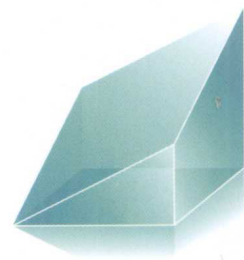
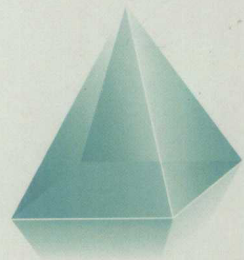
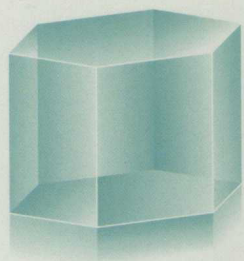
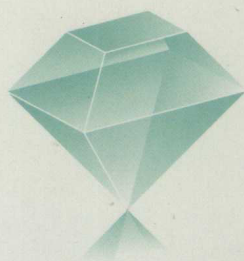
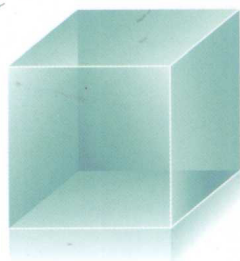


高等学校教材

材料成形 技术基础

主编 江树勇



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

高等学校教材

材料成形技术基础

CAILIAO CHENGXING JISHU JICHU

主 编 江树勇

参 编 王传洋 赵立红 张艳秋 赵成志



高等教育出版社·北京

HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书将材料成形的科学理论和材料成形技术融为一体,在注重材料成形基本科学理论的同时,重点介绍各种成形技术,并融合了大量的新技术,体现了材料成形技术的发展前沿动态。本书较为全面地介绍了金属材料成形技术、高分子材料成形技术、无机非金属材料成形技术和复合材料成形技术。本书编写了大量的工艺案例,有利于培养学生的工程实践能力,拓宽学生的工程思维。本书共分 8 章,分别为铸造成形技术、塑性成形技术、焊接成形技术、粉末冶金成形技术、金属复合成形技术、高分子材料成形技术、无机非金属材料成形技术和复合材料成形技术。

本书可作为高等学校机械类和近机械类专业的教材,也可作为材料科学与工程学科相关专业的教学参考书,还可作为相关专业技术人员的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形技术基础/江树勇主编. —北京:高等教育出版社,2010.7

ISBN 978-7-04-029486-6

I. ①材… II. ①江… 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(2010)第 082529 号

策划编辑 宋 晓 责任编辑 王素霞 封面设计 于 涛 版式设计 王 莹
责任校对 殷 然 责任印制 朱学忠

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 河北省财政厅票证文印中心

开 本 787×1092 1/16
印 张 22.25
字 数 540 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2010 年 7 月第 1 版
印 次 2010 年 7 月第 1 次印刷
定 价 30.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究
物料号 29486-00

前 言

工程、实践和创新是促进社会协调发展和人类文明进步的永恒主题,高等工程教育需要先进的工程教育理念,需要丰富的工程实践内涵,需要锐意的工程创新精神。

哈尔滨工程大学工程训练中心自2005年5月成立以来,以“工程”、“实践”和“创新”为主题,以“知识”、“素质”和“能力”的培养为主线,在人才培养方面形成了独具特色的工程实践教育理念和工程实践教学模式。2006年12月,哈尔滨工程大学工程训练中心被评为国家级实验教学示范中心;2007年10月,哈尔滨工程大学工程训练中心工程训练课程被评为国家级精品课程;2008年10月,哈尔滨工程大学工程训练中心工程实践创新教学团队被评为国家级教学团队;2009年6月,哈尔滨工程大学工程训练中心机械制造基础课程被评为省级精品课程。就是在这样的背景下,哈尔滨工程大学工程训练中心与高等教育出版社合作,编写了工程训练系列教材《工程材料》、《材料成形技术基础》和《机械加工工艺基础》。这套教材在国家机械基础课程教学指导分委员会教学大纲的指导下,汲取了国内外众多优秀学者的智慧,凝聚了全体编写教师的学识,融入了丰富的工程经验,突出了鲜明的工程特色,丰富了新材料、新技术和新工艺的内涵。

本书是工程训练系列教材中的《材料成形技术基础》篇。材料是人类社会赖以生存的基础,也是工程建设中不可缺少的基础资源,然而,材料只有通过一定的成形技术才能转化为人类所需要的产品。技术作为工程建设中必不可少的手段,并不是孤立存在的,在每一项技术的背后,都应该有科学的理论作为支撑,而技术也同样需要在工程实践中实现其自身的价值。所以说,科学、技术和工程之间有着必然的联系,三者相互融合,相互促进,共同发展,不断地推动着人类社会走向文明和进步。基于这样一种思想,本书并不局限于只谈技术,在介绍每种成形技术的同时,不仅阐述相关的科学理论知识,还介绍相关技术的工程应用背景。

本书共分8章,第1章为铸造成形技术,主要介绍铸造成形理论基础、铸造方法、铸造工艺设计、铸件结构工艺性和铸造工艺实例;第2章为塑性成形技术,主要介绍塑性成形理论基础、塑性成形方法、锻压工艺设计、锻压结构工艺性和锻压工艺设计实例;第3章为焊接成形技术,主要介绍焊接理论基础、焊接成形方法、材料的焊接性、焊接结构工艺设计和焊接工艺设计实例;第4章为粉末冶金成形技术,主要介绍粉末冶金理论基础、粉末冶金工艺和粉末冶金制品实例;第5章为金属复合成形技术,主要介绍金属液态与固态复合成形技术、金属半固态成形技术;第6章为高分子材料成形技术,主要介绍高分子材料成形理论基础、高分子材料液态成形技术、高分子材料固态成形技术;第7章为无机非金属材料成形技术,主要介绍陶瓷材料成形技术;第8章为复合材料成形技术,主要介绍聚合物基复合材料成形技术、金属基复合材料成形技术和陶瓷基复合材料成形技术。

参加本书编写工作的有哈尔滨工程大学的江树勇(第2章和第5章)、赵立红(第3章、第1章1.2节和1.4节)、张艳秋(第4章、第1章1.1节)、赵成志(第1章1.3节和1.5节)、苏州大学的王传洋(第6章、第7章和第8章)。全书由江树勇担任主编并进行统稿。

哈尔滨工业大学李春峰教授审阅了本书,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中进行了一些崭新的尝试,加之编者的知识水平有限,难免有错误和不妥之处,敬请专家和读者批评指正。

作 者

2010 年 2 月

目 录

第 1 章 铸造成形技术	1		
1.1 铸造成形理论基础	1		
1.1.1 金属结晶的宏观现象	1		
1.1.2 金属结晶的热力学条件	2		
1.1.3 金属结晶的基本过程	3		
1.1.4 液态合金的结晶	5		
1.1.5 铸件成形过程控制	8		
1.1.6 铸件常见缺陷	14		
1.1.7 常用合金的铸造性能	22		
1.2 铸造方法	26		
1.2.1 砂型铸造	26		
1.2.2 特种铸造	33		
1.2.3 常用的铸造方法比较	40		
1.3 铸造工艺设计	43		
1.3.1 浇注位置的选择	43		
1.3.2 分型面的选择	45		
1.3.3 铸造工艺参数的确定	49		
1.3.4 型芯的设计	56		
1.3.5 浇注系统的设计	61		
1.3.6 补缩系统的设计	63		
1.4 铸件结构工艺性	65		
1.4.1 铸造工艺对铸件结构的要求	65		
1.4.2 铸造性能对铸件结构的要求	72		
1.4.3 铸造方法对铸件结构的要求	78		
1.5 铸造工艺设计实例	79		
1.5.1 铸造工艺设计的内容和一般程序	79		
1.5.2 接盘铸造工艺设计	81		
1.5.3 第Ⅱ级混合室盖铸造工艺设计	83		
1.5.4 摇臂铸造工艺设计	84		
习题	86		
参考文献	87		
第 2 章 塑性成形技术	89		
2.1 金属塑性成形物理基础	89		
2.1.1 单晶体的塑性变形	89		
2.1.2 多晶体的塑性变形	94		
2.1.3 冷塑性变形对金属组织性能的影响	96		
2.1.4 加热对冷塑性变形金属组织性能的影响	98		
2.1.5 热塑性变形对金属组织性能的影响	100		
2.2 金属塑性成形力学基础	103		
2.2.1 应力状态分析	103		
2.2.2 应变状态分析	105		
2.2.3 屈服准则	106		
2.3 金属塑性变形评价指标及影响因素	107		
2.3.1 金属塑性及变形抗力	107		
2.3.2 影响金属塑性及变形抗力的因素	108		
2.4 体积塑性成形方法	109		
2.4.1 锻造	109		
2.4.2 挤压	117		
2.4.3 拉拔	118		
2.4.4 轧制	120		
2.5 板料塑性成形方法	121		
2.5.1 冲裁	122		
2.5.2 弯曲	124		
2.5.3 拉深	125		
2.5.4 翻边	127		
2.6 特种塑性成形方法	128		

2.6.1 超塑性成形	128	3.4 材料的焊接性	212
2.6.2 旋压成形	130	3.4.1 材料焊接性的概念	212
2.6.3 电磁成形	134	3.4.2 影响焊接性的因素	213
2.6.4 液压胀形	135	3.4.3 焊接性的评价方法	214
2.6.5 摆动辗压	136	3.4.4 低碳钢的焊接	215
2.6.6 特种轧制	136	3.4.5 中、高碳钢的焊接	216
2.7 锻造工艺设计	138	3.4.6 普通合金结构钢的焊接 ...	216
2.7.1 自由锻工艺设计	138	3.4.7 奥氏体不锈钢的焊接	218
2.7.2 模锻工艺设计	143	3.4.8 铸铁的焊补	218
2.8 冲压工艺设计	148	3.4.9 有色金属的焊接	218
2.8.1 冲裁工艺设计	148	3.5 焊接结构工艺设计	220
2.8.2 拉深工艺设计	151	3.5.1 焊接结构材料的选择	220
2.8.3 冲压设备的选择	157	3.5.2 焊接材料及其选用	221
2.9 锻件及冲压件结构工艺性分析	159	3.5.3 焊缝的布置	225
2.9.1 锻件结构工艺性分析	159	3.5.4 焊接方法的选择	228
2.9.2 冲压件结构工艺性分析 ...	162	3.5.5 焊接接头设计	229
2.10 典型零件塑性成形工艺实例	166	3.5.6 焊接质量检验方法	232
2.10.1 自由锻工艺实例	166	3.6 焊接工艺设计实例	233
2.10.2 模锻工艺实例	170	3.6.1 支撑座的焊接工艺设计 ...	233
2.10.3 冲压工艺实例	175	3.6.2 压力气罐焊接工艺设计 ...	235
习题	182	习题	237
参考文献	184	参考文献	238
第3章 焊接成形技术	185	第4章 粉末冶金成形技术	240
3.1 焊接理论基础	185	4.1 粉末冶金工艺理论基础	240
3.1.1 电弧焊热过程	185	4.1.1 金属粉末的性能	240
3.1.2 电弧焊的冶金过程	187	4.1.2 粉末压制原理	242
3.1.3 焊接接头的金属组织与 性能	190	4.1.3 粉末烧结原理	242
3.2 焊接力学基础	191	4.2 粉末冶金工艺流程	242
3.2.1 焊接应力和变形产生的 原因	191	4.2.1 粉末的制备	242
3.2.2 焊接变形的基本形式	192	4.2.2 粉末的预处理	244
3.2.3 减小和控制焊接应力与 变形的措施	193	4.2.3 粉末的成形	245
3.3 常用的焊接方法	195	4.2.4 烧结工艺	247
3.3.1 熔焊	196	4.2.5 烧结后处理	248
3.3.2 压焊	205	4.3 粉末冶金制品的结构工艺性	249
3.3.3 钎焊	211	4.4 粉末冶金制品实例	251
		4.4.1 不同材料的制品	251
		4.4.2 具有自润滑功能的制品 ...	252
		4.4.3 机械结构零件制品	252

习题	253	习题	316
参考文献	254	参考文献	317
第 5 章 金属复合成形技术	255	第 7 章 无机非金属材料成形技术	318
5.1 金属液态与固态复合成形技术	255	7.1 陶瓷材料成形工艺特点	318
5.1.1 挤压铸造技术	255	7.2 陶瓷材料成形方法	320
5.1.2 铸轧复合成形技术	257	7.2.1 注射成形	320
5.1.3 铸挤复合成形技术	257	7.2.2 挤出成形	321
5.2 金属半固态成形技术	258	7.2.3 浇注成形	322
5.2.1 流变铸造	258	7.2.4 流延成形	324
5.2.2 触变铸造	259	7.2.5 等静压成形	325
5.2.3 触变锻造	260	7.2.6 其他成形方法	326
5.2.4 触变挤压	260	习题	327
5.2.5 半固态轧制	260	参考文献	328
5.2.6 半固态注射成形	260	第 8 章 复合材料成形技术	329
5.2.7 其他半固态成形技术	261	8.1 复合材料成形的工艺特点	329
习题	263	8.2 聚合物基复合材料成形技术	330
参考文献	263	8.2.1 热压罐成形	330
第 6 章 高分子材料成形技术	264	8.2.2 拉挤成形	331
6.1 高分子材料成形理论基础	264	8.2.3 液体模塑成形	333
6.1.1 高分子材料的力学性能	264	8.2.4 无模成形	334
6.1.2 高分子材料的物理性能	266	8.3 金属基复合材料成形技术	335
6.1.3 高分子材料的化学性能	266	8.3.1 液态金属浸渗成形	336
6.1.4 高分子材料的成形性能	267	8.3.2 热压固结成形	337
6.1.5 高分子材料的流变性	269	8.3.3 粉末冶金	337
6.2 高分子材料的液态成形技术	270	8.3.4 喷雾共沉积	338
6.2.1 静态浇注	270	8.3.5 半固态复合铸造成形	339
6.2.2 离心浇注	273	8.4 陶瓷基复合材料成形技术	339
6.2.3 嵌入浇注	275	8.4.1 浆料浸渍热压	339
6.2.4 注射成形	276	8.4.2 气-液反应成形	339
6.2.5 挤出成形	286	8.4.3 化学气相渗透(CVI)	340
6.2.6 吹塑成形	292	8.4.4 溶液浸渍热裂	340
6.2.7 滚塑旋转成形	301	8.4.5 碳-碳复合材料成形	340
6.3 高分子材料的固态成形技术	302	习题	341
6.3.1 热成形	303	参考文献	342
6.3.2 压制成形	307	附录 各章专业英语词汇	343
6.3.3 焊接成形	313		

第 1 章 铸造成形技术

铸造是将金属材料熔化成液态后,浇注入与拟成形的零件形状及尺寸相适应的模型空腔(称为铸型)中,待其冷却凝固后获得具有一定形状和尺寸的毛坯或零件的方法。它是制造毛坯和零件的主要成形方法之一。铸造生产历史悠久,至今仍然在国民经济中占有很重要的地位。与其他成形方法相比,铸造具有以下优点:

① 成形能力强。能够制造形状复杂的铸件,尤其是能制造具有复杂内腔的毛坯或零件。

② 工艺适应性强。铸件的合金成分、尺寸、形状、质量和生产批量等几乎不受限制。对于不宜塑性成形和焊接的材料,铸造生产方法具有特殊的优势。

③ 经济性好。所用原材料来源广泛,而且铸件的形状和尺寸与零件非常接近,可以节约金属,减少后续加工费用,因而生产成本较低。

但铸造成形也有一些缺点,如铸件(尤其是砂型铸件)的组织比较粗大,且内部常有缩孔、缩松和气孔等缺陷,使得铸件的力学性能一般不如锻件;铸造生产工序繁多,工艺过程较难控制,故铸件质量不够稳定;铸造生产的工件条件较差,工人劳动强度较大等。

1.1 铸造成形理论基础

金属由液态转变为固态的过程称为凝固。凝固后的固态金属通常条件下是晶体,所以又将这一转变过程称为结晶。结晶是原子从不规则排列转变为规则排列的过程。绝大多数金属的制造都要经历熔炼和铸造过程,因而也就都要经历由液态转变为固态的结晶过程。由于金属结晶时形成的组织与其各种性能有着密切的关系,因此,研究金属结晶过程的基本规律,对改善金属材料的组织和性能具有重要的意义。另外,液相向固相的转变又是一个相变过程,掌握结晶过程的基本规律将为研究其他相变奠定基础。纯金属和合金的结晶都遵循着结晶的基本规律,只是合金的结晶比纯金属的结晶要复杂些,为了便于研究,这里先介绍纯金属的结晶。

1.1.1 金属结晶的宏观现象

1. 过冷现象

利用图 1.1 所示的实验装置,将纯金属放入坩埚内加热熔化成液态,用热电偶测温,然后停止加热并让金属缓慢而均匀地冷却,并用双笔记录仪将冷却过程中的温度与时间记录下来,便可获得图 1.2 所示的液态金属在冷却时的温度和时间的关系曲线,此曲线称为冷却曲线。由于这一实验方法称为热分析法,该曲线又称为热分析曲线。从图 1.2 可以看出,液态金属必须冷却到理论结晶温度 T_m 以下某一温度 T 时才开始结晶,这种现象称为过冷。金属的实际结晶温度 T 与理论结晶温度 T_m 之差,称为过冷度 ΔT ,即 $\Delta T = T_m - T$ 。过冷度越大,实际结晶温度越低。

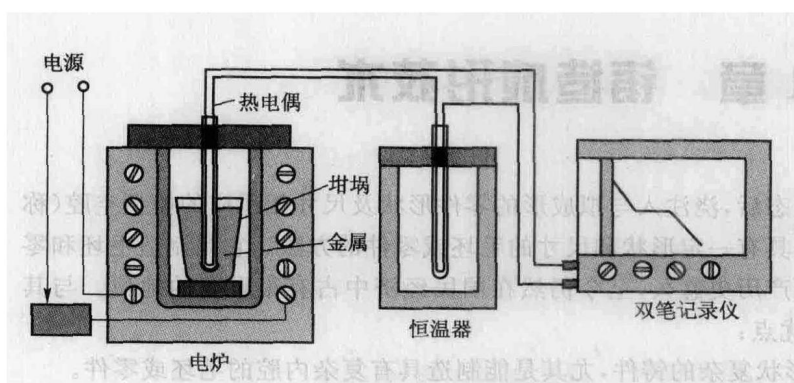
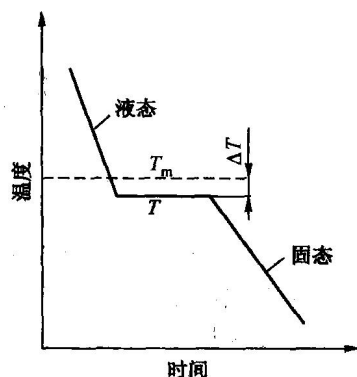


图 1.1 热分析实验装置

图 1.2 纯金属结晶时的冷却曲线示意图^[1]

金属结晶时的过冷度与其性质、纯度和冷却速度有关。金属不同,过冷度的大小也不同;金属纯度越低(杂质越多),过冷度越小;冷却速度越小,过冷度也越小,实际结晶温度则越高。

2. 结晶过程中伴随潜热释放

通过图 1.2 所示的冷却曲线可以看出,当液态金属的温度下降到一定值时,在冷却曲线的两个转折点之间出现了“平台”,产生这种现象的原因是液态金属结晶时释放出了热量,此热量称为结晶潜热。潜热的释放补偿了金属冷却过程中向外界散失的热量,使凝固过程在恒温下完成,所以在冷却曲线上出现了平台。平台延续的时间就是结晶过程所用的时间,结晶过程完毕,冷却曲线便又继续下降。

结晶过程中如果潜热释放速度超过了向周围环境散失的速度,将会出现温度回升,甚至会使已经结晶的局部区域发生重熔现象。此时的冷却曲线将会与图 1.2 所示有所不同。结晶潜热的释放和散失对结晶过程有着重要的影响,应加以重视。

1.1.2 金属结晶的热力学条件

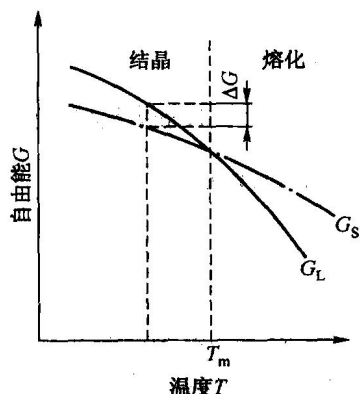
液态金属之所以必须在温度下降到理论结晶温度 T_m 以下才能结晶,是由热力学条件决定的。热力学第二定律指出:等温等压条件下,体系总是朝自由能减少的方向自发变化。因此,只有当液态金属转变为固态金属的过程能够引起体系自由能下降时,才能发生结晶,也就是说,促使这种两相转变发生的驱动力就是这两种状态的自由能之差。图 1.3 是依据热力学理论描绘的纯金属液、固两相自由能随温度变化的示意图。由图可知,恒压时,有以下热力学表达式

$$\frac{dG}{dT} = -S \quad (1.1)$$

式中, G ——体系自由能;

T ——热力学温度;

S ——熵,是表征系统中原子排列混乱程度的参数。

图 1.3 纯金属液、固两相自由能随温度变化的示意图^[2]

由于液态金属原子排列的混乱程度比固态的大($S_L > S_S$),也就是液相自由能曲线的斜率比固相的大,所以液相自由能降低得快一些。两条曲线因斜率不同而在某一温度相交,即此时的液、固两相自由能相等($G_L = G_S$),表示两相可长期共存,既不发生熔化,也不发生结晶,体系处于一种动平衡状态,交点处对应的温度就是理论结晶温度或熔点 T_m 。从图 1.3 还可以看出,当温度低于 T_m 时,固态金属的自由能低于液态金属的自由能,液态金属可以自发地转变为固态金属;当温度高于 T_m 时,液态金属的自由能低于固态金属的自由能,此时不但液态金属不能自发地转变为固态金属,还会发生固态金属的熔化。因此,液态金属必须在 T_m 温度以下才能结晶,即必须过冷才能获得结晶过程所需的驱动力。过冷度越大,相变驱动力越大,结晶速度越快。

1.1.3 金属结晶的基本过程

不同材料的结晶特点不同,但其基本过程和遵循的规律是一致的。液态金属的结晶是依靠两个密切联系的基本过程来实现的。首先,在液体中形成一些具有某一临界尺寸的晶核,然后再以它们为核心不断凝聚液体中的原子而长大。结晶就是不断地形成晶核(晶核的形成)和晶核不断长大(晶核的长大)的过程,图 1.4a~f 表示了微小体积液态金属的结晶过程。其中,影线部分代表塑性变形基体,白色部分代表无畸变的新晶粒。可以看出,随着时间的增加,在再结晶新晶粒不断增多的同时,其尺寸也相应长大,直至全部形成等轴晶粒,再结晶即告完成。从图 1.4 中可以看出,对结晶过程中的一个晶粒来说,有明显的形核和长大阶段,但从整体上说,在先析出晶核长大的同时,又不断有新的晶核从液态金属中产生,即形核和长大两个过程是交错重叠的。

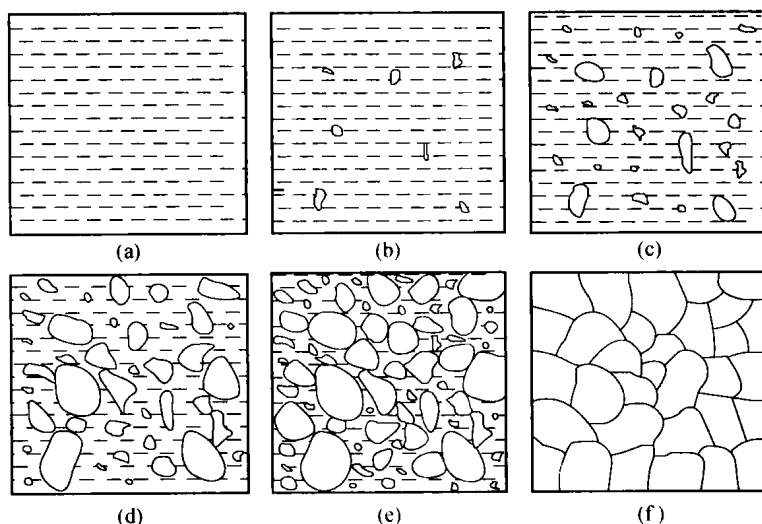


图 1.4 液态金属的结晶过程示意图^[3]

1. 晶核的形成

液态金属中的原子排列呈现短程有序,这些短程有序的原子团尺寸不同,且时聚时散,仿佛在液态金属中不断涌现出一些微小的固态结构一样,这种不断变化着的短程有序原子团称为结

构起伏,或称为相起伏。只有那些较大的相起伏才有可能在过冷液体中转变为晶核,这些相起伏就是晶核的胚芽,称为晶胚。但也并不是所有的晶胚都可以转变为晶核,要转变为晶核,必须满足一定的条件。

液态金属结晶时,有两种形核方式:一种是均匀形核,又称均质形核或自发形核;另一种是非均匀形核,又称异质形核或非自发形核。

1) 均匀形核

均匀形核是指完全依靠液态金属中的晶胚来形核的过程。液相中各个区域出现新相晶核的几率都是相同的。在过冷液体中,并不是所有的晶胚都能转变为晶核,只有那些尺寸等于或大于某一临界尺寸的晶胚才能稳定地存在,并能自发地长大。

均匀形核的形核率 N (在单位时间内,单位体积液体中形成的晶核数目)与过冷度和原子的活动能力有关。随着过冷度的增加,形成晶核的临界尺寸减小,结晶驱动力增大,晶核易于形成,形核率增加。但是过冷度的增加又意味着实际结晶温度的降低,使原子的扩散能力下降,结果造成形核困难,又使形核率降低。图 1.5 描述了形核率 N 与过冷度 ΔT 之间的关系,可以看出,当过冷度较小时,液态金属中基本上不形核,一旦过冷度达到某一值时,形核率急剧增加。一般将此时的形核温度称为有效形核温度,此时的过冷度达到约为 $0.2T_m$ 。

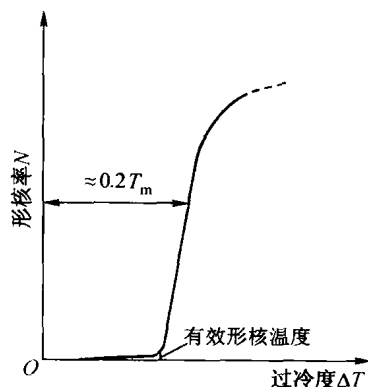


图 1.5 形核率 N 与过冷度 ΔT 之间的关系^[4]

2) 非均匀形核

非均匀形核是指晶胚依附于液态金属中的固态杂质表面而优先在某些区域形核的过程。由于在实际的液态金属中,总是或多或少地含有某些杂质,所以实际金属的结晶主要按非均匀形核方式进行。均匀形核时需要较大的过冷度,如纯铝的过冷度为 130°C ,而纯铁的过冷度则高达 295°C 。这是因为很纯的金属形成晶核的同时会形成固液界面,使体系自由能升高的缘故。非均匀形核时晶核依附在已有界面上形核,可使形核时的过冷度大为降低。通常条件下,金属凝固形核所需的过冷度最多不超过 20°C ,一般只有几摄氏度。

非均匀形核的形核率与均匀形核相似,但其除了受过冷度和温度的影响外,还受固态杂质的结构、数量、形貌及其他一些物理因素的影响。

2. 晶核的长大

当液态金属中出现第一批略大于临界尺寸的晶核后,液体的结晶过程就开始了。结晶过程的进行一方面要依靠新晶核连续不断的产生,另一方面还要依靠已有晶核的不断长大。晶体长大的过程也就是液态金属中的原子不断向晶体表面堆砌、固相界面不断向液态金属中推移的过程。晶核的长大也必须在过冷的液体中进行,只不过它所需要的过冷度比形核时小得多而已,这时所需的过冷度称为动态过冷度,用 ΔT_K 表示。

晶核长大初期外形比较规则,但随着晶核的长大,晶体形成棱角。由于棱角处散热速度快,因而优先长大,如树枝一样先形成枝干,称为一次晶轴或一次枝晶,如图 1.6 所示。一次晶轴上同样会出现很多凸出的尖端,它们长大后成为新的枝晶,称为二次晶轴或二次枝晶。以此类推,还会长出三次、四次等晶轴。图 1.7 所示为树枝状晶体的形貌。晶核的这种长大方式称为树枝

状长大。此外,还有其他的长大方式,这里不再介绍。

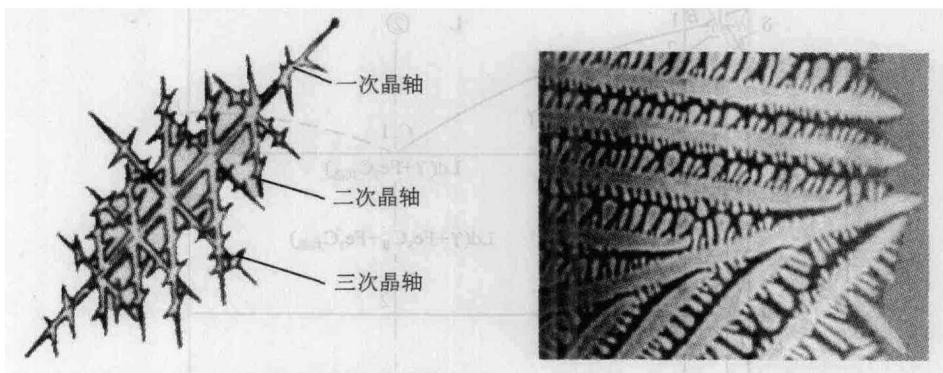


图 1.6 树枝状晶体生长示意图

图 1.7 树枝状晶体的形貌

1.1.4 液态合金的结晶

液态合金的结晶同纯金属的结晶过程类似,也是一个晶核形成和晶核长大的过程。晶核的形成方式可以是均匀形核,也可以是依靠外来质点的非均匀形核。另外,液态合金形核时也是既需要结构起伏,以满足其晶核大小超过一定临界值的要求,又需要能量起伏,以满足形成新相对形核功的要求。但两者又有所区别,这是由于合金结晶时所结晶出的固相成分与原液相成分不同,因此它还需要成分(浓度)起伏。

通常所说的液态合金成分是指宏观的平均成分,但是从微观角度来看,由于原子运动的结果,在任一瞬间液相中总会有某些微小体积的成分可能偏离液相的平均成分,这些微小体积的成分、大小和位置都是不断变化的,这就是成分起伏。合金的形核点便是在那些结构起伏、能量起伏和成分起伏都能满足的地方出现。因此,合金在结晶时又具有与纯金属不同的两个显著特点:

① 异分结晶。合金结晶时所结晶出的固相成分与液相成分不同,这种结晶出的晶体与母相化学成分不同的结晶称为异分结晶,也称选择结晶。而纯金属结晶时所结晶出的晶体与母相化学成分完全相同,称为同分结晶。

② 固溶体合金的结晶需要一定的温度范围。纯金属的结晶是在一定的温度下进行的,即达到结晶温度后便会结晶。而合金的结晶则需要一定的温度范围内进行,在此温度范围内的每一温度下,只能结晶出一定数量的固相。随着温度的降低,固相的数量增加,同时固相和液相的成分分别沿着固相线和液相线连续变化,直至固相的成分与原合金的成分相同时,结晶才完成。因此,合金在结晶时始终进行着溶质原子和溶剂原子的扩散过程,这个过程会使溶质和溶剂原子发生重新分配^[4]。

下面以工业中常用的铁碳合金为例说明液态合金的结晶过程。由于在平衡结晶条件下,铁碳合金中的碳通常以渗碳体的形式存在,即铁碳合金按 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 系转变,故本章只介绍铁碳合金中的 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 部分。铁碳合金为二元合金,该系合金的结晶过程包含了二元合金系中三种最基本的转变,即均晶转变、共晶转变和包晶转变。下面分别介绍这三种结晶转变过程。图 1.8 所示为典型铁碳合金结晶时的组织转变示意图。

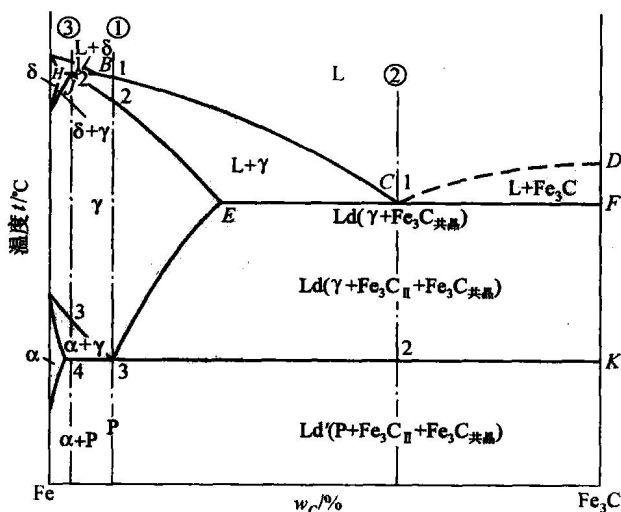


图 1.8 典型铁碳合金结晶时的组织转变示意图

1. 匀晶转变时的结晶(合金①)

图 1.8 中的合金①为 $w_{\text{C}}=0.77\%$ 的共析钢,其结晶时发生匀晶转变,结晶过程如图 1.9 所示。从图 1.8 可以看出,当合金缓慢冷却到与液相线相交的 1 点时,开始从液相中结晶出奥氏体 γ ;在继续冷却的过程中,奥氏体的数量不断增多,液相的数量不断减少。当温度下降到 2 点时,结晶过程结束,液相全部转变为奥氏体。当合金继续冷却到 3 点温度时,奥氏体又会发生共析转变,生成片状珠光体 P 。珠光体中的渗碳体称为共析渗碳体。随着温度继续下降,将从珠光体的铁素体中析出三次渗碳体。由于三次渗碳体的数量少,通常可忽略不计,因此,共析钢在室温下的平衡组织为 100% 的珠光体。

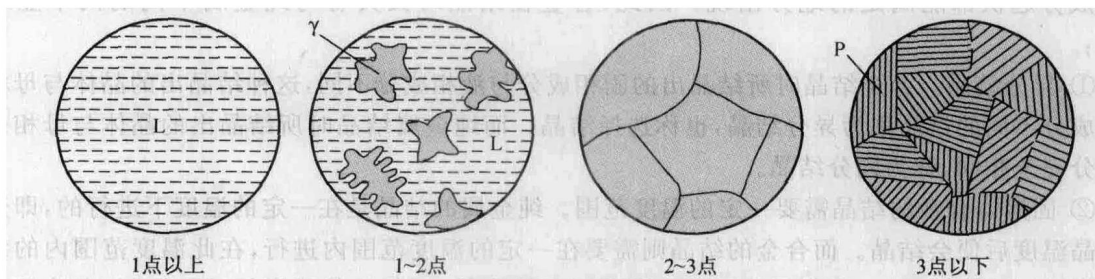


图 1.9 共析钢的结晶过程示意图

2. 共晶转变时的结晶(合金②)

图 1.8 中的合金②为 $w_{\text{C}}=4.3\%$ 的共晶白口铸铁,其结晶时发生共晶转变,结晶过程如图 1.10 所示。如图 1.8 所示,液态合金冷却到 1 点时,在恒温下发生共晶转变,产物为莱氏体 (Ld , 由奥氏体和渗碳体组成)。当合金冷却到 1~2 点的温度区间时,将从共晶奥氏体中不断地析出二次渗碳体 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$;当温度下降到 2 点时,共晶奥氏体的碳含量降至 $w_{\text{C}}=0.77\%$,这些剩余的奥氏体将发生共析转变,转变产物为珠光体。因此共晶白口铸铁的室温组织为珠光体分布在渗碳体的基体上,它保持了莱氏体的形态特征,但组成相发生了改变,因此称为低温莱氏体或变态莱氏体 (Ld')。

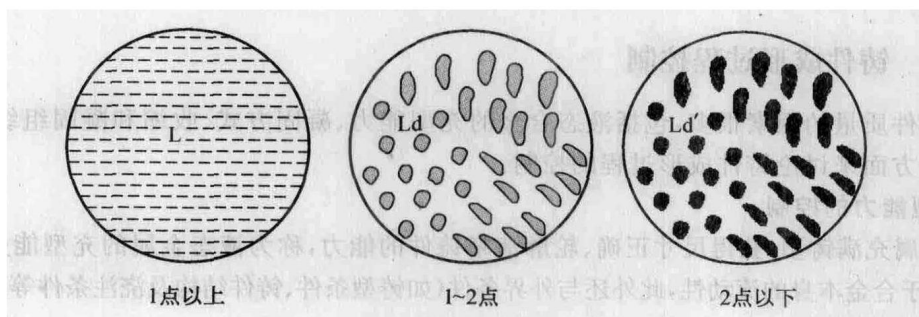


图 1.10 共晶白口铁的结晶过程示意图

3. 包晶转变时的结晶(合金③)

图 1.8 中的合金③为 $w_c=0.17\%$ 的亚共析钢,其结晶转变为包晶转变,结晶过程如图 1.11 所示。当液态合金冷却到 1~2 点的温度区间时,将按匀晶转变析出 δ 铁素体。当合金冷却到 2 点温度时,剩余液相和 δ 铁素体将发生包晶转变,全部形成奥氏体。单相奥氏体继续冷却到 3 点温度时,在其晶界上开始析出 α 铁素体(也称先共析铁素体),之后随着温度下降, α 铁素体数量不断增加。当合金冷却到 4 点温度时,奥氏体将通过共析转变而形成珠光体 P。当冷却到 4 点温度以下时,先共析铁素体和珠光体中的共析铁素体都将会析出三次渗碳体 Fe_3C_{III} ,但因其数量少,一般忽略不计。因此该钢室温下的平衡组织由先共析铁素体和珠光体所组成。

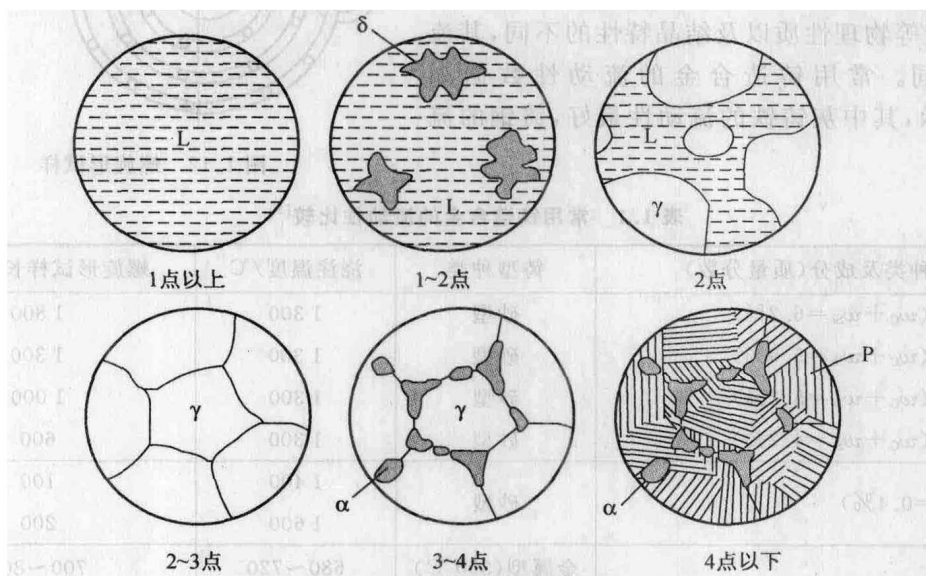


图 1.11 亚共析钢的结晶过程示意图

由于合金的结晶过程是与液相和固相内的原子扩散过程密切相关的,上述的结晶过程只有在极缓慢的冷却条件下,即平衡结晶条件下才能使每个温度下的液、固相成分均匀一致。然而在实际生产中,液态合金浇注后的冷却速度通常都较快,原子扩散尚未充分进行就已继续冷却,这样就使液相尤其是固相内保持着一定的浓度梯度,造成各相内成分不均匀。这种偏离平衡结晶条件的结晶,称为不平衡结晶。不平衡结晶的结果对铸件的组织和性能影响很大,这里不再赘述。

1.1.5 铸件成形过程控制

影响铸件质量的因素很多,包括液态合金的充型能力、凝固方式、收缩和凝固组织等。本节将从这几个方面来讨论铸件成形过程的控制。

1. 充型能力的控制

液态金属充满铸型,获得尺寸正确、轮廓清晰铸件的能力,称为液态金属的充型能力。充型能力首先取决于合金本身的流动性,此外还与外界条件(如铸型条件、铸件结构及浇注条件等因素)有关。

1) 合金的流动性

流动性是指液态合金的流动能力,它与合金本身的化学成分、温度、杂质含量及物理性质等有关。铸造合金流动性的好坏,通常以浇注标准螺旋形试样的方法进行测定。将金属液浇入到图 1.12 所示的螺旋形的铸型中,显然,在相同的铸型及浇注条件下,得到的螺旋形试样越长,表示该合金的流动性越好。

影响合金流动性的主要因素有合金的种类、化学成分及杂质含量。

① 合金的种类。不同种类的合金因熔点、热导率和粘度等物理性质以及结晶特性的不同,其流动性也不同。常用铸造合金的流动性数据如表 1.1 所示,其中灰铸铁的流动性最好,铸钢的流动性最差。

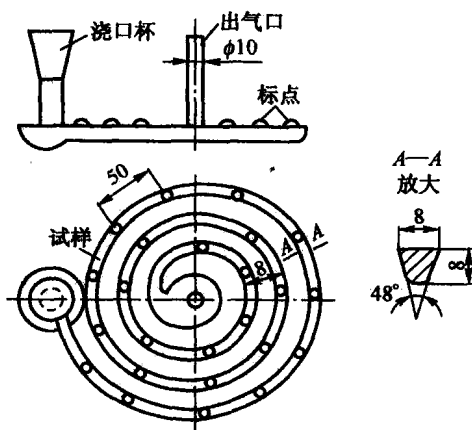


图 1.12 螺旋形试样

表 1.1 常用铸造合金的流动性比较^[4]

合金种类及成分(质量分数)	铸型种类	浇注温度/℃	螺旋形试样长度/mm
灰铸铁 ($w_C + w_{Si} = 6.2\%$) ($w_C + w_{Si} = 5.9\%$) ($w_C + w_{Si} = 5.2\%$) ($w_C + w_{Si} = 4.2\%$)	砂型	1 300	1 800
	砂型	1 300	1 300
	砂型	1 300	1 000
	砂型	1 300	600
铸钢($w_C = 0.4\%$)	砂型	1 400	100
		1 600	200
铝硅合金	金属型(300℃)	680~720	700~800
镁合金(Mg-Al-Zn)	砂型	700	400~600
锡青铜($w_{Sn} = 9\% \sim 11\%$, $w_{Zn} = 9\% \sim 11\%$)	砂型	1 040	420
硅黄铜($w_{Si} = 1.5\% \sim 4.5\%$)	砂型	1 100	1 000

② 合金的化学成分。成分不同的合金具有不同的结晶特点,其流动性也不同。具有共晶成分的合金和纯金属是在恒温下凝固的,凝固层的内表面比较光滑,对后续金属液的流动阻力较

小,加之共晶成分合金的凝固温度较低,容易获得较大的过热度,故其流动性好。除共晶合金和纯金属外的其他合金,由于其凝固是在一定的温度范围内进行的,故流动性有所下降。合金的结晶温度范围越大,则固、液两相共存的凝固区越宽,且固相区内表面越粗糙,故对合金流动的阻力越大,流动性也就越差。

③ 杂质含量。液态金属中含有的固态夹杂物将会使液体的粘度增加,因而会降低合金的流动性。液态金属中的含气量越多,其流动性也越差。

2) 铸型条件

充型过程中,铸型对金属液流的阻力和对液态金属的冷却作用都将影响金属的充型能力。

① 铸型的蓄热系数。蓄热系数表示铸型从其中的金属液吸取并存储热量的能力。铸型材料的热导率、比热容和密度越大,其蓄热能力越强,对金属液的冷却作用也越强,则金属液保持流动的时间就越短,充型能力也就越差。铸型的蓄热系数主要与铸型材料有关。

② 铸型温度。铸型的温度越高,金属液的冷却速度就越慢,保持液态的时间就越长,则充型能力也就越强。预热铸型能减小它与金属液之间的温差,降低换热强度,从而提高金属液的充型能力。因此,生产中常采用预热铸型的方法来增强金属液的充型能力。

③ 铸型中的气体。铸型具有一定的发气能力,能在金属液与铸型之间形成气膜,可减小流动阻力,有利于充型。但若发气量过大而铸型的排气能力又较差时,会使型腔中气体的压力增大,阻碍金属液的充型。因此,生产中常在铸型上开设通气孔以提高铸型的透气性。

3) 铸件结构

当铸件的结构较复杂时,型腔的结构也相应地比较复杂,会增加金属液充型时的阻力;当铸件的壁厚过小、壁厚急剧变化或有较大的水平面等结构时,也会造成充型困难。因此,在设计铸件结构时,应注意尽量避免上述情况。

4) 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的影响。提高浇注温度,有利于降低金属液的粘度,延长保持液态的时间,从而提高流动性,增强充型能力。但浇注温度不宜过高,否则,会使合金的吸气增多、氧化加剧,并且还会使合金的液态收缩量增加,不仅充型能力提高不多,反而易产生气孔、缩孔和粘砂等缺陷,铸件的结晶组织也会变得粗大。因此,每种铸造合金都有一定的浇注温度范围。

② 充型压力。金属液充型时在流动方向上所受到的压力越大,充型能力就越强。砂型铸造时,由于充型压力是由直浇道中金属液柱的重力产生的,因此,生产中常采用增加直浇道高度的方法来提高其充型能力。另外,采用人工加压的方法(如压力铸造、低压铸造和离心铸造等)也可大大提高金属液的充型能力。

2. 铸件的凝固方式及控制

1) 凝固方式

铸件的凝固通常是由外向内进行的,在凝固过程中,除纯金属和共晶成分合金外,截面上一一般都存在三个区域,即液相区、凝固区和固相区。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。根据凝固区的宽度可将铸件的凝固方式分为以下三种:

① 逐层凝固方式。纯金属和共晶成分的合金是在恒温下结晶的,铸件凝固时其凝固区宽度接近于零,所以铸件外层已凝固的固相区和内部尚未开始凝固的液相区之间的界面清晰。随着