

高等学校教材

材料成形学

李新城 主编



机械工业出版社
China Machine Press

高等学校教材

材料成形学

主 编 李新城
副主编 徐晓峰 徐 翔 陈秀娟
参 编 周怙武
主 审 周述积



机械工业出版社

本书是根据 1999 年本学科课程指导小组工作会议的最新指导思想,结合教育部专业目录中相关专业的培养目标及高等院校工科教学的实际所编写的教材。全书共五篇,内容主要有金属液态成形、金属塑性成形、金属焊接成形、其它材料的成形工艺、毛坯选择及检验等。每章后附有有利于培养学生分析与实际问题能力的复习思考题。

本书结合我国机械制造业现状,对传统的金属工艺学内容进行了精选,并以零件的结构与工艺设计为主线贯穿全书,增加了新工艺、新技术及计算机的应用等内容。还新编了工程塑料、橡胶、粉末冶金、陶瓷及复合材料成形工艺,以符合市场经济发展对人才培养的需要。书中有关名词术语、工艺资料等,均采用国家最新标准。

本书是高等工科院校机械工程类专业的基本教材,亦可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形学/李新城主编. —北京:机械工业出版社,
2000.8

高等学校教材

ISBN 7-111-08102-1

I. 材... II. 李... III. 材料-成型-高等学校-
教材 IV. TG39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 61016 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:邓海平 版式设计:霍永明 责任校对:刘志文

封面设计:李雨桥 责任印制:何全君

中国农业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·14.75 印张·365 千字

0 001—9 000 册

定价:19.50 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

序

近几年来,国内高等教育改革不断深化,对人才素质、能力培养和基础知识教育提出了更新更高的要求。同时,高等学校专业设置全面调整,专业面拓宽,教学总时数减少,这就对教材建设和改革提出了新的要求。

“材料成形学”是我国高等工科院校机械类专业必修的技术基础课,其内容几乎涉及机器制造中除切削加工成形工艺以外的所有工程材料的成形工艺,对机械类人才培养具有重要意义。对此,本教材在内容和体系上进行了力度较大的改革,主要表现在:

(1)内容上突出了“广、突、新、精”。广,即内容全面,既有传统的金属成形工艺,又新增了非金属成形工艺;实,即紧密结合生产实际和发展,突出了应用;新,即大幅度增加了新技术、新工艺和计算机在材料成形中的应用,具有时代特色;精,即提高起点,精选内容,删除了传统教材中与先修课程的一些不必要重复。

(2)教材结构层次合理、重点突出,且重点、难点处理恰当。全书以零件的结构与工艺设计为主线,在各篇、章、节的内部联系上,先按纵向阐述基本知识,再提供一定的典型零件,在各种不同要求下作出横向分析研讨,从而有利于学生学习、掌握并学以致用。

根据近几年教育部课程教学指导历次会议的指导精神和个人教学经验,在运用本教材的教学过程中,提出如下建议,以供参考:

(1)从21世纪人才培养需要出发,不仅要注重学生获取知识能力的培养,更要注重学生全面素质和创造性思维的培养。

(2)因各院校、专业要求不同,课程教学用时各有差异,因此,教学中更应突出重点及其应用,努力开拓学生的创新思维,培养学生学习本课程的兴趣和运用相关知识的能力。

(3)在课程内容安排上,切实做到课前、课内和课外的统一。课前一定要把握好金工实习的质量和效果,课内力求把内容讲活,课外应鼓励和组织学生进行现场参观或生产实际考察。作业应以对比分析和解决实际问题为主。

(4)十余年来,工科院校金工电教编审组为“机械制造学”系列课程录制了一整套计五十余部教学电视片(由清华大学音像出版社出版)。它们在教学中已经发挥了良好的作用,建议予以配合使用。

总之,先有一套好的教材还不能保证好的教学效果,重要的是教师教学水平的发挥和教学过程的精心组织。

十分感谢编者,特别是主编为本教材的编写,做了周密的规划、组织工作,付出了辛勤的劳动。同时,也十分感谢机械工业出版社的领导和编辑们为本书的及时出版给予了大力支持和合作。

教育部工程材料及机械制
造基础课程指导小组成员
湖北汽车工业学院

周述积
于湖北十堰

前 言

为落实国家教育部 1995 年 11 月新颁布的机械制造基础课程教学基本要求, 江苏理工大学、湖南大学、甘肃工业大学、国防科技大学、湖北汽车工业学院、洛阳工学院、中南林学院、华东船舶学院等院校组织有长期教学经验、业务能力较强的资深教师成立本课程教材编写组, 合作编写了《材料成形学》、《机械制造学》、《机械制造技术实践》一套三册教材, 供有关高校机类、近机类专业相应课程配套使用。各院校根据具体专业性质、培养目标和教学计划的安排不同, 对各部分的内容与要求可以有所侧重。

本书编写时本着加强工程基础, 注重工艺, 强化能力培养, 推进素质教育的精神, 在以下几个方面作了一些探索:

(1) 调整知识能力结构, 突出对各种工艺的综合论述与横向比较, 注重技术与经济的结合。

(2) 提高起点, 突出重点, 拓宽知识面。新增了工程塑料、橡胶、粉末冶金、陶瓷及复合材料成形工艺的内容, 力求反映近年来在成形技术方面出现的最新成果, 并首次引入了计算机在成形技术方面应用的有关知识。

(3) 强化工艺设计训练, 很多示例选自生产中的典型产品, 以培养学生分析零件结构工艺性和选择成形工艺与方法的基本素质, 从而加强学生的工程意识训练, 培养工程实践能力和创造能力。

(4) 增加了毛坯选择篇章, 为学生进行专业课程设计及今后的工作奠定较为扎实的工程基础。

(5) 在叙述上力求深入浅出、简明扼要、图文并茂, 并全面贯彻国家新标准。

本书是本套教材的第二册, 与同时编写的《机械制造学》、《机械制造技术实践》配套使用, 在内容的选择和编排上有一定的新意。

本书由江苏理工大学李新城任主编, 洛阳工学院徐晓峰、湖北汽车工业学院徐翔、甘肃工业大学陈秀娟任副主编。参加编写人员为: 徐晓峰 (第一章至第五章), 徐翔 (第六章至第八章), 周惦武 (第九章), 陈秀娟 (第十章至第十三章), 李新城 (第十四章至第十八章)。全书由李新城策划并统稿, 徐翔协助整理。本书由教育部课程教学指导小组成员湖北汽车工业学院周述积教授任主审。

在本套教材的编写过程中, 得到了各有关院校领导的大力支持, 在此表示深切的谢意。

限于编者水平, 错误和不妥之处在所难免, 恳请同行与读者批评指正。

编 者

2000 年 2 月

目 录

序 前言

第一篇 金属液态成形

第一章 金属液态成形工艺基础	2	第五节 低压铸造	36
第一节 液态金属的充型能力与流动性	2	第六节 其它成形方法简介	37
第二节 液态金属的凝固与收缩	4	第七节 金属液态成形方法的合理选择	39
第三节 液态成形内应力、变形与裂纹	6	复习思考题	41
第四节 液态成形件的质量与控制	9	第四章 液态成形金属件的结构与 工艺设计	42
复习思考题	10	第一节 铸件结构设计	42
第二章 常用液态成形合金及其熔炼	12	第二节 砂型铸造工艺设计	48
第一节 铸铁件生产	12	第三节 铸造工艺设计实例	56
第二节 铸钢件生产	22	复习思考题	58
第三节 铸造有色合金	24	第五章 液态成形技术的新进展	62
复习思考题	26	第一节 造型技术的新进展	62
第三章 液态金属的成形工艺与方法 ...	28	第二节 快速成形技术 (RPT) 的类型 及应用	63
第一节 砂型铸造	28	第三节 计算机在液态成形技术中 的应用	65
第二节 金属型铸造	31	复习思考题	68
第三节 熔模铸造	33		
第四节 压力铸造	34		

第二篇 金属的塑性成形

第六章 金属塑性成形工艺基础	72	第二节 模锻件的工艺设计	108
第一节 金属的塑性成形原理	72	第三节 板料冲压件的工艺设计	111
第二节 金属塑性成形工艺基础	75	第四节 锻件工艺设计实例	115
复习思考题	79	复习思考题	118
第七章 金属的塑性成形方法	80	第九章 塑性成形技术新进展	119
第一节 锻造	80	第一节 高速高能成形	119
第二节 冲压	90	第二节 少无切削成形	121
第三节 其它金属塑性成形方法	98	第三节 液态模锻	124
第四节 金属塑性成形方法的比较	101	第四节 计算机在塑性成形工艺中 的应用	125
复习思考题	102	复习思考题	128
第八章 塑性成形件的工艺设计	104		
第一节 自由锻件的工艺设计	104		

第三篇 材料的焊接成形

第十章 金属焊接成形工艺基础	130	设计	153
第一节 熔焊接头金属的组织与性能	130	第一节 焊接成形结构材料的选用	153
第二节 焊接应力与变形	133	第二节 焊接成形方法的选择	153
第三节 金属的焊接性	136	第三节 接头工艺设计	157
复习思考题	137	第四节 典型工艺设计实例	159
第十一章 金属的焊接成形方法	138	复习思考题	162
第一节 熔焊	138	第十三章 焊接成形技术新进展	164
第二节 钎焊	144	第一节 计算机在焊接成形中的应用	164
第三节 压焊	145	第二节 焊接机器人和智能化	164
第四节 常用金属材料的焊接成形方法	149	第三节 能源开发	165
第五节 焊接成形常见缺陷	151	第四节 提高焊接生产率	165
复习思考题	152	复习思考题	165
第十二章 焊接成形金属件的工艺			

第四篇 其它材料的成形工艺

第十四章 高分子材料的成形工艺	167	第三节 粉末冶金制品的结构工艺性	185
第一节 工程塑料的成形与加工	167	第四节 工业陶瓷制品的成型	189
第二节 塑件制品结构的工艺性	174	第五节 陶瓷成型常见缺陷及对策	194
第三节 橡胶制品的成形工艺	177	复习思考题	195
复习思考题	180	第十六章 复合材料成型及其它材料成形	
第十五章 粉末冶金及陶瓷材料的		技术新进展	197
成型工艺	181	第一节 复合材料成型	197
第一节 粉末冶金的特点与应用	181	第二节 其它材料成形技术新进展	204
第二节 粉末冶金生产工艺过程	182	复习思考题	206

第五篇 毛坯选择及检验

第十七章 毛坯选择	208	第十八章 毛坯的质量及检验	223
第一节 毛坯的分类及生产特点	208	第一节 毛坯质量的概念	223
第二节 毛坯选择的原则	210	第二节 毛坯的无损检验	223
第三节 毛坯选择的经济性分析	214	复习思考题	228
第四节 材料与毛坯选择实例	217	参考文献	229
复习思考题	221		

第一篇 金属液态成形

将液态金属浇注到与零件形状、尺寸相适应的铸型型腔中，待其冷却凝固，以获得毛坯或零件的生产方法，叫做金属液态成形（或铸造生产）。金属液态成形的方法很多，可分为砂型铸造和特种铸造两大类。其中，砂型铸造是最基本的液态成形方法，所生产的铸件要占铸件总量的80%以上。为了提高铸件的质量和生产率，各种特种铸造生产方法获得了越来越广泛的应用。

金属液态成形在机械制造业中占有重要的地位，它是制造毛坯、零件的重要方法之一。在一般机械设备中，铸件约占整个机械设备重量的45%~90%；在金属切削机床中占70%~80%；在汽车及农业机械中占40%~70%。之所以能获得如此广泛的应用，是因为它具有如下优点：

1) 金属液态成形能够制成形状复杂、特别是具有复杂内腔的毛坯，如各种箱体、床身、机架、车轮等。

2) 金属液态成形适应性广。既可用于单件小批量生产，也可用于大批大量生产；铸件的大小几乎不受限制，重量可从几克到几百吨；工业中常用合金都可采用液态成形来制造毛坯或零件。

3) 金属液态成形成本低，所用原材料来源广泛，价格低廉；一般不需要昂贵的设备。

4) 铸件形状和尺寸与零件相近，因而切削加工余量可减少到最小，从而减少了金属材料消耗，节省了切削加工工时。

但是，金属液态成形过程比较复杂，一些工艺过程难以控制，易出现缺陷；产品质量不够稳定；由于铸件内部晶粒粗大，组织不均匀，且常伴有缩孔、缩松、气孔、砂眼等缺陷，因而其力学性能比同类材料的锻件低。这些缺陷对铸件质量有着严重的影响。然而，随着科学和技术的不断发展，新工艺、新技术、新材料和新设备日益获得广泛的应用，铸件质量和生产率得到很大的提高。

第一章 金属液态成形工艺基础

第一节 液态金属的充型能力与流动性

液态金属填充铸型的过程，简称充型。

液体金属充满铸型型腔，获得尺寸精确、轮廓清晰的成形件的能力，称为充型能力。充型能力不足时，会产生浇不足、冷隔、夹渣、气孔等缺陷。

充型能力要考虑铸型及工艺因素影响的熔融金属的流动性。它首先取决于金属本身的流动性（流动能力），同时又受铸型性质、浇注条件和铸件结构等因素的影响。

1. 液态合金的流动性

合金流动性是指液态合金本身的流动能力。合金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、 α 形、真空试样等等，应用最多的是螺旋形试样，如图 1-1 所示。

合金流动性主要取决于合金化学成分。表 1-1 所列是一些合金的流动性。图 1-2 为 Pb-Sn 合金流动性与合金成分的关系。由图 1-2 可以看出，对应着纯金属、共晶点和形成金属间化合物的成分，流动性出现最大值；而有结晶温度范围的合金，流动性下降。这是因为纯金属和共晶成分的合金是在恒温下结晶的，凝固层表面光滑，对尚未凝固的金属液流动阻力小，因此流动性好（如图 1-3a 所示）；其它成分合金，其结晶是在一定温度区间内完成的，在结晶区间中，既有形状复杂的枝晶，又有液体。由于初生枝晶使结晶固体层内表面粗糙（如图 1-3b 所示），枝晶不仅阻碍液体流动，还使液体金属的冷却速度加快，所以合金的流动性变差。

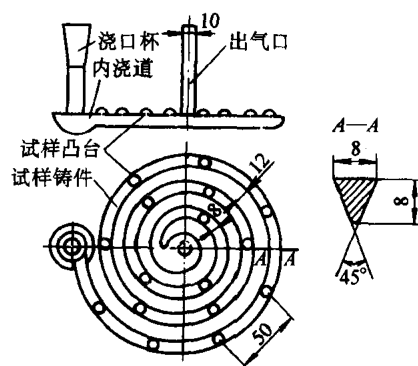


图 1-1 螺旋型标准试样

表 1-1 部分铸造合金的流动性
(螺旋型试样，沟槽截面 8mm×8mm)

合 金	铸型	浇注温度 /℃	螺旋线长度 /mm	合 金	铸型	浇注温度 /℃	螺旋线长度 /mm
铸铁 ($w_C + w_S = 6.2\%$)	砂型	1300	1800	铸钢 ($w_C = 0.4\%$)	砂型	1600	100
($w_C + w_S = 5.9\%$)	砂型	1300	1300			1400	200
($w_C + w_S = 5.2\%$)	砂型	1300	1000	铝硅合金	金属型	680~720	700~800
($w_C + w_S = 4.2\%$)	砂型	1300	600		300℃		

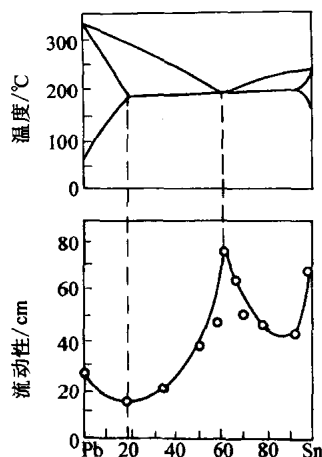
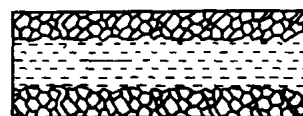


图 1-2 Pb-Sn 合金流动性与状态图的关系



a)



b)

图 1-3 结晶特性对流动性的影响

a) 在恒温下凝固 b) 在一定的温度范围内凝固

铸铁的凝固温度范围虽比铸钢的宽，但流动性却比铸钢的好。这是由于铸钢的熔点高，钢液的过热度比铸铁的小，保持液态流动的时间短。另外，由于钢液的温度高，在铸型中的散热速度快，很快析出一定数量的枝晶，使钢液失去流动能力。同时，液态金属的粘度愈高，金属液的流动性愈差。

2. 浇注条件

(1) 浇注温度 浇注温度对液态金属的充型能力有决定性影响。浇注温度愈高，液态金属的粘度下降，且因过热度高，金属液内含热量多，保持液态时间长，故充型能力愈强。

(2) 充型压力 液态金属在流动方向上所受的压压力越大，充型能力就越强。但金属液的静压头过大或充型速度过高时，会发生喷射和飞溅现象。

(3) 浇注系统的结构 浇注系统的结构越复杂，流动阻力越大，充型能力越差。

3. 铸型充填条件

液态合金充型时，铸型的阻力将影响合金的流动速度，而铸型与合金的热交换又将影响合金保持流动的时间。铸型的如下因素对充型能力均有显著影响：

(1) 铸型的蓄热系数 铸型的蓄热系数表示铸型从金属吸取热量并储存在本身的能力。蓄热系数愈大，铸型的激冷能力就愈强，金属液于其中保持液态的时间就愈短，充型能力下降。

(2) 铸型温度 铸型温度越高，液态金属与铸型的温差越小，充型能力越强。

(3) 铸型中的气体 铸型在浇注时发气，能在金属液与铸型间形成气膜，减小摩擦阻力，有利于充型。但铸型的发气能力过强，浇注速度太快，而铸型的排气能力又小时，则型腔中的气体压力增大，阻碍金属流动。

4. 铸件结构

衡量铸件结构特点的因素是铸件的折算厚度和复杂程度。

(1) 折算厚度 折算厚度也叫当量厚度或模数，为铸件体积与表面积之比。折算厚度大，热量散失慢，充型能力就好。铸件壁厚相同时，垂直壁比水平壁更容易充填。

(2) 铸件复杂程度 铸件结构复杂，流动阻力大，铸型的充填就困难。

第二节 液态金属的凝固与收缩

一、铸件的凝固方式

在铸件凝固过程中，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，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，图 1-4c 中 S 所示即为凝固区。

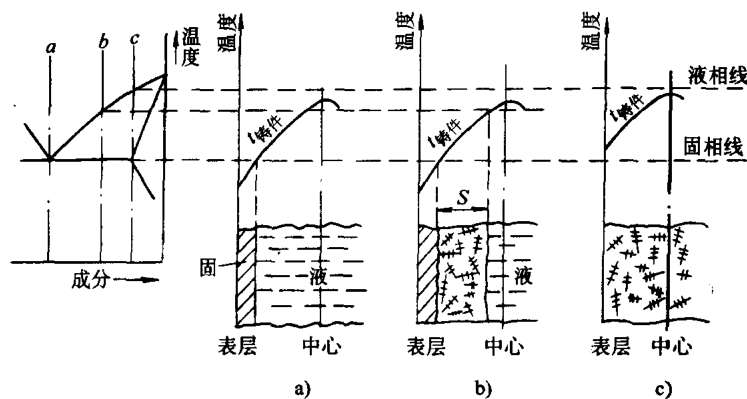


图 1-4 铸件的凝固方式

a) 逐层凝固 b) 中间凝固 c) 糊状凝固

(1) 逐层凝固 纯金属和共晶成分的合金在凝固过程中因不存在液、固并存的凝固区，如图 1-4a 所示，故断面上外层的固体和内层的液体由一条界限（凝固前沿）清楚的分开。随着温度的下降，固体层不断的加厚，液体不断的减少，直达铸件中心，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，如图 1-4b 所示，称为中间凝固。

(3) 糊状凝固 如果合金的结晶温度范围很宽，且铸件的温度分布比较平坦，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断面，如图 1-4c 所示，故称为糊状凝固。

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，易产生缩松，难以获得结晶密实的铸件。

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。

(1) 合金的结晶温度范围 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。如在铁碳合金中，普通灰口铸铁为逐层凝固；高碳钢为糊状凝固。

(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之间的温度差。若铸件内外层之间的温度差由小变大，则其对应的凝固区由宽变窄。

二、合金的收缩

(一) 收缩的概念

合金从液态冷却至室温的过程中，其体积或尺寸缩减的现象，称为收缩。收缩是合金的物理本质。合金的收缩给液态成形工艺带来许多困难，是许多铸造缺陷（如缩孔、缩松、裂

纹、变形等)产生的根源。

合金的收缩经历如下三个阶段:①液态收缩,即从浇注温度到凝固开始温度间的收缩;②凝固收缩,即从凝固开始到凝固终止温度间的收缩;③固态收缩,即从凝固终止温度到室温间的收缩。所以,合金的总收缩率为上述三种收缩的总和。

合金的液态收缩和凝固收缩表现为合金体积的缩减,它是铸件产生缩孔或缩松的根本原因,常用单位体积收缩量即体收缩率(ϵ_v)来表示。合金的固态收缩同样表现为合金体积的缩减,但也表现为铸件线尺寸的缩减,它是铸件产生应力、变形和裂纹的根本原因,常用单位长度的收缩量即线收缩率(ϵ_L)来表示。

不同合金的收缩率不同。在常用合金中铸钢的收缩率最大,灰口铸铁的收缩率最小。灰口铸铁收缩率最小,是因为其中大部分碳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。

铸件的实际收缩率与其化学成分、浇注温度、铸件结构、铸型条件等因素有关。

(二) 缩孔与缩松

液态合金在冷凝过程中,若其液态收缩和凝固收缩所缩减的容积得不到补充,则在铸件最后凝固的部位形成一些孔洞。大而集中的称为缩孔,细小而分散的称为缩松。缩孔、缩松可使铸件力学性能、气密性和物化性能大大降低,以致成为废品。

1. 缩孔的形成

缩孔是集中在铸件上部或最后凝固的部位容积较大的孔洞。多呈倒锥形,内表面粗糙。其形成条件是:合金在恒温或很窄的温度范围内结晶,铸件以逐层凝固的方式凝固。

缩孔形成过程如图 1-5 所示。液态合金填满铸型型腔后,由于铸型的吸热,靠近型腔表面的金属很快凝结成一层外壳,而内部仍然是高于凝固温度的液体。温度继续下降,外壳加厚,但内部液体产生液态收缩和凝固收缩,体积缩减,液面下降,使铸件内部出现了空隙。由于空隙得不到补充,待金属全部凝固后,即在金属最后凝固的部位形成一个大而集中的孔洞——缩孔。铸件完全凝固后,随着温度的下降,因固态收缩时铸件的体积会不断缩小,直到室温为止。合金的液态收缩和凝固收缩愈大,浇注温度愈高,铸件愈厚,缩孔的容积就愈大。

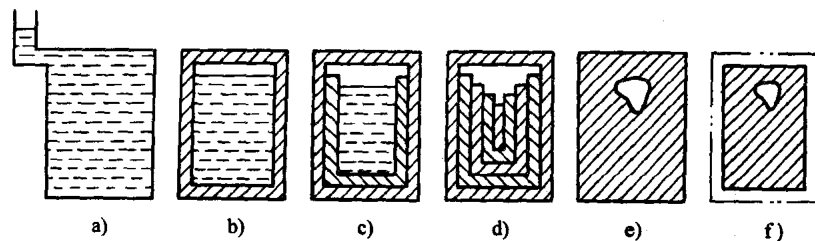


图 1-5 缩孔的形成过程

2. 缩松的形成

分散在铸件某区域内的细小缩孔称为缩松。缩松的形成原因也是由于铸件最后凝固区域的液态收缩和凝固收缩得不到补充,当合金以糊状凝固的方式凝固时就易形成分散性的缩孔,导致缩松。缩松一般出现在铸件壁的轴线区域、热节处、冒口根部和内浇口附近,也常分布在集中缩孔的下方。

3. 缩孔和缩松的防止

缩孔和缩松都使铸件的力学性能下降,降低有效承载面积;缩松还可使铸件因渗漏而报废。因此,缩孔和缩松都是铸件的重要缺陷,必须根据技术要求,采取适当的工艺措施予以预防。防止缩孔和缩松常用的工艺措施就是控制铸件的凝固次序,使铸件实现“顺序凝固”。

所谓“顺序凝固”,是在铸件可能出现缩孔的热节处,通过增设冒口和冷铁等一系列工艺措施,使铸件上远离冒口的部位先凝固,然后是靠近冒口的部位凝固,最后是冒口本身凝固,如图1-6所示。使铸件按照一定的次序逐渐凝固即为“顺序凝固”原则。按此原则进行凝固,能使缩孔集中到冒口中,最后将冒口切除,从而可以获得致密的铸件。

为了控制铸件的凝固次序,还可在铸件的热节处安放冷铁,以局部加快热节处的冷却速度。图1-7为阀体铸件,左边表示未设置冒口和冷铁时热节处可能产生的缩孔;右边表示增设冒口和冷铁后,铸件实现了顺序凝固,防止了缩孔。

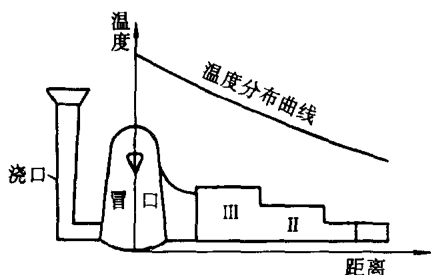


图 1-6 铸件的顺序凝固

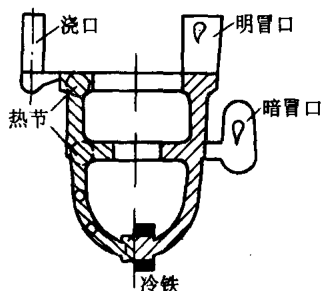


图 1-7 阀体铸件

正确地估计铸件上缩孔或缩松可能产生的部位是合理安放冒口和冷铁的重要依据。在实际生产中,常以画“凝固等温线法”或“内切圆法”近似地找出缩孔的部位,如图1-8所示。图1-8中等温线未曾通过的心部和内切圆直径最大处,即为可能出现缩孔的热节。

安放冒口和冷铁,实现顺序凝固,虽可有效地防止缩孔和缩松(宏观缩松),但却耗费许多金属和工时,增加了铸件成本。同时,顺序凝固扩大了铸件各部分的温差,加大了铸件变形和裂纹的倾向。因此,它主要用于必须补缩的场合,如铝青铜、铝硅合金和铸钢件等。

对于结晶温度范围宽的合金,由于倾向于糊状凝固,结晶开始后,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,因而难以避免显微缩松的产生。对此,选用共晶成分或结晶温度范围较窄的合金生产铸件是适宜的。

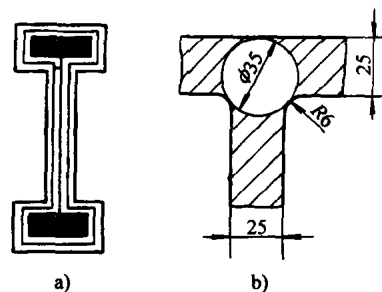


图 1-8 缩孔位置的确定

a) 等温线法 b) 内切圆法

第三节 液态成形内应力、变形与裂纹

一、液态成形内应力

铸件在凝固以后的继续冷却过程中,其固态收缩受到阻碍,铸件内部即将产生内应力。按阻碍收缩原因的不同,液态成形内应力分为机械应力和热应力。液态成形内应力是液态成形件产生变形和裂纹的基本原因。

1. 热应力

热应力是由于铸件壁厚不均匀，各部分冷却速度不同，以致在同一时期内铸件各部分收缩不一致而引起的应力。

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改变。固态金属在再结晶温度以上的较高温度时，处于塑性状态。此时，在较小的应力下就可产生塑性变形（即永久变形），变形之后应力可自行消除。再结晶温度以下，金属呈弹性状态，此时，在应力作用下将产生弹性变形，而变形之后应力继续存在。

现在以框形铸件为例分析说明残留热应力的形成过程。如图 1-9b~e 所示，铸件由一根粗杆 I 和两根细杆 II 组成，两根细杆冷却速度和收缩完全一致。为叙述方便，把三根杆简称为 I、II 两杆。

假设凝固后两杆从同一温度 T_H 开始冷却，最后冷却到同一温度 T_0 ，两杆的固态冷却曲线如图 1-9(a) 所示。当铸件处于高温阶段（图 1-9a 中 $t_0 \sim t_1$ ），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 1-9a 中 $t_1 \sim t_2$ ）。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（图 1-9c），形成了瞬时的内应力，但这个内应力随之便通过粗杆 I 的塑性变形（压缩）而消失（图 1-9d）。当进一步冷却到更低温度时（图 1-9a 中 $t_2 \sim t_3$ ），这时两杆均处于弹性状态。此时，尽管两杆长度相同，但所处的温度不同，粗杆 I 的温度较高并会形成较大的收缩；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，杆 I 受拉伸，杆 II 受压缩，直至室温，形成了双向残余内应力（图 1-9e）。

热应力使铸件的厚壁或心部（缓冷部位）受拉伸，薄壁或表层（速冷部位）受压缩。

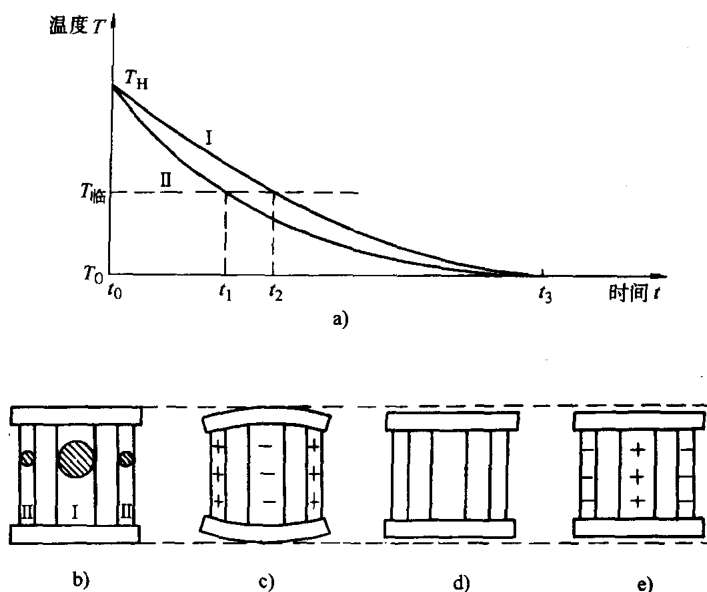


图 1-9 热应力的形成

+ 表示拉应力 - 表示压应力

由此可知，热应力是由于尺寸差别较大的两杆的自由收缩受到阻碍而引起的。铸件的壁厚差别愈大，合金的线收缩率愈高，弹性模量愈大，热应力愈大。

预防热应力的基本途径是减小铸件各部位间的温差，使其均匀的冷却。具体措施有：设计壁厚均匀的铸件；在铸造工艺上，控制铸件按同时凝固原则凝固。如图 1-10 所示阶梯铸件，可将浇口开在薄壁处，而在远离浇口的厚壁处放冷铁，这样因薄壁处被高温金属液加热而冷却速度减慢，厚壁处被冷铁激冷而冷速加快，使铸件各处的温度趋于一致，实现同时凝固。在实际生产中，使铸件同时凝固是减小铸造内应力，防止铸件变形和裂纹的有效措施。

2. 机械应力（收缩应力）

合金的线收缩受到铸型、型芯、浇冒口系统的机械阻碍，形成了内应力。如图 1-11 所示，铸件在冷却收缩时，其轴向受砂型阻碍，径向受型芯阻碍，使铸件产生机械应力。显然，机械应力将使铸件产生拉伸或剪切应力，其大小取决于铸型及型芯的退让性。当铸件落砂后，这种内应力便可自行消除。然而若机械应力在铸型中与热应力共同起作用，则将增大某部位在铸型中的内应力，强化了铸件产生裂纹的倾向。

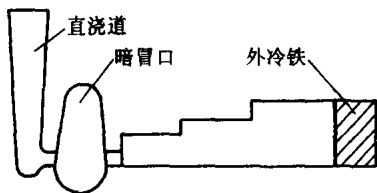


图 1-10 铸件的同时凝固

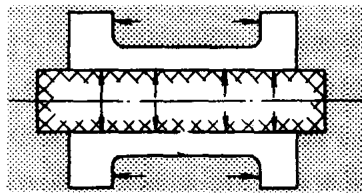


图 1-11 机械应力

二、铸件的变形与防止

前面已经指出，具有残余热应力的铸件，厚壁部分受拉伸，薄壁部分受压缩，就像被拉伸或压缩的弹簧一样，处于一种非稳定状态，将自发地通过铸件变形来减缓其应力，以回到稳定的平衡状态。显然，只有原受拉伸部分产生压缩变形，受压缩部分产生拉伸变形，才能使铸件中的残余内应力减小或消除。换句话说，铸件变形总是朝力图减小或消除残余内应力方向发生的。实际上，铸件变形中，多以“杆”件和“板”件上的弯曲变形最为明显。如图 1-12 所示床身铸件，其导轨较厚，冷却速度慢，形成内部残留拉应力；床腿较薄，为内部残留压应力，最后导致床身导轨内凹的挠曲变形。图 1-13 所示为一平板铸件，尽管其壁厚均匀，但其中心比边缘冷却慢而受拉，边缘则受压，且铸型上面又比下面散热冷却快，于是平板产生如图所示方向的变形。

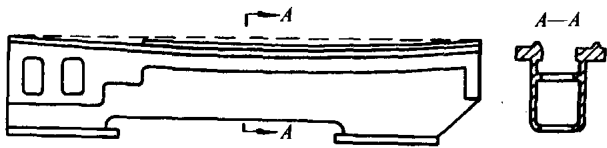


图 1-12 车床床身铸件的变形

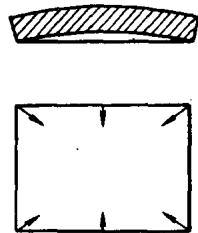


图 1-13 平板铸件的变形

为了防止铸件变形，除减小应力外，最好设计成对称结构的铸件，使其内应力互相平衡而不易变形。在铸造工艺上应采用同时凝固原则，以便冷却均匀。对于长而易变形的铸件，还可采用“反变形”工艺。反变形法是在统计某类铸件变形规律的基础上，在模型上预先作出相当与铸件变形量的反变形量，以抵消铸件的变形。如长度大于 2m 的床身铸件的反变形

量为每米长放 1~3mm 的挠度或更多。

实践证明, 尽管变形后铸件的内应力有所减缓, 但并未彻底消除, 这样的铸件经机械加工后, 由于内应力的重新分布, 还将逐渐缓缓地发生微量变形, 使零件丧失了应有的精度, 严重时会使零件报废。为此, 对于要求装配精度稳定性高的零件 (如机床导轨、变速箱、刀架等) 必须进行时效处理。时效处理可分为自然时效和人工时效两种。自然时效是将铸件置于露天场地半年以上, 使其在自然的气压和温度作用下, 逐渐缓慢地变形, 从而消除内应力。人工时效是将铸件加热到 550~650℃ 进行去应力退火, 它比自然时效节省时间和场地, 且内应力去除较为彻底, 故应用较为普遍。时效处理宜在粗加工之后进行, 这样既有利于原有内应力的消除, 又可将粗加工过程中产生的应力一并消除。本世纪 70 年代以来, 出现了振动去应力的新技术。它是在零件上设置合理的振动点, 并对振动点施以恰当的频率和振幅进行振动, 在室温下就可高效释放内应力。

三、铸件的裂纹与防止

当铸件的内应力超过金属的强度极限时, 铸件将产生裂纹。裂纹是铸件的严重缺陷, 常导致铸件报废。根据裂纹产生的原因, 可分为热裂和冷裂两种。

1. 热裂

热裂是铸件在凝固后期, 接近固相线的高温下形成的。因为合金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。例如, $w_C = 0.3\%$ 的碳钢, 室温强度 $\sigma_b \geq 480\text{MPa}$, 而在 1300~1410℃ 时的高温强度 $\sigma_b \leq 0.75\text{MPa}$ 。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应尽量选择凝固温度范围小, 热裂倾向小的合金; ②应提高铸型和型芯的退让性, 以减小机械应力; ③浇冒口的设计要合理; 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, 铸件内应力超过合金的强度极限而产生的。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、气孔以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。

铸件的冷裂倾向与热应力的大小密切相关。铸件的壁厚差别愈大, 形状愈复杂, 特别是大而薄壁的铸件, 愈易产生冷裂纹。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, 故冷裂倾向小。铸钢中含磷量愈高而冷裂倾向愈大。

凡是减小铸件内应力或降低合金脆性的因素均能防止冷裂。

第四节 液态成形件的质量与控制

由于液态成形工序繁多, 影响铸件质量的因素既复杂又难以控制, 因此铸件缺陷几乎难以完全避免, 废品率也比其它加工方法多。同时, 许多铸造缺陷隐藏在铸件内部, 难于发现

和修补,有些则是在机械加工时才会暴露出来,这不仅浪费了机械加工工时,增加制造成本,有时还延误了整个生产任务的完成。因此,进行铸件质量控制,降低废品率,是非常重要的。表1-2所列常见铸件缺陷及特征。

表1-2 常见铸件缺陷及特征

名 称	特 征	名 称	特 征
气孔	主要为梨形、圆形、椭圆形的孔洞,表面较光滑,一般不在铸件表面露出,大孔独立存在,小孔则成群出现	缩孔 缩松	①缩孔:形状为不规则的封闭或敞露的空洞,孔壁粗糙并带有枝状晶,常出现在铸件最后凝固部位 ②缩松:铸件断面上出现的分散而细小的缩孔
粘砂	铸件的部分或整个表面粘附着一层金属和砂粒的机械混和物,多发生在铸件厚壁和热节处	裂纹	①热裂:断面严重氧化,无金属光泽,断口沿晶界产生和发展,外形曲折而不规则的裂纹 ②冷裂:穿过晶体而不沿晶界断裂,断口有金属光泽或有轻微氧化色
夹砂	铸件表面上有凸起的金属片状物和砂粒,表面粗糙,边角锐利,有小部分与铸件本体相连	化学成分及性能不合格	铸件的化学成分和硬度、强度、伸长率、冲击韧度、耐热、耐蚀及耐磨等性能不符合技术条件要求
白口	灰铸铁件断面全部或表面出现亮白色组织,常在铸件薄的断面、棱角及边缘部分	偏析	铸件整体或部分出现化学成分、金相组织不一致

铸件缺陷的产生与铸造工艺、造型材料、模具、合金的熔炼与浇注、铸造合金的选择、铸件结构设计、技术要求的设计是否合理等各个环节密切相关。因此,应从以下几个方面控制铸件质量:

(1) 合理选定铸造合金和铸件结构 设计选材时,在保证铸件使用性能要求的前提下,应尽量选用铸造性能好的合金。同时,还应根据合金种类合理设计铸件结构。

(2) 合理制定铸件的技术要求 具有缺陷的铸件并不都是废品。在合格铸件中,对允许存在的缺陷及其存在的程度,应在零件图或有关的技术文件中做出具体规定,作为铸件质量要求的依据。

(3) 铸件质量检验 铸件质量检验是控制铸件质量的重要措施。铸件检验的目的是依据铸件缺陷存在的程度,确定和分辨合格铸件、待修补铸件及废品。同时,通过缺陷分析寻找缺陷存在的原因。

铸件检验的项目有:铸件外观质量,包括铸件表面缺陷、表面粗糙度、重量公差和尺寸公差等;铸件内在质量,包括铸件内部缺陷、化学成分、金相组织和材质性能等;铸件使用性能,包括铸件在强力、高速、腐蚀、高温、低温等不同条件下的工作能力。

铸件质量检验最常用的是宏观法。它是通过肉眼观察(或借助尖嘴锤)找出铸件的表面缺陷和皮下缺陷,如气孔、砂眼、夹渣、粘砂、缩孔、浇不足、冷隔和尺寸误差等。对于内部缺陷则要用仪器检验,如着色渗透检验、超声波探伤、射线探伤、磁粉探伤、荧光探伤、耐压试验等。此外,若有必要还应对铸件进行解剖检验、金相检验、力学性能检验和化学成分分析等。

复 习 思 考 题

- (1) 什么是液态合金的充型能力?它与流动性有何关系?流动性对铸件质量有何影响?
- (2) 合金收缩由哪三个阶段组成?各会产生哪些铸造缺陷?