

· 工艺与技术 ·

生产高清洁度钢水的磁流体力学技术

毛 斌

(中国科学院力学研究所)

提要:本文综述了生产高清洁度钢水的一些磁流体力学技术,包括钢包精炼的电磁搅拌、离心分离型中间罐、中间罐通道式感应加热、结晶器电磁制动、结晶器电磁稳流和电磁加速等等,着重描述了其技术特征和夹杂物的去除机制。工业应用表明,这些磁流体力学技术对生产高清洁度钢水和高质量的最终产品都具有良好的效果。

Magnetohydrodynamic techniques for production of high cleanliness molten steels

Mao Bin

(Institute of Mechanics Chinese Academy of Science)

Abstract: In this article, a review was presented of Magnetohydrodynamic (MHD) techniques for the productions of high cleanliness molten steel, which include ladle electromagnetic stirring, centrifugal flow tundish (CFTundish), Tundish channel induction heating, Mold electromagnetic brake (EMBr), Mold electromagnetic level stabilizer (EMLS) and electromagnetic level accelerator (EMLA) etc, their technical characteristics and inclusion removal mechanisms were also emphasized. The industrial applications have demonstrated some good effects on the productions of high cleanliness molten steel and high quality products.

前 言

生产高清洁度钢水是钢铁工业发展的必然趋势。这种钢水的生产要求能非常谨慎地控制其中的化学和物理过程。基于钢水中夹杂物的动态行为通常起因于与钢水中的密度差产生的移动、温度差引起的热对流、布朗扩散和湍流扩散、速度梯度中升力引起的泳动、向异相界面的附着以及电磁力产生的移动等有关机制,因而控制这些过程的方法便是多种多样了。与其他方法相比,磁流体力学方法更具应用潜力,已成为影响这些过程的非常有效的手段。

磁流体力学(MHD—Magnetohydrodynamics)是研究导电液体(熔融金属、半凝固金属)在电磁场作用下的运动规律的一门边缘学科。在此基础上建立的应用技术称磁流体力学技术,在冶金方面的则称电磁冶金技术。其基本特点是:

* 借助电磁感应将能量无接触地转换成导电

流体的动能和热能;

* 由于电磁场可以人为控制,因而可以人为地控制导电液体的流动形态,包括其强度和方向。

因此,MHD技术具有能量的高密度性和清洁性、优越的响应性和可控性、易于自动化及能量利用率高等优点,在冶金工业特别是连续铸钢上具有广阔的应用前景。

本文拟循着连铸工艺过程简述一下获得高清洁度钢水的一些磁流体力学技术。

1 钢包精炼的电磁搅拌技术^[1-2]

为连铸提供清洁的钢水,钢包精炼是一个重要环节。目前,精炼方法主要有吹气搅拌和电磁搅拌。将两者数值模拟的流动形态相比较:吹气搅拌的流场在接近卷流区更强烈些,在包底的角部有较大的滞止区;而电磁搅拌则能使整个钢包内的钢水达到

湍流均匀,不会在包底出现死区,在自由面处不会出现喷溅,不与钢水接触也不会有任何外来气体滞留在钢水内,搅拌功率和方向易于调整,而且还耐用。

图1表示钢包精炼期的脱氧机理:钢水中生成的大量夹杂物,由于搅拌,经由接触、聚合、增大、上浮,而后被熔融渣吸收。这样周而复始,此后残留在钢水中的夹杂物就变得很少了。

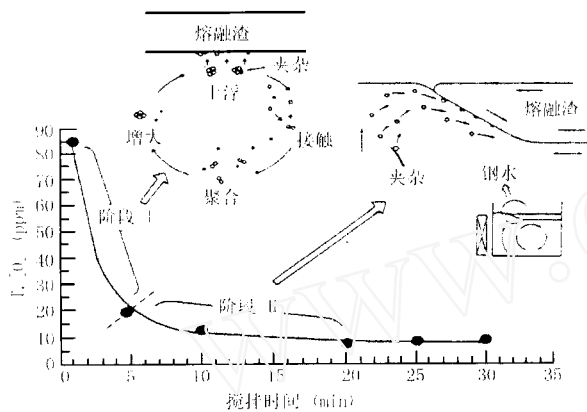


图1 总含氧量与电磁搅拌时间的关系
和夹杂物去除机理

80吨轴承钢的电磁搅拌实践表明,采用单个行波磁场搅拌器,在脱氧初期(约5分钟),含氧量迅速降低,脱氧率高,并形成大型夹杂物经由电磁搅拌去除。此后随着搅拌时间延长,脱氧率慢慢降低,但残留在钢水中的夹杂物几乎都能被去除。

2 离心分离型中间罐^[3-5]

近年来,为了更有效地降低钢水中外来夹杂物,提高铸坯质量特别是钢包交换期的铸坯质量,以及降低二次精炼费用,日本川崎公司开发了新型高效的中间罐的钢水净化技术,即基于电磁力的离心分离型中间罐(CF Tundish-centrifugal flow tundish)。

图2是离心分离型中间罐的示意图。其特征是将中间罐分隔成两个室:分离室和分配室。在分离室的外侧配置一台半圆形行波磁场搅拌器,其下部与分配室相连。CF中间罐中夹杂物的分离机制是借助电磁感应在钢水中产生水平移动的电磁力,使钢水产生水平旋转。由于水平旋转,钢水中轻的夹杂物受向心力的作用向中心集中上浮、分离;与此同时,由于旋转搅拌,促进夹杂物的接触、聚合而增大,使其更易于上浮、分离;由于旋转流动产生的二次流,阻碍了重力方向的流动,改善了钢水滞留时间分布,大幅度地促进了在钢包交换期内渣子的上浮分

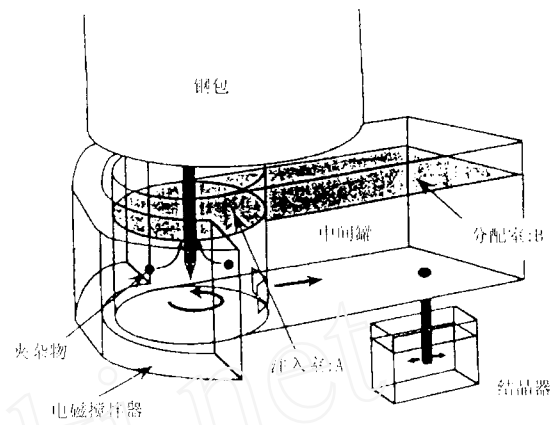


图2 离心分离型中间罐示意图

离,从而大大地提高了中间罐内钢水的清洁度。

日本川崎公司先在千叶厂1号连铸机的10吨中间罐上进行了工业试验,得到脱氧和渣子分离的良好效果。无论是稳定浇铸期或是钢包交换期,板坯的 $[O]_T$ 至少减少一半以上,而且随转速提高, $[O]_T$ 相应地降低。其后在新建的4号立弯式板坯连铸机的30吨中间罐上实施工程化,用于超净不锈钢的高速连铸。实机使用表明,采用CF中间罐,含Al不锈钢的板坯中总含氧量降低一半,夹杂物的总量也减少一半,使热轧和冷轧卷板的缺陷降低到通常中间罐的60%,最大拉速可增加到1.6m/min,从而使制造高质量的不锈钢卷板成为可能,见图3。

3 中间罐通道式感应加热技术^[6-10]

中间罐通道式感应加热技术已为人们所熟悉,而其伴生的夹杂物分离效果尚不为人们所充分了解。

中间罐通道式感应加热装置根据感应器和通道的设置不同可分为单通道、双通道和三通道式。不管哪种形式,中间罐被通道隔墙分隔成钢包注入钢水的注入室和分配室。其工作原理类似一台变压器,多匝线圈相当于变压器的原边,通道中流动的钢水相当于付边。根据变压器的工作原理就能将原边中提供的电能通过电磁感应转换成付边即钢水中的热能和动能。

在通道式感应加热中间罐的钢水中,夹杂物的分离机制是:

1) 从钢包注入的钢水经通道感应加热后,温度上升而密度减小,当其流出通道后,形成有利于夹杂物和气泡上浮的上升流动。

2) 由于流经通道的感应电流与其感生磁场的相互作用产生指向中心的箍缩力,使钢水向中心箍缩,而悬浮在钢水中较轻的夹杂物受到与箍缩力相反方向力的作用,使其聚集,当其流经通道时或被通道壁吸附或被从钢水中挤出。

3) 由于通道设置在中间罐的底部,而通常中间

罐液面附近的夹杂物含量明显比底部要高,使得从通道中流入的钢水相对更干净些。

在线使用表明,中间罐感应加热技术能有效地减少铸坯以致最终产品的表面缺陷,见图4。加热功率越大,箍缩力也越大,夹杂物分离效果也越好。

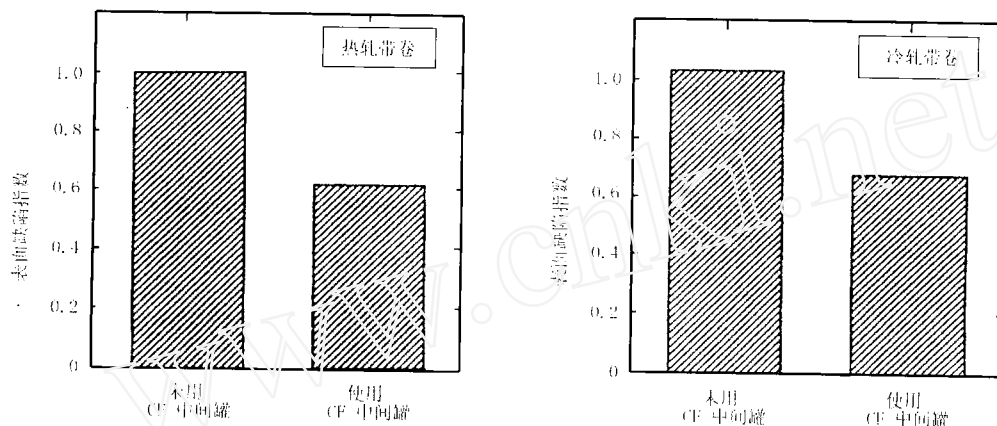


图3 CF中间罐对不锈钢薄板表面质量的影响

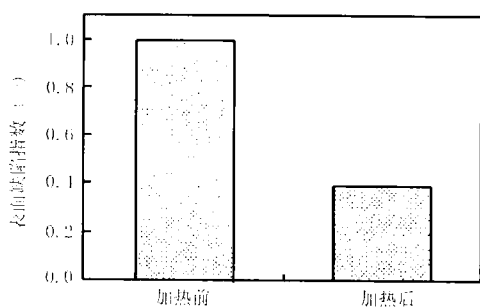


图4 感应加热对钢板表面缺陷的影响

4 结晶器钢水流动控制技术

板坯连铸的实践表明,大部分板坯的表面和内部缺陷都与结晶器内的钢水流动密切相关。目前高速连铸已成为连铸技术的发展趋势。然而,拉速的提高势必使浸入式水口两个侧孔吐出的流股速度明显增加,从而铸坯表面和内部夹杂物、表面裂纹和漏钢事故也相应增加,这成为高速连铸的重要制约因素。为此开发了结晶器钢水控流技术,除常规的浸入式水口形状(吐出口径和吐出角度)的优化、结晶器液面控制和结晶器电磁搅拌外,近年来又开发了两类新的结晶器控流技术:基于恒定磁场的电磁制动(EMBR-Electromagnetic Brake);基于行波磁场的电磁稳流(EMLS-Electromagnetic level Stabilizer)和电磁加速(EMIA-Electromagnetic level Accelerator)。

4.1 结晶器电磁制动技术^[11-19]

目前结晶器电磁制动技术根据磁场配置方式的不同,大体有三种形式:局部区域的、全幅一段(LMF-Level Magnetic field)和全幅二段的(FCMold-Flow Control Mold)电磁制动;目前也在探索全幅三段的电磁制动。

本文以全幅二段电磁制动为例作一简要描述。图5是全幅二段电磁制动示意图。由图可见,在整个结晶器的宽度上外加两个恒定磁场,即有两个磁场作用区域,分别位于弯月面附近和浸入式水口下方。其作用机制是上段磁场用于制动沿初期凝固面上升的反转流动,以稳定弯月面的波动及缓和弯月面附近的流动,防止保护渣被卷吸,以利减少保护渣性夹杂物。下段磁场用于制动从浸入式水口吐出的流股,使其减速、分裂,以减小流股侵入液相穴的深度,促使外来夹杂物、脱氧生成物和气泡等的上浮;同时提高热区位置,以利保护渣均匀铺展与充分熔融,增强其对夹杂物的吸附能力;在其下方则形成较为均匀的“活塞”流动,能获得类似于低温浇铸的效果。基于结晶器电磁制动的良好冶金效果,这已成为高速板坯连铸的重要技术手段。

板坯连铸结晶器全幅二段电磁制动钢水流动的数值模拟表明,外加适当强度的磁场,可以使窄面附近的弯月面波高减小50%以上,而在其下流形成速

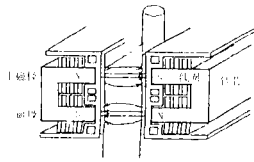


图5 FC结晶器的示意图

度很小且较为均匀的“活塞”流动,为实机应用提供了理论基础。

实机应用表明,使用全幅二段电磁制动技术能在结晶器内获得较好的流场,在弯月面附近的湍流明显减弱,平均流速减小80%,而且速度的波动减小到30%,有效地防止了保护渣的卷吸;同时流股向下侵入深度减小一半以上,夹杂物易于上浮,从而使铸坯和冷轧钢板的质量大幅度提高,见图6。

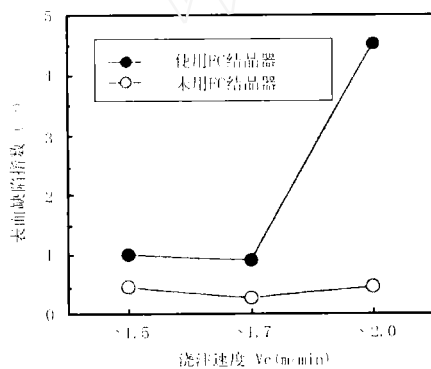


图6 FC结晶器在冷轧薄板表面质量上的影响

4.2 结晶器电磁稳流和加速技术^[20,21]

板坯连铸实践表明,在常规连铸中,冷轧薄板的表面缺陷与结晶器窄面附近弯月面波高有密切关系。波高过大或过小,表面缺陷发生的频度都较高。其原因是,沿窄面上升的反转流动引起窄面附近弯月面的波动,如反转流动强,弯月面的波高就大,保护渣易被卷吸,导致保护渣性夹杂物的增加;如反转流动弱,弯月面波高小,弯月面附近流动也小,向弯月面的供热也小,保护渣熔融不完全,使吸收上浮的外来夹杂物的能力降低,导致外来夹杂物性缺陷的增加。为了适应从浇铸开始到终了的各种浇铸条件的变化,使结晶器内的钢水始终保持最佳的流动状态,开发了基于行波磁场的钢水控流技术,即EMLS和EMLA,见图7。其特征是在板坯结晶器的两个宽面上,分别配置两台行波磁场搅拌器,分别激发方向

相反的行波磁场。如果两个行波磁场的运动方向分别从左右窄面指向水口,则作用在从水口吐出的流股上的电磁力是制动力,使流股减速,称此为EMLS;如果行波磁场的运动方向分别从水口指向左右窄面,则作用在从水口吐出的流股上的电磁力是加速力,使流股加速,称此为EMLA。

EMLS和EMLA减少夹杂物的机制是,在高速浇铸时,采用EMLS,外加制动方向的电磁力,能大幅度抑制弯月面的波高。反之,在低速浇铸特别是浇铸初期或终了期,采用EMLA,外加加速电磁力,使弯月面的波高适当加大。即是说,相应于浇铸速度的变化,分别采用EMLS和EMLA,调整外加电磁力的方向和大小,使弯月面的波高始终保持在合适的范围内,使夹杂物降低到尽可能小。图8表示使用EMLS和EMLA时铸坯的保护渣性缺陷指数的降

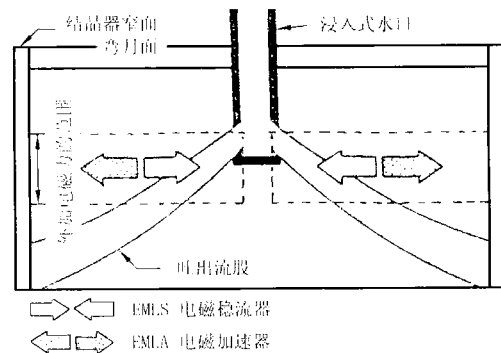


图7 结晶器内钢水流动控制的概念图

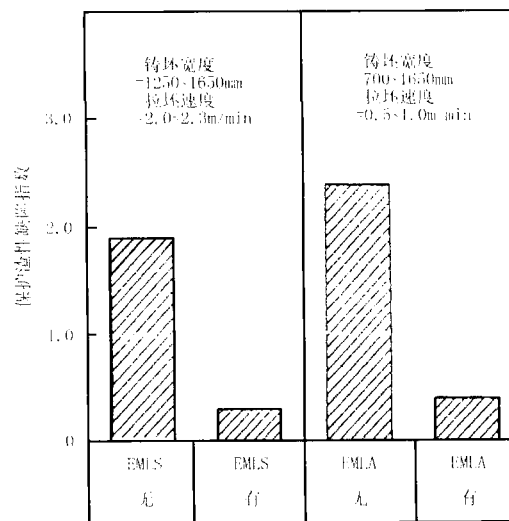


图8 EMLS和EMLA对保护渣性缺陷的降低的效果。由图可见,在高速浇铸时采用EMLS,而在低速浇铸时采用EMLA,可以大幅度降低铸坯的保护渣性的缺陷。图9表示清洁度要求高的冷轧薄板的

内部缺陷在有或无 EMLS 时的比较。由图可见,适当地外加 EMLS 可以有效地减少夹杂物性的缺陷,从而大幅度提高产品的质量。

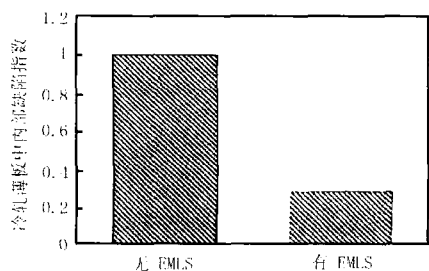


图 9 EMLS 在冷轧薄板内部缺陷上的影响

参 考 文 献

[1] M. M. wolf BHM Band138 Heft 9 S.334-348 1993.
 [2] Wan-Soo Kim etal Ironmaking and Steelmaking Vol. 18 No. 6 P446—453 1991.
 [3] 三木 祐司ウ 川崎制鉄技報 Vol.28 No 1 P52—58. 1996.
 [4] 三木 祐司ウ 材料とプロセス Vol.9 P234 1996.

[5] H. ENOKido etal La Revue de Metallurgie-CIT P1385 ~ 1391 1997.
 [6] Masaki Mabuchi etal 1986 Steelmaking conference proceedings P737—742.
 [7] I. Suzuki etal 1988 steelmaking conference proceedings P125—131.
 [8] Y. Fukuzuki etal 1992 steelmaking conference proceedings P397—403.
 [9] 朱宮 徹ウ 住友金属 Vol.45No3 P91—97 1993.
 [10] 谷口 尚司ウ 鉄と鋼 Vol.80 No1 P24—29 1994
 [11] 高谷幸司ウ 材料とプロセス Vol.9 P602 1996
 [12] Kollberg, s. G Iron and Steel Engingeer Vol. 73 No7 P24—28.
 [13] 潰村利照ウ 材料とプロセス Vol 9 P213 1993
 [14] 原田寛ウ 材料とプロセス Vol 9 P205 1995
 [15] 石井孝宣ウ 材料とプロセス Vol.9 P206 1996
 [16] Kazukio Kariya etal 1994 Steelmaking conference proceedings P53—58
 [17] 井戸川 ウ 川崎制鉄技术报 vol.28 No1 P46—51 1996
 [18] 戸 宏ウ 材料とプロセス P604—605 1996
 [19] 久保田 淳ウ まりあ vol.33 No6 P793—795 1994
 [20] 鈴木真ウ 材料とプロセス vol.9 P616—617 1996
 [21] 久保田 淳ウ 材料とプロセス vol.9 P209 1996

· 国外信息 ·

德马克与捷克新冶金公司联合进行高速连铸试验

对连铸机生产率起决定作用的是铸速。在小方坯连铸中,为了使浇铸与炼钢过程相匹配,需要将铸速提高到 4m/min 或更高。为此需要增大结晶器的冷却速率,以确保合适良好的连铸坯壳。由于结晶器导热率受结晶器壁与坯壳间气隙大小影响较大,因此避免或减小气隙是非常重要的。内壁呈抛物线的结晶器对改善坯壳外形与结晶器外形紧密接触是很好的措施。

德国曼内斯曼·德马克公司和捷克新冶金公司联合在六流方坯连铸机(130×130mm)上通过采用抛物线型结晶器(长度 1000mm)进行了高速连铸试验。试验分别在敞开浇注和保护浇注下进行。在试验的过程中,研究人员测量了结晶器壁纵向不同位置处的温度,以分析与坯壳的接触状况,进而考察结晶器内的传热情况,并与理论计算相比较。在敞开

浇铸中约 1500 吨的钢水在大于 3m/min 的速度下浇铸的,最大曾达到 5.2m/min。为防止浇铸过程中拉漏,采取了相应措施。为了控制结晶器内周期性出现的搅动对浇注速度的影响,振动频率确定为 250 ~ 260 次/min,并取得了明显的效果。在保护浇铸中,仅对包晶钢种作了试验,铸速在 4m/min 以上。通过两组不同条件下进行的浇注试验所得到的铸坯,与常规浇铸条件下所得到的铸坯进行了比较,结果铸坯质量并无明显的差别。只是与普通铸速相比高速浇铸条件下得到的等轴晶区更大一些。

研究人员还对结晶器的传热及其影响因素进行了研究分析,并利用数学模型对传热、冷却速度、热收缩和纵向收缩进行了模拟,其结果与实际吻合的较好。

侯 巍 摘自《MPT International》1998, No. 1 P74-83