

方坯中间包包盖吹氩数值计算研究

吴晨辉^{*1}, 袁开通², 李阳¹, 谢鑫¹

1. 攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司, 攀枝花 617000
2. 攀钢集团西昌钢钒有限公司科技质量部, 西昌 615000

Numerical Investigation on argon blowing from tundish cover for bloom continuous casting machine

Wu Chenhui^{*}, Yuan Kaitong, Li Yang, Xie Xin

1 Institute of Materials Engineering & Technology, Pangang Group Research Institute Co., Ltd.,
Panzhihua 617000 China

2 Department of Technology and Quality, Pangang Group Xichang Steel Vanadium Co., Ltd.,
Xichang 615000 China

1. 前言

连铸是重轨钢生产过程的一个关键工序, 而中间包作为连铸机的关键冶金容器, 其冶金功能直接影响着钢水纯净度^[1-4]。连铸过程中, 若中间包保护浇铸效果较差, 浇钢过程中钢水与空气中的氧气接触会发生二次氧化^[5], 成为影响钢水纯净度的一个重要因素。

氩气作为一种保护性气体, 已被广泛应用于连铸过程^[6-10]。为了增强连铸过程中间包内保护浇铸效果, 一些冶金工作者开发应用了包盖吹氩工艺。该工艺通过布放于包盖等位置的氩气管路向中间包吹入氩气, 将中包内的空气排出, 使中包内氧气质量分数降低至 1%^[11] 以下, 可有效改善中间包保护浇铸效果。Story^[12] 等人验结果表明, 采用中包吹氩工艺后, 开浇阶段钢水酸溶铝烧损 $\Delta w(\text{Als})$ 可大幅降低约 87.5%。鉴于中包吹氩工艺优势, 日本及欧洲部分企业应已采用了该技术^[13], 并取得良好的应用效果。其中, Corus 公司生产的 IF 钢铸坯缺陷率降低 38%, POSCO 公司铸坯长度方向夹杂物明显减少。目前, 国内一些企业^[14-17] 也采用了中包吹氩工艺, 邯钢^[13, 14] 采用该工艺将含铝钢水口堵塞率由 8% 降低至 3% 以下, 高菊^[14] 等人采用该工艺将深冲件表面缺陷率由 7.78% 降低至 2.62%。

虽然中间包吹氩工艺已在部分企业得到应用, 但针对该工艺的理论计算研究尚未见报道。目前, 现场多采用反复工业试验确定中间包吹氩工艺参数, 试验周期长, 且成本较高。鉴于此, 为开发出适用于某厂重轨钢连铸过程的包盖吹氩工艺, 以其方坯中间包为对象, 建立了包盖吹氩数值计算模型, 针对不同吹氩工艺方案开展了计算, 据此确定了合理工艺方案。

2. 包盖吹氩模型

2.1. 模型建立

以某厂 6 流 T 型方坯中间包为对象, 其内腔结构三维视图与俯视图分别如图 1、图 2 所示, 图 2 中的 a1~a11、b1~b11 及 c1~c11 为后续计算涉及到的氩气管布放位置。

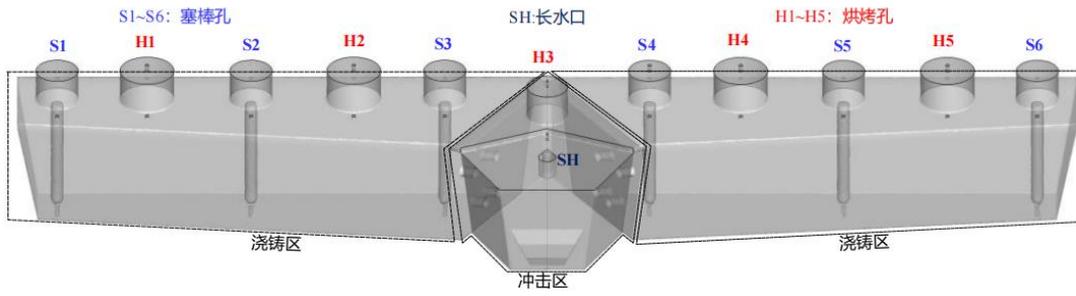


图 1 中包内腔三维视图
Fig. 1 3D view of tundish inner cavity

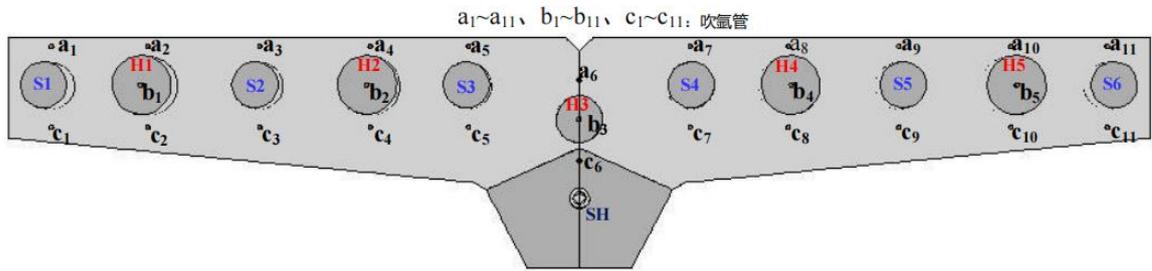


图 2 中包俯视图
Fig. 2 Vertical view of tundish inner cavity

以中包宽向一半为对象，分别针对其空包阶段与稳浇阶存在空气的内腔，建立了如图 3(a)、3(b)所示包盖吹氩过程模型，模型划分过程采用 8 面体网格，3(a)与 3(b)所示模型分别包含 355078 与 277164 个网格。

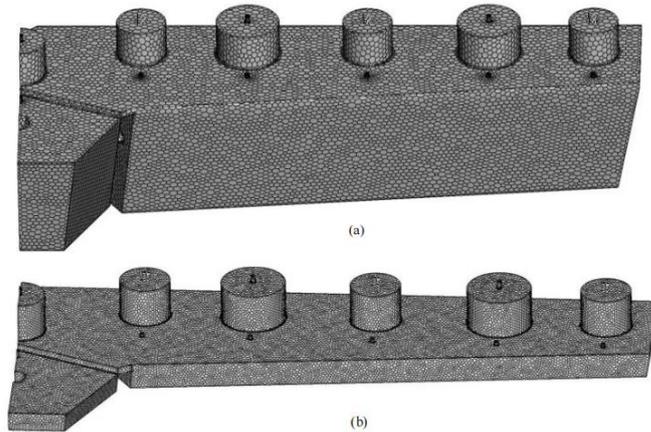


图 3 包盖吹氩模型：(a)空包阶段，(b)稳浇阶段
Fig. 3 Models of ABTC during (a) period of empty tundish and (b) period of normal casting

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

式中 ρ 为混合气体的密度， kg/m^3 ； t 为时间， s ； \mathbf{u} 为混合气体的速度矢量， m/s 。

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}}(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)) + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t = \mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

式中 p 为压力, Pa; g 为重力加速度, m/s^2 ; μ 为混合分子黏度, μ_t 为湍流黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

湍流方程:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

湍动能耗散方程:

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \varepsilon) \quad (5)$$

式中 C_1 、 C_2 、 C_μ 、 σ_k 、 σ_ε 为经验常数, 其值分别为 1.44、1.92、0.09、1.0、1.3; G_k 为平均速度梯度产生的湍动能, m^2/s^2 。

质量传输方程:

式中 Y 为质量分数, 下标 Ar 和 Air 分别表示氩气和空气; D_g 为氩气的质量扩散系数, m^2/s ; S_{ct} 为湍流施密特数, 取值为 0.7; S_{Ar} 为氩气源相, $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{s})^{-1}$; 空气中氧气的质量分数为 23.3%。

模型以吹入的氩气流速作为氩气管入口边界条件, 中间包内壁视为无滑移避面, 塞棒孔、烘烤孔以相对静压 0Pa 作为出口边界条件, 出口位置回流气体为空气。空包阶段以内腔充满空气为计算初始条件, 稳浇阶段以空包阶段吹氩 5min 时中包气氛为初始条件。采用 SIMPLE 求解算法, 计算残差为 10^{-4} [21]。

2.2. 模型验证

为验证模型准确性, 测量了不同吹氩流量与吹氩时间后中包内氧气含量, 并与模型计算值进行了对比, 如图 4 所示。吹氩过程吹氩管(a1-a11 C1-C11)布放于包盖孔两侧, 烘烤孔(H1~H5)密封。由图 4 可知, 实测值与模型计算值吻合较好, 两者相对误差小于 7.5%。

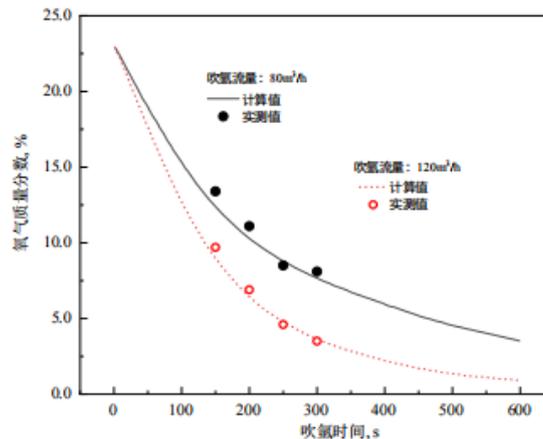


图 4 中包内氧气质量分数计算值与实测值对比

Fig. 4 The calculated and measured mass fraction of oxygen during ABTC

3. 计算结果与分析

3.1. 空包阶段氩气管位置与包盖孔密封方案

为确定空包阶段合理的吹氩管位置与包盖孔密封方式，针对表 1 所示 7 种工艺方案计算了包盖吹氩 10min 内中包气氛变化规律，各方案吹氩流量均为 $100\text{m}^3/\text{h}$ 。

表 1 空包阶段模拟吹氩方案

Table 1 Schemes of ABTC during the period of empty tundish

方案	吹氩管数量	吹氩管位置	包盖孔密封位置
1#	5	b1~b5	无
2#	5	b1~b5	S1-S6
3#	5	b1~b5	H1-H5
4#	5	b1~b5	S1-S6; H1-H5
5#	22	a1-a11 c1-c11	S1-S5
6#	22	a1-a11 c1-c11	H1-H5
7#	22	a1-a11 c1-c11	S1-S6; H1-H5

图 5 为采用方案 1~4 时，中间包内空气与氧气质量分数变化规律。在吹氩起始阶段，中间包内空气与氧气质量分数快速降低。随着吹氩过程进行，中包内空气与氧气浓度不断降低，中包内的空气与氧气质量分数降低趋势不断放缓，并在一定时间后维持在较稳定水平。

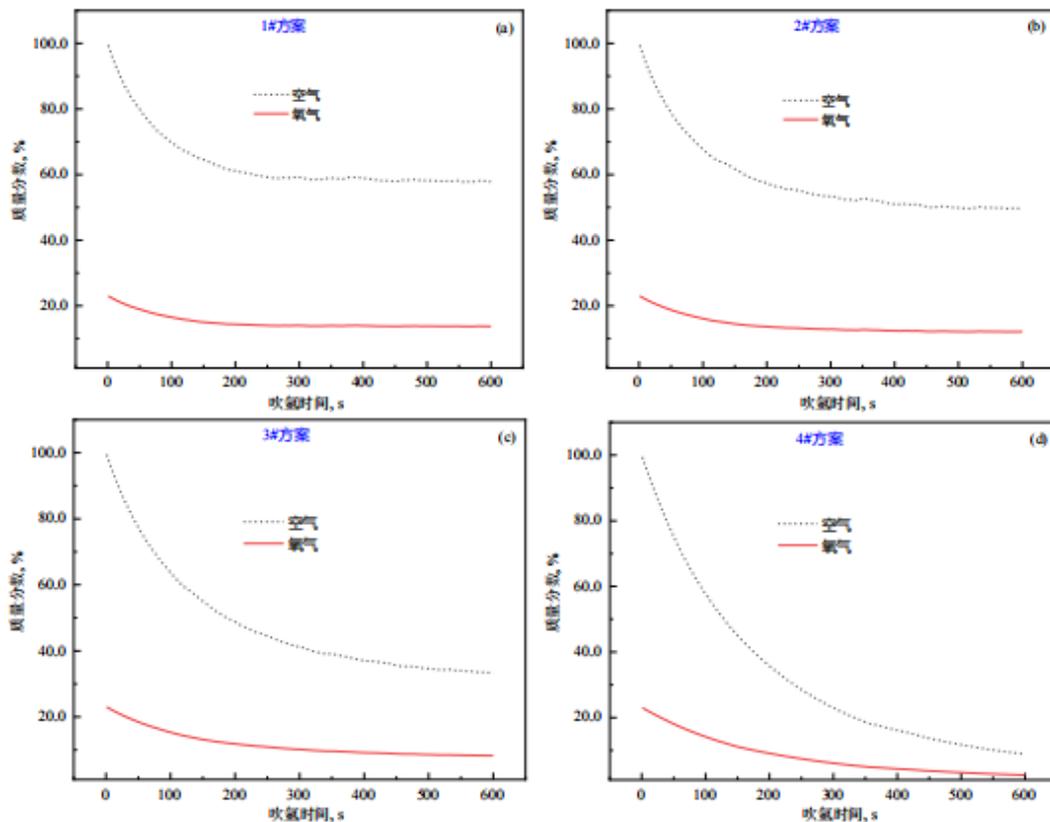


图 5 空包阶段采用 1#~4#方案吹氩过程中包气氛变化情况

Fig. 5 Variation of gas content in tundish during ABTC with (a) Scheme 1, (b) Scheme 2, (c) Scheme 3, and (d) Scheme 4

为了对比分析 1#~4#方案吹氩效果，对比了吹氩 240s、360s、480s 及 600s 时中包氧气质量分数，如图 6 所示。与 1#方案相比，随着 2#~4#方案包盖孔密封，相同吹氩时间中包内的氧气质量分数降低，吹

氩效果得到改善，尤其 4#方案，相同吹氩时刻中包内的氧气质量分数显著低于其它三种方案。吹氩 600s 时，1#~4#方案中包内氧气质量分数分别为 13.7%、12.1%、8.3%与 2.5%，4#方案与 1#~3#方案相比，氧气质量分数分别降低 81.8%、79.3%与 69.9%。

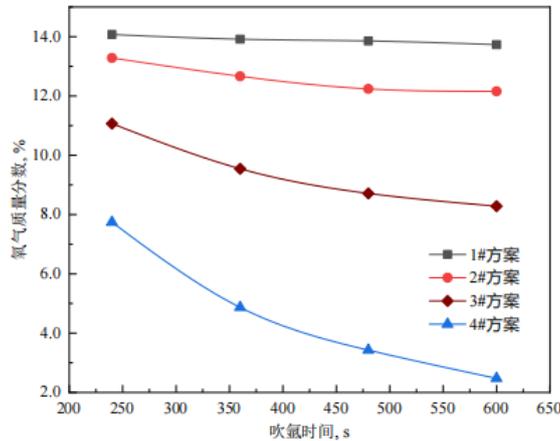


图 6 吹氩不同时刻 1#~4#方案中包内氧气质量分数

Fig. 6 Mass fraction of remaining oxygen in tundish with Scheme 1~4 after different times of argon blowing

图 7 对比了 4#方案及 5#~7#方案在不同吹氩时间后中间包内氧气质量分数。与 4#方案相比，相同吹氩时间 5#~7#方案中间包内的氧气质量分数更低，即将氩气管由烘烤孔位置移动至包盖孔两侧，可更高效的将中包内的空气排出，提升包盖吹氩效率。对比 5#~7#方案可知，相同吹氩时间，6#方案中包氧气含量明显低于 5#、7#方案，说明当吹氩管布放于包盖孔两侧时，为实现较好的包盖吹氩效果，需密封包盖烘烤孔，同时保持塞棒孔畅通。

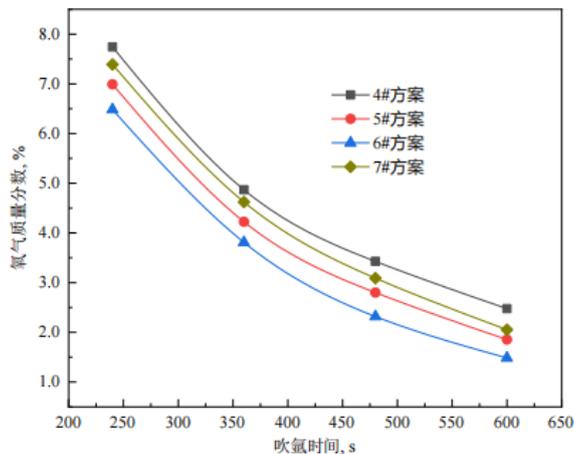


图 7 吹氩不同时刻 4#~7#方案中包内氧气质量分数

Fig. 7. Mass fraction of remaining oxygen in tundish with Scheme 4~7 after different times of argon blowing

基于上述分析可知，空包阶段包盖吹氩过程，若氩气管布放于包盖烘烤孔位置，则包盖吹氩过程需密封塞棒孔与烘烤孔，即表 1 中的 4#方案；若将氩气管布放于包盖孔两侧，则吹氩过程需密封包盖烘烤孔，塞棒孔保持畅通，即表 1 中的 6#方案。

3.2. 空包阶段吹氩流量计算

由 1.2.1 节可知，吹氩管布放于烘烤孔或包盖孔两侧时，分别采用 4#、6#方案吹氩效果较好。为进一步确定两种方案合理的吹氩流量，计算了采用 4#、6#方案在不同吹氩流量时中间包氧气质量分数变化规律，如图 8 所示。随着吹氩流量增加，两种方案相同吹氩时间后中间包内氧气质量分数不断降低。但

随着吹氩流量增加，相同吹氩时间后中间包内的氧气质量分数降低速度不断减缓，说明包盖吹氩效率随吹氩流量增加而不断降低。

中间包内的氧气质量分数降低至 1% [11] 以下时，可有效抑制钢水与空气接触发生的二次氧化。目前，现场氩气管路最大氩气流量约 $130\text{m}^3/\text{h}$ ，在该最大氩气流量条件下，采用 4#方案、6#方案吹氩 600s 后，中包内的氧气质量分数分别为 1.7%、0.7%。这意味着若采用 4#方案，即使在最大吹氩流量与最长吹氩时间条件下都难以将中包内的氧气质量分数降低至 1% 以下。鉴于此，需采用 6#方案，且吹氩流量 $\geq 120\text{m}^3/\text{h}$ 。

采用 6#方案，氩气流量 $120\text{m}^3/\text{h}$ ，吹氩 600s 后，中包内的氧气质量分数约 0.9%。

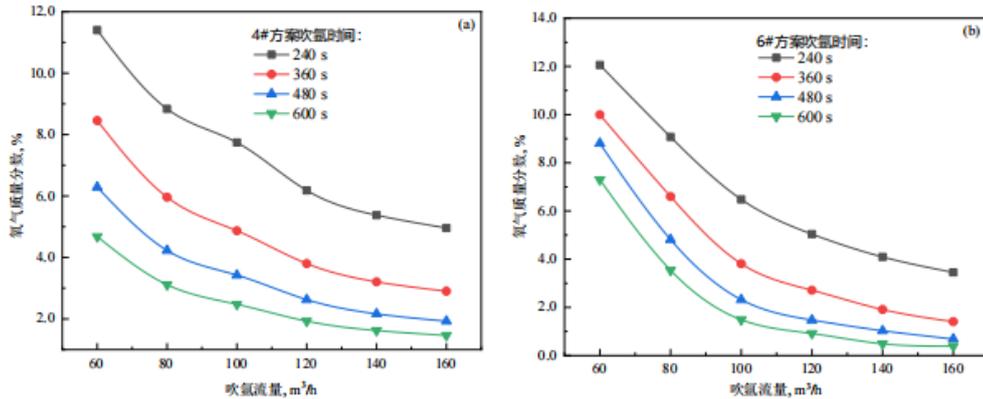


图 8 4#方案与 6#方案不同吹氩流量时中包氧气质量分数变化规律

Fig. 8 Variation of mass fraction of remaining oxygen in tundish with different argon flow rates by applying (a) Scheme 4 and (b) Scheme 6

3.3. 稳浇阶段吹氩流量计算

与空包阶段相比，中包稳浇阶段钢液面与包盖间可容纳气体的容积大幅降低，该阶段气体流量需做出相应调整。鉴于此，采用图 3(b)所示模型，针对 6#方案计算了不同吹氩流量时中间包内氧气质量分数变化规律，如图 9 所示。计算时，以 6#方案空包阶段吹氩 5min 时的中包氧气质量分数作为初始条件。由图 9 可知，随着吹氩时间延长，中包内的氧气质量分数不断降低，并最终降低至某一平衡值。此外，随着吹氩流量增大，中包内最终平衡氧气质量分数不断降低，且降低速度不断减缓。吹氩流量分别为 $50\text{m}^3/\text{h}$ 、 $60\text{m}^3/\text{h}$ 时，中包内最终平衡氧气质量分数分别为 1.1%、0.8%。因此，为了在稳浇阶段将中包内的氧气质量分数维持在 1% 以下，吹氩流量需 $\geq 60\text{m}^3/\text{h}$ 。

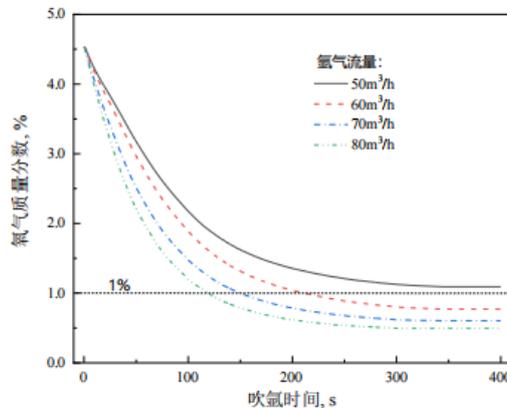


图 9 稳浇阶段不同吹氩流量时中包氧气质量分数变化

Fig. 9 Mass fraction of remaining oxygen in tundish with different argon flow rate

4. 结论

(1) 为取得较好的包盖吹氩效果,若吹氩管布放于烘烤孔位置,则需密封塞棒孔与烘烤孔(4#方案);若吹氩管布放于包盖孔两侧,则需密封烘烤孔,保持塞棒孔畅通(6#方案)。

(2) 基于现场最大氩气流量等工艺参数,确定6#方案为开展包盖吹氩较优工艺方案,且空包阶段吹氩流量需 $\geq 120\text{m}^3/\text{h}$,稳浇阶段氩流量需 $\geq 60\text{m}^3/\text{h}$ 。

参考文献

- [1] 徐匡迪. 关于洁净钢的若干问题[J]. 金属学报, 2009, 45(3): 257-269.
- [2] Sahai Y. Tundish technology for casting clean steel: a review[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(4): 2095-2106.
- [3] Zhang J, Liu J, Yu S, et al. Production of clean steel using the nitrogen elevating and reducing method[J]. Metals, 2018, 8(7): 560.
- [4] Webler B A, Pistorius P C. A review of steel processing considerations for oxide cleanliness[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2020, 51(6): 2437-2452.
- [5] Sasai, K., & Mizukami, Y. Reoxidation behavior of molten steel in tundish. ISIJ international, 2000, 40(1): 40-47.
- [6] Zhang J, Liu Q, Yang S, and Chen Z, et al. Advances in ladle shroud as a functional device in tundish metallurgy: A review[J]. ISIJ International, 2019, 59(7): 1167-1177.
- [7] Chatterjee S, Li D and Chattopadhyay K. Tundish open eye formation: a trivial event with dire consequences[J]. Steel Research International, 2017, 88(9): 1600436.
- [8] Chatterjee Saikat, Donghui Li and Kinnor Chattopadhyay. Modeling of liquid steel/slag/argon gas multiphase flow during tundish open eye formation in a two-strand tundish[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 49(2): 756 -766.
- [9] Lai Q R, Luo Z G, Hou Q F, et al. Numerical study of inclusion removal in steel continuous casting mold considering interactions between bubbles and inclusions[J]. ISIJ International. 2018, 58(11): 2062.
- [10] Liu Z Q, Li B K, Vakhrushev A, et al. Physical and numerical modeling of exposed slag eye in continuous casting mold using Euler-Euler approach[J]. Steel Research International, 2019, 90(4): 1800117.
- [11] 王峰. 唐钢铝脱氧钢二次氧化现象及抑制机理[D]. 北京科技大学, 2019.
- [12] Story Scotte R, Goldsmith Gerry E, Fruchan Richard J. A Study of Casting Issues Using Rapid Inclusion Identification and Analysis[J]. Iron and Steel Technology, 2006, 3(9): 52-61.
- [13] 孙彦辉, 蔡开科, 赵长亮. 非稳态浇注操作对连铸坯洁净度影响[J]. 钢铁, 2008, 43(1): 22-25.
- [14] 段永卿, 陈晓辉, 王月聪. 冶炼含铝钢中包水口堵塞原因分析及改进[J]. 钢铁钒钛, 2015, 36(06): 123-127.
- [15] 刘庆岗, 王一洲. 汽车钢 DC03 夹杂物产生原因分析及改进措施[J]. 中国冶金, 2016, 26(02): 25-30.
- [16] 范连明. 转炉/矩形坯连铸生产 34Mn2V 钢的实践[J]. 炼钢, 2010, 26(05): 69-72.
- [17] 高菊, 闫绍维, 丁志军. 滤清器用钢 DC04-LQQ 深冲件表面缺陷分析和工艺控制[J]. 特殊钢, 2017, 38(04): 27-31.
- [18] Launder B, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 1974, 3(2): 269-289.
- [19] Qin X, Cheng C, Li Y, et al. A simulation study on the flow behavior of liquid steel in tundish with annular argon blowing in the upper nozzle[J]. Metals, 2019, 9(2): 225.