

高等院校机电类 工程教育 系列规划教材

材料成形技术基础

■ 主 编 赵升吨

→ **材料成形技术基础：**本书是省级精品课程的配套教材，通过铸造、焊接和成形三篇来系统地讲述材料成形技术，同时注重将工艺、设备一体化，力求体现最新科研成果，非常适合于高等院校机械工程、材料科学与工程专业及相关专业的教学。详细内容请见目录>>>



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等院校机电类工程教育系列规划教材

材料成形技术基础

主编 赵升吨



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书主要针对铸、锻、焊三种基本成形技术,分为三篇进行论述,每篇都从成形理论、工艺、设备三方面展开。鉴于“材料—工艺—设备”的一体化成形领域的发展趋势,本书加入了相应设备的内容,同时,考虑到成形工艺的复杂性采用计算机辅助分析已成为重要的手段,因此也加入了相应数值模拟的内容。

本书可作为普通高等院校机械设计制造及其自动化、机械工程、车辆工程、机械电子工程、航空航天制造工程、能源动力系统及自动化、测控技术与仪器等相关专业主干专业课程“材料成形技术基础”的教科书,也可供从事成形技术的研究和应用的工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容
版权所有·侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

材料成形技术基础/赵升吨主编. —北京:电子工业出版社,2013.8

高等院校机电类工程教育系列规划教材

ISBN 978-7-121-21159-1

I. ①材… II. ①赵… III. ①工程材料—成型—高等学校—教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 177833 号

策划编辑:余 义

责任编辑:余 义

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

装 订:北京中新伟业印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:21.75 字数:658 千字

印 次:2013 年 8 月第 1 次印刷

定 价:39.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

序

2008年7月间,电子工业出版社邀请全国20多所高校几十位机电领域的老师,研讨符合“工程教育”要求的教材的编写方案。大家认为,这适应了目前我国高等院校工科教育发展的趋势,特别是对工科本科生实践能力的提高和创新精神的培养,都会起到积极的推动作用。

教育部于2007年1月22日颁布了教高(2007)1号文件《教育部财政部关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》。同年2月17日,紧接着又颁布了教高(2007)2号文件《教育部关于进一步深化本科教学改革全面提高教学质量的若干意见》。由这两份文件,可以看到国家教育部已经决定并将逐步实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”(简称质量工程),而质量工程的核心思想就在于培养学生的实践能力和创新精神,提高教师队伍整体素质,以及进一步转变人才培养模式、教学内容和方法。

教学改革和教材建设从来都是相辅相成的。经过近两年的教改实践,不少老师都积累了一定的教学经验,借此机会,编写、出版符合“工程教育”要求的教材,不仅能够满足许多学校对此类教材的需求,而且将进一步促进质量工程的深化。

近一年来,电子工业出版社选派了骨干人员与参加编写的各位教授、专家和老师进行了深入的交流和研究。不仅在教学内容上进行了优化,而且根据不同课程的需要开辟了许多实践性、经验性和工程性较强的栏目,如“经验总结”、“应用点评”、“一般步骤”、“工程实例”、“经典案例”、“工程背景”、“设计者思维”、“学习方法”等,从而将工程中注重的理念与理论教学更有机地结合起来。此外,部分教材还融入了实验指导书和课程设计方案,这样一方面可以满足某些课程对实践教学的需要,另一方面也为教师更深入地开展实践教学提供丰富的素材。

随着我国经济建设的发展,普通高等教育也将随之发展,并培养出适合经济建设需要的人才。“高等院校机电类工程教育系列规划教材”就站在这个发展过程的源头,将最新的教改成果推而广之,并与之共进,协调发展。希望这套教材对更多学校的教学有所裨益,对学生的理论与实践的结合发挥一定的作用。

最后,预祝“高等院校机电类工程教育系列规划教材”项目取得成功。同时,也恳请读者对教材中的不当、不贴切、不足之处提出意见与建议,以便重印和再版时更正。



中国工程院院士、西安交通大学教授

教材编写委员会

主任委员 赵升吨(西安交通大学)

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

芮延年(苏州大学)

胡大超(上海应用技术学院)

钱瑞明(东南大学)

袁清珂(广东工业大学)

参编院校

(按拼音排序)

※ 安徽工业大学

※ 沈阳工业大学

※ 长安大学

※ 苏州大学

※ 东南大学

※ 苏州科技学院

※ 广东工业大学

※ 同济大学

※ 华南理工大学

※ 五邑大学

※ 华南农业大学

※ 武汉科技学院

※ 淮海工学院

※ 西安电子科技大学

※ 吉林师范大学

※ 西安工程大学

※ 南通大学

※ 西安工业大学

※ 山东建筑大学

※ 西安交通大学

※ 陕西科技大学

※ 西安科技大学

※ 上海应用技术学院

※ 西安理工大学

※ 深圳大学

※ 西安文理学院

前 言

在人类社会的发展进程中，制造业起到了举足轻重的作用，可以说制造业是创造人类财富的支柱。制造业也是产生当今人类社会面临的环境、资源、人口三大问题的主要根源。为了保护人类社会的可持续发展，一个综合考虑环境影响和资源效率的现代制造业的可持续发展模式——绿色制造应运而生。其目标是使产品从设计、制造、包装、运输、使用到报废处理的整个产品生命周期中对环境的影响（负作用）最小，资源效率最高。零件或材料的加工方法大致可分为4种，即成形加工、切除加工、表面加工、热处理加工等。选择零件的加工方法需要综合考虑零件的形状尺寸特征、工作条件及性能要求、生产批量和制造成本等多种因素。而成形加工兼备了成形与成性两方面，节材、高效、可显著提高材料性能，已成为目前蓬勃发展的技术领域。因此，成形技术水平的高低是衡量一个国家制造能力、综合国力、工业现代化水平的重要标志之一。培养和造就掌握成形技术和创新精神的人才，对提升我国制造能力、实现制造强国梦想具有极其重要的现实意义和战略意义。

为适应当今工程教育新模式对人才培养的要求，在编写过程中，充分吸收国内外最新的成形技术和科技成果，融基础理论、工程实例、经典例题、经验总结、实践训练于一体，力求做到实用性、系统性和先进性。本书主要针对铸、锻、焊三种基本成形技术，分为三篇自成体系进行论述，每篇都从成形理论、工艺、设备三方面展开。鉴于“材料—工艺—设备”的一体化成形领域的发展趋势，加之成形装备已成为目前机械加工装备发展的重点之一，因此，本书在铸、锻、焊三篇中均加入相应的设备的内容，这也是有别于其他教材的特色之一。同时，考虑到成形工艺的复杂性，目前借助于商用软件，采用计算机辅助分析方法，对复杂的成形工艺过程进行数值模拟已成为重要的手段，所以，本书在铸、锻、焊三篇中均加入相应的数值模拟的相关内容。

本书可作为普通高等院校机械设计制造及其自动化、机械工程、车辆工程、机械电子工程、航空航天制造工程、能源动力系统及其自动化、测控技术与仪器等相关专业主干专业课程“材料成形技术基础”的教科书，也可供从事成形技术的研究和应用的工程技术人员参考。

本书由西安交通大学赵升吨担任主编。全书共分三篇。第一篇中的第1章、第2章、第3章由河南科技大学陈慧敏编写，第4章、第5章、第6章由河南科技大学张万红编写。第二篇中的第7章由西安交通大学赵升吨编写，第8章由西安交通大学赵升吨、张大伟编写，第9章由西北工业大学姚泽坤编写，第10章由西安理工大学唐文亭编写，第11章由西安交通大学张琦编写，第12章由西安交通大学赵升吨、范淑琴编写。第三篇由西安交通大学蔡洪能编写。本书由西安交通大学赵升吨统稿。

本书编写时参阅了有关院校、工厂、科研院所的一些教材、资料和文献，并得到了许多同行专家教授的支持和帮助，在此谨向他们表示衷心的感谢。

限于编者水平有限，书中难免存在错误、疏漏和不妥之处，敬请读者提出宝贵意见。

编 者

2013年7月

目 录

第一篇 铸 造

第 1 章 铸造工艺基础	1	第 5 章 铸件质量控制及其过程的 计算机数值模拟	70
1.1 液态合金的充型能力	1	5.1 铸造生产过程的质量控制	70
1.2 铸件的凝固与收缩	3	5.1.1 铸造生产的工艺过程	70
1.3 铸造应力及铸件的变形与裂纹	5	5.1.2 铸造生产工序的质量控制	71
1.4 习题与思考题	8	5.2 铸件质量的检验	72
第 2 章 常用铸造合金及其熔炼	9	5.2.1 铸件质量	72
2.1 常用铸造合金	9	5.2.2 铸件质量检验	72
2.1.1 铸铁	9	5.3 铸件缺陷的产生和修复	73
2.1.2 铸钢	19	5.3.1 铸件常见缺陷及其产生原因	73
2.1.3 铸造有色合金	23	5.3.2 铸件缺陷的修复	74
2.2 常用铸造合金的熔炼	34	5.4 铸造过程的计算机数值模拟	77
2.2.1 铸铁的熔炼	34	5.4.1 铸件充型及传热过程模拟	78
2.2.2 铸钢的熔炼	36	5.4.2 铸件应力场的数值模拟	80
2.2.3 铸造有色合金的熔炼	38	5.4.3 凝固过程的微观组织模拟	80
2.3 习题与思考题	39	5.4.4 铸造过程数值模拟主要专业 软件简介	80
第 3 章 铸造成形方法	40	5.5 习题与思考题	84
3.1 砂型铸造	40	第 6 章 常用铸造设备	85
3.2 特种铸造	43	6.1 铸造设备的分类	85
3.2.1 熔模铸造	43	6.2 造型和制芯设备	85
3.2.2 金属型铸造	44	6.2.1 压实式造型机	85
3.2.3 压力铸造	45	6.2.2 震实式造型机	86
3.2.4 离心铸造	46	6.2.3 震压式造型机	87
3.2.5 其他特种铸造方法	47	6.2.4 射压式造型机	88
3.3 习题与思考题	50	6.2.5 气冲造型机	88
第 4 章 铸造工艺与铸件结构设计	51	6.2.6 抛砂机	89
4.1 铸造工艺设计	51	6.3 制芯机	89
4.2 铸造工艺设计实例	59	6.3.1 热芯盒射芯机	89
4.3 铸件结构设计	60	6.3.2 壳芯机	90
4.3.1 铸造性能对铸件结构的要求	61	6.3.3 冷芯盒射芯机	91
4.3.2 铸造工艺对铸件结构的要求	64	6.4 混砂设备	92
4.3.3 铸件结构设计应考虑的其他方面	66	6.4.1 碾轮式混砂机	93
4.4 习题与思考题	67		

6.4.2 碾轮转子式混砂机	93	6.7.3 立式离心铸造机	103
6.4.3 逆流式混砂机	94	6.8 连铸机	103
6.5 落砂与清理设备	94	6.8.1 钢包运载装置	104
6.5.1 落砂机	94	6.8.2 中间包及运载装置	104
6.5.2 抛丸及喷丸清理设备	96	6.8.3 结晶器及振动装置	105
6.6 压铸机	98	6.8.4 二次冷却装置	106
6.6.1 热室压铸机	98	6.8.5 拉坯矫直装置	106
6.6.2 冷室压铸机	99	6.8.6 切割装置	106
6.7 离心浇注机	101	6.8.7 引锭装置	106
6.7.1 悬臂式卧式离心铸造机	102	6.9 习题与思考题	107
6.7.2 托辊式卧式离心铸造机	102		

第二篇 塑性成形技术

第7章 绪论	108	8.3.3 密席斯屈服准则(弹性形变能不 变条件)	133
7.1 塑性成形技术的含义与特点	108	8.3.4 中间主应力的影响	134
7.1.1 塑性成形的定义	108	8.3.5 平面问题和轴对称问题中屈服 准则的简化	135
7.1.2 塑性成形的本质	108	8.3.6 塑性变形中的应力状态对塑性与 变形抗力的影响	135
7.1.3 塑性成形中需要解决的 基本问题	109	8.4 几何方程、应变连续方程与体积 不变条件	137
7.1.4 塑性成形技术的特点	109	8.4.1 质点的应变状态与几何方程	137
7.2 塑性成形工艺方法的分类	109	8.4.2 变形连续方程	139
7.3 工艺与设备的关系	110	8.4.3 塑性变形时的体积不变条件	140
7.4 塑性成形技术的发展趋势	111	8.4.4 主应变、应变张量的不变量、 主剪应变和最大剪应变	140
第8章 金属塑性变形力学基础	117	8.4.5 应变偏张量和球张量	141
8.1 金属材料的真实应力-应变曲线	117	8.4.6 应变状态的影响	141
8.1.1 金属材料的单向拉伸试验	118	8.5 本构关系	141
8.1.2 金属材料的单向拉伸试验曲线 载荷最大点及颈缩阶段的特性	120	8.5.1 弹性应力应变的关系	142
8.1.3 真实应力-应变曲线的近似 数学表达式	121	8.5.2 塑性变形的增量理论 (流动理论)	143
8.1.4 变形温度和应变速率对真实 应力-应变曲线的影响	123	8.6 变形力的理论计算与主应力法	146
8.2 应力平衡微分方程	123	8.6.1 变形力的数学解析法	146
8.2.1 直角坐标系中一点的应力状态	123	8.6.2 主应力法	149
8.2.2 应力平衡微分方程	129	8.7 习题与思考题	151
8.3 屈服准则	131	第9章 塑性成形设备	153
8.3.1 与屈服准则相关的金属材料的 某些性质	132	9.1 概论	153
8.3.2 屈雷斯加屈服准则(最大剪应力 不变条件)	133		

9.1.1	塑性成形设备的驱动与传动 的特点	153	11.1.2	弯曲	210
9.1.2	塑性成形设备的分类	155	11.1.3	拉深	212
9.2	锻造设备	158	11.1.4	成形	214
9.2.1	液压机概述	159	11.2	冲压模具及其结构	216
9.2.2	液压机动力装置	162	11.2.1	冲裁模具及其结构	216
9.2.3	液压缸部件	164	11.2.2	弯曲模的典型结构	218
9.2.4	液压机机身	167	11.2.3	拉深模的典型结构	220
9.3	冲压设备	169	11.3	冲压过程有限元分析	221
9.3.1	机械压力机概述	169	11.3.1	有限元分析简介	221
9.3.2	曲柄滑块机构的设计计算	173	11.3.2	板料成形有限元模拟	222
9.3.3	机械压力机传动系统	177	11.3.3	板料成形有限元模拟前后 处理技术	223
9.3.4	机械压力机离合器与制动器	183	11.4	习题与思考题	225
9.4	习题与思考题	187	第 12 章	挤压成形工艺	227
第 10 章	锻造工艺	188	12.1	挤压成形基本工序	228
10.1	锻造基本工序	188	12.1.1	挤压工艺分类	228
10.1.1	自由锻工序	188	12.1.2	挤压金属流动规律	230
10.2	锻造模具及其结构	194	12.1.3	挤压主要缺陷形式	233
10.3	锻造过程有限元分析	204	12.2	挤压模具及其结构	234
10.4	习题与思考题	206	12.2.1	冷挤压模具及其结构	234
第 11 章	板料冲压成形工艺	207	12.2.2	温挤压模具及其结构	236
11.1	冲压成形基本工序	207	12.2.3	热挤压模具及其结构	237
11.1.1	冲裁	207	12.3	挤压过程有限元分析	237

第三篇 焊接技术

第 13 章	焊接冶金与成形原理	240	13.3.1	熔渣的作用及其分类	248
13.1	焊接冶金成形原理	240	13.3.2	熔渣的物理性能及其对焊缝的 影响	248
13.1.1	焊接的实质	240	13.3.3	熔渣的化学性能及其对焊缝的 影响	250
13.1.2	焊接接头的特征	240	13.3.4	焊接熔渣的断面情况	253
13.1.3	焊接冶金过程的特点	241	13.4	习题与思考题	254
13.1.4	焊缝金属的结晶	241	第 14 章	常用焊接方法	256
13.1.5	改善焊缝金属组织的措施	242	14.1	电弧焊接方法	256
13.1.6	影响焊接接头组织与性能的 因素	242	14.1.1	手工电弧焊	256
13.2	液态金属与气体的相互作用	244	14.1.2	埋弧自动焊	260
13.2.1	焊接过程中的气体及其来源	244	14.1.3	钨极氩弧焊	262
13.2.2	金属的氧化及其影响	244	14.1.4	熔化极气体保护焊	265
13.2.3	焊缝金属的氮化及其影响	245	14.1.5	熔化极氩弧焊	266
13.2.4	氢对焊缝金属的作用	246			
13.3	液态金属与熔渣的相互作用	247			

14.1.6	二氧化碳气体保护焊	267	16.5	焊接结构冲击韧性和低温强度	305
14.1.7	药芯焊丝气体保护焊	268	16.5.1	焊接结构的脆性断裂	305
14.2	压力焊及钎焊	269	16.6	焊接结构的疲劳强度	307
14.2.1	电阻焊	269	16.6.1	焊接结构的疲劳	307
14.2.2	摩擦焊	275	16.6.2	提高焊接接头疲劳强度的措施	307
14.2.3	钎焊	277	16.7	焊接结构的应力腐蚀破坏	309
14.3	习题与思考题	279	16.7.1	应力腐蚀破坏	309
第 15 章	焊接性分析与常用金属焊接	282	16.7.2	防止焊接结构产生应力腐蚀的措施	309
15.1	金属的焊接性及试验方法	282	16.8	习题与思考题	310
15.1.1	金属的焊接性	282	第 17 章	高能束焊接	312
15.1.2	影响焊接性的主要因素	282	17.1	高能束焊接的物理基础	312
15.1.3	金属焊接性的评估	283	17.1.1	高能束流束源品质的发展	312
15.2	结构钢的焊接	286	17.1.2	高能束流焊接技术	312
15.2.1	碳钢的焊接性	286	17.2	电子束焊	313
15.2.2	合金结构钢的焊接	287	17.2.1	电子束焊的基本原理	313
15.3	不锈钢的焊接	291	17.2.2	电子束焊的深熔焊效应	313
15.3.1	奥氏体不锈钢的焊接	291	17.2.3	电子束焊的特点	314
15.3.2	马氏体不锈钢的焊接	292	17.2.4	电子束焊的适用范围	314
15.3.3	铁素体不锈钢的焊接	292	17.2.5	电子束焊工艺	314
15.4	有色金属的焊接	293	17.2.6	真空电子束焊的应用	315
15.4.1	铝及铝合金的焊接	293	17.3	激光焊	316
15.4.2	铜及铜合金的焊接	295	17.3.1	激光焊原理	316
15.5	习题与思考题	296	17.3.2	激光焊的特点	316
第 16 章	焊接结构力学与强度	297	17.3.3	激光焊的应用	316
16.1	焊接应力与变形	297	17.3.4	激光焊工艺	317
16.1.1	焊接应力与变形的形成	297	17.4	习题与思考题	317
16.1.2	纵向残余应力及其分布特点	298	第 18 章	焊接工装设计	319
16.1.3	横向残余应力及其分布特点	299	18.1	焊接工装的组成与分类	319
16.1.4	厚板中厚度方向残余应力及其分布	300	18.1.1	焊接工装的地位和作用	319
16.2	残余应力对结构的影响	300	18.1.2	焊接工装的分类	319
16.2.1	对静载强度的影响	300	18.1.3	焊接工装的特点	320
16.2.2	对构件加工尺寸精度的影响	301	18.2	焊件的定位原理及定位器设计	320
16.2.3	对受压杆件稳定性的影响	302	18.2.1	焊件的定位及定位器	320
16.2.4	对应力腐蚀裂纹的影响	302	18.3	焊接工装夹具	323
16.3	减小及消除焊接残余应力的措施	302	18.3.1	夹紧的作用	323
16.3.1	减小焊接残余应力的措施	302	18.3.2	夹紧机构的设计要点	324
16.3.2	消除焊接残余应力的措施	303	18.3.3	对夹紧机构的基本要求	324
16.4	预防和消除焊接变形的措施	303	18.3.4	夹紧机构的组成	324
16.4.1	焊接变形的分类	303	18.3.5	常用夹紧机构	325
16.4.2	预防焊接变形的措施	304	18.3.6	气动与液压夹紧器	325
16.4.3	消除焊接变形的措施	305			

18.3.7 专用夹具	326	18.5.2 焊工变位机	330
18.4 焊接工装夹具的设计方法	326	18.5.3 变位机械装备的组合应用	330
18.4.1 夹具设计的基本要求	326	18.6 焊件变位机械	331
18.4.2 工装夹具设计基本方法	327	18.6.1 焊件变位机	331
18.4.3 工装夹具设计的步骤	327	18.6.2 焊件变位机设计	334
18.4.4 工装夹具制造的精度要求	328	18.7 习题与思考题	335
18.4.5 夹具结构工艺性	328	参考文献	336
18.5 焊接变位机械	329		
18.5.1 焊接操作机	329		

第一篇 铸 造

第1章 铸造工艺基础

铸造生产过程复杂,铸件的质量与铸件的铸造工艺性能密切相关。影响铸件质量的因素很多,其中最主要的影响因素是合金的铸造性能和铸件的凝固过程。

合金的铸造性能是指合金在熔炼、充填型腔和冷却凝固的铸造生产过程中,获得尺寸精确、结构完整的铸件的能力,主要包括合金的充型能力、流动性、收缩性等。这些性能是选择铸造合金材料、确定铸造工艺方案、进行铸件结构设计的依据。

1.1 液态合金的充型能力

液态合金填充铸型的过程简称充型。液态合金充满型腔,获得形状完整、轮廓清晰的铸件的能力,称为液态合金的充型能力。在液态合金充型过程中,有时伴随着结晶现象,若充型能力不足,形成的晶粒堵塞充型通道,液态合金被迫停流,使铸件薄壁处或远离浇口的宽大表面产生“浇不足”或“冷隔”等缺陷。影响合金充型能力的因素很多,凡影响液态合金在铸型中的流动时间和流动速度的因素,都能影响其充型能力,其中主要的是合金的流动性、浇注条件和铸型的填充条件。

1. 合金的流动性

合金的流动性是指合金本身在液态下的流动能力,是液态合金的主要铸造性能之一。液态合金的流动性越好,表示液态合金的充型能力越强,有利于浇注出轮廓清晰的薄壁复杂铸件,有利于液态合金中非金属夹杂物和气体的上浮和排除,有利于对合金凝固过程所产生的收缩进行补缩,以免产生浇不足或冷隔、气孔、夹渣,以及缩孔、缩松等缺陷。

合金流动性的好坏,通常以“螺旋形流动试样”的长度来衡量。测定时,先将液态合金浇入螺旋形标准试样(如图1-1所示)所形成的铸型中,冷凝后,测出浇铸试件的实际螺旋线长度。为便于测定,在标准试样上每隔50 mm设置一个凸点标记。在相同的工艺条件下,螺旋线越长,合金的流动性就越好。在常用铸造合金中,灰铸铁、硅黄铜的流动性较好,铝合金次之,铸钢的流动性最差(见表1-1)。

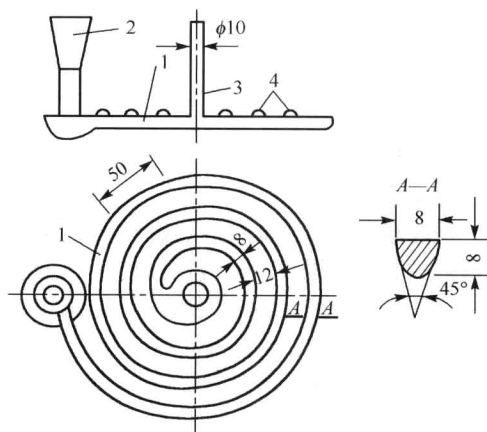


图 1-1 螺旋形标准试样

1—试样铸件; 2—浇口; 3—冒口; 4—试样凸点

表 1-1 常用铸造合金的流动性

合金	造型材料	浇注温度/(°C)	螺旋线长度/mm
灰口铸铁 C+Si = 6.2% C+Si = 5.2% C+Si = 4.2%	砂型	1300	1800
			1000
			600
铸钢 (0.4%C)	砂型	1600	100
		1640	200
锡青铜 (9%~11%Sn+2%~4%Zn)	砂型	1040	420
硅黄铜 (1.5%~4.5%Si)	砂型	1100	1000
铝合金 (硅铝明)	金属型 (300°C)	680~720	700~800

影响合金流动性的因素很多, 不同种类合金的流动性差别较大, 但对同类合金而言, 化学成分的影响最为显著。化学成分对合金流动性的影响由合金的结晶特点决定。图 1-2 所示的是 Pb-Sb 合金的流动性、结晶特点与化学成分的关系。共晶成分合金的结晶是在恒温下进行的, 液态合金从表层逐层向中心凝固, 如图 1-2(a)所示, 由于已结晶的固体层内表面比较光滑, 对金属液的流动阻力小, 故流动性最好。除纯金属和共晶成分合金外, 其他成分合金是在一定温度范围内逐步凝固的。此时, 结晶是在一定宽度的凝固区内同时进行的, 凝固前沿为发达的树枝晶延伸进入液态合金中, 如图 1-2(b)所示, 对合金液流动的阻力大, 所以非共晶成分的合金流动性变差。显然, 同类合金的结晶温度区间越大, 结晶时固液两相共存区越宽, 则对内部液体的流动阻力越大, 合金的流动性也就越差。因此, 从流动性考虑, 宜选用共晶成分或结晶温度区间窄的合金作为铸造合金。除此之外, 合金液的黏度、结晶潜热、导热系数等物理性能对合金的流动性也有一定的影响。

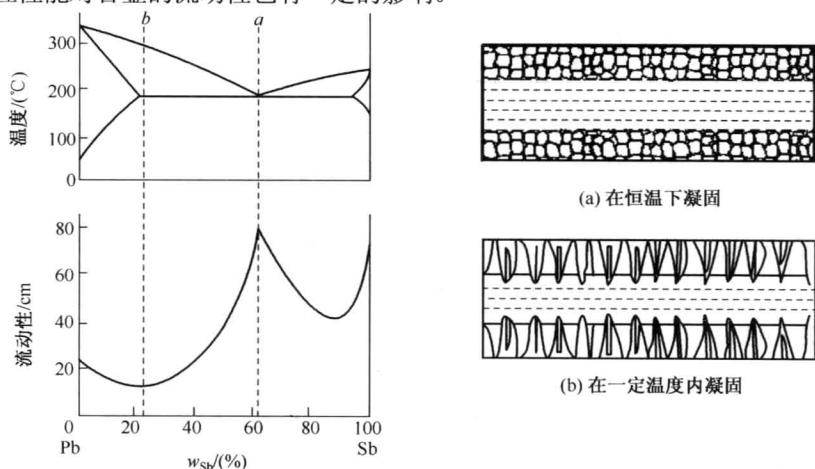


图 1-2 Pb-Sb 合金的流动性、结晶特点与化学成分的关系

2. 浇注条件

1) 浇注温度

浇注温度对合金流动性的影响非常显著。浇注温度较高的金属液黏度较低, 过热度较高, 蓄热多, 保持液态的时间较长, 故流动性较好, 且有利于夹杂物的上浮和排除, 因此, 适当提高浇注温度是提高充型能力的有效措施。但浇注温度过高, 会导致合金液的氧化、吸气和收缩, 铸件容易产生粘砂、气孔、缩孔、缩松、粗晶等缺陷, 因此, 只是对薄壁复杂铸件或合金流动性较差的铸件, 才采用适当提高浇注温度的方法来改善合金的流动性。一般而言, 在保证液态合金有足够充型能力的前提下, 浇注温度应尽可能低。通常, 铸钢的浇注温度范围为 1520~1620°C, 铸铁的浇注温度范围为 1230~1450°C, 铝合金的浇注温度范围为 680~780°C, 具体温度视铸件大小、壁厚、复杂程度及合金成分而定。

2) 浇注压力

增大浇注压力可改善金属的流动性, 生产中常采用增加直浇道高度的方法或采用压力铸造、离心

铸造工艺来增大浇注压力,提高金属的流动性。此外,浇注系统结构应尽量简化,以减小流动阻力,提高充型能力。

3. 铸型条件

1) 铸型导热能力

铸型材料的导热速度越高,对液态合金的激冷能力越强,合金液的流动时间会缩短,合金的充型能力就越差。例如,液态合金在金属型中的充型能力比在砂型中差。金属型铸造、压力铸造和熔模铸造时,铸型被预热到较高的温度,通过减小对金属液的激冷作用从而减缓了金属液的冷却速度,故使充型能力得到提高。

2) 铸型阻力

当铸型型腔狭窄、结构复杂及有大的水平面等结构时,将会使合金液的流动变得困难,降低充型能力。铸型材料发气量大,浇注时型腔内气体增多,也会增加充型阻力,使合金的充型能力变差。

综上所述,合金的充型能力与合金的流动性、浇注条件及铸型条件有关。为提高合金的充型能力,应尽量选择共晶成分或结晶温度区间小、流动性好的合金,同时应尽量优化外部工艺条件。在许多情况下,合金是确定的,因此需要从其他方面采取措施来提高合金的充型能力。

1.2 铸件的凝固与收缩

浇入铸型中的合金液在冷却凝固过程中要发生结晶,同时伴随着收缩。凝固和收缩对铸件的质量影响很大,为了保证铸件质量,必须合理地控制铸件的凝固和收缩过程。

1. 铸造合金的结晶

铸造合金的结晶也是通过晶核的形成和晶体的长大这两个过程来实现的。实际生产过程中,铸造合金的结晶大多以非均质方式形核。由于实际铸造合金中往往存在杂质,这样在液态铸造合金结晶时就会由一些外来的微小固态质点形成外来晶核,即非均质形核,也称为孕育(变质)处理。非均质形核所需能量较小,因而可以在较小的过冷度下获得较多的晶核数目,从而获得晶粒细小的铸件。

铸造合金的结晶与凝固条件有关,凝固条件不同,晶体形态会发生变化。铸型型壁处传热快,型壁表面又有促进形核的作用,这样达到结晶条件的那部分液体在型壁上就会产生大量晶核,在型壁“激冷”及液体合金热对流的综合作用下,形成一层很薄的等轴细晶区。与此同时,铸型温度升高,液体合金的冷却速度降低,过冷度减小,形核率降低,使那些与传热最快方向相反、与型壁垂直的晶核优先长大并进入液体合金,而其他方向上的晶核由于受相邻晶体的阻碍而生长较慢。此过程持续进行,就形成了向液体合金内部平行长大的柱状晶区。铸型心部,由于过冷度减小较大,温度梯度小,传热逐渐无方向性,晶体向各个方向均匀长大,即形成粗大的等轴晶区。

铸件的质量和力学性能主要取决于柱状晶和等轴晶所占比例的大小。铸件结晶后是以等轴晶为主还是以柱状晶为主,除了与铸造合金的成分有关,还与铸件的凝固方式有关。

2. 铸件的凝固方式

铸件的成形过程是液态金属在铸型中的凝固过程。合金的凝固方式对铸件的质量、性能及铸造工艺等都有极大的影响。

铸件在凝固过程中,其断面一般存在3个区域,即固相区、凝固区和液相区,其中液相和固相并存的凝固区对铸件质量影响最大。通常,根据凝固区的宽窄将铸件的凝固方式分为逐层凝固、中间凝固和糊状凝固三种方式,如图1-3所示。

1) 逐层凝固

纯金属或共晶成分的合金在凝固过程中因不存在液、固相并存的凝固区,故断面上外层的固体和

内层的液体由一条界线(凝固前沿)清楚地分开,如图 1-3(a)所示。随着温度的下降,固体层不断加厚,液体层不断减小,直到中心层全部凝固。这种凝固方式称为逐层凝固。逐层凝固得到的晶体主要是柱状晶。灰铸铁、铝硅合金、硅黄铜及低碳钢等倾向于这种凝固方式。

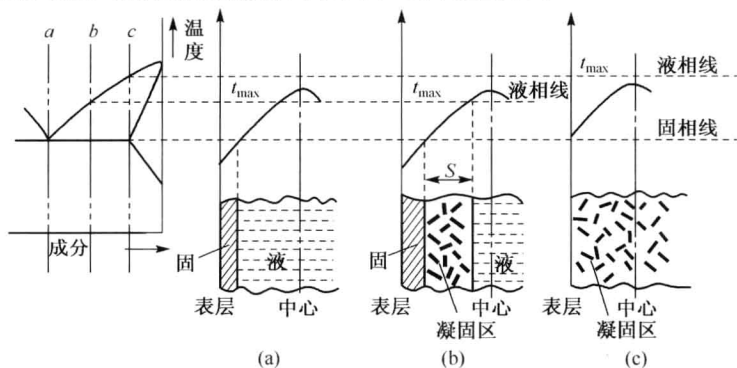


图 1-3 铸件的凝固方式

2) 糊状凝固

当合金的结晶温度范围很宽且铸件断面温度分布较为平坦时,在凝固的某段时间内,铸件表面并不存在固体层,而液、固相并存的凝固区贯穿整个断面,如图 1-3(c)所示。由于这种凝固方式与水泥凝固方式很相似,先成糊状而后固化,故称为糊状凝固。糊状凝固得到的晶体主要是等轴晶,由于在凝固过程中固态枝晶的析出会阻碍液态合金的流动,故充型能力较差,且难以补缩,往往会产生多种铸造缺陷。铝铜合金、锡青铜、球墨铸铁及高碳钢等,倾向于这种凝固方式。

3) 中间凝固

介于逐层凝固和糊状凝固之间的凝固方式称为中间凝固,如图 1-3(b)所示。中间凝固得到的晶体既有等轴晶,又有柱状晶,大多数合金都属于这种凝固方式。

铸件质量与其凝固方式密切相关。一般来说,逐层凝固时,液态合金的充型能力强,便于防止缩孔和缩松。糊状凝固时,充型能力较差,且难以补缩,难以获得致密的铸件。尽管大多数的合金都属于中间凝固,在铸造选材时,仍倾向于选择逐层凝固的合金,如灰铸铁。同时采用适当的工艺措施,减少铸造缺陷的形成,保证铸件质量。

3. 铸造合金的收缩性

1) 合金收缩的概念

合金在浇注、凝固直至冷却到室温的过程中体积或尺寸缩减的现象,称为收缩。收缩是合金固有的物理特性,但如果在铸造过程中不能对收缩进行控制,常常会导致铸件产生缩孔、缩松、变形和裂纹等缺陷。因此,必须研究合金的收缩规律及对铸件质量的影响。

合金的收缩量是用体积收缩率和线收缩率来表示的。当合金的温度自 T_0 下降到 T_1 时,体收缩率是以单位体积的相对变化量来表示的;线收缩率是以单位长度的相对变化量来表示的,即

体收缩率:

$$\varepsilon_V = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\% = \alpha_V (T_0 - T_1) \times 100\% \quad (1-1)$$

线收缩率:

$$\varepsilon_L = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100\% = \alpha_L (T_0 - T_1) \times 100\% \quad (1-2)$$

式中, V_0 、 V_1 为合金在 T_0 、 T_1 时的体积; L_0 、 L_1 为合金在 T_0 、 T_1 时的长度 (cm); α_V 、 α_L 为合金在 T_0 至 T_1 温度范围内的体收缩系数和线收缩系数 ($1/^\circ\text{C}$)。

金属从液态冷却到室温要经历三个相互联系的收缩阶段，如图 1-4 所示。

(1) 液态收缩 指合金从浇注温度 ($T_{\text{浇}}$) 冷却到液相线温度 ($T_{\text{液}}$) 过程中的收缩。从式(1-1)可看出，浇注温度高，过热度 ($T_{\text{浇}} - T_{\text{液}}$) 大和收缩系数较大，都会使液态收缩率增加。

(2) 凝固收缩 指合金从液相线 ($T_{\text{液}}$) 到固相线 ($T_{\text{固}}$) 之间凝固过程中的收缩。对于纯金属和共晶成分的合金，凝固期间的体积收缩是由于状态的改变，与温度无关；具有结晶温度范围的合金，凝固收缩由状态改变和温度下降两部分产生，结晶温度范围 ($T_{\text{液}} - T_{\text{固}}$) 越大，则凝固收缩越大。

液态收缩和凝固收缩使金属液体积缩小，一般表现为型内液面降低，是铸件产生缩孔和缩松的基本原因。

(3) 固态收缩 指合金从固相线温度冷却到室温时的收缩。固态收缩通常直接表现为铸件外形尺寸的减小，故一般用线收缩率来表示。线收缩对铸件形状和尺寸精度影响很大，是铸造应力、变形和裂纹等缺陷产生的基本原因。

合金总的收缩率为上述三种收缩的和。对于不同的合金，有不同的收缩率。在常用铸造合金中，铸钢收缩率较大，而灰铸铁较小。这是由于灰铸铁中的碳在凝固过程中以石墨态析出的缘故。石墨的比容大，产生体积膨胀，部分抵消了合金的收缩。

2) 影响合金收缩的因素

影响收缩的因素主要有化学成分、浇注温度、铸件结构和铸型条件等。

(1) 化学成分 碳素钢的碳含量增加，其 $\epsilon_{\text{凝}}$ 增加而 $\epsilon_{\text{固}}$ 略减。灰铸铁中的碳、硅含量越高，其石墨化能力越强，故灰铸铁的收缩率越小；硫可阻碍石墨析出，使灰铸铁收缩率增大。表 1-2 所示的是几种铁碳合金的体积收缩率。

(2) 浇注温度 浇注温度越高，过热度越大，合金的 $\epsilon_{\text{液}}$ 和总收缩率就越大。为减小合金液态收缩及氧化、吸气，并兼顾流动性，浇注温度一般控制在合金液相线温度以上 50~150℃。

表 1-2 几种铁碳合金的体积收缩率

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

(3) 铸件结构和铸型条件 铸件结构和铸型条件对收缩的影响主要表现在使铸件收缩受阻。由于铸件壁厚不均匀，各部分冷却速度不同，收缩不一致，从而相互制约产生阻力；而铸型和型芯则直接阻碍收缩，从而产生机械阻力。铸件结构越复杂，铸型硬度越高，芯骨越粗大，铸件收缩时受阻越大，实际收缩率越小。因此，在设计和制造模样时，应根据合金的种类和铸件的受阻情况，综合考虑收缩率的影响。

1.3 铸造应力及铸件的变形与裂纹

当铸件的固态收缩受到阻碍时，在铸件内部产生的内应力称为铸造内应力。当铸造应力方向与铸件所受外力方向相同时，铸件的实际承载能力会降低。此外，铸造应力还是引起铸件产生变形和裂纹的基本原因。

1. 铸造应力

按照内应力的产生原因，可分为热应力和机械应力两种。

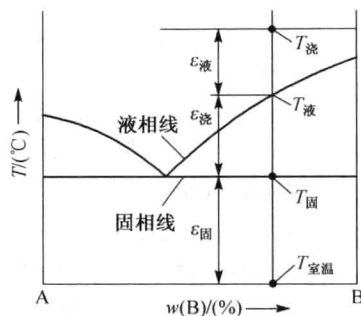


图 1-4 合金收缩三阶段

1) 热应力

热应力是由于铸件各部分冷却速度不同,以至于在同一时间内铸件各部分收缩不一致、相互约束而引起的内应力。

为了分析热应力的形成过程,首先应了解固态金属自高温冷却到室温时力学状态的变化。固态金属在再结晶温度 $T_{\text{再}}$ (钢和铸铁的 $T_{\text{再}}$ 为 $620\sim 650^{\circ}\text{C}$)以上处于塑性状态,此时,在较小的应力作用下,便可发生塑性变形(即永久变形),其内应力在变形后可自行消除;在再结晶温度以下呈弹性状态,此时,在应力作用下,仅能产生弹性变形,变形后应力仍然存在。

图1-5所示的是热应力形成过程及应力框的粗、细杆冷却曲线示意图。如图1-5(a)所示,应力框由长为 L_0 的一根粗杆I和两根细杆II及上、下横梁整铸而成,它用来分析热应力的形成过程。由该图可见,杆I与杆II的截面厚度不同,冷却速度不一,两杆的收缩不一致,因而产生了内应力。其具体形成过程可分为如下3个阶段。

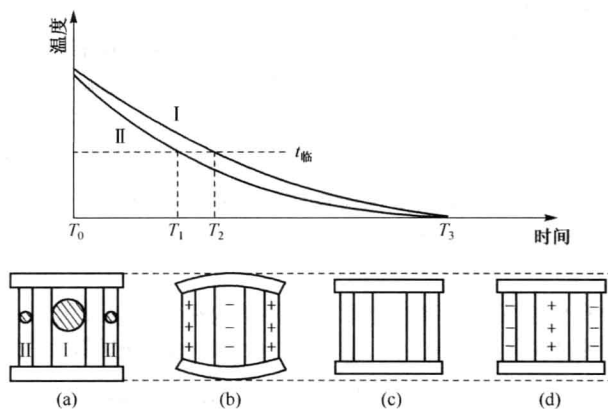


图1-5 热应力的形成

“+”表示拉应力;“-”表示压应力

(1) 第1阶段($T_0\sim T_1$) 此时铸件处于高温阶段,两杆均处于塑性状态,尽管此时两杆的冷却速度不同,收缩也不同步,但瞬时存在的应力通过塑性变形可自行消除,在铸件内不会产生应力。

(2) 第2阶段($T_1\sim T_2$) 进入此阶段后,冷速较快的细杆II已进入弹性状态,而粗杆I仍处于塑性状态,此时由于细杆II冷速快,收缩大于粗杆I,所以粗杆I受压缩,细杆II受拉伸(如图1-5(b)所示),形成了暂时内应力,但此应力因粗杆I发生的微量受压塑性变形而自行消失(如图1-5(c)所示)。

(3) 第3阶段($T_2\sim T_3$) 进一步冷却到更低温度,粗杆I也处于弹性状态,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,还将进行较大的收缩,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,在粗杆I中产生拉应力,而细杆II则受到杆I因收缩而施与的压应力(如图1-5(d)所示)。冷却到室温时,框中就产生了残余热应力。

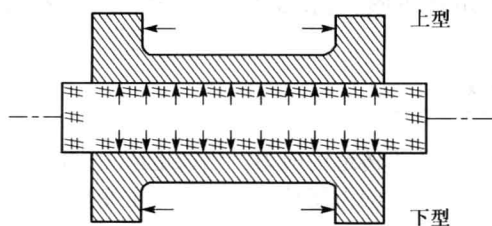


图1-6 轴套机械应力示意图

由此可见,热应力使铸件冷速较慢的厚壁或心部受拉应力,冷速较快的薄壁或表层受压应力。铸件的壁厚差别越大,合金线收缩率越高,弹性模量越大,产生的热应力就越大。

2) 机械应力

机械应力是合金的固态收缩受到铸型或型芯的机械阻碍而形成的内应力。如图1-6所示的轴套铸件在冷却收缩时,其轴向受砂型阻碍、径向受型芯阻碍而产生机械应力。

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,