

结晶器振动对连铸坯初始裂纹形成影响

孟祥宁¹, 林仁敢^{1,2}, 杨杰¹, 朱苗勇¹

(1. 东北大学材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 宝钢特钢有限公司, 上海 200940)

摘 要: 简要分析了振动结晶器内弯月面坯壳受力研究现状, 归纳了坯壳初始裂纹的形成原因. 在此基础上提出描述伴随结晶器振动的弯月面坯壳受力模型, 阐述振动周期内初凝坯壳力学状态. 分析表明, 振动特定时段内, 结晶器振动引起施加于弯月面处初凝坯壳上的机械应力为 148.4 kPa, 而该温度下坯壳高温临界断裂强度仅为 119.1 kPa, 结晶器振动产生的机械应力超过临界断裂强度时极易引发初始裂纹的形成. 当结晶器振动速度大于 $1.61 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时弯月面处坯壳初始裂纹开始形成, 且产生于钢水自由液面以下 2.15 ~ 5.4 mm 位置范围.

关 键 词: 振动结晶器; 初凝坯壳; 初始裂纹形成; 弯曲应力; 临界断裂强度

中图分类号: TF 777

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)01-0054-05

Effect of Mold Oscillation on Initial Cracks Formation of Continuous Casting Slabs

MENG Xiang-ning¹, LIN Ren-gan^{1,2}, YANG Jie¹, ZHU Miao-yong¹

(1. School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Baosteel Special Metals Co., Ltd., Shanghai 200940, China. Corresponding author: MENG Xiang-ning, E-mail: mengxn@smm.neu.edu.cn)

Abstract: The previous researches on the stress state of initial solidifying shell in oscillation mold and the detailed reasons to clarify the crack formation process were summarized. The mechanical stress caused by mold oscillation has a dominant contribution to the initial cracks formation as a nonnegligible factor, so a new model was proposed to shed light on the influence of mold oscillation on the initial cracks formation. The stress states of the shell were analyzed for an oscillation cycle. The results showed that the mold oscillation plays an important role on the cracks formation because the maximum bending stress in initial solidifying shell can reach to 148.4 kPa and the critical fracture strength of the shell is only 119.1 kPa. The initial crack will form when the oscillation velocity is higher than $1.61 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, which is located in the region of 2.15 ~ 5.4 mm under the free surface of steel in the mold because the critical fracture strength at a certain temperature is exceeded.

Key words: oscillating mold; initial solidifying shell; initial cracks formation; bending stress; critical fracture strength

连铸结晶器弯月面初始凝固区域由于其复杂的热-力作用环境, 成为连铸坯裂纹等各种缺陷的发源地. 坯壳在结晶器内初始凝固过程形成的裂纹会在后续拉坯、矫直、二冷等工序中逐渐扩展为严重的宏观裂纹, 成为影响钢铁产品最终质量的主要缺陷^[1]. 结晶器振动对弯月面坯壳的生长影响显著, 本文在归纳结晶器内初凝坯壳受力研

究的基础上提出描述结晶器振动过程中坯壳受力模型, 并结合坯壳高温力学性能阐述结晶器振动过程中初始裂纹的形成机理.

1 初始裂纹形成力学影响

结晶器内弯月面处初凝坯壳由于其较低的强

收稿日期: 2014-11-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51004031); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N140205002).

作者简介: 孟祥宁(1977-), 男, 辽宁本溪人, 东北大学副教授; 朱苗勇(1965-), 男, 浙江诸暨人, 东北大学教授, 博士生导师.

度和塑性,受环境影响较为敏感. 结晶器振动周期内渣道宽度、压力等条件持续变化,但渣道总能被液态渣瞬间充满. 为考察渣道压力变化对弯月面坯壳的影响,国内外学者进行了大量研究^[2-4]. 实际连铸过程中,初凝坯壳会随着结晶器振动而周期性“推离-推回”运动,正是因为这种复杂的作用环境对坯壳的生长产生着严峻考验. 当坯壳自身强度不足以抵抗来自周围环境的作用力时,坯壳裂纹等缺陷随之产生. 此外,渣道宽度、渣膜厚度等因素也会随着结晶器振动而变化,从而对弯月面坯壳的受力状况造成影响^[5].

弯月面处的力学行为决定着初凝坯壳能否形成合适的强度和厚度. Lankford 等^[6]指出结晶器振动过程中坯壳表面的摩擦力作用会对坯壳产生弯曲应力,并分析了该弯曲应力与轴向拉伸应力的合力对初凝坯壳质量的影响. Zang 等^[7]对结晶器振动条件下初凝坯壳所受摩擦力进行了分析,并指出振动负滑脱期间结晶器的压力作用对坯壳表面产生的微小裂纹具有一定的愈合效果. Schwerdtfeger 等^[8]根据梁弯曲理论对弯月面坯壳建立力学模型,并以此来预测铸坯表面振痕的深度. 大量研究表明,弯月面处坯壳所受应力不仅对初凝坯壳生长有决定性作用,同时也是限制铸坯产品质量的关键性因素. 铸坯裂纹被证明与钢水成分、操作工艺条件、传热条件以及微观偏析行为等方面密切相关,然而其产生的根源在于本身受到了机械力的作用,且超过临界应力或者临界

应变值. 由于弯月面坯壳处于高温区域,凝固产生的收缩应力效果有限,而结晶器振动导致渣道压力变化传递到初凝坯壳的机械应力效果明显. 现有研究未能考虑结晶器振动与坯壳初始裂纹形成的关系,坯壳是否因受力而产生裂纹等缺陷尚未有准确的数据参考. 因此,本研究引入材料力学理论,提出弯月面初凝坯壳力学模型,并通过确定初凝坯壳所承载荷的变化来定量分析结晶器振动引发的力学作用,阐述坯壳初始裂纹的形成过程.

2 初凝坯壳受力分析

2.1 数学模型

弯月面初凝坯壳厚度非常小(1.0~2.0 mm),考虑渣道入口处压力较小以及下部坯壳逐渐增厚,在渣道长度范围内将该段坯壳视为简支梁且梁体厚度均匀. 摩擦力的产生源于垂直受力面方向存在的作用力,因此,简化初凝坯壳垂直拉坯方向作用力为渣道压力以及钢水静压力形成的非均布载荷 $q(x)$. 本文对低碳钢($w(C) = 0.04\%$)板坯(断面尺寸 1 200 mm × 200 mm)连铸过程中结晶器内弯月面坯壳进行分析,取初凝坯壳厚度为 1.6 mm,渣道长度为 8 mm^[3],且假定该简支梁为纯弯曲. 初凝坯壳力学模型见图 1,其中简支梁简化模型如图 1b 所示,沿拉坯方向建立 x 轴,垂直拉坯方向建立 y 轴.

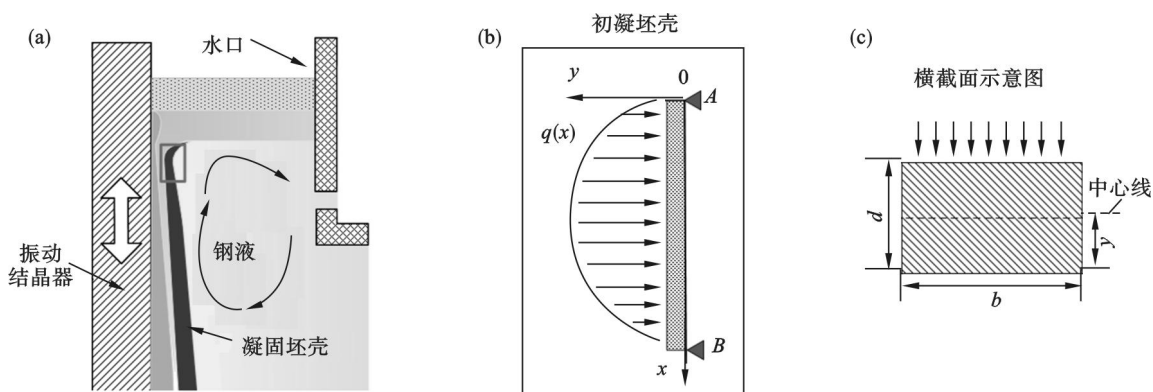


图1 初凝坯壳力学模型

Fig. 1 Schematics of physical model of solidifying shell

(a)—连铸结晶器工艺模型; (b)—坯壳受力简图; (c)—坯壳力学状态.

简支梁力学模型中非均布载荷 $q(x)$ 为渣道压力与钢水静压力的矢量和,其中,渣道压力大小根据现有渣道压力模型确定^[3]. 即

$$q(x) = p_s + p_f. \quad (1)$$

式中: $p_s = p_1 + \rho_s g x$, 即钢水静压力, kPa; p_f 为渣道压力, kPa;

为简化计算,假设:沿拉坯方向该段坯壳厚度、宽度均匀,无缺陷点;忽略弯月面初凝坯壳附近钢液流动冲刷影响;不考虑坯壳自重引起简支梁的弯曲变形. 在建立坯壳受力模型基础上,首先对简支梁所受非均布载荷进行积分,求出两端支撑点反作用力以及载荷合力作用线位置,即设

0-x 段初凝坯壳非均布载荷为一个合力时,该合力作用于简支梁的位置.由于支撑点处反作用力弯矩作用与合力弯矩作用方向相反,故通过矢量运算可得到简支梁上任一点处弯矩值.再通过引入惯性力矩,则可计算出各截面所受弯曲应力.具体计算过程如下:

通过对简支梁上作用载荷进行积分运算确定合力作用线的位置:

$$x_R = \frac{\int_0^x xq(x) dx}{\int_0^x q(x) dx}. \quad (2)$$

式中, x_R 为合力作用线位置, m.

简支梁长度设为 l , 即渣道长度, 通过合力作用线位置计算 A 支撑点处反作用力:

$$F_A = \frac{b(l-x_R)}{l} \int_0^l q(x) dx. \quad (3)$$

式中: F_A 为简支梁 A 端支撑点处反作用力, N; b 为弯月面初凝坯壳宽度, 即简支梁横截面宽

$$\sigma = \frac{12y}{d^3} \left[x \left(1 - \frac{\int_0^x xq(x) dx}{l \int_0^x q(x) dx} \right) \int_0^l q(x) dx - x \int_0^x q(x) dx + \int_0^x xq(x) dx \right]. \quad (7)$$

简支梁横截面上各点处的弯曲应力并不相同, 距中心线最远的上、下两个边缘点处, 具有该截面的最大弯曲应力值, 如图 1c 所示. 本文对各

$$\sigma_{\max} = \frac{6}{d^2} \left[x \left(1 - \frac{\int_0^x xq(x) dx}{l \int_0^x q(x) dx} \right) \int_0^l q(x) dx - x \int_0^x q(x) dx + \int_0^x xq(x) dx \right]. \quad (8)$$

2.2 计算结果及分析

图 2 为具有最佳振动模式特点的非正弦振动波形曲线(拉速 $2.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, 振频 155 min^{-1} , 振幅 $\pm 4.5 \text{ mm}$, 振动因子 0.2), 由于波形曲线对称, 选取 c, d, p, r, e 典型时刻点处初凝坯壳进行弯曲应力分析. 通过坯壳简支梁力学模型计算分析, 各时刻点坯壳弯曲应力在渣道入口和出口处均较小, 中部较大, 且在初凝坯壳中点上方 0.4 mm 左右处产生最大值. 其中, 结晶器振动正滑脱期 c 时刻点处结晶器相对坯壳运动速度最大, 初凝坯壳所受载荷也相对较大, 承受的最大弯矩及弯曲应力达到峰值. p 时刻点处结晶器振动速度与拉坯速度大小、方向相同, 渣道动态压力最

$$\sigma_{\text{cri}} = 28406.86 \times w(\text{C}) + 48.63 \times w(\text{Si}) - 186.38 \times w(\text{Mn}) - 6301.85 \times w(\text{P}) + 11575.62 \times w(\text{S}) + 292.03 \times w(\text{Al}) - 0.00805 \times t. \quad (9)$$

式中, t 为试样温度, $^{\circ}\text{C}$;

取钢种成分(质量分数, %) 为 C 0.04, Si 0.1, Mn 0.11, P 0.013, S 0.013, Al 0.12 进行

度, m.

根据载荷合力作用线位置并结合支撑点处反作用力, 计算简支梁弯矩, 公式如下:

$$M(x) = F_A x - b(x-x_R) \int_0^x q(x) dx. \quad (4)$$

式中, $M(x)$ 为简支梁 x 点横截面弯矩, $\text{N} \cdot \text{m}$.

设梁的横截面为矩形, 则其惯性力矩可表示为

$$I = \frac{bd^3}{12}. \quad (5)$$

式中, d 为简支梁矩形截面高度, 即弯月面初凝坯壳厚度, m.

简支梁上 x 点截面处弯曲应力可由下式计算得出:

$$\sigma = \frac{My}{I}. \quad (6)$$

式中, y 为横截面受力点至中心线的距离, m.

将式(4), 式(5)代入式(6)可得

截面受到的最大应力值进行讨论, 计算中定义 $y = \frac{d}{2}$, 则

小, 坯壳垂直拉坯方向只受钢水静压力以及渣道固有压力作用, 此时初凝坯壳所受最大弯曲应力值相对较小, 结晶器振动对坯壳质量的影响也相应减弱. 随后结晶器振动进入负滑脱期, 垂直拉坯方向坯壳所受载荷又开始逐渐增大, 弯曲应力值随之增加. 如图 3 所示, 振动周期内初凝坯壳受最大弯曲应力值可达 148.4 kPa , 且在 c 时刻点处产生, 此时结晶器振动对坯壳影响最大, 初始裂纹产生几率也最高.

本文根据 Suzuki 等^[9]设计的浸没开口式金属模张力试验(SSCT)数据拟合出低碳钢($w(\text{C}) = 0.04\%$)在高温区临界断裂强度与成分的函数关系式:

分析, 图 4 为该低碳钢高温区临界断裂强度随温度的变化关系.

Kobayashi 等^[10]研究指出 ZST 对应的固相

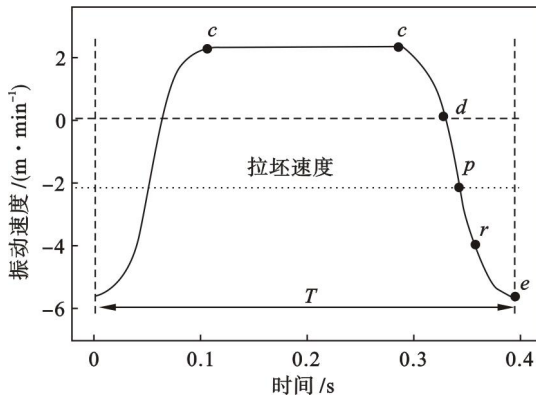


图 2 结晶器非正弦振动波形

Fig. 2 Non-sinusoidal waveform of mold oscillation

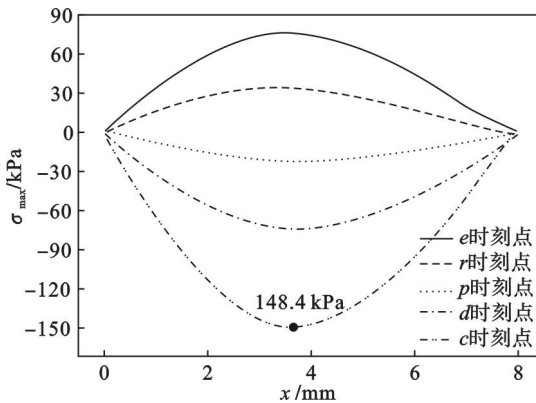


图 3 初凝坯壳弯曲应力曲线

Fig. 3 Bending stress of initial solidifying shell

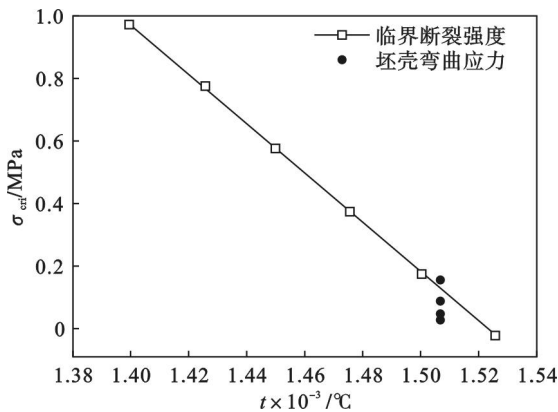


图 4 坯壳临界断裂强度

Fig. 4 Critical fracture strength of solidifying shell

分率为 0.85, ZDT 对应的固相分率为 1.0. 应力分析只对固态坯壳和可以承受应力的准固态坯壳进行, 一般糊状区中固相分率大于 0.7 ~ 0.9 的准固态坯壳具有一定强度. 由于连铸坯裂纹通常形成于 ZST 与 ZDT 之间, 本文选取凝固前沿固相分率为 0.9 时初凝坯壳临界断裂强度进行分析. 根据液相线以及固相线经验公式^[11]和钢种成分分别计算出液相线温度为 1 530.6 °C, 固相线温度为 1 502.1 °C.

$$t_L = 1\,536 - 7\,800 \times w(C) - 760 \times w(Si) - 490 \times$$

$$w(Mn) - 3\,440 \times w(P) - 3\,800 \times w(S), \quad (10)$$

$$t_s = 1\,536 - 26\,776 \times w(C) - 1\,493 \times w(Si) - 905 \times w(Mn) - 58\,144 \times w(P) - 101\,401 \times w(S). \quad (11)$$

在此基础上通过固相分率计算公式^[12]确定固相分率为 0.9 时弯月面坯壳温度为 1 506 °C.

$$f_s = 1 - \left[\frac{t_{int} - t_s}{t_L - t_s} \right]^p, \quad (12)$$

$$p = p_2 + (p_1 - p_2)f_s. \quad (13)$$

式中: f_s 为固相分率; t_{int} 为弯月面坯壳温度, °C; t_s 为固相线温度, °C; t_L 为液相线温度, °C; p_1, p_2 为常数, 分别取 1.25, 0.75.

由图 4 可知, 当弯月面初凝坯壳凝固前沿温度为 1 506 °C 时, 其临界断裂强度值仅为 119.1 kPa, 而通过简支梁力学模型计算出结晶器振动对初凝坯壳产生的弯曲应力最大值为 148.4 kPa. 因此, 结晶器振动引发的机械力作用有可能突破坯壳自身强度, 从而诱发初始裂纹的产生.

由于结晶器振动达最大上振速度时初凝坯壳受影响最为明显, 故选取振动 c 时刻点初凝坯壳弯曲应力进行分析. 由图 5 可以看出, 此时坯壳弯曲应力随着弯月面下距离的增加呈现先增大再减小的变化趋势, 且在弯月面坯壳中点处上方约 0.4 mm 处产生最大值. 载荷大小的不同决定了初凝坯壳各部位受到的弯曲应力也各不相同, 其中间部位承受着更高的应力作用. 同时, 由于高温临界断裂强度较低, 坯壳在中部某一长度范围很容易被突破. 因此, 结合结晶器振动 c 时刻点初凝坯壳的受力情况, 坯壳初始裂纹极有可能在弯月面下距离 2.15 ~ 5.4 mm 范围内形成.

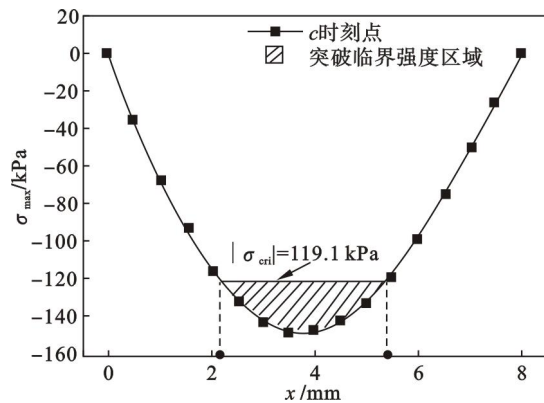


图 5 c 时刻点坯壳弯曲应力

Fig. 5 Bending stress of solidifying shell at c moment

对振动过程中整段初凝坯壳受到的弯曲应力进行分析, 具体如图 6 所示, 阴影部分为整段坯壳

各部位在对应振动速度下受到的弯曲应力值集合。结晶器振动负滑脱期间坯壳受弯曲应力较小,坯壳生长相对较为稳定,正滑脱段由于较高的应力作用则成为坯壳各种质量缺陷的高发期。结晶器下振速度大于 $2.8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,初凝坯壳整体受到背离结晶器壁方向的弯曲应力,且随着下振速度的降低而逐渐减小。当下振速度等于 $2.8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,由于钢水静压力对渣道正压的抵消作用,此时初凝坯壳受到结晶器振动作用力最小。此后,随着结晶器向上振动速度的增加,初凝坯壳受弯曲应力方向也变为指向结晶器壁的负向,且弯曲应力值逐渐增大。通过计算可知,当结晶器上振速度大于 $1.61 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,初凝坯壳受到的最大弯曲应力将超过其高温临界断裂强度,则坯壳极有可能开始形成初始裂纹。

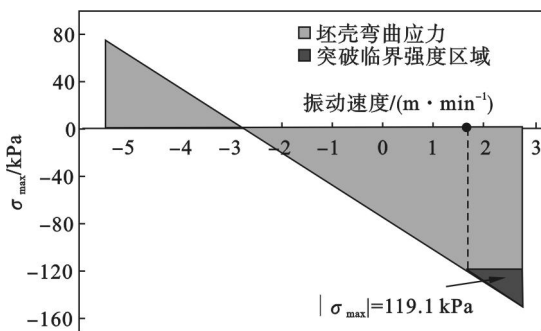


图 6 结晶器不同振动速度下坯壳弯曲应力
Fig. 6 Bending stress of solidifying shell vs mold oscillation velocity

3 结 论

1) 归纳了连铸结晶器振动条件下弯月面初凝坯壳受力的研究现状,认为弯月面处的力学作用对坯壳生长影响显著,且由结晶器振动诱发的机械应力是导致坯壳初始裂纹形成的直接原因。

2) 通过建立振动条件下弯月面初凝坯壳力学模型,并结合坯壳高温力学性能分析振动周期坯壳受力状态。结果表明,弯月面处初凝坯壳受最大弯曲应力为 148.4 kPa ,远大于该温度下其临界断裂强度 119.1 kPa ,结晶器振动引发的机械应力超过临界断裂强度时极易诱发初始裂纹的形成。

3) 本工艺条件下,结晶器振动速度大于 $1.61 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时弯月面处坯壳初始裂纹开始形成,且应产生于钢水自由液面以下 $2.15 \sim 5.4 \text{ mm}$ 位置范围。

参考文献:

- [1] El-Bealy M O. On the formation of macrosegregation and interdendritic cracks during dendritic solidification of continuous casting of steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2014, 45(3): 988 – 1017.
- [2] Sengupta J, Thomas B G, Shin H J. A new mechanism of hook formation during continuous casting of ultra-low-carbon steel slabs [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006, 37(5): 1597 – 1607.
- [3] 孟祥宁, 朱苗勇, 程乃良. 高拉速下连铸坯振痕形成机理及振动参数优化[J]. *金属学报*, 2007, 43(8): 839 – 846.
(Meng Xiang-ning, Zhu Miao-yong, Cheng Nai-liang. Oscillation marks formation mechanism and oscillation parameters optimization for slab continuous casting with high casting speed [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2007, 43(8): 839 – 846.)
- [4] 雷作胜, 任忠鸣, 阎勇刚, 等. 软接触结晶器电磁连铸保护渣道的动态压力[J]. *金属学报*, 2004, 40(5): 546 – 550.
(Lei Zuo-sheng, Ren Zhong-ming, Yan Yong-gang, et al. Mold flux channel dynamic pressure in electromagnetic continuous casting [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2004, 40(5): 546 – 550.)
- [5] Yang J, Meng X N, Zhu M Y. Experimental study on mold flux lubrication for continuous casting [J]. *Steel Research International*, 2014, 85(4): 710 – 717.
- [6] Lankford W. Some considerations of strength and ductility in the continuous casting process [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1972, 3(6): 1331 – 1357.
- [7] Zang X Y, Wang X D, Ma Y, et al. The shell surface force caused by mould friction during slab continuous casting [J]. *ISIJ International*, 2008, 48(2): 170 – 174.
- [8] Schwerdtfeger K, Sha H. Depth of oscillation marks forming in continuous casting of steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2000, 31(4): 813 – 826.
- [9] Suzuki M, Suzuki M, Yu C H, et al. In-situ measurement of fracture strength of solidifying steel shells to predict upper limit of casting speed in continuous caster with oscillating mold [J]. *ISIJ International*, 1997, 37(4): 375 – 382.
- [10] Kobayashi S, Nagamichi T, Gunji K. Numerical analysis of solute redistribution during solidification accompanying δ/γ transformation [J]. *Transactions ISIJ*, 1988, 28(7): 543 – 552.
- [11] Li C S, Thomas B G. Thermomechanical finite-element model of shell behavior in continuous casting of steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2004, 35(6): 1151 – 1172.
- [12] 雷新泉. 用差分法求解金属凝固传热问题的一个注记[J]. *钢铁研究*, 1992, 68(5): 35 – 39.
(Lei Xin-quan. Notes on difference solution of heat transfer in metal solidification [J]. *Research on Iron and Steel*, 1992, 68(5): 35 – 39.)