

超长耐热钢管离心铸造工艺模拟与优化

刘宇鹏¹ 李青春¹ 徐磊¹ 李响¹ 胡小强²

(1.辽宁工业大学材料科学与工程学院;2.中国科学院金属研究所)

摘要 采用 ProCAST 软件研究了浇注温度、浇注速度、铸型预热温度和铸型转速对离心铸造超长 2848W5 奥氏体耐热钢管的充型过程、温度场、应力场、缩松和宏观组织的影响,并进行了铸造工艺优化。模拟结果确定优化工艺参数:浇注温度为 1 580 ℃,浇注速度为 40 kg/s,铸型预热温度为 260 ℃,铸型转速为 2 000 r/min。采用优化工艺参数生产的铸管无明显缩松和裂纹,铸管外层组织为柱状晶,内层为等轴晶,铸管品质达到了 HG/T 2601-2011 技术要求。

关键词 离心铸造;奥氏体耐热钢;应力场;缩松

中图分类号 TG249.4;TP331 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.07.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Simulation and Optimization on Centrifugal Casting Technology of Ultra-long Heat-resistant Steel Pipe

Liu Yupeng¹, Li Qingchun¹, Xu Lei¹, Li Xiang¹, Hu Xiaoqiang²

(1.School of Materials Science and Engineering, Liaoning University of Technology;

2.Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences)

Abstract: The influence of pouring temperature, pouring speed, preheating temperature and rotation speed of casting mould on the filling process, temperature field, stress field, shrinkage porosities and macrostructure of ultra-long 2848W5 austenite heat-resistant steel pipe produced by centrifugal casting technology was simulated by the ProCAST software, and the process was optimized. The optimal process parameters were obtained as follows: pouring temperature of 1 580 ℃, pouring speed of 40 kg/s, preheating temperature of 260 ℃ and rotation speed of casting mould of 2 000 r/min. Pipes produced by the optimal process parameter is absence of shrinkage porosity and crack, where the outer layer is columnar crystal, and inner layer is equiaxed crystal. The quality of cast pipe reaches the technical requirements of HG/T 2601-2011 standard.

Key Words: Centrifugal Casting, Austenitic Heat-resistant Steel, Stress Field, Shrinkage Porosity

奥氏体耐热钢管是加热炉管、超(超)临界电站锅炉、连续退火炉底辊等加热设备的重要零部件,长期服役于高温高压环境下,其内在品质直接决定服役寿命^[1-2]。耐热钢管通常采用离心铸造生产,该方法具有生产铸件晶粒细小、组织致密和工艺成品率高等特点^[3]。奥氏体耐热钢属于高合金钢,在离心铸造过程中,钢水粘度大、流动行为复杂、充型难度高,铸管易产生薄厚不均匀、缩松、变形、裂纹等缺陷,造成铸管外层和内层断面柱状晶和等轴晶层不均匀。离心铸造超长耐热钢管主要依赖经验浇注,采用“试错法”对铸造工艺进行优化,成本昂贵,效率低。

随着计算机技术的发展,Flow-3D、PHYSICA 和

Fluent 等模拟软件被应用到大型铸管的卧式离心铸造过程中^[4-5]。近年来,ProCAST 软件在离心铸造钢铁铸件的数值模拟方面有着广泛的应用^[6-8]。邓传杰等^[6]模拟分析了 35 钢复合管的外层温度场。郝素斌^[7]模拟优化了复合轧辊的铸造工艺参数。梁应广等^[8]依据温度场和固/液相分布的模拟结果,优化设计了球墨铸铁气缸套卧式离心铸造的铸型结构。本研究以某离心铸造超长 2848W5 钢管现有的工艺参数为基础,采用 ProCAST 软件模拟 2848W5 奥氏体耐热钢管的卧式离心铸造过程,主要研究浇注温度、浇注速度、铸型转速和预热温度对充型过程、温度场、应力场、缩松和宏观组织的影响,并在最优工艺参数下生产奥氏体耐热钢管。

收稿日期:2022-08-04;修改稿收到日期:2022-10-12
第一作者简介:刘宇鹏,男,2000 年出生,硕士研究生,辽宁锦州(121001),E-mail:1263902895@qq.com
通信作者:李青春,女,1972 年出生,教授,辽宁锦州(121001),E-mail:lqcsusan@126.com
引用格式:刘宇鹏,李青春,徐磊,等. 超长耐热钢管离心铸造工艺模拟与优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(7): 955-958.
LIU Y P, LI Q C, XU L, et al. Simulation and optimization on centrifugal casting technology of ultra-long heat-resistant steel pipe[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(7): 955-958.

1 模拟方法

铸管材质为 2848W5 奥氏体耐热钢,其成分(质量分数)为:0.4%~0.6%的 C,26%~30%的 Cr,46%~50%的 Ni,4%~6%的 W,余量为 Fe。耐热钢铸管长为 5 800 mm,外径为 230 mm,内径为 197 mm,厚度为 16.5 mm。采用分段法模拟卧式离心铸造充型过程(见图 1),将钢水流动分为重力流动和离心充型两个阶段,即钢水在横浇道内流动时,只受重力的影响。为了保证模拟计算的连续性,将重力流动阶段的模拟结果设置为离心充型阶段的初始边界条件。铸件的离心流动模型主要分为最外层的铸型、中间的铸件以及最内层的空气。假设钢水为不可压缩牛顿液体,满足动量守恒方程、质量守恒方程和能量守恒方程,同时要在非真空离心铸造中保证热传导传热、辐射传热和对流传热 3 种热量传递方式的存在。

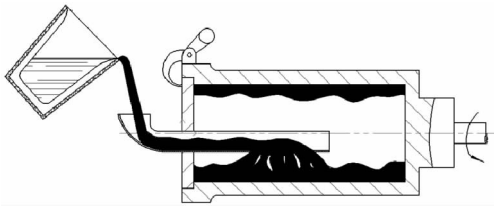


图 1 卧式离心铸造示意图

Fig.1 Schematic diagram of horizontal centrifugal casting

图 2 为铸件的网格模型,网格尺寸为 20 mm,共计生成 88 136 个面网格,660 567 个体网格。在铸件内表面设置圆形浇口,浇口高度为 400 mm。由于涂料对铸件和铸型之间的传热系数影响较大,在对比分析工厂实测结果与数值模拟结果的基础上,确定铸型+涂料与钢



图 2 铸件网格模型

Fig.2 Grid model of the castings

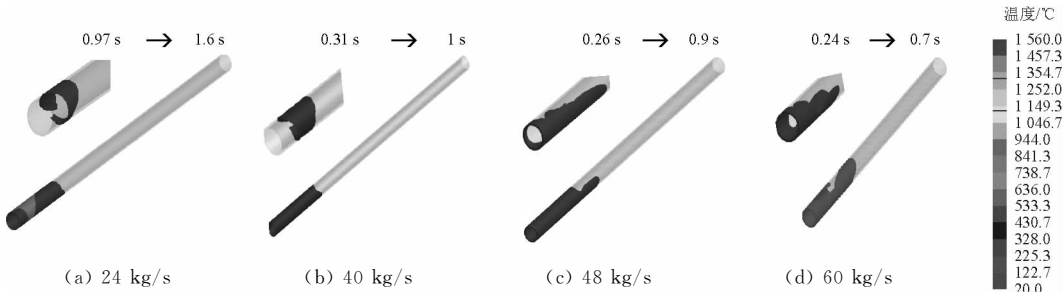


图 3 不同浇注速度下充型模拟结果

Fig.3 Filling simulation results under different pouring speeds

水的传热系数为 1 000 W/(m²·K)。

目前某厂采用卧式离心铸造生产 2848W5 钢管,铸型预热温度为 200 ℃,浇注温度为 1 550 ℃,钢水的浇注速度为 60 kg/s,铸型转速为 1 100 r/min,铸型材料采用 35CrMn 锻造钢,其外径为 480 mm,内径为 230 mm,长为 5 900 mm。该工艺参数生产的钢管出现充型难(有效充型长度只有 4 800 mm)、铸管薄厚不均匀、断面组织不均匀等品质问题。当铸型温度为 200 ℃、浇注温度为 1 550 ℃时,在浇注完成之前,就有部分钢水已经凝固。当浇注速度为 60 kg/s 时,在浇口处出现了钢水堆积现象。为了提高铸管品质,提高铸型预热温度(分别为 200、230、260 和 290 ℃)和钢水浇注温度(分别为 1 550、1 580 和 1 600 ℃),降低浇注速度(分别为 60、48、40 和 24 kg/s),调整铸型转速(分别为 800、1 100 和 2 000 r/min),分析不同工艺参数下超长耐热钢管离心铸造的充型过程、温度场、应力场、缩孔缩松和断面组织的模拟结果,以获得优化工艺参数,并分析优化工艺参数下实际生产铸管的组织与性能。

2 模拟结果与分析

2.1 充型流场的模拟结果

影响离心铸造充型过程的主要因素为浇注速度与铸型转速。不同浇注速度下的充型模拟结果见图 3,铸型温度为 260 ℃,浇注温度为 1 550 ℃,铸型转速为 1 600 r/min。当浇注速度为 24、40、48 和 60 kg/s 时,钢水充满铸型的时间分别为 20、12、10 和 8 s,即随着浇注速度增加,充型时间明显缩短。当浇注速度为 60 kg/s 和 48 kg/s 时,浇注速度远大于钢水充型速度,金属液无法及时跟随铸型一起旋转,在浇口端形成堆积,钢水未形成稳定的螺旋运动充型。当浇注速度为 24 kg/s 和 40 kg/s 时,充型过程未发生钢水堆积、断流、液面破碎和飞溅等现象,液体以稳定螺旋方式充型,整体充型过程平稳连续,充型较好。

图 4 为不同铸型转速下的离心铸造充型模拟结果,浇注速度为 40 kg/s,浇注温度为 1 550 ℃,预热温度为 260 ℃。当铸型转速为 800 r/min 时,由于转速过低,

离心力不足,浇注后金属液紧贴铸型内壁,无法迅速形成螺旋运动。铸型转速为 1 100 r/min 时,在浇注初期金属液进入铸型后迅速完成螺旋运动,但充型到第 9 s 时,金属液自由流动,无法持续稳定以螺旋方式充型。当铸型转速提高到 2 000 r/min 时,钢水能够紧贴型壁以稳定螺旋方式充型,充型过程平稳连续,充型品质好。

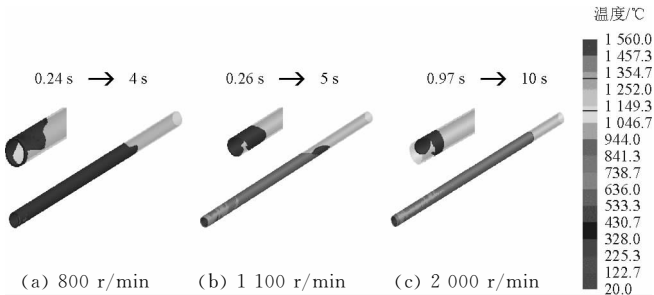


图 4 不同铸型转速下充型模拟结果

Fig.4 Filling simulation results at different rotation speeds

2.2 温度场、应力场与缩松缺陷的模拟结果

表 1 为不同离心铸造工艺下,铸管温度场、应力场与缩松缺陷的模拟结果。铸型预热温度为 260 ℃,浇注温度为 1 550 ℃,浇注速度为 40 kg/s,铸型转速为 1 600 r/min。以基本工艺为基准,改变其中任一变量作为其中模拟中的工艺参数。可以看出,随着铸型预热温度的提高,缩松总体积逐渐减小,铸管轴向和径向温差减小,轴向和径向最大应力降低。当铸型预热温度为 200 ℃时,钢液受激冷,凝固速度块,补缩通道开放时间较短,铸管的四周均存在缩松,当铸型预热温度提高到 290 ℃时,补缩通道开放的时间增加,缩松的体积减少。当铸型预热温度为 200 ℃和 230 ℃时,凝固过程中产生的最大应力值较大,均高于该钢高温下的抗拉强度

表 1 不同离心铸造工艺下温度场、应力场与缩松缺陷模拟结果
Tab.1 Simulation results of temperature field, stress field and shrinkage defects under different centrifugal casting processes

参数	温度差/℃		缩松总 体积/cm ³	最大应力/MPa	
	径向	轴向		轴向	径向
铸型预热 温度/℃	200	101	110	73	1 131
	230	76	80	53	811
	260	70	63	40	228
	290	51	54	15	218
浇注温度/ ℃	1 550	70	63	40	228
	1 560	71	96	35	220
	1 580	75	79	39	211
	1 600	83	63	48	195
浇注速度/ (kg·s ⁻¹)	24	68	100	48	258
	40	70	63	40	228
	48	71	80	43	245
	60	78	40	41	226
铸型转速/ (r·min ⁻¹)	800	74	44	55	258
	1 100	79	40	48	246
	1 600	70	63	40	228
	2 000	84	33	25	211

(1 119 ℃时,σ_b=265 MPa),有产生热裂倾向。提高铸型预热温度为 260 ℃和 290 ℃时,减少铸型对金属液的激冷作用,铸件的冷却速度趋于一致,最大应力值减小,产生裂纹的可能性减小^[9]。

增大浇注温度,缩松的体积增加,铸管轴向温度差降低,轴向和径向最大应力值减小,且最大应力值均低于该钢高温下的抗拉强度。随着浇注温度提高,一方面钢水的流动能力增加,补缩能力得到提升,另一方面过高的浇注温度使凝固过程中的液态收缩量增大,当增加的补缩能力不足以抵消收缩的增加量时,导致缩松体积增大。随着浇注温度提高,缩松的体积逐渐增大,当浇注温度超过 1 580 ℃时,缩松体积明显增加。另外,提高浇注温度,铸型温度也得到提高,导致铸件冷却速度和温度梯度降低,因此铸管内最大应力值逐渐减小。

随着浇注速度增加,缩松体积逐渐减小,铸管整体温度差减小,各部位凝固时间趋于一致,最大应力逐渐减小,且最大应力值均低于该钢高温下的最大抗拉强度。当浇注速度较慢(24 kg/s)时,在充型过程中铸管内外的温差大,凝固产生的应力也大,并且浇注速度过慢会导致在浇注过程中,紧贴内壁的钢水温度下降快,由于与后浇注的钢水产生过大的温度差而导致冷隔产生。随着浇注速度增加,铸件各部位温度分布变均匀,铸件能够均匀变形,不会造成应力集中,最大应力值不断减小,产生裂纹的可能性减小。

随着铸型转速增加,离心力增大,重力对钢水的影响会逐渐消失,补缩能力增强,缩松体积减小。另外,提高转速使得对流传热的速度加快,单位时间内铸型和铸管向空气中散发的热量提高,铸管的温度降低越快,铸管轴向温度差降低,铸管轴向和径向的最大应力也相应降低。

对于薄壁超长管件,应保证铸管各部分之间没有温差或温差尽量小,可以有效解决薄壁管件中缩松问题。在浇注过程中,过低的预热温度、浇注温度以及浇注速度会使先浇注的钢水沿着铸型内壁快速降温,与后面的钢水产生较大的温差,所以要合理控制这 3 项参数,减小在充型过程产生的温差。

根据上述模拟结果,综合考虑充型过程、缩松体积和应力大小,根据 HG/T 2601-2011,对高温承压用离心铸造合金炉管件,综合铸管轴向和径向温度分布均匀性和缩松体积大小、铸管轴向和径向应力大小和应力分布均匀性,确定超长耐热钢管离心铸造优化工艺参数:铸型预热温度为 260 ℃,浇注温度为 1 580 ℃,浇注速度为 40 kg/s,铸型转速为 2 000 r/min。

2.3 优化工艺参数下铸管的组织与性能

图 5 为优化离心铸造工艺参数下获得的钢管应力

场、缩松和凝固组织模拟结果。可以看出,铸管最外层为激冷细晶区,中间层为柱状晶区,最内层为等轴晶区,柱状晶与等轴晶区的面积占比为 1 : 1,计算平均晶粒尺寸为 70 μm 左右。另外,铸管组织致密,缩松的总体积仅为 0.96 cm^3 。

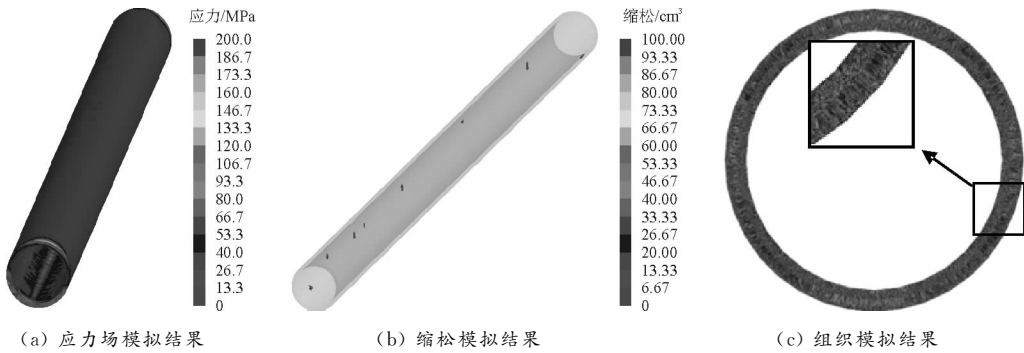


图 5 最佳工艺参数下耐热钢管的模拟结果

Fig.5 Simulation results of heat-resistant pipe under optimal process parameters

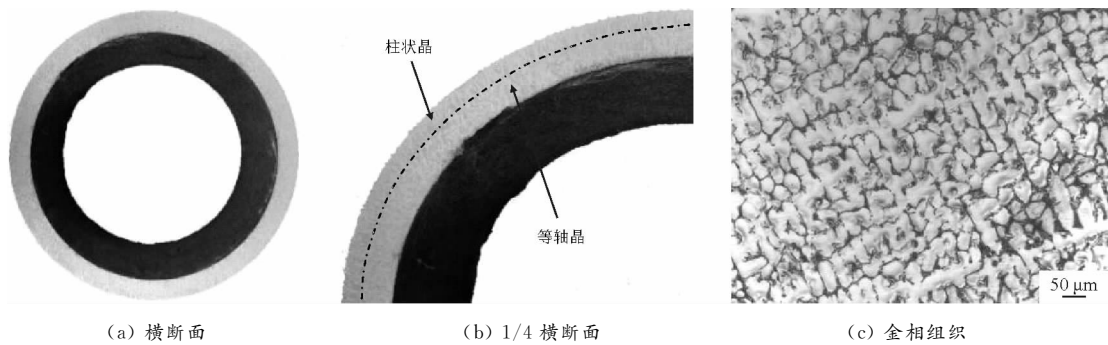


图 6 最佳工艺参数下耐热钢管的试验结果

Fig.6 Experimental results of heat-resistant pipe under optimal process parameters

间的碳化物组成。

测试耐热钢管的力学性能见表 2。可见,当试验条件为 17 MPa 和 1 050 $^{\circ}\text{C}$ 时,耐热钢管的持久断裂时间为 129.62 h。超声探伤发现,铸管内部无缩孔、缩松和裂纹缺陷,铸管组织和力学性能达到了 HG/T 2601-2011 要求。

表 2 卧式离心耐热钢铸管的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of horizontal centrifugal heat-resistant steel cast pipe

温度/ $^{\circ}\text{C}$	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ $\%$	断面收缩 率/ $\%$	蠕变 时间/h
室温	302	609	14.0	16.0	—
1 050	77	83	29.5	39.0	129.62

3 结 论

(1)根据充型流场、温度场、应力场和铸造缺陷模拟结果,确定厚度为 16.5 mm 的 $\phi 230\text{ mm}\times 5\,800\text{ mm}$ 耐热钢铸管卧式离心铸造的优化工艺参数:铸型预热温度为 260 $^{\circ}\text{C}$,浇注温度为 1 580 $^{\circ}\text{C}$,浇注速度为 40 kg/s ,铸型转速为 2 000 r/min 。

(2)采用优化工艺生产的铸管组织致密,无明显缩

图 6 为采用优化工艺参数浇注的离心铸造超长耐热钢铸管的横断面宏观形貌和显微组织。可以看出,由于钢管外层受到铸型内壁的急冷作用,宏观组织外层为柱状晶,内层为等轴晶,二者比例约为 1 : 1,晶粒分布比较均匀。耐热钢管的显微组织由奥氏体基体和枝晶

松,铸管内不存在裂纹,品质满足 HG/T 2601-2011 要求。

参 考 文 献

[1] 赖仙红,杨红英. Sanicro25 奥氏体耐热钢管性能简述[J]. 东方锅炉, 2012, 24(4): 28-33.

[2] 赵永宁,岳增武. TP304H 奥氏体耐热钢锅炉管的组织性能研究[J]. 热力发电, 2009, 38(3): 56-60.

[3] 宋广. 离心铸造装置设计及充型凝固过程实验研究与数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.

[4] DONG Q, YIN Z, LI H, et al. Simulation study on filling and solidification of horizontal centrifugal casting babbitt lining of bimetallic bearing[J]. International Journal of Metal Casting, 2021, 15 (1): 119-129.

[5] 韩少丽,骆合力,李尚平,等. K4169 合金离心铸管工艺模拟及试制研究[J]. 铸造, 2021, 70(3): 373-377.

[6] 邓传杰,汪选国,杜学铭. 离心铸造复合管外层充型与凝固数值模拟[J]. 铸造技术, 2016, 37(6): 1 197-1 201.

[7] 郝素斌. 离心铸造复合轧辊的凝固过程模拟[D]. 石家庄:河北科技大学, 2012.

[8] 梁应广,杨国敏,董梦瑶. 湿式气缸套卧式离心铸造工艺仿真[J]. 铸造技术, 2016, 37(5): 1 062-1 065.

[9] 田学雷,刘志勇,李光友,等. 金属液压力对缩松预测的影响[J]. 中国铸造装备与技术, 2001, 38(4): 9-11.

(编辑:刘晨辉)