

## 电磁制动对 CSP 结晶器内坯壳冲击和弯月面温度的影响

徐愧儒 刘光穆 孟征兵 尹延波  
(湖南华菱涟源钢铁有限公司,娄底 417009)

**摘要** 通过电磁制动数值模拟,提出了钢水对(900~1600)mm×(50~70)mm 结晶器内壁或铸坯初凝壳冲击和冲刷作用的半定量分析方法。数值模拟结果表明,电磁制动使钢水注流对结晶器窄边的冲击位置上升40%,上升流的冲刷强度下降了86%,下降流的冲刷强度下降了10%,这有利于避免发生铸坯初凝壳被钢水热流重熔等现象,从而减少铸坯横裂等凝固缺陷;现场对比试验结果表明,使用电磁制动使 CSP(紧凑式热带生产)结晶器内弯月面钢液温度上升5.8℃,有利于结晶器内钢水表面的化渣。

**关键词** CSP工艺 电磁制动 坯壳 弯月面温度

## Influence of Electromagnetic Brake on Impact to Solidified Shell and Temperature at Meniscus in CSP Mould

Xu Kuiru, Liu Guangmu, Meng Zhengbing and Yin Yanbo  
(Hunan Hualing Lianyuan Iron and Steel Corp, Loudi 417009)

**Abstract** With electromagnetic brake (EMBr) numerical simulation, the semi-quantitative method to analyze the impact of molten steel to inner wall and initial solidified shell in (900~1600) mm×(50~70) mm mould has been presented. The numerical simulation results showed that with EMBr the impact point of steel flow in mould at narrow face went up by 40%, and the impact intensity of up-flow and down-flow decreased by 86% and 10% respectively, it was available to avoid the solidified shell re-melting so as to reduce the solidification defect such as transverse crack. The commercial test results showed that with EMBr the temperature of molten steel at meniscus in CSP (Compact Strip Production) mould increased by 5.8℃, it was favourable to flux at surface of molten steel.

**Material Index** CSP Process, Electromagnetic Brake, Solidified Shell, Temperature at Meniscus

CSP(Compact Strip Production)即紧凑式热带工艺是由施勒曼-西马克公司开发的一种薄板坯连铸连轧工艺。自1986年西马克公司与美国纽柯钢铁公司签订CSP薄板坯连铸连轧技术的工艺化合同,1989年7月世界第1条生产热轧板卷的CSP生产线诞生以来<sup>[1]</sup>,其推广应用的速度很快,据统计1999年全世界CSP生产线占薄板坯连铸连轧生产线的70%,占世界钢产总量的5%,预计2013年将上升到50%,而美国CSP热轧板在2004年就达到其国内钢产总量的50%<sup>[2]</sup>。

早在20世纪50年代,就有人在结晶器上实验电磁制动技术<sup>[3]</sup>。1982年,由瑞典ASEA公司与日本川崎公司联合开发了连铸结晶器电磁制动技术(Electromagnetic Brake,简称EMBr),并在川崎公司的水岛钢厂进行实机应用试验,冶金效果良好<sup>[4]</sup>。之后电磁制动技术不断进步,随后开发了条尺形电磁制动EMBr-MR(也称电磁闸)技术,这种电磁制动装置于1991年安装在法国索拉克公

司敦刻尔克厂,后来荷兰艾莫尹登的霍戈文公司也装了这种设备<sup>[5]</sup>。据不完全统计,至1996年在世界范围内已有近30套各种类型的电磁制动装置用于板坯和薄板坯连铸<sup>[6]</sup>。

湖南华菱涟钢CSP连铸机(表1)于2004年9月安装调试了EMBr,2004年10月正式投入使用。它采用ABB公司的第2代产品——窗口式尺形电磁制动,在水口下整个宽面上都有磁场。电磁制动线圈由2个线圈绕组构成,它连同铁心和磁轭组成一磁路,这些磁轭围绕结晶器和2个铁心相连,此线圈绕组按电力学方式顺序相连,在结晶器内不吹氩。本实验采用数值模拟和现场试验来研究电磁制动对CSP结晶器内坯壳冲击和弯月面温度的影响。

### 1 EMBr对凝固初始坯壳冲击的影响

湖南华菱涟钢CSP连铸结晶器为直立型,长度为1100mm,宽度为900~1600mm,出口厚度

表 1 CSP 连铸机主要技术参数

Table 1 Main technology parameters of CSP concaster

项目	参数
中间包额定容量/t	30
铸坯断面/mm	厚 50 ~ 70, 宽 900 ~ 1 600
弧形半径/m	3.25
流数	1 流(2 台铸机)
流间距/mm	26 000
铸(拉)坯速度/m·min <sup>-1</sup>	2.8 ~ 6.0
铸坯定尺长度	10 m(最短) ~ 269 m(max, 半无头轧制)
冶金长度/m	9.705(导向段)
矫直方式	连续
二次冷却方式	水冷
电磁制动 EMBr	有
电磁搅拌	无
铸流保护	有
连铸机平均作业率/%	80
连铸机连浇铸炉数/炉	平均 16.45, 最大 28
浇铸时间/h	平均 7.77
年生产能力/万 t	260
钢水来源	100 t 顶底复吹转炉-100 t LF 或 RH
钢包容量 (一次处理钢水量)/t	100

为 50 ~ 70 mm。在结晶器上段 850 mm 深度以内为漏斗型腔,以安置双注流水口,该漏斗宽度为 880 mm,厚度为 180 mm。在结晶器 479 mm 深度范围内装有电磁制动线圈和磁轭系统(该位置为电磁制动系统的中心位置)。沿结晶器中面上的磁感应强度分布如图 1 所示,数值模拟的基本参数如表 2 所示<sup>[7]</sup>。

1.1 钢水注流对铸坯凝固初始坯壳冲击的强度模型

对结晶器壁面受到钢水的冲击问题,本文提出钢水注流对结晶器窄边内壁或铸坯凝固初始坯

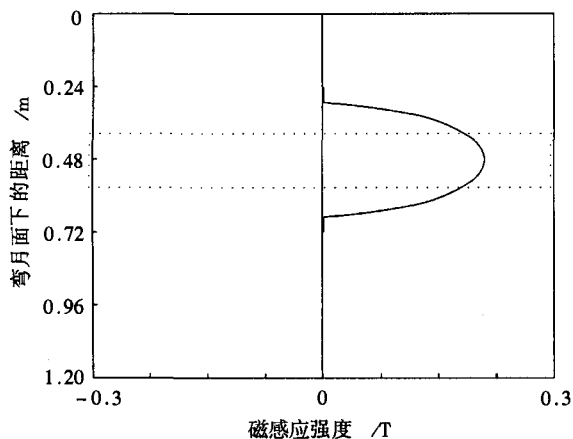


图 1 结晶器中面上的磁感应强度分布曲线

Fig.1 Distribution curve of magnetic flux density at center section in mould

表 2 电磁制动数值模拟主要参数

Table 2 Main parameters of electromagnetic brake (EM-Br) for numerical simulation

项目	参数
结晶器和计算区域/mm	1 500(宽) × 70(厚) × 2 000(长)
水口端面尺寸/mm × mm	160 × 40
水口插入深度/mm	150
钢水浇铸流量/t·min <sup>-1</sup>	3.4(拉速 V <sub>c</sub> = 4.5 m/min)
氩气注入流量/m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	0
钢水密度/kg·m <sup>-3</sup>	7 000
钢水粘度/m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	1.78 × 10 <sup>-3</sup>
浇铸温度/°C	1 550
钢水的电导率/Ω <sup>-1</sup> ·m <sup>-1</sup>	1.7 × 10 <sup>6</sup>
电磁制动中心处磁感应强度/T	0.2(电源输出电流 238 A)
电磁制动磁轭的中心位置/mm	479(自结晶器顶端向下)
电磁制动磁轭处结晶器壁厚/mm	50

壳的冲击强度,由钢水在固体壁面处水平流速的梯度来表示。在固体壁面处,钢水的水平流速 V<sub>x</sub> = 0(这表示钢水不会渗入固体壁面),若在沿固体壁面内法线方向取一段距离 Δx,则该处钢水的水平流速 V<sub>x</sub> ≠ 0,显然钢水由此处(Δx)冲击到结晶器内壁或铸坯初始凝壳时,其水平流速降低到零。根据动量原理,钢水冲击固体壁面动量的损失将转化为固体壁面所受到钢水的冲量,即:

$$\rho \Omega V_x = F_x \cdot \Delta t \tag{1}$$

式中:Ω-钢水的体积;ρ-流体密度;t-时间;F<sub>x</sub>-钢水对壁面的冲击力。

于是可用钢水冲击壁面时动量消耗来计算钢水对壁面的冲击力 F<sub>x</sub>。固体壁面附近钢水的水平流量 Q<sub>x</sub> = Ω/Δt,而 Q<sub>x</sub> = Ω/Δt = V<sub>x</sub> · S,故

$$F_x / S = \rho V_x^2 \tag{2}$$

式中 S 为固体壁面面积。该式为固体壁面在受到钢水冲击时,单位面积上所形成的冲击力。若再考虑固体壁面所受到的热冲击,则只要将钢水在壁面处的温度变化转换成钢水的热能损失 W(该热能降就是钢水对壁面的热冲击):

$$W = \rho C_p (T_m - T_w) V_{steel} = \rho C_p (T_m - T_w) \sqrt{V_x^2 + V_z^2} \tag{3}$$

式中:C<sub>p</sub>-热容;V<sub>steel</sub>、T<sub>m</sub>-分别为固体壁面处钢水的流速和温度;T<sub>w</sub>-固体壁面的温度,它对结晶器内表面即为结晶器温度,对铸坯初凝壳则为钢水凝固温度;V<sub>z</sub>-Z 轴方向上钢水的流速。

实际上,在式(2)中未考虑钢水流动受到电磁制动时钢水所克服的电磁制动力。因此,对于电

磁制动条件下,上述关系应修正为:

$$(F_x + F_{x,em})/S = \rho V_x^2 \quad (4)$$

即钢水流团动量的改变等于该时间内钢水所受到的电磁制动力与壁面冲击反力之和。这里,  $F_{x,em}$  为钢水流团所受的电磁制动力,与流速反向。由式(3)和(4)可知,

$$F_{x,em} = \sigma V \times B \times B \cdot \Omega = \sigma V_x B_y^2 \Omega = \sigma V_x B_y^2 \cdot S \cdot \Delta x \quad (5)$$

式中  $\sigma$ 、 $B$ 、 $B_y$  分别为导电率、总磁感应强度和  $Y$  轴方向上的磁感应强度。

于是,在电磁制动下,结晶器窄面所受到的钢水冲击强度修正为:

$$F_x/S = \rho V_x^2 - \rho V_x B_y^2 \cdot \Delta x \quad (6)$$

显然,在式(2)和(6)中,均含有(或隐含)长度变量  $\Delta x$ ,在数值模拟中,所取计算网格的大小不同,会对计算结果有一定影响。因此,本文提出的冲击强度分布模型更主要的是分析结晶器壁面所受到的冲击峰值区域的位置和范围,对冲击强度值更多的是对比不同位置或工艺条件下的相对结果。这是一种半定量分析方法。

同样,钢水对结晶器窄边和铸坯初凝壳表面的冲刷问题,本文也给出一种半定量分析方法,用结晶器内壁附近或铸坯初凝壳前沿  $\Delta x$  处钢水纵向流速的绝对值来表示,该流速的绝对值越大,则钢水对固体壁面的冲刷越强。

对钢水等牛顿流体来说,钢水对固体壁面的冲刷力  $\tau$  即为其作用在固体壁面上的摩擦力:

$$\tau = \mu \frac{\Delta V_x}{\Delta x} \quad (7)$$

式中  $\mu$  为摩擦系数。这样,若  $\Delta x$  足够小,由上式可用来表示钢水对固体壁面的冲刷强度。该式仍然与数值模拟中所取计算网格的大小有关,  $\Delta x$  值会对计算结果有一定影响。因此上式主要分析的是结晶器壁面所受到冲刷峰值区域的位置和范围,或是对比不同位置及不同工艺条件下结晶器受到钢水冲刷的相对强度。

### 1.2 结晶器内壁或凝固初始凝壳受钢水注流冲击的比较

图 2(a)是钢水注流对结晶器内壁或铸坯初凝壳冲击强度的分布图。该冲击强度的定义是本研究理论解析的结果,它在一定程度上能定量反映钢水注流对结晶器或铸坯初凝壳的冲击作用。图中为注流钢水在结晶器窄面或铸坯初凝壳处的动量变化率(每单位时间内的动量变化量)。在无电磁制动时,其最大值为  $50 \text{ N/m}^2$ ,该值即为钢水的最大冲击力,其作用点在液面下  $0.6 \text{ m}$  处;有电磁制动时,其动量变化率的最大值为  $60 \text{ N/m}^2$  (作用点位于液面下  $0.35 \text{ m}$  处),该值还包括了注流钢水在结晶器中所受到的电磁制动力。可见,电磁制动使注流钢水对结晶器或铸坯初凝壳的最大冲击点位置上移约  $40\%$  ( $0.25 \text{ m}$ ),降低了其对铸坯初凝壳的冲击和重熔等影响。

### 1.3 结晶器内壁或凝固初始凝壳受钢水流动冲刷的比较

图 2(b)是靠近结晶器内壁或凝固初始凝壳处钢水垂直流动速度分布图。根据图中钢水近壁面处的垂直流速分布,可由式(4)计算出钢水对固体

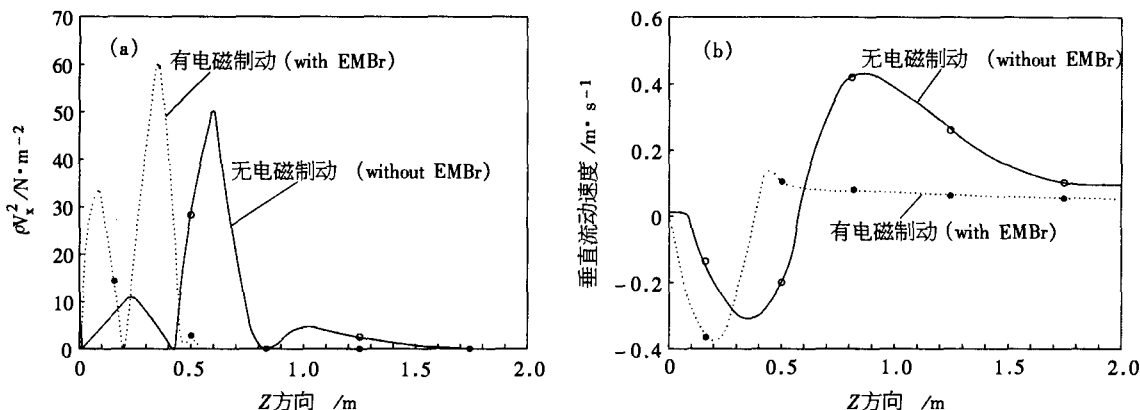


图 2 弯月面下结晶器壁受钢水冲击的强度分布(a);结晶器窄边内壁所受的钢水冲刷强度分布(b)  
Fig.2 Impact intensity of molten steel flow to mould wall below meniscus (a) and to narrow side of mould wall (b)

壁面的摩擦力(即冲刷强度)。该冲刷强度的定义是本研究理论解析的结果,能在一定程度上半定量地反映近固体壁面处钢水的流动对结晶器或铸坯初凝壳的冲刷作用。计算结果显示,无电磁制动时,钢水向下和向上流动对固体壁面冲刷的最大强度分别为  $0.063 \text{ N/m}^2$  和  $0.089 \text{ N/m}^2$ ,其位置分别在液面下  $0.9 \text{ m}$  和  $0.4 \text{ m}$  处;而有电磁制动时,钢水向下和向上流动对固体壁面冲刷的最大强度则分别为  $0.009 \text{ N/m}^2$  和  $0.08 \text{ N/m}^2$ ,其位置分别在液面下  $0.46 \text{ m}$  和  $0.22 \text{ m}$  处。由此可见,电磁制动使钢水对结晶器内壁或铸坯初凝壳的冲刷强度降低,其中上升流降低  $86\%$ ,下降流降低  $10\%$ ,这对减少铸坯表面横向热裂有利。

同时,由上述计算结果可知钢水对结晶器内壁或凝固初凝壳的冲刷力很小。根据计算所得的钢水流速分布,在结晶器温度或钢水温度已知时,可直接利用式(3)计算钢水的“热”冲击强度。

## 2 EMBr 对弯月面温度的影响

为了掌握 EMBr 对弯月面温度的影响,在湖南华菱涟钢 CSP 连铸现场进行了对比试验。湖南华菱涟钢 CSP 结晶器,在结晶器铜板外表面装了热电偶,其中窄面装了 4 排,每排每边装了 2 个热电偶;宽面装了 3 排,每排固定侧和活动侧各装了 8 个热电偶。通过由西马克公司提供的与 CSP 连铸配套的 MMS(Mould Monitoring System,即结晶器监视系统)中热成像系统来获得数据。

在同一炉钢、同一拉速浇注过程中,前  $10 \text{ min}$  使用 EMBr,之后关闭 EMBr  $10 \text{ min}$ ,在使用与关闭 EMBr 期间各采集接近弯月面位置的最上面一排热电偶所测定的温度数据进行对比,其结果见表 3(表中“+”为温度升高,“-”为温度下降;“ $T_1$ ”和“ $T_2$ ”分别指有、无 EMBr 时中间包钢水温度)。由表 3 可见,使用 EMBr 使弯月面温度上升  $5.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

表 3 使用比未使用 EMBr 时结晶器弯月面钢液温度上升值,21 炉/ $^\circ\text{C}$

Table 3 Temperature increment of molten steel at meniscus in mould using EMBr compared with non-using EMBr, 21 heats/ $^\circ\text{C}$

项目	中间包温度差 $T_2 - T_1$	有 EMBr 比无 EMBr 时温度上升	
		不考虑中间包温差	考虑中间包温差
范围	-1 ~ +9	-1.7 ~ +10.0	+1.6 ~ +10.5
平均	+1.7	+4.1	+5.8

## 3 EMBr 对结晶器内钢液热流密度的影响

在同一炉钢、同一拉速浇铸过程中,前  $15 \text{ min}$  使用 EMBr,之后关闭 EMBr  $15 \text{ min}$ ,选连铸工艺稳顺的时段各取  $10 \text{ min}$ ,每隔  $1 \text{ min}$  通过由西马克公司提供的与 CSP 连铸配套的 TCS-Edas(Technology Control System-Electronic data acquire system,即工艺控制系统中电子数据采集系统)来采集热流密度数据,得到结晶器内钢液热流密度的标准偏差,得出无论是窄面右侧还是左侧、宽面活动侧还是固定侧,使用 EMBr 都使结晶器内钢液热流密度标准偏差明显减少,即其离散度明显减少。

## 4 结论

(1) 描述钢水对结晶器内壁或铸坯初凝壳冲击作用的半定量分析方法和模型为:  $F_x/S = \rho V_x^2 - \sigma V_x B_y^2 \cdot \Delta x$ 。并直接采用牛顿流体的内摩擦(剪力)模型  $\tau = \mu \frac{\Delta V_x}{\Delta x}$ ,作为半定量方法来分析固体壁面所承受的钢水冲刷的位置和相对强度。

(2) 电磁制动使钢水注流对结晶器窄边(最大)冲击位置上升  $40\%$ ,上升流冲刷强度下降  $86\%$ ,下降流冲刷强度下降  $10\%$ ,有利于避免铸坯初凝壳被钢水热流重熔,减少铸坯横裂等缺陷。

(3) 电磁制动使弯月面钢液温度上升  $5.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ,这有利于结晶器内钢水表面的化渣。

(4) 电磁制动使结晶器内钢液热流密度标准偏差明显减少,即其离散度明显减少。

## 参考文献

- 1 宋 贤.薄板坯连铸连轧线辊底式加热炉.特殊钢,2001,22(6):30
- 2 Fritz-Pete Pleschiuts Chnigg, Gunter Flemming, Wolfgang Hennig, et al. The Latest Developments in CSP-Technology. 1999 CSP Annual Meeting, Beijing, China, October 19-21, 1999
- 3 王 军,王宏静,刘 杰.连铸工艺中的电磁技术.宽厚板,2000(3):18
- 4 Jun Nagai. Steel Flow Control in a High-speed Continuous Slab Casting Using an Electromagnetic Brake, Iron & Steel Engineer, 1984(5): 41
- 5 Lehman A, Tallback G, Rullgard A. The Use of Electromagnetic Braking in Continuous Casting. Steel Times, 1996(7): 278
- 6 毛 斌.连铸电磁冶金技术.连铸,1999(6):37
- 7 刘光穆,郑柏平,焦国华,等.高拉速下 CSP 连铸电磁制动的数值模拟.薄板坯连铸连轧技术交流与开发协会第三次技术交流会论文集,中国工程院产业工程科技委员会,薄板坯连铸连轧技术交流与开发协会,2005:174

徐愧儒(1969-),男,硕士,工程师,1990 年重庆科技学院毕业,从事产品开发与营销工作。

收稿日期:2005-09-05