

水平连铸 Inconel 600 合金温度场模拟及试验研究

曹健晟^{1,2} 杨帆^{1,2} 余建波^{1,2} 任忠鸣^{1,2}

(1.省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室;2.上海大学材料科学与工程学院)

摘 要 利用 ProCAST 软件研究了拉坯速度和冷却水流量对 Inconel 600 水平连铸的初始凝固界面和凝固中心偏移的影响,并通过测温结果校核模拟参数,使模拟结果和试验结果最大误差在 10% 以内。结果表明,冷却水流量从 12 L/min 增加到 22 L/min 时,初始凝固界面后移 6.52 mm,初始凝固中心向上的偏移量从 0.44 mm 增加到 1.07 mm;拉坯速度从 120 mm/min 增加到 240 mm/min,初始凝固界面向结晶器出口处前移了 15.4 mm,初始凝固中心向上偏移量从 1.03 mm 减小到 0.51 mm。冷却水流量为 16 L/min 时,拉速的提高使得铸坯的凝固中心偏移从 0.73 mm 降低至 0.44 mm,铸坯断面的平均显微硬度(HV)从 412.2 增加到 432.7,且断面的硬度均匀性得到改善。铸坯凝固组织均呈强径向取向柱状晶。优化的工艺参数:铸造温度为 1 450 ℃,冷却水流量为 16 L/min,拉坯速度为 200 mm/min。

关键词 水平连铸;数值模拟;凝固中心偏移;显微硬度

中图分类号 TG146.1⁺5;TG249.7;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.02.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Analysis of Temperature Field in Horizontal Continuous Casting Process for Inconel 600

Cao Jiansheng^{1,2}, Yang Fan^{1,2}, Yu Jianbo^{1,2}, Ren Zhongmin^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Advanced Special Steel Metallurgical and Preparation;
2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University)

Abstract: The effects of drawing speed and cooling water flow on the initial solidification interface and solidification center shift in horizontal continuous casting for Inconel 600 were investigated by ProCAST software. The simulation parameters were corrected by temperature measurement results, which reduced the maximum error between the simulation and experimental results within 10%. The results indicate that the initial solidification interface is moved backward by 6.52 mm, and the upward deviation of the initial solidification center is increased from 0.44 mm to 1.07 mm as the cooling water flow rate increased from 12 L/min to 22 L/min. When the drawing speeds is increased from 120 mm/min to 240 mm/min, the initial solidification interface is moved forward by 15.4 mm towards the outlet of the crystallizer, and the initial solidification center deviation is decreased from 1.03 mm to 0.51 mm. At a cooling water flow rate of 16 L/min, the solidification center deviation of the cast billets is reduced from 0.73 mm to 0.44 mm due to the increase in drawing speed, where the average microhardness of sections is increased from 412.2 HV to 432.7 HV, and the hardness uniformity is significantly improved. The solidification structure of the cast billets presents strongly radially oriented columnar crystals. The optimal process parameters can be obtained as follows: casting temperature of 1 450 ℃, cooling water flow of 16 L/min and drawing speed of 200 mm/min.

Key Words: Horizontal Continuous Casting, Numerical Simulation, Solidification Center Deviation, Microhardness

Inconel 600 合金是一种典型的固溶强化型镍基高温合金,由于其优异的抗腐蚀性、高温抗氧化性以及优良的成型加工能力,被广泛应用于核电、化学化工以及

航空航天领域^[1-5]。目前,此类合金主要采用模铸工艺生产,这种方法存在着较多弊端,如单炉产量低、检测周期长和材料损耗率高等。

收稿日期:2022-04-20;修改稿收到日期:2022-05-18

基金项目:上海市扬帆计划资助项目(21YF1413000);上海市启明星计划资助项目(20QA1403800);上海市曙光计划资助项目(20SG42)

第一作者简介:曹健晟,男,1997 年出生,硕士研究生,上海(200444),E-mail: cjason1997@163.com

通信作者:余建波,男,1982 年出生,研究员,上海(200444),E-mail: jbyu@shu.edu.cn

引用格式:曹健晟,杨帆,余建波,等. 水平连铸 Inconel 600 合金温度场模拟及试验研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(2):178-184.

CAO J S, YANG F, YU J B, et al. Numerical analysis of temperature field in horizontal continuous casting process for inconel 600[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(2):178-184.

随着 Inconel 600 合金需求量提升,利用连铸工艺生产该合金的技术有待开发。水平连铸是将金属液水平注入结晶器内,通过水平拉坯进行连续铸造的工艺。该方法具有冷却速度大、凝固组织致密、铸锭偏析小、表面质量高以及近终型等特点,可以大幅提高合金的生产效率。这一特点已经在铜合金和非晶合金的生产上得到了证明^[6-7]。

在连铸生产中,合金的初始凝固区域尤为重要,该区域易使铸坯产生表面缺陷,也决定了拉坯成功与否^[8]。在水平连铸过程中,由于重力和铸坯凝固收缩的影响,铸坯上部存在较大的宏观气隙区,造成初始凝固中心向上偏移,导致铸坯宏观组织的分布不均^[9],但对于在水平连铸中铸坯的初始凝固中心偏移研究报道较少。本研究采用 ProCAST 软件对 Inconel 600 高温合金在冷却区域进行温度场数值模拟,以探究拉坯速度和冷却水流量对结晶器内铸坯的初始凝固界面和凝固中心偏移的影响,同时基于模拟结果进行了相关验证。

1 计算模型与验证试验

1.1 计算模型建立

模拟中使用的模型是基于对照试验所使用的结晶器和分离环结构所建立,首先在结晶器、引锭杆、分离环和熔融金属的模型表面生成三角形网格。然后对这 4 个部分分别进行四面体网格划分,最后进行装配,见图 1。通过控制节点数,对网格的质量评价和边缘的平滑性进行了修正,最终网格单元总数为 369 401 个。

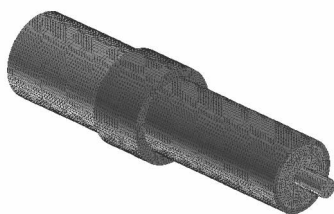


图 1 模型网格划分

Fig.1 Meshing of model

结晶器内的凝固行为在连铸过程极其重要,因为这涉及到许多影响,如相变、传热和微观结构的变化。因此,在铸坯的整个温度场的模拟过程中,作如下基本假设:①温度场模拟采用稳态计算方式,仅考虑温度变化达到稳态后的结果;②在结晶器中的传热呈现各向同性,即网格点在 3 个方向上的传热相同;③在金属凝固过程中,只考虑凝固潜热的释放,忽略相变潜热;④冷却水沿着结晶器均匀分布,结晶器外周的冷却强度均匀分布。

温度场控制方程采用基于能量守恒的热传导微分

方程:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + L_s \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (1)$$

式中, T 为随时间和空间的温度变化,℃; ρ 为合金密度, kg/m^3 ; c_p 为合金的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $\lambda_i (i=x, y, z)$ 为合金在 3 个方向上的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; L_s 为合金的凝固潜热; f_s 为合金凝固过程的固相率。

1.2 边界条件及传热系数的设定

图 2 为边界网格划分示意图。在 I 区域左端面的钢液入口处温度设置为 1 450 ℃,而 BN 导流管处在加热区内,此处设置为绝热保温面。铜套和一次冷却水之间设置为对流传热。BN 内套和铜套的导热性能较好,模拟过程中忽略两者连接处的缝隙,在 II 和 III 区域中 BN 内套和铜套之间的传热系数设为 1 500 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;在此区域的冷却水传热系数通过每 min 设置的水流量代入无量纲公式进行计算^[10]:

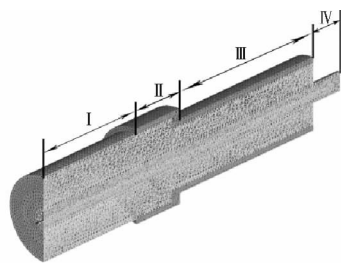


图 2 边界网格划分示意图

Fig.2 Boundary grid meshment

$$\frac{h_w D_H}{\lambda_w} = 0.023 \left(\frac{\rho_w u_w D_H}{\mu_w} \right)^{\frac{4}{5}} \cdot \left(\frac{c_w \mu_w}{\lambda_w} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (2)$$

$$D_H = \frac{4A}{S} \quad (3)$$

式中, λ_w 为冷却水的导热系数, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; ρ_w 为冷却水的密度, kg/m^3 ; μ_w 为冷却水的粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; u_w 为冷却水流速, m/s ; c_w 为水的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; D_H 为结晶器水缝的当量直径, m ; A 为冷却水水缝的截面积, m^2 ; S 为湿周, m 。

一般金属和陶瓷之间的传热系数在 300~1 000 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 之间^[11],铸坯和 BN 内套之间是紧密接触时,传热系数设定为 1 000 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。水平连铸中的气隙设定为热量在空气中的对流传热和辐射传热,收缩量计算如下:

$$\Delta D = \alpha (\Delta T D_0) \quad (4)$$

式中, λ_{air} 为空气的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; ΔD 为线材收缩量,%; D_0 为收缩前尺寸 mm ; ΔT 为温度差, K 。由文献[12]可知,Inconel 600 合金的线性收缩系数 α 取 1.62×10^{-5} ;再通过下式计算产生不同收缩量后的界面传热系数。

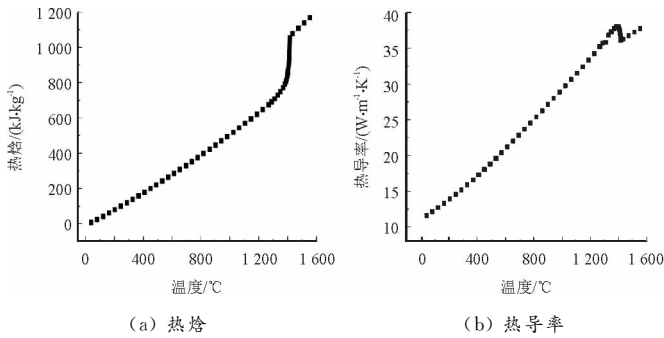
$$h_{gap} = \frac{1}{\frac{1}{h_0} + R_{gap}} = \frac{1}{\frac{1}{h_0} + \frac{1}{\frac{\lambda_{air}}{d} + h_{rad}}} \tag{5}$$

式中, h_{gap} 为气隙的界面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; h_{rad} 为空气的辐射传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; h_0 为紧密接触时的初始传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; d 为气隙宽度, m ; h_{rad} 为辐射传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

IV 区域是铸坯与空气的接触面, 铸坯与空气之间的辐射热交换计算如下:

$$h_{rad} = \sigma \epsilon (T_{metal}^4 - T_{air}^4) \tag{6}$$

式中, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; ϵ 为铸坯黑度; T_{metal} 和 T_{air} 分别为铸坯温度与环境温度, $^{\circ}C$ 。铸坯与空气的



对流传热系数设为 $20 W/(m^2 \cdot K)^{[13]}$ 。

1.3 Inconel 600 合金和 BN 内套物性参数

试验采用 Inconel 600 合金, 其化学成分见表 1。铸坯直径为 $\phi 11 mm$, 合金的物理性能经材料数据库计算, 见图 3。

表 1 Inconel 600 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of Inconel 600 alloy %						
w_B						
Cr	Fe	C	Mn	Si	Ti	Ni
15.26	8.34	0.03	0.15	0.13	0.24	余量

温度场模拟中所使用的 BN 分离环和内套的物性参数参照文献[14], 在 ProCAST 中建立相关数据, 见表 2。

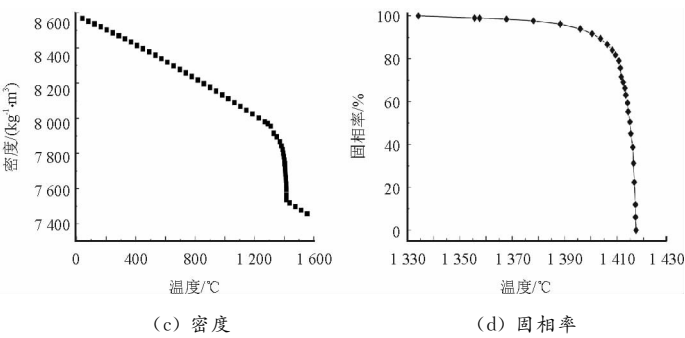


图 3 Inconel 600 合金物理性能

Fig.3 Physical performance of Inconel 600 alloy

表 2 BN 物性参数

Tab.2 Physical parameters of BN		
温度/ $^{\circ}C$	比热容/ $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	热导率/ $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
25	33.6	808
500	25.2	916
800	21	1 257
1 000	20.6	1 966

2 计算结果与分析

2.1 温度场的坐标定义

为定量分析不同工艺参数下, 铸坯初始凝固界面和凝固中心的变化, 在温度场中建立坐标轴, 以钢水入口处作为坐标原点, 坐标系上的点用来确定初始凝固位置和液穴的具体形貌。模拟的铸造温度均为 $1 450^{\circ}C$, Inconel 600 合金的液相线温度为 $1417^{\circ}C$, 固相线温度

为 $1 334^{\circ}C$, 初始凝固区域则定义为铸坯液相线等温线, 对应图 4 中 A、B 和 C 点的位置。将 A 和 C 点作为铸坯上下部的初始凝固点, 定义点 B 为初始凝固中心。

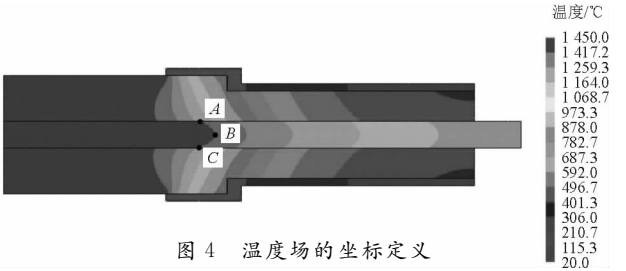


图 4 温度场的坐标定义

Fig.4 Coordinate definition of temperature field

2.1.1 不同冷却水流量下的温度场

图 5 为不同冷却水流量下的铸坯温度场变化。可以发现, 冷却水流量越大, 铸坯在结晶器出口处的温度也越低。图 6 为不同冷却水流量下的初始凝固点形貌

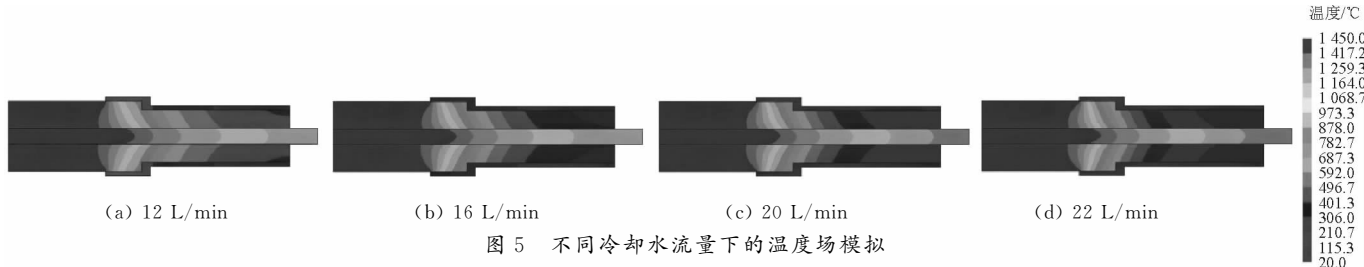


图 5 不同冷却水流量下的温度场模拟

Fig.5 Temperature fields under different cooling water flow rates

及位置。由图 6a 可以看出,在水流量从 12 L/min 增加到 22 L/min 时,平均初始凝固界面抽后移动近 6.52 mm;冷却水流量的增加使铸坯的冷却速度加大,所需

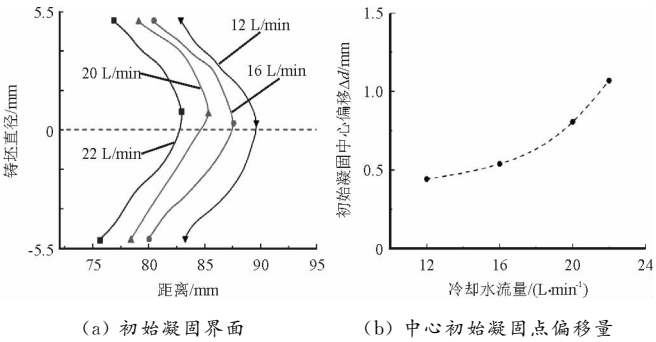


图 6 不同冷却水流量下的初始凝固点形貌及位置
Fig.6 Morphologies and locations of initial solidification point under different cooling water flow

的凝固时间缩短,因此初始凝固界面向结晶器内移动。由图 6b 可以看出,随着冷速水流量增加,初始凝固中心的偏移量逐渐加大,偏移量从 0.44 mm 增加到 1.07 mm。在结晶器内铸坯因重力和凝固收缩的影响,上部铸坯传热效率比下部低,使得铸坯上部的初始凝固点要比下部迟缓,最终造成初始凝固中心 B 的偏移。冷却水流量的增加也会使得金属液流动性变差,无法及时对铸坯中心进行补缩,造成中心缩孔的缺陷甚至冻住水口的风险。因此选择合适的冷却水流量,既能保持合金流动性,又可以减小初始凝固中心偏移导致的组织不均匀性。此处选择冷却水流量为 16 L/min。

2.1.2 不同拉坯速度对温度场的影响

图 7 为不同拉坯速度下的温度场模拟。可以发现,拉坯速度越大,铸坯出结晶器口的温度越高。图 8 为不

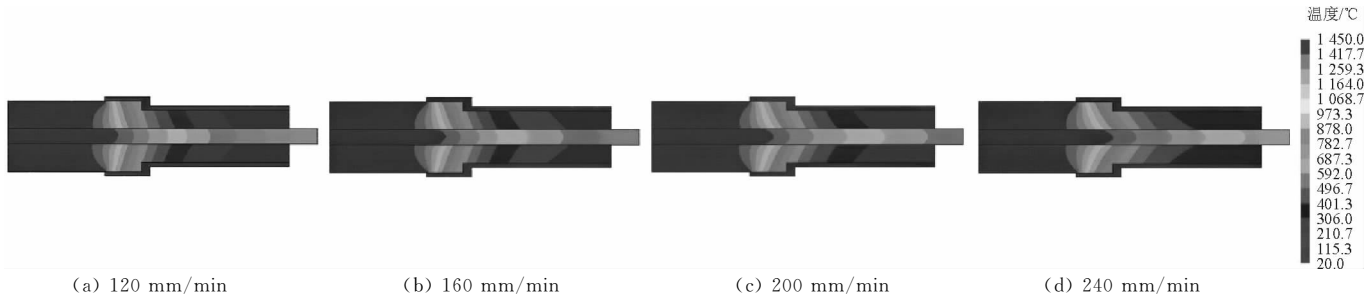


图 7 不同拉坯速度下的温度场模拟
Fig.7 Temperature fields at different drawing speeds

同拉速下的初始凝固点形貌与位置。从图 8a 发现,拉坯速度对初始凝固界面的位置分布影响较大。当拉坯速度从 120 mm/min 增加到 240 mm/min 时,平均初始凝固界面前移 15.4 mm,拉坯速度的提升说明铸坯在单位时间内受到的冷却量降低,初始凝固界面向结晶器出口处移动。这有利于减小拉坯过程中的阻力,降低铸坯纵向裂纹的产生。同时在拉坯速度从 200 mm/min 到 240 mm/min 的过程中,初始凝固界面前移量较大。因为过快的拉坯速度会使得铸坯冷却不足,铸坯的热量无法及时被冷却水带走,初始凝固界面大幅度前移,造

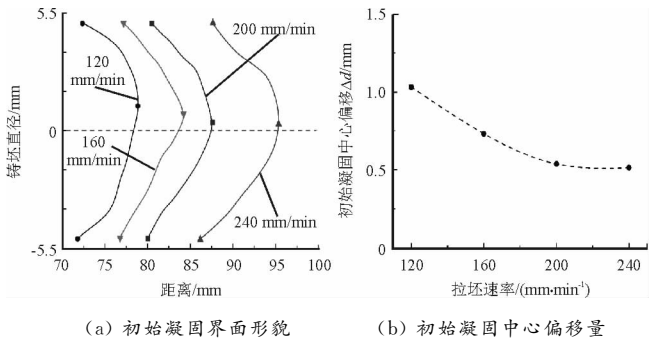


图 8 不同拉速下的初始凝固点形貌与位置
Fig.8 Morphologies and locations of initial solidification point at different drawing speeds

成拉坯断裂的风险。从图 8b 中发现,铸坯初始凝固中心向上的偏移量随着拉坯速度的提升而逐渐降低,从 1.03 mm 降低至 0.51 mm。同时考虑到拉坯速度过快会使得初始凝固界面过于靠前,铸坯会因液穴过长,使周向的初生坯壳太薄导致拉坯断裂;而拉坯速度过慢则会出现钢水凝固过快,产生冻结水口的风险。因此选择合理的拉坯速度既能够有效提高拉坯的成功率,又可以减少铸坯的初始凝固中心的偏移。

2.2 模拟模型的温度验证

由于无法精确测量水平连铸过程中各点的温度,本课题通过间接测量结晶器内套的方法进行温度场的验证。图 9 为测温示意图。首先在 BN 内套不同位置处预埋热电偶测量连铸达到稳态时的温度,BN 内套中的测温点分布见图 9a,孔的夹角呈 60°分布,沿着 AOB 做剖面处理后见图 9b,孔的深度分别为 80 mm 和 120 mm,且孔的直径均为 6 mm;图 9c 为对应模型中的测温选取点,当温度场计算达到稳态,即温度不再发生变化后,温度变化结果见图 9d。

验证试验参数铸造温度为 1 450 ℃,冷却水流量为 16 L/min,拉坯速度为 200 mm/min。表 3 为试验测温

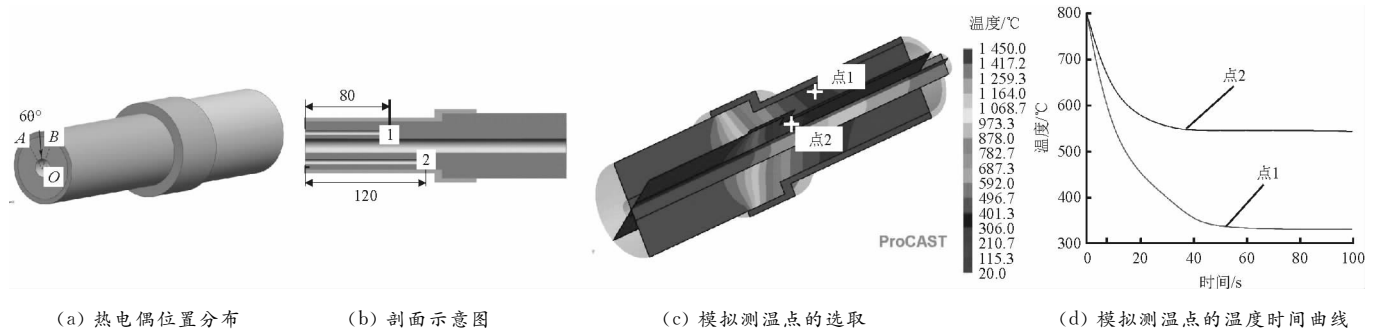


图 9 测温示意图

Fig.9 Schematic diagram of temperature measurement

稳定后的温度值和模拟温度的对比,由表中的数据做误差分析,发现经过校准后的数据误差都在 10% 以内,说明模拟参数设置合理。

表 3 实际测温点和模拟对比

Tab.3 Comparison of actual and simulated temperature measuring points			
测温点	实测值/℃	模拟值/℃	误差/%
1	307	329	7.1
2	509	544	6.9

表 4 不同拉坯速度下工厂试验工艺参数

Tab.4 Process parameters for industry experiments			
方案	铸造温度/℃	冷却水流量/(L·min ⁻¹)	拉坯速度/(mm·min ⁻¹)
1	1 450	16	160
2	1 450	16	200
3	1 450	16	240

图 10 为不同工艺方案下 Inconel 600 高温合金水平连铸坯。可以看出,在 160 mm/min 的拉坯速度下,连铸过程中出现拉断现象。这是因为铸坯的初始凝固位置相对靠后,在整个连铸过程中的拉坯阻力较大,并且钢水经过 BN 导管进入结晶器后,由于水平连铸的冷却强度大,铸坯直径较小,钢水的流动性能大幅降低,最终导致拉坯失败。在 200 mm/min 的拉坯速度下,Inconel 600 合金可以实现拉坯,这是因为其初始凝固界面更靠前,在整个连铸过程中的阻力更小;并且拉坯速度快,铸坯单位时间内在冷却区域的停留时间较短,后续的金属液能及时补充,使得整个连铸过程较为顺利。拉坯速度为 240 mm/min 时,发现由于铸坯在启铸阶

3 试验结果与讨论

3.1 拉坯速度的试验验证

基于上述水平连铸温度场的模拟结果,可以得知拉坯速度的不同对铸坯凝固位置影响较大。选择 160、200 和 240 mm/min 的拉坯速度作为试验参数,观察不同速度下的凝固中心的偏移量。具体试验的工艺参数见表 4。



(a) 方案 1(拉坯失败),160 mm/min (b) 方案 2(拉坯成功),200 mm/min (c) 方案 3(拉坯失败),240 mm/min

图 10 不同方案下 Inconel 600 高温合金水平连铸坯

Fig.10 Horizontal continuous casting billets of Inconel 600 superalloy under different schemes

段引锭杆附近的金属液温度较低,流动性较差,金属液的流动速度跟不上拉坯速度,铸坯凝固过程中伴随较多气孔,造成金属液和引锭杆之间不能很好地结合,最终导致铸坯被拉断^[15]。因此在连铸初始阶段,适当地降低拉坯速度,可以避免在启铸阶段的拉断事故。

3.2 凝固中心偏移量

铸坯在结晶器中发生的凝固收缩现象使得铸坯尺寸有所缩减。因此分别测量 5 处实际铸坯尺寸以及结晶器内套口的尺寸,取平均值后结果见表 5。

铸坯凝固收缩产生的气隙热阻,直接影响了铸坯初始凝固中心的偏移,图 11 为不同拉坯速度下的宏观金相图以及凝固中心偏移量的对比。可以发现,拉坯速度

表 5 3 组试验铸坯的凝固收缩量

Tab.5 Solidification shrinkage degree of three groups of experimental cast billets			
方案	结晶器内孔直径/mm	铸坯实际直径/mm	收缩量/mm
1	10.85	10.43	0.42
2	11.20	10.75	0.45
3	11.28	10.84	0.44

为 160 mm/min 的铸坯上部边缘距离凝固中心距离为 4.85 mm,铸坯下边缘距中心距离为 5.58 mm,凝固中心偏移量为 0.73 mm;在 200 mm/min 下的铸坯上边缘距中心为 5.18 mm,下边缘距中心距离为 5.59 mm,凝固中心偏移量为 0.43 mm;在 240 mm/min 的铸坯上边缘距凝固中心为 5.19 mm,而下边缘距离中心为 5.63

mm,凝固中心的偏移量为 0.44 mm。而这种凝固中心偏移的现象是因为在拉坯过程中由于重力作用致使铸坯下部与结晶器内壁的接触压力要比上部大,冷却速度较快,使得铸坯中液穴的等温线出现不对称性,最终造

成铸坯凝固中心相较于几何中心产生偏差。由图 11d 观察,模拟和实际的铸坯凝固中心偏移量,发现拉坯速度提升,凝固中心偏移量也随之降低。拉坯速度的增加提高了铸坯轴向的传热,减缓了径向传热,有利于减小

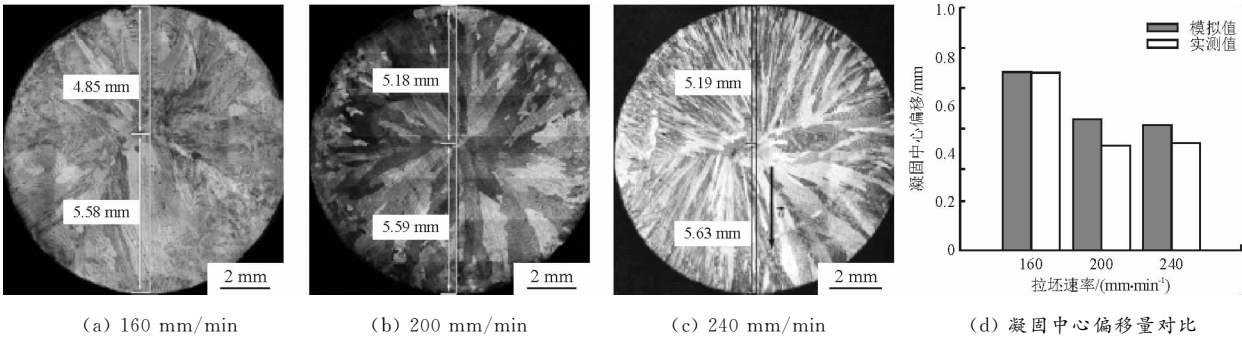


图 11 不同拉坯速度下的宏观金相图以及凝固中心偏移量的对比

Fig.11 Macro metallographs of casting billet at different drawing speeds and comparison of solidification center deviations

铸坯凝固中心的偏移。

凝固坯壳厚度的生长不均匀是导致凝固中心偏移的直接原因。连铸过程中金属熔体受到结晶器冷却作用开始结晶,形成一定厚度的坯壳后,出现凝固收缩的现象。同时在重力影响下,铸坯上部的气隙宽度要远大于下部区域,形成了“上大下小”的分布特点。这就使得铸坯下部区域紧贴结晶器内壁,径向传热速度大于上部区域^[16],上下部的初始凝固点出现不对称性,上部的初始凝固点要比下部迟缓 ΔL ;随着凝固的进行,最终铸锭的凝固中心向上偏移,与几何中心产生了 ΔR 的距离偏差,见图 12。

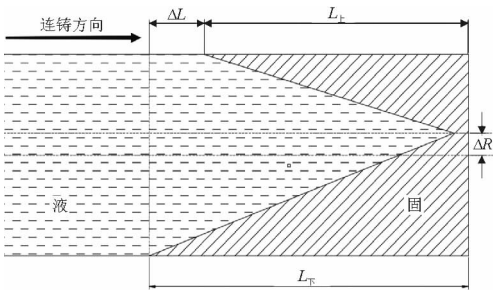


图 12 凝固中心偏移示意图

Fig.12 Schematic diagram of the solidification center deviation

在 3 组不同拉速下的铸坯横断面上,选取纵向均匀分布的 5 个位置进行显微硬度测试,加载载荷和加载时间分别为 4.9 N 和 15 s,结果见图 13。可以发现,铸坯的平均显微硬度(HV)随着拉坯速度的增大而增大,从 412.2 增加到了 432.7。这是因为提高拉坯速度使铸坯表面收缩较小,和结晶器内壁接触较好,减小了铸坯内部热应力,减少裂纹产生^[17]。

拉速为 160 mm/min 时,铸坯断面处不同位置的硬度均匀性较差,最大硬度(HV)差达到 50。这是因为

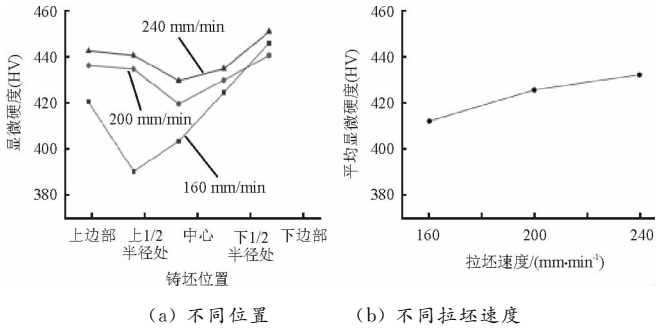


图 13 不同拉坯速度下的铸坯硬度

Fig.13 Microhardness of cast billets at different drawing speeds

拉坯速度较慢,上、下部冷却的不对称性加大,金属熔体由于重力汇聚在底部。随着后续液流的补充,液穴内上、下区域的熔体温度产生了较大的差异,下部区域温度比上部区域更低,增加了凝固中心附近的裂纹生成倾向,而凝固中心的上移也促使了裂纹偏向于上方形成;同时在凝固过程中,由于拉坯速度较慢,铸坯受到的冷却强度较大,凝固时间较短,液穴内来不及溢出的气体向上聚集,在铸坯上部区域形成气孔缺陷,见图 14。凝固中心的上移和气孔缺陷的形成,导致铸坯断面上下区域的硬度差值变大,力学性能的均匀性变差。

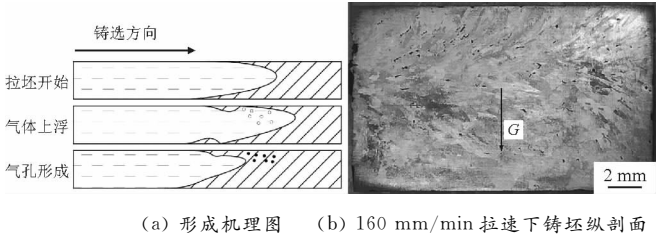


图 14 铸坯上部区域气孔缺陷形成机理图和 160 mm/min 拉速下铸坯纵剖面缺陷分布

Fig.14 Mechanism diagram of micropore formation in the upper area and defect distribution in the longitudinal section of casting billet at 160 mm/min

4 结 论

(1)模拟结果表明,当拉坯速度从 120 mm/min 增加到 240 mm/min 时,平均初始凝固界面前移 15.4 mm,凝固中心偏移从 1.03 mm 降低至 0.51 mm;在水流量从 12 L/min 增加到 22 L/min 时,平均初始凝固界面后退了近 6.52 mm,凝固中心偏移从 0.44 mm 增加到 1.07 mm。

(2)在 $\phi 11$ mm 的 Inconel 600 合金水平连铸过程中,拉坯速度和冷却水流量是初始凝固中心偏移的重要因素,影响初始凝固界面位置的主要因素是拉坯速度。

(3)在铸造温度为 1 450 $^{\circ}\text{C}$,冷却水流量为 16 L/min 的实验条件下,拉速在 160、200 和 240 mm/min 的铸坯,其凝固中心的偏移量分别为 0.73、0.43 和 0.44 mm。

(4)铸坯断面的平均显微硬度(HV)随着拉坯速度的增加而增加,从 412.2 增加到 432.7;断面的硬度均匀性随着拉速的提高得到改善。

(5)Inconel 600 高温合金($\phi 11$ mm)水平连铸适合的制备参数:铸造温度为 1 450 $^{\circ}\text{C}$ 、冷却水流量为 16 L/min,拉坯速度为 200 mm/min。

参 考 文 献

- [1] HERRERA L Y, RUIZ A, VH L M, et al. Microstructural characterization and mechanical response of Inconel 600 welded joint[J]. Materials Characterization, 2019, 157: 109 882.
- [2] KARTHIK D, SWAROOP S. Laser shock peening enhanced corrosion properties in a nickel based Inconel 600 superalloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 694: 1 309-1 319.
- [3] SAHU S, YADAV P C, SHEKHAR S. Use of hot rolling for generating low deviation twins and a disconnected random boundary network in Inconel 600 alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2018, A49(2): 628-643.
- [4] PARK D, WOO S, YOON D, et al. A study on fretting fatigue life for the Inconel alloy 600 at high temperature[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(10): 2 521-2 527.
- [5] EZUGWU E O, WANG Z M, MACHADO A R. The machinability of nickel-based alloys: A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 86(1-3): 1-16.
- [6] JIANG Y, MAO X, LEI Y, et al. Microstructure and mechanical property evolutions of CuNi10Fe1.8Mn1 alloy tube produced by HCCM horizontal continuous casting during drawing and its deformation mechanism[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 771: 905-913.
- [7] ZHOU B W, YIN S J, TANG R H, et al. Study on fabrication of

bulk metallic glassy composites by horizontal continuous casting method[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 660: 39-43.

- [8] 刘少寒, 韩毅华, 朱立光. 方坯软接触电磁连铸结晶器内钢水磁场分布数学模型[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(12): 1 260-1 269.
- [9] 潘德清, 李道喜, 牛冬鑫, 等. 气隙热阻对水平连铸 Cu-15Ni-8Sn 合金组织和成分分布影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(1): 69-74.
- [10] 张凯. 铜管水平连铸过程数值模拟及结晶器结构参数优化研究[D]. 河北秦皇岛:燕山大学, 2019.
- [11] 李日, 马军贤, 崔启玉. 铸造工艺仿真 ProCAST 从入门到精通[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010.
- [12] 中国金属学会高温材料分会. 中国高温合金手册(上卷), 变形高温合金 焊接用高温合金丝[M]. 北京:中国标准出版社, 2012.
- [13] 骆合力, 冯淦, 李尚平, 等. 高温合金线材真空水平连铸过程的数值模拟[J]. 连铸, 2015, 40(2): 29-37.
- [14] 周正华. K418 高温合金热型连铸过程数值模拟与试验研究[D]. 上海:上海大学, 2019.
- [15] 程向明, 冯淦, 骆合力, 等. 线材水平连铸引丝失败的原因分析[J]. 钢铁研究学报, 1997(5): 60-63.
- [16] 朱庆丰, 赵志浩, 王向杰, 等. 差相磁场对水平连铸 7075 铝合金锭坯组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(9): 791-793.
- [17] 张凤清, 张世平, 刘金学, 等. 水平连铸圆坯裂纹形成原因及防止措施[J]. 连铸, 2007(5): 18-20.

(编辑:刘晨辉)

可吸收镁合金支架和镁合金空心钉 投入临床使用

2022 年 9 月,由百多力公司生产的 Magmaris 西罗莫司洗脱可吸收冠脉镁合金支架正式落地博鳌乐城,该药械用于冠心病患者的相关治疗。

Magmaris 采用已获专利的镁合金材质制成,该镁合金可以在人体内完全降解为镁离子,并被周围的组织吸收或被排泄出体外。

2022 年 10 月 10 日,苏州卓恰医疗科技有限公司自主研发的镁合金空心钉在北京积水潭医院完成首例临床入组。

卓恰医疗镁合金空心钉是目前中国首例进入临床阶段的可降解镁合金空心钉产品,使用自主知识产权的 ZHUOMAG 医用镁合金制造。ZHUOMAG 医用镁合金攻克了镁合金材料降解速率偏高和力学性能不足的难题,为骨折、错位或其他病理性骨改变后进行的重建手术,提供了安全便捷、固定牢靠、相容性好、可完全降解的植入物方案。

(摘自中国有色网)