

# 埋管铸造中预埋铜管几何特性对铸造熔合情况的影响

高增丽<sup>1</sup>, 宫本奎<sup>1</sup>, 牛建平<sup>2</sup>, 唐 彪<sup>3</sup>, 闫丽峰<sup>2</sup>, 闫小影<sup>2</sup>

(1. 山东理工大学材料科学与工程学院, 山东淄博 255000; 2. 河北万丰冶金备件有限公司, 河北张家口 076250;

3. 山东德瑞防腐材料有限公司, 山东沂源 256100)

**摘要:** 通过建立铸造充型-凝固过程的数学模型, 在实验验证模型有效的基础上, 数值研究了具体浇注工况下埋管几何特性(壁厚)对铸造熔合情况的影响。计算结果表明: 随着埋管壁厚的增大, 埋管外壁所能达到的峰值温度逐渐降低, 且峰值温度对应的时间点后延, 主要是由于埋管壁厚的增大导致浇注过程中冷源的质量增大以及冷热物体实现热交换的时间延长; 此外, 埋管铸造要想实现理想的熔合必须保证内壁的温度不能达到铜的熔点, 以避免产生管壁熔穿, 进而避免实际浇注事故发生, 因此具体工况下要想达到外壁熔合、内壁不熔塌的理想铸造, 埋管壁厚存在理想值。

**关键词:** 预埋铜管; 几何特性; 埋管铸造

在高温热工窑炉中, 为了保护炉衬, 延长窑炉的寿命, 通常在炉衬的内部埋置冷却设备<sup>[1-3]</sup>, 这种冷却设备在有色冶金窑炉上称为冷却水套, 在炼铁高炉上称为冷却壁, 也常用在结晶器中, 冷却设备通常是在金属材料上留下水流腔道, 水流腔道为一个或者多个U型弯(图1<sup>[4]</sup>)连接。这种冷却设备的成形方法主要为钻孔法和预埋管一体成形方法。钻孔法(图2)是先纵向(A、B、C方向)钻通道, 再横向(D、E方向)钻通道, 与纵向通道贯穿, 然后把横向通道的两端封堵, 这种方法的最大问题在于封堵的端部使用时容易漏水, 引起事故发生, 同时水流腔道只能是垂直通道; 预埋管一体成形法是在浇注前在型腔内、预埋管道, 在浇注的过程中, 预埋管与浇注液态金属凝固成一体。这种成形方法中, 预埋管道可以随意弯成多个U型弯, 而且连通起的多个U型弯, 水流动时的阻力要远远小于垂直的U型弯, 而且一体成形的方法不存在使用时漏水的问题, 因此, 埋管铸造一体成形逐步成为冷却水套的主要成形方法<sup>[5-8]</sup>。埋管铸造一体成形冷却水套的关键在于成形过程中要保证埋管内壁的不熔塌和埋管外壁与液态金属的熔合, 这需要控制浇注过程中埋管的内壁温度和外界温度, 即埋管内壁温度不能超过埋管材料的熔点, 埋管的外壁温度必须超过埋管金属材料的熔点, 要控制埋管内壁温度需要一定的护管技术, 通常是在埋

作者简介:

高增丽(1973-), 女, 博士, 主要研究方向为充型凝固过程中的传热分析。E-mail: gaozengli@sdut.edu.cn

中图分类号: TG242

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

04-0382-06

基金项目:

淄博沂源校城融合项目(YYXC2020003)。

收稿日期:

2022-07-04 收到初稿,

2022-09-21 收到修订稿。

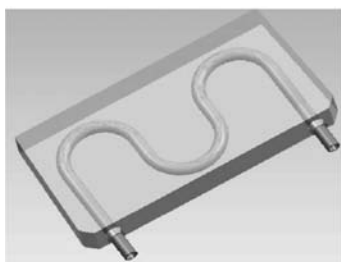


图1 大型工业冷却水套

Fig. 1 Large industrial cooling water jacket

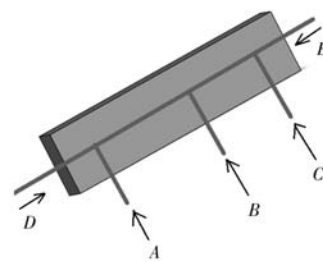


图2 机械钻孔成形方法

Fig. 2 Mechanical drilling forming method

管内填充固体粉末、流动冷却介质<sup>[9-10]</sup>或者采用高熔点材质的合金埋管<sup>[11]</sup>。本文采用数值研究的方法,利用铸造软件Anycasting,研究在埋管内流动介质且浇注工况不变的条件埋管几何特性(壁厚变化)对埋管内外壁温度的影响,进而推知埋管铸造一体成形的熔合情况,为实际生产提供重要指导。

## 1 浇注过程中传热模型的建立和模型有效性的验证

### 1.1 浇注过程传热数学模型的建立

在500 mm × 100 mm × 130 mm (图3)的型腔里,预埋不同壁厚的管道,管道的内腔道直径保持20 mm,变化埋管壁厚,由于在浇注的过程中预埋管与本体会熔合为一体,只要满足外壁能够熔合,不会影响最终铸件的几何结构,浇注采用底注方式,设置上部双冒口。

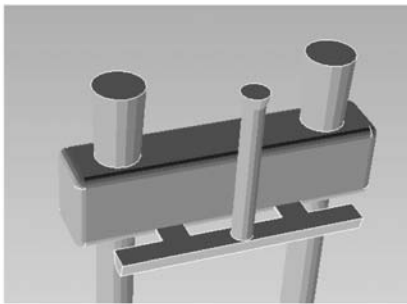


图3 计算几何模型

Fig. 3 Computational geometry model

管内流动介质的密度视为常数,忽略液态金属在充型和凝固过程中因为温度变化而引起的密度变化,液态金属与管内流动的介质,在浇注和凝固过程中遵循质量守恒方程(式1)、动量守恒方程(式2)以及传热过程的能量守恒方程(式3),速度场和压力场的求解采用SOLA算法。

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

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho X + \mu \Delta u$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho Y + \mu \Delta v \quad (2)$$

$$\rho \frac{dw}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho Z + \mu \Delta w$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho c w \frac{\partial T}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (3)$$

式中:  $u, v, w$ 为在 $t$ 时刻在点 $(x, y, z)$ 处的速度分

量;  $\rho$ 为流体密度;  $p$ 是压力;  $\nabla$ 为拉普拉斯算子;  $X, Y, Z$ 为所受外力的分量;  $\mu$ 为动力粘性;  $T$ 为温度;  $c$ 为比热;  $\lambda$ 为热导率;  $S$ 为源项。

管内介质物性参数见表1,流动速度为0.5 m/s,入口温度为20 °C,埋管材质为纯铜,浇注液态金属为铜,浇注温度1 180 °C,18 s充型时间,埋管的初始温度20 °C,型砂物性来自软件内部数据,初始温度为20 °C,在图4中埋管的外壁设定一点A,在内壁上设定一点B,监测浇注过程中埋管外壁温度和内壁温度的变化,从而推知铸造的熔合情况。

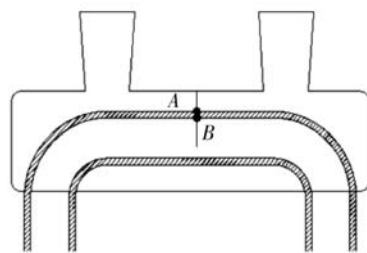


图4 温度测点位置

Fig. 4 Position of the temperature measuring points

表1 流动介质物性

Table 1 Physical properties of the flowing medium

密度 / (kg · m <sup>-3</sup> )	热导率 / (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	比热容 / (J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	粘度 / (kg · m <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup> )
998	0.60	4 178	0.000 996

### 1.2 浇注过程传热数学模型的可靠性验证

利用上述数学模型计算出来仿真结果能否可信,还需要通过实验验证所建数学的有效性,根据图1的几何模型,搭建相应的实验台(图5),预埋铜管(图6),预埋铜管需要预先经过喷砂处理,去除表面氧化层,实验中型腔与埋管几何尺寸与图3、图4相同,埋管规格为 $\Phi 32$  mm × 5 mm,在铜管外壁对应于图4中的



图5 数学模型验证实验台

Fig. 5 The experimental station

A点放置热电偶的测点A/ (图6), 热电偶的测试温度在MD807型仪表上显示, 浇注工况为: 浇注温度1 180 °C, 18 s充型完毕, 埋管内流动冷却介质(介质物性见表1) 流速为0.5 m/s, 入口温度为20 °C, 埋管预热到80 °C, 将上述工况下A点(图4)的数值计算仿真结果与A点(图6)实验结果进行对比, 从而验证数学模型的有效性。相同条件下的A点的数值计算结果与实验测试的结果进行对比, 见图7, 从图7中可以看出, 数值计算结果与实验结果吻合良好, 将图7中前18 s内的数值结果和实验结果放大, 见图8, 可以看出, 实验结果明显滞后于数值计算结果, 主要是由于数值计算



图6 测温热电偶

Fig. 6 Thermometric thermocouple

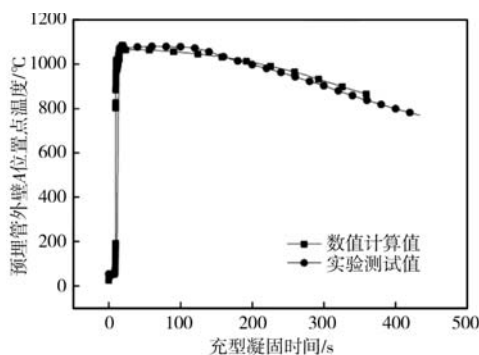


图7 充型凝固阶段外壁温度的数值计算值与实验测试值对比  
Fig. 7 Comparison of the calculated values and experimental values of the outer wall temperature during filling and solidification stage

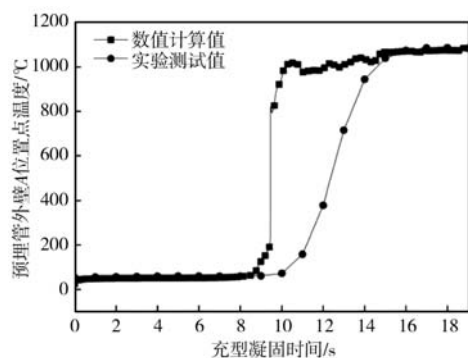


图8 充型阶段外壁温度的数值计算值与实验测试值对比  
Fig. 8 Comparison of the calculated values and experimental values of the outer wall temperature during filling stage

结果的温度显示可以是瞬时的, 但是实验中热电偶的测温显示是需要响应时间的, 热电偶的测量数据与实际数据相比, 存在时间上的滞后, 滞后时间的长短取决于热电偶的粗细。图8表明在充型18 s内的数值计算值和实验测试值也是吻合良好的, 因此, 根据所建立的数学模型计算出的仿真结果是可信的。

## 2 埋管几何特性尺寸对铸造熔合情况的影响

在埋管铸造过程中, 预埋管在浇注过程中对浇注的液态金属而言是冷源, 而对预埋管而言, 浇注的液态金属是热源, 预埋管几何特性主要是管壁厚的变化决定了冷源与热源相对量发生变化, 必然对埋管外壁温度以及埋管的内壁温度产生影响, 进而影响预埋管与液态金属的熔合情况。

### 2.1 埋管壁厚对浇注过程中埋管外壁温度的影响

液态铜浇注温度为1 190 °C、充型时间为18 s, 预埋管内流动液态冷却介质, 常温流入, 流速为0.5 m/s, 预埋管与砂箱均不预热, 在上述条件下, 变化预埋管的壁厚, 保持埋管内腔道途径不变, 变化埋管壁厚从5 mm依次增大到20 mm, 由于在浇注的过程中前30 s的温度变化最剧烈, A点温度达到的最高值也出现在这个时间段, 30 s后铸件凝固进入冷却段, 温度迅速下降, 因此要想确定外壁温度是否达到铜质埋管的熔点, 进而确定埋管与液态铜的熔合情况, 主要取决于外壁A点在30 s内的温度变化是否达到铜的熔点。图9a、b、c、d分别为埋管壁厚为5 mm、10 mm、15 mm、20 mm前30 s内的温度变化情况, 对比图9a、b、c、d, 随着壁厚的增加, 达到最高点温度的时间越往后推迟, 这是由于壁厚的增大, 进行热交换的冷源物体质量增大, 冷热物体换热时间延长; 此外, 随着壁厚的增大, 外壁达到的峰值点温度逐渐降低, 从壁厚为5 mm时的峰值温度1 133 °C降至壁厚为20 mm时的1 071 °C, 这是由于埋管壁厚的增大, 冷源物体的质量在增大, 由于型腔的容积是固定的, 必然使浇注液态铜质量减少, 也就是热源的质量减少, 从而引起峰值温度的下降。在上述工况下, 壁厚为5 mm和10 mm的预埋管时, 外壁均能实现熔合, 当预埋管壁厚为15 mm时, 外壁与液态铜无法实现冶金熔合。

### 2.2 埋管壁厚对浇注过程中埋管内壁温度的影响

埋管一体成形技术, 不仅要求埋管的外壁与液态金属实现冶金熔合, 而且也要防止埋管内壁的熔塌, 尤其在埋管内流动液态冷却介质的条件下, 一旦埋管

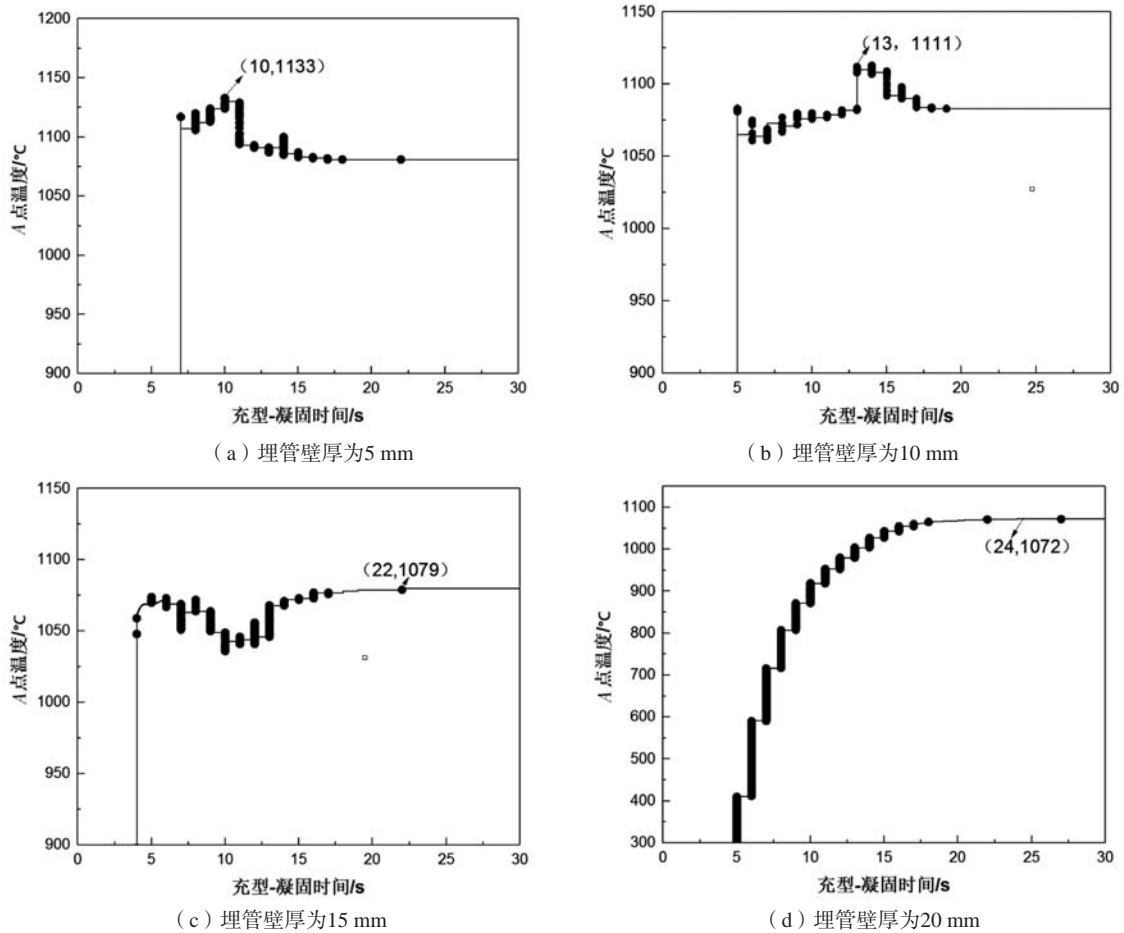


图9 埋管壁厚对埋管外壁的影响

Fig. 9 Influence of the buried pipe wall thickness on the outer wall of the buried pipe

内壁达到其熔点，埋管就会软化，严重时会被熔穿，埋管管壁一旦熔穿，液态金属与埋管内冷却介质接触后，冷却介质与高温的液态金属接触后瞬间转变为气态，压力骤增，严重时会出现爆炸事故，这也是埋管铸造工艺的一个技术瓶颈，因此在实际浇注前，必须通过一定手段确定在整个充型-凝固过程中埋管内壁温度都不能超过铜的熔点，才能实施浇注，在此方面，数值计算为埋管铸造提供了重要的数据指导。

图10a、b、c、d分别为埋管壁厚5 mm、10 mm、15 mm、20 mm时埋管内壁B点的温度，从图10中可以看出，在前30 s内，由于埋管内流动冷却介质，在冷却介质对流换热的作用下，埋管内壁的温度变化整体上要比外壁温度变化平缓，由于热传导需要一定的时间，埋管内壁温度达到峰值点的时间总要晚于外壁点，虽然四个壁厚条件下的内壁温度都没有超过铜的熔点，理论上不存在内壁熔塌的情况，考虑到1 081 °C已经接近铜的熔点，5 mm的埋管壁厚不适合该工况下的浇注。

根据数值计算得到的合理壁厚为10 mm，选择预埋

铜管，并在如下浇注条件下进行浇注：管内介质物性参数见表1，其流动速度为0.5 m/s，入口温度为20 °C，埋管材质为纯铜，浇注液态金属为铜，浇注温度为1 180 °C，18 s充型时间，埋管的初始温度为20 °C，型砂物性来自软件内部数据，初始温度为20 °C。浇注后的铸件见图11，剖开后的铸件见图12，剖开后的铸件表明，根据数值计算结果选择的预埋管外壁与液态铜的熔合良好，内部腔道形状也比较规则，完全可以满足埋管铸造的通球要求（通球检查是检查铸造通道是否有堵塞或不通畅缺陷的特殊方法，包括浇注时引起的熔蚀或管壁塌陷），因此，数值计算的结果对实际浇注具有重要的指导意义。

### 3 结论

(1) 埋管壁厚的增大，使得浇注过程参与换热的冷源物体质量增大，换热的时间延长，达到最高点温度的时间越往后推迟；此外，随着壁厚的增大，外壁达到的峰值点温度逐渐降低，主要由于埋管壁厚的增

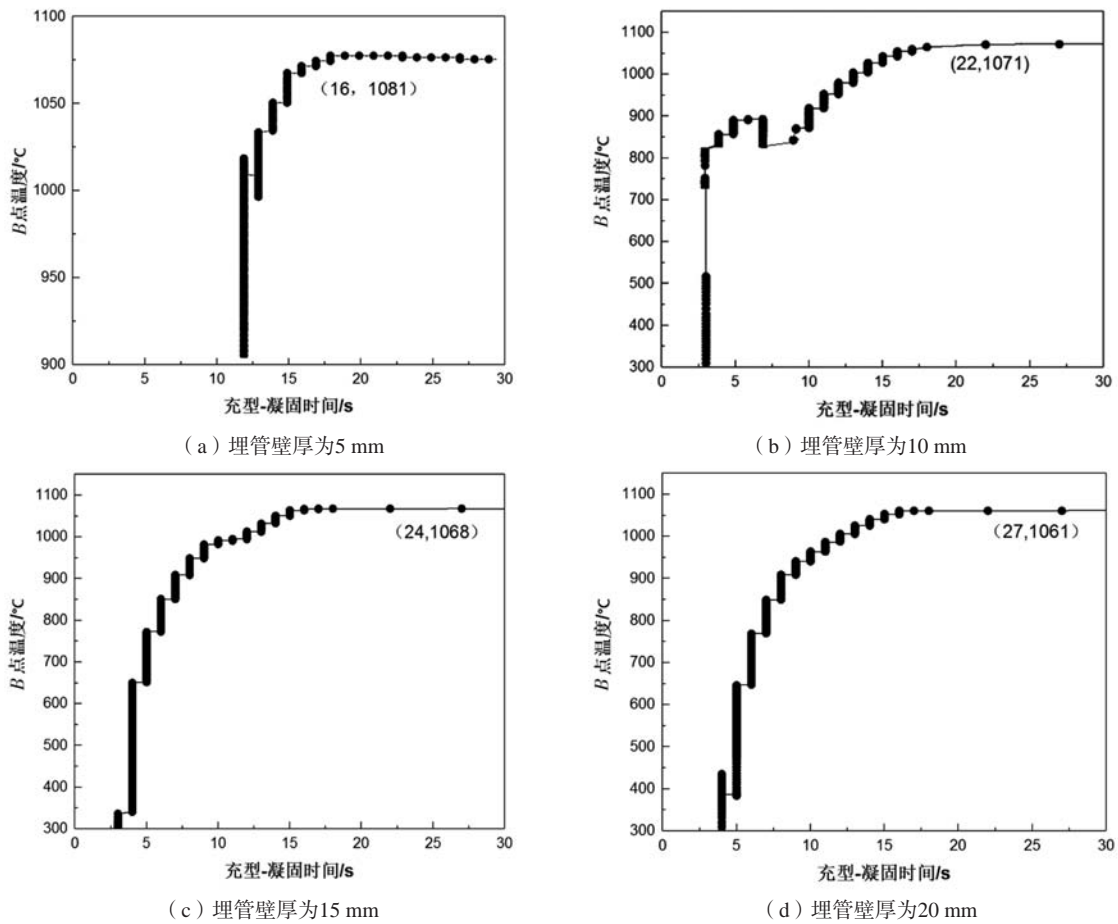


图10 冷却介质流速对预埋管外壁温度的影响

Fig. 10 Influence of the cooling medium velocity on outer wall temperature of the preburied tube

图11 浇注冷却后的铸件  
Fig. 11 The cooled casting图12 剖开后的铸件  
Fig. 12 The casting after being split

大，冷源物体的质量在增大，由于型腔的容积是固定的，必然使浇注液态铜质量减少，也就是热源的质量减少，从而引起峰值温度的下降。

(2) 由于埋管内流动冷却介质，在冷却介质对流换热的作用下，埋管内壁的温度变化整体上要比外壁温度变化要平缓，由于热传导需要一定的时间，埋管内壁温度达到峰值点的时间总要晚于外壁点，在浇注的过程中，要想实现理想的熔合，除了埋管外壁温度超过铜的熔点外，内壁温度不能接近铜的熔点。

(3) 在冷却介质流动速度0.5 m/s、入口温度20 °C、浇注温度1 180 °C、18 s充型时间、埋管的初始温度和型砂初始温度为20 °C的浇注条件下，采用10 mm壁厚的预埋管浇注的铸件熔合良好。

**参考文献:**

- [1] 许良友, 陈先良, 阮俊达, 等. 新型铸铜冷却壁的制造和在高炉上应用 [J]. 炼铁, 2010 (1): 54-56.
- [2] KAREL V, ANDREW K K, ANDREAS F, et al. Furnace cooling technology in metallurgical process [J]. JOM, 2006, 58 (4): 139-154.
- [3] MAC RAE A. New technology for the manufacture of cast copper cooling blocks[C]//ISS 59th Electric Furnace Conference, Phoenix, Arizonam, 11-14 November 2001.
- [4] 谭诗薪. 基于ProCAST预埋铜管冷却水套整体铸造工艺研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- [5] 范晓明, 胡寿玉, 余光明, 等. 高炉冷却壁的制备技术及其进展 [J]. 钢铁研究, 2007, 35 (4): 51-54.
- [6] 魏渊. 高炉炉腹区域铸铜冷却壁数值模拟及热态试验方案研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2013.
- [7] 石琳, 程树森, 阮新伟, 等. 埋管铜管式铸铜冷却壁热态试验研究 [J]. 炼铁, 2007 (3): 29-32.
- [8] 高增丽, 宫本奎, 牛建平, 等. 通冷却介质的埋管铸造中预埋管熔合状况的数值预测方法 [J]. 铸造, 2018, 67 (11): 974-978.
- [9] 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, 68 (6): 599-602.
- [10] 韩旭, 宫本奎, 高增丽, 等. 预埋管铜冷却水套铸造工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (9): 956-959.
- [11] 谭诗薪. 基于ProCAST预埋铜管冷却水套整体铸造工艺研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.

---

## Influence of Geometric Characteristics of Embedded Copper Pipe on Casting Fusion in Buried Pipe Casting

GAO Zeng-li<sup>1</sup>, GONG Ben-kui<sup>1</sup>, NIU Jian-ping<sup>2</sup>, TANG Biao<sup>3</sup>, YAN Li-feng<sup>2</sup>, YAN Xiao-ying<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China; 2. Hebei Wanfeng Metallurgical Spare Parts Co., Ltd., Zhangjiakou 076250, Hebei, China; Shandong Derui Anticorrosive Materials Co., Ltd., Yiyuan 256100, Shandong, China)

**Abstract:**

By establishing the mathematical model of casting filling and solidification process, on the basis of experimental verification of the validity of the model, the influence of the geometric characteristics (wall thickness) of the buried pipe on the casting fusion under specific pouring conditions was numerically studied. The calculation results showed that with the increase of the wall thickness of the buried pipe, the peak temperature of the outer wall of the buried pipe gradually decreased, and the time point corresponding to the peak temperature delayed. It is mainly because the increase of the wall thickness of the buried pipe led to the increase of the mass of the cold source during the pouring process and the extension of the time for the cold and hot objects to realize the heat exchange. In addition, in order to realize the ideal fusion of the buried pipe casting, the temperature of the inner wall must not reach the melting point of the copper, so as to avoid pipe wall penetration and actual pouring accidents. Therefore, in order to achieve the ideal casting under the specific working conditions, the wall thickness of the buried pipe had an ideal value.

**Key words:**

embedded copper pipe; geometric characteristics; buried pipe casting