

铸轧工艺参数对铝熔体流热场影响的模拟研究

潘秋红¹ 刘杰¹ 郑帅¹ 吴华杰¹ 赵阳¹ 董则防²

(1.江苏大学材料科学与工程学院; 2.内蒙古连晟新能源材料有限公司)

摘要 利用 Fluent 流体模拟软件对 1030 铝合金铸轧流热场进行数值模拟分析,进而分析铸轧速度和浇注温度对熔体流热场影响的规律。结果发现,Hunter 式铸嘴型腔中铝熔体的流场受铸轧速度影响较大,占据主导作用。铸轧生产时,若铸轧速度越慢,则铝熔体有充分的时间进行分配,铸嘴出口处中部与两侧边部之间铝液的速度差越小,但会导致铝液在铸嘴内滞留的时间长、温降大;浇注温度对铝熔体的流、热场影响十分有限,仅影响边部区域的速度场、铸嘴整体温度分布。当铸轧速度为 1.2 m/min、浇注温度为 695 ℃ 时有利于熔体在铸嘴型腔内的流动和充型,有利于铸嘴布流稳定以及保证板坯的质量。

关键词 1030 铝合金;数值模拟;工艺参数;流热场

中图分类号 TG146.21;TP311;TG249.9

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.08.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation on the Influence of Roll-casting Process Parameters on the Fluid-thermal Field of Aluminum Melt

Pan QiuHong¹, Liu Jie¹, Zheng Shuai¹, Wu Huajie¹, Zhao Yang¹, Dong Zefang²

(1.School of Material Science and Engineering, Jiangsu University;

2.Inner Mongolia Liansheng New Energy Materials Co., Ltd.)

Abstract: The fluid-thermal field of 1030 aluminum alloy by roll-casting was simulated by Fluent software, and the influence of casting speed and pouring temperature on fluid-thermal field was investigated. The results reveal that the flow field of aluminum melt in the cavity of Hunter nozzle is dominated by the casting speed. During the roll-casting process, the slower the roll casting speed is, the longer is allocated to the aluminum melt, and the smaller the velocity difference between the middle and the two sides of the nozzle outlet is, however, leading to the longer retention of the molten aluminum in the nozzle and the larger drop of temperature; Effect of pouring temperature on fluid-thermal field of aluminum melt is very limited, which only affects the velocity field in the edge area and the overall temperature distribution of the nozzle and hardly affects the distribution of fluid-thermal field. The condition that the casting speed is set at 1.2 m/min and the casting temperature is set at 695 ℃ is conducive to the flow and filling of melt in the nozzle cavity, which is the most conducive to the flow stability of nozzle and the quality of slab.

Key Words: 1030 Aluminum Alloy, Numerical Simulation, Process Parameters, Fluid-thermal Field

收稿日期:2021-01-20;修改稿收到日期:2021-02-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51801072)

第一作者简介:潘秋红,女,1970 年出生,副教授,江苏镇江(212016),E-mail:panhong9004@163.com

通信作者:刘杰,男,1999 年出生,硕士研究生,江苏镇江(212016),E-mail:1791523687@qq.com

引用格式:潘秋红,刘杰,郑帅,等.铸轧工艺参数对铝熔体流热场影响的模拟研究[J].特种铸造及有色合金,2021,41(8):1 016-1 019.

PAN Q H, LIU J, ZHENG S, et al. Numerical simulation on the influence of roll-casting process parameters on the fluid-thermal field of a-luminum melt[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(8):1 016-1 019.

[17] POLKOWSKI W, JÓŹWIK P, KARCEWSKI K, et al. Evolution of crystallographic texture and strain in a fine-grained Ni3Al (Zr, B) intermetallic alloy during cold rolling[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014, 14(4): 550-560.

[18] 冯志慧. 经济型双相不锈钢 2101 热塑性研究[D]. 北京:北京科技大学, 2018.

[19] 宋志刚, 陈斌, 郑文杰, 等. 固溶温度对 00Cr22Ni5 Mo3N 钢组织及力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2004(6): 47-50.

[20] 韩伟伟, 刘清友, 贾书君, 等. 回火温度对低合金双相钢的组织及力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2013, 38(4): 74-78.

[21] BURSTEIN G T, ILEVBAR G O. The effect of specimen size on the measured pitting potential of stainless steel[J]. Corrosion Science, 1996, 38(12): 2 257-2 265.

[22] 王凤平. 腐蚀电化学原理、方法及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.

[23] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.

[24] HUNT C P. The effect of impurities on the intergranular stress corrosion cracking of a C/Mn steel[J]. Corrosion Science, 1988, 28(9): 901-922.

[25] 方晓英, 王卫国, 郭红, 等. 304 不锈钢冷轧退火 Σ3~n 特殊晶界分布研究[J]. 金属学报, 2007, 43(12): 1 239-1 244.

(编辑:刘卫)

随着双辊连续铸轧技术向超宽、超薄、快速的方向发展,铸轧系统中铝熔体的布流结构和铸轧工艺对铸轧板坯稳定、高效、高质量生产影响最大。在铸轧生产时,铸轧板的质量很大程度上取决于铸嘴内部的熔体热流场,若在上游热流场中出现铸轧板缺陷(如裂纹、孔洞、凹陷、横波纹等),则在下游冷轧时难以进行改善^[1]。在工程实践中,铸嘴结构的类型已从 3C 式转向大量使用 Hunter 式,但大多数企业还依靠经验调节铸轧工艺参数和设计铸嘴系统,导致铸轧坯质量不稳定。对铸轧技术的研究表明,铸轧生产时,铸轧工艺参数会影响着铝液在铸嘴内的流动形态和规律,但是对铸嘴内部熔体热流场的综合分析较少,大多数研究仅仅停留在铸嘴出口处的熔体热流场,未深入地去研究铸嘴型腔内部熔体热流场对实际铸轧生产的影响^[2,3]。因此,本课题采用数值模拟方法对 1030 铝合金铸轧工艺参数进行分析与设计,旨在研究其对铸嘴内部熔体热流场的影响,以探寻出最优的铸轧工艺参数,为优化铸轧工艺、改善铸轧坯质量提供参考。

1 铝熔体流动的数学模型与边界条件

1.1 1030 铝熔体物性参数

1030 铝熔体的粘度会随着温度的变化发生变化,因此运用 Arrhenius 公式对其粘度(η)建立数学模型,该模型的数学表达式为: $\eta = 3.5 \times 10^{-7} e^{\frac{5\,870.305}{T}}$ Pa·s,其中, T 为温度。根据相关文献^[4,5],不考虑铝熔体在铸嘴型腔内的凝固问题,铝熔体的比热容、热导率以及密度可以认为是常数:比热容 $c_p = 1\,080$ J/(kg·°C),熔体热导率 $\lambda = 10^3$ W/(m·K),密度 $\rho_{\text{熔}} = 2.371 \times 10^3$ kg/m³。

针对截面规格为 6.2 mm×1 610 mm 的铸轧板,铸轧工艺参数:入口温度为 685、695、705 °C,根据质量守恒^[6]可以计算出,当铸轧速度分别为 0.8、1.2、1.6 m/min 时,对应的铸嘴入口速度分别为 0.071、0.106、0.141 m/s,入口温度即为实际浇注温度。

1.2 铸嘴型腔模型及数学模型的建立

铸嘴形式采用 Hunter 式单入口型,为满足生产需要,铸嘴模型选自某公司 1030 铝板的生产线,采用 UG 软件进行严格建模,为方便后续网格划分和计算,此模型只取其 1/2 进行建模。

铸嘴型腔结构类似于矩形管道,矩形管道临界雷诺数(Re)为 2 260^[7,8]。根据公式 $Re = VL/v$ 计算,铸嘴入口处流体的 $Re = 3\,873.91$,出口处 $Re = 811$,则入口处铝熔体流态为湍流,出口为层流,整体上铝熔体是从

入口的湍流状态向出口的层流状态过渡态,故利用 Flurnt 模拟软件时采用低雷诺数的 κ - ϵ 湍流模型^[9]:

连续性方程^[10]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中, u 、 v 、 w 分别为熔体在 x 、 y 、 z 方向的流速,m/s。

动量守恒方程^[11]:

$$\rho \frac{\partial \kappa}{\partial t} + \rho u \nabla \kappa = \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla \kappa \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u \nabla \epsilon =$$

$$\nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{\kappa} P_k - f_\epsilon C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (3)$$

式中, ρ 为密度,kg/m³; ϵ 为湍流耗散率; κ 为湍动能,m²/s²; u 为速度矢量,m/s; μ 为动力粘度,Pa·s; μ_T 为有效湍流粘度,Pa·s;常数 $C_{\epsilon 1} = 1.5$; $C_{\epsilon 2} = 1.9$; $\sigma_k = 1.4$; $\sigma_\epsilon = 1.4$; f_μ 、 f_ϵ 分别为湍流雷诺数修正函数; P_k 为低湍流模型下的湍动能产生项,kg/(m·s³)。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum j' h_{j'} J_{j'} + u_j (\tau_{ij})_{\text{eff}} + S_h \right] \quad (4)$$

式中, k_{eff} 为有效导热系数; $J_{j'}$ 为组分 j 的扩散流量,kg·s⁻¹·m⁻²; S_h 为体积热原项; E 为流体系统能量,J; h 为分子内能,J; u_i 、 u_j 分别为各组分流速,m/s; P 为表面张力,N/m²; τ_{ij} 为粘性耗散系数。

1.3 有限元传热模型的建立

传热模型中需要考虑整体热通量的影响,为方便计算, X 方向(铸嘴板宽方向)的整体热通量选取两侧边部与中部的平均值; Y 方向(轧制方向)的热通量分布建立了以下函数拟合关系^[12]:

$$q(y) =$$

$$\begin{cases} 1.453y + 5\,977.96 & (0 \leq y \leq 250 \text{ mm}) \\ 0.969\,3y^2 - 506.62y + 72\,498.6 & (250 \text{ mm} < y \leq 370 \text{ mm}) \\ 12\,732.5 & (370 \text{ mm} < y \leq 400 \text{ mm}) \end{cases} \quad (5)$$

1.4 边界条件

入口处边界条件:入口温度即为浇注温度,根据水平方案分别设定为 705、695、685 °C,入口速度 $u = 0$ m/s, V 向速度根据质量守恒定律分别设定为 0.071、0.106、0.141 m/s, $w = 0$ m/s。

出口处边界条件: $P = 0$ N/m², $\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{\partial W}{\partial y} = 0$ ^[12]。

壁面边界条件:由于壁面为无滑移形式,则其速度为 0。

2 试验方案设计

采用交叉试验的方法研究若干组铸轧速度和浇注温度的组合,针对铸轧速度和浇注温度这两个影响因素各取 3 个水平,其中浇注温度选取 685、695、705 ℃;铸轧速度选取 0.8、1.2、1.6 m/min,建立 2 因素 3 水平的交叉试验表,见表 1。

表 1 铸轧工艺参数的控制变量试验组合
Tab.1 The combination of control variable testing of roll-casting process parameters

序号	浇注温度/℃	铸轧速度/(m·min ⁻¹)
1	705	0.8
2	705	1.2
3	705	1.6
4	695	0.8
5	695	1.2
6	695	1.6
7	685	0.8
8	685	1.2
9	685	1.6

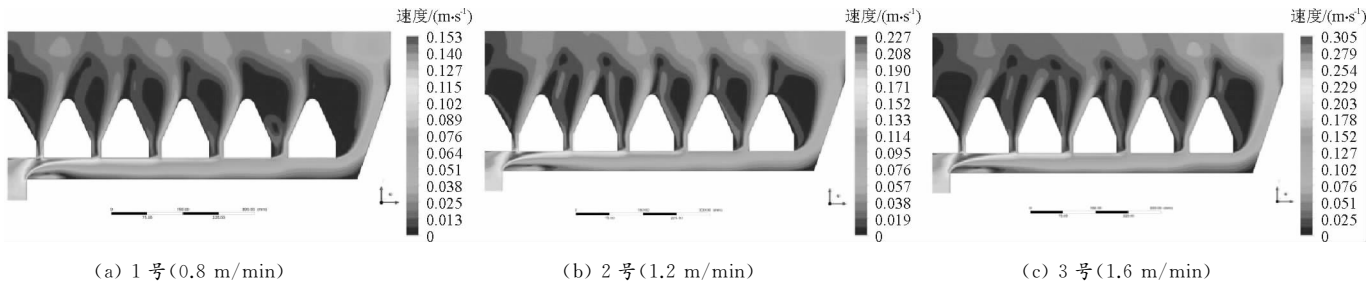


图 1 浇注温度为 705 ℃ 不同铸轧速度下对应铸嘴中心 Y 平面铝熔体的速度云图
Fig.1 Velocity nephogram of aluminum melt corresponding to the Y plane in the center of the casting nozzle under different roll-casting parameters

轧速度越低,铸嘴中部和边部的速度差越小,铝液整体流动性越均匀,越有利于控制铸轧板坯质量。1 号曲线对应铝液流动最均匀,边部和中部最大速度差为 0.034 m/s;2 号对应的铝液流动曲线相对不均匀,边部和中部

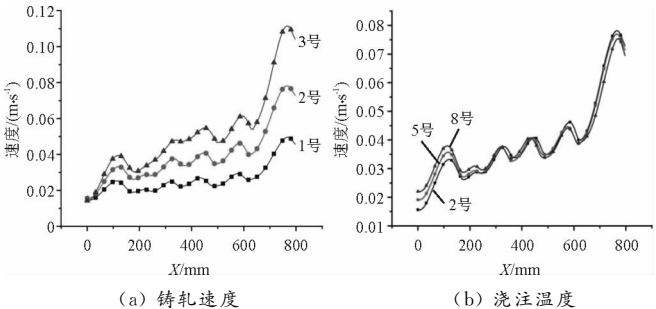


图 2 不同铸轧速度下和浇注温度下的铸嘴出口熔体流速分布曲线

Fig.2 Flow velocity distribution curves of melt at the outlet of casting nozzle at different roll-casting speeds and different casting temperatures

3 铸嘴型腔内熔体流动的数值模拟

3.1 铸轧工艺参数对熔体速度场的影响

图 1 是浇注温度为 705 ℃ 时不同铸轧速度下的速度云图。可以看出,当浇注温度恒定时,提高铸轧速度,会使得铸嘴型腔中的铝熔体更加向边部和肋板处进行分配,使得中部间隙处的铝熔体流速降低、流量减少。当铸轧速度为 0.8 m/min 时,中部间隙、边部间隙、肋板间隙处铝熔体的速度差较小、流量分布较为均匀,边部的间隙 1 和间隙 2 分配得到的铝熔体流量较为充足。当铸轧速度为 1.2 m/min 时,铝熔体的整体流动速度得到提高,但中部间隙分配得到的铝液有所减少,边部及肋板处的铝液分配有所增多。当铸轧速度为 1.6 m/min 时,间隙 1 和间隙 2 的铝液流量进一步减少,是因为入口流速过快,铝液已经来不及进行分流而流向后部间隙。在 4~9 号中流动规律相似,即浇注温度基本上不影响铝液流场的流动。

图 2 为不同铸轧速度和浇注温度下铸嘴出口熔体流速分布曲线。由图 2a 可以看出,同一浇注温度下,铸

最大速度差为 0.063 m/s;3 号对应的铝液流动曲线最不均匀,边部和中部最大速度差为 0.101 m/s。

由图 2b 可以看出,浇注温度不仅不改变铝液的流动规律,而且对铝液的流动速度影响也很小,仅表现为边部和中部的流速略微增加,而肋板处的流速略微降低。

3.2 铸轧工艺参数对熔体温度场的影响

不同铸轧参数下对应铸嘴中心 Y 平面铝熔体的温度云图见图 3。

对图 3 进行分析可知,当铸轧速度为 0.8 m/min 时,铸嘴出口处中部区域的温度最低,为 675 ℃,而入口温度为 705 ℃,出入口温差较大,不利于控制板坯质量;当铸轧速度为 1.2 m/min 时,铸嘴出口中部区域温度有所提高,为 680 ℃,出入口温差较低;当铸轧速度为 1.6 m/min 时,出口处中部区域温度进一步提高,达到了

690℃, 出入口温差进一步降低。此规律在 4~9 号试样中也可以看出。即表明当浇注温度保持一定时, 提高

铸轧速度会使得铝熔体在铸嘴型腔中的流速加快, 停留时间缩短, 出入口温差减小。

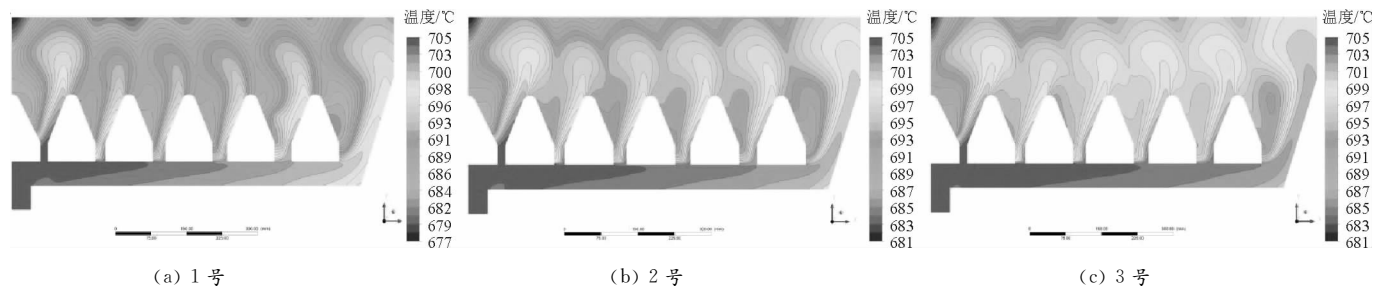


图3 不同铸轧参数下对应铸嘴中心Y平面铝熔体的温度云图

Fig.3 Temperature nephogram of aluminum melt corresponding to the Y plane in the center of the casting nozzle under different roll-casting parameters

不同铸轧速度下的铸嘴出口熔体温度分布曲线见图4。可以看出, 当铸轧速度越大, 对应的出口处的平均温度也越高, 同时曲线的波动也更加平稳, 即表现为出口处温度的标准差越低, 温度的分布越均匀。

不同浇注温度下铸嘴出口熔体温度分布曲线见图5。可以看出, 浇注温度越高, 出口处的平均温度也越高, 但出口处沿着板宽方向的温度分布规律基本不变, 曲线的走势以波峰波谷对应位置也基本相同, 即表明浇注温度基本上不改变铸嘴出口处的温度分布, 仅仅表现为整体温度的高低。

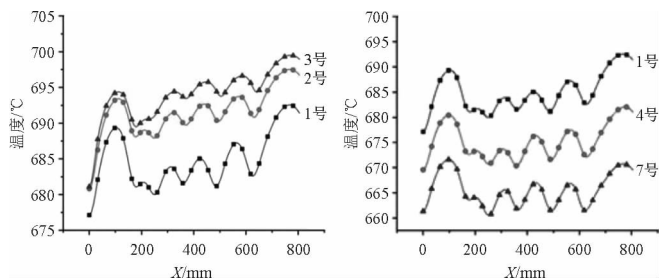


图4 不同铸轧速度下的铸嘴出口熔体温度分布曲线

Fig.4 Temperature distribution curve of the melt at outlet of casting nozzle at different roll-casting speeds

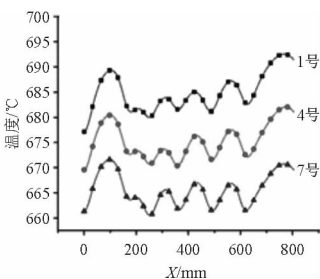


图5 不同浇注温度下的铸嘴出口熔体温度分布曲线

Fig.5 Temperature distribution curve of the melt at outlet of casting nozzle at different pouring temperatures

4 结 论

(1) 铸嘴型腔中铝熔体的流场受铸轧速度参数影响较大, 占据主导作用, 铸轧生产时, 速度越慢, 则铝熔体有充分的时间分配均匀, 铸嘴出口处中部与两侧边部之间铝液的速度差越小。

(2) 浇注温度基本不改变铝液的流动规律, 且对铝液的流动速度影响很小, 仅表现为边部和中部的流速略微增加, 而肋板处的流速略微降低。

(3) 铸轧速度越大时, 对应的出口处的平均温度越高, 铝液在铸嘴型腔中的停留时间缩短, 表现为出口处

温度的标准差越低, 整体温度分布越均匀。

(4) 浇注温度基本不改变铸嘴型腔中铝熔体的温度分布规律, 不同的浇注温度仅仅表现为整体温度的高低, 但其对控制铸轧过程和质量起着重要的作用。

(5) 当设定铸轧工艺参数中的浇注温度为 695℃, 铸轧速度为 1.2 m/min, 铝熔体流热场的分布最为合理。

参 考 文 献

- [1] 潘军朋. 铸轧铝板坯晶粒度的控制[J]. 轻合金加工技术, 2003, 31(7): 10-12.
- [2] XU M, ZHU M. Numerical simulation of the fluid flow, heat transfer, and solidification during the twin-roll continuous casting of steel and aluminum[J]. Metall. and Mater. Trans., 2016, B47(3): 740-748.
- [3] 廖桑桑. 宽幅镁合金板坯双辊连铸铸嘴结构的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [4] 刘晓波, 毛大恒. 铝铸轧铸嘴型腔的计算机仿真设计[A]. 中国有色金属学会、长沙矿山研究院. 中国有色金属学会第五届学术年会论文集[C]. 长沙, 2003.
- [5] SARIOGLY K, YILDIZBAYRAK G, DUNDER M. Computer simulation of metal feeding system used in twin roll casting[J]. Light Metals, 2000, 12(9): 663-666.
- [6] 周英. 连续铸轧熔体流场的物理与几何耦合规律与设计[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [7] 屠基元, 叶关恒, 刘超群. 计算流体力学[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2014.
- [8] 江帆, 黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [9] 戴青松, 邓运来, 胥福顺, 等. 铸嘴结构对 3004 铝合金铸轧流热场的影响及其优化设计[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(5): 1 602-1 608.
- [10] 郭彦宏, 王金辉, 韩丽, 等. 铝铸轧用铸嘴的优化设计[J]. 热加工工艺, 2012, 41(17): 55-59.
- [11] SMITH D M. New system enables sheet width changes during casting[J]. Light Metal Ages, 2000, 57(8): 130-133.
- [12] 郑帅. 宽幅铝合金板坯连续铸轧铸嘴型腔熔体流热场的数值模拟研究[D]. 江苏镇江: 江苏大学, 2020.

(编辑: 栗万仲)