

改善铸坯质量。

2 结晶器电磁搅拌能明显地减少铸坯表层的非金属夹杂物,从大量的试片统计,非金属夹杂物平均级别从无电磁搅拌的0.45级下降到经电磁搅拌后的0.03级,下降了93%,对提高铸坯质量起到十分明显的作用。

3 铸坯横向低倍试样上的缩孔评级由于受到随机取样的影响,在同一段铸坯上切取的试样,在评级时会出现忽高忽低的现象,因此不能作为评定铸坯质量的标志。但由于电磁搅拌能改善铸坯的“小钢锭”结构,使集中的缩孔趋于分散,成为面积较大的疏松,从而使横向低倍试片在随机取样时低级别缩孔的试样取得率提高,从统计角度看可说明铸坯的缩孔得到改善,但单一的横向低倍试片的缩孔评级并不能代表铸坯的质量;大量的实践证明,铸坯“小钢锭”结构所形成的缩孔,只要与其同时形成的中心疏松和中心偏析评级不高,经轧制后都能焊合,对轧材质量并无明显影响;通过试样的分析还能发现,从同一段铸坯上切取的横向试样,其中心偏析和中心疏松的评级不受随机取样的影响,可代表铸坯的质量。

4 在无结晶器电磁搅拌的情况下,二冷电磁搅拌仅能将集中的缩孔降低(还是受到取样随机性的影响),但中心疏松的级别反而比不经电磁搅拌的有所提高,因此,在有结晶器电磁搅拌的情况下,如何准确选择二冷电磁搅拌的合适位置,将能更好地改善铸坯的中心疏松。

5 载流钢水在电磁搅拌磁场的作用下产生运动,在这一钢液运动的搅拌区内凝固的铸坯,其晶粒生长因受到钢液的冲刷作用,引起了负偏析现象,同时其凝速率也发生改变,反映在铸坯低倍试样上就形成了“白亮带”。白亮带内元素的绝对偏析量受到搅拌形式的不同而变化,其中行波直线搅拌产生的偏析量较低,如何根据铸坯质量的要求,合理选择电磁搅拌形式,并确定其合适的安装位置是连铸冶金技术上迫切需要解决的重要课题,应引起足够的重视。

6 电磁搅拌不能对铸坯内部裂纹的形成产生直接影响,但由于电磁搅拌能均匀液芯的温度,有利于铸坯凝壳厚度及坯壳热传导的均匀,从而可以缓解在冷却凝固中产生的复合应力,一定程度上可以减轻铸坯的内裂纹。

参考资料(略)

板坯结晶器全幅三段变磁通量电磁制动钢水流动的分析

毛斌 荣升 何达

中国科学院力学研究所

1 前言

利用磁场控制高速连铸结晶器内钢水流动力获得优质铸坯的电磁制动技术是当前连铸技术的重要发展之一。八十年代初以来,国外已先后开发了局部区域电磁制动EMBr和全幅一段EMBr Ruler,相继进行了理论分析、实验研究和工业应用,取得了良好的冶金效果。八十年代末以来国内也相继开展了电磁制动技术的研究,九十年代初由力学所、济南钢厂等在济南钢厂进行实机应用,研制成国内第一台板坯连铸

局部区域电磁制动装置,取得了改善铸坯质量和减少内部夹杂物的良好效果。然而局部区域电磁制动EMBr不能制动整个宽度的流动,当磁场增强时,水口下方和窄面附近分流过强,EMBr Ruler不能有效制动向上反转流股,使弯月面波动较大。九十年代中,国际上又开发了全幅两段FC Mold,工业实践表明,FC Mold比前两者有更好的冶金效果。但是,在薄板坯高速连铸中,由于拉速很高,FC Mold也不能有效地制动高速流股,且过分抑制弯月面下的钢水流流动,在连铸工艺上不可取。为此,本文提出全幅

三段变磁通量电磁制动技术方案,增强中段磁极的磁通量,加强对向下流股的制动,不增加上段磁极的磁通量,不过分抑制弯月面下的流动,增添第三段磁极,对向下流动实现第二次制动。本文建立了相应的钢水二维湍流流动的数学模型,采用 SIMPLE 算法,进行了流场的数值模拟,并用大源项法处理了形状复杂的水口区域,研究了全幅三段变磁通量电磁制动下钢水的流动结构,并与 FC Mold 的流动结构进行比较;还研究了磁极宽度对制动效果的影响。计算结果表明,全幅三段变磁通量电磁制动技术可以实现两次制动,使高速流股有效地制动和分散,形成均匀的活塞式流动,而且能保持弯月面下钢水具有一定的流速,使之更符合连铸工艺的要求。当拉速很高时,显示出全幅三段变磁通量电磁制动比两段相同磁通的 FC Mold 的制动效果好。

2 全幅三段变磁通量电磁制动技术方案的提出

在板坯连铸中,特别是薄板坯连铸中,拉速很高。但是,全幅两段 FC Mold 不能有效地制动高速流股,在水口下方仍有较大的回流区。在 FC Mold 中,由于两段磁场具有相同的磁通量,如果提高磁通量,增强磁场来提高制动效果和改善下回流区,但又过分抑制了弯月面下的流速,这在连铸工艺上是不可取的。日本 NKK 公司众多炉次试验的冷轧卷板的统计结果表明,弯月面的波高适当,产品发生缺陷的频度最低,弯月面的波高过高或过低,产品发生缺陷的频度会增高。因此,当拉速提高时,使用 FC Mold 并增大磁通量的办法,依然不能满足连铸工艺的需求。

为此,本文提出了一种新的电磁制动方案—全幅三段变磁通量电磁制动。增加中段磁极的磁通量,加强对向下流股的制动,不增加上段磁极的磁通量,不过分抑制弯月面下的流动,增添第三段磁极,对向下流动实现第二次制动。这一方案的电磁制动系统在结构上采用在宽面上配置一对 E 形电磁铁,其宽度与结晶器的宽度相同。上、中、下三段磁极分别配置在弯月

面、水口附近、水口下方一定距离。中段磁极分别与上、下两段磁极各形成一个磁回路,通过上、下两段磁极的磁力线方向与中段的相反,上或下段磁极中通过的磁通量是中段磁极的一半,即形成上、中、下三段磁极具有不同的磁通量。这个电磁制动系统在功能上形成上段磁场较弱,用于稳定弯月面并保持弯月面下有一定的流速,中段磁场较强,用于对向下高速流股的第一次制动,下段磁场用于第二次的制动。这样在效果上形成在拉速很高时,在相同的激磁功率下,全幅三段变磁通量电磁制动比全幅两段相同磁通的 FC Mold 的制动效果更好,更符合连铸工艺的要求。

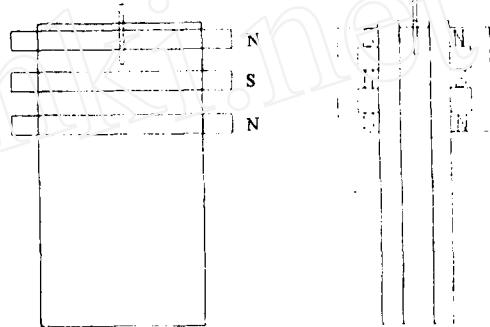


图 1 全幅三段变磁通量电磁制动系统结构图

3 数学模型

在结晶器中,钢水从浸入式水口两侧孔以速度 V 吐出,形成两股流股。水口插入深度 h ,水口径 r_{in} 和外径 r_{out} ,侧孔半径 r_s ,倾角 α ,板坯宽度 $2a$ 浇铸速度 V_c 。全幅三段变磁通量电磁制动系统安装在结晶器外,每对磁极间形成垂直于钢水流股的磁场,磁通密度矢量为 B ,磁极间的中心距为 τ 。考虑不可压缩钢水的二维对称定常流动,弯月面是水平自由面,忽略温度的影响,钢水动力粘性系数 μ 和导电率 σ 均为常数,磁雷诺数很小。

钢水流股流经垂直于它的磁场时,在其中产生感应电流 J ,它与当地磁场作用产生一个洛伦兹体力 $J \times B$ 作用于钢水上。由于结晶器内钢水流动的雷诺数较高,一般大于 10000,故流动为湍流,我们采用 $k-\epsilon$ 湍流模型,有效动

力粘性系数为 μ_{eff} 。结晶器内钢水流流动满足磁流体力学方程组,即动量方程、连续方程、欧姆定律、电流连续方程、法拉第定律分别为

$$\rho(V \cdot \nabla) V = -\rho P + \nabla \cdot [\mu_{\text{eff}}(\nabla V + V \nabla)] + J \times B$$

$$\nabla \cdot V = 0$$

$$J = \sigma(E + V \times B)$$

$$\nabla \cdot J = 0$$

$$\nabla \times E = 0$$

其中 V 、 ρ 、 P 、 J 和 E 分别为速度矢量、钢水密度、归一化压力、电流密度矢量和电场强度矢量, ϕ 为电场电位, $E = -\nabla \phi$ 。

由于对称,我们仅考虑半坯内流动,流场和电场应满足的边界条件为:在自由面上有自由滑移和绝缘条件,窄面上有不滑移条件和电绝缘条件,在出流边界上水平分速度 u 为零,垂直速度分量 v 的法向导数为零,电场电位 ϕ 为零,在中心线上有对称条件,电位 ϕ 为零,在入口(f),图中的虚线表示磁极位置。图 2(a)为无磁场 $B=0$ 和拉速 $V_c=1.7\text{m/min}$ 时速度矢量图,可以看到,从水口侧孔吐出的流股以较高的速度冲击窄面,向上反转流和向下回流较强,弯月面下钢水流速较高。图 2(b)是采用全幅两段 FC Mold 制动 $V_c=1.7\text{m/min}$ 和 $B_0=0.15\text{T}$ 时速度矢量图,可以看出,当拉速不很高时,全幅两段 FC Mold 制动效果良好。图 2(c)是采用全幅两段 FC Mold 制动,拉速提高一倍 $V_c=3.4\text{m/min}$ 和 $B_0=0.15\text{T}$ 时速度矢量图,可以看到,拉速提高一倍时,全幅两段 FC Mold 不能有效制动流股,流股冲击窄面的范围和速度较大,下游的回流区较大。图 2(d)是采用全幅三段变磁通量电磁制动, $B_0=0.15\text{T}$ 和 $V_c=3.4\text{m/min}$ 时的速度矢量图,制动效果良好。比较图 2(d)和图 2(c),在相同的磁通量情况下,全幅三段变磁通量电磁制动效果优于全幅两段 FC Mold 的制动效果,在其下游回流消失,形成更为均匀的“活塞”流动,有利于夹杂物上浮,而且在弯月面下保持适当的钢水流量,保证热量供应,更符合连铸工艺的要求。由于中段磁极的磁场较上、下段的要强,它对高速流股实施第一次、主要的

处,垂直速度 $v=v_{\text{in}}, u=0$ 。

4 计算方法和结果

计算区域为矩形,长 $l=4520\text{mm}$,宽 $a=600\text{mm}$,网格点 192×38 ,在水口附近区域、自由面和窄面附近加密网格点,采用自然网格和交错网格,用控制容积法离散磁流体力学方程组,利用大源项方法处理水口壁,使用 SIMPLE 算法求解。

本计算取以下各参数值: $h=250\text{mm}$, $r_{\text{in}}=40\text{mm}$, $r_{\text{out}}=65\text{mm}$, $r_s=40\text{mm}$, $\alpha=-15^\circ$, $V_c=1.7\text{m/min}, 3.4\text{m/min}$, $\tau=300\text{mm}$,最大磁通密度 $B_0=0, 0.075\text{T}, 0.15\text{T}, 0.3\text{T}$,上、中、下段磁极宽度分别为 $C_1=100\text{mm}$, $C_2=100\text{mm}, 200\text{mm}$, $C_3=100\text{mm}$,钢水密度 $\rho=7.1 \times 10^3\text{kg/m}^3$, $\mu=0.065\text{kg/m}\cdot\text{s}$, $\sigma=7.14 \times 10^3\text{S/m}$ 。

一些典型的计算结果见速度矢量图 2(a)~

制动,所以,我们计算了中段磁极的宽度变化对制动效果的影响。图 2(e)为采用全幅三段变磁通量电磁制动,三段磁极宽度相同, $C_1=C_2=C_3=100\text{mm}$ 时的速度矢量图,图 2(f)为全幅三段变磁通量电磁制动中段磁极加宽一倍 $C_2=200\text{mm}$,上、下两段磁极宽度不变 $C_1=C_3=100\text{mm}$ 时的速度矢量图,从图 2(e)和图 2(f)可以看到,在中段磁极宽度较窄时比加宽一倍时,磁力线较集中,磁通密度较强,流股对窄面的冲击较弱,在下游流场较均匀,回流较小。因此,中段磁极宽度较窄时制动效果较好。

5 结论

(1)一般拉速时,全幅两段 FC Mold 电磁制动能有效减小流股速度并使流股分散,制动效果良好。

(2)拉速高时,在相同的激磁功率下,全幅三段变磁通量电磁制动比目前的全幅两段 FC Mold 的制动效果更好。

(3)全幅三段变磁通量电磁制动系统的中段磁极宽度较窄,其制动效果较好。

参考文献(略)

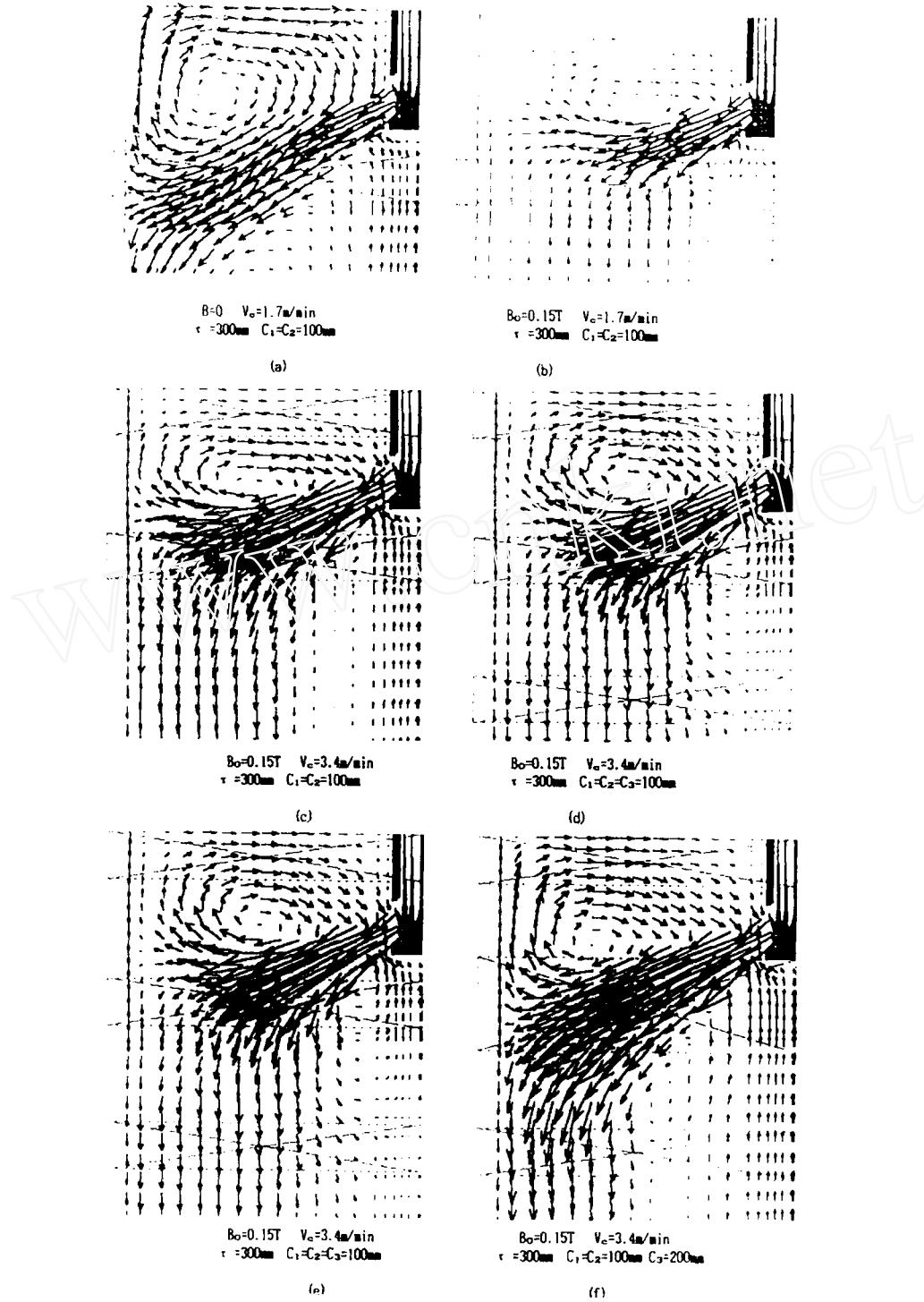


图 2 速度矢量图