

# 电磁制动对 CSP 结晶器内流动和传热的影响

张晓峰<sup>1,2</sup>, 张路莎<sup>1,2</sup>, 王 宝<sup>1,2</sup>, 刘 青<sup>1,2</sup>

(1. 北京科技大学 钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083; 2. 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 采用数值模拟方法, 通过计算 1 500 mm × 90 mm CSP 漏斗型结晶器内磁场、流场和温度场分布, 研究了 CSP 漏斗型结晶器采用不同浸入式水口条件下电磁制动对钢液流动和传热行为的影响. 研究结果表明, 施加电磁制动后, 采用牛鼻子水口的结晶器内流股冲击深度变小, 自由液面最大速度从 0.231 m/s 降至 0.067 m/s; 采用双侧孔水口的结晶器内钢液主流股向上弯曲的趋势消失, 流股对结晶器窄侧壁的冲击强度减弱, 结晶器上部回流钢液速度减小, 自由液面最大速度从 0.798 m/s 降到 0.140 m/s. 综合比较采用两种水口时电磁制动对钢液流动和传热行为的影响, 采用双侧孔水口时制动效果较好, 有利于提高铸坯质量.

**关 键 词:** CSP 漏斗型结晶器; 浸入式水口; 电磁制动; 数值模拟

中图分类号: TF 777.7

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)02-0232-06

## Influences of EMBr on Flow and Heat Transfer in CSP Mold

ZHANG Xiao-feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Lu-sha<sup>1,2</sup>, WANG Bao<sup>1,2</sup>, LIU Qing<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China. Corresponding author, LIU Qing, professor, E-mail: qliu@ustb.edu.cn)

**Abstract:** The magnetic field, flow field and temperature field in the CSP funnel type mold with a size of 1500 mm × 90 mm were calculated by numerical simulation, and the influences of electromagnetic brake (EMBr) on the behavior of flow and heat transfer of molten steel with different submerged entry nozzle (SEN) in the CSP mold were researched. The results show that the impinging depth of steel jet is shortened in the mold with cow-nose nozzle when the EMBr is employed, and the maximum velocity in the free surface is decreased from 0.231 m/s to 0.067 m/s. The upswept trend of liquid steel mainstream disappears under the influence of EMBr when the bifurcated nozzle is adopted. The impinging strength of steel jet on the narrow side of mold is weakened. The velocity of molten steel in the upper circumfluence is reduced. The maximum velocity in the free surface decreases from 0.798 m/s to 0.140 m/s. Comparing synthetically the influences of EMBr on the behavior of fluid flow and heat transfer with the two kinds of SEN, the braking effect is better under the condition of bifurcated nozzle, and the quality of thin slab is improved.

**Key words:** CSP funnel type mold; submerged entry nozzle (SEN); electromagnetic brake; numerical simulation

CSP 薄板坯连铸机通常采用漏斗型结晶器和与之配套的扁平型浸入式水口, 构成了薄板坯连铸工艺的核心技术. 结晶器内钢液的流动状态主要与拉坯速度、浸入式水口参数和结晶器尺寸等因素相关. 以往的研究发现, 仅改变这些参数不能

从根本上改善钢液在结晶器内的流动形式<sup>[1-2]</sup>.

目前, 国内外学者对结晶器电磁制动的应用做了大量的研究工作<sup>[3-10]</sup>. 李宝宽等<sup>[3]</sup>建立磁场-流场耦合数学模型, 分析了电磁制动对 CSP 结晶器内钢液流动的影响. Wang 等<sup>[4]</sup>采用数值

模拟方法对电磁制动作用下板坯结晶器内流动 - 温度 - 夹杂物运动进行了研究. Ha 等<sup>[5]</sup>对电磁制动下板坯结晶器内钢液的三维流动、传热和凝固现象进行了数值模拟研究. Yu 等<sup>[6]</sup>数值模拟了电磁制动和吹氩对板坯结晶器内多相流动 - 传热的影响. Tian 等<sup>[8]</sup>比较了传统电磁制动与新型电磁制动对薄板坯漏斗型结晶器内钢液的流动 - 传热 - 凝固的影响, 得出新型电磁制动在达到与传统电磁制动相同的制动效果时消耗较少电能的结论. 作者前期的研究发现, 直流电磁制动装置下 CSP 结晶器内相同高度的磁场强度分布较为均匀, 电磁制动效果明显, 有效减少了结晶器注流钢液扰动, 提高了结晶器弯月面温度, 并通过计算得到电磁制动合理工艺参数<sup>[10]</sup>.

上述文献中采用多场耦合方法, 围绕电磁制动的冶金效果, 针对拉速、水口插入深度、夹杂物上浮等进行研究, 但是, 针对薄板坯结晶器电磁制动效果的研究并不全面. 当 CSP 结晶器内采用结构不同的水口时, 钢液流动形态明显不同, 因此, 施加电磁制动对钢液的制动效果也有差别. 本文借鉴相关研究方法, 建立了 CSP 结晶器内磁场 - 流场 - 温度场耦合数学模型, 研究 CSP 结晶器不同浸入式水口条件下电磁制动对钢液流动和传热行为的影响, 为 CSP 薄板坯浇铸过程中浸入式水口的选型及电磁操作工艺优化提供理论参考.

# 1 模型建立

## 1.1 模型假设

为了便于对电磁制动作用下 CSP 结晶器内钢液的流动和传热现象进行描述和计算, 假设:

- ①结晶器内钢液为稳态不可压缩黏性流体;
- ②钢液按均相介质处理, 物性参数为常数;
- ③忽略凝固坯壳对钢液流动的影响;
- ④钢液的电磁参数均匀且各向同性, 忽略感生电流产生的二次磁场.

## 1.2 磁场计算

本文建立的电磁制动 (EMBr) 系统装置几何模型如图 1 所示.

电磁场的基本理论由 Maxwell 方程组描述, 包括安培环路定律、法拉第电磁感应定律、高斯电通定律和高斯磁通定律.

## 1.3 电磁场作用下流体流动计算

根据国内某 CSP 厂提供的浸入式水口 (SEN) 结构简图, 对浸入式水口模型作了合理简化, 图 2 所示为两种浸入式水口几何模型, 由于结

晶器几何对称性, 按照对称原则选取其四分之一作为计算区域, 并为了使钢液在出口处充分发展以利于计算收敛, 将计算域延长至 2 000 mm.

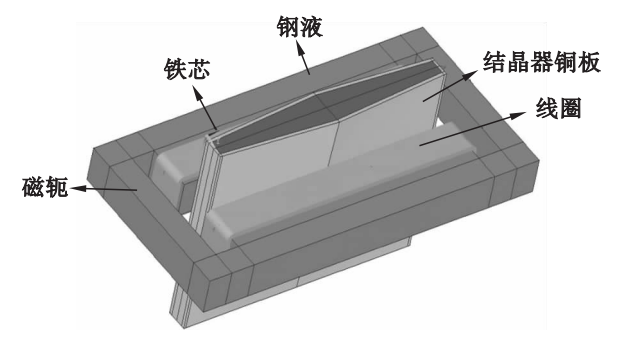


图 1 电磁制动系统装置几何模型  
Fig. 1 Schematic of EMBr system equipment

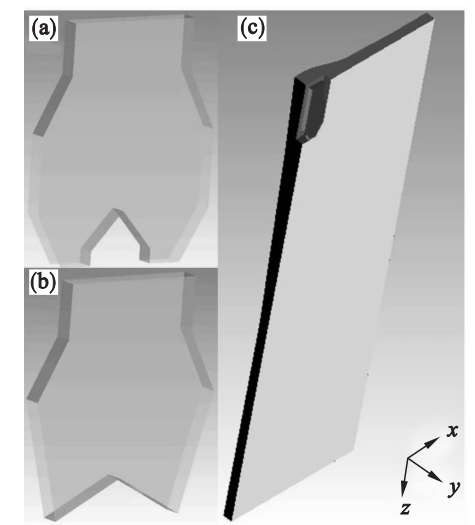


图 2 CSP 结晶器和浸入式水口几何模型  
Fig. 2 Schematic of the CSP mold and SEN

(a) — 牛鼻子型水口; (b) — 双侧孔型水口;  
(c) — CSP 结晶器.

电磁场作用下结晶器内钢液流动和传热现象可由连续性方程、动量方程、湍流  $k - \varepsilon$  双方程和能量方程描述.

动量方程中的电磁力是由电磁制动线圈产生的恒稳磁场与流动的钢液相互作用而产生的, 由式 (1) 表达.

$$\mathbf{F}_{\text{em}} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} . \tag{1}$$

感应电流密度通过求解电势方程得出:

$$\nabla^2 \varphi = \nabla \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) , \tag{2}$$

$$\mathbf{j} = \sigma [ - \nabla \varphi + (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) ] . \tag{3}$$

式中:  $\mathbf{B}$  为磁感应强度, T;  $\mathbf{j}$  为感应电流密度,  $\text{A}/\text{m}^2$ ;  $\sigma$  为电导率,  $\text{S}/\text{m}$ ;  $\varphi$  为电势, V;  $\mathbf{v}$  为钢液流速,  $\text{m}/\text{s}$ ,  $\mathbf{F}_{\text{em}}$  为电磁力, N.

## 1.4 边界条件

磁场计算中采用磁标量位方法将电流源以基元方式单独处理. 计算中用到的主要参数见表 1.

表 1 模型尺寸与计算参数	
Table 1 Model size and computational parameters	
参数	值
计算区域尺寸/mm	1 500 × 90 × 2 000
水口断面尺寸/mm	160 × 40
水口浸入深度/mm	250
拉速/( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	5
钢液密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	7 020
钢液黏度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0.005 5
浇注温度/℃	1 547
液相线温度/℃	1 521
钢液导热系数/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	27
钢液电导率/( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$7.14 \times 10^5$
结晶器铜板电导率/( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$1.78 \times 10^7$

电磁场作用下钢液流动和传热的边界条件设置如下:

①入口:入口速度根据质量守恒由拉速换算得出,湍流动能和湍流动能耗散率由式(4)和式(5)给出,钢液温度为浇注温度.

表 2 不同研究条件下的参数  
Table 2 Parameters under different conditions of research

研究条件	结晶器 宽度/mm	结晶器窄边 厚度/mm	磁动势/A	电磁制动装置 安装高度/mm
文献[12]计算条件	1 100	70	10 000	400
本文计算条件(1)	1 500	90	30 000	550
本文计算条件(2)	1 100	70	10 000	400
文献[11]测量条件	1 500	90	电流 570 A	—

图 3a 所示为沿结晶器中心高度方向的磁场强度分布.其中,文献[11]实际测量了邯钢 2 号薄板坯结晶器弯月面下 900 mm 以上高度范围内的磁场强度,文献[12]计算出结晶器漏斗形区域所在高度(850 mm)范围内的磁场强度,而本研究则计算出结晶器有效高度(1 100 mm)范围以内的磁场强度分布.由于不同条件下的电流强度(磁动势)和电磁制动装置安装高度不一致,结晶器内磁场强度最大值以及最大磁场强度的存在位置有所差别.然而,由图 3a 可知,不同条件下的磁场强度在结晶器高度方向上的分布趋势相同,均呈现先增后减的趋势,且在制动装置中心位置达到最大值.图 3b 所示为制动装置中心沿结晶器水平方向的磁场强度分布.由图 3b 可知,在水平方向上,不同条件下的磁场强度在结晶器中心变化均不明显,而靠近结晶器窄侧壁呈减小的趋势.由图 3 可知,不同计算条件下磁场强度分布与文献

$$k=0.01\nu_{\text{inlet}}^2,$$

(4)

$$\varepsilon=\frac{2k^{1.5}}{d_{\text{nozzle}}}.$$

(5)

②对称面和自由液面:垂直速度分量及沿法向的各物理量的梯度为零,自由液面简化为绝热边界条件.

③壁面:垂直表面的速度分量和其他物理量的法向分量为零,电势  $\varphi$  给定第一类边界条件,浸入式水口壁面为绝热边界,结晶器壁面简化为凝固前沿,温度设为液相线温度.

④出口:计算域出口定义为自由出流,各变量沿出口截面的法向梯度为零.

2 模型验证

由于针对 CSP 结晶器磁场研究的文献很少,为了检验本文计算磁场的方法是否可行,得到的磁场数据是否准确,作者查找到文献[11]和文献[12],将本文研究结果分别与之比较.表 2 列出了不同研究条件下的参数值.

[11]、文献[12]相近,特别是在本文计算条件(2)下,当电磁制动安装位置、电流强度等计算参数相同时,与文献[12]结果趋于一致.因此,本文的磁场计算方法可行,计算结果准确、可靠.

3 计算结果与分析

本文研究了采用不同水口时,电磁制动对 CSP 漏斗型结晶器内钢液流动和传热的影响.

3.1 牛鼻子水口结晶器电磁制动效果

针对 CSP 漏斗型结晶器使用的牛鼻子型水口,模拟计算条件如下:拉速 5 m/min,水口浸入深度 250 mm,电磁制动装置安装高度 450 mm.图 4 所示为有、无电磁制动作用下牛鼻子水口结晶器中心宽面上的速度云图与钢液流线图.

由图 4 可知,未施加电磁制动时(见图 4a),钢液从浸入式水口出口射流而出后以较大的速度

冲入结晶器内部,主流股冲击深度较深,会将钢液中的非金属夹杂物带入结晶器底部,不易上浮.施加电磁制动后(见图 4b),钢液流动明显得到抑制,主流股变短,且没有冲击结晶器窄侧壁,上部回流区域的钢液主要集中在水口附近,下部回流的钢液减少,整个结晶器内的流场分布更加均匀.由图 5 可知,施加电磁制动后,牛鼻子水口结晶器自由液面速度由 0.231 m/s 降至 0.067 m/s.

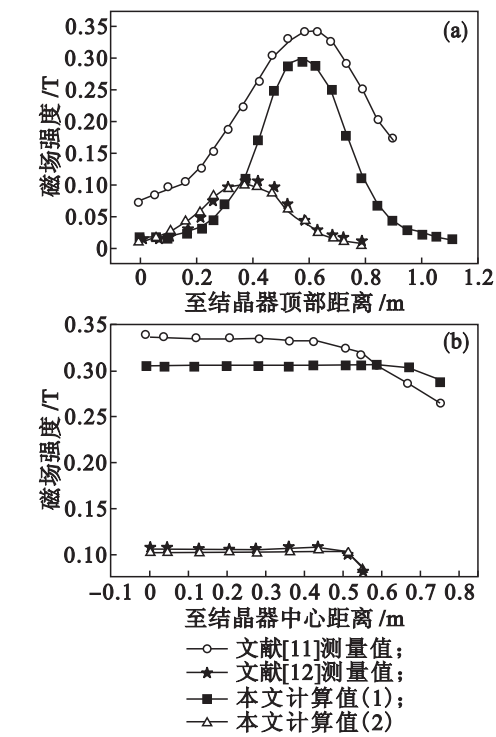


图 3 结晶器不同方向的磁场强度分布  
Fig. 3 The distribution of magnetic flux density in different directions of mold  
(a)—沿高度方向; (b)—沿水平方向.

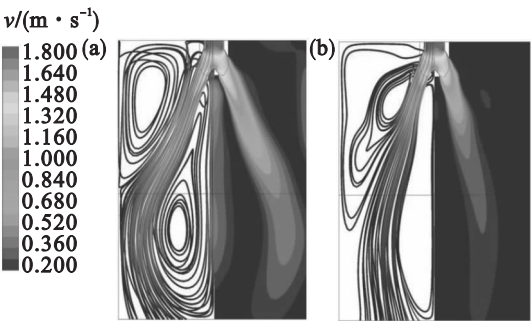


图 4 牛鼻子水口结晶器流场与流线分布  
Fig. 4 Distribution of flow field and streamline in the mold with cow-nose nozzle  
(a)— $B=0\text{ T}$ ; (b)— $B=0.3\text{ T}$ .

由图 6 可见,当无电磁制动作用时(见图 6a),热量随高速流动的钢液流股进入结晶器内部,由于湍流扰动剧烈,热扩散较快,钢液主流股周围温度梯度较大,且结晶器上部存在一个面积

较大的低温区域,将不利于保护渣的熔化.当有电磁制动作用时(见图 6b),由于高温钢液射流受到抑制,钢液主流股的温度梯度变小,温度场分布更加均匀.同时,结晶器弯月面附近的低温区域面积明显变小,有利于钢液把较多的热量传输给保护渣层,促进保护渣的熔化.

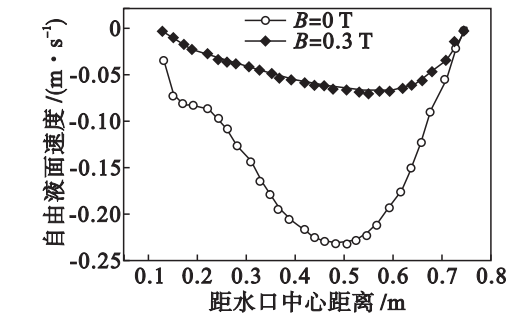


图 5 牛鼻子水口结晶器自由液面速度分布  
Fig. 5 Velocity distribution in the free surface of mold with cow-nose nozzle

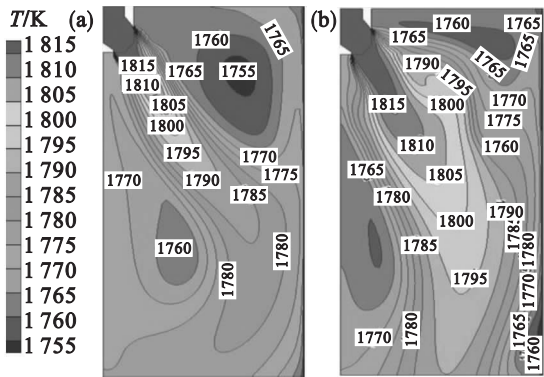


图 6 牛鼻子水口结晶器温度场分布  
Fig. 6 Distribution of temperature field in the mold with cow-nose nozzle  
(a)— $B=0\text{ T}$ ; (b)— $B=0.3\text{ T}$ .

3.2 双侧孔水口结晶器电磁制动效果

采用与 3.1 节相同的模拟计算条件,本节针对漏斗型结晶器使用的双侧孔型水口,研究电磁制动对钢液流动和传热行为的影响.

由图 7 可见,未施加电磁制动时(见图 7a),由于双侧孔水口侧孔面积较牛鼻子水口的小,且底部导流槽角度大,钢液射流携带较大的动能从水口出口流出,在较短的时间内强烈冲击到结晶器窄侧壁,湍流动能耗散受限,这时漏斗型结晶器上部较为开阔的空间为钢液能量的聚集和耗散提供了可能性.因此,钢液流股呈现向上弯曲的趋势,这导致上部回流流动强度大,弯月面波动增大,加重卷渣现象.当施加最大磁场强度为 0.3 T 的电磁制动时(见图 7b),由于电磁力的抑制作用,结晶器内钢液的流动形式发生了显著改变,钢

液主流股向上弯曲的趋势消失,冲击深度变小,对结晶器窄侧壁的冲击强度减弱.结晶器上部回流流动强度明显变弱,有利于弯月面的稳定,减小保护渣卷入钢液的机会.由图 8 可知,在电磁制动作用下,双侧孔水口结晶器自由液面最大速度从 0.798 m/s 降至 0.140 m/s.

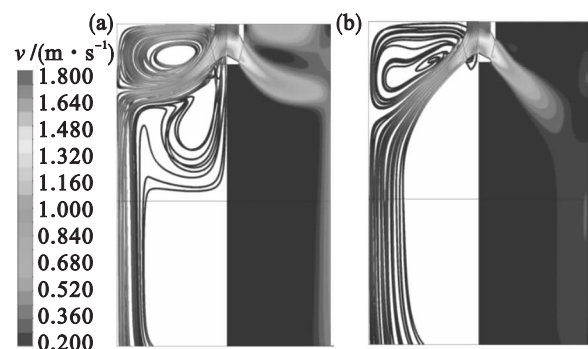


图 7 双侧孔水口结晶器流场与流线图

Fig. 7 Distribution of flow field and streamline in the mold with bifurcated nozzle

(a)— $B=0$  T; (b)— $B=0.3$  T.

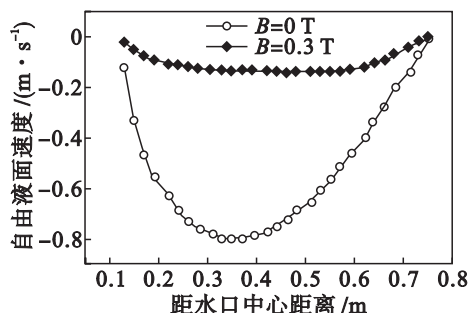


图 8 双侧孔水口结晶器自由液面速度分布

Fig. 8 Velocity distribution in the free surface of mold with bifurcated nozzle

图 9 给出了有、无电磁制动作用时结晶器中心宽面上的温度场分布.由图 9b 可知,由于电磁制动作用,钢液主流股向上弯曲的趋势消失,钢液主流股末端的高温钢液不能将热量传递到弯月面附近,弯月面温度降低了  $10^{\circ}\text{C}$  左右,但钢液向整个结晶器内部扩散,温度梯度减小,温度场分布更加均匀.综上所述,在无电磁制动作用条件下,当采用牛鼻子水口浇铸时(见图 4a),钢液流股冲击深度深,不利于夹杂物上浮去除;结晶器上部区域温度较低,不利于保护渣层的熔化.采用双侧孔水口浇铸时(见图 7a),结晶器上部回流过强,自由液面波动大,卷渣现象严重;高温钢液强烈冲击结晶器窄侧壁,易造成初始凝固坯壳重熔.而施加电磁制动后,两种类型水口的结晶器内钢液流场和温度场分布都得到了显著改善;相比较而言,采用双侧孔型水口浇铸时,钢液主流股在结晶器高度

方向上相对集中,较多的钢液集中在主磁场区域内,电磁力对钢液主流股的抑制作用更加明显,应用电磁制动技术更加有意义.

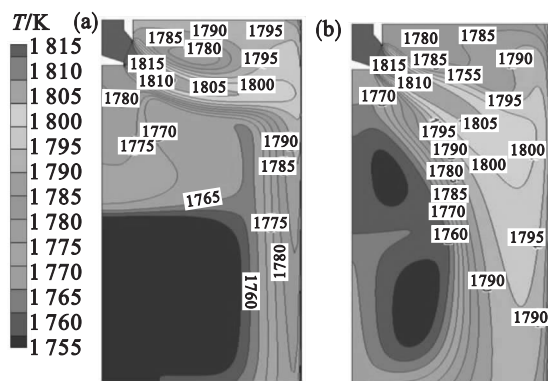


图 9 双侧孔水口结晶器温度场分布

Fig. 9 Distribution of temperature field in the mold with bifurcated nozzle

(a)— $B=0$  T; (b)— $B=0.3$  T.

## 4 结 论

1) 当采用牛鼻子水口浇铸、无电磁制动作用时,结晶器内钢液流股冲击深度较深;施加电磁制动后,钢液主流股明显变短,自由液面最大速度从 0.231 m/s 降至 0.067 m/s.

2) 当采用双侧孔水口浇铸、无电磁制动作用时,钢液主流股强烈冲击结晶器窄侧壁,结晶器上部回流流动强度过强,自由液面最大速度为 0.798 m/s;施加电磁制动后,主流股弯曲趋势消失,上部回流流动强度减弱,自由液面速度降至 0.140 m/s.

3) 综合研究两种浸入式水口下施加电磁制动对 CSP 结晶器内钢液流动和传热行为的影响,采用双侧孔水口浇铸时,电磁制动效果更加明显,可提高铸机效率,并获得较好的铸坯质量.

## 参考文献:

- [1] 朱苗勇,刘家奇,肖泽强.板坯连铸结晶器内钢液流动过程的模拟仿真[J].钢铁,1996,30(8):23-27.  
(Zhu Miao-yong, Liu Jia-qi, Xiao Ze-qiang. Simulation of molten steel flow in slab continuous casting mould[J]. Iron and Steel, 1996, 30(8): 23-27.)
- [2] Li B W, Tian X Y, Wang E G, et al. Influences of casting speed and SEN depth on fluid flow in the funnel type mold of a thin slab caster[J]. Acta Metallurgica Sinica: English Letters, 2007, 20(1): 15-26.
- [3] 李宝宽,赫冀成,贾光霖,等.薄板坯连铸结晶器内钢液流场电磁制动的模拟研究[J].金属学报,1997,33(11): 1207-1214.

(下转第 240 页)