

·技术讲座·

连铸电磁冶金技术

第六讲 板坯连铸结晶器电磁控流技术

毛 斌

(中国科学院力学研究所)

Electromagnetic metallurgical technology for continuous casting

Lesson Six

Mold electromagnetic flow control technology for continuous casting of slab

Mao Bin

(Institute of Mechanics Chinese Academy of Sciences)

众所周知,在连铸过程中的基本要求是提供高洁净的钢水,从而避免由夹杂物造成的表面和内部缺陷。这些夹杂物主要来自保护渣的卷吸和外来氧化铝的浸入等,它们都与结晶器内钢水流动,特别是弯月面下的流动密切相关。然而在连铸过程从浇注开始到浇注终了,浇注条件经历各种各样的变化,为了避免保护渣的卷吸,需要使结晶器内流动控制在最佳的范围内,从而在提高铸坯质量的同时,保持浇注的稳定性。

作为结晶器内钢水流动控制的手段,基于行波磁场方式的结晶器电磁控流技术是保证高速连铸的铸坯质量和浇注稳定性的不可缺少的技术。

1 开发背景

连铸实践表明,控制弯月面附近的流动或弯月面的波高是改进铸坯表面和内部质量的重要因素。

1.1 冷轧薄板的表面缺陷与弯月面的波高

图 1 是冷轧薄板表面缺陷指数与结晶器内窄面附近弯月面波高(ΔX)的关系。由图可见, ΔX 过大或过小,表面缺陷指数都变大。对表面缺陷的分析表明,大多是保护渣性和外来的 Al_2O_3 性等的夹杂物。由结晶器内流动分析可知,结晶器内浸入式水口侧孔吐出的流股冲击窄面后,分裂成向上反转流动和向下浸入流动,沿窄面凝固面向上反转流动,使

窄面附近的弯月面拱起形成波动。当向上反转流动过强时,弯月面附近流速较高,引起弯月面激烈波动,其波高变大,熔融保护渣易被卷吸;反之,向上反转流动较弱时,弯月面附近流速较小,弯月面波高也小,向弯月面供热减小,使弯月面附近钢水温度较低,导致保护渣的熔融不完全,吸收夹杂物的能力降低,从而导致外来的 Al_2O_3 夹杂物的缺陷增大。

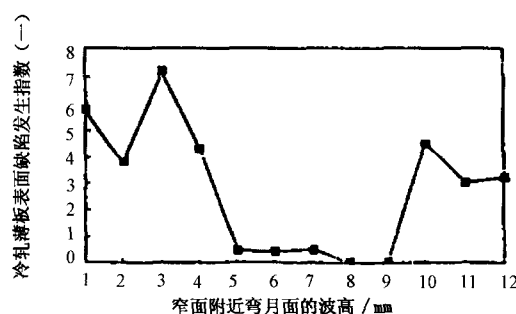


图 1 冷轧薄板的表面缺陷与窄面附近弯月面的波高

1.2 不同钢种的冷轧薄板表面缺陷与浇注量

图 2 表示在相同浇注条件下,超低碳钢与低碳钢的冷轧薄板的表面缺陷与浇注量的关系。由图可见,两者的行为正好相反,低碳钢随着浇注量的增加,表面缺陷指数呈上升趋势,而超低碳钢在相同铸造条件下随着浇注量的增加,表面缺陷指数反而大大减小。另外,从超低碳钢表面缺陷分析,主体是保

护渣性的夹杂物。其原因是由于浇注量小,过热钢水对弯月面的热量补充就小,保护渣的保温性降低,并且由于凝固前沿流速小,对凝固前沿的清洗能力也降低,从而导致浇注量小,表面缺陷反而增加的结果。

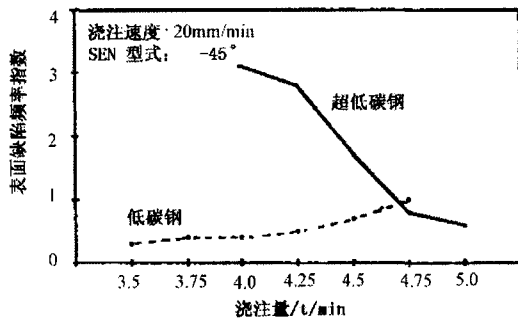


图2 表面缺陷与浇注量的关系

由上所述,要使产品的表面缺陷尽可能少,必须将结晶器内的钢水流动特别是弯月面附近的流动控制在一个恰当的范围。为此开发了新型结晶器电磁流动控制技术。

2 结晶器电磁流动控制技术的描述

2.1 工作原理

为了控制结晶器内钢水的流动特别是弯月面下钢水的流动,开发了基于行波磁场的结晶器电磁流动控制技术。

其装置的构成是:在板坯两个宽面上分别布置两对行波磁场搅拌器,其宽度与结晶器宽度相同,如图3。

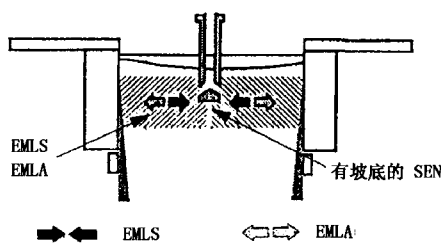


图3 板坯结晶器流动控制器

其工作原理是:在同一宽面上的一对行波磁场搅拌器可分别激发相向行进的行波磁场或反向行进的行波磁场。在从浸入式水口吐出的流股上产生两类水平的电磁力,前者的电磁力是从窄面指向浸入式水口,其力的方向迎着流股,由于电磁力是体积力,从而制动流股使其减速,称此为电磁水平稳定器(Electromagnetic level stabilizer: EMLS);后者的电磁力从浸入式水口指向窄面,其方向顺着流股,从而使

钢水加速,称此为电磁水平加速器(Electromagnetic level Accelerator: EMLA)。

2.2 技术特征

结晶器电磁控流技术的特征是根据不同的浇注条件,通过选择和调节加于从浸入式水口吐出的流股上的水平电磁力的方向和大小,控制结晶器内特别是弯月面附近的流动:

- 高浇注速度时,目的是制动流股,降低弯月面附近的流动速度,以避免弯月面的不稳定或波动;
- 低浇注速度时,目的是加速流股,提高弯月面附近的流动速度,使过热钢水将热量传给弯月面;同时也提高对凝固前沿的清洗作用。

·浇注开始和终了及钢包交换期等不正常浇注期的浇注速度变化时,适时调节钢水的流动。

由此可见,在不同浇注条件下,可以借助结晶器电磁控流装置,使结晶器内的流动特别是弯月面附近的流动控制在一个最佳范围内,从而使铸坯表面和皮下夹杂物含量大大减少。

2.3 与 EMBr 和常规的 MEMS 的主要区别

由上述结晶器电磁控流技术的工作原理和技术特征可以看出,与 EMBr 和常规的 MEMS 的主要区别是:

·基于恒定磁场的结晶器电磁制动技术(EMBr)只能对从浸入式水口吐出的流股产生制动作用,制动力的的大小大体上与流股的速度成正比,对速度为零的钢水不起作用;更不能使钢水加速。

·基于行波磁场的常规的结晶器电磁搅拌技术(MEMS)在结晶器的两个宽面上激发方向相反的行波磁场,产生方向相反的电磁力,从而使钢水产生旋转搅拌,一般说来,它只起了使钢水加速的作用,而不能制动钢水。

·对于结晶器电磁流动控制技术,不仅可以产生制动力,使从水口两侧孔吐出的流股同时减速;也可以产生加速力,使从水口两侧孔吐出的流股同时加速。这样可以按照不同的断面、浇注速度等浇注条件和钢种来选择最合适的搅拌或制动方式,这就使系统操作极其灵活。

3 选择 EMLA 或 EMLS 的判据

由图1可见,产品表面缺陷与弯月面波高有关。借助水模试验可以由结晶器内的钢水流动推导出窄面附近弯月面波高,见图4。当钢水从水口侧孔吐出后,冲击窄面,而后分裂成向上反转流动和向下侵入流动。测定冲击角度及其深度就可根据下式定义

弯月面波动指数:

$$F = \rho QV(1 - \sin\theta)/(4/D)$$

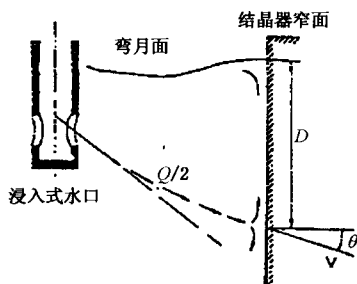


图4 结晶器内钢水流动的判据(F值)

其中 ρ —钢水密度, kg/m^3 ; Q —体积浇注速度, m^3/min ; V —吐出流股的窄面冲击速度, m/min ; θ —吐出流股的窄面冲击角度, $^\circ$; D —吐出流股的冲击深度, m 。

由上式可看出, F 值可以由浇注条件计算, 它表示向上反转流动对弯月面的冲量。在实机应用中, 窄面附近的弯月面波高与 F 值具有良好的线性关系。求出 F 值, 就有可能评价向上反转流动, 使弯月面的波高进入图 1 所示的最佳范围。在具体运用中, 如果 F 值过大, 采用 EMLS 模式运转, 如果 F 值过小, 则采用 EMLA 模式运转。这样, 在整个连铸过程中可以借助于计算机控制, 将弯月面波高很好地维持在最佳范围内, 从而使保护渣卷吸大大减少, 显著地减少铸坯和最终产品的表面和内部缺陷。

4 结晶器电磁控流技术的冶金效果

4.1 EMLA/EMLS 对弯月面附近平均流速的影响

当使用 EMLS/EMLA 时, 弯月面附近表面流速的平均值见图 5。由图可见, 在低浇注速度, 采用 EMLA 工况, 表面流速随电流强度的增大而增大; 而在高浇注速度时, 采用 EMLS 工况, 表面流速随电流强度的增大而降低。

4.2 窄面附近弯月面波高与浇注速度的关系

图 6 表示有无 EMLA/EMLS 时, 窄面附近弯月面波高与铸造速度的关系。由图可见, 在无电磁控流的工况下, 伴随浇注速度的增加, 弯月面波高也增大。当高速连铸时, 在制动方向外加相向行进的行波磁场, 即 EMLS 工况, 使流股减速, 抑制了弯月面的波高。当低速连铸时, 在加速方向外加反向行进的行波磁场, 即 EMLA 工况, 使流股加速, 导致沿窄面向上反转流动增大, 把弯月面波高提高到适当的值。这样, 对应于浇注速度的变化, 选择外加磁场方

向和调整搅拌强度, 有可能使窄面附近的弯月面波高维持在一个适当的范围内。

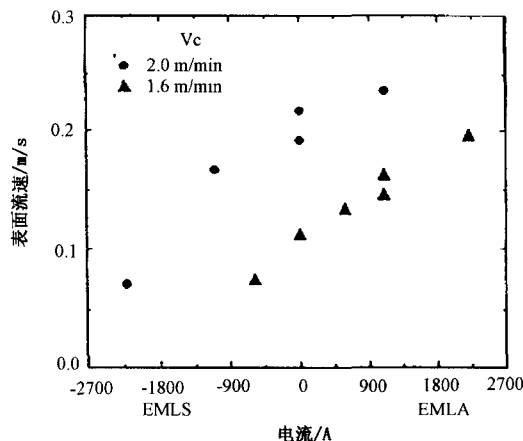


图5 EMLS/EMLA 对平均表面流速的影响

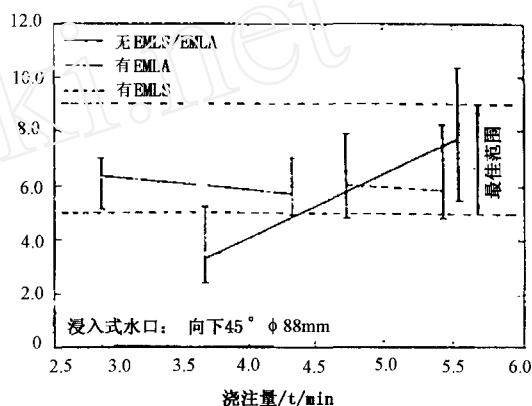


图6 窄面附近弯月面的波高与浇注速度的关系

4.3 弯月面附近钢水温度的变化

图 7 表示在 EMLS/EMLA 下, 在离窄面 80mm 和弯月面下 30mm 处钢水温度的变化。在 EMLA 工况下, 由于流股被加速, 使沿窄面上升的反转流动增

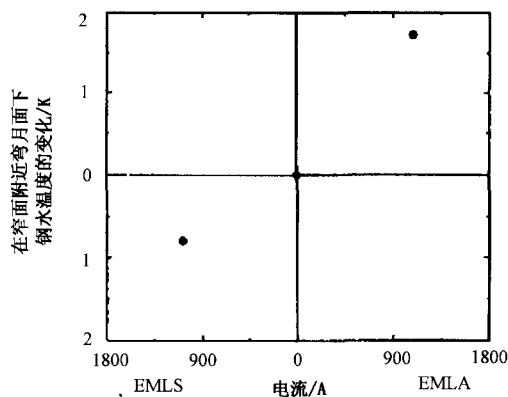


图7 窄面附近弯月面下的钢水温度的变化

大,过热钢水不断向弯月面提供热量,从而使弯月面附近温度升高;而在 EMLS 工况下,由于流股被制动,弯月面附近的流速降低,提供给弯月面的热量减少,使弯月面附近的温度降低。

4.4 EMLA/EMLS 在板坯表面质量上的影响

图 8 表示 EMLA 和 EMLS 对板坯表面质量的影响。在低速连铸时,使用 EMLA,而在高速连铸时使用 EMLS,板坯表面渣斑密度明显减少。

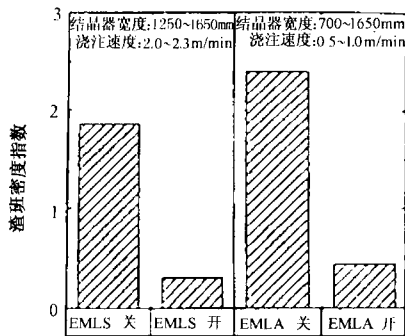


图 8 EMLA/EMLS 在板坯表面质量上的影响

5 EMLA/EMLS 改进产品质量的效果

5.1 EMLA 对产品质量的影响

图 9 表示 EMLA 对超低碳钢冷轧薄板表面缺陷的影响。由图可见,在低速浇注时,表面缺陷发生的频度很高。由于使用了 EMLA,从浸入式水口吐出的钢水流股被加速,沿窄面向上反转流股使弯月面附近的钢水流动增大,过热钢水向弯月面补充热量增多,使保护渣熔融较充分,同时也提高保护渣吸收夹杂物的能力,从而使低速浇注时超低碳钢的冷轧薄板的表面缺陷明显降低。

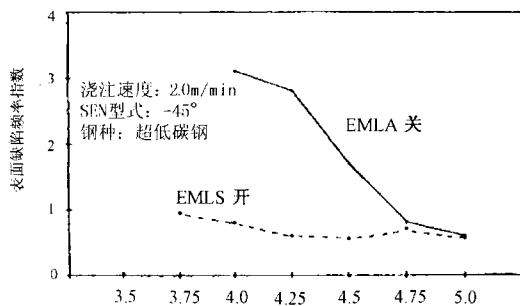


图 9 EMLA 对冷轧钢板表面缺陷的影响

5.2 EMLS 对冷轧薄板内部质量的影响

图 10 表示 EMLS 对冷轧薄板内部质量的影响。

由于使用 EMLS,在高速连铸时,从浸入式水口吐出的流股受到制动,降低了弯月面附近的钢水流动,减少了保护渣的卷吸,同时使流股浸入液相穴深度变浅,有利于夹杂物上浮分离;从而使冷轧薄板内部缺陷明显减少。

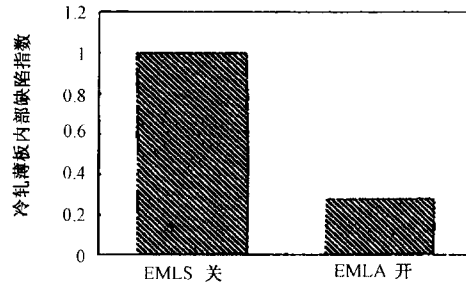


图 10 EMLS 在冷轧薄板内部质量上的影响

5.3 不同浇注条件下 EMLA/EMLS 对冷轧薄板表面质量的影响

图 11 表示在不同浇注条件下, EMLA/EMLS 对冷轧薄板表面质量的影响。由于在浇注开始、终了或在钢包交换期等非正常浇注期,随浇注速度变化,选择和调整磁场方向和强度,使弯月面的波高维持在合适的范围内,从而大幅度降低保护渣性的缺陷。

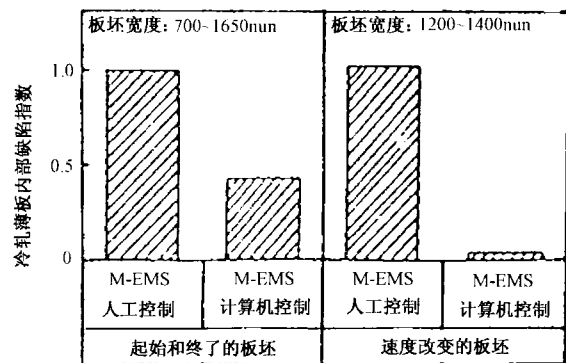


图 11 EMLA/EMLS 在冷轧薄板表面质量上的效果

参考文献

- 1 久保田 淳ウ. までりあ, 1994, 66(6):793.
- 2 冲本一生ウ. 材料与プロセス, 1990, 3:1172.
- 3 久保田 淳ウ. 材料与プロセス, 1996, 9:209.
- 4 Makoto Suzuki et al. Intern. Symp. EMP of Materials. 1994. 283.
- 5 久保田 淳ウ. 材料与プロセス, 1990. 256 ~ 257.
- 6 铃木真ウ. 材料与プロセス, 1996. 616.
- 7 T. Ishii et al. Ironmaking and Steelmaking 1996. 23(3):267.