

哈兹列特连铸铝板坯凝固场数值模拟研究

李 轩¹ 潘秋红¹ 金 伟¹ 黄寿志² 蒋明元¹

(1. 江苏大学材料科学与工程学院, 镇江 212013; 2. 内蒙古联晟新能源材料股份有限公司, 通辽 029200)

摘 要 基于Fluent流体模拟软件构建了3003铝合金在二维尺度下的连铸区液-固耦合流变场模型, 采用单一变量法模拟分析了不同工艺参数对铸坯温度场、凝固场的影响。结果表明, 当拉坯速度一定且浇注温度在适配区间内升高时, 铸坯芯部形成位置的延后偏移量要大于表面坯壳, 但两相区长度影响较小。当浇注温度一定, 拉坯速度在中速区间升高时, 铸坯芯部及坯壳形成位置的延后距离几乎一致且微量, 但拉坯速度提高到0.15 m/s和0.17 m/s时, 上述距离会明显增加且整个铸区的温度梯度减小, 两相区长度相近。此外, 拟合并验证了铸坯出口温度与厚度、温差的公式, 为热连轧建立合适的铸坯温度控制机制。

关键词 哈兹列特连铸; 凝固传热; 数值模拟

中图分类号 TG146.21; TP311; TG249.9

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240329

Numerical Simulation of Solidification Field of Hazlitt Continuous Casting Aluminum Slab

LI Xuan¹, PAN QiuHong¹, JIN Wei¹, HUANG ShouZhi², JIANG MingYuan¹

(1. School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013; 2. Inner Mongolia Liansheng New Energy Materials Co., Ltd., Tongliao 029200)

Abstract: A fluid-solid coupling rheological field model for 3003 aluminum alloy in two-dimensional continuous casting zone was established based on Fluent fluid simulation software. The effect of various process parameters on temperature and solidification fields of casting billet was simulated and analyzed by single variable method. The results indicate that the delay offset in the forming position of casting core is greater than that of surface shell at a given drawing speed with pouring temperature rising within the fitting range, while the effect on two-phase zone length can be neglected. With the fixed pouring temperature and pouring speed rising within a moderate range, the delay distance of core and forming position of billet are nearly equal and trace. However, the distances are enhanced significantly along with decreasing temperature gradient across the entire casting zone at drawing speeds of 0.15 m/s and 0.17 m/s, and two-phase zone length remains similar. Moreover, the formulas for outlet temperature, thickness and temperature difference of billets were fitted and validated to establish an appropriate control mechanism of billet temperature for hot continuous rolling.

Key Words: Hazlitt Continuous Casting, Solidification Heat Transfer, Numerical Simulation

收稿日期: 2024-08-19; 修订日期: 2024-10-20

基金项目: 内蒙古自治区科技计划基金资助项目(2022SYSJ0172)

第一作者简介: 李轩, 男, 2000年出生, 硕士研究生, E-mail: lx595962@163.com

通信作者: 潘秋红, 女, 1970年出生, 副教授, E-mail: panhong9004@163.com

引用格式: 李轩, 潘秋红, 金伟, 等. 哈兹列特连铸铝板坯凝固场数值模拟研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(9): 1296-1302.

LI X, PAN Q H, JIN W, et al. Numerical simulation of solidification field of Hazlitt continuous casting aluminum slab [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(9): 1296-1302.

- [6] 王化喜, 郭丙征. 汽车压铸及铸造铝合金[J]. 建筑论坛, 2017(11): 1944-1944.
- [7] 卢信学, 邓益民, 束学道, 等. 铝合金发动机端盖压铸数值模拟与工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(3): 424-427.
- [8] 雷书星, 侯志杰, 唐培洁, 等. 基于 CAE 分析的铝合金二合一壳体压铸工艺设计与优化[J]. 铸造, 2024, 73(2): 224-228.
- [9] 宋成猛, 侯东锋, 王健, 等. 浅述压铸铝合金行业现状及发展趋势[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(6): 848-852.
- [10] 韩凤梅, 齐卫东. 压铸工艺与模具设计[M]. 北京: 北京理工大学出

版社, 2013.

- [11] 宋鹏, 龚海军, 彭军, 等. 铝合金机油泵盖压铸模浇注及溢流系统仿真优化设计[J]. 铸造, 2023, 72(2): 196-202.
- [12] 刘晓龙, 龚海军, 卢红林, 等. 汽车机油泵体压铸工艺数值模拟与优化[J]. 铸造, 2024, 73(2): 208-215.
- [13] GUPTA R D, SHARMA N, KHANNA R, et al. A study of process optimization of carburetor die casting process [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 1420-1424.

(编辑: 张正贺)

铝合金具有高比强度、低密度、良好的塑韧性与导热性等,被广泛应用于航空航天、汽车、日用化工、建筑等领域。铝板带箔材的供坯方式主要为铸锭热轧、连续铸轧和连铸连轧^[1]等。铸锭热轧法主要用于生产6系、7系等铝合金坯料以保证其高品质,但是能耗大、成本高;连续铸轧法广泛应用于1系、3系、8系等民用铝合金板带箔材供坯生产,该方法流程短、成本低,但生产出的铸轧坯因凝固冷却速率较快易产生偏析裂纹等组织缺陷^[2]。哈兹列特连铸连轧法以低成本、高效率、低能耗及工艺先进等特点成为轧制铝卷的常用生产方式之一^[3-4],其最大特征是从铝液到铸坯生产过程的连续性,然而铝铸坯的成形、组织及性能会受到双带对铝液冷却凝固及在结晶器中液-固状态下动态变化的熔体流热场的直接影响,使得进入后续热连轧的坯料性能难以精准掌控,因此产生的坯料缺陷无法在后续的冷轧及箔轧中完全消除,这是目前采用连铸连轧板料生产高精度、高质量、高性能板带箔材的关键问题之一^[5]。

随着数值模拟技术的发展与成熟,利用模拟工具对哈兹列特连铸连轧生产进行模拟与验证是提高生产效率、优化生产环节、降低生产成本并提高铝板带箔材生产精度、质量的有效途径之一^[6-7]。目前,针对双带连铸连轧的研究取得了一定的研究成果^[8],但针对哈兹列特双带凝固传热、铝熔池流场和热场、铸造凝固场的凝固过程展开研究的报道很少。本研究构建3003铝合金二维尺度下连铸区液-固耦合流变场,结合Fluent及JMat Pro软件进行数值模拟,探究哈兹列特连铸过程中拉坯速度及浇注温度对铸坯温度场及凝固场的影响,旨在为该工艺的推广应用提供参考。

1 哈兹列特基于传热理论的流场和热场模型

1.1 3003铝熔体物性参数

本研究拟对3003铝合金的连铸过程进行数值模拟,该合金的化学成分见表1^[9]。

表1 3003铝合金的主要化学成分

Tab.1 Main chemical composition of 3003 aluminum alloy %					
w_B					
Cu	Si	Fe	Mn	Zn	Al
0.1	0.6	0.7	1.25	0.1	余量

取某哈兹列特连铸产线生产的2.065 5 mg坯样作为研究对象,采取热重-差示扫描量热法(TG-DSC)进行分析,选取 Al_2O_3 坩埚加盖方法并采用 N_2 作为保护气氛,升温速率设置为 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,升温到 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 。由耐驰

449F3综合热分析仪绘制并导出合金的TG-DSC曲线,见图1。可以看出,合金升温后经历玻璃化转变与结晶过程,于 $643\text{ }^\circ\text{C}$ 左右开始出现吸热峰,并于 $654\text{ }^\circ\text{C}$ 时达到吸热峰值,即合金熔点。根据TG-DSC曲线可以确定3003合金固、液相线温度区间为 $643\sim 654\text{ }^\circ\text{C}$ 。

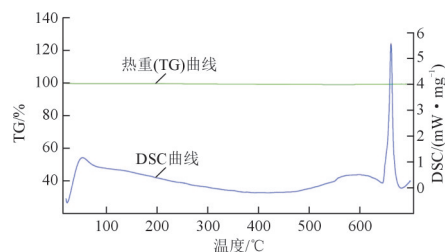


图1 3003铝合金的TG-DSC曲线

Fig.1 TG-DSC curves of 3003 alloy

利用JMatPro材料性能模拟软件对3003铝合金的热物性参数进行曲线拟合^[10]。输入铝合金的成分,设置起始温度为 $5\text{ }^\circ\text{C}$,最终加热温度为 $700\text{ }^\circ\text{C}$,凝固截止点为 0.01% ,导出3003铝合金在 $5\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ 下的温度、热导率、热焓等变温曲线,见图2。

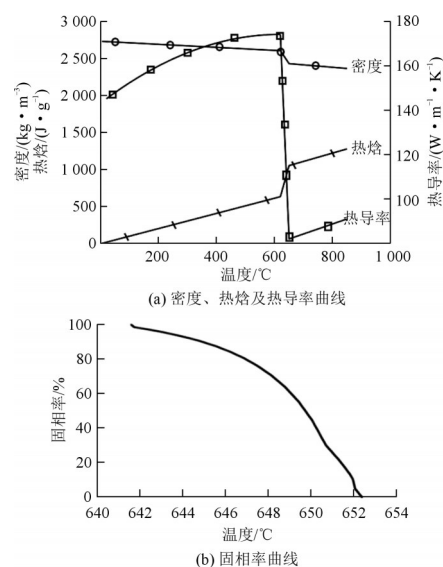


图2 3003铝合金热物性参数

Fig.2 Thermophysical parameters for 3003 aluminum alloy

1.2 连铸过程传热数学模型的建立

哈兹列特双带连铸工艺涉及的热能传递方式有热传导、热对流以及热辐射。热传导方面,傅里叶导热定律^[11]表明了物体内部热流与温度梯度成正比关系,其微分形式表达为:

$$q = -k\nabla T \quad (1)$$

式中, q 为单位面积单位时间内通过的热流; k 为材料热导率; ∇T 为温度梯度。

将哈兹列特双带连铸过程的导热在二维空间进行描述,式(1)可以扩展为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{Q}{\rho c} \quad (2)$$

式中, T 为热力学温度; t 为时间; α 为热扩散率, 表示热导率与密度和比热容的比值, 即 $\alpha = \frac{k}{\rho c}$; Q 为单位体积单位时间内产生的热源强度; ρ 为材料密度; c 为材料比热容。

采用 Robin 边界条件, 规定边界上物体与接触流体的对流传热系数及周围流体的温度, 其表达式为:

$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = h(t_w - t_f) \quad (3)$$

式中, t_w 为壁面温度; t_f 为流体温度; h 为两者之间的传热系数。

采用牛顿冷却公式 (Newton's law of cooling) 描述热对流传热过程, 流体受固体加热时:

$$q = h(t_w - t_f) \quad (4)$$

流体被固体冷却时:

$$q = h(t_f - t_w) \quad (5)$$

取温差 $\Delta T = (t_f - t_w)$, 式(5)可变为:

$$q = h\Delta T \quad (6)$$

物体在单位时间内辐射的热量遵循玻尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 定律:

$$\phi = A\sigma T^4 \quad (7)$$

式中, σ 为 Boltzmann 常数; A 为辐射表面积。实际热辐射过程中, 物体辐射热量的计算需要遵循经验修正为:

$$\phi = \epsilon A\sigma T^4 \quad (8)$$

式中, ϵ 为发射率, 也称为辐射系数, 数值小于 1。

通过计算系统焓变来表示潜热, 表达式为:

$$H(T) = H_0 + \int_{T_0}^T c_p(T) dT + L(1 - f_s) \quad (9)$$

式中, L 为相变时单位质量的潜热; $H(T)$ 为温度 T 时的焓; f_s 为材料固相体积分数; $c_p(T)$ 为物质的定压比热容。

对式(9)求导可得:

$$\frac{\partial H}{\partial T} = c_p - L \frac{\partial f_s}{\partial T} \quad (10)$$

有效比热通过增加材料在相变温度范围内的比热容来处理潜热, 以修正比热的方式来补偿潜热的释放, 表达式为:

$$\rho \left(c_p - L \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (11)$$

傅里叶定律中的热源 Q 在铝熔体凝固过程中表示为:

$$Q = \begin{cases} L, & (T > T_L) \\ (1 - f_s)L, & (T_L > T > T_s) \end{cases} \quad (12)$$

式中, T_L 与 T_s 分别为液相线温度与固相线温度, 当温度低于固相线温度时, $Q=0$ 。将式(12)代入式(11), 可得:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (13)$$

1.3 几何模型的建立

哈兹列特双带连铸机特点是具有直线、平行移动的铸腔, 使用钢带作为铸腔的上表面和下表面, 两侧挡块链构成了铸腔的侧面。熔融金属进入到钢带之间, 并随着其在移动铸腔中的移动而凝固, 当热量转移到钢带背面时, 开始固化。铸造区整体几何模型尺寸: 连铸区长为 2 000 mm, 钢带厚为 1.25 mm, 铸坯厚为 19 mm, 铸机设备对应的模型简化与网格划分见图 3, 现针对计算模型作出以下假设: ①连铸坯厚为 19 mm, 板宽与板厚比例超过 100, 属极薄板。因此忽略板宽方向传热, 采用二维传热模型来描述, 模型简化为二维^[12]。②连铸过程中凝固坯壳与钢带之间存在的气隙层不随连铸进程而变化, 运用串联热阻模型处理冷却水到铸坯之间的多层传热。③钢带浸没在不断流动的冷却水膜当中, 冷却水的传热系数保持一致, 且上下钢带对铸坯传热一致。

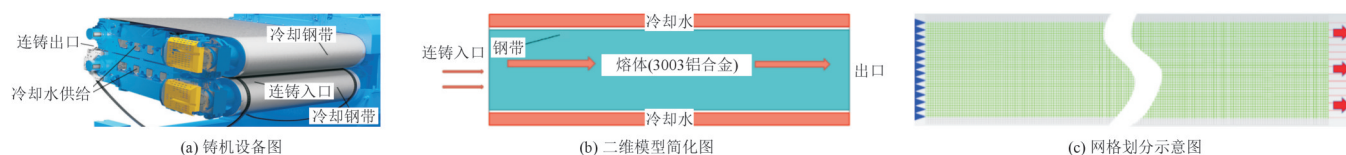


图3 哈兹列特连铸设备二维模型简化图及网格示意图

Fig.3 Simplified diagram and grid diagram of two-dimensional model of Hazlitt continuous casting equipment

1.4 边界条件的确定

浇注温度及拉坯速度参考哈兹列特生产线实测值设定。凝固过程中, 铝液通过上、下两层极薄低碳钢受到铸机内部循环水冷却^[13]。哈兹列特低碳钢双

带背面有高速循环冷却水, 水温为 32 ℃, 冷却速度较快, 基于 PENUMAKALA P K 等^[14]研究, 结合哈兹列特连铸机高效快速水膜冷却技术^[15], 采用 Robin 边界条件, 铸带与铝熔体之间的传热系数取 2 000~4 000 W/(m²·K)^[16]。

2 模拟方案设计

采用ANSYS软件的Fluent模块进行模拟,由于连铸凝固模型中铝熔体经过连铸机入口处温度、凝固界面及流体的流动环境均会随着时间和位置发生不断变化,所以采用先稳态后瞬态的计算步骤,以稳态下的流场预测瞬态温度场计算。考虑到合金液相线温度在654℃左右,为使模拟更接近实际生产。根据前箱温度确定浇注温度为660~740℃,拉坯速度为0.08~0.17 m/s,基于上述范围进行控制变量模拟,方案见表2。

表2 工艺参数控制变量试验组

Tab.2 Control variable test group of process parameters

序号	拉坯速度/(m·s ⁻¹)	初始浇注温度/℃
1	0.08	700
2	0.09	700
3	0.10	700
4	0.11	700
5	0.15	700
6	0.17	700
7	0.11	660
8	0.11	680
9	0.11	720
10	0.11	740

3 模拟结果与讨论

3.1 连铸工艺参数对连铸温度场的影响

图4是拉坯速度为0.11 m/s时不同浇注温度下铸坯的温度场。可以看出,5种温度下铸区内铝液受冷却形成液穴随之与固液共存区相接,到达出口前形成固相区均完全凝固。随着浇注温度的升高,各组铸机出口时温度分别为516、549、562、585和595℃,温差均在140℃左右,表明铸坯在到达出口位置时温度均能在固相线温度以下,基本满足连铸要求。浇注温度升高的同时,液相区域的色块越密集说明温度梯度渐增,这是因为在拉坯速度一定时,浇注温度越高的铝液在铸区内冷却至固液共存区所需的冷却长度越长,凝固速率下降导致入口区的等温线更加密集,温度变化更加剧烈。在固液两相区色块密集程度减小,这是由于结晶潜热的释放导致温度下降减缓。铸坯出口色块密集程度又出现增加且等温线密集,这是因为结晶潜热释放结束,温度下降迅速。

图5是浇注温度为700℃时、不同拉坯速度下铸坯的温度场。可以发现,随着拉坯速度提高,液穴的终点与固液两相区的初始点会沿x轴方向偏移,这是因为拉

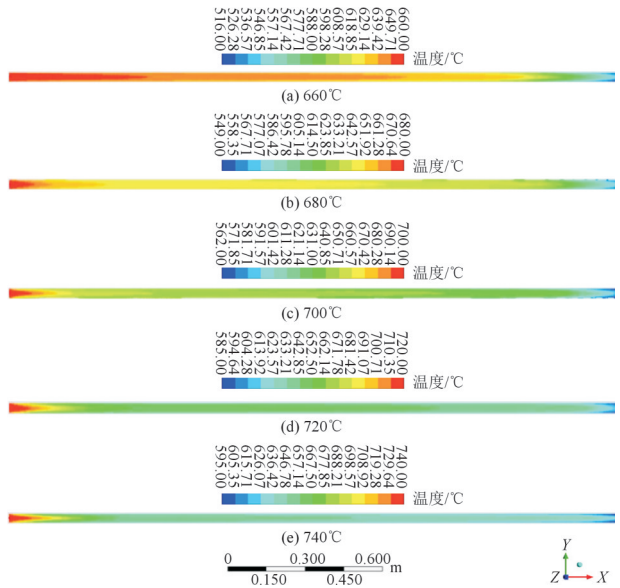


图4 拉坯速度为0.11 m/s、不同浇注温度下的铸坯温度场云图
Fig.4 Temperature field nephogram of casting billets under different pouring temperatures with drawing speed of 0.11 m/s

坯速度提高使铝熔体更快通过铸区,导致凝固时间缩短,连铸稳定后相同流量的Al液会更早经历相变过程。拉坯速度增加,入口处的等温线越密集且温度梯度越大,说明连铸初期较快的拉坯速度能提高冷却速率,促进凝固坯壳形成。

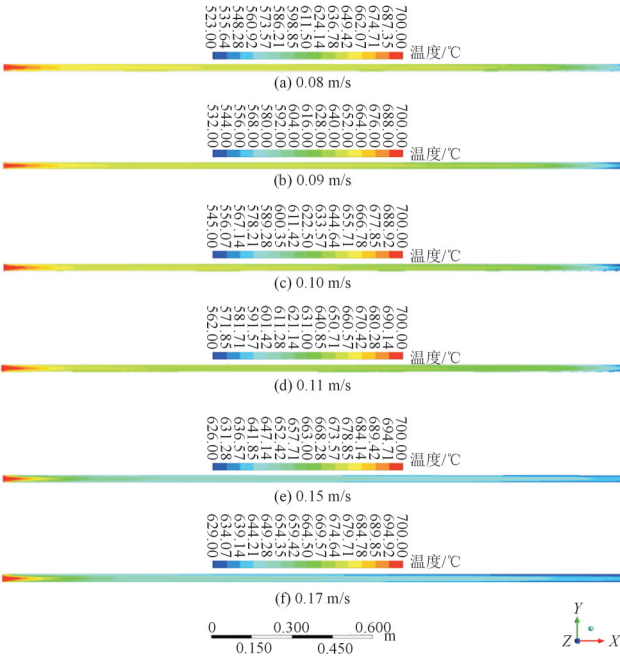


图5 浇注温度为700℃不同拉坯速度下的铸坯温度场云图
Fig.5 Temperature field nephogram of casting billets under different drawing speeds at pouring temperature of 700℃

图6为不同浇注温度及不同拉坯速度下的铸坯表面温度分布图。由图6a可以看出,当表面温度达到654℃后,凝固坯壳开始形成,在浇注温度为660℃时,由于浇注温度过低且进入铸机受激冷瞬间释放大量热

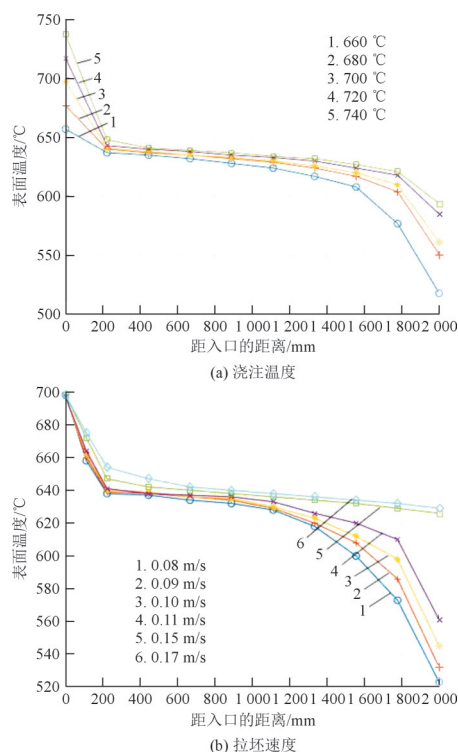


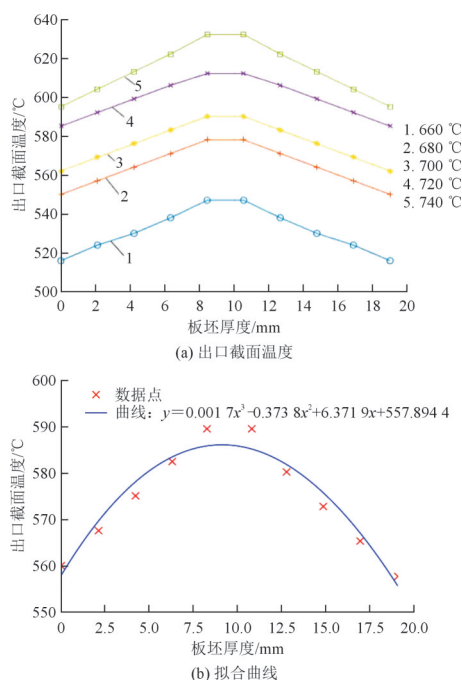
图6 不同工艺参数下铸坯表面温度分布图

Fig.6 Surface temperature distribution of casting billets under different process parameters

量,凝固坯壳形成位置在距入口很近的 53 mm 处。当浇注温度为 680、700、720 和 740 °C 时,凝固坯壳形成的位置分别为 129、157、186 和 212 mm。由图 6b 可知,当拉坯速度在 0.08~0.11 m/s 时,铝液都会靠近铸机入口处形成表面坯壳,固液两相区温差较小,铸机后半段至出口温降明显,而 0.15 m/s 和 0.17 m/s 下的铸坯表面温度在低至液相线后,均小幅下降直至出口位置,这是因为过高的拉坯速度使得铸坯冷却受限。6 种拉坯速度下,凝固坯壳形成的位置分别是 168、172、174、177、196 和 205 mm,前 4 种拉坯速度下,每提高 0.01 m/s 拉坯速度,坯壳延后 3 mm 左右形成,当提高到 0.15 m/s 与 0.17 m/s 后,坯壳在 200 mm 左右位置形成。

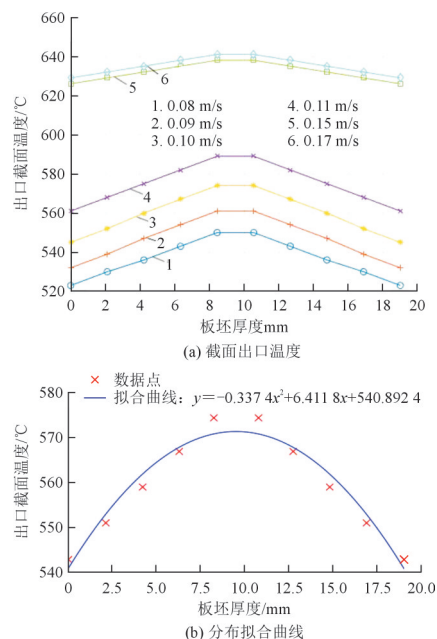
图 7 为不同浇注温度下铸坯出口截面温度分布及拟合曲线。由图 7a 可知,铸坯出口截面处的温度均为从中心向边部下降。浇注温度每增 20 °C,铸坯同一厚度位置温度升高 10~30 °C,铸坯出口温差变化在 27~37 °C。5 种温度下的温度梯度相似,可用相同的二次方程式表达,当浇注温度提高或降低时,只需要将方程调整为 $T(x) = 0.0017x^3 - 0.3738x^2 + 6.3719x + \Delta t$ 。其中, Δt 为同一位置下不同工艺的温差。

图 8 为不同拉坯速度下铸坯出口截面温度分布及曲线。由图 8a 可见,拉坯速度在 0.08~0.11 m/s 时,每提高 0.01 m/s,铸坯同一厚度位置温度升高 9~16 °C;拉坯速度提高到 0.15 和 0.17 m/s 时,同一位置的温度差值为


 图7 不同浇注温度下铸坯出口截面的温度分布及拟合曲线
Fig.7 Temperature distribution and fitting curves of casting billets at outlet section under different pouring temperatures

3 °C。6 种拉坯速度下铸坯出口处温差分别为 27、29、29、28、12 和 12 °C。前 4 种拉坯速度下的温度梯度相似,可用相同的二次方程表达,表达式为 $T(x) = -0.3374x^2 + 6.4118x + 540.8924$,提高或减小拉坯速度后,优化方程为 $T(x) = -0.3374x^2 + 6.4118x + \Delta t$ 。

拉坯速度提高到 0.15 m/s 和 0.17 m/s 时曲线拟合见图 9,其中,曲线 1 为 0.15 m/s,曲线 2 为 0.17 m/s。表


 图8 不同拉坯速度下铸坯出口截面的温度及分布拟合曲线
Fig.8 Temperature distribution and fitting curves of casting billets at outlet section under different drawing speeds

达式为 $T(x) = -0.127x^2 + 2.422x + 625.185$, 细微调整拉坯速度后, 优化方程为 $T(x) = -0.127x^2 + 2.422x + \Delta t_0$ 。

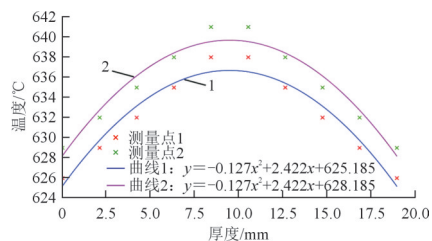


图9 拉坯速度为0.15和0.17 m/s铸坯出口温度分布拟合曲线
Fig.9 Fitting curves of temperature distribution of casting billets at outlet with drawing speeds of 0.15 and 0.17 m/s

3.2 连铸工艺参数对连铸凝固场的影响

图10为CFD-POST后处理得到的不同浇注温度下的凝固场。可以看出,随着温度升高,同一位置铝液凝固坯壳形成及完全凝固的位置都出现延后,液相在铸坯芯部延伸形成液穴,铸机出口处均为纯固相,满足连铸基本要求。

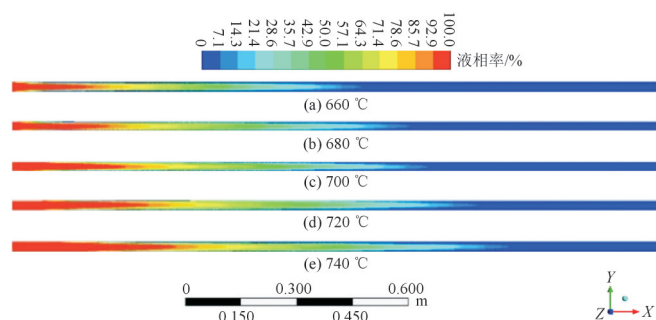


图10 拉坯速度为0.11 m/s不同浇注温度下的凝固场云图
Fig.10 Solidification field nephogram under different pouring temperatures at drawing speeds of 0.11 m/s

图11为CFD-POST后处理得到的不同拉坯速度下的凝固场。可以看出,相较于改变浇注温度,拉坯速度对凝固场的影响更为明显,拉坯速度越快,凝固形成位置越延后。在拉坯速度为0.08、0.09、0.10和0.11 m/s时整体变化不大,在0.15和0.17 m/s拉坯速度下凝固延后更为明显。

由于连铸过程中坯壳是由表面向中心凝固而成,因此以中心温度变化范围来确定两相区的长度。图12为不同工艺参数下铸坯中心液相率分布。由图12a可知,试验组中不同浇注温度下铸坯的两相区长度分别为826、897、966、1 023和1 028 mm,两相区长度相差不大,凝固区的始末点随着温度升高而沿连铸方向偏移。由图12b可知,试验组中拉坯速度为0.08~0.11 m/s对应的两相区长度分别为855、895、934和966 mm,对两相区长度的影响较小。拉坯速度为0.15 m/s和0.17 m/s

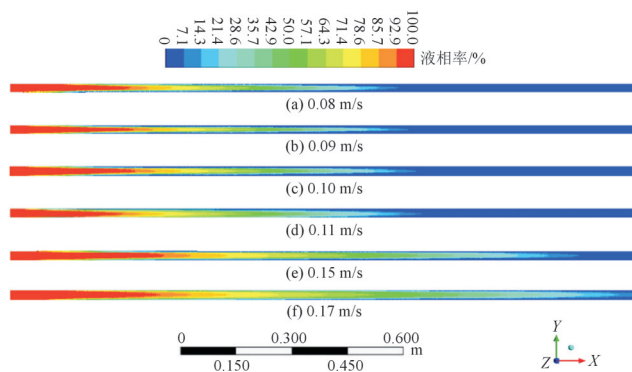


图11 浇注温度为700 °C不同拉坯速度不同下的凝固场云图
Fig.11 Solidification field nephogram under different drawing speeds at pouring temperature of 700 °C

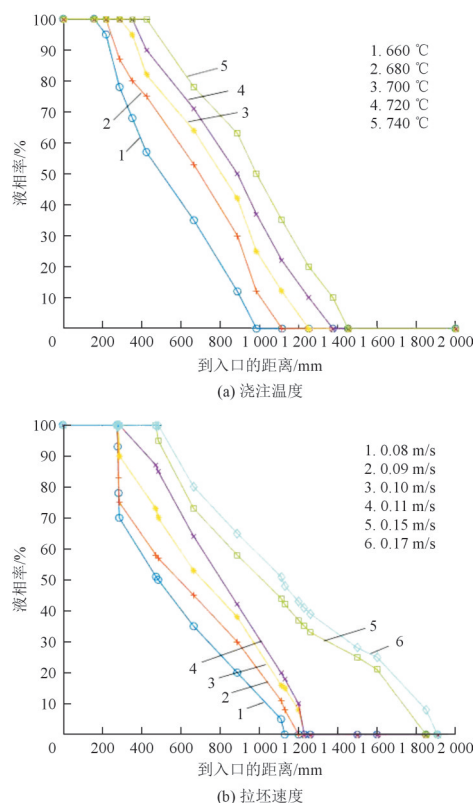


图12 不同工艺参数下铸坯中心液相率分布图

Fig.12 Liquid phase rate distribution at the center of casting billets under different process parameters

时对应的两相区长度分别为1 376和1 423 mm,这是因为在同一浇注温度下,假定钢带-凝固坯壳-芯部铝液间热传导直至芯部凝固所需的热量是固定的,过高的拉坯速度会降低单位距离内传热的效率,造成芯部凝固点出现延后。

3.3 试验验证

表3为某工厂生产3003铝板带材铸机出口处铸坯表面温度的实测值。由于本研究是在二维尺度下进行的数值模拟,故选取厚度方向为0处的出口铸坯截面温度,与实际出口铸坯表面左右两侧的实测值进行对比,

实际温度测量点见图 13。本研究设置浇注温度为 660~740 °C 及拉坯速度为 0.08~0.17 m/s,旨在探讨二者理论上对连铸铝板坯凝固场的影响。而在哈兹列特连铸的实际生产中,为保证连铸铝板坯组织及力学性能的优良性,浇注温度一般介于 695~705 °C 之间,拉坯速度介于 0.10~0.12 m/s 之间,故实际对照组中浇注温度与拉坯速度的跨度有限。由表 3 可知,模拟数据和实际数据的误差值在 6.4%~9.2% 之间,模拟结果均处于合理的误差范围内。

表 3 实测板坯表温与模拟对照

Tab.3 Comparison of measured and simulated surface temperature of billet

序号	前箱温度/°C	拉坯速度/(m·s ⁻¹)	出口铸坯左侧表面温度/°C	出口铸坯右侧表面温度/°C	侧边平均温度/°C	同工艺下侧边模拟温度/°C	数据误差/%
1	694	0.10	577	587	582	536	7.9
2	695	0.11	588	594	591	553	6.4
3	699	0.10	595	597	596	541	9.2
4	699	0.11	596	602	599	558	6.8
5	705	0.10	596	598	597	546	8.5
6	706	0.11	600	603	602	563	6.5

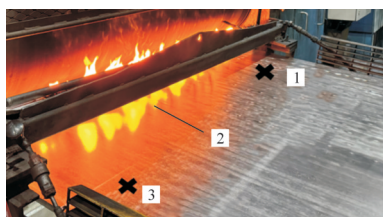


图 13 连铸出口铸坯温度测量点示意图

Fig.13 Schematic diagram of temperature measurement point of billet at the outlet of continuous casting

1. 出口铸坯右侧测温点 2. 连铸出口处 3. 出口铸坯左侧测温点

4 结 论

(1) 随浇注温度上升,凝固区域沿连铸速度方向偏移,排除浇注温度较低的 660 °C 的工艺情况,浇注温度每提升 20 °C,坯壳形成及芯部开始凝固位置沿连铸方向平均偏移 27.67 和 65.75 mm,两相区长度均在 948 mm 左右。出口铸坯截面处的温度均为中心高两侧低且正比于浇注温度,温差变化在 27~37 °C 之间。

(2) 随着拉坯速度提高,凝固区域同样会沿连铸速度方向偏移。当拉坯速度为 0.08~0.11 m/s 时,每提高 0.01 m/s 的拉坯速度,坯壳形成及芯部开始凝固位置分别延后 3 mm 和 4 mm;当拉坯速度为 0.15 和 0.17 m/s 时,坯壳形成及芯部开始凝固位置会大幅延后,随之相接区域温度梯度会保持较低的降温速度,两相区长度在 912.5 mm 左右。出口铸坯截面处的温差在 12~

29 °C 之间。

(3) 经实际测温验证,数值模拟所得对应结果与 5 组数据中铸坯表面侧边温度平均值的误差均在合理范围内,说明经数值模拟工艺参数对铸坯的影响规律结果对哈兹列特连铸的实际生产具有一定的参考意义。

参 考 文 献

- [1] 刘志文,王倩雅,刘雪梅,等. 浅谈连铸连轧生产工艺特点及其对铝合金成分添加剂质量的特异性要求[J]. 有色金属加工, 2023, 52(6): 45-49.
- [2] 张雷刚,王学锋,任书卿. 电解 Al 液直接铸轧生产铝板带坯表面缺陷的研究[J]. 铝加工, 2013(5): 25-27.
- [3] 马道章. 节能降耗——哈兹列特铝板带连铸连轧工艺的优势[J]. 上海有色金属, 2006(1): 18-21.
- [4] 马道章. 连铸连轧——降低汽车用铝材高成本的好工艺[J]. 轻合金加工技术, 2006(6): 5-7.
- [5] PAN Q H, JIN W, HUANG S Z, et al. Simulation and study of influencing factors on the solidification microstructure of Hazelett continuous casting slabs using CAFE model[J]. Materials, 2024, 17(8): 1 869.
- [6] 郭薇. 板坯连铸凝固过程微观组织的模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [7] 陈守东, 杨宇, 陈敬超. 铝合金连续铸轧数值模拟现状及研究展望[J]. 材料导报, 2011, 25(S1): 243-245, 279.
- [8] HUANG J Y, YANG M, WANG Z Q, et al. Key refractories application in Hazelett strip-casting process [J]. China's Refractories, 2016, 25(4): 29-32, 37.
- [9] 杨永昌, 关绍康, 陈斌斌. 哈兹列特连铸连轧 3003 铝合金板组织和性能研究[J]. 轻合金加工技术, 2010, 38(10): 15-18, 26.
- [10] 蔺虹宾, 何跃斌, 蒋辉, 等. 基于 JMatPro 软件对 7050 铝合金析出相的热力学模拟计算[J]. 中国铸造装备与技术, 2019, 54(3): 21-24.
- [11] LI W M, LI L J, GENG Y F, et al. Air gap measurement during steel-Ingot casting and its effect on interfacial heat transfer[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2021, B52(4): 1-15.
- [12] YAN Z, GUO Y, JIAN K, et al. Numerical analysis of the comprehensive effect of continuous casting process parameters on the continuous casting billet remelting [J]. Numerical Heat Transfer, 2024, 85(2): 270-286.
- [13] XU M G, RODERICK G, MIHAIELA I. Transport phenomena in meniscus region of horizontal single belt casting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(11): 3 124-3 132.
- [14] PENUMAKALA P K, NALLATHAMBI A K, SPECHT E, et al. Influence of process parameters on solidification length of twin-belt continuous casting [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 134: 275-286.
- [15] 刘素华. 铝板坯连铸连轧生产新工艺-Hazelett 法[J]. 有色金属加工, 2009, 38(6): 28-29.
- [16] PENUMAKALA P K, NALLATHAMBI A K, SPECHT E, et al. Feasibility study of continuous casting of steel billets in twin-belt caster [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2019, 50(1): 42-51.

(编辑: 刘晨辉)