



全国高技术重点图书
新材料领域

凝固技术

周尧和 胡壮麒 介万奇 编著

机械工业出版社

TG2002
Z85

414099

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

凝固技术

周尧和 胡壮麒 介万奇 编著



00414099



机械工业出版社

凝固技术是以凝固原理为基础,进行凝固过程控制的工程技术领域,其目标是根据材料或产品使用性能的需求,获得期望的微观组织和无凝固缺陷的铸件或铸锭。研究凝固技术对控制材料 and 铸件的质量、研制和开发新材料具有极其重要的意义。

本书除反映国内外凝固技术的最新进展外,重点总结了西北工业大学与中国科学院沈阳金属研究所的“凝固技术”与“快速凝固非平衡合金”两个国家重点实验室的多年研究成果及目前人们关注的凝固技术前沿科学。

本书共9章三大部分:凝固原理及新进展(1、2章),凝固过程控制因素(3章),各种凝固技术(4~9章)。具体内容是:概论;凝固过程的基本原理;凝固过程的传热、传质与液体流动;铸件凝固组织控制;定向凝固与单晶生长;快速凝固;连续铸造;金属基复合材料制备中的凝固问题;特殊条件下的凝固。

本书可供从事铸造与材料工程方面的科研、教学和工程技术人员阅读,也可作为研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

凝固技术/周尧和等编著. —北京:机械工业出版社, 1998. 10
ISBN 7-111-06490-9

I. 凝… II. 周… III. 浇铸-凝固-技术 IV. TG244

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 16650 号

出版人: 马九荣(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 余茂祚 版式设计: 冉晓华 责任校对: 李汝庚

封面设计: 姚毅 责任印制: 路琳

中国建筑工业出版社密云印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

850mm×1168mm $1/32$ ·15.75 印张·3 插页·408 千字

0 001—3000 册

定价: 38.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

前 言

凝固，即自液态向固态转变的相变过程，在自然界是一种常见的现象，在材料制备和液态成形中起着重要的作用。对认识和解释凝固过程各种现象和规律的探索已经持续了数千年。自 50 年代以来，在现代科学基础上的研究进展很快，已形成一个理论体系，即凝固原理(或凝固理论)。然而，认识自然的目的在于改造自然。实现对凝固过程的有效控制是人们长期追求的目标，其研究工作是和凝固原理的研究同步进行的。由于材料的微观凝固组织是决定材料的力学和物理性能的主要因素，因此凝固过程控制对于工程结构材料和功能材料生产过程显得尤为重要，研究工作也是硕果累累，形成材料科学与工程领域的一个重要分支，即凝固技术。

近年来国内外均陆续出版过几本凝固原理的专著，反映了这一方面的进展。然而，至今尚未看到一本系统介绍凝固技术的著作。本书写作的目的是期望填补这一空缺。

在本书的第 1 章概论之后，首先在第 2 章中简要归纳了凝固原理的主要理论及新进展，接着在第 3 章中对凝固过程主要控制因素，即传热、传质和液体流动作了系统分析。这两部分内容是进行凝固过程控制的基础。随后，将凝固技术归纳为铸件凝固组织控制，定向凝固与单晶生长，快速凝固，连续铸造，金属基复合材料制备过程中的凝固问题，特殊条件下的凝固六个部分，分别在第 4 至第 9 章中论述。

本书除系统论述国内外关于凝固技术研究的最新进展外，力图反映作者及其所在“凝固技术”和“快速凝固非平衡合金”两个国家重点实验室的研究成果。这两个实验室是我国目前仅有的两个以凝固技术为主要研究方向的国家重点实验室。

在对凝固技术的讨论中, 本书没有把重点放在对具体技术细节的描述上, 而偏重于对不同凝固技术进行凝固组织控制的原理、方法和思路的讨论。同时, 由于篇幅所限, 本书没有试图覆盖凝固技术的所有内容, 比如凝固过程的数值模拟本书即未涉及。对于具体合金(如铸铁)的铸造缺陷控制等, 也没有作为重点内容。

在名词术语及符号上本书采用了新的国家标准。如, 合金成分(即溶质含量), 过去多用符号 C 表示, 现分别采用质量分数 w 或摩尔分数 x 表示; 相的体积分数 f , 用 φ 表示; 凝固潜热 L , 用 Δh 表示等。这些均在符号表中作了说明。

本书可供从事材料工程方面的科研、教学人员和工程技术人员阅读, 也可作为研究生的教学参考书。

本书的第 1、2、3、4、6、7、8 章由介万奇(西北工业大学)撰写, 第 5、9 章由胡壮麒(中国科学院沈阳金属研究所)撰写, 全书由周尧和(上海交通大学、西北工业大学)规划、修改、加工、定稿。

本书在撰写过程中得到师昌绪院士、张立同院士、陶令桓研究员及作者所在单位同事们的支持。机械工业出版社余茂祚教授为本书的出版做了大量工作, 在此深表谢意。

作 者

《全国高技术重点图书》 出版指导委员会名单

主任：朱丽兰

副主任：刘 杲 卢鸣谷

委员：(以姓氏笔划为序)

王大中 王为珍 牛田佳 王守武 刘 仁

刘 杲 卢鸣谷 叶培大 朱丽兰 孙宝寅

师昌绪 任新民 杨牧之 杨嘉墀 陈芳允

陈能宽 罗见龙 周炳琨 欧阳莲 张钰珍

张效祥 赵忠贤 顾孝诚 谈德颜 龚 刚

梁祥丰

总干事：罗见龙 梁祥丰

《全国高技术重点图书》编审委员会名单

新材料 领域

主任委员：师昌绪 中国科学院技术科学部主任

国家自然科学基金委员会特约顾问 两院院士

委 员：颜鸣皋 621 所学位委员会主任 院士

621 所高级顾问教授

熊家炯 清华大学理学院副院长

现代应用物理系教授

赵稼祥 国防科工委军用新材料组组长 研究员

漆宗能 中国科学院化学所复合材料研究室主任

863 高技术新材料专家组成员 研究员

杜豪年 国防工业出版社 副编审

符 号 表

a —— 热扩散率 ($a = \lambda / \rho c_p$)；比例 因数；原子层间距；向心加 速度；原子直径	h —— 高度；普朗克(Planck)常 量；热交换系数
A —— 面积；振幅；常数	H —— 焓
b —— 蓄热系数，表示为 $b =$ $\sqrt{\lambda \rho c}$ ；比例因数，可用线 性回归方法确定	Ha —— 哈脱曼(Hartmann)数
B —— 枝晶形状系数；常数；两相 区液相流动控制参数；磁通 密度；磁感应强度	Δh —— 凝固潜热
c —— 质量热容；声速	Δh_z —— 折合凝固潜热，表示为 $\Delta h_z = \Delta h + c \Delta T'$
C_s —— 黑体辐射系数	ΔH —— 焓的变化
d —— 直径	I —— 励磁电流
D —— 溶质扩散系数；豪斯道夫维 数；形状系数	J —— 通量；电流密度
e —— 固相内部原子的结合键能	k —— 玻尔兹曼(Boltzmann)常 量；溶质分配因数；相似因 数
E —— 自由能；模数增大因数；比 值	K —— 液相渗透系数；常数
ΔE —— 自由能差值	l —— 长度；距离
f —— 活度因数；焦距；频率	m —— 液相线斜率；质量
f_0 —— 励磁电流频率	M —— 铸件模数
F —— 力；表面因数	Ma —— 马兰哥尼(Marangoni)数
Fo —— 傅里叶数，表示为 $Fo = \alpha \tau /$ l^2	n —— 转速
ΔF —— 相变驱动力	N —— 原子数量
g —— 重力加速度	N_A —— 阿佛加德罗(Avogadro)常 量
G —— 梯度；自由能	Nu —— 努塞尔(Nusselt)数
Gr_T —— 温度格拉晓夫数	Oh —— 奥尼索(Ohnesorge)数
Gr_C —— 溶质格拉晓夫数	p —— 压力；功率密度
	p_0 —— 标准大气压
	P —— 截面保温边长和散热边长 之比
	Pe —— 贝克莱(Peclet)数

Pr —— 普朗特(Plandtl)数(为液相运动粘度 ν 与热扩散率 a 之比,即 ν/a)	ϵ —— 冷却速率; 辐射率
q —— 热流密度; 偏析比; 变化率; 孔隙率	ϵ_r —— 绕组方向因子
Q —— 热量; 流量	γ —— 近邻原子数; 剪切速率
r —— 半径	Γ —— Gibbs-Thomson 系数(界面能 σ 和熔化熵 ΔS_f 之比, $\Gamma = \sigma/\Delta S_f$)
R —— 凝固界面推进速率(凝固速率,生长速率); 气体常数	η —— 动力粘度; 偏析率; 转化度
Re —— 雷诺(Reynolds)数	φ —— 体积分数; 热产生率
Ra —— 瑞利(Rayleigh)数	Φ —— 热流量
S —— 过热度与过冷度之比; 熵	κ —— 曲率
Sc —— 施密特(Schmidt)数	λ —— 间距; 热导率; 波长
T —— 热力学温度	$\bar{\lambda}$ —— 平均枝晶间距
T_M^A —— 纯溶剂的熔点	μ —— 化学位; 磁导率
ΔT —— 过冷度; 温度差	μ_0 —— 真空磁导率
ΔT_k —— 生长动力学过冷度	ν —— 运动粘度
ΔT_0 —— 合金凝固温度间隔	θ —— 接触角; 角度; 曲率过冷常数
u —— 形核率; 速度; 速率	θ_w —— 润湿角
V —— 体积	ρ —— 电阻率; 密度
v —— 体积分布函数	σ —— 界面能; 电导率
V_s^B —— 溶质原子在固相中的偏摩尔体积	τ —— 时间
$\Delta \bar{V}^B$ —— 偏摩尔体积的变化	ω —— 角速度; 角频率
W —— 湿度	
ΔW —— 临界形核功	下标
α —— Jackson 因子; 界面传热系数(经验参数,常通过实验确定); 角度; 膨胀系数	0 —— 初始值; 原始值; 平衡值
β —— 凝固收缩率; 角度	a —— 实际值; 非平衡值
δ —— 厚度	A —— 纯溶剂
	c —— 环境; 临界值; 铸件
	co —— 对流
	C —— 溶质浓度
	d —— 动量; 动力学
	e —— 平衡值

E——共晶	p ——等压值
g——气体	r——冒口；化学反应
g ——重力加速度	ra——辐射
G——超重力	S——固相
i——界面值	α ——初生 α 相
i ——组元	T ——热力学温度
j ——组元	V ——体积；等容值
l ——长度	∞ ——无穷大
L——液相	
m ——熔点	上标
m——合金液	L——液相
M——铸型	i ——组元
max——最大值	S——固相
min——最小值	*——界面值；临界值
op——开孔	'——非平衡
O——氧；氧化	上划线——平均值
p——颗粒；液滴	

目 录

前言

符号表

第 1 章 概论	1
1 凝固过程的研究对象	1
2 凝固过程的研究方法	4
3 凝固过程理论研究的进展	6
4 凝固技术	8
参考文献	10
第 2 章 凝固过程的基本原理	11
第 1 节 相图与凝固	11
1 二元合金的凝固方式	11
2 二元合金凝固过程的溶质再分配	13
3 多元合金的凝固	18
第 2 节 晶体的形核	21
1 均质形核的基本理论	21
2 异质形核	23
3 形核的影响因素与形核控制	24
第 3 节 晶体的长大	26
1 晶体的生长方式与生长速率	26
2 晶体生长形态	29
第 4 节 单相合金的凝固	30
1 单相合金凝固组织的表征与控制参数	30
2 凝固组织研究的新进展	34
第 5 节 共晶合金的凝固	36
1 规则共晶生长	37
2 共晶生长的其他问题	39

第 6 节 偏晶合金和包晶合金的凝固	46
1 偏晶合金的凝固	46
2 包晶合金的凝固	47
参考文献	48
第 3 章 凝固过程的传热、传质与液体流动	52
第 1 节 凝固过程的传热	52
1 传热条件与凝固方式	52
1.1 定向凝固过程	53
1.2 体积凝固过程	53
2 凝固过程传热的方式与特点	55
3 凝固过程传热的研究方法	57
4 温度场与凝固过程的分析	61
4.1 铸件凝固时间的确定	61
4.2 铸件传热条件的简化	63
第 2 节 凝固过程中的传质	64
1 凝固过程中的溶质平衡	64
2 传质过程的控制方程	65
3 平界面一维凝固过程溶质的扩散与再分配	67
4 枝晶凝固过程中的溶质传输	70
第 3 节 凝固过程的液体流动	75
1 凝固过程液体流动的分类	75
1.1 自然对流	75
1.2 强迫对流	76
1.3 亚传输过程引起的流动	76
2 凝固过程液相区的液体流动	77
3 液相流动对传热和传质过程的影响	79
4 液相区的对流对凝固组织的影响	81
5 枝晶凝固过程两相区中的液体流动	82
6 两相区内温度场、浓度场与流场的耦合	83
参考文献	89
第 4 章 铸件凝固组织控制	92
第 1 节 铸件凝固组织的形成	92

1 凝固条件与凝固方式	92
2 铸件的典型凝固组织与形成过程	93
3 等轴晶的形核	96
4 铸件典型凝固组织形态的控制	98
第 2 节 等轴晶的晶粒细化	98
1 添加晶粒细化剂法	100
2 动力学细化法	106
3 熔炼及浇注过程的温度控制	107
第 3 节 多相合金凝固过程的变质处理	109
第 4 节 凝固组织中的偏析及其控制	112
1 枝晶凝固组织中的微观偏析及其控制	112
2 定向凝固组织中的宏观偏析	114
3 铸锭中的宏观偏析	117
第 5 节 凝固收缩及凝固组织致密度的控制	121
1 凝固收缩率	121
2 缩松的形成与控制	124
3 强化补缩的方法——保温冒口与保温补贴	127
第 6 节 合金液的净化	132
1 合金液净化的主要方法	132
2 合金液过滤处理的基本方法和原理	132
3 泡沫陶瓷过滤片型内过滤的工艺设计	135
第 7 节 半固态金属的特性及半固态铸造	136
1 半固态金属的特性	137
2 连续搅拌对半固态金属凝固的影响	138
3 半固态铸造	140
第 8 节 部分凝固提纯技术	146
参考文献	149
第 5 章 定向凝固与单晶生长	155
第 1 节 定向凝固的理论基础	155
1 固液界面形态选择	155
1.1 成分过冷理论	155
1.2 绝对稳定理论	163

2 定向凝固时的枝晶生长	166
2.1 特征长度	166
2.2 等温界面下的枝晶生长	170
2.3 不等温界面的枝晶生长	172
第2节 非平衡凝固	185
1 分形理论的应用	188
2 微量元素对定向凝固的影响	195
3 超高温度梯度下的定向凝固	197
4 侧向约束下的定向凝固	201
5 对流下的定向凝固	202
第3节 定向凝固工艺	206
1 发热剂法(EP法)	206
2 功率降低法(PD法)	207
3 高速凝固法(HRS法)	208
4 液态金属冷却法(LMC法)	210
5 流态床冷却法(FBQ法)	212
6 区域熔化液态金属冷却法(ZMLMC法)	213
7 定向凝固过程的模拟	215
8 单晶制备	218
参考文献	219
第6章 快速凝固	227
第1节 实现快速凝固的条件及凝固特征	227
1 快速凝固方法	227
2 快速凝固的特征	230
第2节 快速凝固过程的动力学与热力学	231
1 单相合金快速凝固	231
2 共晶合金的快速凝固组织	236
3 亚稳定相与非晶态的形成	238
第3节 粉末材料快速凝固制备技术	244
1 液态合金液滴的形成与凝固	244
2 流体雾化法	248
2.1 亚音速气体雾化法	248

2.2	音速气体雾化法	253
2.3	超音速气体雾化法	254
2.4	水雾化法	255
3	离心雾化法	257
3.1	旋转电极法	257
3.2	旋转圆杯/盘法	259
第 4 节	低维材料的快速凝固	261
1	金属碎片的快速凝固	262
2	金属带材的快速凝固	264
2.1	单辊法	264
2.2	双辊法	268
2.3	溢流法	271
2.4	甩出法	272
2.5	复合夹层带材的快速凝固技术	273
3	线材的快速凝固	274
3.1	玻璃涂覆熔液纺绩法(Taylor 法)	276
3.2	合金液流注入液体冷却液法(Kavesh 法)	277
3.3	旋转水纺绩法	279
3.4	传送带法	280
第 5 节	体材料的快速凝固	281
1	液态金属深过冷法	281
1.1	熔融玻璃净化法	281
1.2	悬浮熔炼法	284
2	喷射沉积法	287
2.1	喷射沉积法的技术基础	288
2.2	喷射沉积法的工艺过程控制	290
第 6 节	激光表面处理技术	294
1	激光表面处理技术的发展	295
2	激光的辐射与吸收	297
3	材料表面的加热、熔化与快速凝固	298
4	激光表面熔凝处理工艺	300
	参考文献	303
第 7 章	连续铸造	309

第 1 节 连铸技术的发展	309
第 2 节 钢锭的连铸技术	310
1 钢锭连铸的基本方法与凝固特性	310
2 钢锭连铸工艺过程的控制环节	315
2.1 结晶器的结构设计	315
2.2 结晶器振动	315
2.3 连铸速率的控制	316
2.4 钢锭的弯曲与矫直	316
3 连铸钢锭凝固组织、缺陷及其形成原理	317
3.1 连铸钢锭的凝固过程与组织	317
3.2 连铸钢锭中的偏析	319
3.3 连铸钢锭的变形与裂纹	321
4 连铸钢锭凝固组织与缺陷的控制措施	322
4.1 控制凝固组织的化学方法	323
4.2 温度控制	323
4.3 浇注过程的控制	324
4.4 电磁搅拌技术	327
第 3 节 其他合金的连铸技术	329
1 铝合金的连续铸造	329
1.1 铝合金连铸过程的导热特性	330
1.2 凝固组织的控制	332
1.3 氧化夹渣的防止	335
2 其他合金的连铸	337
2.1 铜合金	337
2.2 金属间化合物及钛合金	338
2.3 铸铁	339
第 4 节 薄板的连铸技术	340
1 钢锭的液芯轧制	340
2 薄板连铸连轧技术	344
3 其他薄板连铸技术	347
3.1 单带激冷连铸技术	347
3.2 喷射沉积带材连铸技术	348

3.3 反铸造法	349
第 5 节 O. C. C. 连铸技术	350
1 O. C. C. 连铸技术的原理与特点	350
2 O. C. C. 连铸方法	353
3 O. C. C. 连铸的凝固过程与质量控制	360
3.1 O. C. C. 连铸过程传热条件的分析	360
3.2 凝固界面的控制	361
3.3 凝固组织的形成过程	362
参考文献	363
第 8 章 金属基复合材料制备中的凝固问题	366
第 1 节 复合材料的发展	366
第 2 节 长纤维增强金属基复合材料液相制备	369
1 增强纤维与基体材料的界面特性	370
1.1 界面特性对材料性能的影响	371
1.2 增强纤维与合金液的化学作用	372
1.3 合金液对纤维的润湿特性	374
1.4 纤维的保护与预处理	375
2 纤维预制体中合金液的浸渗过程	377
2.1 浸渗工艺	377
2.2 纤维预制体中孔隙结构的分析	379
2.3 合金液浸渗过程的动力学分析	381
2.4 合金液浸渗过程的热平衡	384
3 合金液在纤维预制体中的凝固过程	386
3.1 自由凝固	386
3.2 定向凝固	387
第 3 节 颗粒增强复合材料的制备	389
1 搅拌混合法制备技术	389
1.1 合金液与增强颗粒的界面特性	389
1.2 合金液与增强颗粒的搅拌混合	391
1.3 增强颗粒与合金液混合物的凝固	395
2 浸渗法制备技术	400
3 共喷射沉积法制备技术	401

3.1 基本方法	401
3.2 增强颗粒与合金液滴的相互作用	403
3.3 共喷射沉积复合材料的凝固特性	404
第4节 自生复合材料的凝固	405
1 固液相反应法自生复合材料制备技术	405
1.1 基本原理和方法	405
1.2 化学平衡条件的分析	406
1.3 化学反应动力学过程分析	407
2 自蔓延法复合材料制备技术	409
参考文献	413
第9章 特殊条件下的凝固	416
第1节 微重力凝固	416
1 重力引起的不完整性	416
2 Marangoni 对流	422
3 微重力条件下的过冷与形核	424
4 凝固时的对流效应	424
5 微重力下的定向凝固	427
6 难混溶液态合金的凝固	431
7 微重力研究设备	432
第2节 超重力凝固	435
1 重新层流化	436
2 超重力下的形核	441
第3节 电脉冲作用下的凝固特性	445
1 电脉冲驱动下的非平衡相变理论	445
2 电脉冲对合金组织结构的影响	447
第4节 电磁场中的凝固	450
1 三传效应的数学分析及数值模拟	451
1.1 流体流动下的传热数学模型	452
1.2 流体流动下的传质数学模型	453
1.3 流体流动下的动量传递数学模型	453
1.4 电磁离心铸造速度场的理论推导及计算结果	454
2 环境做功对溶质有效分配因数的影响	456