

上海大学出版社

2005年上海大学博士学位论文 60



EMBr对CSP结晶器内冶金 过程和铸坯质量的影响

- 作者：刘光穆
- 专业：钢铁冶金
- 导师：邓康 任忠鸣



上海大学出版社

5年上海大学博士学位论文 60



EMBr对CSP结晶器内冶金过程和铸坯质量的影响

- 作者：刘光穆
- 专业：钢铁冶金
- 导师：邓康 任忠鸣



Shanghai University Doctoral
Dissertation (2005)

Influences of EMBr on Metallurgical Behavior and Slab Quality in CSP Processes

Candidate: Liu Guangmu

Major: Ferro-Metallurgy

Supervisor: Deng Kang Ren Zhongming

Shanghai University Press

• Shanghai •

摘 要

本研究以目前世界上最先进的第二代 CSP 连铸技术为研究对象,通过水力学模拟来分析无电磁制动时结晶器内钢水流动的流场,通过数值模拟和现场试验来研究电磁制动对结晶器内冶金过程及铸坯质量的影响,优化电磁制动工艺参数,达到提高铸坯质量的目的,为进一步提高 CSP 铸坯质量提供理论基础。

水力学模拟表明:结晶器内钢水的冲击深度可达 800~1 000 mm,形成大范围的回流和涡流,使进入结晶器的夹杂物颗粒难以上浮。即使采用相同规格的水口,不同断面钢液的流态也有很大区别。为减少结晶器内钢液的不稳定和旋涡、回流等卷渣行为,改善其冶金过程,除优化浸入式水口结构外,还必须采用电磁制动等手段来达到进一步改善铸坯质量的目的。

围绕电磁制动数值模拟,本文首先利用动量原理,将钢水在结晶器壁面或铸坯凝固初凝壳前沿的动量转换为对固体界面的冲量,进而推出钢水对结晶器内壁或铸坯初凝壳冲击作用的半定量分析方法和模型: $F_x/S = \rho V_x^2 - \sigma V_x B_y^2 \cdot \Delta x$ 。其次,通过有、无电磁制动条件下,结晶器中钢水流场之间的速度差和湍动能差给出电磁制动使钢水减速和湍动能降低的幅度和区域,以此来评判电磁制动的效果。再者,对于钢水对结晶器内壁和铸坯初凝壳的冲刷作用,本文直接采用牛顿流体的内摩

擦剪力模型 $\tau = \mu \frac{\Delta V_z}{\Delta x}$, 作为半定量方法来分析固体壁面所承受钢水冲刷的位置和相对强度。

针对钢水液面波动导致钢水表面卷渣问题, 本文研究证明, 液面的水平流速过大并偏流, 导致在水口两侧产生的绕流涡流是卷渣的直接原因, 而电磁制动可有效防止这种随机的表面涡流。

本文对 4.5 m/min 拉速、1500 mm×70 mm 断面的 CSP 连铸数值模拟表明, 电磁制动使钢水注流的冲击深度减小 45%, 并在液面以下 500~700 mm 发展为稳定的一维层流, 有利于提高铸坯拉速、防止拉漏和纵裂; 钢水液面的水平流速明显降低且无偏流, 使水口两侧无涡流卷渣; 钢水在结晶器窄边的回流流量比无电磁制动时增加 4.4%, 有利于夹杂物上浮和表面化渣; 使钢水注流对结晶器窄边(最大)冲击位置上升 40%, 上升流的冲刷强度下降了 86%, 下降流的冲刷强度下降了 10%, 这利于避免发生铸坯初凝壳被钢水热流重熔等现象, 从而减少铸坯横裂等凝固缺陷。

在湖南华菱涟钢生产现场, 对同一炉钢、同样拉速(4.5 m/min)下, 使用与关闭 EMBr 的坯段, 分别取样作对比分析来验证电磁制动对结晶器内冶金过程和铸坯质量的影响。结果显示: 与未采用 EMBr 相比, 铸坯中显微夹杂总量降低了 6.9%, 其中铸坯中心区域夹杂数量降低了 15.6%; 对大型夹杂物来说, 电磁制动使 200~300 μm 夹杂降低了 15.9%, 300~400 μm 夹杂降低了 30.2%, 大于 400 μm 的夹杂降低了 39.1%。电磁制动使弯月面钢水温度平均上升 5.8 $^{\circ}\text{C}$, 使弯

月面波动的幅度平均下降了 16%。现场工业试验证明,本文数值模拟正确地预测了生产中的工艺问题和操作结果,与实际使用效果有很好的一致性。采用本文研究的电磁制动参数和关键工艺,在试生产和正常生产中都取得热轧板优等品率等质量指标提高,边裂等铸造缺陷率下降,漏钢率降低,铸坯表面质量改善的效果,推动了 CSP 连铸电磁制动技术和工艺的开发、优化及自主创新。

最后,本文对 $1500\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 断面、在 5.5 m/min 高拉速条件下的 CSP 连铸电磁制动工艺进行了技术基础研究。按照制动电流 0 A , 220 A , 250 A , 280 A 和 300 A 五种情况进行了数值模拟。结果表明,在 5.5 m/min 高拉速条件下,未经电磁制动的钢水在结晶器中的冲击深度超过 1 m ,水口下方形成了强烈的回流和涡流区域;对结晶器的最大冲击强度达到 85 N/m^2 ,其作用点为液面下 0.55 m 处,冲击区域的宽度约 0.35 m ;同时液面流场呈偏流,在浸入式水口两侧有明显涡流。而在施加 $220\sim 300\text{ A}$ 制动电流时,钢水注流的冲击深度低于 0.5 m ,对结晶器的最大冲击点在液面下 0.3 m 位置,当制动电流 300 A 时,钢水冲击区域的宽度为 0.2 m 。同时,水口下方的涡流及回流的范围降低,液面偏流基本消除,钢水自结晶器窄面至中心的流场相对均匀。与无电磁制动的情况相比,此时钢水减速和湍动能降低幅度最大的区域在注流末端,表现为钢水涡流强度下降,对结晶器窄面内壁或铸坯初凝壳无直接冲击。在本文模拟的电磁制动条件下,钢水在结晶器内 0.3 m 深度处已基本无上升流,在 0.6 m 深度处流速分别已基本平均,呈现为稳定的一维层流。就上述电磁制动效果而言,电流 300 A 比

200 A 的制动效果更明显,因此,在高拉速下,宜采用 300 A 以上的电流进行电磁制动。

关键词 CSP 连铸,电磁制动,水力学模拟,数值模拟,铸坯质量

Abstract

In this study, the effect of EMBr on steel flow behavior and interaction with mold slag were investigated for the worldwide advanced second generation CSP caster at Lianyuan Steel. The steel flow pattern without EMBr was analyzed by means of water model simulation. Numerical simulation was conducted to understand and optimize the metallurgical factors of EMBr on slab quality and productivity.

The results of water model simulation on submerged entry nozzle (SEN) and mold indicated that the steel flow pattern was quite different for wide and narrow mold sizes with the same SEN. The penetration depth reached up to 800~1 000 mm. Flow turbulence and back-flow at large area were formed so that the inclusions in liquid steel is difficult to float up, and that obvious level fluctuation resulted in slag entrapment. Therefore, with regard to different slab sizes, the design of submerged entry nozzle should be optimized to reduce steel flow turbulence and slag entrapment etc. In addition, EMBr is a necessary measure to improve slab quality.

With regard to numerical simulation, both semi-quantitative methods ($F_x/S = \rho V_x^2 - \sigma V_x B_y^2 \cdot \Delta x$ and $\tau = \mu \frac{\Delta V_z}{\Delta x}$) were presented to analyze the impact of steel flow on

the inner wall and initial solidified shell and to describe the effect of EMBR with the subtraction of casting speed and turbulent kinetic energy. The results of numerical simulation indicated that over-high speed of horizontal steel flow and bias-flow resulted in turbulence flow around SEN and consequently entrapment of slag occurred. EMBR can effectively prevent from random turbulence flow on the surface.

Numerical simulation was performed for the slab size $1\ 500 \times 70$ mm at the casting speed of 4.5 m/min to analyze the steel flow behavior with EMBR. The results showed that the penetration of steel flow into the mold was reduced by 45% compared with that without EMBR and that the steel flow was developed into a one-dimensional stable laminar flow below 500 ~ 700 mm, which is facilitated to increase casting speed and prevent from breakout and longitudinal cracking. Steel flow velocity on horizontal direction was remarkably reduced on the steel surface and no abnormal steel flow was formed so that no slag entrapment occurred around SEN. Additionally, the flowrate of back-flow increased at the narrow face, by 4.4% compared with that no EMBR, to promote inclusions to float up and mold fluxes to melt. The numerical simulation of steel flow in the mold with EMBR demonstrated that impact point goes up by 40% at narrow face and that impact intensity of up-flow and down-flow decreased by 86% and 10%, respectively, which is beneficial to avoid the re-melting of the solidified shell so that

solidification defect such as transverse crack can be reduced.

In order to check the effect of EMBr on the metallurgical process and slab quality, industrial test was conducted at Lianyuan Steel under the constant condition, that is, the test was performed for the same steel grade at 4.5 m/min casting speed in one casting sequence. The results pointed out that (1) total number of inclusions in slab was decreased by 6.9%, among which the amount of inclusions at the slab center was decreased by 15.6%; (2) the amount of large inclusions ranging 200~300 μm , 300~400 μm and larger than 400 μm was reduced by 15.9%, 30.2% and 39.1%, respectively; (3) the temperature at meniscus was increased by 5.8 $^{\circ}\text{C}$; and (4) mold level fluctuation was reduced by 16.0% on an average. The production data also showed that breakout ratio was reduced, production became stable and smooth, the quality of slab and steel strip were enhanced, and quality indexes were improved.

Finally, the investigation on EMBr was conducted for the slab size 1 500 \times 70 mm at the casting speed of 5.5 m/min. Numerical simulation was done with electric current being 0 A, 220 A, 250 A, 300 A respectively. The results indicated that better effect of EMBr can be realized with electric current being larger than 300A, under which slab quality can match that at the casting speed of 4.5 m/min.

Key words CSP, EMBr, water model, numerical simulation, slab quality

前 言

钢铁是国民经济的基础材料,其工艺流程对生产成本、产品质量、资源消耗、投资效益等经济技术指标有重要的影响。薄板坯连铸连轧由于其生产流程短、单位投资低、能耗低等特点备受钢铁界的青睐。但由于其铸坯厚度薄,为达到经济产量必须提高拉速,因此其拉速远远大于一般的板坯连铸机,同时薄板坯结晶器由于开口度小,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,液面波动相当剧烈,很容易产生卷渣等现象,而且使得射流流股对结晶器壁冲击剧烈,有使窄面凝固壳重溶的危险。同时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,这些对薄板坯的表面质量及内部质量均有很大的影响。由于在结晶器上加静态磁场可以改善结晶器内的流场,使钢液流速合理,冶金效果好,因而随着连铸拉速的增加及对薄板坯质量要求的提高,电磁制动技术得到了越来越多的应用。以 CSP 为代表的薄板坯连铸连轧技术经过十多年的发展和改进,通过采用 EMBr 等手段已由生产中低档次产品,发展到能生产电工钢、奥氏体不锈钢等高档次产品。

目前,薄板坯连铸连轧已逐步进入成熟期,工艺技术、设备配置的基本框架已经形成,装备的国产化、技术的创新、品种的扩大、产品质量的提高等日益受到重视。今后一段时间,该技术的发展和完善将主要是围绕优化工艺参数,改善在线检测和

控制能力,提高产品质量,开发高新品种等方面开展工作。本文围绕湖南华菱涟钢引进的 CSP 连铸连轧装备,通过钢水浇注的全尺寸水力学模拟和电磁制动下钢水流场的数值模拟,并配合部分关键数据的在线测试等工作,研究 CSP 连铸过程中电磁制动对结晶器内钢水流动、液面波动、涡流、卷渣等行为,以及夹杂物的去除效果和对铸坯质量的影响。在此基础上制定电磁制动工艺参数,实现生产稳顺,提高铸坯质量,并为进一步优化和改进高拉速下的电磁制动工艺提供理论依据与技术基础。

目 录

前言	1
第一章 文献综述	1
1.1 薄板坯连铸连轧工艺的发展概况	1
1.2 薄板坯连铸工艺和技术的特点	2
1.2.1 薄板坯连铸的几项重要技术	2
1.2.2 薄板坯连铸工艺的特点	9
1.3 薄板坯质量	9
1.3.1 纵裂	9
1.3.2 横裂	10
1.3.3 表面皮下氧化物	11
1.3.4 振痕	11
1.4 浸入式水口对结晶器流场及其铸坯质量的影响	12
1.5 电磁制动对结晶器流场及其铸坯质量的影响	14
1.6 电磁制动对结晶器中铸坯初生坯壳的影响	15
1.7 电磁制动对于钢水中夹杂物去除的影响	15
1.8 磁场在金属凝固方面的研究及应用	16
1.9 本文的研究要点	18
第二章 CSP 连铸结晶器水力学模拟实验	19
2.1 CSP 连铸结晶器的水力学模拟实验装置	19

2.1.1	模拟实验装置及尺寸	19
2.1.2	相似准数	19
2.1.3	水口	20
2.2	实验方法及条件	20
2.2.1	模型液流量的测定	20
2.2.2	流态拍摄与流速测定	21
2.3	实验结果	21
2.4	结果分析	24
2.5	小结	25
第三章	EMBr 对 CSP 结晶器内钢水流场的影响	26
3.1	钢水流动及电磁制动的数学与计算模型	26
3.2	CSP 连铸中钢水流动和电磁制动的数值模拟	29
3.3	数值模拟的结果与讨论	32
3.3.1	无电磁制动时钢水的流动	35
3.3.2	有电磁制动时钢水的流动	39
3.3.3	有无电磁制动时钢水流态的比较	41
3.4	结晶器内钢水液面波高的现场测试及分析	47
3.4.1	试验条件	47
3.4.2	实验方法	47
3.4.3	试验结果分析	50
3.5	小结	51
第四章	EMBr 对 CSP 结晶器内夹杂物运动的影响	52
4.1	结晶器内夹杂物颗粒运动的数学模型	52

4.2	结晶器内钢水内部非金属夹杂物颗粒的运动	54
4.3	夹杂物颗粒运动轨迹的统计结果	55
4.4	现场试验	56
4.4.1	试验条件	56
4.4.2	试验结果	57
4.5	现场试验结果的对比分析	70
4.6	小结	70
第五章	EMBr 对坯壳冲击和弯月面温度的影响	72
5.1	EMBr 对凝固初始坯壳冲击的影响	72
5.1.1	钢水注流对铸坯凝固初始坯壳冲击的强度 模型	72
5.1.2	结晶器内壁或凝固初始凝壳受钢水注流冲击的 比较	74
5.1.3	结晶器内壁或凝固初始凝壳受钢水流动冲刷的 比较	75
5.2	EMBr 对弯月面温度的影响	76
5.3	EMBr 对结晶器内钢液热流密度的影响	80
5.4	对比分析	84
5.5	小结	85
第六章	高拉速下 EMBr 工艺探索	86
6.1	高拉速下电磁制动对结晶器内钢水流场的影响	86
6.2	高拉速下电磁制动对钢水流速的影响	88
6.3	钢水对结晶器窄面的冲击	92

6.4 小结	93
第七章 EMBr 工艺参数及 EMBr 对铸坯质量的影响	94
7.1 EMBr 工艺参数	94
7.2 EMBr 对铸坯质量的影响	96
7.3 小结	97
结论	99
本文工作的创新点	102
附录一 中文符号说明	104
附录二 波谷、波峰情况对比基础数据	105
附录三 结晶器弯月面温度对比基础数据	128
参考文献	233
在学期间研究成果	245

第一章 文献综述

1.1 薄板坯连铸连轧工艺的发展概况

薄板坯连铸连轧工艺包括西马克的 CSP 工艺、德马克的 ISP 工艺、达涅利的 FTSR 工艺和奥钢联的 CONROLL 工艺等^[1], 到目前为止, 国内外已建成和正在建设的薄板坯连铸连轧各类生产线已经超过 50 条^[2-4]。至 2002 年止, 全世界已建成的薄板坯连铸连轧生产线年生产能力达 3 900 万吨^[5]。

CSP(Compact Strip Production)亦即紧凑式热带工艺是由施勒曼-西马克公司开发的一种薄板坯连铸连轧工艺, 与传统板带生产相比, CSP 生产线具有流程短、投资少、生产成本低、能耗小等突出优点, 具有很大的适应性和竞争力^[6,7]。自 1986 年西马克公司与美国纽柯钢铁公司签订 CSP 薄板坯连铸连轧技术的工艺化合同, 1989 年 7 月世界第一条生产热轧板卷的 CSP 生产线诞生以来^[8], 其推广应用的速度很快, 据统计 1999 年全世界 CSP 生产线占薄板坯连铸连轧生产线的 70%, 占世界钢产总量的 5%, 预计 2013 年将上升到 50%, 而美国 CSP 热轧板在 2004 年就达到其国内钢产总量的 50%^[9]。

1992 年我国在兰州钢厂建立了第一条薄板坯连铸连轧工艺试验线, 薄板坯断面为 (50~70) mm×1 000 mm, 采用漏斗形和平板形两种结晶器, 经过了一系列连铸试验, 效果良好, 由于资金等方面的原因, 连轧系统没有连上, 虽有计划但没有形成连铸连轧作业线。

1998 年我国第一条薄板坯连铸连轧生产线在珠江钢铁公司投产, 此后邯钢、鞍钢、包钢 3 条薄板生产线陆续投入生产并配套完善,