

文章编号: 1000-8055(2009)01-0007-06

微阵列射流冲击肋化表面传热特性

夏国栋, 贾 真, 陈永昌

(北京工业大学 环境与能源工程学院

传热强化与过程节能教育部重点实验室, 北京 100022)

摘 要: 以去离子水为工质, 对微阵列射流冲击光滑和肋化表面的传热特性进行了实验研究, 并以光滑表面传热性能为基准, 讨论了肋化表面强化因子(ε)变化规律. 实验结果表明: ① 浸没和自由射流的传热系数均受无量纲射流距离(H/d)影响; 提高射流 Re 数和减小无量纲孔间距(S/d)都能够增强换热. ② 浸没射流 ε 受 H/d 影响大, 而自由射流 ε 基本不受 H/d 影响; 两种射流方式的 ε 都随 Re 数增大, 且渐趋于一个常数. ③ 对流热阻在各种射流情况下均随流量不断下降, 但下降趋势逐渐平缓, 当流量大到一定时, 热阻基本不再降低.

关 键 词: 微阵列射流; 肋化表面; 强化因子; 对流热阻

中图分类号: V231.1; TK124

文献标识码: A

Investigation on heat transfer of micro-jet array impinging on pin fin surface

XIA Guo-dong, JIA Zhen, CHEN Yong-chang

(Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation,
Ministry of Education, College of Environmental and Energy Engineering,
Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: An investigation on heat transfer of a micro-jet array impinging smooth and pin fin surfaces was conducted. The experimental results indicate that: (1) the dimensionless nozzle to target spacing (H/d) has notable effects on heat transfer coefficient of both free surface and submerged jet impingement, and heat transfer may be enhanced with increasing Reynolds number or decreasing dimensionless jet to jet spacing (S/d). (2) the enhancement factor (ε) is not influenced by H/d for free surface jet, but it is sensitive to variation of H/d for submerged jet. For both free surface and submerged jet impingement, ε increases with increasing Re . (3) The convection resistance decreases, at first rapidly and then slowly, with increasing liquid flow rate.

Key words: micro-jet array; pin fin surface; enhancement factor; convection resistance

射流冲击是目前所知单相传热系数最高的对流换热方式, 小温差下, 能达到令人满意的热耗散率. 这个显著的优点使得射流冲击换热日益受到人们关注, 已广泛应用于涡轮机叶片冷却、微电子芯片散热等领域.

单孔射流冲击的传热特性已开展了广泛研究, 理论结果也比较成熟. 由于其流程短, 流速高, 冲击表面形成很大的径向压力梯度, 使得驻点区边界层很薄, 因而传热系数非常高, 但随着径向远离驻点区, 边界层不断增厚, 局部换热系数下降很

收稿日期: 2007-12-27; 修订日期: 2008-04-20

基金项目: 北京市教育委员会科技计划重点项目(KZ200710005001); 教育部博士点学科专项科研基金(20070005009)

作者简介: 夏国栋(1965-), 男, 河北景县人, 教授, 博导, 主要从事多相流与传热方面的研究工作.

快. 在径向大概 $1.5 \sim 2.5d$ 的范围内, 局部换热系数出现二次峰值, 这主要是因为壁面射流区流态从层流向湍流^[1]. 相比单孔射流, 阵列射流流场及传热特性复杂. 文献[2]研究了多孔阵列空气射流, 发现射流之间相互卷吸可以提高换热性能, 并且在较大的 H/d 时更明显.

如何在有限的体积内增加更多的传热面积, 是当前射流冲击领域研究的重要方向. 目前主要采取表面粗糙化、表面肋化、在表面加工热沉等方法. 文献[3]研究了单孔空气射流冲击六种肋表面的换热特性, 相比光滑表面换热系数提高了 $1.5 \sim 4.5$ 倍. 文献[4]研究得出单孔及多孔阵列液体射流冲击方形针肋阵列, 传热系数提高了 4.5 倍. 现有文献对液体阵列微射流冲击肋表面的传热特性研究较有限.

本文以去离子水为工质, 对阵列微射流冲击光滑和肋化表面的传热特性分别进行了研究, 讨论主要的参数如射流距离、孔间距、 Re 数对 Nu 数、强化因子、热阻的影响规律.

1 实验系统和研究方法

本实验条件: $2 \leq H/d \leq 25$, $S/d = 4$, $1600 \leq Re \leq 5800$, $1.5 \text{ L/min} \leq Q_v \leq 5.1 \text{ L/min}$. 实验系统如图1所示, 智能泵将恒温水箱中的去离子水泵入实验系统, 经流量计(量程 $40 \sim 400 \text{ kg/h}$, 准确度 $\pm 0.3\%$) 进入射流腔, 通过阵列射流孔冲击紫铜换热表面($D = 20 \text{ mm}$), 然后回流回恒温水箱. 流量由阀门控制. 电源(精确度 0.01 A , 0.1 V) 提供加热功率. 加热棒用多层保温材料包裹, 保证热流一维热流.

实验中控制换热表面温度, 同时配合调节射流速度保证单相换热, 避免液体发生相变.

射流腔内置 T 型热电偶($\pm 0.1^\circ\text{C}$) 测定射流温度. 调节固定于三维坐标架上的射流腔来控制射流距离, 精度为 0.01 mm . 在厚 $t = 5 \text{ mm}$ 的有机玻璃板上加工 19 个直径 $d = 1 \text{ mm}$ 的孔, 以正六边形阵列排布, 任意相邻孔间距 $S = 4 \text{ mm}$. 为测定表面温度, 远离换热表面等间距布置 3 支热电偶来测量加热棒轴线上三点的温度, 然后计算出轴线温度梯度, 推算出换热表面温度.

实验中, 换热表面垂直布置, 流体水平冲击换热表面后由于重力作用能够及时离开表面.

采用线切割工艺加工肋化表面, 精度可达 0.01 mm . 在紫铜表面加工 135 个正方形肋, 肋边长 0.7 mm , 肋间距 0.8 mm , 肋高 2.1 mm . 实验前

用丙酮洗去肋表面油污. 光滑表面在实验前用 600 目砂纸研磨, 为了保证实验中具有相同的表面状况, 将其置于 320°C 的空气中氧化 3 h 以上.

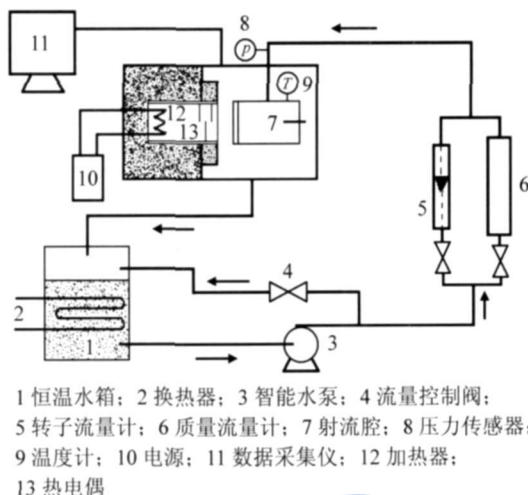


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

2 数据处理

平均表面传热系数由下式确定

$$h = \frac{q}{(T_s - T_{jet})} \quad (1)$$

假定表面热流密度恒定, 由下式计算

$$q = -\lambda_{cu} \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

如图2所示, 将实验件内部传热问题简化为垂直于冲击表面一维稳态导热问题, 则换热表面温度可由下式得到

$$q = \lambda_{cu} \frac{T_3 - T_2}{\Delta x} = \lambda_{cu} \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} = \lambda_{cu} \frac{T_1 - T_s}{\Delta x} \quad (3)$$

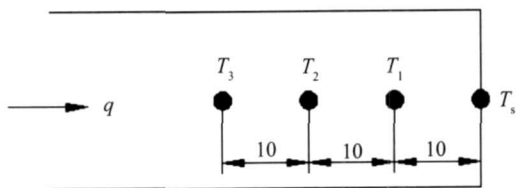


图2 换热表面温度分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wall temperature distribution

但是因热电偶的安装误差, 很难精确测定轴线上 T_1 , T_2 和 T_3 三点温度, 因此将这三点拟合出一条曲线, 然后由曲线方程计算出壁温 T_s .

表面平均努塞尔数(Nu)为

$$Nu = \frac{hL_c}{\lambda} \quad (4)$$

平均射流速度由下式计算

$$u = \frac{4Q_v}{N\pi d^2} \tag{5}$$

射流雷诺数 Re 基于平均射流速度计算

$$Re = \frac{ud}{\nu_f} \tag{6}$$

对流热阻为

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{hA} = \frac{T_s - T_{\text{jet}}}{\Phi} \tag{7}$$

其中 Nu 数以 $L_c = D/2$ 为特征长度计算, Re 数以射流孔径 d 为特征长度, 定性温度为膜温, 即 $T_f = 0.5(T_s + T_{\text{jet}})$.

实验误差产生的原因有四个方面: 测量仪器误差、环境误差、测量方法误差和人员误差, 综合这四方面影响因素, 计算得最大散热损失 0.9%. 温度由铜-康铜热电偶直接测量, 其精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$, 温度测量的最大误差为 6.25%. 根据流量计的精度范围, 在最小流量时导致最大误差为 3.4%. 其他导出参数的误差可由误差传递公式计算. Re 数、热流密度 q 、换热系数 h 、 Nu 数的最大误差分别为 4.95%, 9.7%, 11.7%, 11.9%.

3 实验结果与分析

3.1 浸没射流冲击光滑表面的传热特性

图 3 是浸没射流冲击光滑表面的 Nu 数随 Re 数变化的实验结果. 从图中看出, 在 $2 \leq H/d \leq 4$ 范围内, Nu 数受射流距离影响不明显. 文献[1]认为, 较小射流距离使换热表面处于势流核心内, 此时的射流中心线速度仍保持射流速度, 故换热系数变化不大, 其推荐势流核心长度为 $H/d = 5$.

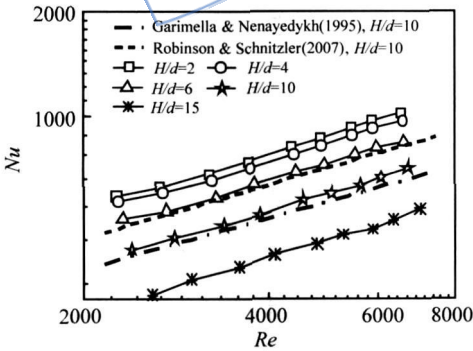


图 3 光滑表面浸没射流 Nu 数随 Re 数变化

Fig. 3 Nusselt number versus Reynolds number for different H/d (Submerged jet flow)

文献[5]和文献[6]推荐关联式的计算结果也表示在图 3 中, 可以看到文献[5]关联的曲线整体高于本文结果, 主要由于其所研究的是受限浸没射流. 文献[7]认为受限板的存在将提高壁面射流

区的紊流度, 强化换热. 再之, 文献[5]研究单位换热表面射流孔数多, 增加了驻点数因而提高了换热性能.

文献[6]结果低于本文实验数据, 这主要是由于他们所研究是单孔射流, 换热系数低于与本文所研究的浸没式阵列射流.

3.2 自由射流冲击光滑表面的传热特性

图 4 是自由射流的 Nu 数随 Re 数变化的实验结果. 如图所示, 将文献[5]、文献[8]和文献[9]所预测曲线同实验结果相比较发现: 较小的射流距离下 ($H/d \leq 4$), 文献[8]所预测曲线同实验数据具有很好的一致性. 而由文献[5]所预测的曲线整体略高于实验值, 这主要由于其单位热源的驻点数多, 提高了整体的换热效果.

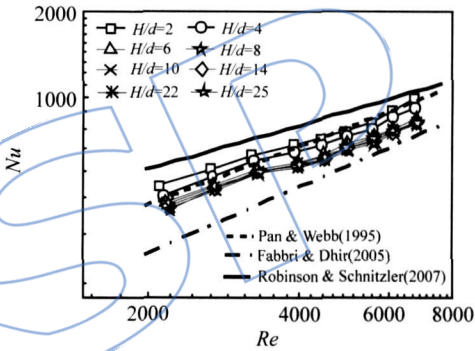


图 4 自由射流 Nu 数随 Re 数的变化

Fig. 4 Nusselt number versus Reynolds number for different H/d (Free surface jet flow)

而文献[9]所预测值较实验数据偏低, 主要由于其研究的射流阵列的孔间距较大 ($7 < S/d < 26$), 相邻射流之间在壁面射流区易发生碰撞, 形成泉涌, 被加热的流体重复进入射流核心区, 恶化传热; 减小 S/d 在较大 H/d 情况下, 能增强壁面射流的紊流度, 强化整体换热性能. 文献[8]将 S/d 从 8 降到 4, Nu 明显提高, 且发现 $S/d = 4$ 是最佳孔间距, 这也是本文选择 $S/d = 4$ 的依据. 文献[9]还发现 Nu 数随 S/d 增加将以指数形式下降. 从图 4 中发现, 较大射流距离 ($H/d > 8$), 数据结果相互簇拥, 并不能发现换热特性随 H/d 变化规律.

图 5 是自由和浸没射流的换热系数 h 随 H/d 变化的比较. 从图中看出, 自由射流的 h 随 H/d 逐渐下降直到 $H/d > 8$ 后, h 不再随下降, 反而换热性能会改善. 文献[5]也得出了类似的变化规律. 这种换热性能局部升高的现象主要由于: 射流卷吸周围空气而增加了剪切层的不稳定, 不稳定

性的累计导致射流冲击换热表面之前发生破碎^[10]。虽然射流的破碎降低了射流速度,但单个射流破碎为若干个不规则的水珠冲击换热表面,这类似于给定流量下增加驻点数目,强化了换热效果。

浸没射流的换热性能随 H/d 单调下降,较小的射流距离,浸没射流换热性能优于自由射流。

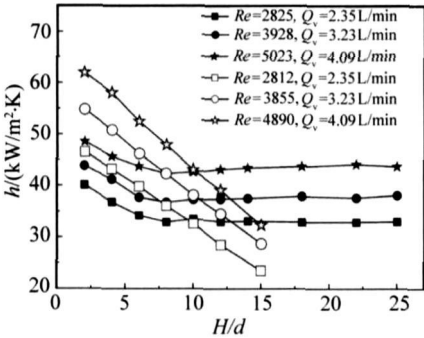


图 5 光滑表面自由和浸没射流 h 受 H/d 变化影响
Fig. 5 Effect of jet to target spacing on heat transfer coefficient for free surface and submerged jets

3.3 浸没射流冲击肋化表面的传热特性

本实验以光滑表面传热为基准,比较了肋的存在对换热特性的影响。

图 6 是浸没射流传热系数的比较. 给定 H/d , 肋表面的 h 随 Re 数单调上升. 但肋表面的 h 对射流 Re 数的依赖性更强,其曲线明显较陡. 这主要是由于: 对于光滑表面, Re 数的增加只是单纯提高了冲击速度;而对于肋表面,肋的换热起主要作用,随 Re 数增加,不只增加了冲击速度,而且流体在针肋阵列内流动的紊流度会明显提高,显著地增强换热。

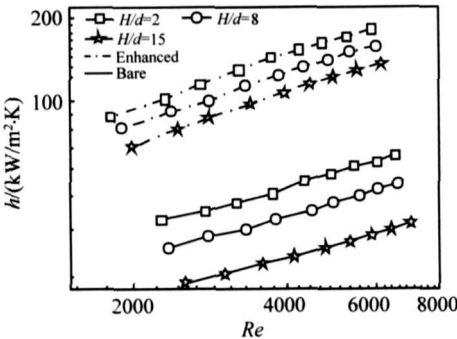


图 6 浸没射流的光滑与肋化表面的传热特性比较
Fig. 6 Comparison of bare and enhanced surface heat transfer coefficient for submerged jet array

定义强化因子为 $\varepsilon = h_{\text{enhanced}}/h_{\text{bare}}^{[11]}$, 考虑到肋在不同的射流距离所能发挥不同的效率. 从图 7 所示,强化因子在 2.3~ 4.0 的范围内. 给定 H/d ,

ε 随流量上升,但上升逐渐平缓. 文献[11]研究了阵列式空气冲击肋化表面的换热特性,他们也发现在大流量下, ε 出现波动. 这主要由于,射流速度增加了流体在针肋阵列内紊流度,肋的作用不断体现,但流量过大,流体在肋空间的出流受限, ε 趋于稳定范围内,甚至有可能会出现波动。

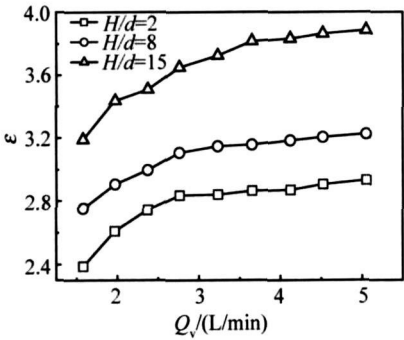


图 7 浸没射流的强化因子随流量的变化
Fig. 7 Variation of enhancement factors with liquid flow rate for submerged jet array

图 8 是浸没射流的强化因子随 H/d 变化曲线. 给定流量,浸没射流的强化因子随 H/d 单调增大, H/d 从 2 增大到 15, 强化因子增加率为 32% 左右。

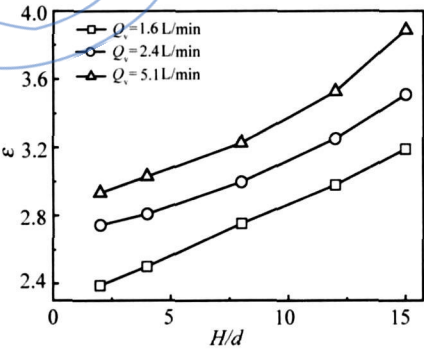


图 8 浸没射流的强化因子随 H/d 的变化
Fig. 8 Variation of enhancement factors with H/d for submerged jet array

3.4 自由射流冲击肋化表面的传热特性

图 9 是自由射流冲击光滑和肋表面的传热特性比较. 给定 H/d , h 随 Re 数单调增大. 但肋表面的曲线的斜率更陡. 这类似浸没射流情形. 当 $H/d > 8$, 肋表面的 h 对 H/d 的依赖很小,数据点相互交错在一起。

图 10 所示为自由射流的强化因子与流量的关系. 强化因子集中在 2.2~ 2.9 之间, 给定 H/d , 强化因子随着流量增加单调上升. 但小流量下, 上升幅度较大, 随着流量增大, 趋于平缓. 在 $Q_v = 5$.

1ml/min, $H/d=2$ 时, 肋效率最大为 2.8 左右.

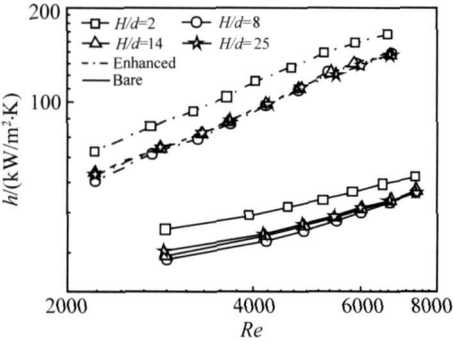


图 9 自由射流的光滑同肋化表面的传热特性比较
Fig. 9 Comparison of bare and enhanced surface heat transfer coefficient for free surface jet array

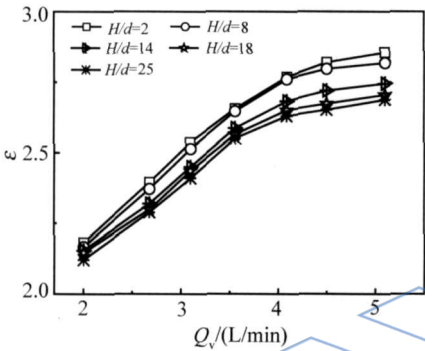


图 10 自由射流的强化因子随流量的变化
Fig. 10 Variation of enhancement factors with liquid flow rate for free surface jet array

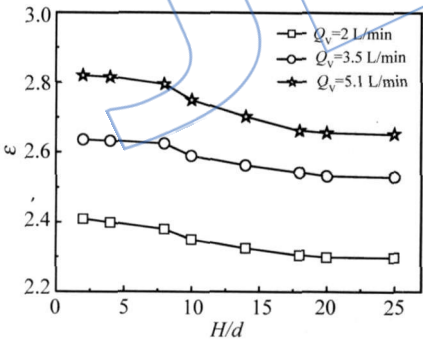


图 11 自由射流的强化因子随 H/d 的变化
Fig. 11 Variation of enhancement factors with H/d for free surface jet array

图 11 所示为自由射流的强化因子与 H/d 的关系. 从图中可以看出, 强化因子随 H/d 增大略有下降, 当 H/d 从 2 增大到 15, 强化因子下降率为 5% 左右.

3.5 对流热阻的变化特性

图 12 是对流换热热阻随流量变化的曲线. 从图中看出, 表面肋化对降低热阻具有很大潜力. 相

同表面状况下, 浸没射流热阻较自由射流热阻低. 随着流量增加, 热阻不断降低, 但变化逐渐趋向平缓, 热阻基本不再变化. 这主要由于冲击速度的提高不会无限制地降低边界层厚度. 本课题组前期对阵列微射流热沉进行数值模拟和实验研究也发现, 在流量很大时, 热阻不再降低^[12].

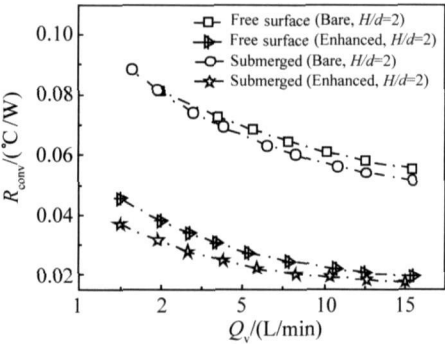


图 12 热阻随流量变化的比较
Fig. 12 Variation of convection resistance with flow rate

4 结 论

本实验对液体阵列微射流冲击光滑和肋化表面的传热特性分别进行实验研究. 研究结果表明:

- 1) 浸没和自由射流的 h 均随 Q_v 增大而单调上升. 浸没射流 h 随 H/d 增大而单调下降; 自由射流 h 在 $H/d \leq 8$ 随 H/d 增加而下降, 当 $H/d > 8$ 后, 不再受其影响. 浸没射流换热性能优于自由射流. 减小 S/d 能够增强换热.
- 2) 浸没射流强化因子 ε 在 2.3~4 之间, 最大为 3.9, 自由射流 ε 在 2~3 之间, 最大为 2.8. 浸没和自由射流的 ε 均随 Q_v 不断上升, 但逐渐趋于平缓. 浸没射流 ε 受 H/d 影响明显, 随 H/d 单调上升; 而自由射流的 ε 对 H/d 的变化不敏感.
- 3) 表面肋化对降低热阻具有很大潜力. 所有的射流情况下, 热阻均随 Q_v 增加而下降, 但逐渐趋于平缓, 说明不能无限制的增加工质流量而降低对流热阻.

符号说明

A	冲击表面横截面积, mm^2
D	冲击表面直径, mm
d	射流孔径, mm
H	射流距离, mm
h	平均传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
N	射流孔数
Nu	平均努塞尔数
Re	射流雷诺数

L_c	特征长度, mm
Q_v	体积流量, ml/min
q	热流密度, W/m ²
R_{conv}	对流热阻, °C/W
S	孔间距, mm
T_s	表面平均温度, °C
T_{jet}	射流温度, °C
T_f	膜温度, °C
T_1, T_2, T_3	加热棒轴线温度, °C
t	射流孔长度, mm
u	射流速度, m/s
Φ	冲击表面热流量, W
λ	导热系数, W/(m·K)
ν	运动粘度, m ² /s
ε	强化因子

下标

bare	光滑表面
enhanced	肋化表面
f	流体
Cu	铜

参考文献:

[1] Garimella S V, Rice R A. Confined and submerged liquid jet impingement heat transfer [J]. J. Heat Transfer, 1995, 117: 871-877.

[2] Huber A M, Viskanta R. Effect of jet jet spacing on convective heat transfer to confined impinging arrays of axisymmetric air jets [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1994, 37: 2859-2869.

[3] Hansen L G, Webb B W. Air jet impingement heat transfer from modified surfaces [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1993, 36: 989-997.

[4] Copeland D. Single phase and boiling cooling of small pin fin arrays by multiple nozzle jet impingement [J]. J. Electron. Packing, 1996, 118: 21-26.

[5] Robinson A J, Schnitzler E. An experimental investigation of free and submerged miniature liquid jet array impingement heat transfer [J]. J. Experimental Thermal Fluid Science, 2007, 12: 1-13.

[6] Garimella S V, Nenayedykh B. Influence of nozzle geometry on heat transfer in submerged and confined liquid jet impingement [J]. Cooling & Thermal Design of Electronic Systems, ASME HTD 319/EEP, 1995: 49-57.

[7] Baydar E, Ozmen Y. An experimental investigation on flow structures of confined and unconfined impinging air jets [J]. J. Heat Mass Transfer, 2006, 42: 338-346.

[8] Pan Y, Webb B W. Heat transfer characteristics of arrays of free surface liquid jets [J]. J. Heat Transfer, 1995, 117: 878-883.

[9] Fabbri M, Dhir V K. Optimized heat transfer for high power electronics cooling using arrays of micro jets [J]. J. Heat Transfer, 2005, 127: 760-769.

[10] Yao S C, Wu C F, Hsieh C C. Microelectromechanical system based evaporative thermal management of high heat flux electronics [J]. J. Heat Transfer, 2005, 127: 66-75.

[11] El Sheikh H A, Garimella S V. Heat transfer in multiple air jet impingement using pin fin heat sinks [J]. IEEE Trans on Advanced Packaging, 2000, 23: 113-121.

[12] 刘青,夏国栋,刘启明. 高效微射流阵列冷却热沉的数值模拟 [J]. 自然科学进展, 2005, 15(8): 987-992. (in Chinese)

LIU Qing, XIA Guodong, LIU Qiming. Numerical simulation on a micro jets impingement cooling heat sink [J]. Advances in Physical Science, 2005, 15(8): 987-992. (in Chinese)