

# 埋管铸造中流动液态介质物性对埋管外壁温度的影响

高增丽<sup>1</sup>, 宫本奎<sup>1</sup>, 牛建平<sup>2</sup>, 韩旭<sup>1</sup>, 刘运腾<sup>3</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. 山东省科学院, 山东济南 255014)

**摘要:** 在验证计算数值模型有效的基础上, 研究了埋管铸造过程中冷却介质物性参数(热导率、粘度、比热)对预埋管外壁温度的影响。结果表明: 随着热导率的减小, 预埋管外壁的温度总体呈上升趋势, 热导率低到一定程度, 浇注过程中预埋管外壁温度会由于浇注过程中自由液面的波动出现温度震荡; 冷却介质粘度越小, 对流换热越强, 预埋管外壁温度越低; 冷却介质比热变化引起的预埋管外壁温度的轻微变化, 主要是由于比热引起的冷却介质的温度变化所致, 但是由于冷却介质在预埋管内的量相比浇注型腔空间内的液态高温铜量要小得多, 因此预埋管内介质温度的变化对预埋管外壁温度的影响微弱。

**关键词:** 冷却介质; 物性参数; 外壁温度; 冷却水套; 埋管铸造

## 作者简介:

高增丽(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为铸造充型凝固过程中的传热分析。E-mail: gaozengli\_10@163.com

中图分类号: TG242

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)06-0599-04

## 基金项目:

山东省自然科学基金(ZR2015EL035); 淄博校城融合项目(2018ZBXC246)。

## 收稿日期:

2019-02-25 收到初稿,  
2019-04-16 收到修订稿。

铸铜式冷却水套是高温冶金炉的关键冷却部件。冷却水套的加工方法主要有两种<sup>[1-4]</sup>: 铜板钻孔冷成形水套、预埋纯铜管或其他铜合金管的埋管铸造冷却水套。铜板钻孔制造冷却水套的成形工艺即在铜板上从图1中的A、B两端向中间钻孔, 直至钻孔贯穿, 然后从A、B方向钻孔直至与A、B向的钻孔贯穿, 然后将A、B向孔两端封堵, 形成冷却水套U型冷却水流腔道, 由于钻孔后需要封堵, 堵头易出现漏水, 使冷却水套在使用过程中存在安全隐患, 同时此方法无法加工具有复杂水流腔道的冷却水套。埋管铸造成形方法<sup>[5]</sup>成为冷却水套的主要制造方法。目前关于冷却水套的文献主要集中在冷却水套使用过程中出现的问题<sup>[6-8]</sup>, 对于冷却水套的具体加工细节尚未见相应文献报道。埋管铸造需要解决铸造过程中埋管的坍塌, 即所谓的护管技术。目前护管技术主要为改变埋管材质(即纯铜-铜合金冷却水套, 铸造浇注材料为纯铜, 预埋管材质为高熔点的铜合金)、在埋管内填充固体粉末介质或流动气、液态介质两种方法。考虑预埋纯铜管易熔穿问题, 南昌航空大学的谭诗薪<sup>[9]</sup>、E. Van. Stein<sup>[10]</sup>采用高熔点的铜合金管解决埋管坍塌问题, 但是铜合金的低热导率使得成形后的冷却管冷却效果明显降低。考虑纯铜优良的导热性能, 科研工作者开始尝试采用预埋纯铜管、同时在管内填砂、流动惰性气体介质或液态介质的护管技术, 而在浇注具有复杂冷却水流腔道的厚大冷却水套时填砂、流动惰性气体介质两种方法带走热量有限不足以保护埋管, 但是流动液态冷却介质的相关实验极其危险, 一旦选择的液态介质不合适, 导致的埋管熔塌会使高温熔体与液态介质混合, 引起严重的爆炸事故。因此, 埋管内流动液态介质条件下的埋管铸造相关试验未见相应文献报道。本文在验证计算模型有效的情况下, 研究纯铜-纯铜冷却水套埋管浇注过程中流动液态冷却介质物性(包括热导率、粘度、比热)对预埋管外壁温度的影响, 研究冷却介质物性变化对预埋管外壁温度影响, 预测熔合, 从而为寻找理想冷却介质提供参考。

## 1 传热模型的建立与验证

埋管铸造充型凝固过程中传热模型遵循能量守恒方程、质量守恒方程以及动

量守恒方程<sup>[11]</sup>。计算物理模型见图2，在外管壁上取C点，在表1的浇注条件下，所用液态介质物性见表2。利用Anycasting模拟充型过程、Fluent模拟凝固过程，根据计算模型搭建实验台（图3），实验台预埋管上C点点焊K型热电偶测点，用引线连接至仪表显示其温度，将表1条件下的C点模拟值与实验值进行对比（图4）。从图4中可以看出，C点温度模拟值与实验值基本吻合，数值计算的结果相对可信。

## 2 数值计算结果分析

考虑冷却介质在埋管内的温度变化，图2中冷却介质入口外壁A点为铸造过程最难熔合点，冷却介质出口处对应的内壁B点为铸造过程中最容易坍塌点。因此，计算过程中通过A点温度预测外壁熔合情况，通过出口内壁B点温度变化预测内壁是否坍塌，本文主要在表1的浇注条件下，数值研究预埋管外壁A点温度随液态冷却介质物性参数的变化。

### 2.1 液态冷却介质热导率对预埋管外壁温度影响

在表1的浇注条件下，浇注过程中流动的冷却介质其他物性保持不变，即密度 $1\ 015.4\ \text{kg}/\text{m}^3$ 、粘度 $1.36\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ 、比热 $3\ 898\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{C})$ ，变化其热导率依次为 $0.2\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{C})$ 、 $0.4\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{C})$ 、 $0.6\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{C})$ ，研究冷却介质热导率对预埋管外壁A点温度的影响。图5为在浇注工况相同、其他物性参数不变

的条件下，预埋管外壁A点温度随冷却介质热导率的变化。从图中可以看出，随着热导率的减小，预埋管外壁的温度总体呈上升趋势，这主要由于在冷却介质与管壁的对流换热过程中，导热起着一定的作用，冷却介质的热导率越小，冷却介质带走的热量越少，对应的预埋管外壁温度越高；相反，冷却介质热导率越大，相同时间内冷却介质传递走的热量越多，对应的预埋管外壁的温度越低；当热导率低到一定程度，由液态铜传递到预埋管的热量不能被有效传递走不仅会引起预埋管温度的急剧上升，同时在浇注充型过程中自由液面的波动会造成预埋管外壁温度的剧烈震荡。从图5可以看出，冷却介质热导率为 $0.2\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{C})$ 时，在充型过程中预埋管外壁A点温度出现了震荡，而冷却介质热导率为 $0.4\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{C})$ 、 $0.6\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{C})$ 时，浇注过程中的外壁温度A点温度相对平稳。

### 2.2 液态冷却介质粘度对预埋管外壁温度影响

液态冷却介质在流动过程中具有了一定的流速，在浇注过程中液态冷却介质与预埋管的热量传递除了热传导，热对流也起着重要的作用。冷却介质与预埋管的对流传热强度通过对流换热的努赛尔准数Nu表征，决定努赛尔准数Nu大小的因素不仅取决于流速，液态介质粘度也是重要的影响因素，因此液态介质粘度变化会对埋管内介质带走的热量产生影响，进而影响埋管的外壁温度。图6为在表1浇注条件、液态介质

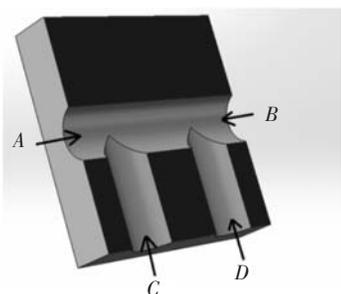


图1 铜板钻孔冷却水套成形工艺

Fig. 1 Copper plate drilling forming technology of cooling water Jacket

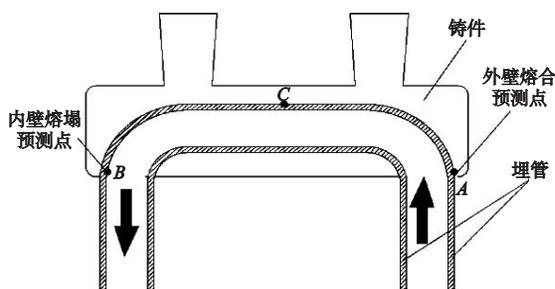


图2 物理模型

Fig. 2 Physical model



图3 实验台

Fig. 3 Experimental station

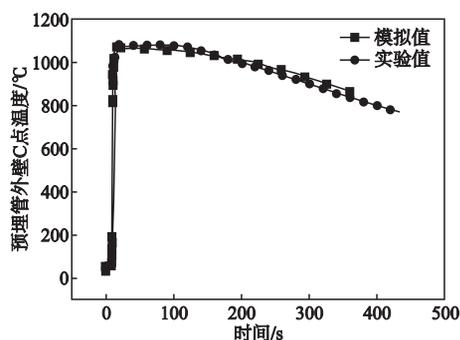


图4 模拟值与实验值对比

Fig. 4 Comparison of simulated and experimental values

表1 浇注工况  
Table 1 Pouring conditions

浇注温度/℃	充型时间/s	冷却介质流速/(m·s <sup>-1</sup> )	冷却介质进入预埋管时温度/℃	预埋管预热温度/℃	型砂预热温度/℃
1 175	18	0.25	35	55	30

表2 计算模型有效性验证实验所用液态介质物性  
Table 2 Physical properties of liquid medium used in verification experiment of computational model validity

密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	热导率/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	比热/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	粘度/(Pa·s)
1 034	0.22	3 618	0.273

密度1015.4kg·m<sup>-3</sup>、热导率0.4 W/(m·℃)、比热3 898 J/(kg·℃)条件下介质粘度变化对预埋管外壁温度影响。从图6中看出,粘度越小,对流换热越强,预埋管外壁A点温度越低;反之,粘度越大,对流换热越弱,预埋管外壁温度越高。粘度依次为0.000 996 Pa·s、0.136 Pa·s、0.276 Pa·s时,浇注过程中出现的最高温度依次为1 064℃、1 078℃、1 084℃,依次增大;粘度为0.276 Pa·s时,浇注过程中A点出现的最高温度1 084℃,接近熔合所需的1 083℃。

### 2.3 液态冷却介质比热对预埋管外壁温度的影响

液态介质的比热是其另一个热物性参数,它决定液态介质流过预埋管后的温度升高和焓增,进而影响预埋管外壁的温度。冷却介质的比热越大,单位质量

的冷却介质升高1℃所需的热量越多,因此冷却介质流过预埋管后升温越小,在液态冷却介质预埋管入口温度同为35℃的条件下,液态冷却介质的出口温度也越低。液态介质温度的变化影响液态介质与液态铜之间的温差,温差影响二者之间的热量传递,进而影响预埋管外壁温度与熔合状况。图7为表1的浇注条件、液态介质密度1 015.4 kg/m<sup>3</sup>、热导率0.4 W/(m·℃)、粘度0.276 Pa·s的条件下,预埋管外壁A点温度随介质比热的变化。从图7中可以看出液态介质比热越大,外壁温度越低,介质比热越小,外壁温度越高,主要是由于介质比热引起的预埋管内介质温度变化(见图8)所致。此外,介质比热的变化对预埋管外壁温度影响没有热导率、粘度那样明显,在浇注过程中出现的最高温度相差不多,主要由于冷却介质的量相比高温的

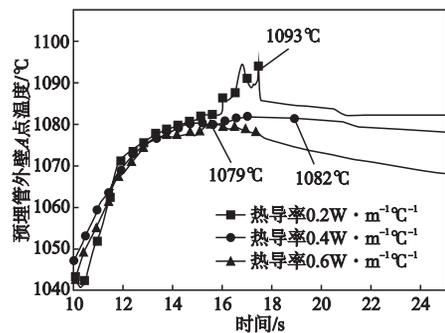


图5 液态冷却介质热导率对预埋管外壁温度影响  
Fig. 5 Influence of thermal conductivity of liquid cooling medium on outer wall temperature of embedded tube

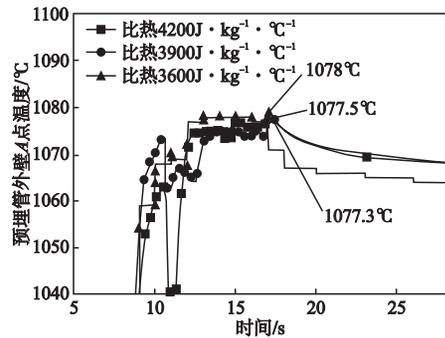


图7 液态冷却介质比热对预埋管外壁温度影响  
Fig. 7 Influence of specific heat of cooling medium on embedded tube outer wall temperature

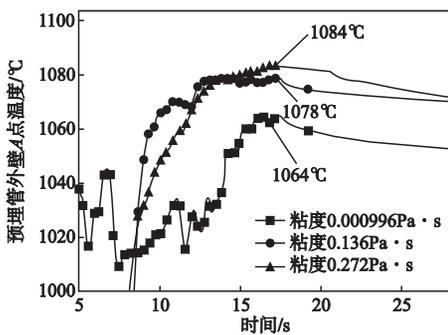


图6 液态冷却介质粘度对预埋管外壁温度影响  
Fig. 6 Influence of viscosity of liquid cooling medium on outer wall temperature of embedded tube

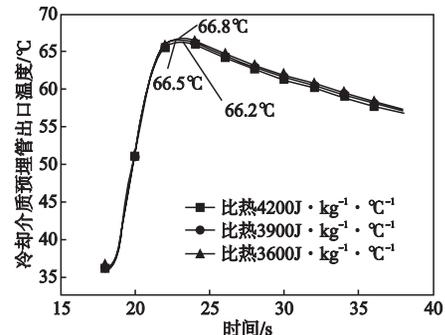


图8 冷却介质预埋管出口温度  
Fig. 8 Temperature of cooling medium in outlet of embedded tube

液态铜的量要小的多,因此预埋管内介质温度的变化对预埋管外壁温度的影响微弱。

### 3 结论

(1) 随着热导率的减小,预埋管外壁的温度总体呈下降趋势;热导率低到一定程度,浇注过程中预埋管外壁温度会由于浇注充型过程中自由液面的波动出现震荡。

(2) 冷却介质粘度越小,对流换热越强,预埋管外壁温度越低;反之,冷却介质粘度越大,对流换热越弱,预埋管外壁温度越高。

(3) 冷却介质比热越大,外壁温度越低,介质比热越小,外壁温度也越高,但是冷却介质比热变化对预埋管外壁温度影响没有热导率、粘度那样明显,主要由于冷却介质在预埋管内的量相比浇注型腔空间内的液态高温铜的量要小得多,因此预埋管内介质温度的变化对预埋管外壁温度的影响微弱。

#### 参考文献:

- [1] 许良友, 陈先良, 阮俊达, 等. 新型铸铜冷却水套的制造和在高炉上应用 [J]. 炼铁, 2010 (1): 54-56.
- [2] KAREL V, ANDREAS K K, ANDRWAS F, et al. Furnace cooling technology in pyrometallurgical process [J]. Processing of Metals and Materials, 2006, 58 (4): 139-154.
- [3] MAC R A. New Technology for the manufacture of cast copper cooling blocks [C] //ISS 59th Electric Furnace Conference, Phoenix, Arizonam, 2001: 11-14.
- [4] 钟毅, 余光明, 卢献忠, 等. 高炉新型铸铜冷却水套的研制 [C] //第九届中国铸造协会年会文集.北京: 中国铸造协会, 2010.
- [5] 范晓明, 胡寿玉, 余光明, 等. 高炉冷却水套的制备技术及其进展 [J]. 钢铁研究, 2007, 35 (4): 51-54.
- [6] 许良友, 张仕荣, 樊婉琴, 等. 高导热率纯铜水套类铸件的研制 [J]. 铸造技术, 1999 (2): 19-21.
- [7] 魏渊. 高炉炉腹区域铸铜冷却水套数值模拟及热态试验方案研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2013.
- [8] 石琳, 程树森, 阮新伟, 等. 埋纯铜管式铸铜冷却水套热态试验研究 [J]. 炼铁, 2007 (3): 29-32.
- [9] 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.
- [10] CALLENFEL E S, LAAR R. 可满足高炉严格使用要求的高性能MTT金属管铸铜冷壁 [J]. 钢铁, 2007 (3): 79-82.
- [11] 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): 974-978.

## Effect of Physical Properties of Flowing Liquid Medium on Embedded Tube Outer Wall Temperature in the Casting Process

GAO Zeng-li<sup>1</sup>, GONG Ben-kui<sup>1</sup>, NIU Jian-ping<sup>2</sup>, HAN Xu<sup>1</sup>, LIU Yun-teng<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, Shandong, China; 2. Hebei Wanfeng Metallurgical Spare Parts Co., Ltd., Zhangjiakou 076250, Hebei, China; 3. Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, Shandong, China)

#### Abstract:

Based on the verified heat transfer model for the filling and solidification process of embedded tube, the influence of the physical parameters of cooling medium (thermal conductivity, viscosity and specific heat) on the outer wall temperature of the embedded tube in the casting process is studied numerically. The results show that the outer wall temperature of the embedded tube increases with the decrease of thermal conductivity, when the thermal conductivity decreases to a certain value, and the outer wall temperature oscillation of the embedded tube in the casting process occurs with the fluctuation of liquid copper free liquid level; the smaller the viscosity of cooling medium, the stronger the convective heat transfer between the cooling media and the embedded tube, the lower the outer wall temperature of the embedded tube; the change of specific heat of cooling medium has a weak influence on the outer wall temperature of the embedded tube, mainly due to the temperature change of the cooling medium caused by the specific heat, but the amount of cooling medium in the embedded tube is much lesser than that of liquid copper, so the change of medium temperature in the embedded tube has a weak influence on the outer wall temperature of the embedded pipe.

#### Key words:

cooling medium; physical parameters; outer wall temperature; cooling water jacket; embedded tube casting