

21 世纪新材料科学与技术丛书

金属电磁凝固 原理与技术

张伟强 著

冶金工业出版社

21 世纪新材料科学与技术丛书

金属电磁凝固 原理与技术

张伟强 著

北 京

冶金工业出版社

2004

图书在版编目(CIP)数据

金属电磁凝固原理与技术/张伟强著. —北京:冶金工业出版社, 2004. 1

(21世纪新材料科学与技术丛书)

ISBN 7-5024-3398-8

I. 金… II. 张… III. 金属—凝固理论 IV. TG111.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 118066 号



出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100004)
责任编辑 刘小峰 美术编辑 李心 责任校对 刘文春 责任印制 牛晓波
北京鑫正大印刷有限公司印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销
2004 年 1 月第 1 版, 2004 年 1 月第 1 次印刷
850mm×1168mm 1/32; 6.25 印张; 166 千字; 188 页; 1-2000 册
20.00 元

冶金工业出版社发行部 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

(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,目前有些具有良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共享这些研究成果,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

凝固是几乎所有的金属材料制备过程中的必经阶段,也是材料成形技术中的一个重要组成部分。在材料凝固的过程中引入外加电磁场,对金属凝固过程产生显著影响,不仅有利于改善和控制凝固组织和成分分布,而且对于制备新材料也具有重要的意义。金属的电磁凝固技术融合了金属材料学、凝固学、流体动力学、电磁学等学科的内容,是现代材料加工技术中的一个重要分支。

自 20 世纪 50 年代起,电磁场就被应用于冶金过程,在金属的熔炼及冶金控制中发挥了重要的作用,尤其是电磁场在诸多方面对凝固过程产生的影响也被关注。在近三十年中,金属材料的电磁加工技术越来越受到国内外的广泛关注,并在金属电磁凝固理论研究中取得了重要成果,开发了多项金属电磁凝固技术,对丰富和发展金属的凝固理论以及推动开发新型材料及先进技术的进步都产生了积极的作用。但是,大多数的金属电磁凝固技术仍然停留在基础研究阶段,尚未在工业化生产中得到推广和应用。在近十年中,作者一直致力于电磁凝固技术的工艺方法与基础理

论研究,也取得了一些较为重要的成果。但到目前为止,国内外尚无关于这一领域的专著。因此,作者撰写此书,旨在以此来对作者所在的科研小组以及国内外其他科研小组的研究成果加以系统的总结,同时,也为各类电磁凝固技术在工业化生产中的应用做理论准备。

本书共分7章。第1章为概述;第2章为金属在电磁场中的流场和力场,这是一个有关磁流体动力学(MHD)的基本问题;第3章为液相流动对凝固过程的影响,从理论上介绍了液相流动引起的凝固组织和成分分布的改变;第4~7章分别介绍了在不同电磁场中金属的凝固技术的原理和由此对凝固过程产生的影响,包括金属在旋转磁场中、电磁离心凝固条件下、电磁振荡条件下的凝固,以及在单一的直流磁场和单一外加电场等条件下的凝固。作者在撰写本书过程中,不仅注意到了对各项技术原理的阐述,为读者提供一个有关电磁凝固技术的清晰思路,而且也注重了对研究结果进行详细的讨论。

作者诚挚感谢中国科学院金属研究所胡壮麒院士和杨院生研究员多年来对作者研究工作的指导,感谢时海芳副教授、王学东博士、付华萌博士、李虎田博士、肖莉博士、刘晴博士、孙越军硕士和裴延玲硕士等人的辛勤工作并为作者提供了部分图表及照片。辽宁省高校中青年骨干教师基金资助了本书的出版,在此一并表示谢意。

对于一个新兴的学术领域,有许多问题需要不断研究和深化,加之作者学识水平所限,难免有挂一漏万、失之偏颇之嫌,不当之处请读者予以批评指正。

张伟强

2003年11月于辽宁阜新

目 录

1 概述	(1)
1.1 凝固控制技术	(1)
1.2 材料电磁工艺	(2)
1.3 材料电磁工艺的基础理论	(4)
1.3.1 麦克斯韦方程组	(4)
1.3.2 欧姆定律和焦耳定律	(6)
1.3.3 磁流体动力学基本方程	(6)
1.4 金属电磁凝固技术	(10)
1.4.1 电场中的凝固技术	(10)
1.4.2 电磁成形	(10)
1.4.3 电磁力驱动熔体流动	(11)
1.4.4 电磁制动	(15)
1.4.5 电磁悬浮	(17)
1.4.6 电磁雾化	(18)
2 电磁场中金属熔体的流场和力场	(19)
2.1 旋转磁场中金属熔体的一维流 场和力场	(19)
2.2 电磁离心铸造二维稳态流场和 力场	(22)
2.2.1 熔体受力状态	(22)
2.2.2 流场数学模型及其求解 方法	(25)
2.2.3 流场特征及变化规律	(29)

2.2.4	力场的分布特征及变化规律·····	(35)
3	液相流动对凝固过程的影响·····	(43)
3.1	凝固过程中的液相流动及其对传热传质的影响·····	(43)
3.1.1	液相流动的类型·····	(43)
3.1.2	液态金属流动对传热、传质过程的影响·····	(44)
3.2	液相流动对凝固组织的影响·····	(44)
3.2.1	液相流动对宏观组织的影响·····	(44)
3.2.2	液相流动对显微组织的影响·····	(47)
3.3	液相流动对宏观成分偏析的影响·····	(50)
3.3.1	枝晶间对流和体积对流·····	(50)
3.3.2	成分偏析的数学模型·····	(51)
3.4	层片共晶生长的数值模拟·····	(54)
3.4.1	共晶生长理论研究概述·····	(54)
3.4.2	液相流动条件下层片共晶生长的数值模拟·····	(59)
3.4.3	液相流动条件下胞/枝晶间距的数值模拟·····	(75)
4	金属在旋转磁场中的凝固·····	(78)
4.1	旋转磁场对合金宏观组织的影响·····	(78)
4.2	电磁搅拌条件下凝固的铝合金枝晶组织·····	(81)
4.3	旋转磁场对 Al-CuAl ₂ 共晶组织的影响·····	(84)
4.4	旋转磁场对 Al-Si 合金中硅相生长的影响·····	(89)
4.5	旋转磁场中凝固的灰口铸铁组织和性能·····	(92)
4.5.1	凝固组织·····	(92)
4.5.2	冲击韧性·····	(94)
5	金属的电磁离心凝固·····	(96)
5.1	电磁离心凝固的宏观组织·····	(96)
5.1.1	常规离心凝固组织·····	(96)
5.1.2	磁场的影响·····	(98)
5.1.3	离心转速的影响·····	(102)

5.1.4	过热度的影响	(103)
5.1.5	水冷的影响	(104)
5.1.6	宏观组织的转变机制	(107)
5.2	铝合金电磁离心凝固的显微组织	(109)
5.2.1	Al-Cu 共晶合金	(109)
5.2.2	Al-Si 共晶合金	(115)
5.2.3	亚共晶合金的凝固	(120)
5.3	电磁离心凝固合金中的宏观成分偏析	(125)
5.4	电磁离心铸造金属基梯度功能复合材料	(132)
6	合金的电磁振荡凝固	(142)
6.1	电磁振荡凝固原理	(142)
6.1.1	电磁振荡凝固方法	(142)
6.1.2	电磁振荡力	(144)
6.1.3	空化效应	(146)
6.2	电磁振荡压力对金属凝固组织的影响	(148)
6.3	电磁振荡频率对凝固组织的影响	(155)
7	金属在电场及稳恒磁场中的凝固	(158)
7.1	金属在电场中的凝固	(158)
7.1.1	连续电场中金属的凝固组织	(158)
7.1.2	电场对金属凝固过程的影响机制	(162)
7.1.3	脉冲电场中的凝固	(166)
7.2	金属在稳恒磁场中的凝固	(170)
7.2.1	磁场的抑制对流作用	(170)
7.2.2	热电磁流体效应	(172)
符号表	(177)
参考文献	(181)

1 概 述

1.1 凝固控制技术

凝固是指从液态到固态的相变过程,自然界和工业生产中的很多过程中都存在凝固现象。凝固技术被广泛地应用于材料的制备和加工过程之中,如钢铁冶金、晶体生长、区域熔炼、铸造及焊接等诸多技术中都包含有凝固过程。凝固技术的发展,不仅使传统材料的潜力得到进一步挖掘,而且新工艺的出现为开发新材料提供了技术手段,如非晶态合金以及低维材料等均可通过凝固过程来获得。由于凝固过程直接关系到材料的组织特征、成分分布以及相关的物理、化学和力学性能,所以工业生产和科学研究中对凝固过程的研究与控制非常重视。

凝固包含了三个基本过程,即热量、质量和动量的传输。所谓凝固过程的控制亦即对上述三个基本过程的控制,通过调节和控制凝固过程中的传热、传质和动量传输的方式和速度,从而实现对材料凝固组织、成分分布和性能的控制。近些年来发展的金属凝固控制技术主要有如下几种:

- (1) 定向凝固技术:包括单向凝固、单晶生长技术等;
- (2) 快速凝固(冷却速度大于 $10^3\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$)和近快速凝固(冷却速度为 $10^2\sim 10^3\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$);
- (3) 利用特殊物理场控制的凝固技术:如压力场、微重力场、离心力场和电磁场中的凝固;
- (4) 控制对流条件下的凝固技术:如超声振动、电磁搅拌等。

近年来,人们还将上述几种凝固方法结合到一起,使凝固条件更趋于复杂。对复杂条件下凝固过程的研究,将为丰富和发展凝

固理论、扩大材料应用领域具有重要的意义。

1.2 材料电磁工艺

材料电磁工艺(Electromagnetic Processing of Materials, 简称 EPM)是指将电场或磁场引入到材料的制备或加工过程中,从而实现材料制备或加工过程和产品质量的控制及材料组织和性能的改善。

在 20 世纪初,就有人尝试利用磁场对液态金属进行搅拌以改善冶金组织^[1]。50 年代末和 60 年代初,随着连续铸钢技术的发展,人们将电磁搅拌技术应用于连铸过程之中,利用强制流体流动来控制凝固过程,将电磁场控制技术与冶金技术相结合,形成了电磁冶金技术。此后,人们开始对电磁场作用下流体的行为开展了一系列研究。到 80 年代初,在大量研究基础上,逐渐形成了“磁流体动力学(MHD)”这一新的学科分支。MHD 是建立在电磁场理论、流体力学和冶金学基础上的学科体系,它的诞生与发展引起了世界各国的广泛关注。1978 年,法国率先成立一个研究机构 MADYLAM;随后,1982 年 9 月在英国的剑桥大学由“国际理论力学和应用力学联合会(IUTAM)”主持召开了首届以“磁流体动力学在冶金中的应用”为主题的国际学术会议。“日本钢铁协会(The Iron and Steel Institute of Japan, 简称 ISIJ)”在 1985 年也成立了“电磁冶金”委员会。与此同时,美国及包括前苏联在内的欧洲许多国家也相继开展了这方面的研究工作,而且,电磁场应用于材料加工的领域也日益扩大。电磁场不仅被应用在金属材料的制备和加工中,也应用到非金属材料的制备和加工过程,并逐渐形成了一种新的材料制备与加工技术,被称为“材料电磁工艺”。1994 年,在日本名古屋召开了第一届电磁材料工艺国际会议,此后,每 3 年就召开一次这种会议来总结最新的研究成果。我国早在 20 世纪 60 年代初期即已经开始了电磁冶金的研究,特别是在 20 世纪 80 年代以后,我国的高等院校和研究单位也相继开展了这方面的工作,把电磁场引入到实际铸造生产过程中,同时对电磁铸造、

电场作用下的凝固、电磁搅拌和电磁离心铸造等新技术开展了研究。

经过近年的发展,材料电磁工艺已形成多学科交叉、工艺手段繁多及应用领域广泛的体系。所采用的电场或者磁场按照其特征可以分类如表 1-1 所示。有些工艺将电场或者磁场单独使用,而有些则使用多个磁场或者将电场和磁场同时引入。

表 1-1 电磁场的分类

电 场	磁 场
直流电场、交流电场	直流磁场、交变磁场
脉冲电场	固定磁场、移动磁场、旋转磁场

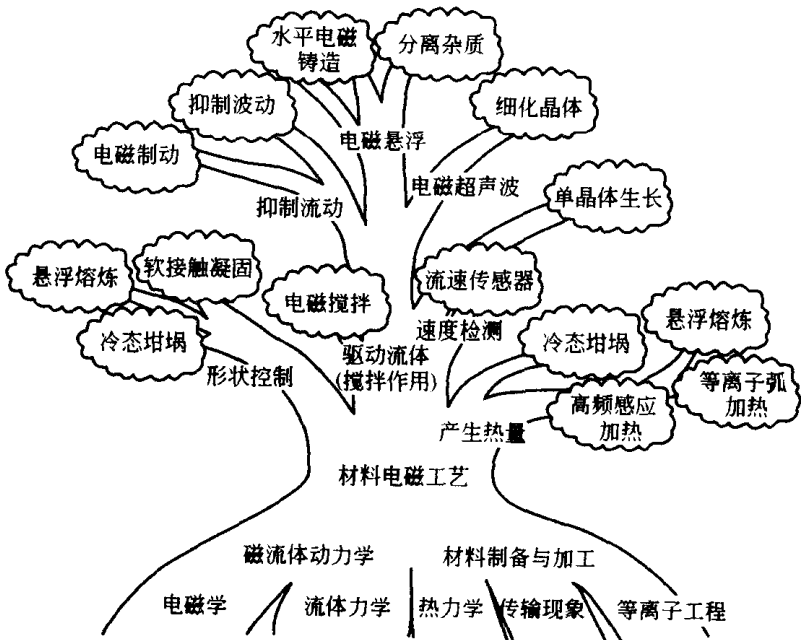


图 1-1 材料电磁工艺树(引自日本名古屋大学材料电磁加工实验室网站)

日本名古屋大学 S. Asai 教授在他所领导实验室的网页上登载了一个树状图,显示了材料电磁工艺的主要分支,如图 1-1 所示。

材料电磁工艺的科学基础包括电磁学、流体力学、热力学、传输和相变理论以及等离子体工程等领域。概括地说,材料电磁工艺中电磁场对材料的作用主要包括产生电磁力、产生热量以及对相变和传输过程的特殊作用(如电迁移等)。另外,材料电磁工艺的应用范围也非常广泛,不仅应用于液态材料的凝固过程,也应用于固态材料的加工过程。表 1-2 列出了材料电磁工艺中的常见技术。

表 1-2 常见的材料电磁工艺

基本原理	对材料的作用	工 艺
产生电磁力	形状控制	软接触凝固、悬浮熔炼、冷态坩埚等
	驱动流体	电磁搅拌、电磁离心铸造
	抑制对流	电磁制动、抑制波动
	悬 浮	水平电磁铸造、夹杂物的分离
	振 荡	电磁振荡凝固
	雾 化	电磁雾化
产生焦耳热	加 热	冷态坩埚、悬浮熔炼、感应加热、等离子体加热等
楞次定律	速度检测	速度传感器
改变相变与质量传输过程的自由能	改变组织和扩散速率	脉冲电场凝固、电场退火、磁场淬火等

1.3 材料电磁工艺的基础理论

材料电磁工艺的理论基础主要包括了电磁学、流体力学、热力学和相变理论。电磁场不仅对材料产生电磁力,而且在材料内部生成焦耳热;同时还会影响到热量、质量和动量的传输过程。

1.3.1 麦克斯韦方程组

麦克斯韦方程组全面地总结了电磁场的基本规律,是宏观电

动力学的基本方程,也是材料电磁工艺的基本方程之一,其一般的微分形式为:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho_f \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 \mathbf{H} ——磁场强度(矢量);
 \mathbf{D} ——电位移(矢量);
 \mathbf{E} ——电场强度(矢量);
 \mathbf{j} ——传导电流密度(矢量);
 \mathbf{B} ——磁通密度(矢量);
 ρ_f ——自由电荷体密度(标量);
 t ——时间。

麦克斯韦方程组的微分形式只适用于场强连续变化的空间,而在不同介质的分界面上,介质的电磁学特性发生突变,某些场量也发生突变,则微分形式的方程组变得没有意义。将高斯散度定理和斯托克斯定理应用于麦克斯韦方程组的微分形式后,即可得到方程组的积分形式如下:

$$\left. \begin{aligned} \oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} &= \int_s \left(\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S} \\ \oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} &= -\int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \\ \oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} &= 0 \\ \oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} &= \int_v \rho_f dV \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

其中, l 、 S 和 V 分别表示线矢量、面矢量和体积。

1.3.2 欧姆定律和焦耳定律

电流必须在一定的电位差下产生。在稳恒条件下,导体中的电流强度与导体两端电位差成正比,即:

$$I = \frac{U}{\tilde{R}} \quad (1-3)$$

这一结论称为欧姆定律的积分形式。式中, \tilde{R} 为导体的电阻(单位为 Ω), 取决于导体材料性质及其几何形状。

因为电荷的流动是由电场驱动的, 所以电流场的分布特征和电场分布密切相关。由于电流密度矢量 \mathbf{j} 与电场 \mathbf{E} 方向一致, 所以欧姆定律可以改写成矢量表达式为:

$$\mathbf{j} = \sigma_e \mathbf{E} \quad (1-4)$$

式中 σ_e ——材料的电导率, $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

对于在磁场 \mathbf{B} 中以速度 \mathbf{v} 运动的导体来说, 还存在一感生电动势, 因此, 欧姆定律的形式为:

$$\mathbf{j} = \sigma_e (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1-5)$$

电流通过一段电路时, 电场力对电荷做功, 如果电位能转化成热能, 即产生焦耳热效应。若电路两端电压为 U , 电流强度 I , 电阻值为 \tilde{R} , 则产生的焦耳热(Q)为:

$$Q = UI t = \frac{U^2}{\tilde{R}} t = I^2 \tilde{R} t \quad (1-6)$$

这是焦耳定律的积分形式。

热功率密度表示在电流场中任一点处单位体积内的热功率, 即在单位时间内电流在导体单位体积中所产生的热量。根据焦耳定律的微分形式, 得到热功率密度 p_h (W/m^2) 的矢量形式为:

$$p_h = \mathbf{E} \cdot \mathbf{j} \quad (1-7)$$

这是焦耳定律的微分形式。

1.3.3 磁流体动力学基本方程

磁流体动力学的理论模型将电磁学的基本方程和流体力学、

热力学方程结合在一起,因而其数学表达式相当复杂,在绝大多数情况下都予以简化处理。对于金属材料来说,一般作如下假设以使问题得到简化^[2]:

- (1) 金属熔体为不可压缩流体;
- (2) 磁场处于准稳态;
- (3) 流体无极性;
- (4) 除焦耳热外无其他内热源;
- (5) 忽略位移电流;
- (6) 流体呈电中性;
- (7) 物性参数为常数。

根据上述假设,麦克斯韦方程组简化成以下形式:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{j} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{j} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

此外,电位移矢量和磁通密度电流密度矢量也相应分别近似表示为:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D} &= \epsilon_e \mathbf{E} \\ \mathbf{B} &= \mu_p \mathbf{H} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

式中 ϵ_e ——介电系数;

μ_p ——磁导率。

流场的基础方程为纳维—斯托克斯(Navier-Stokes)方程,当流体的黏度系数与温度无关时,动量守恒方程可表示为:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \nabla p = \mu_v \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f}_b \quad (1-10)$$

式中 ρ ——流体的密度;

μ_v ——流体的动力学黏度;

\mathbf{v} ——流体流动速度矢量;