

21 世纪新材料科学与技术丛书

金属凝固过程中的 晶体生长与控制

● 常国威 王建中 编著

冶金工业出版社

21 世纪新材料科学与技术丛书

金属凝固过程中的晶体 生长与控制

常国威 王建中 编著

北 京
冶金工业出版社
2002

图书在版编目(CIP)数据

金属凝固过程中的晶体生长与控制/常国威,王建中
编著. —北京:冶金工业出版社, 2002. 3
(21 世纪新材料科学与技术丛书)

ISBN 7-5024-2967-0

I. 金... II. ①常...②王... III. 金属—冷凝—
晶体生长—研究 IV. TG111.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 000012 号

金属凝固过程中的晶体生长与控制

出 版 人 曹胜利(北京市东城区沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)
作 者 常国威 王建中
策划编辑 张 卫(联系电话:010-64027930; E-mail: bull.zw@sina.com.cn)
责任编辑 李 梅 张登科(联系电话:010-64027928; E-mail: lee.m@263.net)
美术编辑 熊晓梅
责任校对 王贺兰
责任印制 牛晓波
版式设计 张 青
出 版 冶金工业出版社
发 行 冶金工业出版社 电话:010-64044283; 传真:010-64027893
冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号 (100711); 电话:010-65289081
经 销 全国各地新华书店
印 刷 北京鑫正大印刷厂
开 本 850mm×1168mm 1/32
印 张 8.875 印张
字 数 236 千字
页 数 267 页
版 次 2002 年 3 月第 1 版
印 次 2002 年 3 月第 1 次印刷
印 数 1~3000 册
书 号 ISBN 7-5024-2967-0/TG·303
定 价 25.00 元

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

编者的话

材料是人类物质生活和人类文明进步的基础,新材料是支撑现代文明社会的基石和高新技术发展的先导。

在刚刚过去的 20 世纪,科学技术迅猛发展,各学科交叉融合。随着科学的发展与工业技术的进步,传统的金属材料、无机非金属材料和高分子材料越来越不能满足现代科技应用的需要,科技工作者不断研制出新材料,特别是新型功能材料,如超导材料、智能材料、纳米材料、生物医用材料、储能材料、环境材料、薄膜材料、先进陶瓷材料等等。正是这些新材料所具有的特殊性能,使其他高新技术及产业得以高速发展,同时材料科学与技术本身相关产业也将快速发展。如纳米材料和技术为功能器件的小型化、多功能化和智能化展示了其未来诱人的发展前景;又如光电子材料的研究与开发为信息技术及产品不断满足人们的要求提供了保障。

21 世纪,材料科学与技术将与信息技术、生物技术等其他科学技术一同为人类的

进步做出贡献。然而,目前有些具有美好发展前景的新型材料的研究与开发,还处于基础阶段,还需要材料工作者做大量理论研究与技术开发工作,并不断总结提高。基于此,我社将有重点、有系统地组织国内从事新材料基础研究、材料制备工艺与先进测试分析技术研制以及产品应用开发的科技工作者,将其取得的最新科技成果及时归纳总结,撰写成著作,编入《21 世纪新材料科学与技术丛书》陆续出版,以推进我国材料科学与技术及其产业化的进程,满足其他高新技术产业发展对新材料提出的更高要求;同时,让更多的科技工作者同享这些研究成果,记录我国在 21 世纪中材料科学与技术的发展历程。

欢迎承担国家“863”项目、国家自然科学基金资助项目、国家“973”项目以及省、部重点研究课题的材料研究学者踊跃参与此项工作,欢迎广大科技工作者和读者提供建议和意见。

2001 年 6 月

前言

在多年从事教学与晶体生长理论及控制的研究工作中,自己深深地体会到有一本比较系统的有关金属凝固过程中晶体生长的书是极其重要的。有关“晶体生长”、“金属凝固原理”、“金属凝固技术”等很好的著作与译著虽然陆续出版,但读后令人感到其针对性还不够强,因此很早以前就萌生写一本有针对性的关于金属凝固过程中晶体生长方面的书,只是由于本人学识尚浅而未敢动笔。随着所从事的相关研究的不断深入与所了解内容的不断增多,终于提笔写了这本书,期望能够与同行们交流,以促进这方面的研究。

从 20 世纪 50 年代开始,金属凝固过程中晶体生长的理论研究与控制技术进入了新的历史阶段。在此之后,实验研究结果层出不穷,晶体生长理论日臻完善,现在有必要也有可能对其进行系统的总结。基于目前研究结果,郡司好喜先生于 1994 年在《鉄と鋼》杂志上连续发表了关于金属凝固基础的综述文章,以此为主要参考文献,本书 1~

6章着重介绍了金属凝固过程中晶体生长基础。随着晶体生长理论研究的不断深入,出现了许多控制晶体生长的方法,前不久周尧和教授已经把它们作为控制金属凝固的技术进行了详细的总结,因此本书7~11章只是给出了有关的定向凝固技术,此外还着重介绍了电流作用下金属凝固过程中的晶体生长行为。

本书7~11章的实验研究工作得到了北京科技大学胡汉起教授的精心指导,为此对胡汉起教授表示衷心感谢。感谢北京科技大学王静松为本书撰写了1~2章的内容。

由于本人水平所限,书中不妥之处,敬请读者批评指正。

常国威

2001年12月于北京



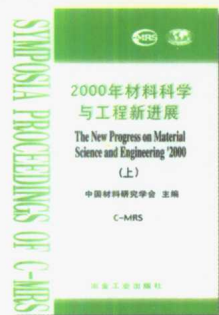
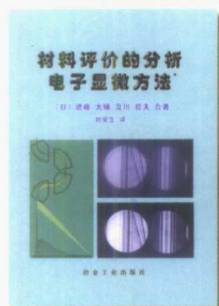
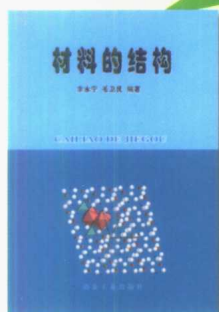
作者简介

常国威，辽宁工学院教授，1960年生，辽宁兴城人。1982年7月毕业于锦州工学院机械二系，获工学学士学位。1985年6月毕业于北京科技大学冶金系，获工学硕士学位。1999年3月毕业于北京科技大学材料学院，获工学博士学位。1999年5月入北京科技大学冶金工程博士后流动站。主要从事金属材料的组织与性能、金属凝固理论与控制技术的研究工作，在电流作用下金属凝固过程中的晶体生长方面多有研究，发表 *Ways of Stabilizing Continuous Unidirectional Solidification Process and Verification Tests, Relationship between the Columnar Crystal Spacing and the Electric Current Density in the Unidirectional Solidification of Monophase Cu-Al Alloy* 等学术论文 30 余篇。

材料类

最近

新书



目 录

1 晶体生长热力学	(1)
1.1 相平衡	(2)
1.1.1 热平衡	(3)
1.1.2 力学平衡	(4)
1.1.3 传质平衡	(5)
1.2 相变	(6)
1.3 金属凝固中晶体生长的热力学处理	(10)
1.3.1 纯金属的热力学	(11)
1.3.2 二元合金热力学	(12)
1.3.3 分配系数	(18)
参考文献	(21)
2 晶体生长中的传递现象	(22)
2.1 传递过程微分方程的建立	(23)
2.1.1 连续方程的建立	(23)
2.1.2 运动方程的建立	(24)
2.1.3 机械能方程的建立	(28)
2.1.4 非等温系统能量方程的建立	(28)

2.1.5 多组分系统连续方程的建立·····	(31)
2.2 边界层·····	(32)
2.2.1 流动边界层·····	(33)
2.2.2 温度边界层·····	(35)
2.2.3 浓度边界层·····	(37)
参考文献·····	(38)
 3 晶体生长形态与生长速率·····	(39)
3.1 晶体生长形态·····	(40)
3.1.1 晶体生长形态与生长速率间的联系·····	(41)
3.1.2 晶体生长的理想形态·····	(42)
3.1.3 晶体生长的实际形态·····	(42)
3.1.4 晶体几何形态与其内部结构间的关系·····	(43)
3.1.5 杂质对晶体形态的影响·····	(46)
3.1.6 小平面与非小平面生长·····	(47)
3.2 晶体的生长速率·····	(50)
3.2.1 二维成核与生长·····	(50)
3.2.2 螺型位错生长·····	(53)
3.2.3 Jackson 生长速率·····	(55)
3.3 晶体生长形态的动力学成因·····	(58)
3.3.1 晶须·····	(58)
3.3.2 针状晶体与片晶·····	(59)
3.3.3 平面晶·····	(59)
3.3.4 平衡与特习性生长·····	(60)
3.3.5 枝蔓生长·····	(61)
参考文献·····	(62)

4 固液界面的稳定性·····	(64)
4.1 在固液界面上形成成分过冷·····	(64)
4.1.1 液体无对流时的溶质富集·····	(64)
4.1.2 液相中有对流时溶质的富集·····	(67)
4.2 合金的成分过冷与晶体形态的变化·····	(68)
4.2.1 成分过冷的形成·····	(68)
4.2.2 出现成分过冷后晶体形态的变化·····	(70)
4.3 固液界面形态稳定性理论(M-S 理论) ·····	(73)
4.3.1 固液界面前沿的浓度分布·····	(75)
4.3.2 固液界面上温度与浓度的匹配·····	(76)
4.3.3 界面稳定性的分析·····	(78)
4.3.4 近似程度高的界面稳定性的分析·····	(80)
4.3.5 准确的界面稳定性分析·····	(82)
4.3.6 固液界面从稳定到不稳定变 化的实验观察·····	(84)
参考文献 ·····	(86)
5 胞晶与枝晶生长·····	(88)
5.1 热流与凝固组织·····	(88)
5.2 枝晶形态与晶体学的关系·····	(90)
5.3 枝晶的生长条件·····	(92)
5.4 枝晶稳定性判据·····	(96)
5.4.1 Oldfield 模型 ·····	(96)
5.4.2 Langer 理论 ·····	(97)
5.4.3 球体模型·····	(99)
5.5 合金枝晶尖端的曲率半径 ·····	(100)
5.6 枝晶的大小 ·····	(104)
5.6.1 胞晶以及枝晶间距 ·····	(104)

5.6.2 枝晶的二次臂间距	(109)
参考文献	(115)
6 多相合金中的晶体生长	(117)
6.1 共晶生长	(117)
6.1.1 共晶组织形态	(117)
6.1.2 共晶生长	(120)
6.2 包晶生长	(139)
6.2.1 包晶反应	(140)
6.2.2 包晶相变	(143)
6.2.3 第二相的一次介稳定析出	(146)
参考文献	(147)
7 控制晶体生长方法	(148)
7.1 定向凝固的方法	(149)
7.1.1 发热保温材料法	(149)
7.1.2 功率降低法(简称 PD 法)	(150)
7.1.3 快速定向凝固法(简称 HRS)	(150)
7.1.4 液态金属冷却法(简称 LMC 法)	(151)
7.1.5 电渣重熔法	(151)
7.2 定向凝固金属与合金的组织与性能	(152)
7.2.1 组织	(152)
7.2.2 偏析	(152)
7.2.3 性能	(152)
7.3 定向凝固方法的应用概况	(153)
参考文献	(154)

8 电渣感应连续定向凝固技术	(156)
8.1 连续定向凝固的现状	(157)
8.1.1 HGC 方法	(158)
8.1.2 OCC 方法	(159)
8.1.3 连续定向凝固金属或合金的组织 特征与表面状态	(161)
8.1.4 连续定向凝固合金性能特征与应用	(163)
8.1.5 连续定向凝固的冶金质量	(164)
8.2 电渣重熔	(165)
8.2.1 电渣重熔冶金的发展概况	(165)
8.2.2 电渣过程的冶金特点	(167)
8.3 感应电渣	(168)
8.4 电渣感应连续定向凝固实验装置原理	(169)
8.4.1 原理、功能及特点	(169)
8.4.2 操作工艺要点	(172)
8.5 电渣感应连续定向凝固过程温度场的 数值模拟	(172)
8.5.1 温度场的数学描述	(173)
8.5.2 边界条件与初始条件的确定以及 其他问题的处理	(175)
8.5.3 有限差分方程的建立	(179)
8.5.4 程序编制框图	(181)
8.6 电渣感应连续定向凝固系统温度分布与 数值计算结果的验证	(182)
8.6.1 温度场的测试	(183)
8.6.2 温度场的测试结果及讨论	(185)
8.6.3 系统纵断面上的温度分布	(189)
8.6.4 电渣感应连续定向凝固过程中 温度分布的监测方法	(189)

参考文献	(191)
9 电渣感应连续定向凝固过程的稳定性	(196)
9.1 过程的稳定性	(197)
9.1.1 固液界面位置的定义	(197)
9.1.2 理想的固液界面位置	(198)
9.1.3 固液界面位置的确定方法	(198)
9.1.4 工艺参数对固液界面位置的影响	(199)
9.2 组织的稳定性	(203)
9.2.1 固液界面形状及工艺参数的影响	(204)
9.2.2 固液界面前沿金属熔体中的温度梯度	(207)
9.3 结晶器壁内温度分布的控制	(212)
9.3.1 感应圈与加热结晶器用石墨 相对位置的影响	(212)
9.3.2 加热结晶器用石墨外形的影响	(212)
9.4 相关因素之间相互匹配的数学描述	(214)
9.5 对下拉法连续定向凝固生命力的探讨	(218)
9.6 铸铁与不锈钢电渣感应连续定向 凝固的实验研究	(220)
9.6.1 铸铁的电渣感应连续定向凝固的 实验研究	(220)
9.6.2 不锈钢电渣感应连续定向凝固的 实验研究	(223)
参考文献	(227)
10 电渣感应连续定向凝固组织与性能	(229)
10.1 电渣感应连续定向凝固铸锭的凝固组织	(229)
10.1.1 电流密度对电渣感应连续定向 凝固铸锭组织的影响	(230)

10.1.2	电渣感应连续定向凝固过程稳定性对凝固组织的影响·····	(232)
10.1.3	结晶器温度对凝固组织的影响·····	(233)
10.1.4	冷却及牵引速度的影响·····	(234)
10.2	电渣感应连续定向凝固铸锭的表面质量·····	(235)
10.3	电渣感应连续定向凝固 QAl9-4 合金的力学性能·····	(237)
	参考文献·····	(239)
11	电流密度与固液界面稳定性及柱状晶间距·····	(241)
11.1	电流作用下固液界面形态稳定性动力学微分方程·····	(242)
11.1.1	界面出现扰动后系统中的温度与浓度分布·····	(242)
11.1.2	扰动振幅随时间的变化率·····	(246)
11.2	电流对固液界面形态稳定性的影响·····	(247)
11.2.1	电流引起固液界面能的变化对稳定性的影响·····	(248)
11.2.2	电流产生的 Joule 热对界面稳定性的影响·····	(248)
11.2.3	电流改变温度梯度对界面稳定性的影响·····	(249)
11.2.4	电流改变溶质浓度梯度对界面稳定性的影响·····	(250)
11.3	电流密度与一次枝晶间距的关系·····	(252)
11.3.1	电流密度与一次枝晶间距关系式的建立·····	(252)
11.3.2	电流密度对一次枝晶间距影响的计算结果·····	(254)

11.4 电流使枝晶间距减小的机理分析·····	(259)
11.4.1 电流使固液界面稳定性增加的作用·····	(259)
11.4.2 电流在固相中偏聚的作用·····	(261)
11.4.3 电流使固液界面能增加的作用·····	(262)
11.5 电流抑制二次枝晶出现的机理分析·····	(263)
参考文献·····	(265)