

基于数值模拟的铸钢冷却壁防熔穿工艺研究

陈佳伟, 龚小龙, 樊自田, 蒋文明

(华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 基于铸造模拟仿真软件, 对比研究了铸钢冷却壁成型凝固过程中有无防熔穿工艺的冷却水管温度场变化, 并通过实际浇注验证了冷却水管填充固体冷却材料防熔穿的可行性。结果表明: 冷却水管填充固体冷却材料, 可使冷却水管的最高受热温度由1 504.1 ℃降低至1 492.4 ℃, 低于冷却水管液相线温度, 确保冷却水管不会发生熔穿。实际浇注完成后对冷却壁剖开检测, 发现冷却水管内部无熔穿, 冷却水管与冷却壁基体的界面结合处除少量的杂质外, 已形成较好的冶金熔合。

关键词: 铸钢冷却壁; 冷却水管; 铸造仿真; 防熔穿; 界面结合

目前, 冶金行业提高高炉寿命的通用方法是在高炉炉膛内安装冷却壁^[1-4]。铸钢冷却壁相对于铸铁冷却壁导热性能好, 相对于铜冷却壁成本较低, 并且具有伸长长率高、抗拉强度高、熔点高、抗热冲击性好等优点^[5]。铸钢冷却壁的生产采用埋管浇注工艺^[6-7], 即浇注之前在砂型中埋入冷却水管, 利用浇注过程中高温金属液产生的热量使冷却壁基体与冷却水管熔合在一起。但在浇注过程中由于金属液温度很高(1 530~1 580 ℃), 冷却水管很容易发生变形和熔穿。为了解决冷却水管熔穿的问题, 学者们展开了大量研究, 李平^[8]研究了金属液的浇注温度以及浇注速度对冷却水管熔穿的影响。李世珺^[9]改进了冷却壁的结构设计, 减薄了铸造时冷却水管四周包覆金属液的厚度, 研究了在冷却水管外表面设置内冷铁以及采用合适的浇冒系统防熔穿。从目前的研究成果看, 上述文献都是改进冷却壁铸造工艺参数的防熔穿研究, 并未有将冷却水管填充固体冷却材料防熔穿的铸造仿真^[10-12]与实际浇注试验结合的相关研究。

本研究通过数值模拟软件对铸钢冷却壁的铸造工艺进行模拟分析, 对比研究了冷却水管有无防熔穿工艺下的温度场变化。通过实际浇注验证冷却水管填充固体冷却材料防熔穿的可行性, 并分析了冷却水管与冷却壁基体的界面结合情况。

1 模拟前处理

1.1 冷却壁及冷却水管的结构分析

冷却壁基体的外形尺寸为2 100 mm × 745 mm × 577 mm, 基体上有三个高148 mm的螺栓孔凸台, 两个高200 mm的水管凸台, 一个高345 mm的定位销, 零件的平均壁厚为288 mm, 最小壁厚190 mm, 最大壁厚430 mm, 壁厚变化均匀。冷却水管外径60 mm, 壁厚5 mm, 长度5 105 mm。冷却壁及冷却水管尺寸如图1所示。冷却壁的材质为ZG35CrMnSi, 冷却水管的材质为20G, 二者的化学成分如表1所示。

1.2 浇注系统设计

通过分析冷却壁的结构和铸钢的凝固特性, 将采用半开放式底注浇注系统成形铸钢冷却壁, 浇注系统设计如图2所示。底注式浇注系统将内浇道设置在铸件的底部, 内浇道尺寸为6个 $\Phi 40$ mm的圆柱形管道, 浇注系统各部分截面积的比例为 $S_{横} : S_{内} : S_{直} = 2 : 1.5 : 1$ 。冒口设置在冷却壁的上表面。

作者简介:

陈佳伟(1996-), 男, 硕士生, 主要研究方向为造型材料与铸造工艺。E-mail: chenjiawei96_27@163.com

中图分类号: TG260

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)

07-0716-06

收稿日期:

2020-01-11 收到初稿,

2020-04-09 收到修订稿。

1.3 试验设计

1.3.1 铸造模拟

通过铸造数值模拟软件ProCAST对铸钢冷却壁的充型凝固过程进行分析,对比研究了冷却水管有无防熔穿工艺的温度场变化。冷却水管有无防熔穿工艺是指在其内部是否填充固体冷却材料,固体冷却材料采用树脂砂,其原砂以宝珠砂和刚玉砂按一定比例复合而成。由于冷却水管靠近内浇道一侧要承受高温金属液的冲刷,导致受热较另一侧更为严重,故冷却水管是否会发生熔穿取决于靠近内浇道一侧的管道是否发生熔穿。为具体研究充型凝固过程中冷却水管可能发生熔穿的部位,取冷却水管靠近内浇道一侧A、B、C、D、E、F六个特殊位置截面,分析该截面上温度场的变化情况。选取截面位置如图3所示。

模拟计算之前设置边界条件及初始条件如下:

(1) 边界条件设置:采用砂型铸造工艺,冷却壁与铸型之间的换热系数为 $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,冷却壁与冷却水管之间的换热系数为 $1\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,冷却水管与固体冷却材料之间的换热系数为 $800 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

(2) 初始条件设置:浇注温度为 $1\,550 \text{ }^\circ\text{C}$,冷却水管以及铸型的初始温度均为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$;浇注方式为重力浇注,重力加速度为 9.8 m/s^2 ;浇注速度为 30 kg/s ,表面散热条件为空冷。

1.3.2 实际浇注

浇注之前,冷却水管内紧实填充固体冷却材料。浇注完成后,去除固体冷却材料,在冷却水管与冷却壁基体熔合界面切取试样,采用LECIA/DMI5000型金相显微镜观察熔合交界区域的金相组织,采用Quanta 400扫描电子显微镜观察界面区域的显微组织特点,同时使用能谱仪(EDS)对熔合界面进行线扫描分析。

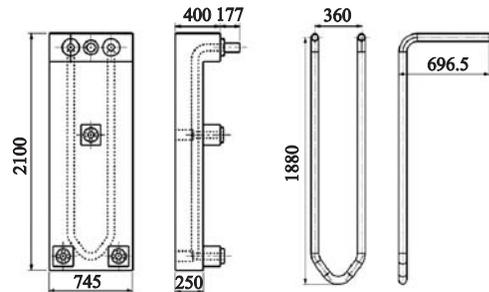
2 无防熔穿工艺铸造模拟结果分析

通过铸造仿真软件对铸钢冷却壁充型凝固过程进行模拟计算。图4为金属液充型过程中不同时刻(13.4 s、63.6 s、97.7 s)冷却壁和冷却水管温度场分布图。图5为冷却壁凝固过程中不同时刻(1 531.2 s、4 256.4 s、9 766.4 s)冷却壁和冷却水管的温度场分布图。

从图4a可以看出,在充型时间为13.4 s,金属液逐渐充盈铸件底部。在充型时间为63.6 s,金属液接触并逐渐包覆冷却水管。在充型时间为97.7 s时,金属液充满型腔后平稳进入冒口,充型过程结束。从图4b可以得到,金属液未接触冷却水管之前,其温度未发生明显变化。充型时间为63.6 s,金属液与冷却水管接触,致使其下表面温度迅速上升至 $620 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上。随着金属液

的持续充型,冷却水管的温度持续上升,充型过程结束时冷却水管的受热温度小于 $1\,100 \text{ }^\circ\text{C}$,远低于冷却水管的固相线温度,因此冷却水管在充型过程中无熔穿风险。

从图5a可以看出,铸件由表及里逐渐凝固,冒口本身最后凝固,从而能对铸件形成有效补缩,整个凝



(a) 冷却壁 (b) 冷却水管

图1 冷却壁及冷却水管尺寸图

Fig. 1 Dimensions of cooling wall and cooling water pipe

表1 铸钢冷却壁及冷却水管的化学成分
Table 1 Chemical composition of cast steel cooling wall and cooling water pipe $w_B/\%$

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr
冷却壁	0.3~0.4	0.5~0.75	0.9~1.2	≤ 0.035	≤ 0.035	0.5~0.8
冷却水管	≤ 0.24	0.17~0.37	0.35~0.65	≤ 0.035	≤ 0.035	≤ 0.25

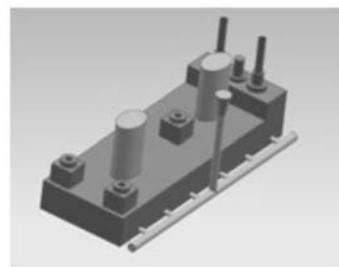


图2 铸钢冷却壁浇注系统设计图

Fig. 2 Design drawing of pouring system of casting steel cooling wall

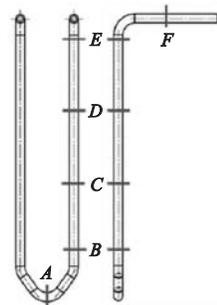


图3 冷却水管截面位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram showing sectional position of cooling water pipe

固过程基本符合顺序凝固的原则。从图5b可以看出,凝固过程中冷却水管的温度不断上升,在凝固时间为1 531.2 s左右,冷却水管弯头部位的受热最高温度在1 502~1 510 °C之间,已超过或接近其液相线温度(1 503.6 °C),极易发生熔穿。

经ProCAST处理得到的冷却水管六个截面(图2)的平均温度变化曲线如图6所示。从图中可以看出,冷却水管的A、F截面处受热温度相对较低,远低于其液相线温度,因此在冷却壁凝固过程中不会发生熔穿。B、C、D截面处冷却水管的最高受热温度在1 500 °C以下,且该截面处冷却水管温度下降较快,因此在冷却壁凝固过程中发生熔穿的几率较小。E截面左右的区域由于处于冷却壁的最大壁厚位置,导致该部位的金属液凝固过程中释放的热量较多,其最高受热温度为1 504.1 °C,且该位置温度高于1 500 °C的时间较长,因此E截面左右的区域凝固过程中会发生熔穿。

3 防熔穿工艺铸造模拟结果分析

通过对铸钢冷却壁无防熔穿工艺模拟,可知冷却

水管会发生局部熔穿,故需要采取相应的防熔穿措施才能保证其不被高温金属液熔穿。冷却水管内部填充固体冷却材料防熔穿是一种简易且可靠的方法,其防熔穿原理如下:金属液充型凝固过程中,冷却水管吸热升温,将热量传递给固体冷却材料,固体冷却材料对周围金属液产生一定的激冷作用,从而降低冷却水管的温度,保证其不被熔穿。树脂砂作为固体冷却材料填充于冷却水管,其优势在于:树脂砂能够与冷却水管内壁紧密贴合,且原砂宝珠砂与刚玉砂均具有较强的蓄热能力,可以有效吸收来自冷却水管的热量,降低冷却水管的受热温度;树脂砂在冷却水管内部具有一定的强度,可以有效避免冷却水管在冷却壁充型凝固过程中发生变形。经ProCAST处理得到的冷却水管各截面温度变化曲线如图7所示。

对比图6可以看出,凝固过程中冷却水管在各截面最高受热温度均低于原工艺。从图7中可以得到,在整个凝固过程中,冷却水管受热最严重的部位为E截面左右的区域,其最高受热温度为1 492.4 °C,但低于冷却水管的液相线温度,因此该部位在凝固过程中不发生

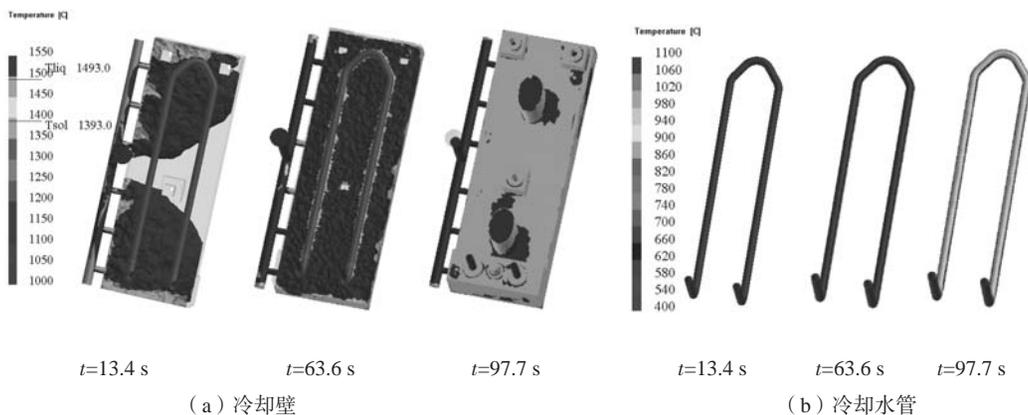


图4 充型过程中冷却壁及冷却水管温度场分布图

Fig. 4 Temperature field distribution of cooling wall and cooling water pipe during mold filling

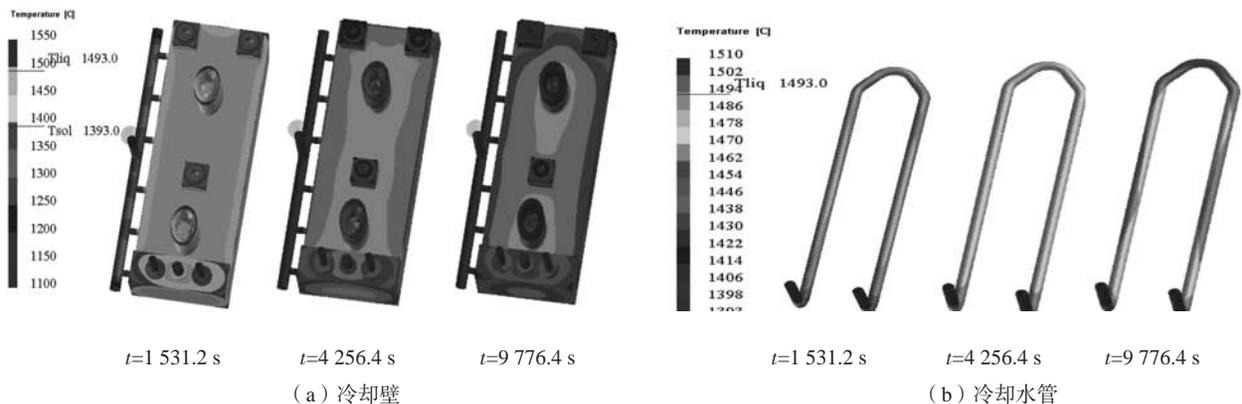


图5 凝固过程中冷却壁及冷却水管温度场分布图

Fig. 5 Temperature field distribution of cooling wall and cooling water pipe in the process of solidification

熔穿。冷却水管F截面的最高受热温度为1 476.2 ℃，高于冷却水管的固相线温度，说明该部位可以实现与冷却壁基体的冶金结合。

4 实际浇注验证及分析

浇注之前，冷却水管内填充并紧实固体冷却材料。浇注完成后，去除固体冷却材料，待冷却壁冷却至室温沿冷却水管轴向对称切开后结果如图8所示。从图中可见，实际生产的铸钢冷却壁基体和冷却水管结

合较好，未看到明显的宏观间隙，冷却水管无变形、无熔穿，熔合交界处无明显组织差异，表明冷却壁基体与冷却水管已经扩散熔合在一起。

熔合交界区域的金相组织如图9所示，熔合交界区域的微观形貌与能谱分析结果如图10和图11所示。

从图9中可以看出，冷却壁基体与冷却水管的组织均为珠光体+铁素体组织，其中白亮的为铁素体组织，颜色较暗的为珠光体组织。冷却壁基体与冷却水管由于碳含量存在差异，冷却水管碳含量（0.2%）低于冷

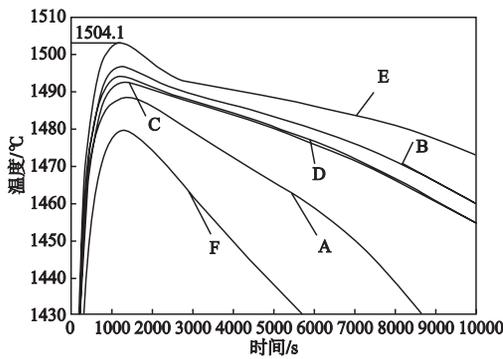


图6 冷却水管不同截面位置温度变化曲线
Fig. 6 Temperature variation curve of cooling water pipe at different sectional positions

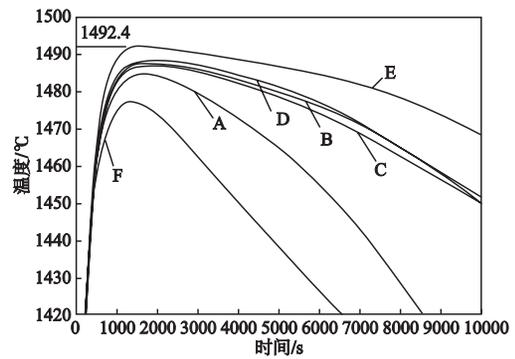
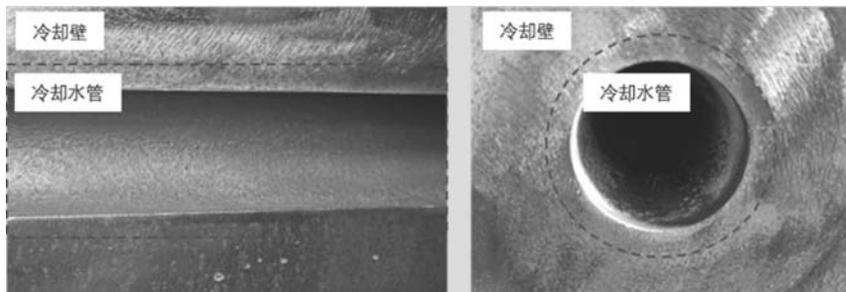


图7 防熔穿处理后冷却水管不同截面位置温度变化曲线
Fig. 7 Temperature variation curves of cooling water pipe at different sectional positions after anti-penetration treatment



(a) 轴向剖切图 (b) 径向剖切图

图8 铸钢冷却壁与冷却水管的宏观结合
Fig. 8 Macroscopic bonding between cooling water pipe and cast steel cooling wall

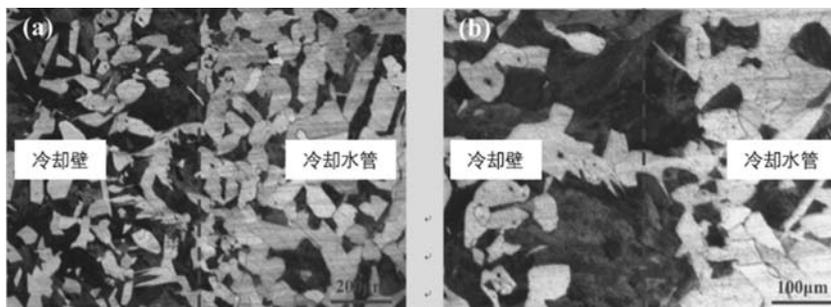


图9 熔合界面金相组织
Fig. 9 Microstructure of fusion interface

却壁基体的碳含量(0.4%),导致冷却水管的金相组织中白亮的铁素体组织所占比例较高。熔合界面的组织为珠光体+铁素体组织,与冷却壁基体、冷却水管的金相组织相同,只是形状上有所差异,证明冷却壁基体与冷却水管发生了冶金反应。界面区域的铁素体组织呈现不规则的锯齿状,并与晶界呈一定方位排列。这种组织的出现,是由于高温金属液接触到冷却水管的外壁时,冷却水管温度较低,对金属液产生较大的激冷作用,致使金属液的冷却速度较快,使先共析铁素体从奥氏体晶界上沿一定晶向呈针状析出。

从图10中可以看出,冷却水管与冷却壁基体的界面除少量的杂质外,未见明显的间隙,二者之间熔合较好。由于冷却壁基体与冷却水管成分相近,在此只分析二者合金元素中相差较大的Si、Cr、Mn三种元素的扩散情况,以此来反映二者的熔合情况。从图11中可以看出,由于Si、Cr、Mn的含量在冷却壁基体中的含量高于冷却水管中的含量,因此在界面处的扩散层发现三种元素的含量均呈下降的趋势,即冷却壁基体的Si、Cr、Mn三种原子扩散至冷却水管外表面并与Fe原子发生固溶。

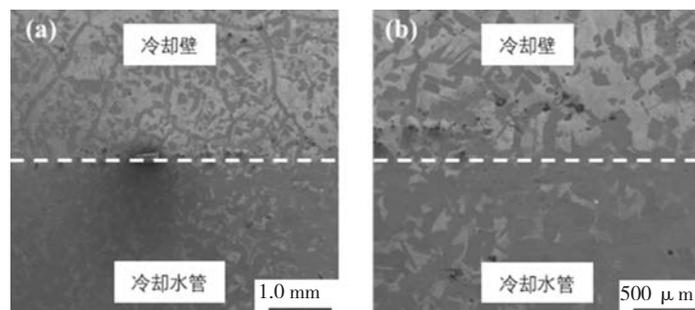


图10 熔合界面显微形貌

Fig. 10 Morphology of fusion interface

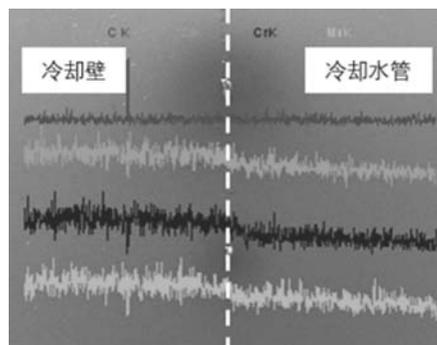


图11 熔合界面元素扩散情况

Fig. 11 Diffusion of fusion interface elements

5 结论

(1) 当冷却水管未采取防熔穿措施时,铸钢冷却壁铸造模拟结果显示,在冷却壁充型过程结束时冷却水管的受热温度小于1 100 °C,远低于冷却水管的固相线温度,因此冷却水管在充型过程中无熔穿风险。凝固过程中冷却水管弯头部位的最高受热温度在1 502~1 510 °C之间,超过或接近其液相线温度(1 503.6 °C),极易发生熔穿。

(2) 铸钢冷却壁防熔穿工艺铸造模拟结果显示,冷却水管内紧实填充固体冷却材料防熔穿,利用固体冷却材料产生的激冷作用,可使冷却水管的最高受热温度降为1 492.4 °C,处于其固相线与液相线温度之间,既能避免冷却水管的熔穿,也能够使冷却水管与冷却壁基体之间实现冶金结合。

(3) 实际生产的铸钢冷却壁基体和冷却壁水管之间结合较好,宏观观察未看到明显的间隙,冷却水管无变形、无熔穿;微观分析熔合界面处除少量的杂质外,未见明显的间隙,界面处金相组织为冷却壁与冷却水管冶金结合形成的组织。

参考文献:

- [1] CHENG S S, YANG T J, XUE Q G, et al. Optimum design and layout of the cooling apparatus for long compaignship blast furnace [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2003. 10 (4): 24-28.
- [2] WU T, CHENG S S. Model of forming-accretion on blast furnace copper stave and industrial application [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2012, 19 (7): 1-5.
- [3] WU L, XU X, ZHOU W, et al. Heat transfer analysis of blast furnace stave [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51: 2824-2833.
- [4] GUANG S G, ZHANG J L, JIAO K X, et al. Study of the effect of the ratio of cooling surface area on the heat transfer of the cast iron cooling stave in blast furnace hearth [J]. Foundry, 2016, 65 (6): 542-548.
- [5] 张士敏, 王东升. 钢冷却壁的研制及应用 [J]. 炼铁, 2002 (3): 8-12.
- [6] 高增丽, 宫本奎, 牛建平, 等. 埋管铸造中流动液态介质物性对埋管外壁温度的影响 [J]. 铸造, 2019, 67 (11): 974-978.
- [7] 赖鹏飞, 钟敏, 吴渊, 等. 预埋Monel管铸造铜水套的界面特征研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (1): 37-41.
- [8] 李平. 铸钢冷却壁的铸造工艺 [J]. 铸造, 2011, 60 (4): 404-406.
- [9] 李世珺. 内铸钢管式水冷炉喉钢砖的开发研制 [J]. 河南冶金, 2007, 15 (3): 15-16.
- [10] 朱洪斌, 张贺, 王丽萍, 等. 超薄细长低涡工作叶片的精铸工艺方案改进研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (8): 885-888.
- [11] 廖敦明, 曹流, 孙飞, 等. 铸造宏观过程数值模拟技术的研究现状与展望 [J]. 金属学报, 2018, 54 (2): 161-173.
- [12] XIONG J J, MENG F L, LIANG Q J, et al. Casting process design and simulation of large cast steel bracket [J]. Key Engineering Materials, 2019, 815: 125-130.

Study on Anti-Penetration Process of Cast Steel Cooling Wall Based on Numerical Simulation

CHEN Jia-wei, GONG Xiao-long, FAN Zi-tian, JIANG Wen-ming

(State Key Laboratory of Material Processing and Die and Mold Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract:

Based on the casting simulation software, the temperature field changes of cooling water pipes with and without anti-penetration process during the mold filling solidification of cast steel cooling wall were compared, and the feasibility of anti-penetration of cooling water pipe filled with solid cooling material was verified by actual pouring. The results show that the maximum heating temperature of the cooling water pipe can be reduced from 1 504.1 °C to 1 492.4 °C, which is lower than the liquidus temperature of the cooling water pipe. After actual pouring was completed, the cooling wall was cut open and tested. It is found that there is no molten penetration inside the cooling water pipe, and the interface between the cooling water pipe and the cooling wall substrate has formed a good metallurgical fusion except for a small amount of impurities.

Key words:

cast steel cooling wall; cooling water pipe; casting simulation; anti-penetration; interface combination