举办的二级职业技术学院机类或近机类专业的教材,也可作为中等职业技术学院、民办高校等相关专业作为培训教材及工程技术人员参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

金属热成形技术基础/杜伟,公永建主编. —北京:
化学工业出版社,2013.7
高职高专“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-17356-0

I. ①金… II. ①杜…②公… III. ①热处理-高等
职业教育-教材 IV. ①TG15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 101232 号

责任编辑:高 钰
责任校对:宋 玮

文字编辑:项 激
装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司
装 订:三河市万龙印装有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 10 1/4 字数 249 千字 2013 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:22.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书是根据教育部制定的《高职高专教育专业人才培养目标及规格》和《教育部关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》等文件精神,结合相关教学大纲及高职高专学生实际情况编写而成的,是机械类、近机类相关专业的通用教材。

本书以高职高专教育培养应用型人才的目标为指导思想,实用性为宗旨,强化应用为教学重点的原则,在基础理论知识方面以必需、够用为度,适当删减或淡化了一些理论性较强的内容。编写内容力求满足职业岗位群应掌握的知识和能力,突出重点、理论联系实际,在编写过程中广泛吸纳国内企业热成形加工的成熟技术和生产经验,使学生学习后能够解决产品在设计、制造过程中遇到的问题,为后续课程的学习和从事机械制造等相关岗位的工作奠定基础。

本书以金属热成形加工为主线,内容包括铸造成形、锻压成形、焊接成形、机械零件的选材及毛坯的选择四部分,在每章均有教学目标、本章小结及复习思考题,教师可以根据具体章节有目的地进行教学和布置作业,使学生能够巩固所学知识,培养分析问题、解决实际问题的能力。

本书由杜伟、公永建任主编,程芳、崔国明任副主编。参加本书编写的还有邓想、刘涛和河南省新乡海滨药业有限公司杜宇。其中程芳、崔国明、刘涛编写第一章,杜伟编写第二章,公永建编写第三章,杜宇、邓想编写第四章。本书由翟德梅教授担任主审。

本书主要作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校、普通本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校机类或近机类专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

在本书编写过程中得到河南机电高等专科学校各级领导及同事的支持和热情帮助,在此一并表示衷心感谢!

尽管我们在编写过程中已经尽了最大努力,但由于水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者
2013 年 4 月

目 录

绪论	1	二、冷塑性变形对金属组织及性能的影响	52
一、金属热成形技术的作用与地位	1	三、回复与再结晶	53
二、热成形技术的发展	1	四、金属的热加工	54
三、本课程的性质、任务和学习方法	2	第二节 金属的锻压性能	55
第一章 铸造成形	3	一、金属的本质	55
第一节 合金的铸造性能	4	二、变形条件	56
一、合金的流动性	4	第三节 自由锻	57
二、合金的收缩	5	一、自由锻的特点	57
三、合金的吸气性	9	二、自由锻的基本工序	57
第二节 砂型铸造	10	三、自由锻工艺规程的制订	59
一、砂型铸造的造型方法	10	四、自由锻锻件的结构工艺性	64
二、砂型铸造工艺设计	14	第四节 模锻	65
三、铸造实例分析	20	一、锤上模锻	65
四、常用铸造合金的生产特点	21	二、胎模锻	69
第三节 铸件的结构工艺性	25	三、压力机上模锻	70
一、砂型铸造工艺对铸件结构的要求	25	第五节 锻件中常见的缺陷及产生原因	72
二、合金铸造性能对铸件结构的要求	26	一、加热过程中产生的缺陷	73
第四节 特种铸造	28	二、自由锻锻件中常见的缺陷及产生原因	73
一、熔模铸造	28	三、模锻件中常见的缺陷及产生原因	75
二、金属型铸造	30	第六节 板料冲压	76
三、压力铸造	31	一、板料冲压的基本工序	76
四、低压铸造	32	二、冲模的分类及结构	79
五、离心铸造	33	三、冲压件的结构工艺性	81
六、实型铸造	33	第七节 其他压力加工方法	82
七、陶瓷型铸造	35	一、挤压成形	82
第五节 铸件中常见的缺陷及质量检验	36	二、轧制成形	84
一、铸件中常见的缺陷及产生原因	36	三、拉拔	84
二、铸件的质量检验	38	第八节 锻压成形新技术	85
第六节 铸造成形新技术	42	一、精密模锻	85
一、凝固理论推动的铸造新技术	42	二、超塑性成形	86
二、造型技术的新发展	43	三、液态模锻	86
三、计算机技术推动铸造的新发展	44	四、精密冲裁	87
第七节 常用铸造方法比较	45	本章小结	87
本章小结	46	复习思考题	87
复习思考题	46	第三章 焊接成形	92
第二章 锻压成形	50	第一节 焊条电弧焊	93
第一节 金属的塑性变形	50		
一、金属塑性变形的实质	50		

一、焊接电弧	93	三、焊缝的布置	122
二、电弧焊的冶金过程	94	四、常见焊接坡口的形式	123
三、焊条	94	五、常见焊缝的标注方法	128
四、焊接接头	97	第七节 焊接成形新技术	132
五、焊接应力与变形	99	一、搅拌摩擦焊	132
第二节 其他熔焊方法	102	二、电子束焊	133
一、埋弧焊	102	三、激光焊	134
二、气体保护焊	103	第八节 焊接方法的选择	134
三、气焊	105	本章小结	136
四、电渣焊	106	复习思考题	136
五、等离子弧焊	107	第四章 机械零件的选材及毛坯的	
第三节 压焊与钎焊	108	选择	139
一、压焊	108	第一节 机械零件的失效	139
二、钎焊	110	一、零件的失效	139
第四节 常用金属材料的焊接	111	二、零件失效的形式及原因	139
一、金属材料的焊接性	111	第二节 机械零件的选材	140
二、碳钢的焊接	112	一、零件选材的一般原则	141
三、合金钢的焊接	113	二、选材的方法及步骤	145
四、铸铁的焊补	114	三、典型零件的选材	146
五、有色金属的焊接	115	第三节 零件毛坯的选择	150
第五节 焊接件中常见的缺陷	117	一、毛坯选择的原则	150
一、焊接缺陷	117	二、常用毛坯的特点及生产成本比较	152
二、常见焊接缺陷的产生原因和防止		三、常用机械零件毛坯的选择	152
措施	117	本章小结	153
第六节 焊接件的结构设计	120	复习思考题	153
一、焊接结构材料的选择	120	参考文献	156
二、焊接接头形式的选择	121		

绪 论

一、金属热成形技术的作用与地位

任何机械设备都是由相应的几个乃至千万个零件组成的。机械产品的制造过程，一般是先将工程材料制成零件的毛坯或半成品，并进行切削加工制成零件。再将零件进行组装，即得到相应的机械产品。

在产品的制造过程中，合理选择毛坯种类和成形技术具有重大意义。为了使金属获得所需的形状和结构，需要对金属材料作进一步加工处理，这一过程称为材料的成形，其成形方法可分为热加工成形（简称热成形）和冷加工成形（简称冷成形）。

热成形主要是将金属生产成零件毛坯的过程。金属材料的热成形是材料的重要加工工序，主要包括铸造成形、锻压成形、焊接成形。经过热成形，材料成为零件或毛坯，它一方面使材料获得一定的形状、尺寸，同时赋予材料最终的成分、组织和性能。

铸造成形是将所需的金属原材料及辅料，按照一定的配比装入熔炼炉中，用一定的方法进行加热使其熔化，得到熔融的金属液；然后将金属液浇注到与零件的形状、尺寸相适应的铸型型腔中，冷却凝固后获得零件或毛坯的生产方法。铸造成形的特点是使金属一次成形，能够制成形状复杂特别是具有复杂内腔的铸件，如内燃机的汽缸体和汽缸盖、机床的床身和箱体、涡轮机的机壳等复杂机件，所用毛坯都是铸造出来的。

压力加工是在外力作用下使金属产生塑性变形，从而获得具有一定形状、尺寸和力学性能毛坯或零件的加工方法。压力加工的基本生产方式有锻造、冲压、轧制、拉拔、挤压等。它是生产各种型材、毛坯或零件的主要成形方法。各种车辆、飞行器、轮船、枪炮、机器设备以及日常生活中所用的厨具等很多零部件，都是采用压力加工的方法生产出来的。

焊接成形是指通过加热或加压，或两者并用，并且用或不用填充材料，使焊件达到原子结合的一种加工方法。它的连接强度高，方法多样，操作灵活，是材料成形中必不可少的成形方法。焊接在桥梁、船舶、建筑、机械制造等行业中有广泛的应用。

二、热成形技术的发展

金属材料的使用及其加工方法的每一次改进和发展都是人类社会发展的一个里程碑，它象征着人类在征服自然、发展社会生产力方面迈出了具有深远意义的一步，促进了整个社会生产力更进一步的发展。

金属热成形技术是人类在长期生产实践中发展起来的一门学科。我国是世界上使用金属材料最早的国家之一，早在 6000 年前的新石器时代我国就已会冶炼和使用黄铜。大量出土的青铜器说明在商代（公元前 1562～公元前 1066 年）我国的青铜冶炼、铸造技术就已达到了很高的水平，如在河南省安阳出土的司母戊鼎，体积庞大、花纹精巧、造型精美，是迄今为止世界上最古老的大型青铜器，在当时的条件下要浇注出这样庞大的金属器物，如果没有科学的劳动分工和先进的铸造技术，是不可能制造出来的。

公元前 6 世纪的春秋末期，我国就已出现了人工冶炼的铁器，比欧洲出现生铁早 1800 多年，东汉时期我国就掌握了炼钢技术，比其他国家早 1600 多年。如 1953 年在我国河北省

兴隆地区发掘出土用来铸造农具的铁模子,说明铁制农具早在我国春秋战国时期就已大量应用于农业生产中;1965年在湖北省江陵出土的越王勾践青铜剑,虽然在地下深埋了2000多年,但是这把剑在出土时却没有一点锈斑,完好如初,锋利无比,说明当时已经掌握了金属的冶炼、锻造、热处理及防腐蚀等先进技术;在河南省辉县出土的玻璃阁战国墓中,殉葬铜器的耳和足是用钎焊方法与本体连接在一起的,说明在战国时期我国就已经采用了焊接技术。

与此同时,我国劳动人民在长期的生产实践中也总结出了一套比较完整的金属热成形技术的经验,如先秦时代的《考工记》、宋代沈括的《梦溪笔谈》、明代宋应星的《天工开物》等著作中,都有冶炼、铸造、锻造等各种金属加工方法的记载。

历史事实充分说明,我国古代劳动人民在金属材料热成形技术方面取得了辉煌的成就,为世界文明和人类的进步做出了巨大贡献。但是到了近代,由于封建王朝的长期统治和闭关自守政策,严重阻碍和束缚了我国生产力技术的发展,特别是鸦片战争以后的几十年间外国的侵略和剥削,使我国工业和科学技术水平一直处于落后状态。

近年来,我国在金属热成形技术研究方面有了突飞猛进的发展,推动了机械制造、矿山冶金、交通运输、石油化工、电子仪表、航天航空等现代化工业的发展。原子弹、氢弹、导弹、人造地球卫星、宇宙飞船的发射等重大项目的研究与试验成功,都标志着我国在金属热成形技术方面的发展达到了世界先进水平。

随着社会科技水平的不断提高,一些新工艺、新技术应运而生,现代制造技术不断被采用。到目前为止,定向凝固技术、快速成形技术、高速锻锤、精密模锻、气体保护自动焊、激光焊、等离子焊等新的成形技术,以及计算机数控(CNE)、柔性制造系统(FMS)、计算机辅助设计和计算机辅助制造(CAD/CAM)等,已经引领加工制造业的新潮流。传统的热成形方法,在其自身技术不断发展的同时,溶入新技术、新工艺,必将构筑人类文明的新辉煌。

三、本课程的性质、任务和学习方法

“金属热成形技术基础”是一门综合性的职业基础课,是高职高专机械类、近机械类专业学生的必修课。通过本课程的学习,应达到以下基本要求:

- ① 掌握金属热成形技术和板料冲压的基本原理、特点和应用范围;
- ② 了解金属常用热成形方法所用主要设备、工具的基本工作原理,熟悉其使用范围;
- ③ 了解零件失效的主要形式,熟悉毛坯或零件的结构工艺性,并具有设计毛坯和零件结构的初步能力;
- ④ 了解与本课程有关的新技术、新工艺、新设备、新材料的发展概况。

本课程具有较强的实践性,学习时应注重前后知识的衔接、分析、理解和运用。为了提高工作中分析问题、解决问题的能力,要注意理论与实践相结合;为保证教学质量,本课程应安排在热成形实习之后学习,才能达到预期的学习目的和要求。

学习本课程时,应注意课前预习,并根据教学内容完成老师布置的课后复习题,以巩固所学知识,培养独立分析问题和解决问题的能力;学习过程中应联系热成形实习的相关内容,加深对理论课程的理解,提高学习效果。

第一章 铸 造 成 形

【教学目标】

本章主要介绍了铸造成形的原理、应用及铸件的结构工艺性，通过学习要达到以下目的。

- ① 了解铸造生产的特点及应用。
- ② 掌握砂型铸造的特点、合金的铸造性能及影响因素，会合理选择铸造合金、造型方法、分型面、浇注位置及绘制简单零件的铸造工艺图。
- ③ 熟悉常用特种铸造方法的特点及应用范围，初步具有分析铸件结构工艺性的能力。
- ④ 了解铸件中常见的缺陷、产生原因及铸件质量检验常用的方法。
- ⑤ 了解铸造成形新工艺、新技术及其发展趋势。

铸造是将液态金属浇注到相应的铸型中，待其冷却凝固后，以获得一定形状毛坯或零件的成形方法。用铸造方法生产出来的零件或毛坯统称为铸件。

铸造方法一般分为砂型铸造和特种铸造两大类。砂型铸造由于具有适应性强、生产准备简单等特点，因此是目前应用最为普遍的铸造方法，约占铸件总产量的 80% 以上；特种铸造，如熔模铸造、金属型铸造、压力铸造、低压铸造、离心铸造、实型铸造、陶瓷型铸造等，也广泛应用于各特殊领域的生产。

铸造生产具有以下优点。

① 用铸造方法可以生产出各种尺寸和形状复杂的铸件，尤其是具有复杂内腔结构的铸件。铸件的轮廓尺寸可小至几毫米，大至几十米；质量可从几克至数百吨。

② 铸造生产适应性广。工业中常用的金属材料，如碳素钢、合金钢、铸铁、青铜、黄铜、铝合金等，都可以用于铸造。其中在生产中应用广泛的铸铁，只能用铸造的方法来制造毛坯。

③ 铸件的形状、尺寸与零件接近，可以节省金属材料和减少切削加工工时。精密铸件甚至能够省去切削加工，直接用于产品装配。

④ 铸造所用的原材料来源广泛，价格低廉，可直接利用报废的零件、废钢和切屑等。一般情况下，铸造设备需要的投资较少、生产周期短，因此，铸造生产的成本较低。

但是铸造生产也存在以下缺点。

① 铸件的组织疏松，晶粒粗大，内部易产生缩孔、缩松、气孔等缺陷。因此，对于承受动载荷的重要零件，一般不选用铸件作为零件毛坯。

② 铸件的力学性能没有锻件高，特别是冲击韧性较差。

③ 砂型铸造的工序较多，有些工艺过程难以精确控制，因此铸件质量不够稳定，废品率较高。

④ 砂型铸件表面较粗糙，尺寸精度不高，工人劳动强度大，劳动条件较差。

随着铸造技术的发展，新材料、新工艺、新技术和新设备的推广和使用，铸件质量和铸造生产率得到很大提高，劳动条件也得到显著改善，因此铸造生产已成为制造具有复杂结构金属件最灵活、最经济的成形方法，在工业生产中得到广泛应用。在各类机械产品中，铸件

质量占整机质量的比重很大，如在机床、内燃机、重型设备中占 70％～90％，在汽车中占 40％以上，在拖拉机生产中占 50％～70％。

第一节 合金的铸造性能

合金的铸造性能是指合金在铸造过程中所表现出来的工艺性能，是金属在铸造成形过程中容易获得优质铸件的能力。合金的铸造性能对铸件质量、铸造工艺及铸件结构影响很大。通常用合金的流动性、收缩性、氧化性、吸气性、偏析和热裂倾向性等来衡量。

一、合金的流动性

液态金属充满铸型型腔的能力称为流动性。流动性好的合金不仅易于制造薄壁和形状复杂的铸件，而且有利于液态金属在铸型中凝固收缩时得到补缩，也有利于气体和非金属夹杂物等从液态金属中排出。相反，流动性不好的合金，铸件容易产生浇不足、冷隔、气孔、夹渣和缩松等缺陷。

1. 合金流动性的测定

合金的流动性通常是以螺旋形试样的长度来衡量的，如图 1-1 所示。

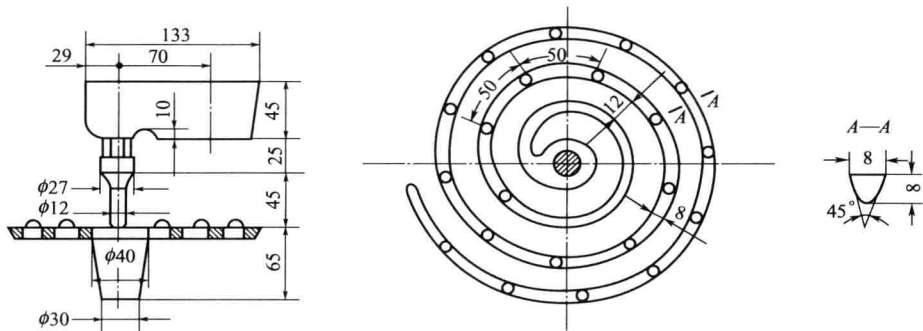


图 1-1 合金流动性的测定

在测定合金流动性时，将液态金属浇注到螺旋形标准试样所形成的铸型中，待其冷却凝固后，测出浇注试样的实际螺旋线长度。显然，在相同铸型及浇注条件下，浇出的螺旋形试样越长，表示该合金的流动性越好。常用合金的流动性见表 1-1。

表 1-1 常用合金的流动性

合金	化学成分	铸型种类	浇注温度 $t/^\circ\text{C}$	螺旋线长度 l/mm
灰铸铁	$w_{(\text{C}+\text{Si})}=6.2\%$	砂型	1300	1500
	$w_{(\text{C}+\text{Si})}=5.9\%$	砂型	1300	1300
	$w_{(\text{C}+\text{Si})}=5.2\%$	砂型	1300	1000
	$w_{(\text{C}+\text{Si})}=4.2\%$	砂型	1300	600
铸钢	$w_{\text{C}}=0.4\%$	砂型	1600	100
			1640	200
铝硅合金		金属型(300℃)	680~720	700~800
锡青铜	$w_{\text{Sn}}=9\%\sim 11\%, w_{\text{Zn}}=2\%\sim 4\%$	砂型	1040	420
硅黄铜	$w_{\text{Si}}=1.5\%\sim 4.5\%$	砂型	1100	1000

2. 影响合金流动性的因素

合金流动性的大小与合金的种类、化学成分、浇注条件和铸型特点等因素有关。

(1) 合金的种类和化学成分 不同种类合金的熔点、导热性、合金液的黏度等物理性能不同, 因此具有不同的流动性。在常用的铸造合金中, 灰铸铁、硅青铜的流动性较好, 铸钢较差, 铝合金居中。

在同种合金中, 成分不同的铸造合金由于具有不同的结晶特点, 对流动性的影响也不相同。其中纯金属和共晶成分的合金流动性最好。这是因为它们是在恒温下进行结晶的, 根据温度的分布规律, 结晶是从表面开始向中心逐层凝固, 结晶前沿较为平滑, 对尚未凝固的金属流动阻力小, 因而流动性较好, 如图 1-2 所示。其他合金的凝固过程都是在一定温度范围内进行的, 在这个温度范围内, 同时存在固、液两相, 固态的树枝状晶体会阻碍液态金属的流动, 从而使合金的流动性变差。合金的结晶温度范围越大, 流动性越差, 如图 1-3 所示。因此, 在选择铸造合金时, 应尽量选择靠近共晶成分的合金。

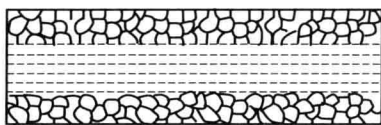


图 1-2 在恒温下凝固

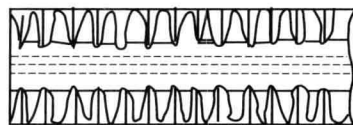


图 1-3 在一定温度范围内凝固

(2) 浇注条件

① 浇注温度 浇注温度越高, 液态金属中的热量越多, 在同样的冷却条件下, 金属保持液态的时间越长, 金属液停止流动前传给铸型的热量越多, 金属的冷却速度降低, 因而提高了合金的流动性。但浇注温度过高, 会使合金的吸气量和总收缩量增大, 铸件容易产生缩孔、缩松、粘砂和气孔等缺陷。因此, 在保证合金流动性的前提下, 应尽量降低浇注温度; 但对于形状复杂的薄壁铸件, 为避免产生冷隔和浇不足等缺陷, 浇注温度可略高些。灰铸铁的浇注温度一般为 $1250 \sim 1350^{\circ}\text{C}$, 壁厚小于 10mm 的薄壁铸件, 其浇注温度为 $1340 \sim 1430^{\circ}\text{C}$; 工程用铸造碳钢的浇注温度为 $1500 \sim 1550^{\circ}\text{C}$; 铝合金的浇注温度为 $680 \sim 780^{\circ}\text{C}$; 铜合金的浇注温度为 $980 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 。

② 浇注压力 液态金属在流动方向上受到的压力越大, 其流动性越好。砂型铸造时, 可适当提高直浇道高度, 以提高合金的流动性; 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, 使合金的流动性提高。

③ 浇注系统的结构 浇注系统结构越复杂, 合金的流动阻力就越大, 流动性越低。因此在设计浇注系统时, 要合理布置内浇道在铸型中的位置, 选择合适的浇注系统结构及各部分(直浇道、横浇道和内浇道)的截面积。

(3) 铸型特点 铸型中凡能增加合金流动阻力和冷却速度、降低流速的因素, 均能降低合金的流动性。例如, 型腔过窄, 型砂水分过多或透气性不好, 铸型材料导热性过大等, 都会降低合金的流动性。为改善铸型的充型条件, 铸件的壁厚应大于规定的“最小壁厚”, 铸件形状应力求简单, 并在铸型工艺上采取相应措施, 如增设出气口及烘干铸型等均可提高合金的流动性。

二、合金的收缩

铸造合金从浇注、凝固直至冷却到室温, 其体积或尺寸缩减的现象, 称为收缩。收缩是

铸造合金本身固有的物理属性，是铸件产生缩孔、缩松、裂纹、变形、铸造应力的基本原因。

1. 收缩的三个阶段

合金从液态冷却到室温的过程中要经过三个相互联系的阶段，如图 1-4 所示。

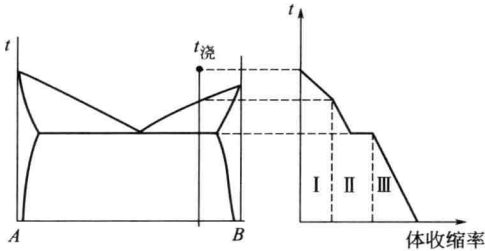


图 1-4 合金收缩的三个阶段
I—液态收缩；II—凝固收缩；III—固态收缩

- ① 液态收缩 从浇注温度到凝固开始温度（即液相线温度）之间的收缩。浇注温度越高，液态收缩越大。
- ② 凝固收缩 从凝固开始温度到凝固终止温度（即固相线温度）之间的收缩。结晶温度范围越大，凝固收缩越大。
- ③ 固态收缩 从凝固终止温度冷却到室温之间的收缩。

液态收缩和凝固收缩表现为液面的降低，通常用体收缩率表示。它是铸件产生缩孔和缩松的基本原因。

固态收缩表现为铸件各个方向尺寸的缩小，对铸件的形状和尺寸精度的影响最大，常用线收缩率表示。固态收缩是铸件产生铸造应力、变形和裂纹等缺陷的基本原因。

2. 影响收缩的因素

影响收缩的因素有化学成分、浇注温度、铸件结构和铸型条件等。

(1) 化学成分 不同种类、不同成分的合金其收缩率也不相同。在灰铸铁中的碳大部分以石墨形式存在，而石墨的比体积（单位质量的体积）大，因而石墨的析出会补偿一部分铸件的收缩，所以在铸铁中增加促进石墨形成的元素，均能使收缩减少，而增加阻碍石墨形成的元素，会使收缩增大。表 1-2 所示为几种铁碳合金的收缩率。

表 1-2 几种铁碳合金的收缩率

合金种类	含碳量/%	浇注温度/℃	液态收缩/%	凝固收缩/%	固态收缩/%	总体积收缩/%
铸造碳钢	0.35	1610	1.6	3	7.8	12.4
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

(2) 浇注温度 合金的浇注温度越高，过热度越大，液态收缩越大，总的收缩量越大。因此，在生产中多采用高温出炉和低温浇注的措施来减小收缩量。

(3) 铸件结构和铸型条件 铸件在凝固和冷却过程中的收缩并不是自由收缩，而是受阻收缩。这是由于铸件在铸型中各部位的冷却速度不同，彼此之间相互制约，对其收缩产生阻力，同时铸型和型芯对铸件收缩产生机械阻力，因此铸件的实际线收缩率比自由收缩时要小，所以在设计模样时，必须根据合金的种类、铸件的形状、尺寸等因素，选取合适的收缩率。

3. 收缩对铸件质量的影响

(1) 缩孔和缩松 液态金属在铸型内凝固过程中，若其体积收缩得不到及时补充，将在铸件最后凝固的部位形成孔洞，这种孔洞称为缩孔。缩孔分为集中缩孔和分散缩孔两类。通常所说的缩孔，主要是指集中缩孔，而分散缩孔一般称为缩松。

① 缩孔的形成过程 缩孔形成的过程如图 1-5 所示。在液态合金充满铸型后, 由于散热开始冷却, 并产生液态收缩。在浇注系统尚未凝固期间, 所减少的液态合金可以从浇口处得到补充, 铸型处液面不下降仍保持充满状态, 如图 1-5(a) 所示; 随着热量的不断散失, 原接近型腔表面的液态合金逐渐降低到凝固温度, 并凝固成一层硬壳, 如图 1-5(b) 所示; 温度继续下降, 铸件除产生液态收缩和凝固收缩外, 还有已凝固的外壳产生的固态收缩, 由于硬壳的固态收缩比壳内液态合金的收缩小, 此时又无液态合金来补充, 所以壳内液态合金的液面下降并与壳顶分离, 如图 1-5(c) 所示; 铸件继续冷却直至全部凝固成固态, 就在铸件上部形成了一个倒圆锥形的缩孔, 如图 1-5(d) 所示; 已形成缩孔的铸件自凝固终止温度冷却到室温, 因固态收缩使其外形尺寸略有减少, 如图 1-5(e) 所示。

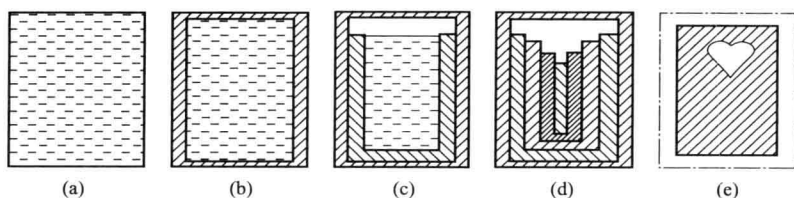


图 1-5 缩孔的形成过程示意

纯金属及靠近共晶成分的合金, 因其结晶温度范围较窄, 流动性较好, 易于形成集中缩孔。缩孔通常隐藏在铸件上部或最后凝固部位, 有时经切削加工才能暴露出来。

② 缩松的形成过程 缩松的形成过程如图 1-6 所示。当使用较大结晶温度区间的铸造合金时, 其结晶是在铸件截面上一定的宽度区域内同时进行的。液态金属首先从表层开始凝固, 凝固前沿呈树枝状结晶, 表面凹凸不平, 如图 1-6(a) 所示; 先形成的树枝状晶体彼此相互交错, 将液态金属分割成许多小的封闭区域, 如图 1-6(b) 所示; 在封闭区域内的液态金属凝固时的收缩由于得不到及时补充, 就会形成许多分散的缩孔即缩松, 如图 1-6(c) 所示。

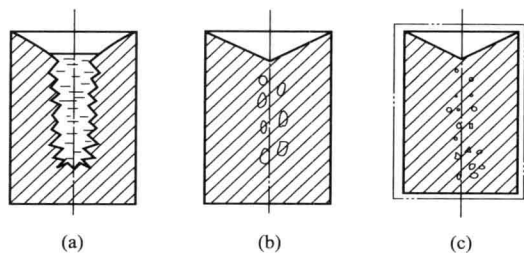


图 1-6 缩松的形成过程示意

铸造合金的结晶温度范围越大, 树枝状晶体越容易将液态金属分隔, 铸件越容易产生缩松。缩松隐藏在铸件内部, 从外部难以发现。当缩松与缩孔的体积相同时, 缩松的分布面积要比缩孔大得多。

(2) 缩孔和缩松的防止 缩孔与缩松不仅使铸件的力学性能显著下降, 还会影响铸件的致密性、物理性能和化学性能。因此, 在生产中要根据铸件技术要求, 采取适当的工艺措施, 使缩松尽量变为缩孔, 同时避免缩孔和缩松出现在铸件内部。防止产生缩孔和缩松的主要措施如下。

① 合理选择铸造合金 从缩孔和缩松的形成过程可知, 结晶温度范围越宽的合金, 越易形成缩松, 因此, 生产中应尽量采用接近共晶成分的或结晶温度范围窄的合金, 使铸件产生集中缩孔。

② 采用顺序凝固的原则 顺序凝固, 是使铸件按“薄壁→厚壁→冒口”的顺序进行凝固的过程。对于凝固收缩大或壁厚差别较大、易产生缩孔的铸件, 通过增设冒口或冷铁等一

系列措施,可使铸件远离冒口的部位先凝固,然后是靠近冒口部位凝固,最后才是冒口本身凝固,使铸件各个部位的凝固收缩均能得到液态金属的充分补缩,最后将缩孔转移到冒口之中。冒口为铸件的多余部分,在铸件清理时切除,即可得到无缩孔的铸件。图 1-7 所示为冒口补缩进行的顺序凝固。

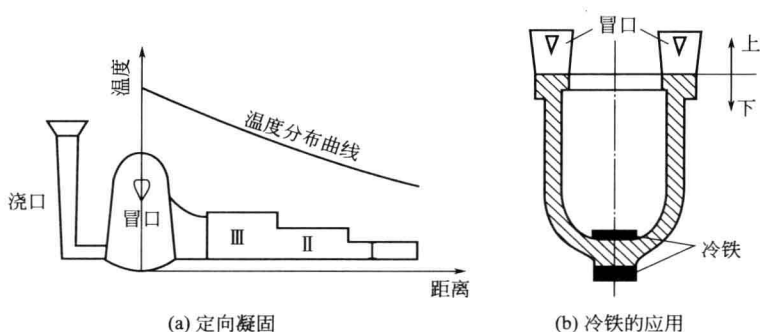


图 1-7 顺序凝固

4. 铸造应力

铸件在凝固和冷却过程中由于受阻收缩、温度不均和相变等因素引起的应力称为铸造应力。它是铸件产生变形、裂纹等缺陷的主要原因。

(1) 铸造应力的形成 铸造应力按其形成的原因不同可分为收缩应力、热应力和相变应力。

① 收缩应力 收缩应力是由于铸型、型芯等阻碍铸件收缩而产生的内应力,收缩应力的产生如图 1-8 所示。收缩应力一般使铸件受到拉应力的作用,这种应力是暂时的,当形成应力的因素一经消除,如铸件落砂、清理之后,收缩应力便会随之消失。

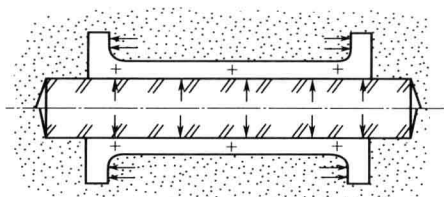


图 1-8 收缩应力的产生

② 热应力 热应力是由于铸件壁厚不均匀,各部分冷却速度、收缩量不均匀,相互阻碍收缩而引起的应力。在铸件落砂、清理后热应力仍存在于铸件中,因此是一种残余应力。图 1-9 为框架形铸件收缩应力的形成过程。铸件中杆 1 的直径比杆 2 大,刚凝固成固体时的状态如图 1-9(a) 所示,在冷却至室温的过程中,开始时杆 2 因散热快冷却速度大,沿长度方向收缩量大,受到杆 1 的阻碍而产生拉应力,杆 1 受到压应力的作用 [图 1-9(b)],但此时杆 1 温度较高,处于塑性状态,则杆 1 随杆 2 的收缩而产生塑性变形,应力随之消失 [图 1-9(c)];再继续冷却,杆 2 已冷至接近室温,已完成固态收

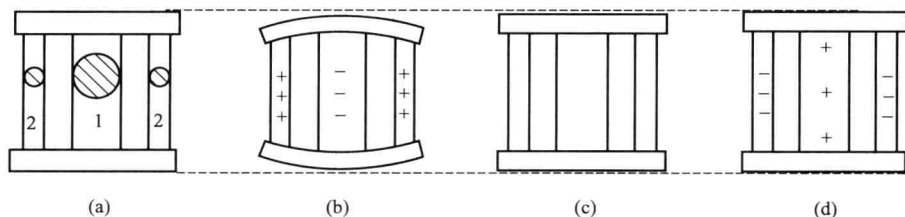


图 1-9 框架形铸件收缩应力的形成过程

1, 2—杆

缩,此时,杆1也进入弹性状态,但因温度高仍在继续收缩,因受到杆2阻碍而产生拉应力,而杆2受到压应力的作用[图1-9(d)]。

由此可见热应力将使铸件厚壁或心部受到拉应力,薄壁或表层受到压应力的作用。对于厚薄不均匀、截面不对称及细长的杆类、板类及轮状类铸件,较薄部分因受压应力的作用,产生外凸变形,而厚大部分受到拉应力的作用,产生内凹变形。T形铸件因厚薄不均而产生的变形如图1-10所示。

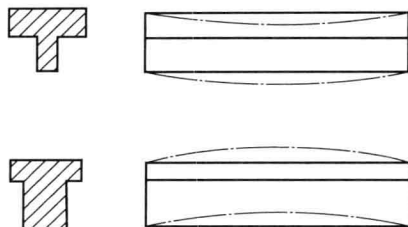


图 1-10 T形铸件因厚薄不均而产生的变形

③ 相变应力 相变应力是由于固态相变,造成各部分体积发生不平衡变化而引起的。

(2) 变形和裂纹 当铸造应力超过合金的屈服极限时,会产生变形。当铸造应力超过合金的抗拉强度时,铸件便会产生裂纹。

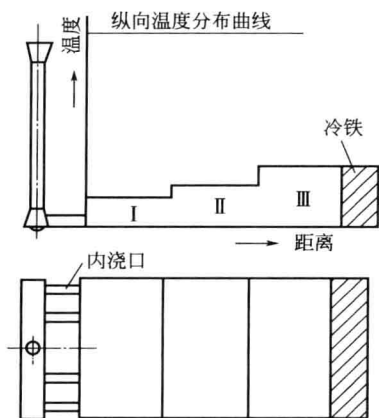


图 1-11 同时凝固

(3) 铸件变形及裂纹的防止 为了减小铸件变形、防止开裂,应合理设计铸件的结构,力求铸件壁厚均匀,形状对称;合理设计浇冒口、冷铁等,尽量使铸件均匀冷却;采用退让性好的型砂和芯砂;浇注后不要过早落砂;铸件在清理后进行去应力退火。

为了减小收缩应力,应提高铸型和型芯的退让性,如在型砂中加入适量的锯末或在芯砂中加入高温强度较低的黏结剂等,都可以减小铸件收缩时的阻力。

为减小热应力,应尽量减小在冷却过程中铸件各部分的温差,使其均匀地冷却。设计铸件时,应尽量使其壁厚均匀,在铸造工艺上应采用同时凝固原则,如图1-11所示。

对于细长、大而薄等易变形铸件可采取增加加强筋、反变形法等措施减少铸件的变形;对于重要精密铸件,在铸造后必须进行自然时效或人工时效处理消除铸件内应力,减小铸件在加工及使用过程中的变形量。

三、合金的吸气性

液态金属在高温下会吸收大量气体,在凝固过程中这些气体会随温度的降低而析出,从而在铸件内部形成析出气孔。析出气孔的形状一般为球形、椭圆形或梨形,内表面比较光滑、明亮或带有轻微氧化色,气孔的尺寸较小,分布面积较广,甚至遍布整个铸件截面,以最后凝固处、冒口附近和铸件拐角处最多。析出气孔破坏了金属的连续性,减少了承载的有效截面积,降低了铸件的力学性能,特别是冲击韧性和疲劳强度显著降低。

在铸造合金中铝合金易吸收气体,氢在液态铝中的溶解度比固态时大得多,如图1-12所示。铝合金熔液温度越高,吸收的氢也越多,当含碱金属杂质时,氢在铝液中的溶解度显著增加。

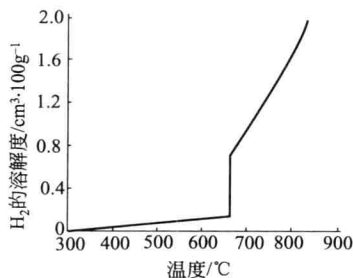


图 1-12 氢在纯铝中的溶解度

铸铝合金除熔炼时吸气外,在浇入铸型时也会产生吸气,进入铸型内的液态金属随温度下降,气体的溶解度下降,析出多余的气体,但有一部分受阻而不能逸出的气体会留在铸件

内部形成气孔，这就是通常所称的“针孔”。铸铝合金液中含氢量越高，铸件中产生的针孔也越多。铝铸件中针孔不仅降低了铸件的气密性、耐蚀性，还降低了合金的力学性能。要获得无气孔或少气孔的铝铸件，关键在于熔炼条件。在熔炼时添加覆盖剂保护，合金的吸气量就会大大减小。对铝熔液进行精炼处理，可有效控制铝液中的含氢量，减少析出气孔产生。

灰铸铁中也可能产生析出气孔，但比铝和铸钢少得多。铸铁件中析出的氢气孔有时呈圆形，但更多情况下是在靠近热节处呈狭长裂缝状，孔的表面光洁常有一层石墨薄膜。灰铸铁件中析出的氮气孔引起的裂纹与析出的氢气孔相似，但比较分散，厚断面一般比薄断面容易产生。与氢气孔一样，当铁水中含气量大时，形成大而圆的气孔。

防止析出气孔的基本途径是：①烘干和洁净炉料，使炉料入炉前不含水、油锈等污物；②减少金属液与空气的接触，并控制炉气为中性气氛；③有色金属应在熔剂层下进行熔炼，熔炼后期要进行精炼除气；④提高冷却速度及铸件凝固时的外部压力，阻止气体在冷却过程中的析出。

第二节 砂型铸造

砂型铸造是最基本、应用最广泛的一种铸造方法，其造型材料来源广泛、价格低廉，所用设备简单、操作方便、灵活，不受铸造合金种类、铸件形状和尺寸的限制，适合于各种规模的铸造生产。目前，我国砂型铸件约占全部铸件产量的80%以上。砂型铸造的基本工艺过程如图1-13所示，其主要工序为制造模样、制备造型（芯）材料、造型、造芯、合型、熔炼浇注、落砂、清理和检验等。

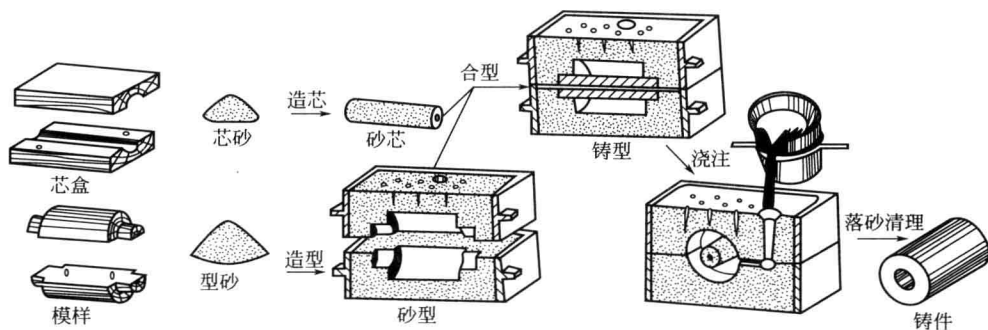


图 1-13 砂型铸造的生产过程

一、砂型铸造的造型方法

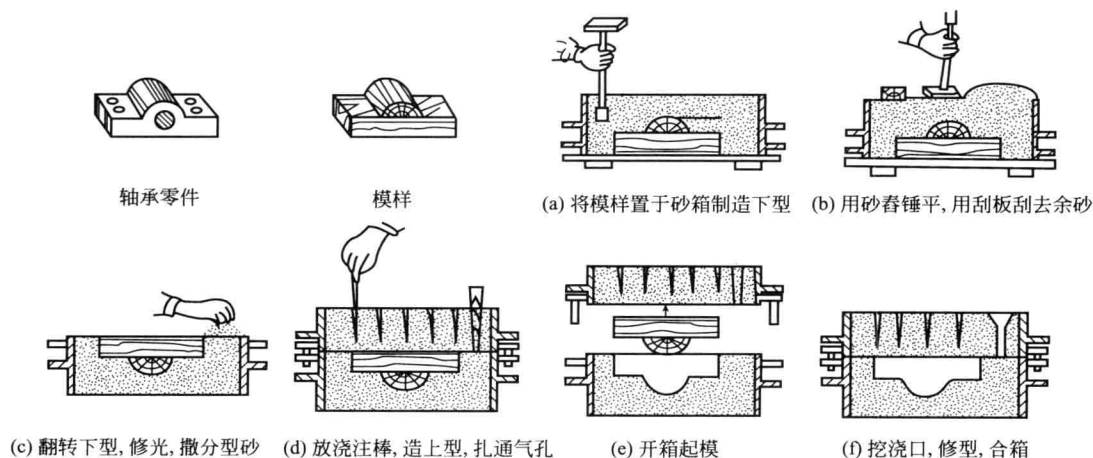
造型是指用型砂和模样等制造砂型的过程，是砂型铸造的最基本工序。造型对铸件的质量、生产效率和生产成本有很大影响。造型方法通常分为手工造型和机器造型两大类。

1. 手工造型

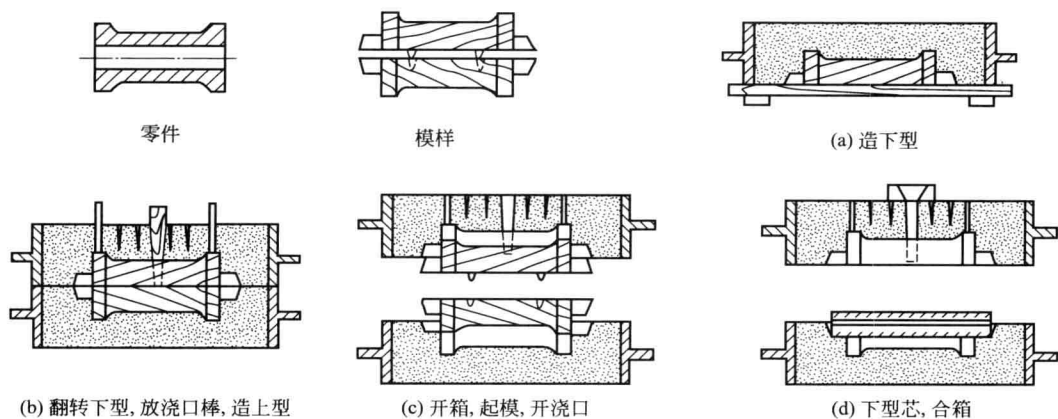
手工造型是指全部用手工或手动工具完成各造型工序的方法。手工造型具有操作灵活、适应性强、工艺装备简单、生产准备时间短、成本低等优点；但也存在铸件质量较差、生产效率低、劳动强度大、工作环境差、铸件质量不稳定的缺点，同时对工人的技术水平要求较高。手工造型目前主要用于单件、小批生产，特别是重型和形状复杂的铸件生产。

常用的手工造型方法可以分为以下几类。

(1) 整模造型 整模造型是将模样做成与零件形状相适应的整体模样进行造型的方法。其特点是把模样整体放在一个砂箱内,并以模样一端的最大表面作为铸型的分型面,这种造型方法操作简便、铸型简单,铸件不会产生错型缺陷。整模造型过程如图 1-14 所示。



(2) 分模造型 分模造型是将模样分为两半,造型时模样分别在上、下砂箱内进行造型的方法。这种造型方法操作简便,主要用于一些没有平整的表面,而且最大截面在模样中部,难以进行整模造型的铸件,但分模造型制作模样较麻烦,铸件容易出现错型缺陷。分模造型过程如图 1-15 所示。



(3) 挖砂造型 挖砂造型时模样是整体的,但铸件的分型面为曲面,为了能起出模样,造型时需手工将阻碍起模的型砂挖去。挖砂造型过程麻烦、生产效率低,分模后易损坏铸型。挖砂造型过程如图 1-16 所示。

(4) 假箱造型 对于需要挖砂造型的模样,可利用预先制备好的半个铸型以简化挖砂操作的造型方法,称为假箱造型,如图 1-17 所示。假箱造型比挖砂造型操作简便,生产率大大提高。假箱造型适用于成批生产需要挖砂造型的铸件生产。

(5) 活块造型 在有些铸件上有一些小的凸台、肋条等,造型时妨碍起模,这时可将模