

铸造模具冷却通道内高速气体射流冲击换热数值模拟与试验验证

何雪莉¹, 侯柏康¹, 杨好音¹, 马小英², 冯树伟², 罗智群², 陈召东¹, 王俊升³, 豆瑞锋¹

(1. 北京科技大学 能源与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中信戴卡股份有限公司, 河北秦皇岛 066011;

3. 北京理工大学前沿交叉研究院, 北京 100081)

摘要: 采用计算流体动力学方法, 对铝合金轮毂铸造模具冷却通道内气体冲击射流瞬态换热过程进行数值模拟和试验研究, 得到冷却通道内对流换热系数和冷却通道管壁温度的变化规律。与试验数据进行对比, 结果表明数学模型对管壁温度的预测精度在 $\pm 5\%$ 以内。研究发现: 驻点位置的换热系数最高, 而冷却通道的侧面位置换热系数相对较低。随着气体入流速度的增大, 冷却通道内的换热系数也逐渐增加。本研究为铝合金轮毂铸造工艺仿真模型提供了准确的边界条件。

关键词: 流体动力学; 气体射流冲击; 瞬态传热; 铸造; 数值模拟

射流冲击作为一种高效的增强传热方法, 由于其优异的局部传热特性而引起人们的广泛关注^[1-2]。在轻量化铝合金轮毂的铸造过程中, 需要调控合适的冷却强度, 以保证铸件的质量和性能^[3-4]。在实际生产中, 通常采用高速气体射流冲击实现冷却通道的高强度换热^[5]。然而, 在铝合金轮毂铸造工艺仿真模型中, 冷却通道内壁面的对流换热系数往往采用经验值, 缺少理论支撑^[6], 这使得铸造工艺仿真模型的精度难以保证, 从而削弱了对铝合金轮毂缺陷预测模型的支撑^[7-8]。

为了提高铸造工艺仿真模型的准确性, 基于铸造模具中的冷却通道结构, 采用计算流体动力学软件对高速气体冲击射流冷却过程进行了数值模拟研究。通过瞬态冷却试验校验了数学模型的准确性, 对冷却通道内的对流换热特性进行了详细的分析。

1 数学模型及计算方法

1.1 物理模型

汽车轮毂铸造模具的核心结构, 通常由若干个定模和动模组成。这些模具部件协同作用, 确保了轮毂铸造的精确性和高效性^[9]。铸造模具中冷却管道的布置根据模具形状和轮毂结构的不同而有所差异, 以实现浇注材料的顺序凝固^[10]。铸造工艺设计中需合理安排冷却通道位置和选择冷却速率, 以确保最终形成均匀合理的温度分布^[11]。

在铸造模具的设计中, 存在众多冷却通道, 本研究选取其中一个冷却通道进行建模计算, 并通过设计试验来验证数值模拟结果的准确性。冷却通道及进风管的几何结构如图1所示。

冷却通道和进风管的材料均为304不锈钢, 物理性质参数如表1^[12]所示。铸造过程中通入的冷却空气具有较高的流速和压力, 因此密度选择为理想气体进行计算, 冷却空气的物理性质如表2所示。

在数学模型网格划分过程中, 对冷却空气入口截面、冷却通道的内壁面和外壁面以及流固接触界面进行局部加密处理, 以适应这些区域较为剧烈的流动和热交换现象^[13]。完成网格划分后的结构如图2所示, 网格总数达到300万个。

作者简介:

何雪莉(2000-), 女, 硕士生, 主要研究方向为铝合金铸造。E-mail: h18097531018@163.com

通信作者:

豆瑞锋, 男, 博士, 教授。E-mail: douruifeng@ustb.edu.cn

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

06-0788-06

收稿日期:

2024-09-25 收到初稿,

2024-11-19 收到修订稿。

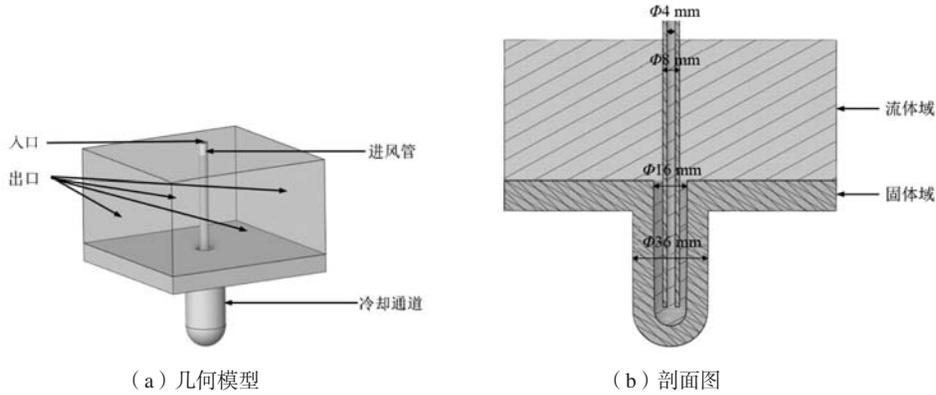


图1 几何模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the geometric model

表1 304不锈钢物理性质 (680 K)

Tab. 1 Physical properties of stainless steel (680 K)

密度/(g·cm ⁻³)	熔点/°C	比热容/(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
7.75	1 398~1 454	0.54	20.2

表2 计算域内空气物理性质

Tab. 2 Physical properties of air in the computational domain

密度	比热/(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	粘度/(e ⁻⁵ kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
理想气体	1 006.43	1.789 4	0.024 2

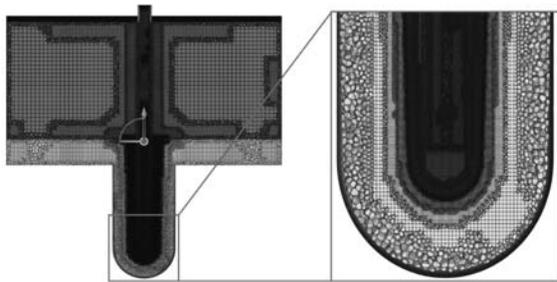


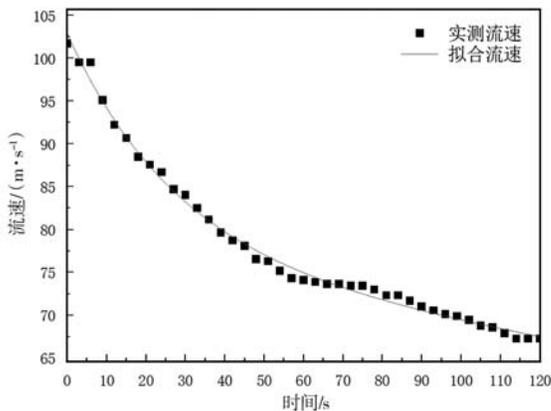
图2 网格划分剖面图

Fig. 2 Cross-sectional view of the mesh

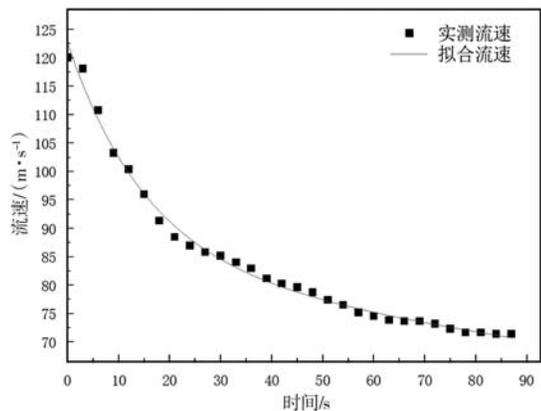
1.2 边界条件

冷却空气入口在进风管的最上端，冷却空气入口温度： $T_{initial}=300\text{ K}$ 。因为实际试验中入口处的流量是随时间变化的，所以在冷却空气入口处，流速按照实际记录的流量进行赋值。

在本研究开展的两次试验过程中，流量均是先逐渐减小，后趋于稳定，故采用分段拟合的方式进行流量拟合。两次试验的实测流速与拟合公式的对比如图3所示，雷诺数的范围在 $1.82 \times 10^4 \sim 3.36 \times 10^4$ 之间。第一



(a) 第一次试验前120 s拟合流速和实际流速的对比



(b) 第二次试验前87 s拟合流速和实际流速的对比

图3 拟合效果对比

Fig. 3 Comparison of model fitting performance

次试验在120 s之后流速恒定，第二次试验在90 s之后流速恒定。

参数拟合选择ExpAssoc函数进行非线性拟合^[14]，拟合方程分别为：

$$v=102.87-26.19\left(1-e^{-\frac{t}{27.89}}\right)-3.65\left(1-e^{-\frac{t}{4.59}}\right) \quad (1)$$

$$v=122.54-95.53\left(1-e^{-\frac{t}{597.58}}\right)-39.00\left(1-e^{-\frac{t}{15.58}}\right) \quad (2)$$

其中， v 为速度，m/s。

两次ExpAssoc函数拟合的R值分别为0.994 2和0.993 1，均大于0.99，拟合效果良好。

在本研究的试验设计中，模具预热温度为680 K ± 5 K，这也是瞬态冷却试验的初始温度。

1.3 数学模型

在建立数学模型前，作如下假设：（1）忽略浮升力的影响；（2）工质为可压缩理想气体。

模型中雷诺数最高达到336 800，属于湍流流动，本研究使用标准 $k-\varepsilon$ 模型数值模拟模具冷却中的湍流流动。在数值模拟过程中，马赫数达到0.375，呈现出可压缩流的特性^[15]，必须考虑流体的可压缩性对湍流

动的影响。本研究采用适用于可压缩流体的数值方法和模型，以确保数值模拟结果的准确性和可靠性。数值求解过程采用基于压力的瞬态三维数值求解器，冷却通道上方的流体区域出口设置为压力出口，表压设置为0。数学模型的操作压力为一个大气压。

采用SLMPLE算法进行求解压力-速度耦合问题，能量、动量、湍动能和湍流耗散率方程均采用二阶迎风格式离散。本模型数值模拟计算所选用的时间步长为0.1 s，模拟500 s的冷却过程。

2 试验设计

试验装置的主体结构包括风管、冷却通道以及固定架，所有组件均采用304不锈钢材质。图4所示为试验装配图和具体尺寸。进风管与冷却通道尺寸如图5所示，冷却通道内径16 mm，外径36 mm，壁厚10 mm，进风管内径4 mm，外径8 mm，进风管壁厚2 mm。在竖直放置的冷却通道侧面开设热电偶安装孔：在与轴线夹角0°、30°、60°和90°位置处各设置一个测孔，同时在90°位置上方10 mm和20 mm处增设两个测孔。所有测孔孔径1 mm，深度9.0 mm ± 0.1 mm。试验时插入

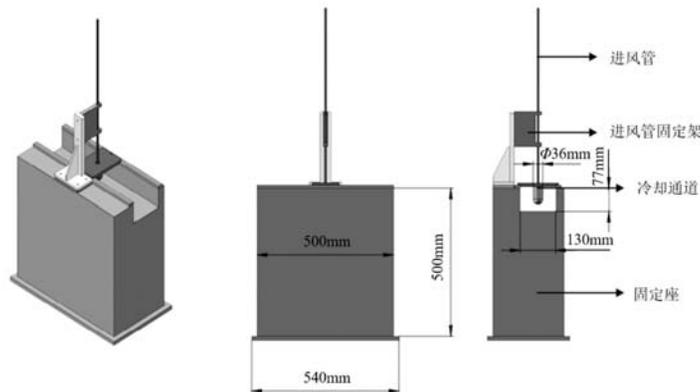


图4 试验平台装配图

Fig. 4 Assembly diagram of the test platform

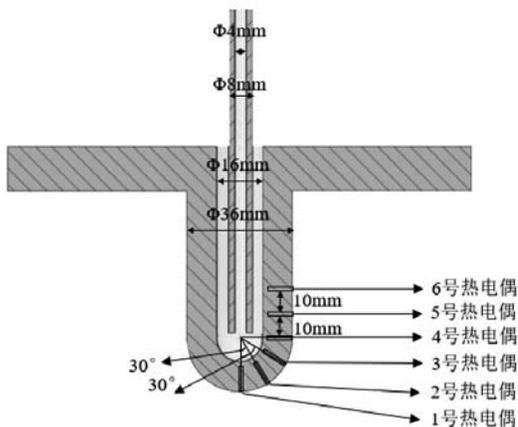


图5 进风管和冷却通道尺寸示意图

Fig. 5 Dimensional schematic of the air inlet duct and cooling channels

K型铠装热电偶实时监测冷却通道壁面内部温度，打孔位置见图5。冷却通道工件最外侧包裹保温材料，使得冷却通道工件最外侧表面近似于绝热。

试验采用空压机提供冷却空气。试验开始前，将1#至6#K型铠装热电偶插入对应热电偶安装孔，并在冷却通道外表面包裹绝热保温材料。随后将冷却通道放入加热炉，加热至680 K ± 5 K后保温30 min，确保冷却通道完全升温至680 K ± 5 K后，将冷却通道从加热炉中取出，放置于试验台固定座上，并用进风管固定架将进风管固定在距离冷却通道底面10 mm的位置。打开空压机吹入冷却空气，实时记录空压机的流量和热电偶的温度值。当冷却进行到1 000 s时，关闭空压机，停止冷却，试验结束。本研究共开展了两次重复试验，试验

采集到的瞬态流速如图4所示。

3 计算结果与讨论

3.1 试验结果分析

试验中热电偶实测温度随时间变化的结果如图6所示。

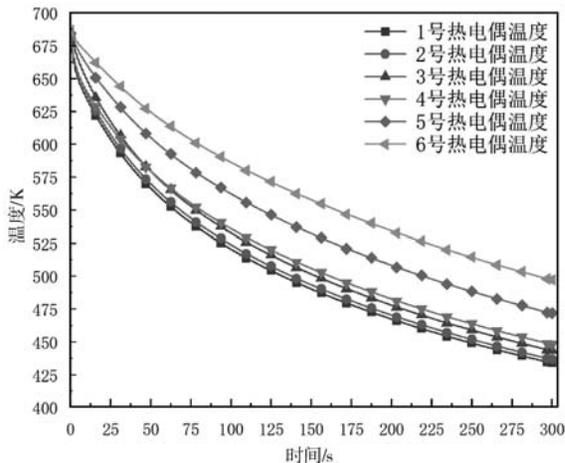


图6 热电偶测量温度随时间变化曲线

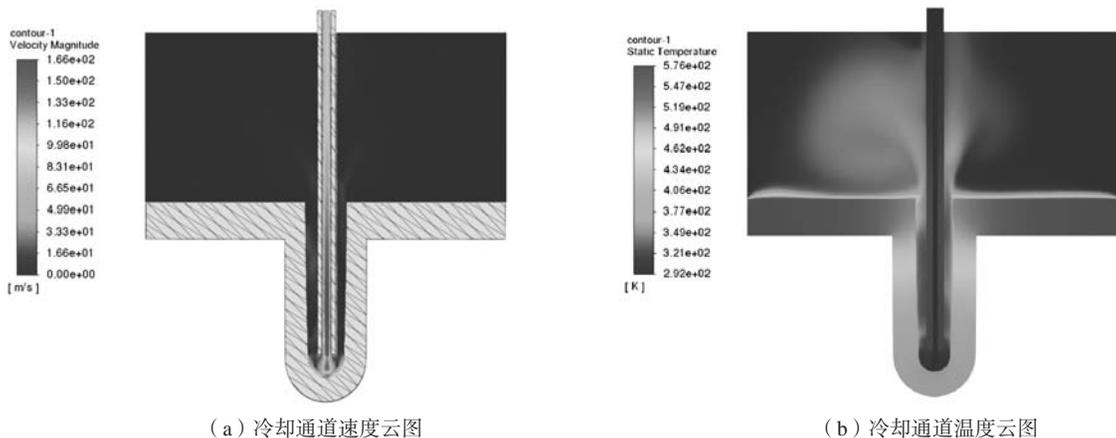
Fig. 6 Thermocouple-measured temperature variation with time

试验结果显示, 各个测温点处温度随冷却的进行逐步降低, 降温速率逐渐变缓。从测温位置来看, 1#热电偶位于射流冲击冷却的正下方, 对流换热最为剧烈, 故此处温度降低速率最快, 温度降低幅度最大。6#热电偶位于冷却通道的柱面位置, 距离冲击射流中心驻点最远, 故此处温度降低速率最慢, 温度降低幅度最小。

3.2 计算结果与讨论

图7所示为冷却通道内的速度云图与温度云图, 由图7(a)可以观察到, 在风管末端出口位置处流速显著增大, 这是由于管道出口连接大气压, 根据伯努利方程, 出口压力降低会导致该处流速增大。由图7(b)可以看出, 在冷却通道底部降温效果最明显, 这也是由于该区域流速较大, 并在底部形成驻点, 从而使得换热过程最为剧烈。

图8(a)所示为试验中1#至6#热电偶所测得的实际温度与计算温度结果对比。图8(b)所示为实测值与计算值的相对误差图, 每个测温点的相对误差均在5%以内。第二次重复试验的相对误差也均在5%以内, 表明数学模型计算的准确性和可靠性较高。在模型验证



(a) 冷却通道速度云图

(b) 冷却通道温度云图

图7 冷却通道计算结果云图

Fig. 7 Contour plot of cooling channel simulation results

准确的基础上, 分别计算了射流冲击换热过程中的雷诺数 (Re) 和努塞尔数 (Nu), 如图9所示。图9(a)展示了 Re 随时间的变化趋势, Re 随时间逐渐降低, 是因为在冷却试验中流速的逐步减小。同时, 计算了 Nu 随时间的变化, 如图9(b)所示, 发现其同样呈现下降趋势, 与 Re 的减少相对应。为了直观展示雷诺数与努塞尔数之间的关系, 绘制了 Nu 随 Re 变化的曲线图, 如图9(c)所示, 并对图中数据进行拟合, 得到拟合公式, $Nu = a \times Re^m$, 其中 $a = 1.012\ 44 \pm 0.123\ 61$, $m = 0.621\ 43 \pm 0.012\ 16$ 。当 Re 较大时, 流体流动的湍流程度增加, 湍流流动中的高速流体微团不断地冲击和

剥离边界层, 使得温度较低的流体不断接触到高温的固体表面, 提升了热交换的强度, 从而引起 Nu 的增加。

4 结论

本研究以汽车轮毂铸造模具中的一个冷却通道为研究对象, 探讨了该通道内的高速气体射流冲击冷却换热特性, 得出以下结论。

(1) 射流冲击的驻点位置, 温度降低速率最快, 降温幅度最大, 而冷却通道的柱面位置, 远离驻点, 温度降低速率最慢, 降温幅度最小。射流冲击的驻点

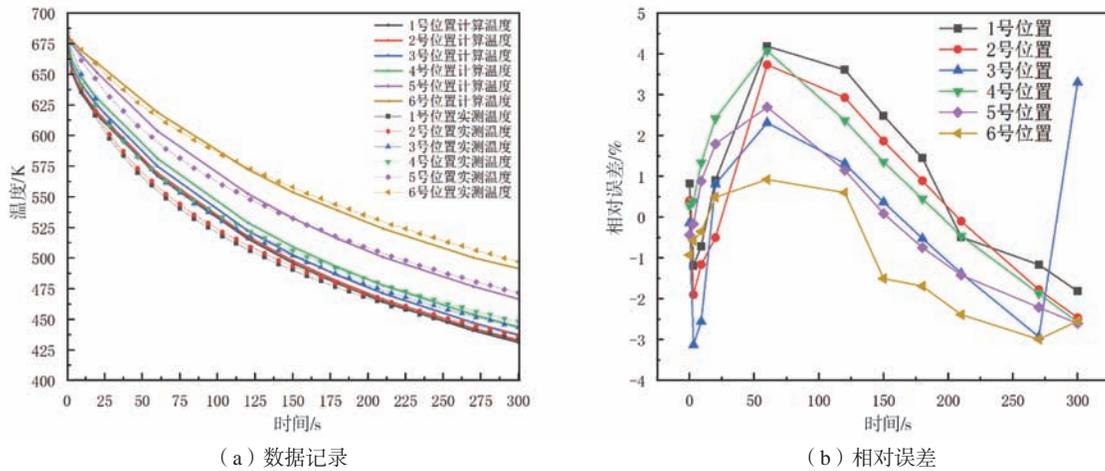
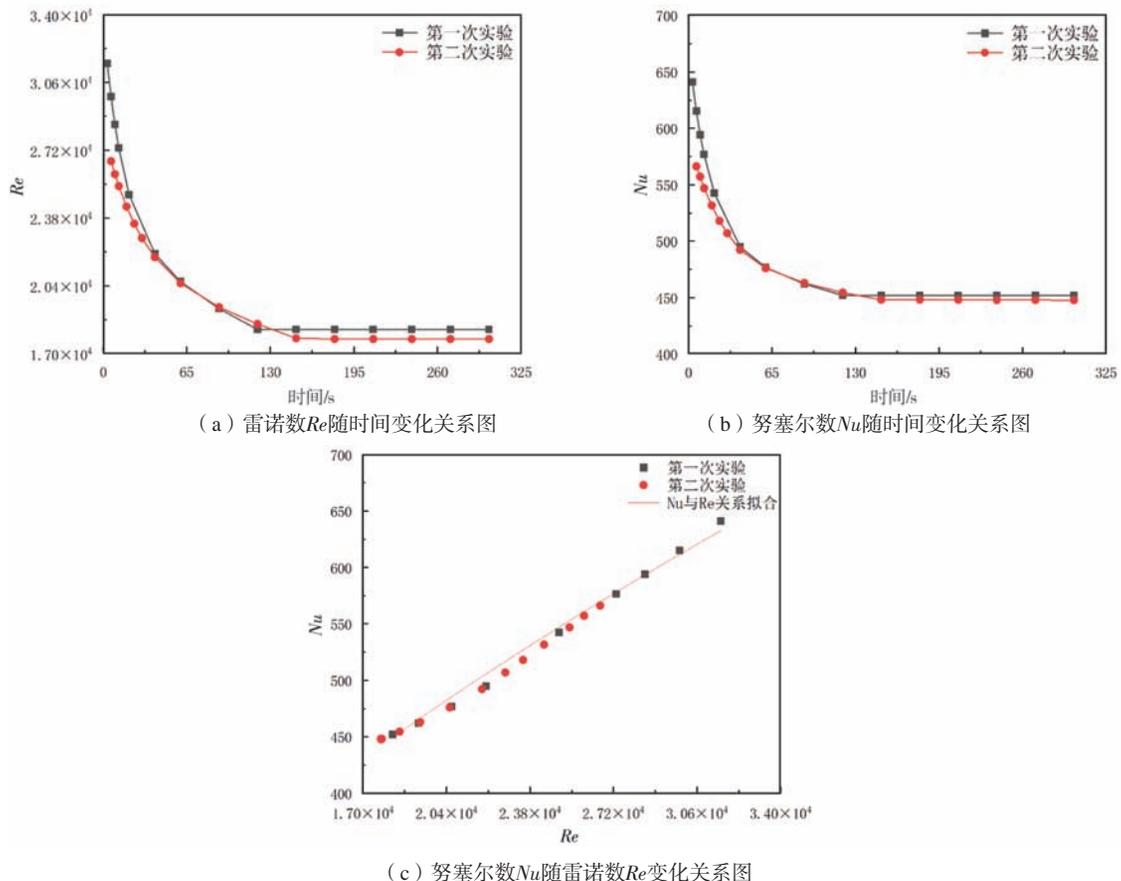


图8 试验验证情况

Fig. 8 Experimental verification results

图9 雷诺数 (Re) 和努塞尔数 (Nu) 变化规律Fig. 9 Variation patterns of reynolds number (Re) and nusselt number (Nu)

位置由于流体与固体表面之间的高效对流换热，温度迅速降低。相反，远离驻点的区域，由于流体流动的减弱和边界层厚度的增加，热交换效率降低，导致温度降低速率变慢。

(2) 模型计算结果与试验数据相对误差小于5%，证实了模型和计算方法的精确性和可靠性。当入口流速

增大时，雷诺数增加，流体的湍流程度增强，流体中的高速流体微团不断地冲击和剥离边界层，增强了热交换的强度，从而导致努塞尔数增加。

(3) 对试验中的对流换热系数以及冷空气流速进行分析，本研究获得了冷却通道内射流冲击换热过程中的努塞尔数 (Nu) 与雷诺数 (Re) 之间的关系，该关

系式可用于类似结构的换热系数计算。
本研究通过试验和计算流体动力学模型，探讨了

射流冲击冷却通道的传热特性，为铸造工艺模型的开发提供了更为精准的边界条件。

参考文献:

- [1] 朱孟帅, 邱剑涛, 陈赢. 强化换热方法在换热器中的应用研究 [J]. 能源与节能, 2020 (2): 58-61.
- [2] POLAT S, HUANG B, MUJUMDAR A S, et al. Numerical flow and heat transfer under impinging jets: a review [J]. Annual Reviews of Heat Transfer, 1989, 2 (2): 157-197.
- [3] 王祝堂. 铝合金轮毂工业的发展 [J]. 轻合金加工技术, 1994, 22 (3): 17-18.
- [4] MARYANI E, PURBA H H, SUNADI. Analysis of aluminium alloy wheels product quality improvement through DMAIC method in casting process: a case study of the wheel manufacturing industry in indonesia [J]. JESA, 2021, 54 (1): 55-62.
- [5] 韩波. 模具冷却方式对轮毂组织及性能的影响 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- [6] 何宇航, 卢德宏, 周振, 等. 冷却工艺对大型铝合金轮毂低压铸造缺陷的影响 [J]. 铸造, 2023, 72 (10): 1336-1344.
- [7] 李钟尧, 吴雪龙, 苗以升, 等. 低压铸造铝合金轮毂工艺参数对缩孔缺陷的影响 [J]. 铸造技术, 2024, 45 (2): 163-172.
- [8] 周振, 卢德宏, 何宇航, 等. 大尺寸铝合金轮毂双边浇注低压铸造工艺的模拟及优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44 (4): 484-489.
- [9] 孙全喜, 李淑利, 王伟, 等. 一种铝合金壳体压铸模具设计 [J]. 铸造, 2024, 73 (2): 220-223.
- [10] REIPERT P. Optimization of an extremely light cast aluminum wheel rim [J]. International Journal of Vehicle Design, 1985, 6 (4-5): 509-513.
- [11] MROWKA-NOWOTNIK G, SIENIAWSKI J. Microstructure and mechanical properties of C355.0 cast aluminium alloy [J]. Archives of Materials Science and Engineering, 2011, 47 (2): 85-94.
- [12] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册 [M]. 2版. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [13] 孙纪宁. ANSYS CFX 对流传热数值模拟基础应用教程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [14] 曾铭, 王晋研, 王刚志. 物理实验数据的线性与非线性拟合 [J]. 大学物理实验, 2017, 30 (2): 116-119.
- [15] 范福强, 邢素霞, 张俊举. 基于湍流模型的飞行器温度场数值仿真研究 [J]. 激光与红外, 2024, 54 (5): 766-773.

Simulation and Experimental Validation of High Velocity Gas Jet Impact Heat Transfer in Casting Die Cooling Channel

HE Xue-li¹, HOU Bai-kang¹, YANG Hao-yin¹, MA Xiao-ying², FENG Shu-wei², LUO Zhi-qun², CHEN Zhao-dong¹, WANG Jun-sheng³, DOU Rui-feng¹

(1. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. CITIC Dicastal Co., Ltd., Qinhuangdao 066011, Hebei, China; 3. Advanced Research Institute of Multidisciplinary Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract:

This study adopts computational fluid dynamics method to numerically simulate and experimentally investigate the transient heat transfer process of gas impingement jet in the cooling channel of aluminum alloy wheel hub casting die, and to obtain the rule of change of convective heat transfer coefficient in the cooling channel, and the wall temperature of the cooling channel. Compared with the experimental data, the results show that the mathematical model of the wall temperature prediction accuracy within $\pm 5\%$. It is found that the stationary point position has the highest heat transfer coefficient, while the side position of the cooling channel has a relatively low heat transfer coefficient. The heat transfer coefficient in the cooling channel increases gradually with the increase of gas inflow velocity. This study provides accurate boundary conditions for the simulation model of aluminum alloy wheel casting process.

Key words:

fluid dynamics; air jet impact; transient heat transfer; casting; simulation