

连铸电磁搅拌和电磁制动的 理论及实践

王宝峰 李建超 著

LIANZHU DIANCI JIAOBAN HE DIANCI ZHIDONG DE LILUN JI SHIJIAN



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

内 容 提 要

本书从连铸电磁冶金技术出发,结合连铸电磁冶金理论,采用先进的数值计算方法,模拟分析了各种电磁搅拌技术及其搅拌设备,如小方坯电磁搅拌、大方坯电磁搅拌、圆坯电磁搅拌等;重点介绍了目前钢铁工业上比较成熟的连铸电磁冶金技术,主要包括电磁搅拌技术和电磁制动技术,模拟分析了各种技术在二冷区和结晶器中的应用以及工业实践。本书是作者十几年来对电磁理论及其在连铸领域应用研究的结晶,具有很强的参考价值。

本书适合钢铁生产领域的生产、科研、教学、管理人员参阅。

图书在版编目(CIP)数据

连铸电磁搅拌和电磁制动的理论及实践/王宝峰,李建超著.
—北京:冶金工业出版社,2011.2
ISBN 978-7-5024-5441-8

I. ①连… II. ①王… ②李… III. ①连续铸造—电磁
振荡—研究 ②电磁制动器—研究 IV. ①TG249.7 ②TF777
③TH134

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 002510 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 常国平 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5441-8

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

2011 年 2 月第 1 版,2011 年 2 月第 1 次印刷

787 mm×1092 mm 1/16;10.25 印张;245 千字;154 页

36.00 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(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)

前 言

电磁冶金技术在钢铁工业中的应用已经有三十多年的历史,其改善钢材质量的作用已经得到普遍认可。20 世纪 80 年代以来,我国从引进到开发,使得电磁搅拌技术在我国钢铁企业的连铸生产中得到了广泛应用。但是,在很多钢铁企业中普遍存在着电磁搅拌技术和装置达不到预期效果的现象。其主要原因是,电磁搅拌器为非标准的机电一体化设备,需要进行针对用户的设计和参数优化,牵涉到多种学科和多项技术。而对很多钢铁企业来说,是在现有连铸机上新增电磁搅拌装置,这就要求所配置的电磁搅拌技术和装备适应现有的连铸设备和工艺,否则将难以发挥电磁搅拌的预期效果。

目前,钢铁工业上应用比较成熟的连铸电磁冶金技术主要包括电磁搅拌技术和电磁制动技术。其中,电磁搅拌技术主要应用于方(圆)坯连铸机和板坯连铸机上;而电磁制动技术主要应用于板坯连铸中,特别是在薄板坯连铸过程中应用居多。经过近二十年的应用实践和研究开发,对电磁搅拌和电磁制动理论和技术进行系统地梳理和总结已经变得十分必要和迫切。

本书内容涵盖了现在钢铁工业上应用比较成熟的各种电磁冶金技术。针对电磁搅拌技术在连铸这一具体领域上的应用,从电磁理论出发,阐述了各种形态电磁场的传递和作用规律;采用先进的数值模拟方法,对不同类型的电磁搅拌和电磁制动下的磁场和流场进行了耦合计算,定量分析了国内外不同形式的电磁冶金设备的特点,并结合工厂中的实际应用情况,对理论分析和数值计算的正确性进行了验证。本书内容主要包括电磁冶金理论、方(圆)坯电磁搅拌技术、板坯电磁搅拌技术及电磁制动技术等内容。本书作者及其团队长期从事该领域的研究工作,并且开发出了具有自主知识产权的电磁冶金设备,在很多钢厂得到应用,从中积淀的实践经验丰富和发展了电磁冶金理论。通过阅读本书,读者能够了解电磁冶金的原理,深刻认识连铸电磁冶金的关键技术,掌握电磁搅拌和电磁制动设备的设计思路和使用原则,使连铸电磁冶金技术更好地为企业服务,创造更多的经济效益。

研究团队成员有王宝峰、李建超、曹建刚、丁国、麻永林、黄军等教师及于海岐、宿国栋等研究生,他们的研究成果是本书内容的重要来源。

在本书撰写过程中,参考了许多学者和专家的相关著作和论文,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平所限,书中不妥之处,欢迎广大读者批评指正。

内蒙古科技大学 王宝峰 李建超
2010年11月于包头

目 录

1 绪论	1
1.1 国内外连铸技术的发展概况	1
1.1.1 国外连铸技术发展简要回顾	1
1.1.2 我国连铸技术的发展概况	2
1.2 电磁冶金理论的研究	3
1.3 电磁技术在连铸生产中的应用	3
1.3.1 电磁搅拌技术	5
1.3.2 电磁制动技术	8
参考文献	9
2 连铸电磁冶金理论	11
2.1 电磁场控制方程的表述	11
2.1.1 电磁场的基本模型	11
2.1.2 单连通域涡流区求解模型建立	11
2.1.3 多连通域涡流区求解模型建立	12
2.2 流场分析模型的建立	14
2.2.1 流场基本方程	14
2.2.2 湍流模型	14
2.3 金属熔体与电磁场之间的交互作用	16
2.3.1 磁流体力学近似	16
2.3.2 磁流体力学基本方程	16
参考文献	17
3 方(圆)坯电磁搅拌数值模拟及实践	20
3.1 结晶器电磁搅拌	20
3.1.1 结晶器电磁搅拌的作用	20
3.1.2 电磁搅拌的结构形式	25
3.1.3 结晶器电磁搅拌存在的问题	28
3.2 方(圆)坯电磁搅拌工作原理	31
3.2.1 旋转磁场的产生	31
3.2.2 旋转磁场的方向	32

3.3 电磁搅拌器结构设计及结构参数对搅拌效率的影响	33
3.3.1 结构对搅拌效率的影响	33
3.3.2 电流频率对搅拌效率的影响	33
3.3.3 结晶器电导率对搅拌效率的影响	34
3.3.4 电磁搅拌效率高低的判断	34
3.4 小方坯结晶器电磁搅拌的数值模拟	35
3.4.1 电磁搅拌的计算方法	35
3.4.2 模型的建立	36
3.4.3 两相四极电磁搅拌的结果分析	38
3.4.4 三相六极电磁搅拌的结果分析	41
3.4.5 两种形式电磁搅拌器搅拌速度对比	43
3.4.6 电流频率对搅拌效果的影响	44
3.4.7 结晶器电磁搅拌器的工业实践	46
3.5 大方坯结晶器电磁搅拌的数值模拟	47
3.5.1 大方坯结晶器电磁搅拌模型的建立	48
3.5.2 大方坯结晶器电磁搅拌的数值计算结果分析	48
3.6 圆坯结晶器电磁搅拌的数值模拟	54
3.6.1 圆坯结晶器电磁搅拌数学模型的建立	54
3.6.2 圆坯结晶器电磁搅拌的数值模拟结果讨论	55
3.6.3 圆坯结晶器电磁搅拌的工业实践	56
3.7 组合电磁搅拌——结晶器和凝固末端组合电磁搅拌	57
3.7.1 最佳凝固末端搅拌器安装位置的确定	58
3.7.2 结晶器和凝固末端组合搅拌参数的确定	61
3.7.3 结晶器和凝固末端组合搅拌的工业实践	66
3.8 电磁搅拌器的设备设计	70
3.8.1 电磁搅拌器本体	70
3.8.2 电磁搅拌器电源	73
3.8.3 电磁搅拌器冷却系统	73
3.8.4 电磁搅拌器自动控制系统	74
参考文献	75
4 板坯连铸电磁搅拌技术	77
4.1 电磁搅拌技术概述	77
4.2 板坯电磁搅拌器的原理	78
4.2.1 两相电流板坯电磁搅拌器的原理	80
4.2.2 三相电流板坯电磁搅拌器的原理	81
4.3 板坯电磁搅拌器的结构	82
4.3.1 板坯连铸二冷区电磁搅拌器的结构	82
4.3.2 板坯结晶器电磁搅拌器	85

4.3.3 高速铸机的电磁稳定—电磁加速系统	89
4.4 板坯电磁搅拌器的数值计算	91
4.4.1 两相四极板坯电磁搅拌器	91
4.4.2 三相六极板坯电磁搅拌器	105
4.4.3 两相板坯电磁搅拌和三相板坯电磁搅拌的对比	110
4.5 板坯电磁搅拌的工业实践	115
4.5.1 凸极式板坯电磁搅拌器工业实践	115
4.5.2 辊式电磁搅拌器的工业实践	116
4.5.3 提高铸坯等轴晶率的工业实践	119
参考文献	120
5 板坯连铸电磁制动技术	121
5.1 电磁制动技术概述	121
5.2 电磁制动技术的工作原理	122
5.3 电磁制动的冶金效果及其影响因素	122
5.3.1 电磁制动的冶金效果	122
5.3.2 影响电磁制动效果的因素	122
5.4 电磁制动装置的结构	123
5.5 电磁制动过程流场的数值模拟	124
5.5.1 模拟过程总体计算流程	124
5.5.2 钢液流动的基本假设	125
5.5.3 数学模型的基本控制方程及求解	125
5.5.4 求解区域和边界条件	126
5.5.5 计算区域网格划分和控制方程的离散	127
5.5.6 控制方程的求解	129
5.6 电磁制动过程影响钢液流动因素分析	131
5.6.1 结晶器内电磁制动过程的基本特征	131
5.6.2 磁感应强度对钢液流场的影响	135
5.6.3 磁场位置对钢液流场的影响	139
5.6.4 水口侧孔倾角对钢液流场的影响	142
5.6.5 拉速对钢液流场的影响	144
5.7 电磁制动的设备	148
5.8 电磁制动的工业实践	149
5.8.1 电磁制动的磁场分布特性	149
5.8.2 电磁制动的效果对比	150
5.8.3 电磁制动对结晶器内钢液温度的影响	152
参考文献	153

1 | 绪 论

1.1 国内外连铸技术的发展概况

1.1.1 国外连铸技术发展简要回顾

连续浇铸液体金属的思想可以追溯到 150 多年前。由于受各种条件的限制,塞勒斯 (G. E. Sellers) 等人提出的这种设想只能在低熔点的有色金属中得到应用,如铅的浇铸等。最早的有关类似于现代连铸技术和工艺的建议是在 1887 年,由德国人戴伦 (R. M. Daelen) 首先提出。在戴伦等人提出的这种连铸技术中,包括了水冷和上下口敞开的结晶器、二次冷却部分、引锭杆、夹辊及连铸坯切割装置等设备和工艺技术。但是,当时钢坯黏结结晶器及连铸过程中拉漏现象经常发生,操作工艺也极不稳定,难以实现大规模生产。德国人容汉斯 (Siegflid Junghans) 提出了结晶器振动技术,解决了钢坯黏结结晶器的问题,奠定了近代连铸生产技术的基础。容汉斯于 1933 年在德国建成了第一台立式的、带振动结晶器的连铸机,并用这种设备浇铸了铜、铝等合金,获得了成功。与此同时,美国 Alcoa 公司也发明了立式的半连续铸造工艺 (Vertical Direct Chill Casting, DC 法),用来生产铝合金铸锭等材料。由于采用这种立式连续铸造技术具有占地少、投资省、效率高、成本低等优点,在有色金属材料的生产中得到了广泛应用。

钢铁材料具有熔点高、凝固速度慢和生产规模庞大等特点,在工业规模上实现连续铸造存在很多技术困难,发展速度非常缓慢。20 世纪 40 年代,容汉斯在德国建设了第一台生产钢的试验性连铸机,并采用了带振动的水冷结晶器、浸入式水口和保护浇铸等技术,为现代连续铸钢技术的发展奠定了基础。第二次世界大战后,世界各地相继建成了一批浇铸钢铁材料的实验性和半工业性连续铸钢实验设备。到 20 世纪 50 年代,连续铸钢技术实现了工业化设计和生产,从此连铸技术得到迅速发展。20 世纪 70 年代,世界能源危机的出现和与模铸相比连铸本身固有的节能优势,以及相关技术 (如大型氧气转炉、电磁搅拌技术等) 在连铸生产中的广泛采用,促进了连续铸钢技术的进一步发展。在这一时期,连铸技术的理论、生产工艺、设备、连铸坯的品种规格、质量等都取得了巨大的进步。

20 世纪 80 年代,世界钢铁生产和科学研究中心从欧美逐渐转移到日本。连铸技术呈现出强劲的发展态势,而高效连铸技术的提出 (生产过程的高效化、铸坯洁净化、产品近终形、操作自动化以及与后续工艺衔接上的连续化) 代表了世界现代连铸技术的发展方向。特别是在 20 世纪 90 年代,韩国钢铁业的崛起使钢铁生产的国际竞争更加激烈。目前,世界各大钢铁公司都在提高产品质量和生产效率、节能环保等环节上开展全面的研究开发工作,以满足社会发展的需要及提高企业和本国钢铁材料生产的国际竞争力。在这种连续铸钢中,取消钢坯的表面处理,将连铸生产的高温钢坯直接热装实现连铸坯—热装—连轧的生产工艺,是节能、环保和提高生产效率的重要途径,也是近年来钢铁界引人注目

的重大研究课题。

实现连铸坯—热装—连轧的生产工艺,要求连铸生产出的坯料是无内外缺陷的优质连铸坯。但是,在目前的连铸生产工艺和技术条件下,钢坯的缺陷几乎不可避免,不仅结晶器的振动会留下表面振痕、甚至裂纹等缺陷,而且连铸过程中弯月面的不稳定性极易导致连铸过程中初期凝固坯壳生长不均匀,进而增大纵裂纹生成的几率。这些问题不仅阻碍了连铸—热装—连轧技术的实现和高效(速)连铸技术的发展,而且其产品质量也难以满足现代工业对优质钢材的要求。多年来许多研究工作者和工程技术人员一直在进行各种尝试改善连铸坯的质量,如变化结晶器的振动方式等,但这些做法的效果有限。因此,生产无缺陷铸坯成为冶金工作者梦寐以求的理想。而电磁连铸技术能够极大地改善连铸坯的表面和内部质量,能够进一步提高连铸连轧的比率,大幅度降低生产成本。因此,以钢铁材料为代表的高熔点液态金属的电磁成形及凝固控制技术的研究成为各国钢铁研究的重点课题,受到世界各国钢铁生产者的高度重视。美国能源部所属 Argonne 研究所,在能源部巨资支持下,于 1984 年开始全面开展了钢的电磁连铸技术的研究。他们以开发钢的立式和水平电磁铸造为目标,进行了大量的实验研究工作。1991 年,日本通产省将液态金属成形及凝固控制的研究作为科学技术超前研究课题(1991 ~ 1993 年),取得了一些突破性的研究成果。1993 年,日本贸易振兴会组织由通产省、大学和相关企业参加的代表团,赴欧洲考察后,将此研究方向确定为 21 世纪金属成型的新方法,并于 1995 年投入数十亿日元作为国家工程计划立项(1995 ~ 2000 年)。韩国也投入了巨额资金将此课题定为国家重大研究项目(1995 ~ 2004 年)。可见,开展钢铁材料电磁连铸技术的研究,不仅对丰富和发展电磁冶金理论、磁流体力学和金属凝固理论具有一定学术价值,而且具有良好的工业应用前景,也会给冶金工业带来重大变革和取得巨大的经济效益^[1~3]。

1.1.2 我国连铸技术的发展概况

我国在研究和开发连铸技术方面起步也比较早,但是,由于社会和技术等多方面的原因,以前的发展速度非常缓慢。技术落后、铸坯质量差是我国 20 世纪 70 ~ 80 年代(改革开放之前)的基本写照^[4,5]。经过 20 多年的引进、消化和发展,我国的连铸技术得到了空前的发展,连铸比已经从 20 世纪 80 年代的不足 30%,发展到目前约 99%。同时,从 1996 年起,我国钢铁材料的年产量首次突破 1 亿吨,进入 21 世纪,经过十年波澜壮阔、史诗般的发展,2010 年钢产能已经突破 7 亿吨,成为名副其实的钢铁王国。由于历史原因,我国基础研究和技術开发的投入量远远低于发达国家的水平,特别是对连铸相关技术的开发和消化相对滞后,直接导致了对电磁技术在冶金中应用研究的不足。此外,企业的技术开发力度和重视程度不足,与世界发达国家和公司的差距甚大(如日本新日铁公司的研究与开发费用占总产值的 3%)^[6,7],也影响了电磁技术在冶金工业中的推广使用。为此,针对电磁技术在冶金工业中开发和应用研究存在的问题,开展电磁搅拌在冶金过程中的研究工作,不仅能够使我国生产出更多更好的优质钢材,同时也带动和促进相关领域科学技术的发展。面对 21 世纪对金属材料的新要求、新挑战,以及我国加入世贸组织后对钢铁工业所面临的新形势,研究和开发钢的电磁连铸技术,对提高我国钢铁生产的装备水平,提高钢材质量有着非常重要的意义^[8~10]。

1.2 电磁冶金理论的研究

电磁流体力学(MHD)是电磁冶金理论的基础,它的发展带动了电磁连铸技术在冶金工业中的应用和发展。早在1823年Faraday就提出了测量流体在磁场中流动情况的设想。尽管当时未能达到实用目的,但却是当今磁流体动力学的基础。后来,O. Muck于1923年提出了“悬浮熔融”方法的专利。W. Braunbeck在1932年就已经认识到,旋转磁场可使流体旋转。磁流体力学系统化工作要归功于Alfven(1942年)。电磁流体力学(MHD)理论的系统发展和广泛应用,则是从20世纪60年代开始的。Langenberg发现(1961年),钢锭在交变电磁场中凝固时,钢锭内部组织可以细化。由于液态金属也是良好的导体,在磁场和电流的作用下,金属熔体内部就会产生电磁力,利用电磁力就可以对液态金属进行非接触式搅拌、传送和形状控制。同时,电磁场是一种高密度的能量形式,具有清洁、即时响应、可控以及易于自动控制等特点,受到科学研究工作者的关注。电磁搅拌技术就是把交变的电磁场应用于金属的凝固过程,使其在交变磁场的作用下,产生感应电流和电磁力,进而驱动液态金属产生理想的流动。基于此,电磁冶金理论在冶金工业中的应用受到了广泛的重视,且得到了推广应用。前苏联是最早将电磁场的加热功能和电磁约束功能应用到金属加工领域的国家,例如,Getselev等人在1969年就申请了铝的无模电磁铸造技术专利,在1978年,瑞士Alusuisse公司把这一专利技术进行了商业化开发,取得了成功。1982年,在英国Cambridge举行的国际力学理论和应用联合会议(IUTAM)上,最早发表了关于电磁流体力学在冶金工业中应用的文章^[11]。这次会议对推动电磁流体力学在冶金及加工工程领域的发展起到了积极的促进作用。1985年,日本钢铁协会电磁冶金委员会成立,标志着电磁冶金已经成为一个独立的学科。1990年和1994年先后在日本召开了第六届国际钢铁研讨会和第一届材料电磁加工国际会议。在这两次会议上,材料电磁加工(EPM)这个术语被首次提出,标志着EPM技术大发展的到来。此后,又召开了几届EPM国际学术会议^[12],2005年,中国金属学会电磁冶金与强磁场材料科学分会在东北大学成立,标志着我国EPM的研究和开发进入了一个新时代。从这些会议看出,材料电磁加工技术已成为材料科学制备领域内重要研究方向,它已经从开始阶段的改进和提升传统工艺和技术,发展成为开发和研制新材料、新工艺的一种重要途径。

1.3 电磁技术在连铸生产中的应用

电磁技术在轻金属领域有大量的应用。法国C. Vives^[13]等人发明了铝的电磁精炼方法,即CREM(Casting Refining by Electromagnetic Method),Pechiney公司使该技术实现了商业化。这种方法是在石墨铸型的外部设置感应线圈,接50~60 Hz的工频电流,产生的交变电磁场对铝液产生搅拌作用。CREM的工业应用证明,这种工艺生产的铸锭,其晶粒尺寸是DC法生产铝铸锭(不加入任何晶粒细化剂)时的1/10,铸锭边部的偏析缺陷也基本消失,表面光滑,几乎消除了波纹等表面缺陷。

电磁铸造(EMC)是利用电磁场对金属材料的约束功能实现无模铸造技术的最好例证。这一技术在20世纪60年代初开发出来之后,先后在美国、瑞士等进行了大力推广,并形成工业化的生产能力^[14,15]。这种技术的独特优点是,液态金属不与铸型(模具)接触而凝固成形,铸坯表面质量好,几乎不需去皮加工,同时金属液体受电磁搅拌及强冷却水作用,晶粒细

小、成分偏析小。由于无模电磁铸造要求有很大的电磁力,这种技术主要应用到密度小、电导率大的铝、铜等金属及合金的生产中。目前,很多国家对该技术进行了深入研究并加以发展,生产和技术水平已实现了一机多锭,以及铸造过程计算机自动控制,能够进行多种软硬合金锭的铸造。

我国电磁铸造技术的研究也比较早,20 世纪 70 年代中期,东北轻合金加工厂便开始这方面的研究,并于 1982 年生产出铝合金圆锭,但因缺乏基础理论支持和系统的配套设备,工艺操作难度大,没有实现自动控制,致使这一技术实际上被搁置起来,未能在生产中发挥应有的作用。之后,东北大学开展了低频电磁铸造的研究工作,在实验室已经铸造出各种系列的铝合金,表面质量、内部组织以及力学和物理性能均有一定的改善,取得了一些有益的研究成果^[16~18]。

为了能够生产出内外质量都达到优良的铸坯,人们开始试图把电磁技术运用于连续铸钢的生产实践中。表 1-1^[19]列出了铝、铜和钢的物理参数以及实现电磁铸造时的一些主要技术数据。

表 1-1 铝、铜、钢电磁铸造主要参数的比较

项 目		铝	钢	铜
$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$		2400	7800	9600
$\sigma/\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$		1.1×10^7	7.14×10^5	4.7×10^7
δ/mm	$F = 1 \text{ kHz}$	8	7.1	19.5
	$F = 3 \text{ kHz}$	4.6	4.1	11.4
	$F = 10 \text{ kHz}$	2.5	2.2	6.2
$P/\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$	$H = 50 \text{ mm}$	12	38	34.5
	$H = 100 \text{ mm}$	24	78	69
	$H = 200 \text{ mm}$	48	156	138
B/T	$H = 50 \text{ mm}$	0.0540	0.0980	0.0920
	$H = 100 \text{ mm}$	0.0770	0.1390	0.1300
	$H = 200 \text{ mm}$	0.1090	0.1960	0.1840

注: ρ —密度; σ —电导率; δ —电流渗透深度; P —静压力(电磁压力); B —磁感应强度; F —磁场频率; H —液态金属高度。

由表 1-1 列出的铝、铜和钢的参数可以看出,钢的密度是铝的 3 倍多,使得钢电磁铸造所需的电磁力比铝大;钢的电导率小,在相同的电源参数下所产生的感应电流小,电磁力也就小。因此,获得相同电磁力,钢所需的电磁力是铝的 2.9 倍,需要的磁场强度是铝的 1.7 倍。其次,钢的熔点比铝的熔点要高得多,熔化潜热也很大,导致钢的凝固速度缓慢,加上钢的连铸速度通常为铝的几十倍,因此实现钢的电磁铸造,就需要对铸坯采取很高的冷却强度,从而增加了钢电磁铸造的难度。基于上述原因,科学家提出了在连铸结晶器外设置交流电磁场,通过结晶器壁面和电磁的作用力来共同约束钢液,达到减少钢液和结晶器壁面之间的接触压力,增大熔化的保护渣通道,减小了结晶器上下振动时对铸坯质量的影响,这样可以使液态金属处于一种被称作“软接触”的状态。

把电磁技术成功应用到连续铸钢生产中比较典型的例子是电磁搅拌(Electro Magnetic

Stirring, EMS) 和结晶器电磁制动 (Electro Magnetic Brake, EMBR)。电磁搅拌技术的实质是在电磁搅拌器的线圈内通以低频电流,产生变化的磁场,变化的磁场在金属液体中感应出感生电流,感生电流与磁场的相互作用,在钢液中产生洛伦兹力,借助这种电磁力驱动连铸坯内液态金属产生流动,从而改变金属熔体凝固过程中的流动、传热和传质过程,达到改善铸坯内部质量的目的。几十年来的连铸 EMS 实践表明,目前使用在方坯连铸机上的结晶器电磁搅拌技术,能够有效地改善铸坯的凝固组织。因此,这项技术受到了广泛的关注,在工业生产中得到了广泛的推广。这不但促进了电磁冶金理论和技术的进一步发展,而且这项技术的应用可以在不改变现有连铸设备的前提下,明显提高连铸坯的表面质量和内部质量。

最初在连续铸钢中应用的电磁搅拌采用的是工频电源供电。由于不需要变频设备,在旧式连铸机上配套使用有一定的优势,所以日本新日铁公司,从 20 世纪 80 年代末开始一直开展此项工作的研究,并取得了一些结果。他们在传统铜结晶器外部施加了 60 Hz 的工频电磁场,进行了不锈钢圆坯的连铸实验。实验结果表明,施加电磁场减轻了铸坯表面振痕,同时消除了一些元素的表面偏析。但是在现代的电磁搅拌中,无论是结晶器搅拌还是二冷电磁搅拌,都采用低频电源供电,极大地提高了电磁搅拌的效率,取得了良好的冶金效果。

电磁冶金在钢铁生产中应用的另一技术是结晶器电磁制动。它是在结晶器内的钢液上施加一个与铸流方向垂直的静态磁场。钢水在水口流出时,相当于一个良导体。当钢液在磁场中切割磁力线就产生感生电流,此电流与磁场相互作用,产生一个与流动方向相反的电磁力而使流速得到制动。其结果是减少了钢水对铸坯凝固面的冲击,防止了凝固壳的再熔化,减少了漏钢的发生。通过控制钢液对液面的扰动,减少或避免了夹杂物的卷入。同时,因钢水的冲击深度减小,有利于非金属夹杂物的上浮,提高了保护渣对夹杂物的吸收能力。目前国内外的一些设备制造公司已经开发出了结晶器电磁制动装置,并在一些企业中得到了应用。

1.3.1 电磁搅拌技术

现代连铸工艺虽然采用了浸入式水口、保护渣、气体保护等措施,使得铸坯质量得到很大改善,但是,直到采用了电磁搅拌技术,才可能对铸坯组织结构进行控制。扩大铸坯的等轴晶区,减轻铸坯的中心疏松、中心偏析和中心缩孔,是连铸电磁搅拌技术在连铸生产中得到广泛应用的重要原因^[20,21]。目前,电磁搅拌技术已经发展成为重要的连铸相关技术之一。搅拌方式也已由单一搅拌——结晶器搅拌 (M-EMS)、二冷区搅拌 (S-EMS) 和凝固末端搅拌 (F-EMS) 发展为组合式搅拌等多种方式。搅拌装置示意图如图 1-1 所示。此外,根据电磁力驱动熔体运动方式的不同,又可以分为旋转型搅拌和线型搅拌等。旋转型搅拌主要用于方、圆和宽厚比接近于 1 的矩形坯,对于板坯及宽厚比大的矩形坯则多采用线型搅拌,或称作

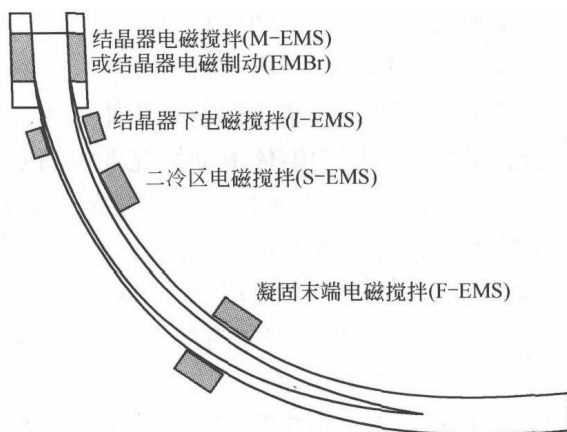


图 1-1 连铸电磁搅拌方式

行波搅拌。

电磁搅拌技术是利用不同形式的磁场发生装置,当连铸坯的液态金属通过交变电磁场时,在液态金属中产生感生电流,感生电流与磁感应强度的作用产生电磁力。通过电磁力来控制连铸过程中钢水的流动、传热甚至凝固,从而提高钢的洁净度,扩大铸坯的等轴晶区,降低成分偏析,减轻或消除中心疏松和中心缩孔,实现生产优质、高等级钢材的目的。根据电磁搅拌器安装位置的不同,主要有以下三种搅拌形式:

(1) 结晶器电磁搅拌(Mould Electro Magnetic Stirring, M-EMS)。这种形式的搅拌器安装在结晶器水套内部或外部(内置式或外置式结晶器电磁搅拌器),其作用效果是:提高拉坯速度,改善表面质量,清洁凝固壳表层气泡和夹杂,有利于减小过热度的影响,提高钢水洁净度,改善铸坯内部组织结构,增加等轴晶率等。

(2) 二冷区电磁搅拌(Secondary Cooling Electro Magnetic Stirring, S-EMS)。这种形式的搅拌器安装在二冷区。二冷区搅拌的主要效果是:消除柱状枝晶间的搭桥,减轻或消除中心疏松和中心缩孔,扩大等轴晶区,减轻中心偏析和内弧夹杂物的集聚。目前的生产实践和研究表明,只有将二冷区搅拌与末端搅拌结合起来,才能实现最佳效果。

(3) 凝固末端电磁搅拌(Final Electro Magnetic Stirring, F-EMS)。这是把搅拌器安装在钢液凝固末端的一种搅拌方式(糊状区)。此时,钢水成糊状,凝固壳较厚,一般采用低频电源。其主要效果是:降低中心偏析,减轻或消除中心疏松和中心缩孔等。目前的主要问题是:如何保证电磁搅拌器准确安装到指定凝固率的位置上,同时保证稳定的连铸工艺参数并与电磁搅拌工艺参数合理匹配。

1.3.1.1 电磁搅拌理论的研究

针对电磁搅拌的机理和应用,人们从多个方面开展了电磁搅拌理论的研究工作。计算机数值模拟技术是研究电磁搅拌过程的一种重要手段。T. Okimura^[22]采用数值模拟技术研究了弧形连铸机上 EMB_r 控制金属流动的原理和方法。K. Kariya, Y. Kitano, M. Kuga 等^[23]和 T. Takeuchi 等^[24]采用稳恒磁场对高速连铸机的钢液流动控制效果进行了模拟研究,取得了大量数据。在进行电磁搅拌计算机数值模拟时,人们主要关注电磁场的分布及电磁力的分布,并研究电磁场作用下流场的情况,取得了大量的研究成果^[25~27];同时,在对电磁场进行实验室和现场测定等研究方面,对理论研究结果的精度和方法以及它们的合理性进行验证和完善方面也做了大量的工作^[28~30]。黄军涛、赫冀成^[31]用数值模拟方法研究了方坯连铸二冷区电磁旋转搅拌问题,获得了电磁场的分布规律;李秋玲、邓康等^[32]则应用试验方法模拟了薄板坯水平连铸结晶器电磁搅拌过程;郭大勇、杨院生、童文辉等^[33]通过模拟技术分析和研究了在电磁驱动熔体流动情况下枝晶变形断裂的情况;张宏丽、王恩刚、贾光霖、赫冀成等^[34]则模拟和计算了电磁搅拌器的结构参数对钢液内电磁场和流场分布的影响规律;在现场试验方面,国内外学者对电磁搅拌过程也进行了大量的研究,有的已经应用于工业生产中。内蒙古科技大学研究人员^[35~38]首次对电磁搅拌过程进行了磁场和流场耦合计算,研究了不同相位电流作用下,铸坯内部磁场和流场的分布,而且还对凝固末端电磁搅拌进行实验研究,得出一些重要的结论。

随着连铸技术的不断发展及计算机的普及,数值模拟成为研究连铸过程电磁搅拌的有效手段,采用数值模拟方法进行电磁搅拌器结构设计和工艺参数的确定是一种简单而有效

的研究方法。

1.3.1.2 电磁搅拌的应用

从连铸电磁搅拌技术的发展历程来看,初期的电磁搅拌器主要是安装在二冷区。20 世纪 70 年代法国的东方优质钢公司进行了具有代表性的研究工作,证明了磁力线能够穿透铸坯凝固壳之后,世界各国对二冷区电磁搅拌技术的发展给予了极大的重视。而法国钢铁研究院对结晶器电磁搅拌开展了全面的研究,取得了大量成果,促使人们更多地研究和开发结晶器电磁搅拌技术。

工业应用和理论研究表明,结晶器电磁搅拌虽然具有扩大等轴晶带、减少偏析、净化钢水、去除非金属夹杂物、增大钢水和保护渣之间的接触面积、有利于将非金属夹杂物上浮转移到保护渣中等优点,但是,如果搅拌器的安装位置不够合理时,特别是当搅拌强度较大时,这些冶金效果则可能大打折扣。离心力的作用,可能在液面形成旋涡,使得型壁附近的金属液向上突起,中心的金属液面凹陷,这种情况会造成弯月面稳定性降低,阻碍润滑剂沿结晶器壁的流入,降低润滑效果。同时,如果发生中心涡流,还会将保护渣卷入金属液内部而产生夹杂缺陷^[39,40]。多年的生产实践表明,弯月面波动是造成连铸坯质量缺陷的关键因素。为此,很多研究工作者开始研究和解决这一问题,其中加拿大学者 L. Beitelman 和 J. A. Mulcahy 等设计了一种 M-EMS/AC-SM 双搅拌系统。其基本想法是,在结晶器下部设置一个主搅拌线圈(M-EMS),在弯月面区域设置一个辅助线圈(AC-SM),搅拌过程中给辅助线圈通以与下部搅拌线圈方向相反的电流。由于两线圈产生的电磁搅拌力方向相反,希望用辅助线圈削弱由于主搅拌线圈在弯月面区域带来的弯月面波动,起到稳定弯月面的作用^[41]。但是,法国 Rotelec 公司的实验研究发现,采用这种方法的效果不大,相反,还可能对铸坯质量产生负面影响。由此可见,电磁搅拌的作用效果受很多因素影响,深入研究电磁搅拌过程的作用机理是开发电磁搅拌器的基础。而研究瞬态电磁场、感应电流和电磁力的变化规律,掌握它们之间的相互作用和相互影响,同时考虑连铸坯冷却过程的温度场和凝固特点,是开发出高效实用电磁搅拌系统的基础。

电磁搅拌技术在我国的研究和开发始于 20 世纪 80 年代初,主要是对引进设备的消化和吸收,但研究进展比较缓慢,没有形成自己的研究体系和成套技术。进入 90 年代,钢铁企业先后从德国、意大利、加拿大等国引进了大量电磁搅拌设备,耗资数千万美元,一些电修厂和电磁铁厂对国外产品进行了修复和仿制,但由于这些企业规模小,研发能力弱,没有形成生产电磁搅拌系统的能力,在电磁搅拌新技术开发和应用方面与国外也有较大差距。1995 年以后,虽然国家对连铸电磁搅拌及电磁冶金技术进行了较大规模的投入,并一直将电磁冶金技术作为鼓励研究开发的领域。但是,理论研究与实际应用经常出现脱节情况。由于该技术牵涉到众多学科和技术(电磁理论、磁路设计、流动理论、凝固理论、连铸技术、变频技术和控制技术等),同时大多数电磁搅拌装置又是在现有连铸设备上进行配套安装,给企业开发制造电磁搅拌系统带来了不少困难。

目前,国内的电磁搅拌器制造厂家主要还是在过去仿制和修复国外产品的基础上,开发自己的产品。由于电磁搅拌器的应用领域不同,所要求的搅拌方式也不同,特别是在内置式搅拌器方面,大部分国内制造商还无法生产两相电源(相位差为 90°),所以无论是规模上还是技术上都未形成自己的优势,也没有形成大量有自主知识产权的系列产品。

电磁搅拌技术在钢铁工业中的应用已经有 30 多年的历史。无论企业应用电磁搅拌的效果如何,电磁搅拌在改善连铸坯质量方面的作用已经得到普遍认可。而中国成为 WTO 成员之后,中国钢铁工业也就成为世界各国关注的焦点。很多著名的国外企业进驻中国,推销自己的电磁搅拌技术和产品。目前,在电磁搅拌设计方面,无论是国内还是国外,都是推广应用重于基础研究和技术开发,基础研究方面的投入严重不足。因国内对引进设备的消化和吸收工作做得也不够理想,在我国的一些钢铁企业,存在着引进和国产的电磁搅拌技术及装置达不到预期效果或虽有冶金效果但不显著的现象。

电磁搅拌技术在理论方面和应用方面都是一个综合性问题,理论方面,它涉及电磁理论、金属学原理、流体力学、凝固理论等学科,使得这项技术的开发应用具有较大的困难,但其重大的经济和社会效益已被广泛认同。不少厂家认为电磁搅拌技术的应用未能达到预期的效果,虽有冶金效果但不显著,难以转化为现实的经济效益。其主要原因是:由于电磁搅拌器为非标准的机电一体化设备,需按照连铸机现有设备和工艺条件进行工业设计,必须进行对用户设备的评估→设计→制造→安装→调试的一条龙服务,才能发挥出电磁搅拌的作用,电磁搅拌器是以用户为中心的产品,电磁搅拌技术的应用也把装备制造厂家的产业链从装备制造业向服务业进行了延伸。工厂中的技术人员除了掌握连铸技术之外,还应了解电磁搅拌过程中磁场的作用规律,这样才能更好地使用电磁搅拌装备。

1.3.2 电磁制动技术

电磁制动(EMBr)这一技术及名词是由 S. Kollerg 在 1982 年英国伦敦举行的第四届国际钢铁会议上最先提出的。它是日本川崎钢铁公司(Kawasaki Steel Corporation)和瑞典 ASEA 公司联合开发的,并在川崎钢铁公司 Okayama 钢铁厂的 5 号板坯连铸机上进行了试验,接着又将这项技术应用于川崎公司的其他连铸机上,收到了良好的冶金效果。近年来,电磁制动技术(Electromagnetic Brake, EMBr)在连铸中的应用得到了飞速的发展。在薄板坯连铸中,从浸入式水口喷出的钢液流速很大,这样就使得结晶器内的钢液产生剧烈的湍流,产生卷渣现象,而且使得射流流股对结晶器壁冲击剧烈,有使窄面凝固壳重熔的危险。另外,流股的穿透深度也很大,使一些夹杂物来不及上浮就卷进正在凝固的凝壳中,这些对板坯的表面质量及内部质量均有很大的影响。在结晶器上加静态磁场可以控制结晶器内的钢液分布,使钢液流速合理,以达到良好的冶金效果。随着连铸机向重型化和大型化发展,结晶器内流动控制变得更加重要,电磁制动技术在未来必将得到越来越多的应用。

国外冶金工作者就磁场对结晶器中钢水流动行为的影响进行了很多的研究。Hackl 等人通过往连铸钢液中加入一个难熔的圆形物体,采用已用水模校准的仪表来测定圆形物体上的压力来反映电磁制动后结晶器弯月面流体流动的速度;采用将无磁不锈钢片插入结晶器弯月面来比较电磁制动后弯月面液面波动的情况。Tho 和 Takeuchi 认为,结晶器中钢液的流动决定了最终产品的质量。Tkaat 认为,交变的磁场用来搅拌钢液,静态的磁场用来控制钢液的流动。Mosrihaa 等报道了电磁制动的影响,结晶器中钢水从弯月面的渗透深度从 1500 mm 减小到 900 mm;同时,夹杂物也减少了 50% 左右。另据报道,采用电磁制动后结晶器液面波动可控制在 ± 2 mm。近年来,国内也开展了有关薄板坯结晶器电磁制动技术的基础研究工作。李宝宽^[42]等采用模型实验结合数值模拟的方法分析了薄板坯连铸结晶器内的电磁制动过程。吕伟^[43,44]等以 500 mm × 70 mm 薄板连铸机结晶器为研究对象,依据电磁

流体力学理论,建立二维数学模型,使用交错网格及数值分析方法,分析了薄板坯结晶器在恒定磁场作用下的钢水流动特性。吕伟等以锡作为模拟合金,测定了有无电磁制动条件下结晶器内液流的二维速度分布,实验结果表明,电磁制动对于减少液面波动、改善薄板坯连铸结晶器内的流场有明显效果。

参考文献

- [1] Sundberg Y. Metallurgical applications of magneto-hydrodynamics [A]. Proceedings of a symposium of the IUTAM [C], 1984:217-225.
- [2] Yamamoto H, et al. Proceedings of the 6th International Iron and Steel Congress [C], Nagaya, Japan, 1990, 3: 478-486.
- [3] Kunstreich S, Nove M C, Yves D. In-mold double stirring system in continuous casting: effect of two counter rotating magnetic fields [A]. Proceedings of ISEPM [C], 1997:355-365.
- [4] 论文集编写组. 21 世纪前叶冶金装备发展及对策讨论会论文集 [C], 北京:冶金工业出版社,1998.
- [5] 金俊泽,李廷举. 材料电磁加工新进展 [A], 2000 国外材料科学与工程发展动向研讨会论文集 [C], 大连:(中国材料研究学会), 2000:79-83.
- [6] 张寿荣. 关于 21 世纪我国钢铁工业的若干思考 [J], 炼钢, 2002, 18(2): 5-10.
- [7] 殷瑞钰. 中国钢铁业发展与评估 [J], 金属学报, 2002, 38(6): 561-567.
- [8] 韩至成. 电磁冶金 [A]. 反应工程学和有色金属冶金学术会议论文集 [C], 北京:中国金属学会, 1993:76-91.
- [9] 李宝宽,赫冀成. 电磁力在钢精炼和连铸中的应用——电磁流体力学的冶金应用研究十年回顾和展望 [J]. 材料与冶金学报, 2003, 2(4): 246-252.
- [10] 干勇,仇圣桃. 先进钢铁生产流程进展及先进钢铁材料生产制造技术 [J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(z1): 25-29.
- [11] Getselev Z N. Method of continuous and semi-continuous casting of metals and plant for same [P]. US. Pat. 3467166, 1969.
- [12] Beitelman L, Mulcahy J A. Continuous casting of steel billets with an in-mold dual-coil electromagnetic stirring system of magnetic field. improvement of surface quality of steel by electromagnetic mold. ISEPM, Paris, ISIJ, 1997:335-341.
- [13] Vives C. Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process [J]. Metall. Trans. B., 1989, 20B(5): 623-629.
- [14] Getselev Z N. Casting in an electromagnetic field [J], J. Metals, 1971, 23(10): 38-41.
- [15] Getselev Z N. Production of continuously cast shapes using electromagnetic forming [J]. British Foundryman. 1973, 66(2): 56-57.
- [16] 李建超,麻永林,王宝峰,等. 低频电磁铸造铝合金结晶器材料对磁场的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2005, 25(3): 133-135.
- [17] 秦克,崔建忠. 磁调质 A356 合金的组织研究 [J]. 轻合金加工技术, 2005, 33(11): 17-19.
- [18] 李建超,崔建忠,王宝峰,等. 低频电磁铸造 6063 铝合金的数值模拟和试验研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(2): 87-89.
- [19] 韩至成. 电磁冶金学 [M], 北京:冶金工业出版社, 2001:168.
- [20] 麻永林,王宝峰,李保卫,等. 扇形段电磁搅拌对 U71Mn 重轨钢质量的影响 [J]. 钢铁, 2006, 41(2): 23-25.
- [21] 赫冀成. 电磁场对改善钢材质量的作用 [J]. 钢铁, 2005, 40(1): 24-30.

- [22] Okimura T, et al. Flow control of molten steel by EMBr ruler in the curved mold continuous caster at Kure Works [A]. International Symposium on Electro-magnetic Processing of Materials [C], Paris, ISIJ, 1997: 37.
- [23] Kariya K, Kitano Y, Kuga M, et al. Development of flow control mold for high speed casting using static magnetic fields [A]. The 7th Steel Making Conference Proceedings [C], Chicago: The Iron and Steel Society, 1994: 53.
- [24] Takeuchi T, Zeze M, Tamaka H, et al. Novel continuous casting process for clad steel slabs with level DC magnetic field [J]. Ironmaking and steelmaking, 1997, 24(3): 257-263.
- [25] 舍克里, 著. 彭一川, 等译. 冶金中的流体流动现象[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985.
- [26] 韩至成, 编译. 电磁流体力学在冶金工业中的应用[J]. 国外钢铁, 1987, (6): 24-39.
- [27] 贾光霖, 庞维成, 编著. 电磁冶金原理与工艺[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2003.
- [28] 麻永林, 宿国栋, 黄海娥, 等. 板坯行波电磁搅拌器磁场分布规律的实验研究[J]. 包头钢铁学院学报, 2005, 24(3): 224-226.
- [29] 张森林, 冯军, 陈伟庆, 等. 小方坯连铸 F-EMS 的试验研究[J]. 钢铁, 2004, 39(增刊): 134-137.
- [30] 周德光, 傅杰, 王平, 等. 工艺参数对连铸轴承钢坯碳偏析的影响[J]. 钢铁, 1999, 34(6): 22-26.
- [31] 黄军涛, 赫冀成. 方坯连铸二冷区电磁旋转搅拌数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2001, 13(5): 19-23.
- [32] 李秋玲, 邓康, 李伟轩, 等. 薄板坯水平连铸结晶器电磁搅拌的模拟实验研究[J]. 上海金属, 2005, 27(6): 35-39.
- [33] 郭大勇, 杨院生, 童文辉, 等. 电磁驱动熔体流动与枝晶变形断裂模拟[J]. 金属学报, 2003, 39(9): 914-919.
- [34] 张宏丽, 王恩刚, 贾光霖, 等. 搅拌器的结构参数对钢液内电磁场和流场分布的影响[J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(4): 10-15.
- [35] 李建超, 崔建忠, 王宝峰, 麻永林. 大方坯连铸跨结晶器电磁搅拌的数值模拟[J]. 东北大学学报, 2006, 27(5): 497-500.
- [36] 李建超, 崔建忠, 王宝峰, 麻永林. 小方坯结晶器电磁搅拌的数值模拟, 炼钢, 2007, 23(1): 35-39.
- [37] 李建超, 王宝峰, 董方, 等. 电磁场相位对小方坯结晶器电磁搅拌效果的影响[J]. 连铸, 2007, (1): 43-46.
- [38] 李建超, 崔建忠, 王宝峰, 麻永林. 大方坯连铸二冷区电磁搅拌的数值模拟和实验分析[J]. 金属热处理, 2007, 32(8): 69-71.
- [39] 马国军, 茅洪祥, 陈崇峰. 连铸结晶器电磁搅拌对夹杂物的影响[J]. 云南冶金, 2000, 29(2): 50-53.
- [40] 刘金刚, 刘浏, 王新华. 中间包夹杂物的去除与控制新技术[J]. 炼钢, 2006, 22(2): 30-33.
- [41] Beitelman L. Flow control in the meniscus of continuous casting mold with an auxiliary A. C. magnetic field [J]. ISEPM, 1994, 235-241.
- [42] 李宝宽, 赫冀成, 贾光霖, 等. 薄板坯连铸结晶器内钢液流场电磁制动的模拟研究[J]. 金属学报, 1997, 33(11): 1207-1214.
- [43] 吕伟, 程云阶, 贾光霖. 薄板坯连铸结晶器电磁制动的数值模拟[J]. 沈阳航空工业学院学报, 1998, 15(4): 15-21.
- [44] 吕伟, 张大千, 刘成贾, 等. 薄板坯连铸结晶器电磁制动的热模拟实验[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2002, 19(3): 9-11.