

·技术讲座·

连铸电磁冶金技术

第七讲 电磁连铸技术

毛 斌

(中国科学院力学研究所)

Electromagnetic metallurgical technology for continuous casting

Lesson seven

Electromagnetic continuous casting technology

Mao Bin

(Institute of Mechanics Chinese Academy of Sciences)

1 背景

连铸生产的要求是在高拉速下获得高质量的铸坯,即高质量与高生产率的统一;连铸技术的发展趋势是实现连铸连轧甚或近终形连铸,两者都要求有良好的铸坯表面质量。实践表明,铸坯表面质量实质上是由弯月面处发生的初期凝固决定的。为消除表面缺陷,提出了各种控制初期凝固的电磁连铸技术。电磁连铸的实质是用电磁力箍缩钢水,使其与结晶器“软接触”,从而控制初期凝固。

60年代初,前苏联的 3. H. ГЕЛІЕНЕВ 提出了电磁铸造(Electromagnetic Casting; EMC)的专利,并成功地应用于铝的铸造。然而将其直接应用于钢的连铸还面临着许多难题,主要在于钢的物性,如高熔点、高密度、低导电率、低导热率等。因此与铝相比,要平衡相同高度的钢水静压,需要更大的磁压力;另外钢的导热率低且浇注速度高,其液相穴长度远比铝长得多。为此近十几年来国内外都在钢的电磁铸造上进行了广泛、深入的理论和实验研究,以期为连铸技术带来革命性变革。

由于钢的电磁连铸是连铸技术的前沿课题,正在广泛的探索。本文仅就其作用原理、发展模

式和冶金机理等作一简单介绍。

2 借助电磁场控制初期凝固的机理

2.1 电磁场控制初期凝固的机理

运用电磁场控制初期凝固的机理简单说是控制弯月面的形状和拓宽熔融保护渣的通道,见图 1。即在初期凝固处外加交变磁场,由此产生磁压箍缩钢水,从而控制弯月面的形状,使弯月面曲率变小。与此同时,拓宽了熔融保护渣的通道,使得由于结晶器振动作用在坯壳上的动压减小,即钢水与结晶器的接触压力减小,使钢水与结晶器软接触;拓宽通

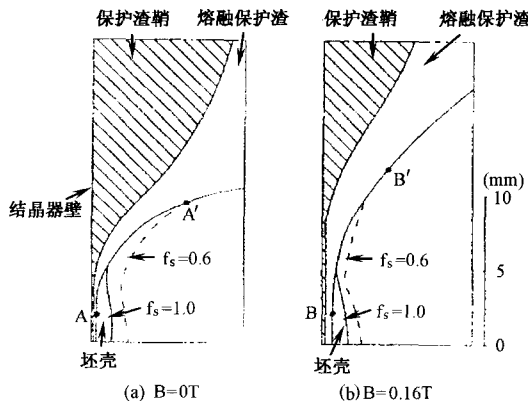


图 1 用电磁场控制初期凝固示意图

道,也改进了润滑状况。

2.2 电磁连铸的工作原理

电磁连铸的工作原理如图2所示。在结晶器外围配置一个感应线圈,称感应器。当感应器馈给单相交流电流时,就在其中产生按安培右螺旋法则指向的交变磁场 \vec{B} ,交变磁场向钢水内渗透就在其中感生起感应电流 \vec{J} ,其方向与感应器内的电流方向相反。该感应电流与当地磁场相互作用,产生电磁体力即劳仑兹力 \vec{F} ,它们符合 Fleming 左手定则,电磁体力 \vec{F} 的方向由表面指向中心。由于频率较高,电磁力集中在表面很薄的区域内,使钢水由表面向中心箍缩,从而使钢水与结晶器软接触。这就是电磁连铸的工作原理。

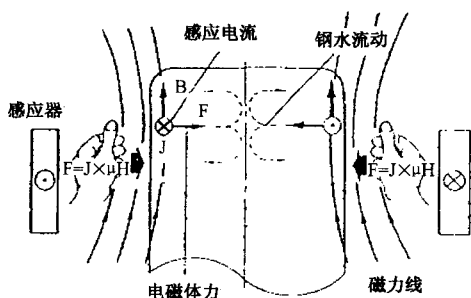


图2 电磁连铸工作原理示意图

描述电磁连铸的基本方程仍是麦克斯威方程,将安培定律(1)式代入电磁体力(2)式,并经向量运算后,得到(3)式。

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J} \quad (1)$$

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \vec{F} &= \vec{J} \times \vec{B} = \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{B} \right) \times \vec{B} \\ &= \left(\frac{1}{\mu} \vec{B} \cdot \nabla \right) \vec{B} - \nabla \left(\frac{B^2}{\mu} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 μ —钢水导磁率或真空导磁率。

(3)式右边第一项是有旋分量 \vec{F}_r ,它驱动钢水旋转运动,即搅拌功能;右边第二项是无旋分量 \vec{F}_i ,它产生磁压,向中心箍缩钢水,控制了弯月面的形状,即成型功能。 \vec{F}_r 与 \vec{F}_i 之比近似地表示为

$$\left| \frac{\vec{F}_r}{\vec{F}_i} \right| \approx \frac{\delta}{L} \quad (4)$$

L 是特征长度; $\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \omega \sigma}}$ 是磁场的渗透厚度; $\omega = 2\pi f$, f —频率; σ —钢水导电率。由(4)式可知,哪个功能占优势,很大程度上由所选择的频率决定。

随着频率增加, δ 变小, $\left| \frac{\vec{F}_r}{\vec{F}_i} \right| \ll 1$,这意味着电磁力

作为无旋力即磁压工作,也就是说,为了控制弯月面的形状,宜采用高频交流电流激磁;当 $\frac{\delta}{L} \sim 1$,电磁体力的有旋分量 \vec{F}_r 占优势,即为了增加钢水搅拌运动宜采用较低频率如工频交流电流激磁。由此可见,在电磁连铸中,频率的选择必须处理好两者的关系。

2.3 弯月面形状的确

理论和实验研究表明,弯月面的几何形状对电磁连铸是极其重要的。在磁压下,弯月面成一定形状,弯月面的形状主要取决于磁压与钢水静压之间的平衡;同时磁压的分布又受弯月面形状的影响,定量分析电磁场与弯月面的耦合作用,对于模拟实验、工程设计和工艺参数的选择是很重要的。

由(4)式可知,当频率较高时 $\frac{\delta}{L} \ll 1$,因此只考虑电磁力的无旋分量,即磁压,而忽略有旋分量即不考虑流体流动的影响。磁压在一个周期内的平均为:

$$P_m = \frac{B^2}{4\mu}$$

在有保护渣的工况下,弯月面的形状主要由磁压、钢水静压、钢水表面张力和熔融保护渣的静压等四个力的平衡所决定。因此沿弯月面的平衡方程为:

$$\begin{aligned} \frac{B^2 - B_0^2}{4\mu} + \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + \rho_s g (z_0 - z) \\ = \rho g (z_0 - z) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 B_0 —弯月面顶端的磁感应强度; z_0 —该点的坐标; γ —钢水和熔融保护渣之间的表面张力系数; R_1 、 R_2 —弯月面处的曲率半径; ρ 和 ρ_s —分别为钢水和保护渣的密度; g —重力加速度。在一定的边界条件下,求解方程(5)可以确定弯月面的形状。

图3表示在外加低频磁场下圆形结晶器内弯月面形状随外加磁感应强度的变化。由图可见,弯月面的高度随磁感应强度的增强而增加。

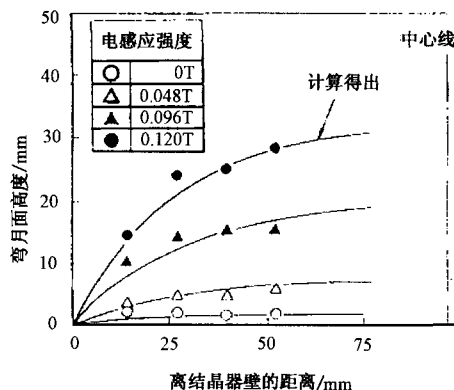


图3 弯月面形状与电场强的关系

图4表示在外加高频磁场下,方形冷坩埚型结晶器内弯月面形状的变化。数值模拟表明,电流强度、感应器的位置、电流频率、冷坩埚分瓣数对弯月面形状产生不同程度的影响。

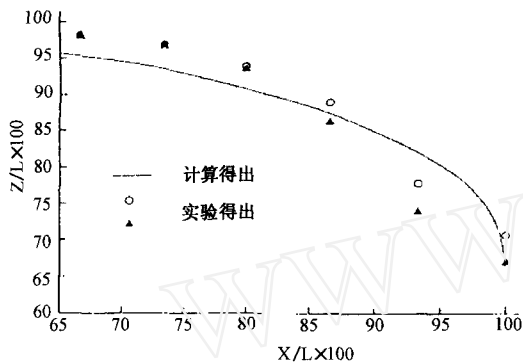


图4 方形冷坩埚电磁连铸弯月面形状

3 正在探索的几种类型电磁连铸技术

从目前正在探索的几种类型电磁连铸技术看,电磁连铸技术主要涉及结晶器的构形和感应器激发的磁场形态。因为钢的高密度和高的浇注速度要求电磁连铸结晶器承受高得多的钢水静压,因此设计电磁连铸结晶器必须考虑两个区域,即在其上部必须考虑电磁效果,使外加磁场尽可能多的透过结晶器,能有效地箍缩钢水;而在其下部,与常规连铸一样,必须考虑机械效果。目前正在探索的电磁连铸技术大致有以下几种类型。

3.1 CREM 技术

CREM (Casting, Refining, Electromagnetic) 技术由铝电磁铸造 (Electromagnetic Casting: EMC) 演变而来,将常规的结晶器与 EMC 相结合,即构成 CREM 技术,也称“软接触 (Soft Contact)”技术。“软接触”的含意是在磁压作用下,弯月面略微内缩,使结晶器与铸坯之间的熔融保护渣的通道扩大,弯月面受保护渣动压的作用减小,使钢水与结晶器的接触压力减小,从而使拉坯阻力也相应减小,故称“软接触”。CREM 技术的特点是:

1) 采用水冷整体薄壁结晶器,采用薄壁的主要原因是减小整体铜结晶器对磁场的屏蔽作用。

2) 在结晶器外围设置由铜管绕制的感应器,其位置相对于初期凝固区域。在感应器内馈给较低频率(通常为 50Hz)的交流电流,其强度通常在几百或上千 A。感应器通水冷却。

3) 外加的磁场形态可以是连续的,也可以是脉冲的,脉冲磁场与结晶器振动相匹配,有利于改进

表面粗糙度,也有利于改进坯壳与结晶器壁的润滑。

其作用是:借助磁压箍缩钢水,使钢水处于缓冷状态;另外采用低频电流激磁,增加了结晶器内钢水的搅拌运动。由于搅拌运动,使钢水内部温度均匀化,促进传热,利于过热度尽快消失;搅拌运动也有利于细化晶粒,改善凝固组织,以及夹杂物和气泡的上浮分离。因此,CREM 技术能使铸坯获得良好的表面质量和良好的内部质量。需指出的是,搅拌运动使弯月面附近流速过大、湍流过强,导致弯月面不稳定,会对铸坯质量产生不利的影响。

3.2 冷坩埚型电磁连铸技术

冷坩埚型电磁连铸 (Cold Crucible Continuous Casting) 技术,简称 4C 技术,它由感应悬浮熔炼技术演变而来。常规意义上的坩埚如石墨坩埚是整体的、热的,而此处的坩埚是分瓣的铜结晶器,内部通水冷却,在其运行过程中坩埚始终是冷的,故称冷坩埚。4C 技术的示意图见图 5。其特点是:

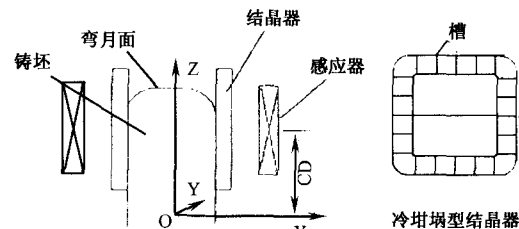


图5 冷坩埚型电磁连铸示意图

1) 结晶器不是整体的,而是由纵向槽将结晶器壁分隔成若干瓣,每瓣之间嵌有电绝缘材料,内部通水冷却。分瓣的作用是将铜结晶器上的感应电流分割成不连续的电流,从而大大地减小结晶器对磁场的屏蔽作用。因此结晶器的设计必须考虑到一是结晶器上的纵向槽必须窄得足以防止钢水渗漏;二是需要对槽的数目、宽度、深度及其分布进行优化。

2) 在冷坩埚的外围设置由铜管绕制的感应器,馈给高频电流,激发高频磁场。通常电流频率在几千或上万 Hz,其强度在几百或上千 A。

3) 感应器激发的磁场形态可以是连续的,也可以是间断的,连续磁场有利减少表面缺陷,频率越高,减少皮下缺陷越有效;而间断磁场,特别是与结晶器振动匹配的间断磁场更有利于减小振痕深度。

其作用是:感应器激发的高频磁场经分瓣的结晶器将磁场尽可能大地集中,使之产生足够大的磁压来箍缩钢水,使其与结晶器“软接触”,拉坯阻力减小。由于频率高,磁场的渗透厚度小,因而由电磁力产生的磁压较大,而搅拌力不大,使弯月面较平衡并

能有效地减少皮下缺陷,获得表面光滑的铸坯。需要指出的是,由于槽的存在,磁场和热流分布不均匀,可能引起铸坯的纵向裂纹和漏钢。

3.3 热顶电磁连铸技术

热顶电磁连铸技术借鉴了水平连铸技术,其特点是:

1) 热顶结晶器(Hot Top Refractory and Water Cooled Copper Mold)由两部分组成,在常规水冷结晶器上部设置耐火材料套筒,形成类似水平连铸机的三重点即耐火材料、结晶器和钢水的交界点。

2) 在耐火材料套筒外围的三重点附近配置由水冷铜管绕制的感应器。馈给高频电流,激发高频磁场。电流频率通常在几千 Hz,电流强度通常在几千 A。

其作用是:感应器激发高频磁场,由于加在耐火材料套筒外围,磁场很容易渗透到钢水内。由于频率高、渗透厚度小,磁场集中在铸坯表面,因而电磁力产生的磁压大。因为三重点起了初期凝固起始点的作用,在三重点处外加高频磁场能有效地控制初期凝固,从而在三重点处获得合适的凝固起始点。在磁压大于钢水静压的条件下,在三重点处钢水脱离耐火材料套筒,向耐火材料传热降低,防止坯壳从耐火材料侧生长;在磁压小于钢水静压条件下,钢水常常在耐火材料套筒内边接触边凝固。由于感应电流的焦耳热,使得给予坯壳的热量大于从耐火材料套筒的传热速度,坯壳起始点的温度上升。由此可见,无论在何种条件下,凝固起始点的温度总是较高,“热顶”的含意就在于此。因此,无论何种条件,都能利用高频磁场产生磁压有效地控制三重点处的初期凝固,从而改善铸坯表面的性状。

需要特别指出的是,热顶电磁连铸技术特别适合于水平连铸机。

4 电磁连铸的冶金机理

电磁连铸利用电磁力产生的磁压实现对初期凝固的控制,这种控制的冶金机理是:

1) 降低初期凝固起始点的位置

由于电磁力箍缩钢水,扩大了熔融保护渣的通道,使钢水与结晶器软接触,加上感应电流的加热作用,从而使初期凝固起始点的位置降低。图6表示初期凝固起始点的位置随感应器电压(实际也是电流)的变化。由图可见,电压越高,起始点的位置越低。

2) 增大弯月面的接触角

在常规连铸中,气泡和非金属夹杂物在上浮到

弯月面时,被顶部弯曲的坯壳捕获而形成表面和皮下缺陷如渣斑和气孔。在电磁连铸中,由于电磁力的箍缩效应,弯月面的曲率变小,在结晶器处的弯月面的接触角增大,坯壳顶部被拉直。图7表示弯月面接触角与电流强度和频率的关系。由图可见,弯月面的接触角随频率和电流强度的增加而增大。弯月面接触角的增大,有利于气泡和非金属夹杂物的上浮而易被保护渣吸收,因此铸坯表面和皮下缺陷大大减少。

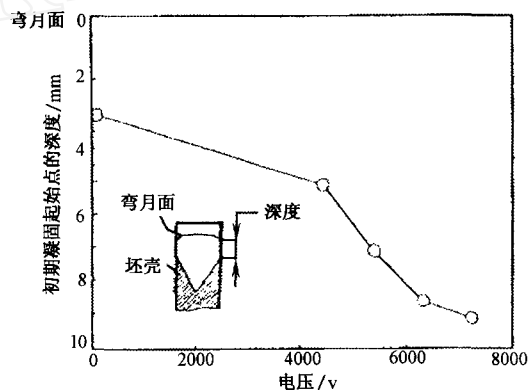


图6 初期凝固起始点位置与感应器电压的关系

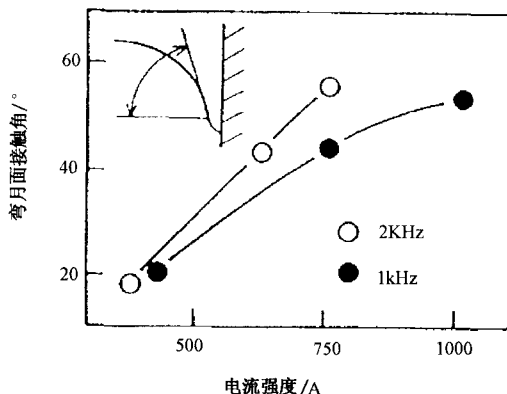


图7 弯月面的接触角与电流频率和强度的关系

3) 减少激冷层的深度

由于感应电流产生的焦耳热的作用,在初期凝固区域中钢水被感应加热,从而能显著地减小激冷层的深度,有利于气泡和夹杂物的上浮,减少了铸坯表面和皮下气孔和渣斑。

由上所述,常规连铸追求的热顶凝固在电磁连铸中易于实现。

5 冶金效果

由上述冶金机理,电磁连铸较常规连铸具有明显的优越性,初步的实验研究显示了以下冶金效果。

1) 铸坯表面性状明显变得光滑

图8为在外加低频磁场下铸坯表面性状的变化,由图可见在无外加磁场时,表面振痕明显,在外加低频磁场后,表面立刻变得光滑了。

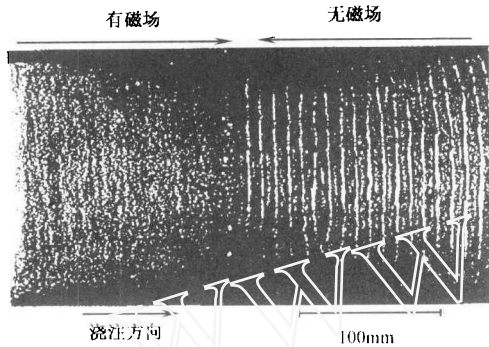


图8 有或无外加磁场时的表面性状

2)振痕变浅

图9表示在外加低频磁场下振痕深度随磁感应强度的变化。由图可见,振痕深度随磁感应强度增强而变浅。

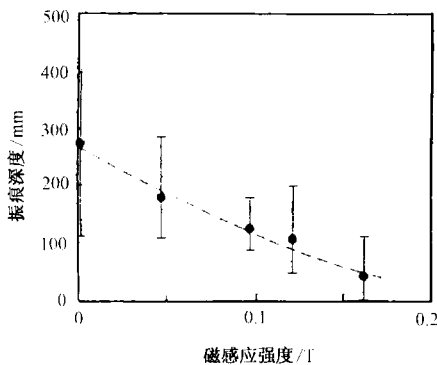


图9 振痕深度与磁感应强度的关系

3)减小拉坯阻力

图10表示在外加低频磁场下,拉坯阻力趋于减小,特别是在高拉速时。这说明在电磁场作用下坯壳变薄,并很容易随拉速而变形,因此电磁场在坯壳

上的影响更明显了。

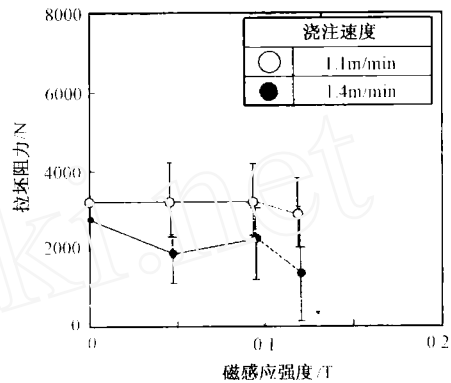


图10 拉坯阻力与磁感应强度的关系

需要指出的是,电磁连铸是连铸技术的前沿课题,国内外都在大力进行探索研究,相信今后还会有所发展,有所前进。上述材料只是为大连铸工作者了解电磁连铸的内涵提供一个参考。

参考文献

- 1 T. TOH et al. ISIJ International, 1997, 31(11): 1112.
- 2 鸺见,郁宏ウ.铁と钢,1992,78(3):109.
- 3 M. Morishita et al. In: Szekely J. ed. Magneto Hydrodynamics in Process Metallurgy TMS. 1991. 267.
- 4 竹内荣一.まてりあ,1997,36(7):703.
- 5 中田正之ウ.铁と钢,1996,82(12):41.
- 6 Tingju Li et al. ISIJ International, 1996, 36(4): 450.
- 7 增德鸿、毛斌等.金属学报,2000,36(2):162.
- 8 任忠鸣等.全国第二届电磁搅拌技术研讨会文集,毛斌主编. 1998. 174.
- 9 Nakata. H et al. International Symposium on EPM. 1994, Nagoya, ISIJ. 166.
- 10 Lavers, J. D. IEEE trans. on Ind. Appl. 1986, IA22(4): 586.
- 11 T. TOH. et al. International Symposium on EPM. 1994 Nagoya ISIJ. 254.
- 12 李廷举.金属学报,1997,33(5):524.

(全文完)

(上接第39页)

7 结语

1) 该渣系的研制,基本达到了成分设计和性能指标要求。各项性能控制较好,适应生产工艺的变化,能够满足普碳钢和低合金钢的使用要求。

2) 采用复合配碳和细颗粒配碳,改善了保护渣的熔化性能,三层结构控制合理,提高了保护渣的保温效果,消除了结渣条现象。

3) 试验渣的粘度随温度的变化较小,渣耗量

适中,基本适应拉速、熔速、钢水温度的变化,且润滑情况良好。

4) 试验渣形成了均匀固态渣膜,对改善传热,提高坯壳保温效果,减少铸坯裂纹起一定作用。

5) 铸坯质量良好,无清理率达到95%以上;钢板质量较好,合格板率大于98.2%,质量达到和超过同期对比渣水平。

参考文献

- 1 迟景灏,甘永年.连铸保护渣.东北大学出版社,1993.
- 2 卢盛意.连铸坯质量.冶金工业出版社,1994.