

组合式射流冲击冷却壁面稳态传热特性仿真分析

赵 波^{1, 2}, 刘相宜¹, 王翼鹏¹, 金汝宁¹, 唐万松¹

(1. 四川大学机械工程学院, 成都 610065; 2. 四川省智能农机装备创新中心, 德阳 618000)

摘 要: 射流冲击是一种具有较高的局部换热效率的换热方式, 具有重要的工程应用价值. 以流体仿真软件 Fluent 为工具, 设计了多个喷嘴组合式的射流冲击冷却模型, 研究了组合式射流垂直和倾斜冲击壁面时的稳态传热过程, 讨论了喷嘴倾角和间距对壁面传热特性的影响. 发现随着斜喷嘴倾角增大, 组合式射流的壁面平均努塞尔数先逐渐增大然后减小; 组合式射流继承了单束直射流和斜射流的优点, 在保证滞止区传热效率较高的同时, 有效地提高了射流下游的传热效率并使壁温分布更加均匀; 当斜喷嘴靠近直喷嘴时, 组合式射流整体传热特性与单束斜射流相似; 当沿横向和纵向增大斜喷嘴与直喷嘴间距时, 壁面平均努塞尔数均增大.

关键词: 冲击射流; 组合式射流; 数值模拟; FLUENT; 稳态传热

中图分类号: O358 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2022.024002

Simulation analysis of steady-state heat transfer characteristics of combined jet impingement cooling on the wall

ZHAO Bo^{1, 2}, LIU Xiang-Yi¹, WANG Yi-Peng¹, JIN Ru-Ning¹, TANG Wan-Song¹

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Sichuan Center of Collaborative Innovation for Intelligent Agricultural Machinery, Deyang 618000, China)

Abstract: Jet impingement is a heat exchange method with high local heat exchange efficiency, and it is very important for engineering application. In this study, by means of fluid simulation software Fluent, a jet impingement cooling model with multiple nozzles was designed, the steady-state heat transfer characteristics of the process was studied when the combined jet impinges on the wall surface vertically and obliquely, and the influence of nozzle inclination angle and distance on the heat transfer characteristics of the wall was discussed. It is found that as the inclination angle of the oblique nozzle increases, the average Nusselt number of the combined jet gradually increases and then decreases. The combined jet inherits the advantages of the single straight jet and the oblique jet. It ensures heat transfer efficiency in the stagnation zone, improves the heat transfer efficiency downstream of the jet effectively and makes the wall temperature distribution more uniform in the meantime. When the oblique nozzle is close to the straight nozzle, the overall heat transfer characteristics of the combined jet are similar to that of the single oblique jet. When the distance between the inclined nozzle and the straight one is increased along the horizontal direction and the longitudinal direction, the average Nusselt number of the wall increases, the two high-temperature regions upstream from the nozzle area shift to the downstream, and the cooling ef-

收稿日期: 2021-09-10

基金项目: 四川省重大科技专项(2020YFSY0058)

作者简介: 赵波(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为对流传热传质统一场理论. E-mail: zhaobo@scu.edu.cn

iciency improves significantly.

Keywords: Fluent; Combined jet; Jet impingement; Numerical simulation; Steady state heat transfer

1 引言

射流冲击冷却的局部传热效果极好,尤其在滞止区能够获得极高的传热效率,因此广泛应用于航空航天、钢铁和玻璃等工程技术领域^[1-7]. Baghel 等^[8]通过数值仿真以及试验的方法研究了组合式喷嘴的传热特性,并且探究了雷诺数对驻点处的努塞尔数的影响,以及喷嘴倾角对射流传热特性的影响; Hosain 等^[9]研究了恒温以及恒热流密度两种边界条件下,单束射流的水流量对冲击壁面传热特性的影响,发现喷嘴出口水流量与努塞尔数分布呈正相关;耿丽萍等^[10]通过数值模拟的方法对带相差的多喷嘴射流冲击传热进行数值模拟,研究不同相差和不同射流频率对冲击传热特性的影响; Mishra 等^[11]采用粒子图像测速技术研究了射流冲击间距和倾角对液体浸没射流流动特性的影响; Yeranee 等^[12]通过数值模拟以及试验研究了膨胀管管长对于冲击射流阵列的传热增强和流动特性的影响; Hattori 等^[3]研究了有限空间内撞击射流的平面湍流流动结构以及传热特性; 周定伟等^[13]对圆形液体浸没层流射流的流场结构和驻点的单相传热进行了数值模拟,研究了充分发展的管形喷嘴在雷诺数为定值的情况下,喷嘴直径对驻点处努塞尔数的影响.

对单束射流冲击冷却而言,虽然在滞止区具有较高的局部传热效率外,但是不可避免地在壁面射流区存在冷却不均的现象. 另一方面,实际生产中受喷嘴的结构、承载能力和使用寿命等因素限制,单束射流的冷却能力和范围十分有限,已

不能满足日益增长的工业需求. 鉴于此,本文提出了多个喷嘴协同作用的组合式射流冲击冷却模型,通过数值仿真的方法研究了喷嘴倾角及间距对其传热特性的影响,为工程应用提供了一定的设计基础和工业指导.

2 数值模拟及计算

数值仿真过程中,速度入口的流体速度的大小由所设置的射流雷诺数 Re 换算得到. 雷诺数 Re 是表征粘性影响的相似准则数,是一个无量纲量^[14]. 一般认为冲击射流 $Re < 2500$ 时为层流射流^[15],射流中雷诺数的具体表达式^[16,17]:

$$Re = \frac{\rho w_{\infty} l}{\mu} = \frac{w_{\infty} l}{\nu}$$
 (1)

式中, w_{∞} 为喷嘴出口速度; l 为喷嘴特征尺寸(方形喷嘴的边长); ν 为流体运动粘度.

努塞尔数 Nu 是考量射流换热效率的重要参数^[18], Nu 是表征对流换热强弱的无量纲量,表示壁面法线方向上的流体的无量纲温度梯度,其大小等于换热系数与特征长度的乘积与流体热导率之比^[19]. 局部 Nu 的表达式^[20]:

$$Nu = \frac{q_s l}{(T_s - T_{\infty}) \lambda}$$
 (2)

式中, q_s 为壁面热流密度; T_s 为壁面温度; T_{∞} 为喷嘴出口流体平均温度; λ 为热传导系数. 平均 Nu_{avg} 的表达式^[21,22]:

$$Nu_{avg} = \frac{q_s l}{(T_{avg} - T_{\infty}) \lambda}$$
 (3)

式中, T_{avg} 为壁面平均温度或沿流向的平均温度.

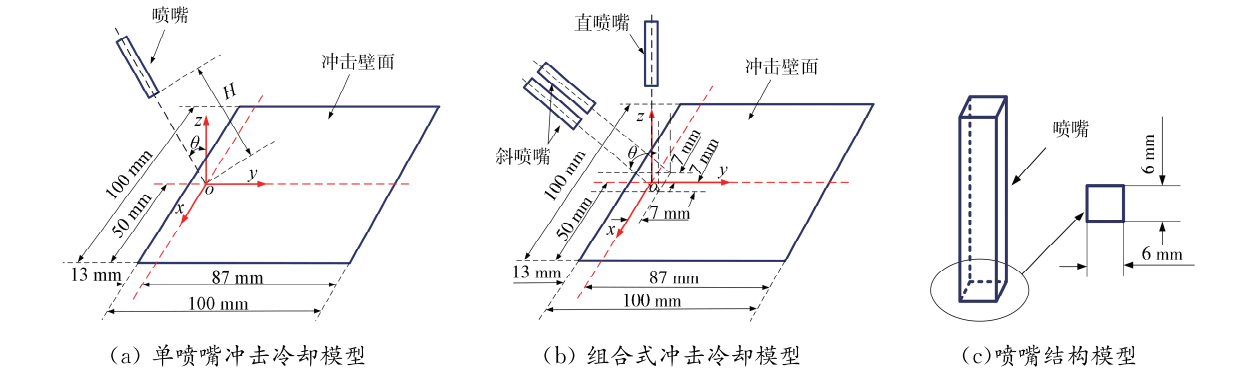


图 1 射流冲击冷却模型
Fig. 1 Jet impingement cooling model

2.1 模型建立

数值模拟的模型如图 1 所示, 冷却水自喷嘴射出, 流经空气域, 对高温壁面进行冲击冷却. 组合式射流冲击冷却模型中直喷嘴两侧的斜喷嘴倾角均为 $\theta=60^\circ$. 两个斜喷嘴的轴心线与壁面的交点距 x 和 y 轴的距离均为 7 mm, 如图 1a 所示. 喷嘴出口截面和冲击壁面尺寸分别为 $6\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 和 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的方形薄壁结构, 方喷嘴的特征长度 l 为喷嘴出口, 边长 6 mm, 喷嘴几何参数如图 1c 所示. 以直喷嘴轴心线与壁面的交点为原点建立笛卡尔坐标系, x 、 y 和 z 轴的正方向如图 1a 所示, 分别称为纵向、横向和垂向, 流体沿 x 、 y 和 z 轴正方向的流速分别为 u 、 v 和 w . 整个模型关于 yoz 面对称, 定义 y 轴负方向($y<0$)区域为射流上游, y 轴正方向($y>0$)区域为下游.

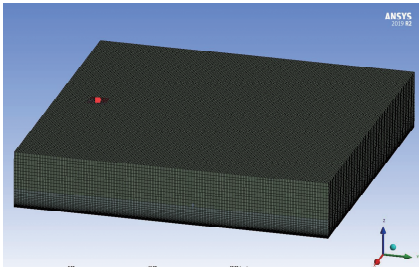
2.2 网格划分及边界条件

采用六面体结构化网格对整个计算域进行划分, 如图 2 所示. 由于流固交界面与壁面传热密切相关, 为了保证仿真的准确性, 有必要对此处的网格进行加密处理, 使 $y^+=(u^*y)/\nu$ 接近于 1, 其中 u^* 为近壁面流体速度, y 为流固交界面处第一

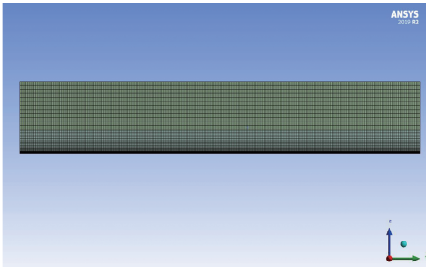
层网格的高度, ν 为流体的运动粘度.

数值求解过程采用基于压力 (pressure-based) 的稳态 (steady) 3D 数值求解器. 重力加速度为 -9.81 kg/s^2 , 并开启能量方程. 仿真所采用的雷诺数 Re 为 $5964>2300$, 故射流模型为湍流模型, 采用 SST $k-\omega$ 模型. 对于压力-速度耦合, 采用 SIMPLE 算法进行求解. 动量、能量、湍动能和湍流耗散率方程均采用二阶迎风格式 (second order upwind) 离散. 数值计算结果以连续性、动量、能量、湍动能、湍流耗散率方程和水相体积分数的残差小于 10^{-6} 作为收敛判据.

冲击射流过程是冷却水以一定速度射入空气中的过程, 所以仿真采用 VOF 模型. 喷嘴入口边界采用速度入口 (velocity-inlet), 并将水的 Volume Fraction 设置为 1, 即速度入口充满水, 其速度的大小由所设置的射流雷诺数 Re 换算得到. 空气入口和射流出口分别设置为压力入口 (pressure-inlet) 和压力出口 (pressure-outlet), 表压值设为 0, 操作压力为 1 个标准大气压, 模拟连通大气的情况. 冲击壁面无滑移速度, 且保持恒定热流密度. 其他参数设置见表 1.



(a) 整体网格划分
(a) Overall meshing



(b) 流固交界面处网格划分示意图
(b) Schematic diagram of meshing at fluid-solid interface

图 2 网格划分示意图
Fig. 2 Schematic diagram of meshing

2.3 模拟工况

组合式射流冲击冷却模型同图 1, 同步改变两个斜喷嘴的倾角 θ , 探究喷嘴倾角对壁面传热特性的影响, 模拟工况如表 1 所示.

表 1 模拟工况
Tab. 1 Simulation conditions

| 工况 | H/mm | $\theta/(\text{^\circ})$ | Re | 冷却水温 度 T_∞/K | 环境温度 T_a/K | 壁面热流密 度 $q_s/(\text{W/m}^2)$ |
|----|---------------|--------------------------|------|-------------------------------|------------------------|---------------------------------|
| 一 | 18 | 0 | 5964 | 293.15 | 293.15 | 6×10^4 |
| 二 | 18 | 30 | 5964 | 293.15 | 293.15 | 6×10^4 |
| 三 | 18 | 45 | 5964 | 293.15 | 293.15 | 6×10^4 |
| 四 | 18 | 60 | 5964 | 293.15 | 293.15 | 6×10^4 |

3 结果及讨论

3.1 喷嘴倾角对壁面传热特性的影响

3.1.1 壁面温度云图 图 3 显示组合式射流不同倾角下的壁面温度分布云图. 整体上看, 低温区呈对称分布, 滞止区温度最低. 随着斜喷嘴倾角的增大, 上游低温区逐渐收缩, 下游低温区逐渐扩大, 具体表现为低温区向下游转移并发生变形. 流体自直喷嘴射出到达壁面形成附壁横流, 两个斜喷嘴射出的流体接触横流后相互撞击, 部分流体向上抬升, 各处壁面传热不均导致壁温分布不均匀. 斜喷嘴倾角越小, 射流之间撞击就越激烈, 流体抬

升的程度就越大. 特别是 $\theta=0^\circ$ 时, 两个斜喷嘴之间大部分流体被抬升脱离壁面呈抛物状冲击射流下游, 造成下游区域的壁温分布极不均匀, 因此 $\theta=0^\circ$ 的壁面温度云图与其它三种工况存在显著的差异. 随着斜喷嘴倾角的增大, 上游区域远离喷嘴

位置逐渐形成两个高温区, 与此相反, 下游区域的冷却效果明显提升, 产生这种现象的主要原因是由于斜喷嘴倾角的增大, 使射流下游的流速增加, 增加了对壁面热对流的贡献, 从而提升了冷却效果.

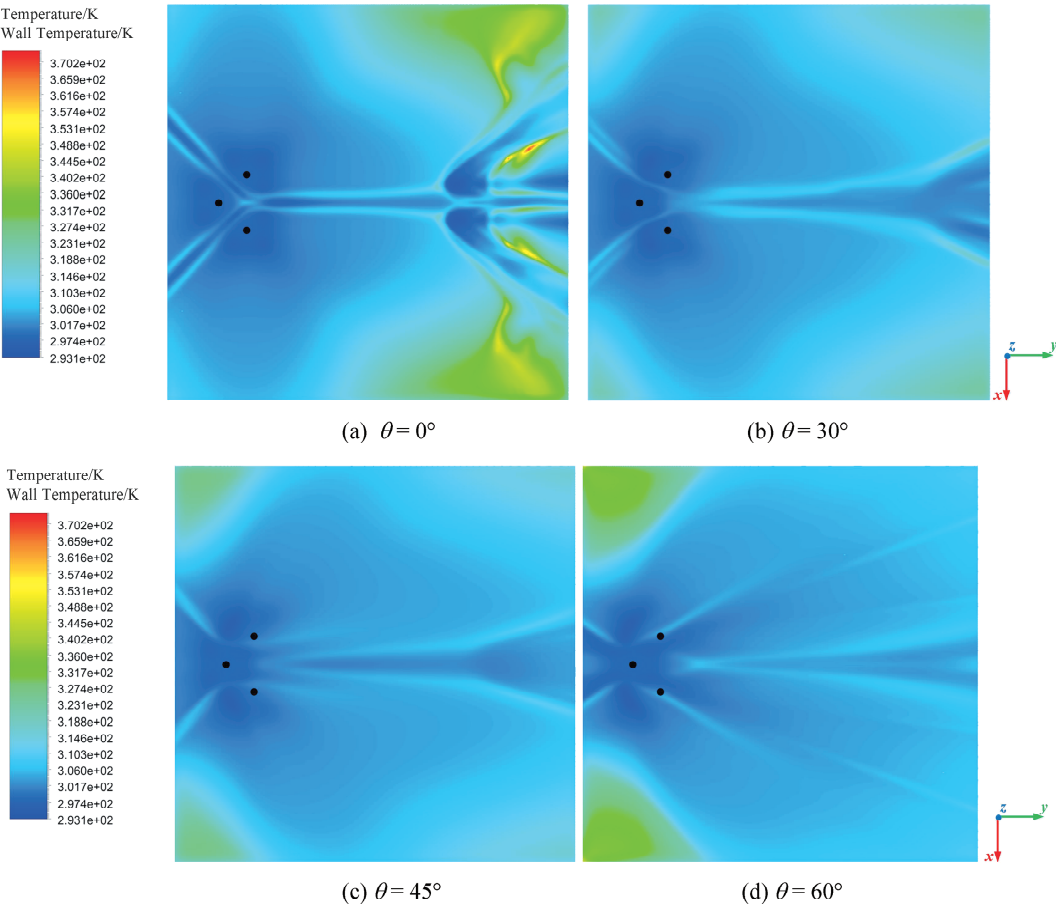


图 3 组合式射流在不同倾角下的壁面温度云图
Fig. 3 The wall temperature cloud maps of the combined jet at different inclination angles

3.1.2 传热特性分析 组合式射流冲击冷却模型关于 yoz 面对称, 因此这里只分析 $x>0$ 区域壁

度及努塞尔数分布进行对比, 如图 4 所示. 其中直线 $x=0\text{ mm}$ 和 $x=7\text{ mm}$ 分别位于直喷嘴和斜喷嘴的正下方.

图 5a 为直线 $x=0\text{ mm}$ 上努塞尔数分布对比, 该位置处于直喷嘴正下方. 见图可知, 几何中心 O 处的努塞尔数变化不大, 这主要是因为斜喷嘴对几何中心 O 附近垂向流速影响较小; 靠近喷嘴区域, 斜喷嘴倾角越大, 直线 $x=0\text{ mm}$ 上的努塞尔数越大; 远离喷嘴区域, 除 $\theta=0^\circ$ 时波动较大外, 其余努塞尔数分布平稳, 且随着倾角的增大而减小, 主要是因为 $\theta=0^\circ$ 时两个斜喷嘴之间的流体受压迫的程度较大, 流场波动较大, 随着斜喷嘴倾角增大, 三束射流的相互干涉减弱, 流场趋于平稳.

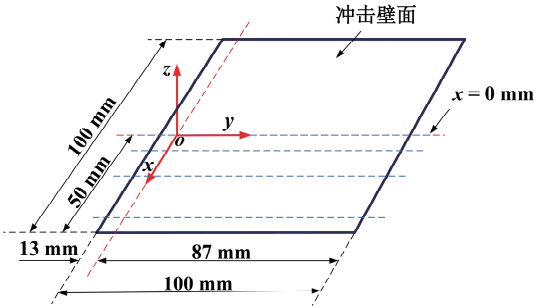


图 4 冲击壁面示意图
Fig. 4 Schematic diagrams of impact wall

面传热特性的变化. 取壁面上 $x=0\text{ mm}$ 、 $x=7\text{ mm}$ 、 $x=20\text{ mm}$ 和 $x=40\text{ mm}$ 四条直线上的温

图 5b 为直线 $x = 7\text{ mm}$ 上努塞尔数分布对比, 此处位于斜喷嘴的正下方. 由于靠近喷嘴区域, 随着斜喷嘴倾角增大, 直线 $x = 7\text{ mm}$ 上的努塞尔数峰值增大, 且峰值对应的位置向上游转移; 远离喷嘴区域, 除 $\theta = 0^\circ$ 外, 其余倾角下的努塞尔数分布相对平稳, 仅在末端出现波动.

图 5c 和 d 努塞尔数的整体分布特征相近. 图 5c 以 $y/l = 5.5$ 为分界点, 分界点以左, 努塞尔数随着斜喷嘴倾角的增大而减小; 分界点以右则

情况相反. 图 5d 则以 $y/l = 3$ 为分界点, 努塞尔数变化趋势与图 5c 相同.

整体上看, 在 $x > 0$ 区域, 组合式射流壁面传热特性大致可分为两部分, 以直线 $x = 7\text{ mm}$ 为界限(即斜喷嘴所处位置), $0 < x < 7\text{ mm}$ 区域(即斜喷嘴与直喷嘴之间的区域)的壁面传热特性由单束直射流逐渐向单束斜射流过渡, 而 $x > 7\text{ mm}$ 区域(即远离斜喷嘴区域)则与单束斜射流相近.

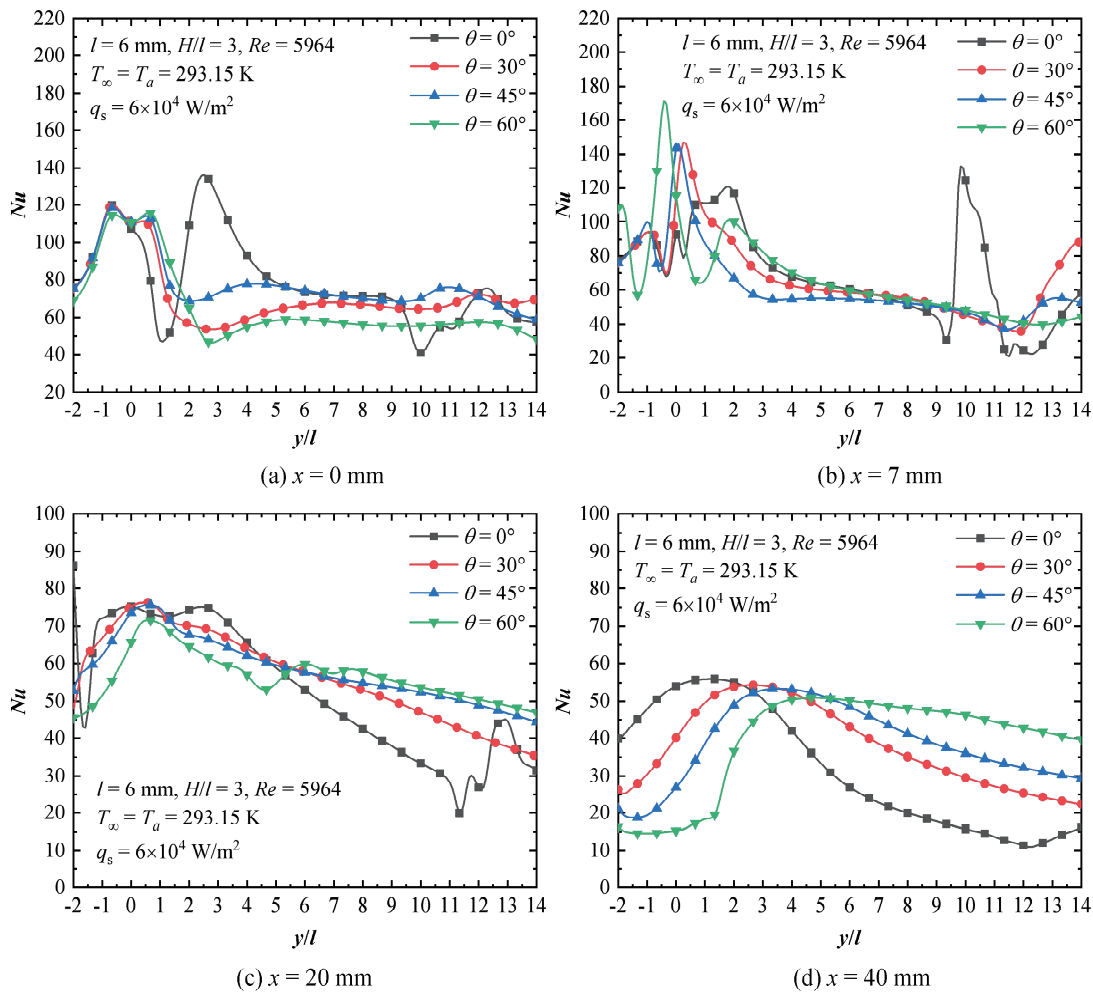


图 5 壁面不同位置处努塞尔数分布对比
Fig. 5 Comparison of Nusselt number distributions at different positions on the wall

以上虽然对比了组合式射流不同倾角下各位置的努塞尔数分布, 但这并不能描述整个壁面的传热情况, 因此还需对比整个壁面的平均努塞尔数 Nu_{avg} , 如图 6 所示. 随着斜喷嘴倾角增大, 壁面平均努塞尔数逐渐增大, 当 $\theta = 45^\circ$ 时, 达到最大值, 继续增大倾角, 平均努塞尔数开始减小. 这是因为斜喷嘴的出现使组合式射流的壁面传热特性整体上与单束斜射流相似, 主要表现为上下游

的传热特性相互影响且保持相反作用. 因此不可能无限增大斜喷嘴的倾角, 理论上存在一个最优值, 保证在提高射流下游的冷却效率的同时, 尽量减弱对射流上游的削弱, 从而保证壁面整体的冷却效果. 在本文工况下, $\theta = 45^\circ$ 时壁面平均努塞尔数相较于 $\theta = 60^\circ$ 、 $\theta = 30^\circ$ 和 $\theta = 0^\circ$ 分别提高了 5.4%、3.6% 和 33.3%.

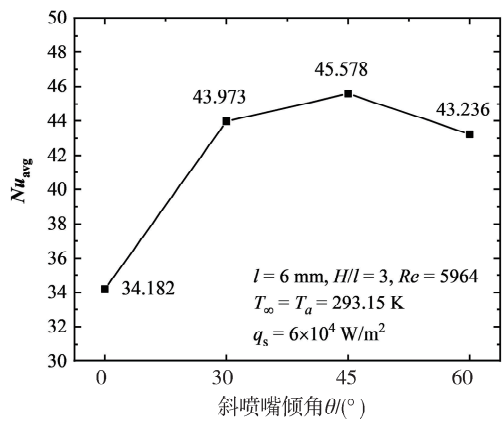


图 6 不同倾角下壁面平均努塞尔数对比
Fig. 6 Comparison of the average Nusselt number of the wall at different inclination angles

3.2 喷嘴间距对壁面传热特性的影响

3.2.1 喷嘴布置 以斜喷嘴倾角 $\theta=60^\circ$ 的组合式射流冲击冷却模型为例, 数值仿真模型同图 1b, 改变斜喷嘴的位置, 分析喷嘴间距对组合式射流壁面传热特性的影响. 如图 7 所示, A、B、C、D、E 和 F 分别表示斜喷嘴轴线与壁面的交点, 两个斜喷嘴关于 yoz 面对称分布. 首先将 B 处的斜喷嘴沿横向分别移至 A、C 和 D 处, 即 $y=0$ mm, $y=15$ mm 和 $y=30$ mm 处; 然后再沿纵向分别移至 E 和 F 处, 即 $x=20$ mm 和 $x=40$ mm 处. 网格划分、三个喷嘴的边界条件和求解设置同前文所述.

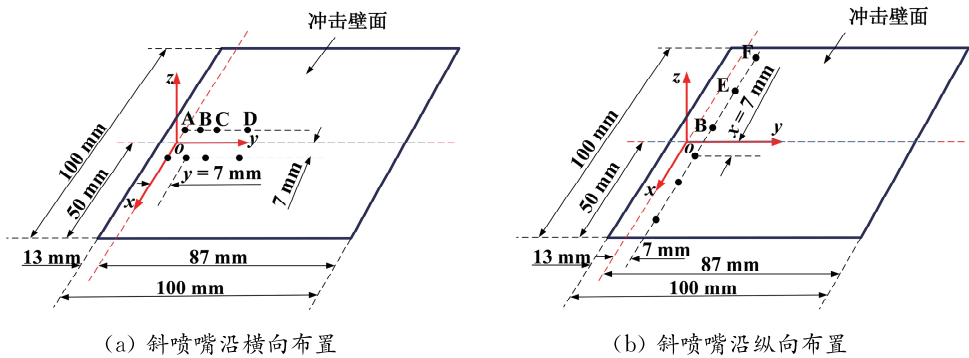


图 7 斜喷嘴不同位置分布示意图
Fig. 7 Schematic diagrams of the distribution of different positions of the oblique nozzle

3.2.2 壁面温度分布云图 图 8 为斜喷嘴沿横向布置时的壁面温度分布云图. 由于喷嘴是对称布置, 所以壁温整体呈对称分布. 当斜喷嘴位于 A 处时, 三束射流作用强烈, 流场波动较大, 壁温分布极不均匀; 位于 B 处时, 三束射流充分掺混, 流场稳定, 下游壁温分布较为均匀, 但上游远离喷嘴位置明显存在两个高温区, 总体壁温分布特征与单束斜射流相近; 分别位于 C 和 D 处时, 直喷嘴与斜喷嘴距离增大, 二者开始保持各自的传热特性, 出现明显分界, 且随着两者距离的增加高温区逐渐向下游转移, 同时高温区冷却效果变好. 图 9 为斜喷嘴沿纵向布置时的壁面温度分布云图. 当斜喷嘴沿纵向位于 E 处时, 两个高温区作用范围减小, 但射流下游冷却效果逐渐变差; 位于 F 处时, 两个高温区完全消失, 与此同时下游的冷却效果进一步变差. 对比上述六种工况, 发现当斜喷嘴沿横向布置位于 B 处时, 射流下游冷却较为均匀; 纵向布置位于 E 和 F 处时, 整体冷却效果较好, 但是下游冷却相对不均匀, 冷却效果较差.

3.2.3 传热特性分析 图 10 为斜喷嘴沿横向布置时努塞尔数分布对比. 图 10a 为直线 $x=0$ mm 上努塞尔数分布对比, 此处位于直喷嘴正下方. 靠近直喷嘴区域, 壁面努塞尔数分布特征与单束直射流相近, 且随着直喷嘴与斜喷嘴间距的增大, 努塞尔数逐渐增大. 当斜喷嘴移至 C 和 D 处时, 直喷嘴附近塞尔数分布特征几乎一致, 显然此时斜喷嘴对直喷嘴附近传热特性不再产生影响; 远离喷嘴的下游区域, 随着直喷嘴与斜喷嘴间距的增大, 努塞尔数增大. 其中斜喷嘴位于 D 处时努塞尔数波动较大, 具体表现为在 $y/l=4.5$ 附近出现努塞尔数峰值. 直线 $x=7$ mm 位于斜喷嘴正下方, 壁面努塞尔数整体分布特征与单束斜射流相近, 如图 10b 所示, 随着斜喷嘴向下游布置, 努塞尔数峰值逐渐向下游转移. 图 10c 和 10d 显示直线 $x=20$ mm 和 $x=40$ mm 处努塞尔数分布特征比较紊乱, 尤其是斜喷嘴位于 A 处时最为明显.

图 11 为斜喷嘴沿横向布置时壁面平均努塞尔

数分布对比. 随着斜喷嘴与直喷嘴间距的增大, 壁面平均努塞尔数逐渐增大. 斜喷嘴位于 D 处时壁面平均努塞尔数相较于位置 C、B 和 A 处分别提高了 7.5%、10.7% 和 26.9%.

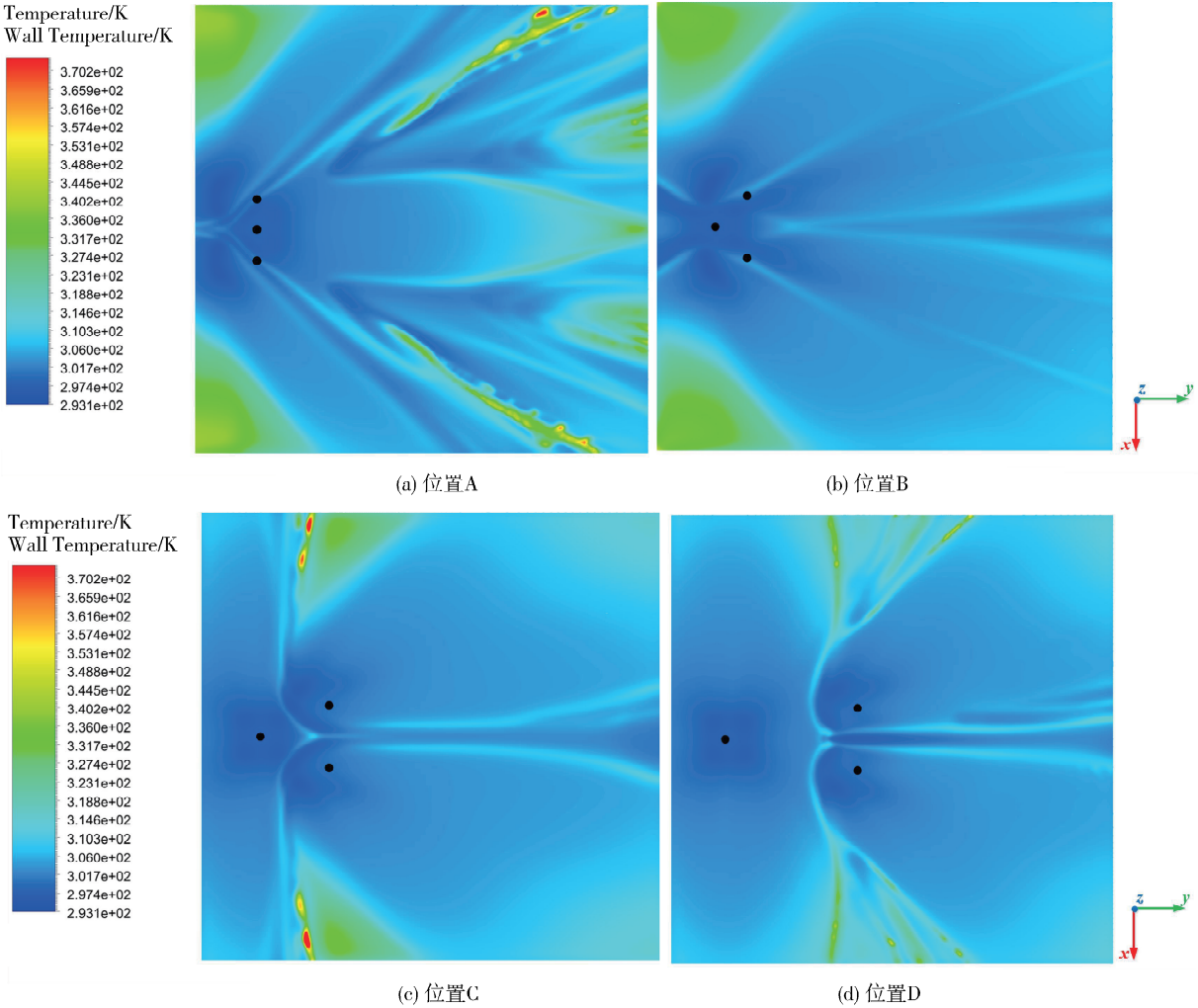


图 8 斜喷嘴沿横向布置时壁温云图
Fig. 8 Wall temperature cloud diagrams with inclined nozzles being arranged horizontally

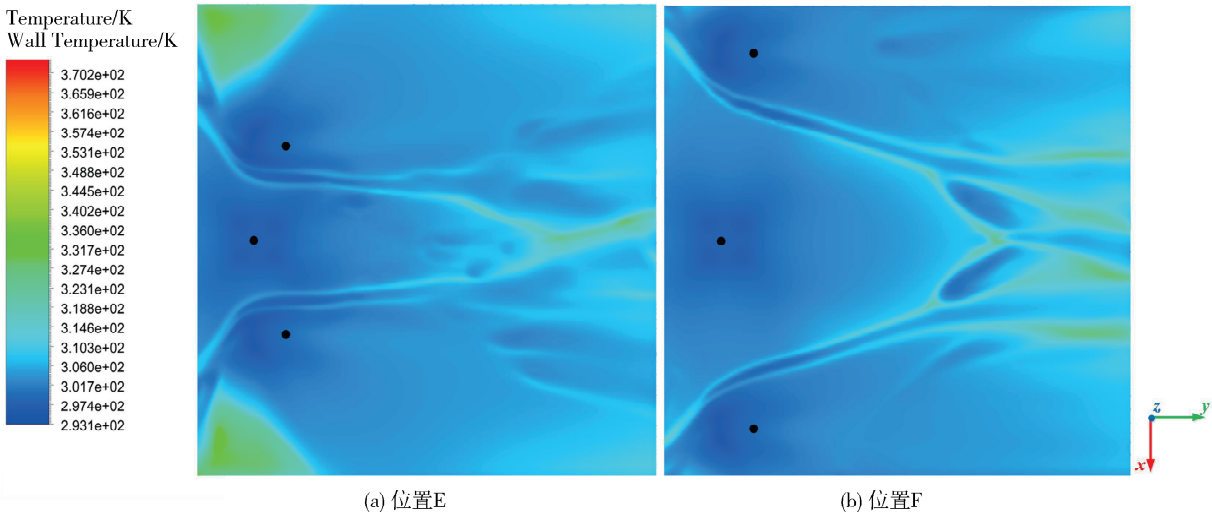


图 9 斜喷嘴沿纵向布置时壁温云图
Fig. 9 Wall temperature cloud diagrams with inclined nozzles being arranged longitudinally

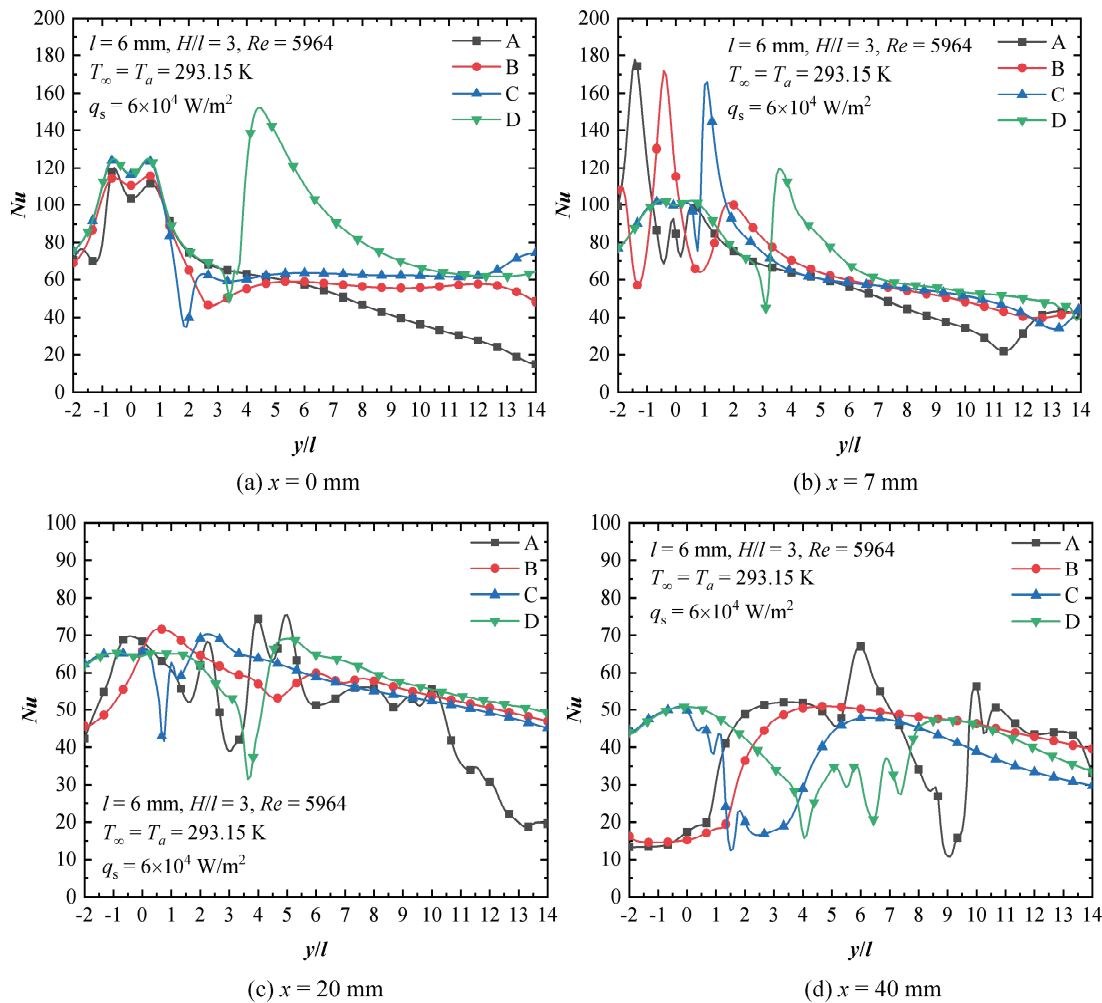


图 10 斜喷嘴沿横向布置时努塞尔数分布对比

Fig. 10 Comparison of Nusselt number distributions with inclined nozzles being arranged horizontally

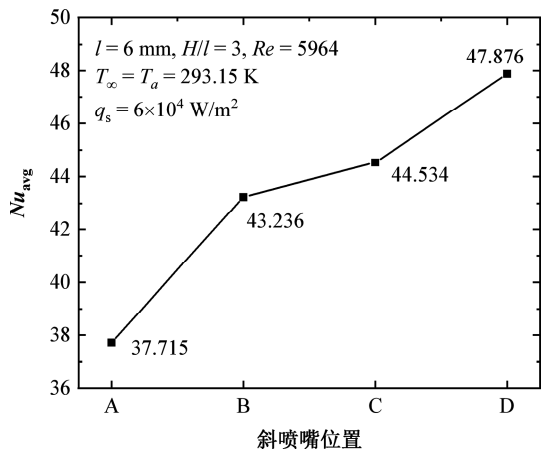


图 11 斜喷嘴沿横向方向布置时平均努塞尔数对比

Fig. 11 Comparison of average Nusselt numbers with inclined nozzles being arranged horizontally

图 12 为斜喷嘴沿纵向布置时努塞尔数分布对比。图 12a 显示随着斜喷嘴与直喷嘴间距的增大，斜喷嘴对直喷嘴附近的影响逐渐减弱，主要表现为直喷嘴所在位置附近的努塞尔数分布特征趋于一致。图 12b、12c 和 12d 的努塞尔数分布规律相近，除斜喷嘴所在位置附近存在努塞尔数峰值外，其余位置三种工况差别不大。

图 13 为斜喷嘴沿纵向布置时壁面平均努塞尔数分布对比。显然随着斜喷嘴与直喷嘴距离的增大，壁面平均努塞尔数逐渐增大。斜喷嘴位于 F 处时壁面平均努塞尔数相较于 B 和 E 处分别提高了 16.3% 和 5.8%。

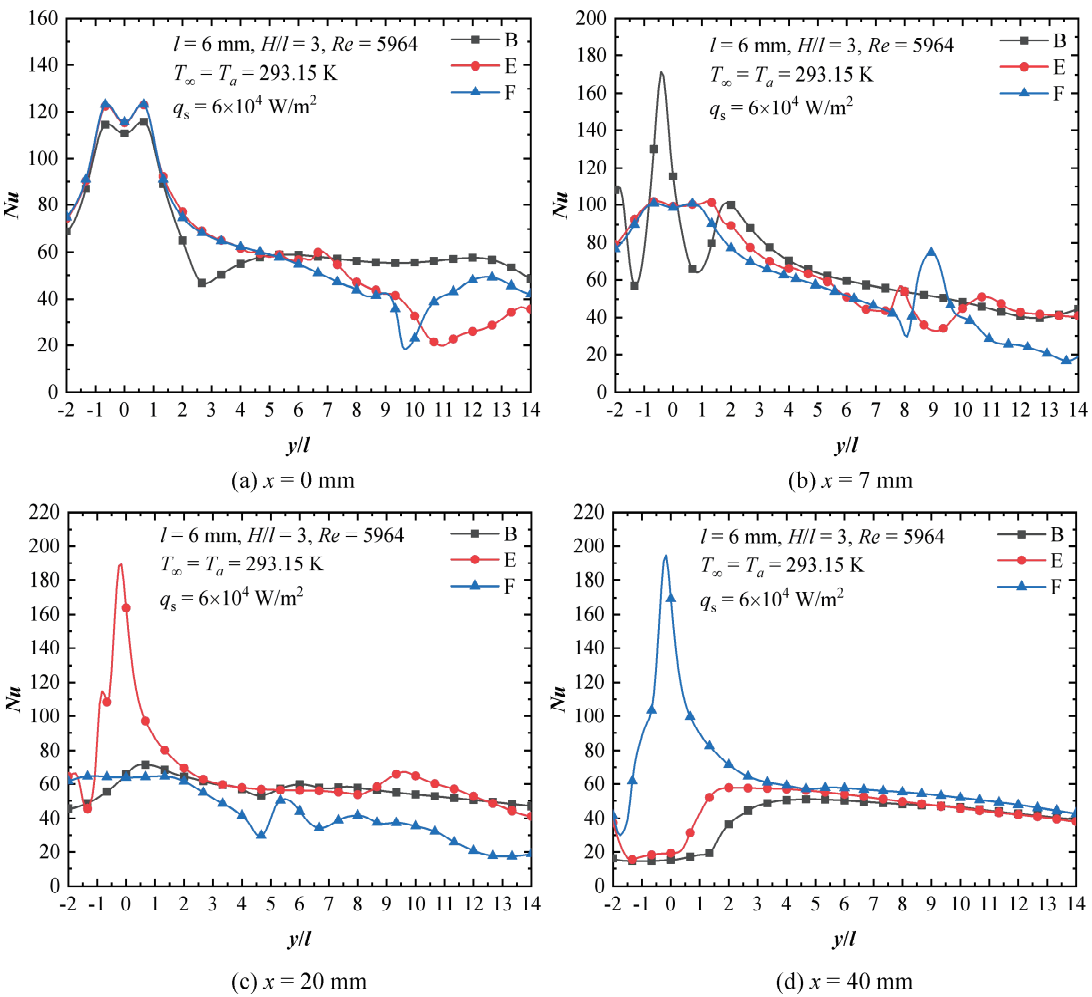


图 12 斜喷嘴沿纵向布置时努塞尔数分布对比
Fig. 12 Comparison of Nusselt number distributions with inclined nozzles being arranged longitudinally

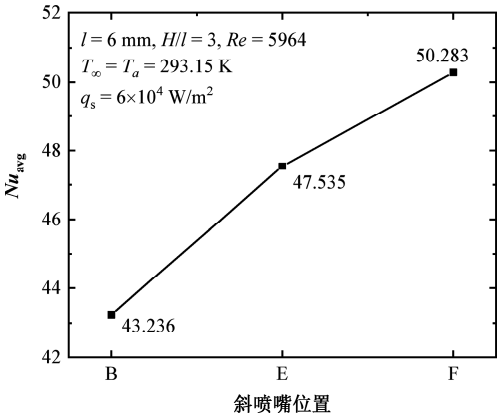


图 13 斜喷嘴沿纵向布置时平均努塞尔数对比
Fig. 13 Comparison of average Nusselt numbers with inclined nozzles being arranged longitudinally

4 结 论

本文以液体非浸没射流为研究对象,以流体仿真软件 Fluent 为工具,数值模拟了合式射流冲击冷却模型中斜喷嘴倾角及间距对壁面传热特性

的影响。

(1) 当斜喷嘴靠近直喷嘴时,组合式射流整体换热特征与单束斜射流相似. 随着斜喷嘴倾斜角度的增大,组合式射流下游冷区效果明显增强,而上游远离喷嘴区域的冷却效果被削弱,同时壁面平均努塞尔数先增大后减小,斜喷嘴倾角存在最优值。

(2) 当斜喷嘴沿横向远离直喷嘴时,壁面平均努塞尔数逐渐增大;斜喷嘴与直喷嘴之间的相互作用减弱,二者开始保持各自的传热特性,出现明显分界;上游远离喷嘴区域的高温区向下游转移且冷却效果逐渐变好. 当斜喷嘴沿纵向远离直喷嘴时,壁面平均努塞尔数逐渐增大;上游远离喷嘴区域的高温区逐渐减小直至消失,同时射流下游壁温的均匀性不断变差。

参考文献:

[1] 周娜,于明,吴迪,等. 圆形喷嘴射流对钢板冷却

- 的数值模拟[J]. 轧钢, 2008, 25: 7.
- [2] 周钢, 温治, 豆瑞锋, 等. 单圆孔气体冲击射流冷却高温钢板瞬态传热特性[J]. 金属热处理, 2014 (4): 121.
- [3] Hattori H, Nagano Y. Direct numerical simulation of turbulent heat transfer in plane impinging jet [J]. Int J Heat Fluid Fl, 2004, 25: 749.
- [4] Yeranee K, Wae-Hayee M, Piya I, *et al.* Effects of expansion pipe length on heat transfer enhancement of impinging jet array [J]. J Mech Sci Technol, 2019, 33: 2429.
- [5] 张靖周, 刘波, 徐华胜. Experimental investigation on flow and heat transfer of jet impingement inside a semi-confined smooth channel [J]. 南京航空航天大学学报: 英文版, 2014, 31: 16.
- [6] 周雷声, 朱惠人, 许都纯, 等. 带射流收缩通道内部换热特性数值模拟[J]. 机械设计与制造, 2011 (6): 230.
- [7] 朱泽辉, 聂欣, 廖海波. 基于低雷诺数模型冲击射流传热的数值模拟[J]. 水电能源科学, 2021 (4): 158.
- [8] Baghel K, Sridharan A, Murallidharan J S. Experimental and numerical study of inclined free surface liquid jet impingement [J]. Int J Therm Sci, 2020, 154: 106389.
- [9] Hosain M L, Fdhila R B, Daneryd A. Multi-jet impingement cooling of a hot flat steel plate [J]. Energy Procedia, 2014, 61: 1835.
- [10] 耿丽萍, 许庆功, 郑传波, 等. 多喷嘴带相差射流冲击传热的数值模拟[J]. 化工学报, 2014 (S1): 240.
- [11] Mishra A, Yadav H, Djenidi L, *et al.* Experimental study of flow characteristics of an oblique impinging jet [J]. Exp Fluids, 2020, 61: 90.
- [12] Yeranee K, Wae-Hayee M, Piya I, *et al.* Effects of expansion pipe length on heat transfer enhancement of impinging jet array [J]. J Mech Sci Technol, 2019, 33: 2429.
- [13] 周定伟, 马重芳. 圆形液体浸没射流冲击驻点传热的数值模拟[J]. 北京工业大学学报, 2001 (3): 316.
- [14] 叶纯杰, 范俊生, 潘红良. 倾斜射流对移动平板表面紊动和传热特性的影响[J]. 动力工程学报, 2012, 32: 315.
- [15] 董志勇. 冲击射流[M]. 北京: 海洋出版社, 1997.
- [16] 朱凯迪. 高速飞行器空气涡轮气动及冷却结构设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [17] Gabour L A, Lienhard J H V. Wall roughness effects on stagnation-point heat transfer beneath an impinging liquid jet [J]. J Heat Transfer, 1994, 116: 81.
- [18] 赵永杰, 卢永锦. 高速高温射流冲击传热特性的数值模拟[J]. 机电设备, 2010, 27: 47.
- [19] 陈庆光, 徐忠, 张永建. 湍流冲击射流流动与传热的数值研究进展[J]. 力学进展, 2002, 32: 92.
- [20] Gardon R, Akfirat J C. The role of turbulence in determining the heat-transfer characteristics of impinging jets [J]. Int J Heat Mass Tran, 1965, 8: 1261.
- [21] 王玉艳, 王鹏, 白敏丽, 等. 射流冲击冷却过程的数值研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2016, 37: 692.
- [22] 史强, 丁建宁, 樊宝伟, 等. 射流冷却超薄玻璃的数值模拟研究[J]. 常州大学学报: 自然科学版, 2017, 29: 12.

引用本文格式:

中文: 赵波, 刘相宜, 王翼鹏, 等. 组合式射流冲击冷却壁面稳态传热特性仿真分析[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2022, 59: 024002.

英文: Zhao B, Liu X Y, Wang Y P, *et al.* Simulation analysis of steady-state heat transfer characteristics of combined jet impingement cooling on the wall [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2022, 59: 024002.