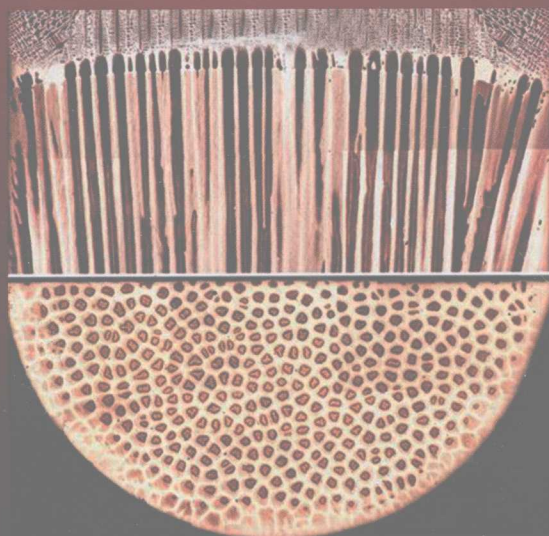


先进材料定向凝固

Directional Solidification
and Processing of
Advanced Materials

傅恒志 郭景杰 刘 林 李金山 著



科学出版社

www.sciencep.com

先进材料定向凝固

Directional Solidification and Processing
of Advanced Materials

傅恒志 郭景杰 刘 林 李金山 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是我国著名冶金和材料学家傅恒志院士及其学术梯队几十年从事材料定向凝固研究工作的总结和升华。它在作者多年研究成果的基础上,吸收国内外关于定向凝固的最新研究成果,以先进结构和功能材料为研究对象,对定向凝固的理论及其应用进行了系统深入的分析和阐述。本书共分为十四章,第一章为绪论,第二~第九章为定向凝固理论及方法,第十~第十三章为先进结构和功能材料的定向凝固,第十四章为定向凝固组织形成过程模拟。

本书可作为从事材料及其加工方面的高等院校教师,科学研究人员和企业中的工程技术人员及研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

先进材料定向凝固 = Directional Solidification and Processing of Advanced Materials/傅恒志等著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-021382-2

I. 先… II. 傅… III. 工程材料-定向-凝固 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 034460 号

责任编辑:余 丁 吴凡洁/ 责任校对:陈玉凤

责任印制:刘士平 / 封面设计:耕者

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2008 年 7 月第一次印刷 印张: 54 1/4

印数: 1—2 500 字数: 1 300 000

定价: 150.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

序 一

2006年中国工程院第12次院士大会期间,傅恒志院士向我提及拟组织相关同志撰写《先进材料定向凝固》一书,我当即表示十分支持,这不仅是因为我对傅先生在这一领域中斐然的学术成就早已十分敬慕,还深知他是治学严谨的领军人物,承担着这一学科的国家重大科研项目,并培养出了不少优秀的中青年科研、教学带头人。院士大会后,我曾听说傅先生患了眼疾,也着实为他挂念了一番,却不料今年的院士大会前夕,100余万字的书稿已请人送到我的案头,并要我为之作序。我用了整整两天的时间,逐页拜读。对于多少也做过一点凝固研究的我来说,又一次系统重温了相关的基础理论知识,更可喜的是学到了不少先进材料定向凝固方面的新知识。欣喜之余,也感到作序之难,一是因为我对于凝固,特别是先进材料的定向凝固,相对于先生仍是后学者,难免羞于提笔;二是在这样一本严谨的学术巨著面前说“空话”、“套话”,我认为是没意义的。思忖再三,决定还是就凝固及定向凝固的问题阐述一点“管见”,称不得序,就算作引言或前言吧!

人类对凝固现象的观察或认识,应始于人类文明远未发展的远古时期。篆文中的凝字由“𠂔”(水的一种古写)及“疑”(为声)组合而成,从古汉语来说,是既有形又有声的一个形声字。“凝”在中国古代文人的眼中是十分美丽而寓有诗意的字,著名边塞诗人岑参在《老马川行奉送出师西征》中有“五花连钱旋作冰,幕中草檄砚水凝”的佳句,甚至可以浪漫地拓意到音乐演奏中声波的戛然停顿的情景,如白居易在《琵琶行》中就有“冰泉冷涩弦凝绝,凝绝不通声暂歇”的描述。而“固”也是个形声字,其“口”为城墙或院墙之形,“古”为声,本义是指四周密闭,牢固、坚固之意,如形容城防坚固的“固若金汤”之类的词。因而,从中文的“凝固”来看,凝是过程,是事物变化的本质现象,而固是结果,显然中国人看重的是过程。而英文的凝固——solidification一词,其字根是solid即固体,solidification是个动名词,因而如果硬译、直译,应该是“使固化”或“使变硬”,因此英文中的凝固一词,侧重点似乎是最终状态。当然,在20世纪中期以前,这两者几乎没有太大的差别,因为不管水凝成雪、结成冰,还是熔融的金属铸成形态各异的铸件,钢水浇成钢锭,既有过程,也有结果,从哪个侧重点看区别都不太大,因为当时研究凝固的重要手段,是相图、凝固点、形核条件等热力学参数与理论,它的研究本身就是解决可能与否的问题。所以,从热力学而言,其判据只与起始和最终状态有关,而与途径是无关的。最近50年,当凝固从工艺技术变成一门科学时,凝固过程的动力学及形态组织控制就渐渐成为了研究的主体。简而言之,只有按一定的方式、一定的速度、一定的方向“凝”,才能得到人们想要获得的某种材料的组织形态,某种性能的“固”体材料。所以,从这个意义来说,古代中国人对凝固的认识似乎更深刻、更具哲理。

凝固的研究对象,最早是铜、铁等比较单纯的金属及若干低熔点铜、锡的合金。以后在20世纪开始了对大量合金(钢实际上是铁碳合金,而合金钢、高合金钢则是多元合金了)的凝固学研究,特别是20世纪中期,由于信息产业的迅猛发展,不仅把凝固对象扩大到非

金属材料,如硅、锗等,乃至金属间化合物,还因为航空、航天技术对材料的苛求,除了高温合金外,进而开发、研究了高温结构陶瓷的超细晶控制定向凝固。可以说最近 50 年,凝固科学的蓬勃发展与飞速进步是人们未能预测的。

该书所述的先进材料大致可分为两大类:一类是在超高温、超高压下工作且要保持高强度的镍基高温合金及能承载主应力方向的氧化物高温陶瓷材料;另一类是由于电子、网络、通信及高保真视频技术的发展,所需的单晶、非晶材料和高温氧化物超导等材料。要满足上述两大类先进材料的性能要求,就必须对凝固过程进行严格的控制。所谓控制,无非是对凝固速度、方向及最终获得组织状态的控制,其中的核心技术就是定向凝固。当前它所涵盖的材料,从半导体、各类人工晶体到高温合金、金属间化合物及各种金属基及无机复合材料等。由于定向凝固可以在极大的范围内控制冷却速度($10^{-4} \sim 10^4 \text{K/s}$)、结晶方向、温度梯度及结晶前沿的状态,因此可以制备从准平衡组织到远离平衡的超细或亚稳态组织的各级、各类材料。其主要手段是高温合金的定向及单晶叶片定向凝固;金属间化合物的晶向选择控制定向凝固;高温超导材料的熔体织构定向凝固;高温结构陶瓷的精确控制定向凝固等。

我国在定向凝固方面的研究与开发方面起步并不晚,已有一些成果和建树,如西北工业大学开发的特种合金电磁约束成形与冷坩埚定向凝固;哈尔滨工业大学研究了 Ti-Al 合金在电磁场、温度场、流场三者耦合下的连续熔铸及凝固技术;上海大学的恒稳强磁场下约束晶体排列方向的研究等等。

在定向凝固领域中,目前最活跃的一个分支是无机晶体的定向生长。与金属及金属间化合物的定向凝固比较,人工晶体定向生长有一系列特殊的科学问题。已有学者预言,这一分支的发展与突破,可以为红外、激光等前沿技术提供晶体纯度及完整性高、个体尺寸大、生长速度快的重要晶体器件,还有可能创新相关的理论。

该书的一个重要特点是把系统的理论分析与最新的研究成果结合起来。对于材料科学与工程的研究工作者必将大有裨益,同时也是高等院校教师及研究生系统了解、掌握先进材料定向凝固的不可多得优秀参考书。我对傅恒志先生致以诚挚的祝贺,并为中国的材料科学工作者感到自豪!

全国政协副主席

中国工程院院长

徐匡迪

2007 年 7 月

序 二

定向凝固及单晶生长技术可使材料的组织按特定方向排列,获得定向及单晶结构,从而明显改善材料的力学和物理性质。为此,国内外在材料加工与制备领域,正在大力发展新型单晶高温合金、自生复合共晶合金、金属间化合物、高温超导等结构及功能材料的新型定向凝固及单晶生长技术。定向凝固技术已经成为材料制备与加工领域的重要学科方向和非常活跃的技术领域。

定向凝固技术最具代表性的成就是燃气轮机叶片材料的制备,目前先进航空发动机的涡轮前进口温度已近 2000K,几乎所有的先进发动机均使用定向或单晶涡轮叶片和导向叶片。随着航空发动机工作温度的进一步提高,镍基高温合金的替代材料,包括高温金属间化合物和自生复合陶瓷材料以及大型工业燃气轮机叶片的制备也主要通过定向凝固。因此,发展先进的定向凝固和单晶制备技术对国防和国民经济发展具有十分重要的意义。

定向凝固技术也是研究凝固理论的重要方法,凝固科学技术的发展在一定程度上是建立在对定向凝固过程的研究和定向凝固技术发展水平上的。定向凝固的冷却速率可以由 10^{-4} K/s 到 10^4 K/s,因此可以制备从接近平衡到远离平衡的超细和亚稳态组织,在此过程中所产生的一系列凝固现象一直是材料学家和物理学家研究的重要领域。

自 20 世纪 70 年代后期以来,傅恒志院士领导的课题组在国内率先开展了定向凝固理论及其应用研究。特别是他们研制出的液态金属冷却以及区熔-液态金属冷却(ZMLMC)超高温度梯度定向凝固装置和方法,在实验室中实现了 1000K/cm 以上的温度梯度,所制备的单晶高温合金的超细柱晶大幅度地提高了材料的持久寿命,具有创造性。此后,他们又提出将电磁约束成形与冷坩埚技术和定向凝固技术相结合,利用交变磁场在金属材料中产生的涡流和电磁力使金属加热熔化并约束成设定的形状,构成无坩埚熔炼、无接触或软接触成形,使之具有高纯净及超强冷却能力的新型定向及单晶生长技术,制备出低偏析或无偏析、组织超细化并具有高精度取向的高温合金或金属间化合物的航空发动机关键部件,具有广阔的应用前景。

在深入研究定向凝固技术的基础上,他们还发展了高梯度定向凝固水平连铸技术,生产出高导电性、高塑性的纯铜单晶铜坯,采用该技术也可生产出具有高强度、高导电性的铜基复合材料导线。由于单晶连铸消除了晶界,因而具有高延伸率、高导电率等优越性能,这种技术可在国防及民用电子、网络、通信、音像设备和高清晰度电视等工业领域中获得广泛应用。

《先进材料定向凝固》一书的最大特点是在上述研究工作的基础上融入了国内外定向凝固的经典和最新研究成果,以定向凝固基础理论、研究方法和若干先进结构材料和功能材料的定向凝固制备为主要内容,构成了全书的基本框架。

该书具有下列特点:

1. 系统性。该书从凝固热力学和动力学开始,系统论述了凝固形核、界面、溶质分配、

界面稳定性以及晶体形态学等内容,并分别对共晶、包晶、偏晶的定向凝固组织特点进行了深入的论述,涵盖了定向凝固研究领域的基本内容。从研究方法上,比较全面地覆盖了基础理论、实验方法及建模模拟。

2. 原创性。该书不是简单地编著,而是作者多年研究工作的结晶,其中溶质再分配、包晶共生生长、高梯度与亚快速定向凝固、高梯度单晶连铸等方面的内容具有明显的创新。

3. 实用性。该书所介绍的定向凝固方法和技术对于开展定向凝固的实验研究和工业应用有重要的参考作用,所论述的高温合金、金属间化合物、结构陶瓷和功能材料对于正确制定制备工艺参数有重要参考价值。

4. 前瞻性。随着学科的发展和新的先进材料的出现,定向凝固领域的新技术和新方法不断涌现。该书从基础理论、研究方法和先进材料凝固成形方面着手,对先进材料及高技术的发展打下了良好的基础。

5. 普遍性。该书涉及定向凝固的方方面面,过去人们主要重视结构金属材料的凝固,而该书对陶瓷材料及功能材料的定向凝固也做出了深入的探讨,这是今后发展的重点。

该书理论与实践结合密切,不但是材料工作者的一本良好参考书,也可作为研究生和高等学校的专业教材。该书的出版无疑将有力地推动凝固理论和相关学科的发展,促进先进结构材料和功能材料的研制和应用,为我国国防和国民经济建设做出贡献。

国家自然科学基金委原副主任
中国工程院原副院长

师昌绪

2008年2月

前 言

定向凝固虽然只是凝固科学技术中的一个部分,却占有核心及前沿的重要地位,因为现代凝固理论的奠立很大程度上是通过分析单相热流的凝固过程而获得的。鉴于定向凝固在材料、制备加工及凝固理论发展中的重要作用,特别是联系到我国近几十年来在此领域进行的大量研究与开发工作和卓有成效的科学积累,深感若能结合凝固学科的最新进展,在提炼总结定向凝固理论体系的基础上系统地介绍一些典型先进材料的定向凝固并将它们与凝固理论“揉”在一起,将会对阐释材料的凝固加工本质起到画龙点睛的作用,甚至可能在某些方面促进新材料的发展。

另一方面,伴随着社会经济对新材料的需求,新材料的凝固加工日益成为迫切的课题,而人们对新材料凝固特性的认识却相对较为陌生,有时难于将现有的凝固理论用于处理新材料的制备成形。而新材料的凝固加工多数涉及定向凝固技术,所以先进材料的定向凝固受到广泛关注。西北工业大学和哈尔滨工业大学长期从事材料与凝固学科教学与科研的部分教师不揣浅陋,试图通过分析选择国内外相关文献,结合作者们多年来的研究积累,以凝固原理为本,介绍并讨论先进材料的定向凝固问题,希望能帮助相应学科及相关领域的读者更深入地掌握这方面的知识和技术。

本书共分为十四章,第一章为绪论,第二章~第九章为定向凝固基础理论及方法,第十章~第十三章为先进结构和功能材料的定向凝固,第十四章为定向凝固组织形成过程模拟。全书由傅恒志院士提出构思和体系框架,并撰写第一章、第二章(部分)、第五章~第七章和第十一章,郭景杰教授撰写第二章~第四章和第十四章,刘林教授撰写第八章~第十章和第十二章,李金山教授撰写第十三章,最后由傅恒志院士审定。面对我国近三十多年经济的蓬勃发展,在定向凝固领域凝聚了大量有价值的成果,我们虽力图本书吸纳典型的相关材料,但由于篇幅及视野所限终究可能挂一漏万,且由于学识水平所限,内容亦必有不少似是而非或欠妥之处,衷心希望读者批评纠正,不吝指教。

本书撰写中得到有关老师和研究生的帮助,书稿形成过程中,苏彦庆、李双明、胡锐教授,李新中、骆良顺、崔红保、苏海军、黄太文博士参与了部分章节内容的选撰与讨论,李晓历和贾珊进行了文字图表的整理,书稿经胡壮麒院士及贾均教授审阅并提出了许多宝贵意见,在此谨向他们表示感谢。书中相当一部分内容取自作者们所承担的国家自然科学基金三个重大项目和十余个面上项目以及总装备部和国防科工委“九五”、“十五”、“十一五”的科研项目,这些项目为进行相应的研究工作提供了宝贵的经费支持和需求牵引。国家自然科学基金委对本书的出版还给予了出版基金的资助,我们对他们多年来给予的指导与支持谨致谢意与敬意。特别是中国工程院院长徐匡迪院士和中国工程院原副院长、两院院

2008 年 1 月

目 录

序一	
序二	
前言	
第一章 绪论	1
1.1 凝固的历史发展与凝固科学的形成	1
1.2 定向凝固在材料制备中发挥重要作用	4
1.3 定向凝固面临的挑战	14
1.4 定向凝固发展展望	19
参考文献	20
第二章 凝固过程的物理基础	22
2.1 凝固热力学	22
2.2 液体金属和合金的结构	51
2.3 凝固过程传输现象及研究方法	72
参考文献	93
第三章 形核理论与凝固界面结构	95
3.1 均质形核理论	95
3.2 非均质生核理论	103
3.3 影响形核速率的因素	108
3.4 结晶游离理论	110
3.5 经典形核理论的发展	113
3.6 多元多相合金凝固的形核理论	117
3.7 定向凝固初始过渡区内的形核	120
3.8 界面的基本理论	121
3.9 凝固界面的微观结构及其动力学	137
3.10 凝固界面的宏观形态	150
3.11 凝固界面的研究方法	153
参考文献	160
第四章 定向凝固过程中的溶质分凝与偏析	162
4.1 平衡分凝系数	162
4.2 近平衡定向凝固过程中溶质分凝与偏析	167
4.3 非平衡溶质分凝现象	194
4.4 多层界面的溶质分凝系数	201
4.5 团簇与界面溶质分凝	204

4.6	多相合金定向凝固过程中的溶质分凝	208
4.7	多元合金凝固过程中的溶质分凝	211
4.8	溶质分凝的研究方法	217
	参考文献	219
第五章	单相合金定向凝固与界面稳定性	223
5.1	单相合金定向凝固	223
5.2	界面形态稳定性的动力学理论	230
5.3	定向凝固特征尺度	243
5.4	胞晶生长与胞-枝转换	250
5.5	枝晶生长	253
5.6	定向凝固枝晶生长	263
5.7	胞-枝及枝-胞转变	275
	参考文献	280
第六章	共晶定向凝固	282
6.1	前言	282
6.2	共晶相变	284
6.3	共晶合金凝固的物理基础	293
6.4	规则共晶的定向凝固	316
6.5	不规则共晶定向凝固	333
	参考文献	353
第七章	包晶与偏晶合金定向凝固	356
7.1	包晶相变过程	356
7.2	包晶合金的定向凝固与显微组织	361
7.3	多元系包晶	374
7.4	包晶合金定向凝固初始过渡阶段	386
7.5	包晶合金稳态定向凝固	397
7.6	包晶合金定向凝固的共生生长	403
7.7	定向凝固包晶显微组织的演化	414
7.8	偏晶合金定向凝固	422
	参考文献	433
第八章	快速定向凝固	437
8.1	快速定向凝固方法	437
8.2	快速定向凝固的基本原理和特征	447
8.3	快速定向凝固的组织特点	458
8.4	快速凝固带状结构	481
	参考文献	486
第九章	定向凝固方法	490
9.1	常用定向凝固方法	490

9.2 定向凝固单向温度梯度的解析	496
9.3 定向凝固过程的稳态生长与凝固界面位置控制	504
9.4 定向凝固组织的观测	509
9.5 定向凝固有关参数的测算	517
参考文献	521
第十章 高温合金定向凝固	525
10.1 铸造高温合金概述	525
10.2 高温合金定向凝固技术	532
10.3 高温合金的凝固特性	540
10.4 高温合金定向凝固组织	563
10.5 定向和单晶高温合金的常见凝固缺陷及其控制	591
10.6 定向凝固和单晶高温合金的力学性能	608
参考文献	621
第十一章 结构金属间化合物材料定向凝固	630
11.1 前言	630
11.2 金属间化合物材料的应用	631
11.3 金属间化合物的熔体结构与凝固特性	633
11.4 Ti-Al 金属间化合物及其定向凝固	637
11.5 Ni-Al 系金属间化合物定向凝固	662
11.6 高熔点金属化合物材料及其定向凝固	695
参考文献	703
第十二章 结构陶瓷材料定向凝固	705
12.1 共晶陶瓷材料体系	707
12.2 氧化物共晶陶瓷定向凝固制备技术	709
12.3 定向凝固氧化物共晶陶瓷的凝固组织	713
12.4 定向凝固氧化物共晶陶瓷的力学性能	721
参考文献	726
第十三章 典型功能材料的定向凝固	727
13.1 Cu 单晶定向凝固连铸	727
13.2 NdFeB 稀土永磁材料定向凝固	741
13.3 高温超导氧化物 YBCO 定向凝固	758
参考文献	779
第十四章 定向凝固与组织形成过程模拟	782
14.1 定向凝固传热特点	782
14.2 定向凝固过程的温度场模型化	783
14.3 典型定向凝固温度场计算	785
14.4 定向凝固组织形成过程模拟方法比较	786
14.5 单相合金凝固微观组织形成的相场法模拟	805

14.6 定向凝固共晶相变微观组织形成的相场法模拟.....	829
14.7 定向凝固包晶相变微观组织形成的相场模拟.....	836
14.8 未来的发展展望.....	848
参考文献.....	848

Contents

Foreword 1

Foreword 2

Preface

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Historic development of solidification and establishment of solidification science	1
1.2 The function of directional solidification in materials processing	4
1.3 The challenge facing in directional solidification	14
1.4 Development and prospects of directional solidification	19
References	20
Chapter 2 The basics of solidification processing	22
2.1 Thermodynamics of solidification	22
2.2 Structure of alloy melt	51
2.3 Transport behaviors in solidification and methods for investigation	72
References	93
Chapter 3 Nucleation and solidification interface	95
3.1 Homogeneous nucleation	95
3.2 Heterogeneous nucleation	103
3.3 Factors affecting nucleation rate	108
3.4 Equiaxed crystals separation theory	110
3.5 Progress of classic nucleation theory	113
3.6 Nucleation theory of multi-component/phase alloys	117
3.7 Nucleation in initial transient stage of directional solidification	120
3.8 Basic concept of interface	121
3.9 Microstructure and dynamic of S/L interface	137
3.10 Morphology of S/L interface	150
3.11 Some methods for investigation on interface	153
References	160
Chapter 4 Solute redistribution and segregation during directional solidification	162
4.1 Equilibrium solute distribution coefficient	162
4.2 Solute redistribution and segregation during directional solidification	

near equilibrium	167
4.3 Non-equilibrium solute redistribution	194
4.4 Solute redistribution of multi-layer interfaces	201
4.5 Cluster and interface solute redistribution	204
4.6 Solute redistribution during directional solidification processing of multi-phase alloys	208
4.7 Solute redistribution of multi-component alloys in solidification processing	211
4.8 Some methods for investigation on solute redistribution	217
References	219
Chapter 5 Directional solidification of single phase alloy and interface stability	223
5.1 Directional solidification of single phase alloy	223
5.2 Dynamics of the morphological interface stability	230
5.3 Characteristic scale in directional solidification	243
5.4 Cell growth and cell-to-dendrite transition	250
5.5 Free dendrite growth	253
5.6 Dendritic growth during directional solidification	263
5.7 Cell-to-dendrite and dendrite-to-cell transition	275
References	280
Chapter 6 Directional solidification of eutectic alloy	282
6.1 Introduction	282
6.2 Phase transformation of eutectic alloy	284
6.3 Physical basic of eutectic alloy solidification	293
6.4 Directional solidification of regular eutectic alloy	316
6.5 Directional solidification of irregular eutectic alloy	333
References	353
Chapter 7 Directional solidification of peritectic and monotectic alloys	356
7.1 Phase transformation of peritectic alloy	356
7.2 Directional solidification and microstructure of peritectic alloy	361
7.3 Multi-component peritectic alloy	374
7.4 Initial transient stage in directional solidification of peritectic alloy	386
7.5 Steady state in directional solidification of peritectic alloy	397
7.6 Coupled growth of peritectic alloy during directional solidification	403
7.7 Microstructure evolution of peritectic alloy during directional solidification	414
7.8 Directional solidification of monotectic alloy	422
References	433

Chapter 8 Rapid directional solidification	437
8.1 Methods of rapid directional solidification	437
8.2 Principle and characteristics of rapid directional solidification	447
8.3 Microstructure features in rapid directional solidification	458
8.4 Band structure in rapid directional solidification	481
References	486
Chapter 9 Methods of directional solidification	490
9.1 Conventional directional solidification	490
9.2 Analysis of temperature gradient in unidirectional solidification	496
9.3 Steady state growth and S/L interface position control during directional solidification	504
9.4 In-situ observation of microstructure evolution during directional solidification	509
9.5 Determination and estimation of relative parameters of directional solidification	517
References	521
Chapter 10 Directional solidification of superalloys	525
10.1 Introduction	525
10.2 Directional solidification technology of superalloy	532
10.3 Solidification behavior of superalloy	540
10.4 Microstructure of superalloys in directional solidification	563
10.5 Common defects and their control in directionally solidified and single crystal superalloys	591
10.6 Mechanical properties of directionally solidified and single crystal superalloys	608
References	621
Chapter 11 Directional solidification of structural intermetallic compound	630
11.1 Introduction	630
11.2 Application of materials with intermetallic compound	631
11.3 Melt structure and solidification behaviour of intermetallic compound	633
11.4 Ti-Al intermetallic compounds and their directional solidification	637
11.5 Directional solidification of Ni-Al intermetallic compounds	662
11.6 Intermetallic compounds with high melting point and its directional solidification	695
References	703
Chapter 12 Directional solidification of structural ceramic materials	705
12.1 Eutectic ceramic materials	707

12.2	Directional solidification technology of oxide eutectic ceramics	709
12.3	Solidification microstructures of oxide eutectic ceramics	713
12.4	Mechanical properties of directionally solidified oxide eutectic ceramics	721
	References	726
Chapter 13	Directional solidification of typical function materials	727
13.1	Directional solidification and continuous cast of Cu single crystal	727
13.2	Directional solidification of NdFeB rare-earth permanent magnetic materials	741
13.3	Directional solidification of high T _c YBCO materials	758
	References	779
Chapter 14	Simulation of directional solidification processing and their microstructure evolution	782
14.1	Heat transfer in directional solidification	782
14.2	Temperature field modelling of directional solidification	783
14.3	Temperature field calculation of typical directional solidification processing	785
14.4	Comparison of simulation methods for solidification microstructure	786
14.5	Phase field simulation of solidification microstructure of single phase alloy	805
14.6	Phase field simulation of solidification microstructure of eutectic alloy	829
14.7	Phase field simulation of solidification microstructure of peritectic alloy	836
14.8	Future development	848
	References	848