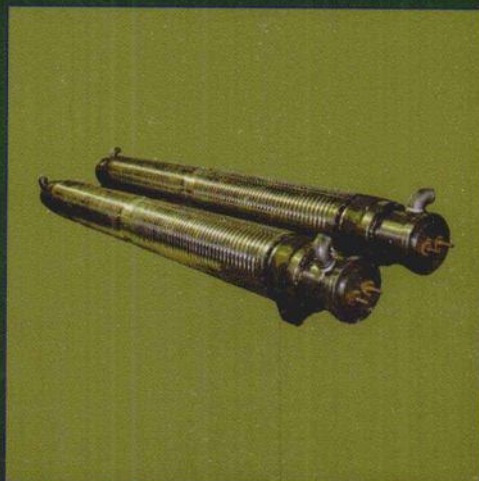
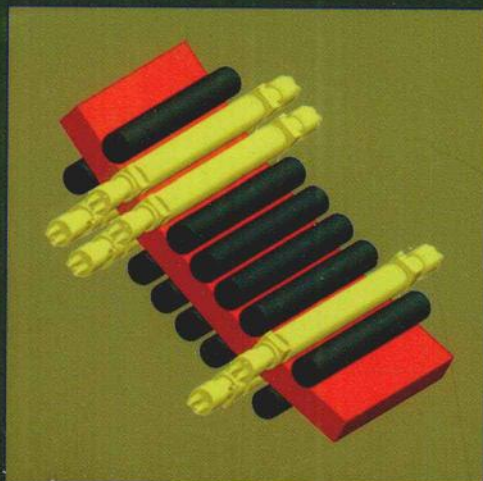


连续铸钢用电磁搅拌的 理论与技术

Theory and Technology of Electromagnetic Stirring for Continuous Casting

毛 斌 张桂芳 李爱武 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

连续铸钢用电磁搅拌的 理论与技术

毛 斌 张桂芳 李爱武 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2012

内 容 提 要

本书分 11 章, 内容包括: 连铸电磁搅拌技术的磁流体力学基础和冶金原理、连铸电磁搅拌的数值模拟、方(圆)坯、板坯连铸结晶器电磁搅拌技术、二冷区和凝固末端电磁搅拌技术、连铸中间包电磁冶金技术以及连铸电磁搅拌系统的配置实例。本书既是连铸电磁搅拌理论和技术的总结, 也是电磁搅拌技术应用和制造的提升, 全面地体现了我国电磁搅拌技术的科研水平与应用技术, 同时对国内外冶金研究热点与难点课题进行了介绍。

本书可作为钢铁企业、研究设计院所的工程技术人员、生产管理人员、设备制造人员以及相关专业教学人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

连续铸钢用电磁搅拌的理论与技术/毛斌, 张桂芳, 李爱武编著.
—北京: 冶金工业出版社, 2012. 1

ISBN 978-7-5024-5806-5

I. ①连… II. ①毛… ②张… ③李… III. ①连续铸钢—电磁
振荡 IV. ①TF777

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 281604 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 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 刘小峰 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5806-5

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销

2012 年 1 月第 1 版, 2012 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 24.25 印张; 583 千字; 369 页

69.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

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(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

序

电磁搅拌装置是国际上先进钢铁企业生产高附加值产品必不可少的特殊冶金装备,电磁搅拌技术已逐渐成为高效连铸生产过程中提高铸坯质量、稳定操作、扩大品种范围的一项重要技术手段。

经过改革开放30年的高速发展,我国钢产量已居世界首位,连铸比也已进入世界先进行列,与此同时,我国电磁搅拌技术也取得了长足的进步和发展。在电磁搅拌技术的研发创新、工业应用和设计制造方面,我国科研院所、高等院校、钢铁企业、设备制造企业共同努力,使我国连铸电磁搅拌技术达到了国际先进水平。

在连铸生产过程中,电磁搅拌技术借助电磁力来改变和控制铸坯的凝固过程,进而改善连铸坯以至最终产品的质量,其冶金效果与多种因素有关,包括连铸钢种、铸坯断面、钢水过热度、拉速、搅拌位置、搅拌强度、搅拌方式和电源频率等。因此,连铸电磁搅拌技术是电磁学和钢铁冶金学的技术融合,是一项与连铸设备及工艺密切相关的系统工程。

本书主要作者毛斌教授从20世纪80年代初开始就致力于连铸电磁搅拌技术的研发和推广工作,用技术支持了国内大多数连铸电磁搅拌器制造企业和应用单位,在学术期刊和连铸技术著作、手册中撰写电磁搅拌文章,并在多次连铸电磁搅拌技术专题学习班上讲授电磁搅拌知识,为推动我国连铸电磁搅拌技术的普及与提高做了大量卓有成效的工作。

本书总结了作者近30年从事连铸电磁搅拌理论研究和工业实践的心得体会,书中深入浅出地阐述了电磁作用机理和连铸冶金机理,详细分析了各种电磁搅拌技术在不同连铸机型和不同位置对不同钢种的应用特点和冶金效果,同时还包含科研院所、高等院校、钢铁企业对连铸电磁搅拌数值模拟、实验研究和工业应用的成果,以及设备制造企业介绍的电磁搅拌配置实例。该著作比较全面地反映我国连铸电磁搅拌技术的理论、科研、应用、设计与创新水平,为电磁搅拌技术的工程应用提供了借鉴和思路。

本书的出版,使读者学习到电磁搅拌知识和冶金机理,从应用案例中得到启发,可以更好地认知电磁搅拌技术,进而推进中国钢铁工业的发展和进步。

中国工程院院士



2011年11月

前 言

连铸电磁搅拌技术对提高连铸坯质量、稳定操作、扩大品种范围等均起到了独特的、不可替代的作用，因而越来越受到连铸界的重视。目前，连铸电磁搅拌技术已成为改善连铸坯质量的重要手段，电磁搅拌器也成为连铸机的规范配置。

我国连铸电磁搅拌技术的发展历程大致经历三个发展阶段：第一阶段从20世纪70年代末到80年代中，是实验室研发阶段；第二阶段从20世纪80年代末至90年代末，是引进技术的消化、吸收和再开发阶段；第三阶段从21世纪初至今，是提高和创新阶段。

目前，国产电磁搅拌成套装置在国内市场已占主导地位，达到90%以上的市场份额，并开始参与国际市场的竞争。与此同时，各家钢厂和科研院所在不同机型、不同位置、不同断面和不同钢种的连铸实践中，广泛采用电磁搅拌技术并进行多批次的在线工业试验，得到很多优化的电磁搅拌工艺参数和高水平的应用成果，不仅提高了我国电磁搅拌技术的工业应用水平，而且为各家钢厂生产出优质连铸坯以至最终产品做出了重要贡献。

中国科学院力学研究所从“七五”开始参加并主持连铸攻关项目中的多项电磁搅拌技术课题，并与钢铁企业、科研院所、高等院校、设备制造厂联手合作，在电磁搅拌技术的引进消化、研发创新和工业应用方面，做出了一些开创性的工作，使我国连铸电磁搅拌技术达到国际先进水平，实现了我国连铸电磁搅拌设备的国产化。

本书系统总结了作者从事连铸电磁搅拌技术理论研究和工业实践的心得，系统地论述电磁搅拌的理论和技術，比较全面地反映我国电磁搅拌技术装备设计与应用水平，同时广泛吸纳了国内外的研究和实践成果，为电磁搅拌技术的应用提供新的借鉴和新的思路。本书以磁流体力学和冶金学的有机结合为基础，阐明各种电磁搅拌的作用机理和冶金机理及特点，分析各种电磁搅拌技术在不同连铸机型和不同位置的应用、特点和冶金效果，着重电磁搅拌的作用机理和冶金机理的挖掘，使读者通过电磁搅拌知识和冶金机理的学习及应用案例的启发，既知其然又知其所以然，能举一反三，学了就能用。

根据连铸技术和电磁搅拌技术的特点,本书内容大致分为五个部分:第一部分为电磁搅拌技术的基础知识;第二部分为方(圆)坯连铸结晶器、二冷区、凝固末端及水平连铸电磁搅拌技术;第三部分为板坯连铸结晶器电磁控流技术和二冷区电磁搅拌技术;第四部分为连铸中间包电磁冶金技术;第五部分为连铸电磁搅拌系统的配置实例。全书共分11章,中国科学院力学研究所毛斌编写第1、2、5~10章;昆明理工大学张桂芳编写第3、4章。考虑到湖南中科电气股份有限公司一直致力于连铸电磁搅拌装置的研发,获得过众多具有自主知识产权的创新成果,在国内处于领先水平,这些成果不仅提升了我国电磁搅拌技术的水平,也为本书提供很有价值的素材。为此,邀请中科电气李爱武、易兵编写第11章。此外,李爱武还参与编写了第9、10章的部分内容。全书由毛斌统编审定。

本书适合钢铁企业、研究设计院所、大专院校从事冶金工程设计、研发及教学的技术人员、科研人员、管理人员、教学人员及大专院校的学生阅读和参考,对渴望了解和学习电磁搅拌技术的钢厂现场操作人员也有参考价值。

书中参考了一些国内外同行的文献资料,使本书内容更加丰富、翔实。作者对他们取得的成果和辛勤劳动表示敬意和感谢!

于勇院士在百忙之中为本书作序,充分肯定本书的编写和出版。对于勇院士的支持和帮助,作者表示深深的敬意和诚挚的感谢!

在本书编写过程中,中国工程院关杰院士、北京科技大学冶金与生态工程学院蔡开科教授、钢铁研究总院倪满森教授、河北钢铁邯钢钢铁集团连铸连轧厂魏祖康教授级高工等给予作者很大的支持和鼓励。北京科技大学冶金与生态工程学院蔡开科教授、中国科学院力学研究所唐福林研究员分别审阅了部分章节并提出了很好的修改意见,作者受益匪浅。本书的出版,还得到中冶京诚工程技术有限公司万体娅高工、湖南中科电气股份有限公司邹益南高工以及冶金工业出版社刘小峰的积极支持和帮助。在此,对他们一并表示衷心的感谢!

由于作者水平所限,书中不妥之处,敬请各位专家和广大读者批评指正。

毛 斌

2011年3月

目 录

1 连铸电磁搅拌技术的基本概念	1
1.1 连铸电磁搅拌技术发展历史的简要回顾	1
1.1.1 国外连铸电磁搅拌技术发展历史简述	1
1.1.2 我国连铸电磁搅拌技术发展历史简述	2
1.2 连铸电磁搅拌技术的基本原理和特点	4
1.2.1 电磁搅拌不能称为磁力搅拌	4
1.2.2 连铸电磁搅拌的实质和意义	4
1.2.3 连铸电磁搅拌技术的分类	5
1.2.4 连铸电磁搅拌的基本原理	7
1.2.5 连铸电磁搅拌技术的特点	8
1.3 电磁搅拌器的基本类型及其激发磁场的机理	9
1.3.1 旋转磁场搅拌器及其激发磁场机理	9
1.3.2 行波磁场搅拌器及其激发磁场机理	12
1.3.3 螺旋磁场搅拌器及其激发磁场机理	16
1.3.4 旋转磁场和行波磁场搅拌技术的比较	17
1.4 电磁搅拌的运行方式	18
1.5 方(圆)坯连铸电磁搅拌技术的几种模式和主要特征	20
1.5.1 基本模式(或一段搅拌模式)	20
1.5.2 多段组合搅拌模式	21
1.5.3 曾经开发过的一些搅拌模式	21
1.6 选择电磁搅拌技术的基本思路	22
1.6.1 选择电磁搅拌技术的基本要素	22
1.6.2 从补救冶金缺陷角度选择电磁搅拌模式	22
1.6.3 根据钢种碳含量选择电磁搅拌模式	23
1.6.4 从等轴晶率角度选择电磁搅拌模式	23
1.6.5 从改善中心偏析角度选择电磁搅拌模式	23
1.7 方(圆)坯连铸电磁搅拌技术的基本特征	24
1.8 各类方(圆)坯和板坯连铸电磁搅拌技术的冶金效果及其应用简述	25
1.8.1 各类方(圆)坯和板坯连铸电磁搅拌技术的冶金功能和效果	25
1.8.2 各类方(圆)坯和板坯连铸电磁搅拌技术应用简述	26
参考文献	27

2 连铸电磁搅拌的磁流体力学基础	29
2.1 连铸电磁搅拌的磁流体力学基本方程	29
2.1.1 连铸电磁搅拌的磁流体力学概述	29
2.1.2 连铸电磁搅拌的磁流体力学的基本假设	29
2.1.3 电磁学的麦克斯韦方程	30
2.1.4 电磁学的感应方程	31
2.1.5 电磁力和电磁能	32
2.1.6 流体力学方程	32
2.1.7 能量方程	33
2.2 描述磁流体力学现象的向量图	33
2.3 磁流体力学的无量纲方程	34
2.3.1 单位和量纲	34
2.3.2 无量纲方程和无量纲参数	34
2.3.3 无量纲参数的定义及其物理意义	36
2.3.4 连铸电磁搅拌过程中各种无量纲参数的量级	39
2.4 电磁搅拌过程的相似性	39
2.4.1 电磁搅拌过程的相似方程	39
2.4.2 电磁搅拌过程在低频工况下的简化	40
2.4.3 电磁搅拌过程中的几个定性结果	40
参考文献	41
3 连铸电磁搅拌的冶金原理	42
3.1 铸坯的凝固与传热	42
3.1.1 结晶器凝固过程中的传热	42
3.1.2 铸坯内部柱状晶区的形成	43
3.1.3 铸坯内部中心等轴晶区的形成	44
3.1.4 二冷区铸坯的传热	44
3.1.5 二冷区铸坯的凝固	45
3.1.6 二冷区凝固坯壳的生长	46
3.2 电磁搅拌对铸坯凝固组织影响的冶金原理	47
3.2.1 结晶器电磁搅拌对铸坯凝固组织的影响	47
3.2.2 二冷区电磁搅拌对铸坯凝固组织的影响	48
3.2.3 末端电磁搅拌对铸坯凝固组织的影响	49
3.2.4 电磁搅拌对铸坯凝固组织影响的分析	50
3.3 电磁搅拌对铸坯凝固坯壳影响的冶金原理	51
3.3.1 结晶器内坯壳的形成	51
3.3.2 结晶器内坯壳的生长规律	53
3.3.3 钢液在结晶器内凝固的影响因素	53
3.3.4 结晶器电磁搅拌对铸坯凝固坯壳的影响	53

3.4 电磁搅拌对铸坯中心疏松影响的冶金原理	55
3.4.1 铸坯中心疏松的形成	55
3.4.2 结晶器电磁搅拌对铸坯中心疏松的影响	56
3.4.3 末端电磁搅拌与铸坯的中心疏松	56
3.4.4 末端电磁搅拌与铸坯中心缩孔	57
3.5 电磁搅拌对铸坯中心偏析影响的冶金原理	58
3.5.1 铸坯偏析的形成	58
3.5.2 结晶器电磁搅拌与铸坯偏析	59
3.5.3 二冷区电磁搅拌与铸坯的偏析	60
3.5.4 二冷区电磁搅拌与铸坯的负偏析	60
3.5.5 二冷区电磁搅拌负偏析原因分析	61
3.5.6 二冷区电磁搅拌负偏析控制原则	62
3.5.7 末端电磁搅拌与铸坯的中心偏析	62
3.5.8 末端电磁搅拌与铸坯负偏析	63
3.6 电磁搅拌对铸坯内部裂纹影响的冶金原理	63
3.6.1 铸坯内部裂纹的形成	63
3.6.2 结晶器电磁搅拌对铸坯内部裂纹的影响	64
3.7 电磁搅拌对铸坯夹杂物影响的冶金原理	65
3.7.1 铸坯非金属夹杂物的形成	65
3.7.2 结晶器电磁搅拌与铸坯中夹杂物	66
3.7.3 二冷区电磁搅拌与铸坯中夹杂物	66
参考文献	67
 4 连铸电磁搅拌的数值模拟	 70
4.1 连铸电磁搅拌的电磁场数值分析概述	70
4.2 连铸电磁搅拌的数值计算方法	71
4.2.1 有限差分法	71
4.2.2 有限元法	71
4.2.3 积分方程法	72
4.2.4 边界元法	72
4.2.5 计算软件	72
4.3 连铸电磁搅拌的数学模型建立	74
4.3.1 符号定义与约定	74
4.3.2 模型假设条件	75
4.3.3 电磁场计算数学模型	75
4.3.4 流场计算数学模型	75
4.4 方坯连铸结晶器电磁搅拌模拟	77
4.4.1 电磁搅拌磁场模拟	77
4.4.2 搅拌工艺参数对电磁搅拌磁场影响的模拟	77

4.4.3	结晶器电磁搅拌的电磁力特征	78
4.4.4	结晶器电磁搅拌的流场特征	81
4.4.5	电磁搅拌结构参数对电磁场影响	82
4.5	圆坯连铸结晶器电磁搅拌模拟	84
4.5.1	电磁搅拌磁场模拟	84
4.5.2	搅拌工艺参数对电磁搅拌磁场影响的模拟	84
4.5.3	电磁搅拌不同断面磁场分布模拟	88
4.5.4	电磁搅拌结构参数对电磁场的影响	89
4.6	板坯连铸结晶器电磁制动数值模拟	92
4.6.1	模拟计算条件	92
4.6.2	磁感应强度对制动效果的影响	93
4.6.3	磁场作用位置对制动效果影响的模拟	94
4.6.4	全幅二段电磁制动结晶器流场模拟	95
4.7	板坯连铸二冷区电磁搅拌数值模拟	95
4.7.1	模拟计算条件	95
4.7.2	二冷区内电磁搅拌磁场模拟	96
4.7.3	搅拌工艺参数对二冷区内钢液流动影响的模拟	97
4.7.4	结构参数对二冷区钢液流动影响的分析	99
	参考文献	100
5	方(圆)坯连铸结晶器电磁搅拌技术	102
5.1	结晶器电磁搅拌器的配置	102
5.1.1	结晶器电磁搅拌器的选型与特点	102
5.1.2	结晶器电磁搅拌器的安装位置和有效作用长度	105
5.1.3	结晶器电磁搅拌器的安装方式	107
5.1.4	结晶器电磁搅拌器设计中的两个关键问题	109
5.2	结晶器电磁搅拌的基本特征	110
5.2.1	结晶器电磁搅拌作用下结晶器内的钢水流动特征	110
5.2.2	结晶器电磁搅拌作用下结晶器内的钢水温度分布特征	111
5.2.3	结晶器电磁搅拌器的空载和有载磁场分布特征	113
5.2.4	结晶器电磁搅拌的电磁力的解析表达式及模拟测量	119
5.2.5	结晶器电磁搅拌器的性能指标——电磁力矩的解析表达式及模拟测量	121
5.2.6	结晶器电磁搅拌的有功功率及模拟测量	123
5.2.7	结晶器电磁搅拌的最大电磁力和最佳频率	123
5.3	结晶器电磁搅拌诱起的钢水流动速度	125
5.3.1	结晶器电磁搅拌诱起的钢水流动速度的估计	126
5.3.2	计算钢水流动速度的实际意义	129
5.4	结晶器电磁搅拌的基本要求和搅拌强度的调控	129
5.4.1	结晶器电磁搅拌的基本要求	129

5.4.2	结晶器电磁搅拌强度调控的理论依据	129
5.4.3	结晶器电磁搅拌的工艺参数指标——搅拌速度的调控	131
5.5	结晶器电磁搅拌对连铸冷却制度的影响	135
5.5.1	一冷冷却的调整	135
5.5.2	二冷总水量和各段比水量的调整	136
5.6	结晶器电磁搅拌对浸入式水口侵蚀的影响	136
5.7	结晶器电磁搅拌相对于二冷区电磁搅拌的优势	137
5.8	结晶器电磁搅拌的冶金机理和主要冶金效果	138
5.8.1	结晶器电磁搅拌的冶金机理	138
5.8.2	结晶器电磁搅拌的主要冶金效果	139
5.9	方(圆)坯连铸结晶器电磁搅拌的几个新问题	139
5.9.1	结晶器电磁搅拌能有效改善中心偏析	139
5.9.2	圆坯连铸结晶器电磁搅拌可以采用交替搅拌方式	143
5.9.3	偏心搅拌的问题	146
5.9.4	单一断面电磁搅拌作用下的偏心问题	148
5.9.5	在结晶器电磁搅拌作用下弯月面流动的共振	149
	参考文献	150
6	方(圆)坯连铸二冷区和凝固末端及水平连铸电磁搅拌技术	153
6.1	方(圆)坯连铸二冷区电磁搅拌技术	153
6.1.1	二冷区电磁搅拌技术的冶金机理	153
6.1.2	二冷区电磁搅拌技术的主要类型	153
6.1.3	二冷区电磁搅拌器的安装位置	155
6.1.4	二冷区电磁搅拌强度的调控	155
6.2	二冷区电磁搅拌与轻压下的双S集成技术	157
6.2.1	二冷区电磁搅拌技术在双S集成技术中的冶金作用	157
6.2.2	二冷区电磁搅拌与轻压下双S集成技术的特点与使用效果	157
6.2.3	二冷区电磁搅拌与轻压下的双S集成技术初步探讨	158
6.3	方(圆)坯连铸凝固末端电磁搅拌技术	158
6.3.1	影响合金钢冶金缺陷的基本因素	158
6.3.2	高碳钢和高合金钢连铸的凝固特点	160
6.3.3	凝固末端电磁搅拌的最佳搅拌条件	161
6.3.4	凝固末端电磁搅拌安装位置(搅拌位置)的确定	162
6.3.5	凝固末端电磁搅拌工艺参数的调控	169
6.4	二冷区和凝固末端电磁搅拌产生的铸坯宏观缺陷——白亮带	170
6.4.1	白亮带的形成机理	170
6.4.2	影响白亮带的几个主要因素	173
6.4.3	减轻白亮带的有效措施	174
6.4.4	白亮带的危害性	175

6.4.5 凝固末端电磁搅拌的白亮带	176
6.5 水平连铸电磁搅拌技术	176
6.5.1 水平连铸的特点及电磁搅拌技术的作用	176
6.5.2 电磁搅拌技术对铸坯凝固组织不对称的影响	177
6.5.3 组合搅拌安装位置的选择	177
参考文献	179
7 方(圆)坯连铸电磁搅拌的冶金效果	182
7.1 方(圆)坯连铸结晶器电磁搅拌的典型冶金效果	182
7.1.1 结晶器电磁搅拌对弯月面温度的影响	182
7.1.2 结晶器电磁搅拌及其组合搅拌对铸坯凝固的影响	182
7.1.3 结晶器电磁搅拌对铸坯清洁度的影响	184
7.1.4 结晶器电磁搅拌对铸坯表面和皮下质量的影响	187
7.1.5 结晶器电磁搅拌和组合搅拌对铸坯等轴晶率的影响	190
7.1.6 结晶器电磁搅拌和组合搅拌对铸坯中心偏析的影响	194
7.1.7 结晶器电磁搅拌对铸坯皮下负偏析的影响	198
7.1.8 结晶器电磁搅拌和组合搅拌对铸坯中心缩孔和中心疏松的影响	200
7.1.9 结晶器电磁搅拌和组合搅拌对铸坯二次枝晶臂间距的影响	205
7.1.10 结晶器电磁搅拌和组合搅拌工艺参数优化对铸坯内部质量的影响	206
7.1.11 结晶器电磁搅拌和组合搅拌对轧坯质量的影响	209
7.2 二冷区、凝固末端电磁搅拌和组合搅拌的冶金效果	211
7.2.1 二冷区电磁搅拌对铸坯等轴晶率的影响	211
7.2.2 二冷区和凝固末端电磁搅拌对中心偏析和中心缺陷的影响	214
7.2.3 凝固末端电磁搅拌不同运行方式的冶金效果	215
7.3 电磁搅拌对水平连铸铸坯质量的影响	216
7.3.1 结晶器电磁搅拌对水平连铸铸坯表面冷隔深度的影响	216
7.3.2 结晶器电磁搅拌和组合搅拌对铸坯等轴晶率的影响	216
7.3.3 不同搅拌方式对改善水平连铸铸坯中心疏松和裂纹的影响	218
7.3.4 不同搅拌方式对改善水平连铸铸坯中心偏析的影响	219
7.3.5 结晶器电磁搅拌和组合搅拌对水平连铸铸坯负偏析的影响	220
参考文献	221
8 板坯连铸结晶器电磁控流技术	223
8.1 板坯连铸结晶器内钢水流动控制的重要性	223
8.1.1 板坯连铸结晶器内钢水流动存在的主要问题	223
8.1.2 板坯连铸结晶器内钢水流动控制的主要目的	224
8.1.3 板坯连铸结晶器内弯月面波动控制的判据	224
8.2 板坯连铸结晶器内钢水流动控制技术的主要模式	226
8.2.1 三种电磁流动控制技术	226

8.2.2 三种电磁流动控制技术的主要区别和特点	227
8.3 板坯连铸结晶器电磁搅拌技术	228
8.3.1 板坯连铸结晶器电磁搅拌技术的主要模式	228
8.3.2 板坯连铸结晶器水平旋转搅拌的电磁力特征	229
8.3.3 板坯连铸结晶器水平旋转搅拌的流动分布特征	230
8.3.4 板坯连铸结晶器水平旋转搅拌对负偏析的影响	232
8.3.5 板坯连铸结晶器水平旋转搅拌对结晶器热流的影响	233
8.3.6 板坯连铸结晶器向下直线搅拌磁场和流动分布的特征	233
8.3.7 板坯连铸结晶器电磁搅拌的主要冶金机理	234
8.3.8 板坯连铸结晶器电磁搅拌的主要冶金效果	234
8.4 板坯连铸结晶器多模式电磁搅拌技术	242
8.4.1 板坯连铸结晶器多模式电磁搅拌技术的开发背景	242
8.4.2 板坯连铸结晶器多模式电磁搅拌技术的工作原理和技术特点	244
8.4.3 结晶器多模式电磁搅拌的冶金机理与冶金效果综述	248
8.4.4 多模式电磁搅拌对板坯质量的影响	253
8.4.5 多模式电磁搅拌对成品质量的影响	253
8.5 板坯连铸结晶器电磁制动技术	255
8.5.1 板坯连铸结晶器电磁制动的工作原理和电磁力特征	255
8.5.2 三类电磁制动装置的结构特征和安装位置	256
8.5.3 在三类电磁制动作用下结晶器内的流场特征	256
8.5.4 使用全幅一段磁场时的优化条件	261
8.5.5 结晶器电磁制动的冶金机理和冶金效果	261
8.5.6 结晶器电磁制动对产品质量的影响	266
8.6 结晶器电磁制动技术在薄板坯连铸上的应用	267
8.6.1 结晶器电磁制动对薄板坯结晶器内钢水流动形貌的影响	267
8.6.2 结晶器电磁制动对钢水清洁度的影响	269
8.6.3 结晶器电磁制动对薄板坯表面纵裂指数的影响	271
8.6.4 结晶器电磁制动对板卷表面缺陷的改善	271
8.7 结晶器电磁控流技术的一个重要应用——结晶器内钢水偏流的控制	272
8.7.1 结晶器内钢水偏流控制的重要性	272
8.7.2 板坯连铸结晶器内钢水偏流产生的主要原因和危害	272
8.7.3 控制偏流现象的结晶器电磁控流技术	273
8.7.4 评价控制偏流效果的检测方法	276
参考文献	278
9 板坯连铸二冷区电磁搅拌技术	281
9.1 板坯连铸二冷区电磁搅拌工作原理、主要形式及特点	281
9.1.1 板坯连铸二冷区电磁搅拌的工作原理	281
9.1.2 板坯连铸二冷区电磁搅拌的主要形式及特点	282

9.1.3 国内外板坯连铸二冷区电磁搅拌性能的比较	285
9.2 板坯连铸二冷区电磁搅拌器的安装位置	286
9.2.1 板坯连铸二冷区电磁搅拌器安装位置的确定	286
9.2.2 板坯连铸二冷区电磁搅拌器安装位置的注意事项	287
9.2.3 板坯连铸二冷区电磁搅拌器安装位置的应用实例	287
9.3 电磁推力的计算和模拟测试方法	287
9.3.1 电磁推力的计算	287
9.3.2 电磁推力的模拟测试方法和实测案例	289
9.4 最大电磁力和最佳频率	291
9.4.1 计算最大电磁力和最佳频率的理论依据	291
9.4.2 各种因素对最大电磁力和最佳频率的影响	291
9.5 国内板坯连铸二冷区电磁搅拌使用情况	293
9.6 板坯连铸二冷区电磁搅拌的冶金机理和冶金效果	293
9.6.1 板坯连铸二冷区电磁搅拌的冶金参数对等轴晶率的影响	294
9.6.2 板坯连铸二冷区电磁搅拌的冶金参数对中心偏析的影响	297
9.6.3 板坯连铸二冷区电磁搅拌对板坯内部质量的改善	298
9.6.4 板坯连铸二冷区电磁搅拌对成品表面单向波纹的改善	299
9.6.5 高推力辊式电磁搅拌技术的冶金效果	300
参考文献	302
10 连铸中间包电磁冶金技术	304
10.1 中间包电磁搅拌技术——离心流动中间包	304
10.1.1 离心流动中间包的研发背景	304
10.1.2 离心流动中间包的结构概述	304
10.1.3 夹杂物的分离机理	304
10.1.4 离心流动中间包内流动的数值模拟	305
10.1.5 离心流动中间包的冶金效果	306
10.1.6 离心流动中间包的工业应用效果	309
10.2 中间包加热技术	310
10.2.1 中间包钢水温度控制	310
10.2.2 中间包通道式感应加热与精炼技术	314
10.2.3 中间包弧形双通道感应加热与精炼技术	320
10.2.4 中间包蝶形通道感应加热与精炼技术	324
10.2.5 中间包等离子体加热技术	326
参考文献	329
11 连铸电磁搅拌系统的配置实例	331
11.1 电磁搅拌系统的配置	331
11.1.1 电磁搅拌系统配置综述	331

11.1.2 电磁搅拌系统设计依据	333
11.1.3 电磁搅拌器的技术要求	335
11.1.4 电磁搅拌器产品型号及含义	339
11.2 方(圆)坯连铸电磁搅拌器的结构和特点	340
11.2.1 方(圆)坯连铸结晶器电磁搅拌器的结构和特点	340
11.2.2 方(圆)坯凝固末端电磁搅拌器的结构和特点	343
11.3 板坯连铸电磁搅拌器的结构和特点	344
11.3.1 板坯连铸结晶器电磁搅拌器的结构和特点	344
11.3.2 板坯连铸二冷区电磁搅拌器的结构和特点	346
11.4 电磁搅拌器电气控制系统	351
11.4.1 电磁搅拌器电力变压器	351
11.4.2 电磁搅拌器电源分配柜	352
11.4.3 电磁搅拌器变频电源系统	352
11.4.4 电磁搅拌器监控系统	356
11.5 电磁搅拌器冷却水系统	358
11.5.1 电磁搅拌器冷却水系统工作原理	358
11.5.2 电磁搅拌器冷却水系统构成和功能	359
11.5.3 电磁搅拌器用冷却水的水质要求	360
11.6 电磁搅拌系统的外围附件	361
11.6.1 动力电缆	361
11.6.2 电缆转接箱	361
11.6.3 电缆连接器	362
11.7 电磁搅拌系统的常见故障及维护方法	363
11.7.1 方(圆)坯电磁搅拌器的常见故障及维护方法	363
11.7.2 板坯连铸电磁搅拌器的常见故障及维护方法	365
11.7.3 变频电源的常见故障及维护方法	366
11.7.4 远程监控系统的常见故障及维护方法	367
11.7.5 冷却水系统的常见故障及维护方法	367
11.8 工厂条件要求	368
参考文献	369



连铸电磁搅拌技术的基本概念

1.1 连铸电磁搅拌技术发展历史的简要回顾

1.1.1 国外连铸电磁搅拌技术发展历史简述

电磁搅拌 (Electromagnetic Stirring, EMS) 技术的应用是连铸技术最重要的贡献之一。目前, 电磁搅拌技术已成为改善连铸坯质量、稳定操作、扩大品种范围和提高生产率的重要技术手段; 电磁搅拌装置也成为连铸机的常规配置。为使广大读者对电磁搅拌技术的发展历程有所了解, 有必要对其发展历史做一简要回顾。

改善铸坯凝固组织的重要性是众所周知的, 连铸技术的出现对控制凝固过程有了特殊的需要并提供了合适的条件。由于电磁搅拌技术的突出特点, 如电磁搅拌器的工作原理和制造工艺与旋转电机相类似; 它不与钢水接触而能控制钢水的流动以及运行可靠等, 因此, 自 1960 年代以来, 电磁搅拌技术备受连铸界的瞩目。

但是, 电磁搅拌技术作为一项新的工艺技术却经历了曲折的发展过程。早在 1922 年, Mcneill 提出了第一个电磁搅拌专利, 论述了熔融金属的流动对凝固组织、偏析和夹杂物分布的影响。1933 年 Shtanko 和 1934 年 Bruchanov 等利用旋转磁场分别研究了有色金属和钢水的流动对凝固组织的影响, 获得了良好的效果, 如含气量低、夹杂物少、晶粒细、无枝晶等, 由此证实了电磁搅拌所具有的主要优点。而此后 20 多年间, 由于传统模铸工艺不适合电磁搅拌技术的发展, 这一技术被耽误了。直到 1950 年代初, 连铸技术的出现对电磁搅拌技术有了特殊的需要, 并提供了合适的条件, 电磁搅拌技术又重新活跃起来。S. Jung haus 和 O. Schaaber 等在德国 Hückingen 的试验连铸机上进行了沸腾钢连铸电磁搅拌的首次试验, 然后, 1961 年 Poppmeier 等在奥地利 Kapfenberg 的 Boehler 工厂的连铸机上进行了合金钢连铸电磁搅拌试验, 到 1960 年代末, 在世界范围内特别是法国、日本、德国、英国、苏联等国同时开发了方坯连铸二冷区电磁搅拌 (Strand Electromagnetic Stirring, S-EMS) 技术, 并进行了系统的试验研究。1973 年, 法国 Safe Hagondange 钢厂是第一家在四流 240mm × 240mm 大方坯连铸机上都安装 S-EMS 的厂家, 进行了系统的工业应用, 使电磁搅拌技术达到了比较成熟的程度。此后近十年间, 二冷区电磁搅拌技术一直占有主导地位。

1970 年代开始, 随着改善方坯连铸表面质量需要, 导致对结晶器电磁搅拌 (Mold Electromagnetic Stirring, M-EMS) 技术的研究与开发, 法国 Allevard 厂和英国 Tsascids 厂都进行了工业试验, 用于改善敞开浇注的硅和铝镇静钢连铸坯的表面和内部质量。由于结晶器铜管材质的影响而发展比较缓慢, 直到低频电源的开发成功, 才使法国钢铁研究院 (IRSID) /CEM 于 1977 年在德国 Arbed-Eschweiler 的一台四流方 (圆) 坯连铸机上进行了 M-EMS 技术的第一次工业应用, 达到了比较成熟的程度而被迅速推广。至今 M-EMS 技术已取代 S-EMS 成为应用最广泛的电磁搅拌技术。

1980年代初,为了克服单一位置电磁搅拌工艺的局限性,采用了两段和三段组合搅拌技术,目的是提高高碳钢的等轴晶率,进一步减小中心偏析和获得与模铸相当的内部质量。多段组合搅拌技术比较成功的当推日本神户制钢和法国 Rotelec 联合开发的多段组合 Kosmostir-Magnetogyr 法,并先后于 1981 年在神户制钢的 3 号大方坯 (300mm × 400mm) 连铸机上和 1983 年在 Yadogawa 的小方坯连铸机上分别进行了首次工业应用,取得了良好的冶金效果。

由于板坯连铸电磁搅拌技术的板坯断面宽厚比大,需要更大的搅拌力,而支承辊密排不仅限制了电磁搅拌器的尺寸而且也限制了安装方式和安装尺寸,因此其发展过程延迟了十几年,但其发展模式与方坯连铸相一致。自 1970 年代初板坯连铸电磁搅拌技术问世以来,IRSID、日本新日铁 (NSC)、瑞典 ASEA、德国 AEG-Eloterm 等通过不断试验和工业应用的实践,逐步完善和发展了板坯连铸二冷区电磁搅拌技术。1978 年,法国 IRSID-CEM 等在德国 Dillinger Hütte 厂首次进行了辊式电磁搅拌器的工业应用;日本 NSC 的插入辊缝的插入式电磁搅拌器和瑞典 ASEA 的辊后式 (箱式) 电磁搅拌器也先后投入工业应用。这三类电磁搅拌器都采用水平行波磁场。现在,板坯连铸 S-EMS 主要用于改善不锈钢、硅钢、管坯和板材等的凝固组织。此外,Sumitomo (住友金属) 开发了直流传导型电磁搅拌技术,但至今未见推广应用。

板坯连铸结晶器电磁搅拌技术的开发始于 1978 年,是由法国钢研院在 Dillinger 首先完成的。此后,法国、日本、瑞典等国开发了三类板坯结晶器电磁搅拌器:第一类是法国 IRSID-CEM 的双边垂直行波磁场搅拌器,安装在德国 Dillinger Hütte 厂,用于解决低碳铝镇静钢的皮下质量;第二类是 NSC 的双边水平行波磁场搅拌器,于 1981 年安装在 Hirohata 厂,用于解决准沸腾钢的 CO 气孔,此后应用表明,它对表面温度和坯壳生长的均匀化、减少表面夹杂物和减浅振痕等均有良好的效果;第三类是 1980 年代末和 1990 年代初由 NKK 开发的多模式 M-EMS,它由 4 个水平行波磁场搅拌器组成,两两成对地安装在结晶器的两个宽面上,用于控制结晶器内从浸入式水口两个侧孔吐出的钢水速度,或加速 (EMLA) 或减速 (EMLS),避免由弯月面波动引起的渣子和保护渣的卷吸及表面缺陷。最近的发展是基于 NKK 的可灵活调整的多模式结晶器电磁搅拌 (MM-EMS) 系统,可按加速、减速或水平旋转等搅拌模式运行,以便在同一连铸机上适用于断面、钢种和浇注速度等变化多的工况。

1980 年初,ABB 和 Kawasaki 联合开发了基于局部区域恒定磁场的板坯结晶器电磁制动技术,1980 年代后期又先后开发成全幅一段电磁制动 (EMBr-Ruler) 和全幅二段电磁制动 (或称流动控制结晶器 (FC-Mold))。目前,电磁制动技术已成为高速板坯连铸特别是薄板坯连铸中控制结晶器内钢水流动的重要技术手段。

1.1.2 我国连铸电磁搅拌技术发展历史简述

我国连铸电磁搅拌技术的研发始于 1970 年代后期,就方坯连铸来说大致经历了三个发展阶段:

第一阶段从 1970 年代末至 1980 年代中,是实验室研发阶段。其特点是,跟踪世界连铸技术的发展,通过大量的实验室研究,开发电磁搅拌技术。其间,众多设计院所、高校和钢厂的研发者探索了旋转磁场、行波磁场和恒定磁场的搅拌器结构和电磁设计,研制成