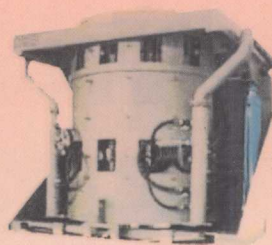
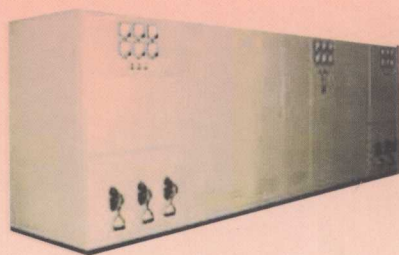


电磁冶金技术及装备

韩至成 等编著

EPM Equipment



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

电磁冶金技术及装备

韩至成 等编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2008

内 容 简 介

全书共分 11 章, 内容包括: 电磁冶金技术概论; 感应熔炼技术及其装备; 中频感应炉及其电源的使用与维护; 感应炉熔炼的基本原理及其工艺技术; 真空感应炉; 液态金属的电磁处理; 电磁搅拌及其装置; 电磁铸造; 冷坩埚感应熔配技术; 电磁感应加热; 电磁冶金技术在资源综合利用与环境保护方面的应用。书中反映了近年来国内外电磁冶金技术及其装备的研究与应用成果。

本书可以作为高等院校冶金、材料加工专业以及机电一体化专业本科生、硕士研究生的教学参考书, 也可供相关领域的科研、生产及设计人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电磁冶金技术及装备/韩至成等编著. —北京: 冶金工业出版社, 2008. 7

ISBN 978-7-5024-4466-2

I. 电… II. 韩… III. 电磁流体力学—应用—冶金
IV. TF19

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 097468 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 程志宏 美术编辑 张媛媛 版式设计 葛新霞

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4466-2

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2008 年 7 月第 1 版, 2008 年 7 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 28.75 印张; 560 千字; 443 页; 1-3000 册

76.00 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

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

《电磁冶金技术及装备》

编 委 会

主 编 韩至成

副 主 编 朱兴发 郭景杰

委 员 (以姓氏笔画为序)

丁宏升 王中然 朱兴发 刘 明 齐延章

陆 钧 杨院生 赵秀珍 郭景杰 韩至成

工作人员 何晓瑜 濮伟国

序

电磁冶金即材料的电磁处理 (EPM), 是借助于电流与磁场所形成的电磁力对材料加工处理过程中的表面形态、流动和传质等施加影响, 以便有效地控制其变化和反应过程, 改善材料的表面质量和组织结构的技术。由于电磁力可以通过不直接接触的方式传递到金属材料的内部, 避免了大气和炉衬材料对金属在冶炼中的二次氧化, 也由于电磁能量是一种清洁的能源, 较少污染环境, 所以电磁冶金被认为是 21 世纪冶金技术发展的重要方向之一。

EPM 具有多方面的功能, 其中包括板形控制功能、流动控制功能、悬浮控制功能、雾化功能、电磁感应热生成功能、精炼功能、凝固组织控制功能、高能密集发生功能以及检测功能等, 因此它的实际应用范围极其广泛。就当前国内外 EPM 技术发展而言, EPM 的发展大致分为三种情况: (1) 已广泛应用于工业化生产或正在工业化生产中得到初步应用, 其技术及其装备水平均较成熟或趋于成熟, 并朝着更高的水平方向发展; (2) 已经进行了实验室或完成了小型工业实验装置的开发与研究, 为工业化生产奠定了相当的基础; (3) 已经有系统地或开始进行了某些领域基础理论方面的研究并已取得重要成果。

《电磁冶金技术及装备》一书从 EPM 技术及其装备两个方面对电磁冶金进行较全面的阐述。全书共分为 11 章, 分别对 EPM 的分类发展过程与方向、电磁感应炉、电磁搅拌、电磁铸造、液态金属的电磁处理、冷坩埚感应熔配技术以及钢坯的感应加热与热处理、电磁冶金在资源领域综合利用与环保方面应用等内容进行较为详细的阐述。

该书的出版将会对我国冶金材料加工专业以及机电一体化专业的

大学生、研究生的教育起到积极的推动作用，同样也会对推动我国 EPM 技术的发展以及装备水平的提高有着较深远的意义。

由于 EPM 技术涉及的范围极其广泛，内容覆盖面宽，该书还不可能将电磁冶金的所有方面内容论述清楚，而且有些研究开发工作仍在进行之中，尚有待进一步总结。

我国现在已成为世界钢铁生产大国和有色金属（十种有色金属）工业的世界生产大国，而且是名副其实的铸件制造业大国，但还称不上世界钢铁和有色金属及铸造业强国。为了成为世界一流的冶金和材料工业强国，推广应用先进技术是十分必要的。推广应用先进的 EPM 技术与提高其装备水平，不仅出于节约资源，减少环境污染的考虑，也是为了使我国材料及制造业更好地满足航空工业、国防工业及民用工业，如汽车等行业对多品种高质量材料的迫切需求。

总之，按照科学发展观的要求，为了促进我国国民经济可持续健康地向前发展，深入开展对 EPM 技术的研究与开发是十分必要的。通过人们的共同努力，EPM 技术及其装备水平将会提到一个新的高度。

中国工程院院士

傅维志

前 言

自 1982 年 9 月由国际理论力学和应用力学协会主持，在英国剑桥大学召开首次磁流体力学在冶金中应用的国际会议以来，被称为 EPM 的技术及其装备有了重大的发展。这些发展首先体现在基础理论的研究方面，例如对电磁热流体力学的基础理论的探讨、在电磁场作用下金属的成形与凝固的基础理论、金属悬浮冶金的基础理论以及金属液的电磁处理和电磁净化理论等。在这些理论指导下，人们通过艰苦且富有成效的实践，研究开发了多种工业生产技术，这对于改善金属材料的质量，提高冶金设备水平起到了十分重要的作用。

本书作者在认真总结近年来国内外 EPM 技术已取得重要成果的基础上，曾于 2001 年出版了《电磁冶金学》一书，本书的编写则是《电磁冶金学》一书的延续与拓展，书中从 EPM 技术及其装备两个方面对电磁冶金技术进行了较全面的阐述。作者试图将这两个方面相互渗透、相互结合，使读者不仅了解关于 EPM 的有关技术，而且对所采用的装备及生产过程也能有所了解。

本书共分为 11 章，分别讲述电磁冶金技术概论；感应熔炼技术及其装备；中频感应炉及其电源的使用与维护；感应炉熔炼的基本原理及其工艺技术；真空感应炉；液态金属的电磁处理；电磁搅拌及其装置；电磁铸造；冷坩埚感应熔配技术；连铸钢坯及钢坯、钢管的电磁感应加热和热处理；电磁冶金技术在资源综合利用和环保等方面的应用。

第 1 章由韩至成编写，第 2~4 章除高次谐波治理由齐延章编写、中频炉感应圈计算由陆钧编写、8t 中频炉熔化各类合金的要点及设备

维修部分由刘明编写之外,其余部分由韩至成编写。第5章真空感应炉的真空设备由王中然编写,其中的冶金物理化学部分由赵秀珍编写,其余部分由韩至成编写,在第5章的编写过程中曾得到董世民和陈锺两位工程师的帮助。第6~8章中电磁离心铸造内容由杨院生编写,其余部分由韩至成编写,第9章由丁宏升编写,第10~11章由韩至成编写。本书内容基本上涵盖了EPM多方面的重要功能和基本理论与实际应用方面的主要成果。

本书可作为大专院校冶金材料及机电一体化专业本科生、研究生的参考书籍,也可供这些专业的工程技术人员及设计人员参考。

在编写本书过程中,作者曾得到业内各界多方面的支持与帮助,并参阅了大量的书籍和论文,在此作者谨向文献的作者表示谢忱。

本书得到了中国工程院院士傅恒志的肯定和热情的帮助。北京科技大学曲英教授以及上海大学任忠鸣教授审阅了全书,并提出了许多宝贵的修改意见,作者从中受益匪浅,并向他们表示衷心感谢。

由于水平所限,不当之处,敬请广大读者批评、指正。

编著者
2008年1月

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
钢材的控制轧制和控制冷却 (高)	王有铭	29.00
金属力学性能检验人员培训教材	林际熙	30.00
解读质量管理	那宝魁	35.00
炼焦煤性质与高炉焦炭质量	周师庸	29.00
金银精炼技术和质量监督手册	宋之代	49.00
负压实型铸造及铸件质量	马幼平	29.00
铅锌质量技术监督手册	杨丽娟	80.00
中国冶金质量认证企业大全		120.00
连铸坯质量 (第2版)	卢盛意	24.00
现代汽车板的质量控制与成形性	康永林	25.00
钢铁材料中的第二相	雍岐龙	75.00
材料成形工艺学 (高)	齐克敏	69.00
轧制测试技术	喻廷信	32.00
金属塑性加工学——轧制理论与工艺 (第2版)	王廷溥	39.00
现代钢管轧制与工具设计原理	李国祯	56.00
轧制过程自动化 (第2版)	丁修堃	59.00
金属塑性变形与轧制理论 (第2版)	赵志业	35.00
特种轧制设备	周存龙	28.00
轧制工程学 (高)	康永林	32.00

目 录

1 电磁冶金技术概论	1
1.1 电磁冶金技术分类	1
1.2 电磁冶金技术及装备在国内外发展概况	3
1.3 电磁冶金技术特点及开发前景	9
1.3.1 电磁冶金技术的实际应用	10
1.3.2 电磁冶金技术的研究与开发	11
1.3.3 理论基础的研究	11
1.3.4 开发前景	12
2 感应熔炼技术及其装备	14
2.1 感应炉概述	14
2.1.1 工频感应炉	14
2.1.2 中频感应炉	14
2.1.3 高频感应炉	15
2.1.4 其他类型感应炉	15
2.2 感应炉熔炼的基本原理	16
2.2.1 电磁感应加热的基本原理	16
2.2.2 涡流	18
2.3 晶闸管中频电源	26
2.3.1 中频电源的电路组成	26
2.3.2 一拖二串联电路与一拖一并联电路的比较	27
2.3.3 无功补偿及谐波滤波装置	31
2.4 PLC 程控器、液晶屏幕显示	35
2.5 中频炉炉体结构及其配套装置	42
2.5.1 炉壳	42
2.5.2 倾炉机构 (含炉盖的移动)	42
2.5.3 感应圈	44
2.5.4 磁轭	48

2.5.5 炉衬厚度检测装置	49
2.5.6 水冷电缆	51
2.5.7 液压装置	52
2.5.8 炉衬快速顶出机构	53
2.5.9 水冷却系统	53
2.5.10 中频炉侧排烟装置	62
2.6 中频感应炉功率、频率及其他参数	63
2.7 中频感应炉成套设备布置案例	66
2.7.1 8t/5000kW 中频炉成套设备布置	66
2.7.2 5t (一拖二) DX-2800kW 中频炉成套设备布置	66
3 中频感应炉及其电源的使用与维护	69
3.1 中频感应炉炉衬坩埚的使用与维护	69
3.1.1 坩埚的材质及其分类	69
3.1.2 感应炉坩埚对耐火材料的要求	70
3.1.3 感应炉坩埚用耐火材料的实际案例	70
3.1.4 炉衬的打结与使用	75
3.2 中频感应炉水冷系统的使用与维护	80
3.3 电源及电气设备的使用与维护	82
3.3.1 各种常见故障及其处理	82
3.3.2 检修时安全注意事项	92
3.3.3 电气设备安全	92
3.3.4 电压测量	93
3.3.5 电气器械和测试用具的接地	93
3.4 电源及电气设备使用与维护案例	94
3.4.1 中频炉电气设备配置	94
3.4.2 电器日常检查内容	95
3.4.3 电器检修和基本维护	95
3.4.4 晶闸管中频炉电器检修及特殊维护	95
3.4.5 晶闸管中频炉电气的完好标准	96
3.4.6 晶闸管中频炉电器检修和使用注意事项	96
3.4.7 绝缘电阻的要求	96
3.4.8 开机、冶炼过程中中频电源操作标准	96
3.4.9 停机标准	98
3.4.10 中频电源专业检查流程	98

3.4.11 中频炉主控板电位器的调节、整定	101
3.4.12 中频炉主控板的调整及注意事项	101
3.5 中频电源经常出现的故障与解决方案实例	102
4 感应炉熔炼的基本原理及其工艺技术	107
4.1 感应炉熔炼的基本特点	107
4.2 感应熔炼过程中元素的氧化与脱氧	108
4.2.1 元素的氧化与脱氧的基本原理	108
4.2.2 各种脱氧方法的基本特点	110
4.2.3 各元素单独脱氧和复合脱氧的特点	111
4.2.4 脱氧反应动力学	117
4.2.5 凝固时的二次脱氧	124
4.3 钢中非金属夹杂物	125
4.3.1 钢中非金属夹杂物分类及存在形态	125
4.3.2 非金属夹杂物对钢性能的影响	129
4.3.3 脱氧过程氧及其夹杂物变化的规律	131
4.3.4 提高钢清洁度的主要方向	133
4.4 钢中气体	135
4.4.1 钢中的氮	136
4.4.2 钢中的氢	140
4.5 钢的感应熔炼基本要点	144
4.5.1 炉衬的选择	144
4.5.2 炉料	144
4.5.3 装料和熔化	144
4.5.4 精炼和脱氧	145
4.6 钢及有色金属感应炉熔炼案例	146
4.6.1 中频炉与其他熔炼炉配合冶炼工艺流程	146
4.6.2 中频炉与 AOD 炉配合生产不锈钢	148
4.6.3 铜及铜合金感应炉的熔炼	150
4.6.4 铝及其合金的感应炉熔炼	156
4.6.5 铝液中的气体及其净化	158
4.6.6 感应炉熔铸铝合金要点	160
4.6.7 银及其合金的感应炉熔炼	162
5 真空感应炉	164
5.1 概述	164

5.1.1	真空感应炉的发展状况	165
5.1.2	真空感应炉的组成与分类	167
5.1.3	真空感应炉中计算机技术的应用	169
5.2	真空感应炉装备	170
5.2.1	真空泵的分类	170
5.2.2	真空泵性能参数	172
5.2.3	真空泵在真空系统中承担的任务及使用范围	172
5.2.4	几种真空泵的工作原理及特点	174
5.2.5	真空感应炉的真空机组	179
5.2.6	真空泵的工作及使用中应注意的问题	182
5.3	真空密封与检漏	184
5.3.1	真空密封	184
5.3.2	真空检漏	187
5.4	真空冶金物理化学	189
5.4.1	真空脱气	189
5.4.2	真空脱氧	191
5.4.3	真空下脱碳	194
5.4.4	真空处理时钢液与耐火材料、非金属夹杂物的反应	195
5.4.5	金属的蒸发反应和真空蒸馏技术	198
5.5	真空感应炉的熔炼和浇铸	202
5.5.1	炉料和装料	203
5.5.2	熔化	203
5.5.3	精炼	204
5.5.4	浇注	205
5.6	多功能真空感应炉	206
5.6.1	国内外多功能真空感应炉发展情况	206
5.6.2	多功能真空感应炉的技术要素	208
5.6.3	多功能真空感应炉的开发目的与意义	208
6	液态金属的电磁处理	210
6.1	电磁泵	210
6.1.1	电磁泵的分类及其基本原理	210
6.1.2	选择或设计电磁泵考虑的基本因素	217
6.1.3	螺旋转子电磁泵的结构及其设计	222
6.2	电磁制动	237

6.3 液态金属电磁封闭	242
6.3.1 电磁封闭阀	243
6.3.2 双辊薄带连铸侧封	244
6.4 液态金属的电磁净化	247
6.4.1 电磁净化简介	247
6.4.2 液态金属电磁净化的工艺	248
7 电磁搅拌及其装置	254
7.1 概述	254
7.2 电磁搅拌装置工作原理及其类型	256
7.2.1 工作原理	256
7.2.2 装置的基本类型	258
7.2.3 电磁搅拌器 (EMS) 的型号及其含义	259
7.3 熔炼炉的电磁搅拌	263
7.3.1 铝熔炼炉中的电磁搅拌	263
7.3.2 电弧炼钢炉中的电磁搅拌	269
7.3.3 感应炉中的电磁搅拌	272
7.4 精炼过程电磁搅拌	273
7.4.1 钢包的电磁搅拌	273
7.4.2 ASEA-SKF 钢包精炼炉	274
7.5 钢凝固过程中的电磁搅拌	276
7.5.1 钢的连铸技术和电磁搅拌的应用	276
7.5.2 电磁搅拌器的安装位置	278
7.5.3 搅拌强度与搅拌时间	283
7.5.4 方坯和小方坯连铸的电磁搅拌实例	284
7.5.5 圆铸坯的电磁搅拌	285
7.5.6 板坯的电磁搅拌	285
8 电磁铸造	289
8.1 铝合金的电磁铸造	289
8.1.1 铝合金电磁铸造原理	290
8.1.2 电磁铸造装置	296
8.1.3 电磁结晶器的设计	303
8.1.4 熔融金属液面及液固界面的检测	309
8.1.5 计算机自动控制系统	314

8.1.6	电磁铸造工艺	318
8.1.7	电磁铸造的铸锭质量及缺陷的防止	320
8.2	铜及其合金的电磁铸造简介	331
8.3	钢的电磁连铸软接触技术	333
8.3.1	有模电磁连铸(电磁软接触)基本原理与特点	335
8.3.2	软接触电磁连铸技术的主要冶金效果	336
8.3.3	电磁软接触连铸结晶器结构	337
8.3.4	电磁场作用下的结晶器内弯月面的行为	341
8.3.5	软接触电磁连铸磁场的施加方式	341
8.3.6	我国宝钢电磁连铸工业装置的实验概况	343
8.4	电磁离心铸造	345
8.4.1	概论	345
8.4.2	电磁离心铸造设备和原理	347
8.4.3	电磁离心铸造过程中的液态金属流动和传热传质	347
8.4.4	电磁离心铸造的组织 and 性能	356
8.4.5	电磁离心铸造的工业应用	364
9	冷坩埚感应熔配技术	369
9.1	概述	369
9.2	冷坩埚感应熔配原理	371
9.2.1	冷坩埚感应熔配过程分析	371
9.2.2	冷坩埚电热性能的影响因素	384
9.3	冷坩埚感应熔配技术基础	388
9.3.1	合金熔体的温度场变化	388
9.3.2	合金熔体的成分变化	395
9.3.3	合金熔体的杂质间隙元素控制	400
9.4	钛基合金的冷坩埚感应熔配技术	404
9.4.1	典型冷坩埚熔炼设备	404
9.4.2	钛合金的熔配	406
9.4.3	钛铝金属间化合物的熔配	407
9.5	多晶硅的冷坩埚连铸	410
9.6	冷坩埚感应熔配技术的其他应用	414
9.6.1	陶瓷材料的冷坩埚熔化	414
9.6.2	金属粉末的冷坩埚雾化沉积	415

10 连铸钢坯热直接轧制与中间包钢液电磁感应加热	418
10.1 连铸坯直接热轧 (CC-HDR)	418
10.1.1 装置的加热电源	419
10.1.2 感应加热频率的选择	421
10.1.3 功率的选择	421
10.1.4 线圈结构	421
10.1.5 温度检测、调整及其控制系统	422
10.1.6 中频电磁感应加热装置 PLC 故障报警系统	422
10.2 钢坯感应加热举例	423
10.3 连铸中间包钢液电磁感应加热	425
10.3.1 概述	425
10.3.2 连铸中间包钢液电磁感应加热装置	425
10.4 钢管中频感应加热热处理技术简介	428
11 电磁冶金技术在资源综合利用与环境保护方面的应用与研究	431
11.1 富锰渣电磁处理技术及综合利用	431
11.1.1 概述	431
11.1.2 研究内容简介	432
11.2 电磁冶金技术在环境保护方面的应用与研究	439
参考文献	441

1 电磁冶金技术概论

1.1 电磁冶金技术分类

电磁冶金是以电磁热流体力学理论为基础,研究冶金过程和材料制造的新兴工程学科。众所周知,电磁热流体力学是电磁学、热力学和流体力学这三个领域相互交叉的学科。如图 1-1 所示,流体与热、流体与电磁、热与电磁之间相互作用及关系构成了电磁冶金学这个学科。

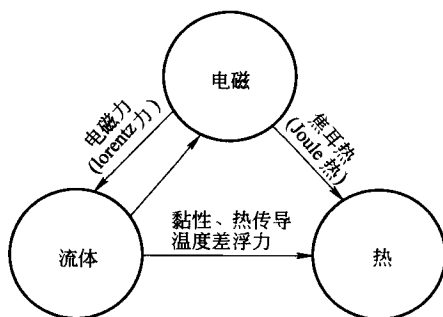


图 1-1 流体、热、电磁场的相互关系

电磁冶金技术则是以电磁热流体力学理论为指导,对各类材料进行制取、凝固、成形、处理的新型工程技术。如果磁能密度远大于电能密度时,电磁流体力学就可称为磁流体力学;相反,如果电能密度远大于磁能密度时就可称为电流体力学。由于在冶金过程中,通过金属导体的电场强度 E 、电位移 D 远小于磁场强度 B 和磁感应强度 H 所起的作用,即电能远小于磁能,故电磁冶金技术属于磁流体力学在冶金及材料制造过程中的应用范围。磁流体力学应用于冶金生产有一个发展过程,大致经历了孕育期、开始应用期以及蓬勃发展期三个阶段。磁流体力学之所以能在多种冶金过程中得到广泛应用与发展,一方面是由于熔融金属为电的良好导体,能因磁场和电流的作用而产生电磁力,利用电磁力可以对熔融金属进行非接触性搅拌、输送和形状控制,而这比机械手段更为有利;另一方面它有利于改善环境、节省投资、提高冶金企业的产品质量与经济效益。

电磁冶金技术按材料处理的各种功能分类,如图 1-2 所示。