

材料成型新技术

白培康 王建宏 编著

Cailiao Chengxing Xinjishu



国防工业出版社

National Defense Industry Press

材料成型新技术

白培康 王建宏 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书主要介绍金属材料成型方面的新技术、新工艺。主要内容包括:液态成型新技术、塑性成型新技术、先进焊接技术、快速成型与快速模具制造技术等,还系统地讲述了每项新技术的原理、工艺方法、特点、设备及应用等。

本书可作为高等院校相关专业的教材,也可作为从事材料科学与工程学科的科技工作者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

材料成型新技术/白培康、王建宏编著. —北京:国防
工业出版社,2007.5
ISBN 978-7-118-05070-7

I. 材… II. ①白…②王… III. 工程材料—成型—新技术
IV. TB3—39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 035018 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京市李史山胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17½ 字数 402 千字

2007 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

随着各种高新技术的不断进步,向材料成型和加工方法提出了更高的要求,想要制造一种零件使之满足各种高水平的综合指标,从传统材料成型方法出发是非常困难的,常常顾此失彼,即使花费很多的时间和很大的精力得到某种符合要求的零件也需要很长的周期。随着现代工业和技术的发展,材料成型方面的新技术、新工艺不断涌现,从而解决了上述难题,并得到了广泛推广。由于在涉及材料成型的众多学科领域中出现大量的新技术、新工艺,很难在一本篇幅有限的书中作详尽的介绍。因此,本书针对金属材料,从液态成型、塑性成型、焊接等领域对金属材料成型新技术进行了阐述。快速成型技术与快速模具制造技术是 20 世纪末产生并发展到国内,是制造技术领域的一次重大突破。作者在该领域进行多年的教学和科研工作,取得了一定的经验,第五章对快速成型与快速模具制造技术进行了阐述。

由于时间仓促和水平有限,疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2007 年 2 月

目 录

第一章 绪论	1	2.4.3 线材快速凝固成形	30
1.1 材料成形技术	1	2.4.4 带材快速凝固成形	34
1.1.1 材料成形技术的作用 与地位	1	2.4.5 体材料快速凝固成形	42
1.1.2 材料成形技术的分类	1	2.5 复合铸造	48
1.2 材料成形技术的发展趋势 与方向	2	2.5.1 概述	48
1.2.1 材料加工技术的总体 发展趋势	2	2.5.2 水平磁场制动复合 连铸法(LMF)	49
1.2.2 金属材料加工技术的 主要发展方向	2	2.5.3 包覆层连续铸造法 (CPC)	50
第二章 液态成形新技术	5	2.5.4 电渣包覆铸造法 (ESSLM)	51
2.1 概述	5	2.5.5 反向凝固连铸复合法	52
2.1.1 铸造生产的特点	5	2.5.6 复合线材铸拉法	53
2.1.2 铸造方法	5	2.5.7 双流连铸梯度复合法	53
2.2 定向凝固	6	2.5.8 双结晶器连铸法	54
2.2.1 定向凝固的理论基础	7	2.5.9 充芯连铸法	55
2.2.2 定向凝固工艺	7	第三章 塑性成形新技术	58
2.2.3 特种定向凝固技术	14	3.1 塑性成形工艺概述	58
2.3 金属半固态加工	17	3.1.1 塑性成形工艺的特点 及应用	58
2.3.1 概述	17	3.1.2 锻压工艺的分类	59
2.3.2 金属半固态的制备 方法	19	3.2 粉末锻造工艺及模具设计	59
2.3.3 半固态金属触变成形	22	3.2.1 粉末锻造的特点及 应用	59
2.3.4 半固态金属的流变 成形	24	3.2.2 粉末锻造时金属粉末 的选择	61
2.4 快速凝固	26	3.2.3 粉锻件和预成形坯的 设计	62
2.4.1 概述	26	3.2.4 预成形坯的压制与	
2.4.2 实现快速凝固的条件	28		

锻造工艺	68	4.2.4 激光焊接工艺及参数	147
3.2.5 预成形坯烧结锻造		4.2.5 典型材料的激光焊	159
变形特点与致密	74	4.3 电子束焊及其他加工技术	163
3.2.6 粉锻模具设计及对		4.3.1 概述	163
设备的要求	78	4.3.2 电子束焊的基本原理	164
3.2.7 粉末热等静压和粉末		4.3.3 电子束焊的特点	167
喷射锻造	80	4.3.4 电子束焊的焊接设备	168
3.3 金属等温成形	82	4.3.5 电子束焊的焊接工艺	172
3.3.1 概述	82	4.3.6 电子束焊的应用实例	173
3.3.2 等温成形的特点及		4.3.7 电子束焊的焊接技术	
适用范围	83	现状与发展前景	178
3.3.3 材料的等温成形性	86	4.3.8 其他电子束加工技术	180
3.3.4 等温成形时的润滑	95	4.4 摩擦焊技术	184
3.3.5 等温成形用模具材料	98	4.4.1 摩擦焊原理及技术	
3.3.6 等温成形用设备	102	优势	184
3.3.7 等温成形工艺的应用	102	4.4.2 摩擦焊工艺及其新	
3.3.8 展望	106	发展	188
3.4 连续挤压与连续铸挤	106	4.4.3 摩擦焊设备	194
3.4.1 概述	106	4.4.4 摩擦焊的应用领域及	
3.4.2 Conform 连续挤压法	107	典型产品	197
3.4.3 连续铸挤	116	4.5 爆炸焊	200
3.4.4 其他连续挤压方法	117	4.5.1 爆炸焊的分类及特点	201
3.5 复合塑性成形概述	119	4.5.2 爆炸焊原理及结合面	
3.5.1 轧制复合	119	形态	202
3.5.2 挤压复合	124	4.5.3 爆炸焊工艺	203
3.5.3 拉拔复合	134	4.5.4 爆炸焊的应用	210
第四章 先进焊接技术	137	4.6 扩散连接技术	212
4.1 焊接技术的本质和发展	137	4.6.1 扩散连接的特点及	
4.1.1 金属焊接过程的本质	137	原理	212
4.1.2 焊接工艺方法的发展	137	4.6.2 材料的扩散连接工艺	216
4.2 激光焊	139	4.6.3 陶瓷材料的扩散连接	228
4.2.1 激光焊原理、分类及		第五章 快速成型与快速模具	
特点	139	制造技术	232
4.2.2 激光焊设备及装置	143	5.1 制造理论的研究对象	232
4.2.3 材料激光焊的焊接性	145	5.1.1 制造产业和制造系统	232

5.1.2 先进制造系统模型·····	233	5.8 快速模具制造技术概念	
5.2 快速成型技术的产生·····	234	及其分类·····	249
5.3 关于对快速成型的命名·····	235	5.8.1 快速模具制造技术的	
5.4 快速成型技术的原理·····	235	概念·····	249
5.4.1 成型方式分类·····	236	5.8.2 快速模具制造技术的	
5.4.2 快速成型技术的原理·····	237	分类·····	251
5.5 快速成型的主要工艺方法·····	239	5.9 直接制模技术·····	253
5.5.1 立体印刷·····	239	5.9.1 直接制造木模或树	
5.5.2 分层实体制造·····	239	脂模·····	253
5.5.3 选择性激光烧结·····	240	5.9.2 直接制造金属模具·····	254
5.5.4 熔化沉积成型·····	240	5.9.3 直接制造铸造用模·····	257
5.5.5 三维打印·····	241	5.10 间接制模技术 ·····	257
5.5.6 固基光敏液相法·····	241	5.10.1 快速制作简易模具 ·····	258
5.5.7 热塑性材料选择性		5.10.2 利用 RPT 快速制作钢	
喷洒·····	242	模具 ·····	266
5.5.8 变长线扫描 SLS RPT ·····	243	5.10.3 利用快速成型电火花	
5.5.9 高功率激光二极管线阵		电极制造钢模具 ·····	267
能量源 SLS RPT ·····	244	5.11 快速模具制造技术的发展	
5.6 RPT 与相关学科间的关系 ·····	244	趋势 ·····	269
5.7 RPT 的现状和发展方向 ·····	246	参考文献 ·····	271

第一章 绪 论

1.1 材料成形技术

1.1.1 材料成形技术的作用与地位

一般认为,现代材料科学与工程由四个基本要素组成:即材料的成分与结构、性质、制备与加工工艺(技术)、使用性能,它们之间形成的四面体关系,如图 1-1 所示。由此可知,材料的制备与加工工艺,与材料的成分和结构、材料的性质一起,构成决定材料使用性能的最基本的三大要素,也充分反映了材料制备与加工技术的重要作用 and 地位。

在图 1-1 所示的四面体结构中,不但清楚地显示出了材料的使用性能与其他三个因素之间的关系,而且也体现了其他三个因素之间的相互影响关系。例如,材料的性质与结构均受到制备与加工工艺的影响。非晶态金属材料的性质和结构均与相同组成(成分)的晶态材料相差很远,其主要原因就是由于制备与加工工艺与参数所致。

关于材料的制备、成形与加工技术的研究和开发材料是科学技术中最活跃的领域之一,而材料先进成型技术是目前材料科学技术中最活跃的领域之一。材料先进制备、成形与加工技术的发展,既对新材料的研究开发、应用和产业化具有决定性的作用,同时也可有效地改进和提高传统材料的使用性能对传统材料产业的更新改造具有重要作用。发展材料先进制备、成形与加工技术,对于提高综合国力,保障国家安全,改善生活质量,促进材料科学技术自身的进步与发展具有重要作用,也是国民经济和社会可持续发展的重大需求。

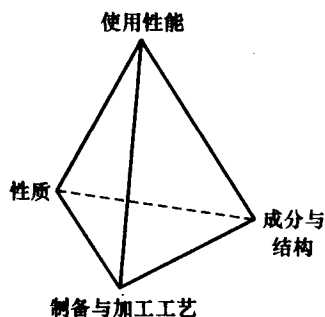


图 1-1 材料科学与工程四个基本要素

1.1.2 材料成形技术的分类

材料成形技术的分类方法有两种:即按照传统的三级学科进行分类和按照被加工材料所处的相态进行分类,如图 1-2 所示。

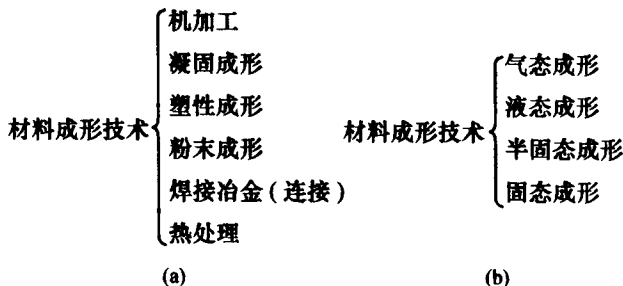


图 1-2 材料成形技术的分类

(a) 按传统三级学科分类; (b) 按被加工材料所处相态分类。

按照传统的三级学科进行分类,材料成形技术(方法)包括机加工(车钻刨、铣、磨等)、凝固成形(铸造)、粉末冶金、塑性成形(压力加工)、焊接成形(连接)、热处理等。

按照被加工材料在成形时所处的相态不同进行分类,成形技术包括气态成形、液态成形(凝固成形)、半固态成形、固态成形。

1.2 材料成形技术的发展趋势与方向

1.2.1 材料加工技术的总体发展趋势

材料加工技术的总体发展趋势,可以概括为三个综合,即过程综合、技术综合、学科综合。过程综合主要包括两个方面的含义,其一是指材料设计、制备、成形与加工的一体化,各个环节的关联越来越紧密;其二是多个过程(如凝固与成形)的综合化,或称短流程化,如喷射成形技术、半固态加工技术、铸轧一体化技术等。

技术综合是指材料加工工程越来越发展成为一门多种技术相结合的应用技术科学,尤其体现为制备、成形、加工技术与计算机技术(计算机模拟与过程仿真)、信息技术的综合,与各种先进控制技术的综合等。

学科综合则体现为传统三级学科(铸造、塑性加工、热处理、连接)之间的综合,与材料物理与化学、材料学等二级学科的综合,与计算机科学、信息工程、环境工程等材料科学与工程学科以外的其他一级学科的综合。其中,与材料科学与工程的其他二级学科的综合的最大特点是,各二级学科之间的界限越来越不明显,学科渗透与相互依赖性越来越强。

从一定意义上来讲,学科综合的发展趋势起因于现代科学技术的发展要求“按照使用要求来设计材料的性能”的特点。例如,要研制(生产)一种新材料,或加工一种新产品,需要综合研究和解决材料设计、材料的组成与结构、材料制备与加工工艺、材料服役行为(包括与环境的交互作用)、材料的保护与再利用等一系列问题,既包括材料科学与工程的所有二级、三级学科问题,也包括计算机科学技术、控制工程等其他一级学科问题。

由于上述材料加工技术的总体发展趋势,可以预见,在今后较长一段时间内,材料制备、成形与加工技术的发展将具有以下两个主要特征:

(1) 性能设计与工艺设计的一体化。

(2) 在材料设计、制备、成形与加工处理的全过程中对材料的组织性能和形状尺寸进行精确控制。

实际上,第一个特征是实现材料技术的第五次革命、进入新材料设计与制备加工工艺时代的重要标志。实现第二个特征则要求具备两个基本条件:一是计算机模拟与仿真技术的高度发展;二是材料数据库的高度完备化。

1.2.2 金属材料加工技术的主要发展方向

基于上述材料加工技术的总体发展趋势和特征,金属材料加工技术的主要发展方向包括以下几个方面。

(1) 常规材料加工工艺的短流程化和高效化。打破传统的材料成形与加工模式,工艺环节,实现近终形、短流程的连续化生产提高生产效率。例如,半固态流变成形、连续铸

轧、连续铸挤等是将凝固与成形两个过程合二为一,实行精确控制,形成以节能、降耗,提高生产效率为主要特征的新技术和新工艺。

目前,国外铝合金和镁合金半固态加工技术已经进入较大规模工业应用阶段。铝合金半固态成形方法主要有流变压铸、触变压铸、触变锻造等;而镁合金半固态成形的成熟技术目前只有半固态触变注射成形(thixomolding)技术。半固态加工技术的一个重要发展方向是在高熔点的钢铁材料和钛合金中的应用。钛合金用途广泛,但成形加工困难,开发钛合金半固态加工技术具有重要的实际意义。

连续铸轧是一种将金属熔体直接轧制成薄带坯或成品带材的工艺,自 20 世纪 50 年代以来已在铝合金等有色金属带材生产上获得广泛应用。其进一步的发展方向是高速高精度、扩大品种规格以及在钢铁材料生产上的应用。

(2) 发展先进的成形加工技术,实现组织与性能的精确控制。发展先进的成形加工技术,实现组织与性能的精确控制,可以提高传统材料的使用性能,改善难加工材料的加工性能,开发高附加值材料。

例如,发展非平衡凝固技术、电磁铸轧技术、电磁连铸技术,可在材料的制备过程中通过冷却速度的控制或附加外场的作用,改善材料的组织,大幅度地提高材料的性能。应用等温成形技术、低温强加工技术,可通过对成形加工过程和工艺参数(温度、变形程度等)的精确控制,精确控制材料的组织与性能,或发展难加工材料与难成形零部件的成形加工技术,提高材料(零部件)的附加价值。

发展先进层状复合材料成形、先进超塑性成形等技术,有利于发展新材料,促进新材料的应用。

激光焊接、电子束焊接、扩散焊接、摩擦焊接等先进连接技术的发展,解决了高性能先进材料的连接技术难题,其应用范围将不断扩大。20 世纪 90 年代初出现的搅拌摩擦焊接技术在熔融焊接困难(如金属基复合材料)或焊缝质量要求特别严格(如航空航天与军事领域)的材料连接等方面,具有潜在的应用前景。

(3) 材料设计(包括成分设计、性能设计与工艺设计)、制备与成形加工一体化。发展材料设计、制备与成形加工一体化技术,可以实现先进材料与零部件的高效、近终形、短流程成形。典型的技术有喷射成形、粉末注射成形、激光快速成形等,是不锈钢、高温合金、钛合金、难熔金属及金属间化合物、陶瓷、复合材料、梯度功能材料零部件制备技术的研究热点。

(4) 开发新型制备与成形加工技术,发展新材料和新制品。大块非晶合金制备与应用技术、连续定向凝固成形技术、电磁约束成形技术、双结晶器连铸与充芯连铸复合技术、多坯料挤压技术、微成形加工技术等,是近年来开发的新型制备与成形加工技术。这些技术在特种高性能材料或制品(零部件)的制备与加工方面具有各自的特色,受到国内外的广泛关注。

采用金属/气体共晶定向凝固方法(也称 Gasar 法)制备的规则多孔金属材料,与传统的烧结或发泡剂法制备的多孔材料相比,具有孔隙内表面光滑,呈圆柱状,沿凝固方向规则排列的特点,使其力学性能、导热性能、过滤能力等大幅度提高,应用前景良好。

先进包覆材料的用途越来越广,但现有各种制备方法具有工艺复杂,界面质量控制困难,生产成本较高等缺点。

与规模化、专业化连续成形与加工技术适合于批量生产相反,为了满足现代科学技术对材料或零部件需求的多样性,一种适合于多品种、小批量的新型成形加工技术——增分成形(incremental forming 或称逐步成形)技术得到迅速发展,以板成形为代表的增分成形技术已经达到实用化水平。

(5) 发展计算机数值模拟与过程仿真技术,构筑完善的材料数据库。计算机数值模拟、过程仿真技术的迅速发展,对材料加工技术的研究和发展起到了重要的促进作用。而发展计算机数值模拟、过程仿真技术的最终目的是为了优化成形加工方法和工艺,实现对制备、成形与加工全过程的精确设计与精确控制。需要强调的是,为了提高数值模拟与过程仿真技术的广泛适用性、结果可靠性,构筑系统、全面、通用性强的材料数据库是必不可少的。有些国家大约从 20 世纪 80 年代起就已经有计划、有步骤地开始了这方面的工作,而国内相关的工作落后较多,尚未引起足够的重视。

(6) 材料的智能制备与成形加工技术。综合利用计算机技术、数据库技术和先进控制技术,开发将材料组织性能设计、零部件设计、材料制备与成形加工过程的实时在线监测和反馈控制融为一体的材料智能制备加工技术,是 20 世纪 90 年代初开始出现的研究课题。发展材料智能制备与加工技术,可大大提高材料制备的可靠性和稳定性,提高生产效率,有效减少原材料的消耗及废弃物的排放。因此,这一方向被认为是 21 世纪前期材料制备与加工新技术中最富潜力的前沿研究方向。

总而言之,科学技术的迅速发展,促进了材料加工技术的不断进步和发展,也促进了新材料设计与制备加工工艺时代的到来。而另一方面,以资源、能源、环境等为代表的可持续发展问题,是人类进入 21 世纪后社会发展面临的最大挑战。因此,不仅对于传统材料加工技术的发展,还是对于新技术新工艺的开发与应用,节能、降耗、高效、优质,是至关重要的核心关键问题。

第二章 液态成形新技术

2.1 概 述

液态金属成形,通常也称铸造,是将液态金属注入铸型中使之冷却、凝固而形成零件的方法。所铸出的金属制品称为铸件。绝大多数铸件用作毛坯,需要经机械加工后才能成为各种机器零件;少数铸件当达到使用的尺寸精度和表面粗糙度要求时,可作为成品或零件直接应用。

2.1.1 铸造生产的特点

(1) 适用范围广。铸造方法几乎不受零件大小、厚薄和复杂程度的限制,适用范围广,可以铸造壁厚范围为 $0.3\text{mm} \sim 1000\text{mm}$,长度从几个毫米到几十米,质量从几克到几百吨的各种铸件。

(2) 可制造各种合金铸件。用铸造方法可以生产铸钢件,铸铁件,各种铝合金、铜合金、镁合金、钛合金及锌合金等铸件。对于脆性金属或合金,铸造是唯一可行的加工方法。在生产中以铸铁件应用最广,约占铸件总产量的 70% 以上。

(3) 尺寸精度高。铸件一般比锻件、焊接件尺寸精确,可节约大量金属材料和机械加工工时。

(4) 成本低廉。铸件在一般机器生产中约占总质量的 40% ~ 80%,而成本只占机器总成本的 25% ~ 30%。成本低廉的原因是:① 容易实现机械化生产;② 可大量利用废、旧金属料;③ 与锻件相比,其动力消耗低;④ 尺寸精度高,加工余量小。

铸造生产在工业发达国家的国民经济中占有极其重要地位。从铸件在机械产品中所占比重可看出其重要性:在机床、内燃机、重型机器中,铸件约占 70% ~ 90%;在风机、压缩机中占 60% ~ 80%;在拖拉机中占 50% ~ 70%;在农业机械中占 40% ~ 70%;在汽车中占 20 ~ 30%。

2.1.2 铸造方法

铸造方法有许多种,一个铸件到底选择什么铸造方法来制造,必须根据这个铸件的合金种类、质量、尺寸精度、表面粗糙度、批量、铸件成本、生产周期、设备条件等方面的要求综合考虑才能决定。表 2-1 铸造方法的应用范围,可根据铸造企业的实际情况适当选择。

表 2-1 各种铸造方法应用范围

序号	铸造工艺	适用合金种类	铸件质量范围	最小壁厚 /mm	铸件表面粗 糙度 $R_a/\mu\text{m}$	铸件尺寸公 差等级 CT	批量
1	砂型铸造	不限	不限	3	12.5~100	8~10	不限
2	壳型铸造	不限	几十克~几 十千克	2.5	1.6~50	6~9	中、大批量
3	熔模铸造	不限(主要是 合金钢、碳 钢、不锈钢)	几克~几百 千克	约 0.5, 最小孔径 0.5	0.8~6.3	4~7	大、中、小批 量
4	金属型铸造	不限(主要是 非铁合金)	几十克~几 百千克	2~3(铝) 5(铁)	3.2~12.5	6~9	中、大批量
5	低压铸造	非铁合金	几百克~几 十千克	2(铝) 2.5(铸铁)	3.2~25	5~8	大、中、小批 量
6	压力铸造	非铁合金	几克~几十 千克	0.3~1.0, 2(铜)	1.6~6.3(铝) 0.2~6.3(镁)	4~8	大批量
7	离心铸造	不限	管件、套筒类	最小内径 8	1.6~12.5	——	大、中、小批 量
8	陶瓷型铸造	钢、铁	中、大件	2	3.2~12.5	5~8	单件、小批
9	石膏型铸造	以非铁合金 为主	几克~几百 千克	约 0.5, 最小孔径 0.5	0.8~6.3	4~7	大、中、小批 量
10	连续铸造	不限	坯料或型材	4	12.5~100	——	大批
11	真空铸造	不限	小件	5	——	——	中、大批量
12	挤压铸造	不限	几十克~几 十千克	1	1.6~6.3	5	中、大批量
13	消失模铸造	不限	不限	2~3	3.2~50	6~9	不限

2.2 定向凝固

定向凝固是指在凝固过程中采用强制手段,在凝固金属和未凝固金属熔体中建立起特定方向的温度梯度,从而使熔体沿着与热流相反的方向凝固,最终得到具有特定取向柱状晶的技术。定向凝固是研究凝固理论和金属凝固规律的重要手段,也是制备单晶材料和微米级(或纳米级)连续纤维晶高性能结构材料和功能材料的重要方法。自 20 世纪 60 年代以来,定向凝固技术发展很快。由最初的发热剂法、功率降低法发展到目前广泛应用

的高速凝固法、液态金属冷却法和连续定向凝固技术。现代航空发动机的涡轮叶片和导向叶片是用铸造高温合金材料制成,这类材料晶界在高温受力条件下是较薄弱的地方,这是因为晶界处原子排列不规则,杂质较多,扩散较快,于是人们设想利用定向凝固方法制成单晶,消除所有晶界,结果性能明显提高了。定向凝固技术广泛应用于高温合金、磁性材料、单晶生长、自生复合材料的制备等方面,并且在类单晶金属间化合物、形状记忆合金领域具有极广阔的应用前景。

2.2.1 定向凝固的理论基础

在定向凝固过程中,随着凝固速度的增加,固液界面的形态由低速生长的平面晶→胞晶→枝晶→细胞晶→高速生长的平面晶变化。无论是哪种固液界面形态,保持固液界面的稳定性对材料的制备和材料的力学性能非常重要。因此,固液界面稳定性是凝固过程中一个十分重要的科学问题。低速生长的平面晶固液界面稳定性可以用成分过冷理论来判定,高速生长的平面晶固液界面稳定性可以用绝对稳定性理论来判定。但到目前为止,关于胞晶、枝晶、细胞晶固液界面稳定性问题,尚没有相应的判定理论体系。

2.2.2 定向凝固工艺

根据成分过冷理论,要使单相合金在定向凝固过程中得到平界面凝固组织,主要取决于合金的性质和凝固工艺参数。前者包括溶质量、液相线斜率和溶质在液相中的扩散系数,后者包括液相温度梯度和凝固速率。如果被研究的合金成分已定,则靠工艺参数的选择来控制凝固组织,其中,固液界面液相一侧的温度梯度是关键的因素,所以人们都致力于提高液相温度梯度。可以说,定向凝固技术的发展历史是不断提高设备温度梯度的历史。大的温度梯度一方面可以得到理想的合金组织和性能,另一方面又可以允许加快凝固速率,提高设备利用率。下面讨论几种主要的定向凝固工艺。

1. 发热剂法(EP 法)

发热剂法是定向凝固工艺中最原始的一种,为了造成一个液相温度梯度,零件模壳放在一个水冷铜底座上,并在顶部加发热剂,其装置示意图如图 2-1 所示。这种生产工艺简单,成本低,但金属熔体内的温度梯度较小,单向传热条件不易保证,凝固一旦开始便无法对凝固过程进行控制。而且这种方法无法保证重复性,难以生产高质量要求的部件,如发动机高温合金叶片。所以,这种方法只适用于小型的定向凝固件生产。

2. 功率降低法(PD 法)

图 2-2 为功率降低定向凝固法示意图。把一个开底的模壳放在水冷底盘上,石墨感应发热器放在分上下两部分的感应圈内。加热时上下两部分感应圈全通电,在模壳内建立起所要求的温度场,注入过热的合金液。然后下部感应圈断电,通过调节输入上部感应圈的功率,在液态金属中形成一个轴向温度梯度。在功率降低法中,热量主要通过已凝固部分及底盘由冷却水带走。

图 2-3 为功率降低法定向凝固 Mar-M200 合金叶片铸造时不同高度的温度分布。

这种工艺可达到的温度梯度较小,在 $10^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 左右,制出的合金叶片,其长度受到限制,并且柱状晶之间的平行度差,甚至产生放射状凝固组织。合金的显微组织在不同部位差异较大,目前一般不采用此工艺。

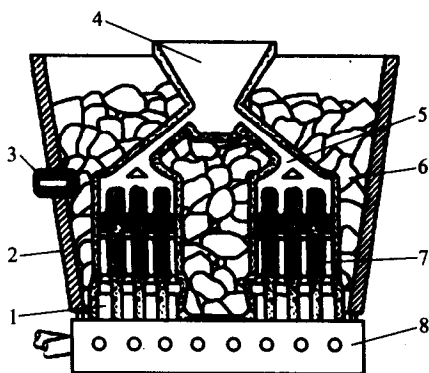


图 2-1 发热剂法装置图

- 1—起始段；2—隔热层；3—光学测温层；
4—浇口杯；5—浇道；6—发热剂；
7—零件；8—水冷铜底座。

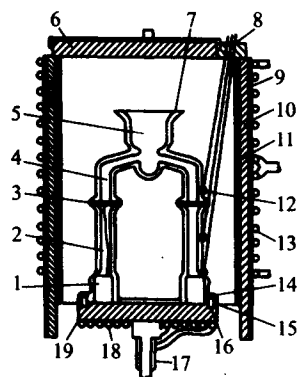


图 2-2 叶片功率降低定向凝固装置图

- 1—叶片根部；2—叶身；3—叶冠；4—浇道；
5—浇口杯；6—模盖；7—精铸模壳；8—热电偶；
9—轴套；10—碳毡；11—石墨感受器；12— Al_2O_3 ；
13—感应圈；14— Al_2O_3 管泥封；15—模壳缘盘；
16—螺栓；17—轴；18—冷却水管；19—铜座。

3. 高速凝固法(BRS 法)

功率降低法的缺点在于其热传导能力随着离结晶器底座的距离增加而明显下降。为了改善热传导的条件,发展了高速凝固法。其装置大致与功率降低法相同,只是多了一个拉锭机构,可使模壳按一定速度向下移动。通过移动模壳(或移动加热器)以加强散热条件。将底部开口的模壳置于水冷底座上,并置于石墨加热器中。加热模壳后,注入过热的合金熔液,浇注后保持几分钟,使其达到热稳定及开始在冷却底座表面生成一薄层固态金属。然后模壳以预定速度经过感应圈底部的辐射挡板从加热器中移出。为得到最好的效果,在移动模壳时,固液界面应保持在挡板附近。图 2-4 为高速凝固法装置示意图。

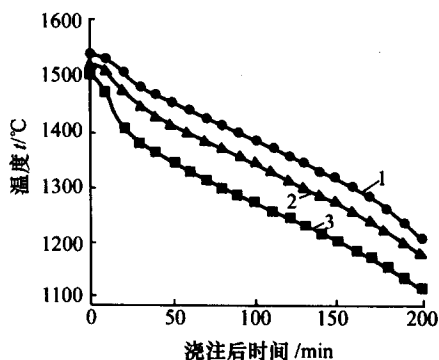


图 2-3 用功率降低法铸造 Mar-M200

合金叶片时不同高度的温度分布

- 1—叶片顶部；2—叶片中部；3—叶片底部。

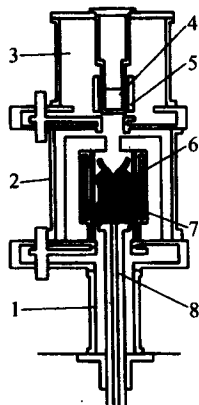


图 2-4 高速凝固法装置图

- 1—拉模室；2—模室；3—熔室；
4—坩埚和原材料；5—水冷感应圈；
6—石墨电阻加热器；7—模壳；8—水冷底座和杆。

在前期凝固阶段,其热量的散失是通过水冷底座的对流传热为主,在离开结晶器某一距离后,对流传热方式减小,转为以辐射传热为主,这样使凝固仍以较快的速度进行。

高速凝固法比降低功率法有以下几个优点：

(1) 有较大的液相温度梯度，能改善柱状晶质量和补缩条件，在约 300mm 高度内可得到完全的柱状晶铸锭；

(2) 由于局部凝固时间和凝固区域都变小，故显微组织致密，减小了偏析，从而改善了合金凝固组织；

(3) 提高凝固速度 2 倍~3 倍， v 达到 300mm/h。

点状偏析是定向凝固材料中的主要缺陷之一，经常在铸件的外层出现。这种缺陷能造成横向晶界，空隙度大，显微偏析较严重，易析出有害相。低的生长速率和小的液相温度梯度会促进点状偏析的形成，如图 2-5 所示。形成点状偏析是树枝晶间因局部溶液密度不一样，引起溶液对流，撞断枝晶轴，才引起这种缺陷。

4. 液态金属冷却法(LMC 法)

在提高导热能力和增大固液界面液相温度梯度方面，功率降低法和高速凝固法都受到一定条件的限制。液态金属冷却法以液态金属代替水，作为模壳的冷却介质，模壳直接浸入液态金属冷却剂中，散热能力大为增强，以致在感应器底部迅速产生热平衡，造成很高的液相温度梯度 G_{TL} ，几乎不依赖浸入速度。液态金属冷却法装置简图如图 2-6 所示。冷却剂的温度，模壳导热性、厚度和形状，挡板位置，溶液温度等因素会影响其液相温度梯度。

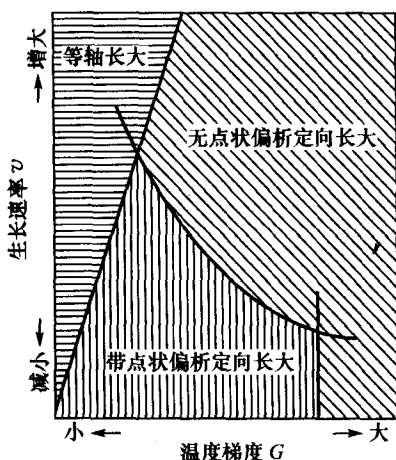


图 2-5 温度梯度和生长速率对点状偏析的影响

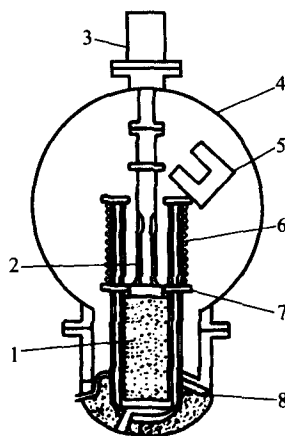


图 2-6 液态金属冷却法装置图

1—液态 Sn；2—模壳；3—浸入机构；4—真空室；
5—坩埚；6—炉高温区；7—挡板；8—加热线圈。

液态金属冷却剂的选择条件如下：

- (1) 有低的蒸气压，可在真空中使用；
- (2) 熔点低，热容量大，导热速率高；
- (3) 冷却剂不溶解在合金中；
- (4) 价格便宜。

液态金属冷却法的工艺过程和高速凝固法的工艺过程基本相似，当金属溶液浇注入模壳后，按预定速度将模壳逐渐浸入液态金属液冷却剂中，使合金凝固的固液界面保持在

冷却剂液面附近,冷却剂保持在一定的温度范围内,使传热不因凝固的进行而变小,也不受模壳形状的影响。液态金属冷却剂可以是静止的或流动的。

分析以上几种定向凝固的方法,无论是局部凝固时间,还是糊状区宽度,液态金属冷却法是最小的,功率降低法是最大的,高速凝固法介于其中,具体数据比较列于表 2-2 中。

很明显液态金属冷却法的 G_{TL} 和 v 都是最大,从而冷却速率也是最大,特别是局部凝固时间和糊状区宽度最小,如图 2-7 所示。因此,利用液态金属冷却法制备定向凝固的高温合金制品,其显微组织是比较理想的。

表 2-2 定向凝固方法比较表

工艺参数	功率降低法	高速凝固法	液态金属冷却法
过热度/ $^{\circ}\text{C}$	120	120	140
循环周期/min	170	45	15
模子直径/cm	3.2	3.2	1.43
$G_{TL}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}^{-1})$	7~11	26~30	73~103
$v/(\text{cm}\cdot\text{h}^{-1})$	3~12	23~30	53~61
糊状区宽度/cm	10~15	3.8~5.6	1.5~2.5
局部凝固时间/min	85~88	8~12	1.2~1.6
冷却速度/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1})$	90	700	4700

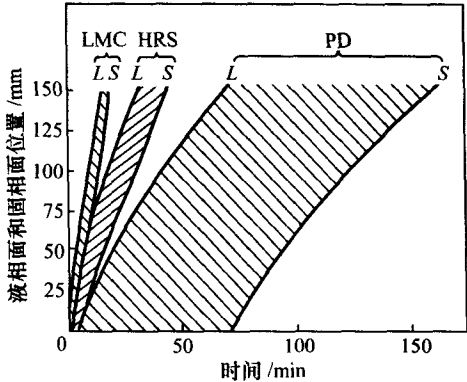


图 2-7 不同定向凝固法制备 Mar-M200 合金制件的固相面和液相面的位置

5. 流态床冷却法(FBQ 法)

Nakagawa 等首先采用流态床冷却法来获得很高的液相温度梯度 G_{TL} ,进行定向凝固。液态床冷却装置示意图如图 2-8 所示。用流态化的 150 号 ZrO_2 粉作为冷却介质。氨气用量大于 $4000\text{cm}^3/\text{min}$,冷却介质温度保持在 $100^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$,在相同条件下,液态金属冷却法的温度梯度 G_{TL} 为 $100^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ 。而流态床冷却法为 $100^{\circ}\text{C}/\text{cm}\sim 200^{\circ}\text{C}/\text{cm}$,两者的凝固速率和糊状宽度相同,分别为 $50\text{cm}/\text{h}\sim 80\text{cm}/\text{h}$ 和 1cm 。

6. 区域熔化液态金属冷却法(ZMLMC 法)

加热和冷却是定向凝固过程的两个基本环节,并对定向凝固过程的温度梯度产生决定性的影响。定向凝固技术从 HRS 法发展到 LMC 法,温度梯度得到大幅度提高,这是因为改进了冷却方式,同时也发挥了冷却环节的最大潜力。要进一步提高定向凝固的液相温度梯度,改变加热方式是一条有效的途径。

分析一下 LMC 法定向凝固过程不难发现,以下两个问题限制着液相温度梯度的提高。一是凝固的固液界面并不处于最佳位置,当抽拉速度较低时,固液界面相对挡板上移,使凝固界面远离挡板;二是未凝固液相中的最高温度面远离凝固界面,界面前沿温度分布平缓。如果改变加热方式,采用在距冷却金属液面极近的特定位置强制加热,将凝固的固液界面位置下移,同时使液相中最高温度区尽量靠近凝固的固液界面,令界面前沿液相中的温度分布变陡,可进一步提高温度梯度。如果采用区域熔化法加热与用液态金属冷却相结合,就形成了区域熔化液态金属冷却(ZMLMC 法)定向凝固法。这种方法液相温度梯度可达 $1270\text{K}/\text{cm}$ 。