

·技术讲座·

连铸电磁冶金技术

第五讲:板坯连铸结晶器电磁搅拌技术

毛 斌

(中国科学院力学研究所)

Electromagnetic metallurgical technology for continuous casting

Lesson five

Mold electromagnetic stirring for continuous casting of slab.

Mao Bin

(Institute of Mechanics Chinese Academy of Sciences)

1 板坯连铸结晶器电磁搅拌的目的

连铸实践表明,结晶器内的钢水流动在很大程度上影响着板坯内夹杂物的行为,支配着夹杂物和气泡的上浮分离;弯月面附近的流动又支配着保护渣的卷吸、熔融及铺展,因此,控制结晶器内流动的两个概念是:

- 必须防止从浸入式水口吐出的向下流股侵入液相穴太深;
- 必须稳定弯月面,降低沿弯月面上升的反转流动。

实践表明,优化浸入式水口形状,钢水液面控制等常规的控制技术虽有利于改进结晶器内钢水的流动,但不尽人意。近十几年来,结晶器电磁制动(EMBr)技术和结晶器电磁搅拌(MEMS)技术,都已发展成为控制高速板坯连铸结晶器内钢水流动来获得优质、高产铸坯的重要技术手段。两者的本质区别是前者借助电磁力制动从浸入式水口吐出的流股使其减速来控制结晶器内的钢水流动,而后者则借助电磁力改变从浸入式水口吐出的流股的流动方向来控制结晶器内的钢水流动。因此板坯连铸结晶器电磁搅拌的目的是:

- 借助 MEMS 增加凝固前沿的流速,控制表面洁净度。
- 控制初期凝固和弯月面处凝固起始点的位置。

借此提高板坯表面和皮下的洁净度并减少表面裂纹,从而提高铸坯质量。

2 MEMS 的工作原理

2.1 行波磁场的产生

板坯连铸结晶器电磁搅拌器不管其形式和安装方式如何,都采用行波磁场型。该搅拌器用超低频电源激磁,激发向一个方向行进的行波磁场,俗称直线磁场。设想将普通异步电机的圆环形定子的一边顺轴向剖开并展平,即成激发行波磁场的直线电机或平面感应器,使原来沿圆周旋转的旋转磁场演变成向一方向行进的行波磁场。平面感应器装上非不锈钢壳体即成电磁搅拌器。

行波磁场运动方向和搅拌器中线圈的相序有关。和普通异步电机一样,将馈给感应器电流的两相相序交换,行波磁场也随之反向。

2.2 工作原理

行波磁场搅拌器的工作原理简单地说,当多相超低频交流电流馈给电磁搅拌器后,就激发以速度 v 向一个方向运动的行波磁场,当它渗透到钢水中就在其中感生起感应电势 \vec{E} ,由于钢水具有导电率 σ ,故钢水中的感应电流为

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \sigma (\vec{V}_s - \vec{V}) \times \vec{B}$$

其中 \vec{V} —钢水的运动速度,它们符合 Fleming 右手定则。感应电流与当地磁场相互作用就在钢水中产生电磁体力。

$$\vec{f}_e = \vec{j} \times \vec{B} = \sigma[(\vec{V}_s - V) \times \vec{B}] \times \vec{B}$$

它们符合 Flaming 左手定则。该电磁体力作用在钢水体积元上,从而推动钢水运动,其运动方向始终与磁场运动方向一致;行波磁场反向,钢水运动方向也随之相反。

2.3 板坯结晶器电磁搅拌(MEMS)与结晶器电磁制动(EMBr)的异

MEMS 与 EMBr 两者的主要异差,从磁流体力学看,主要表现在:

- 激发磁场的机制不同:MEMS 采用多相交流电源激磁,产生行波磁场,而 EMBr 采用直流电源激磁,产生直流磁场。

- 电磁力的产生不同:在 MEMS 中,电磁力 f_e 正比于 $\sigma(V_s - V)B^2$,主要取决于外加行波磁场速度 V_s ,即使钢水不动,也存在电磁力的作用;而在 EMBr 中,电磁力 f_e 正比于 σVB^2 ,主要取决于钢水的流速,钢水静止,电磁力为零。

- 作用的结果不同:MEMS 的电磁力方向始终与钢水流动方向一致,使钢水加速;而 EMBr 的电磁力方向始终与钢水流动方向相反,使钢水减速,即制动。

3 板坯结晶器电磁搅拌的主要模式及其特征

板坯 MEMS 的模式主要有水平旋转搅拌和向下直线搅拌,见图 1。

3.1 水平旋转搅拌的电磁和流动的特征

- 在两个宽面即 F(固定)面和 L(可动)面上配置一对行波磁场搅拌器,其行波磁场方向相反,使钢水形成一个大环流,故称水平旋转搅拌。

- 由于 F 和 L 面的行波磁场方向相反,两者相互作用的结果,在钢水内部的磁场分布在局部地方场强为零,其数目与搅拌器线圈的极数相同。由于局部地方场强为零,电磁力也为零,从而导致钢水内电磁力旋涡的出现,这是水平旋转搅拌的一个特征。由于电磁力的旋涡分布,电磁力可分解成沿宽面的水平分力和垂直宽面的法向分力,前者连续分布,后者呈脉振式分布,前者比后者大得多。

- 尽管电磁力呈现旋涡分布,但钢水表面的速度分布几乎接近水平旋转流动而没有出现旋涡,这是由于流体的连续性和惯性效应掩盖了电磁力的旋涡的结果,见图 2。

钢水表面的流速分布对冶金质量是非常重要的,因为板坯表面质量在很大程度上是由初期凝固

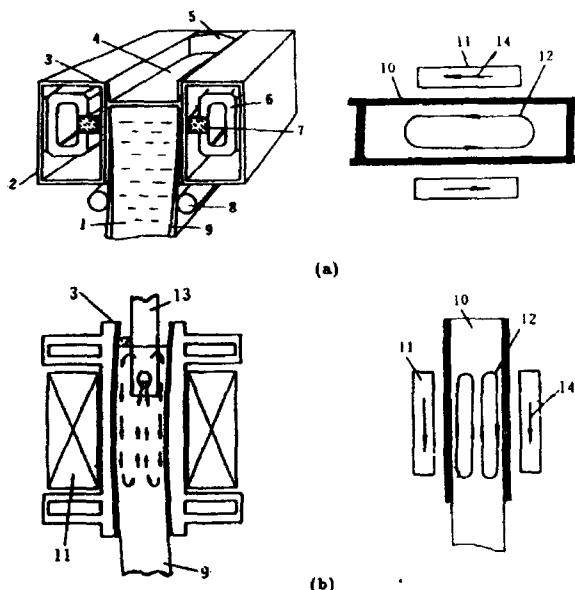
和在弯月面处的凝固起始点决定的。

3.2 向下直线搅拌的电磁和流场的特征

- 在 F 和 L 面上分别配置 2 对行波磁场搅拌器,行波磁场方向垂直向下,使钢水形成两个环流。

- 由于 F 和 L 面的行波磁场方向相同,其搅拌器线圈的相序也应相同,因此两者激发的磁场在 F 和 L 面之间形成一个磁回路,例如从 F 面的 N 极出发穿过钢水到达 L 面的 S 极,然后又从 L 面的 N 极再经钢水回到 F 面的 S 极。其磁场强度沿结晶器厚度方向由结晶器壁向中心衰减。

- 在结晶器厚度中心剖面上向下直线搅拌的流动形貌见图 3。由图可见由于搅拌,使得从水口吐出的比较集中且流速较高的流股被分散成沿宽面的



a—水平旋转搅拌; b—向下直线搅拌
1—钢水 2—冷却水套 3—铜板(宽面) 4—保护渣 5—铜板(窄面) 6—绕组 7—铁芯 8—支撑辊 9—坯壳 10—结晶器 11—搅拌器 12—流动方向 13—水口 14—行波磁场方向

图 1 MEMS 的主要模式示意图

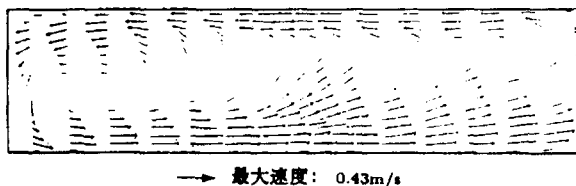


图 2 水平旋转搅拌的流动形貌(2Hz, 4 极)

向下流动,因而流速降低;对窄面的冲击减弱;在板宽方向上形成一对水平旋涡;在结晶器厚度中心产

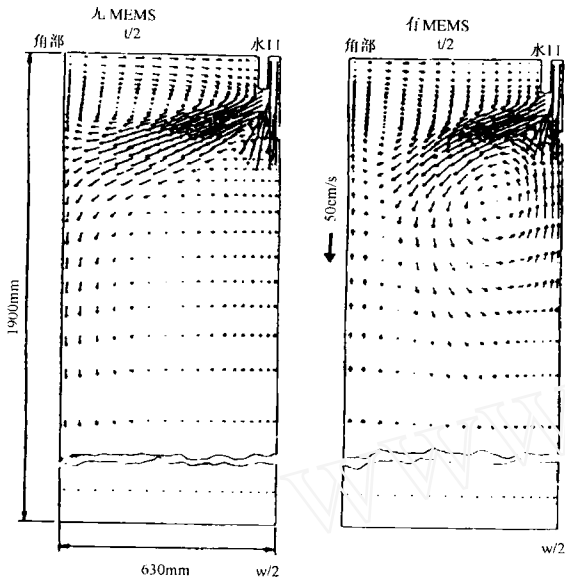


图3 向下直线搅拌的流动形貌

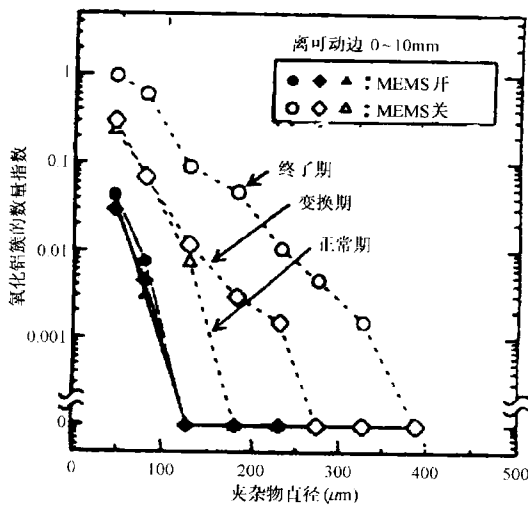


图4 MEMS对不同浇铸期铸坯表面洁净度的影响

生的向下流动,由于流体连续性在较浅位置处改变流动方向并沿窄面上升到弯月面。

由上述流场特征,使从水口吐出的流股向下侵入深度变浅,使外来夹杂物减少;由于弯月面处流速降低,弯月面稳定,使保护渣卷吸减少,从而明显提高铸坯表面和皮下洁净度。

4 两种搅拌模式的冶金效果

4.1 水平旋转搅拌的冶金效果

1) MEMS对不同浇铸期铸坯表面洁净度的影响

图4是有和无MEMS时不同浇铸期的铸坯表面洁净度。由图可见,采用MEMS后,不管注入结晶器

的钢水洁净度如何,铸坯表面(0~10mm)的洁净度明显改进;也不管浇铸状态如何,都达到正常浇铸期的洁净度水平;不管在任何位置都未检测到直径大于106 μm 的夹杂物。这些结果表明铸坯表面的洁净度受结晶器内流动行为的影响要比注入结晶器内的钢水洁净度更显著些。

2) 凝固前沿平均流速对铸坯皮下洁净度的影响

MEMS的目的之一是借助增加凝固前沿附近的流速来控制皮下洁净度,为使这种控制最佳化,需要了解必要的流速和表面洁净度之间的关系。由图5可见,凝固前沿的钢水流速增加,被捕获的夹杂物数量减少。由此可见,借助凝固前沿附近流速的控制来降低皮下夹杂物是可能的,问题是工程上如何来提供沿板坯宽度和厚度方向上的均匀的流动。

3) MEMS对铸坯内部洁净度的影响

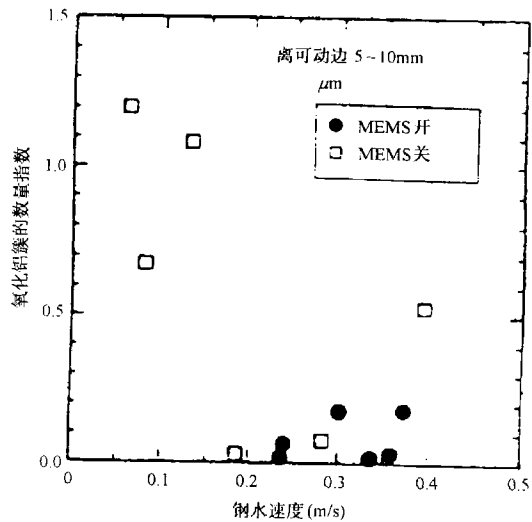


图5 凝固前沿钢水流速对皮下洁净度的影响

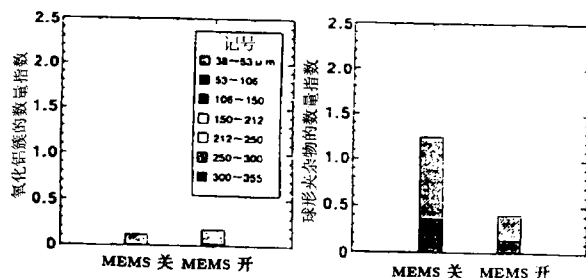


图6 MEMS对Si沸腾中碳钢夹杂数量的影响

图6表示有和无MEMS的板坯内部夹杂物数量的直方图。由图可见,采用MEMS后,氧化铝簇数量减少不多,而球形夹杂物有明显减少,这是因为钢水

流动引起球形夹杂物的结团和聚合比氧化铝簇更容易些。因为球形夹杂物是夹杂物的实质部分,因此夹杂物数量总体上明显减少。

4) 借助 MEMS 控制初期凝固

近几年来,连铸技术的研究表明,初期凝固在很大程度上影响铸坯质量特别是表面质量,因此,控制初期凝固和凝固起始点的位置是采用 MEMS 的另一目的。图 7 是 Si 沸腾钢的板宽 2200mm、浇铸速度 1.0m/min 有和无 MEMS 坯壳剖面的形貌。由图可见, MEMS 抑制了不均匀凝固,使坯壳生长均匀,使得在板宽方向的温度和溶质浓度均匀,利于减少表面裂纹的产生,也有利于防止拉漏和稳定操作。由于水平旋转搅拌,使弯月面附近钢水温度提高,有可能使凝固起始点的位置向下移动。

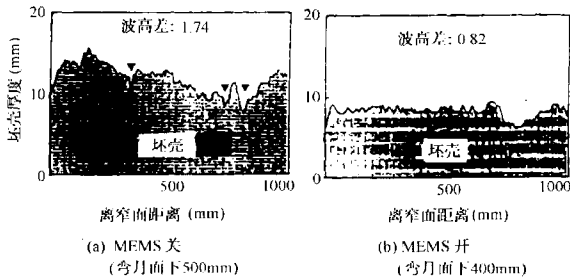


图 7 MEMS 对坯壳均匀性的影响

4.2 向下直线搅拌的冶金效果

1) 弯月面的波高

弯月面波高是导致保护渣卷吸的一个重要原因。图 8 表示有和无 MEMS 的浇铸量与弯月面波高的关系。由图可见,由于向下直线搅拌,即使从水口吐出的流量增加,窄面的弯月面波高也比较低,这表明,由于向下垂直搅拌降低水口吐出流股的速度,因而降低窄面向上的反转流动。

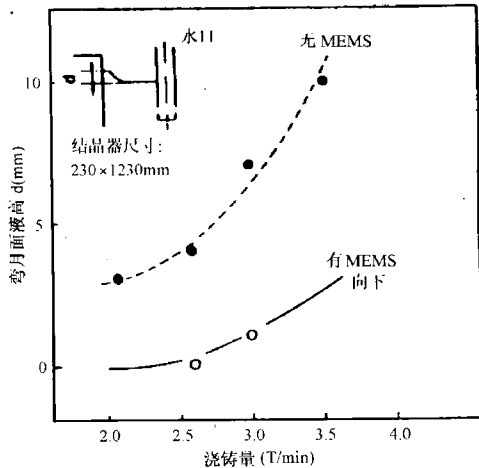


图 8 有和无 MEMS 的浇铸与弯月面波高的关系

2) MEMS 对表面和皮下夹杂物分布的影响

图 9 表示有和无 MEMS 的铸坯表面和皮下的夹杂物分布。由图可见,采用 MEMS 后,整个板坯的夹杂减少,在内弧夹杂带的夹杂物减少尤为明显。图 10 表示由于向下直线搅拌,即使浇铸量增加,夹杂物数量仍保持在一个稳定的低水平上,这意味着允许提高浇铸速度而不会恶化夹杂物的程度。

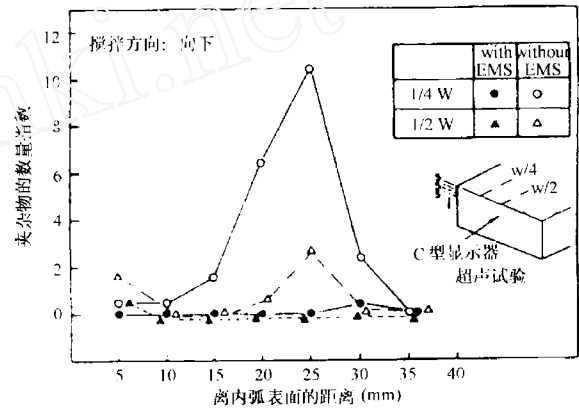


图 9 MEMS 对铸坯表面和皮下夹杂的影响

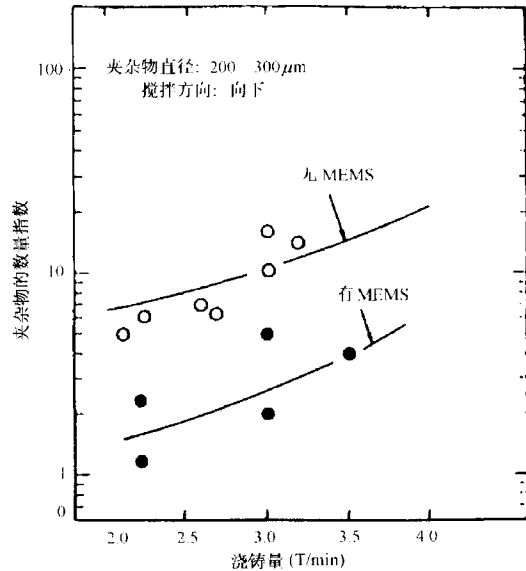


图 10 有和无 MEMS 的夹杂物数量与浇铸量的关系

参考文献

- 1 Hiroshi Yamane et al. 1997 Steelmaking Conference Proceedings. 159 ~ 164.
- 2 Keisuke Fujisaki et al. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, vol. 33 No. 2: 1642 ~ 1645
- 3 I. Hoshikawa et al. Iron and Steelmaker, 1991, No. 4: 45 ~ 52.
- 4 N. Genma et al. ISIJ International, vol. 29 No. 12: 1056 ~ 1062.
- 5 H. Matsuda et al. 1990 Steelmaking Conference Proceedings. 187 ~ 194.