

圆形微/小针肋热沉流动阻力特性研究

卢 铃, 赵孝保, 王红轩, 朱晓华

(南京师范大学 能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 以去离子水为流动工质,对 9 块不同尺寸、不同排布的圆形微/小针肋热沉在不同 Re 下的流动阻力特性进行了实验研究,并将所得的部分实验结果与现存的经验关联式进行了对比.实验结果表明圆形微/小针肋的压力降随着体积流量的增加而增大;圆形微/小针肋内摩擦阻力系数随 Re 数的增大而逐渐减小,当 Re 数大于 500 时,流动阻力系数基本不变;肋高及直径的大小对摩擦阻力系数的影响较大;一个现有的宏观经验关联式能很好地预测部分实验段的实验结果.

[关键词] 微/小针肋,摩擦阻力系数,压降

[中图分类号] TK 124 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2010)04-0041-06

Experimental Study on Flow Resistance Characteristics in a Bank of Circular Shaped Micro/mini Pin Fins

Lu Ling Zhao Xiaobao Wang Hongxuan Zhu Xiaohua

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract With deionized water as working fluid, this paper made an experimental investigation on the characteristics of flow resistance through a bank of circular shaped micro/mini-pin fins with nine different sizes at staggered and in-line arrays over a range of Reynolds number. And part of experimental results obtained is compared with the existing conventional scale correlations. It is found that the pressure drop through micro/mini-pin fin bundles increases with the increase of volumetric flow rate, the friction factors decrease with the increase of the Reynolds number and remain unchanged when the Reynolds number is over 500. The influence of the height and the diameter of the micro/mini-pin fins on the friction factors is great. One of the correlations is able to predict the friction factors accurately at some experimental results.

Key words micro/mini pin fins, friction factors, pressure drop

现代科学技术的发展,制造工艺水平的提高及实际工程的需要开辟了微小尺度研究的新领域,尤其是微电子机械系统的飞速发展,更极大地推动了这一研究热潮.随着 MEMS 技术的不断发展,使得结构更加紧凑的微通道热沉逐步发展起来.近年来,一种新型的性能更加优越的微通道热沉——微针肋热沉受到人们越来越多的关注.

关于流体横向掠过针肋阵列时流动与传热特性的研究大多集中在宏观尺度范围内. Zukauskas^[1]和 Morgan^[2]对长径比大于 8 的管子进行研究,实验表明横掠管束的对流换热特性随雷诺数和普朗特数而变化.微尺度下的研究还处于初始阶段,其中 Kosar^[3-5]等人的研究较为领先,但是宏观尺度下的研究结果为在微尺度条件下开展相关研究提供了宝贵的参考价值. Kosar 等^[4,5]以制冷剂 R-123 为工质,对工质横掠微针肋的流动沸腾特性进行了初步研究,针肋横截面分别为圆形和水翼形. Prasher 等^[6]以水为工质,实验研究流体横掠微针肋的水力特性,针肋的几何形状为圆形和方形,肋直径 50~153 μm ,肋高 155~310 μm ,针肋布置为叉排,较为疏松.他们给出摩擦阻力系数 f 和 Nu 的关系式,指出 $Re > 100$ 和 $Re < 100$ 的关系式不同,当 $Re > 100$ 显示出湍流的特性.另外,还有少数学者以两相流为工质对微针肋热沉进行了实验研究.

收稿日期: 2010-03-10

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目 (209048).

通讯联系人: 赵孝保,博士,教授,研究方向: 高效传热技术及节能技术. E-mail: zhaoxiaoba@njnu.edu.cn

Krishnamurthy 和 Peles^[7]以绝热的氮气与水的两相流为工质,对叉排圆形微针肋热沉的流动阻力特性进行了实验研究,结果表明,质量流量对压降有很大的影响.同时,他们提出一种新型的 Lockhart-Martinelli 关联式,其中因子 C 与流体的 Re 数呈线性关系.

本文以去离子水为工质,测试了不同尺寸的圆形微/小针肋热沉的流动阻力,并与宏观尺度下的经验关联式进行了对比.

1 实验装置与方法

1.1 实验段

实验段为精密加工技术加工的圆形微/小肋板,材质为紫铜,微/小肋排列形式有叉排和顺排两种,其长度与宽度采用卡尺来测量,精度为 0.1 mm. $L = 40\text{mm}$, 宽度 $W = 3.5\text{mm}$, 圆柱中心距为 $s = 1\text{mm}$, 圆柱直径为 d , 肋高为 H . 图 1 为实验段示意图. 本实验共对 9 块不同尺寸的实验段进行了流动阻力实验,实验段参数如表 1 所示.

表 1 微/小针肋几何尺寸

Table 1 Dimensions of micro/mini pin fins

排列方式	叉排				顺排				
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d/mm					0.5				0.3
H/mm	0.25	0.5	0.75	1	0.25	0.5	0.75	1	0.5
H/d	0.5	1	1.5	2	0.5	1	1.5	2	1.67

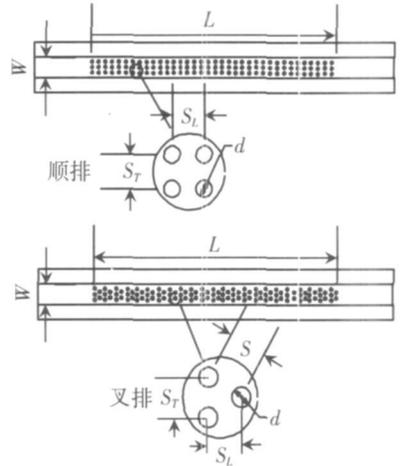


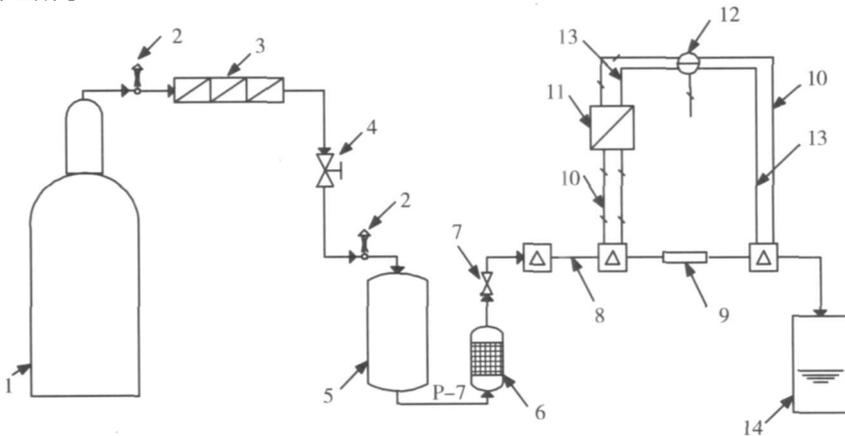
图 1 微/小肋实验段示意图

Fig.1 Schematic of the test section of micro/mini pin fins

本实验的流体为去离子水.用玻璃板盖住实验段形成流道,两者之间用 704 硅橡胶黏结密封,封装后的实验段通过特制的接头接入实验装置.

1.2 实验系统装置

实验系统如图 2 所示.



1.氮气瓶;2.截止阀;3.层气体过滤器;4.精密减压阀;5.储液罐;6.液体过滤器;7.止回阀;8.节流段;9.实验段;10.压力传感器;11.转换器;12.数据采集系统;13.热电偶;14.集液罐

图 2 实验系统简图

Fig.2 Schematic of the experimental setup

实验采用 12Mpa 的高压氮气作为压力源.气体通过精密减压阀可将压力精密调整至实验所需压力(精确到 100 Pa),以便调节出适宜的 Re 值;储液罐内装有实验用的液体;实验段两端装有压力与温度传感器.针对不同的压力大小,采用不同量程的压力传感器,以减小实验误差.温度测量采用精度为 0.1°的 T 型热电偶.压力传感器经过转换器,将压力信号转换为电压信号,与温度信号可直接在仪器上读取.氮气瓶、过滤器、储液罐等部件之间用耐高压的聚氨酯软管连接,接头采用硬密封,出口通过导管与集液罐连接.采用称重法和体积法测量液体的质量流量.当液体流量较小时采用称重法,通过用电子天平进行测量;

当液体流量较大时直接通过精度为 0.1 mL 的量筒测量. 读取数据前, 先在所需的压力下开启一段时间, 等到温度和压力均达到稳定时, 再开始进行实验. 当测得参数不再随液体流动而变化时, 即停止采集, 用电子天平或量筒读取一段时间内的液体重量或体积, 换算得到液体的质量流量. 本实验分别从流量上升和下降两个过程对不同的流量进行了测试.

2 参数归纳与处理

对叉排和顺排排布结构, 雷诺数 Re 的值均可定义如式 (1) 所示:

$$Re = \frac{\rho u_{max} \cdot d}{\mu}, \tag{1}$$

式中, ρ 为流体密度 $/(kg \cdot m^{-3})$; u_{max} 为流体在柱群中的最大速度 $/(m \cdot s^{-1})$; d 为圆柱直径 $/(m)$; μ 是流体的动力粘度 $/(kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$; 本文中 u_{max} 按下式进行计算.

$$u_{max} = \frac{Gs}{\rho WH (s - d)}, \tag{2}$$

式中, G 为质量流量 $/(kg \cdot s^{-1})$; s 为圆柱中心距 $/(m)$; W 为实验段宽度 $/(m)$; H 为圆肋高度 $/(m)$.

摩擦阻力系数可由下式推算

$$f = \frac{2\Delta p d}{\rho u_{max}^2}, \tag{3}$$

式中, Δp 为实验段的进出口压力差, 取为流量上升和下降过程中压差的平均值 $/(Pa)$

3 结果讨论与分析

3.1 压力降与流体流量的关系

实验段的压力降与流体流量的变化关系如图 3 图 4 所示. 图 3 为叉排及顺排排布下, 不同肋高的针肋压力降与流体流量的变化关系, 图 4 为不同肋高下, 顺排及叉排排布针肋压力降与流体流量的变化关系. 从两张图中均可以看出, 压力降随着体积流量的增加而增大.

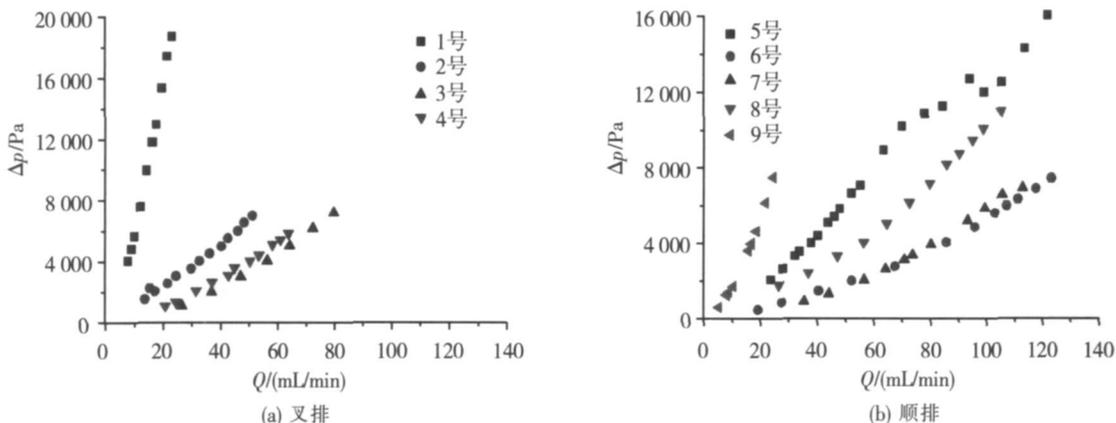


图 3 不同肋高的针肋压力降与流体流量的变化关系

Fig.3 Variation of the measured pressure drop with volume flow rate under different heights of pin fins

从图 3 对相同排布下、不同肋高的实验段进行的比较可以看出, 3 号及 7 号实验段, 即肋高为 0.75 mm 的实验段, 其压降变化均较小. 而 6 号实验段, 即肋高为 0.5 mm, 顺排排布的实验段, 其压降变化也较小. 说明当针肋高度与针肋直径之比为 1 和 1.5 时, 压力降随流体流量的变化相对较小.

从图 4 对叉排和顺排进行的比较可以看出, 相同肋高时, 叉排排布下的实验段压降随流体流量变化较大. 开始流量较小时, 压降差距还较小, 随着流量的增加, 压降差距逐渐增大. 同时, 随着肋高的逐渐增加两种排布下压降的变化差距逐渐变小, 当 $H = 1\text{ mm}$ 时, 压降随流量的变化已基本相同. 观察 (b) 图, 6 号与 9 号实验段相比, 9 号实验段压降随流量的变化较大, 说明在相同肋高、相同排布下, 直径较小的针肋会产生较大的压降. 2 号与 9 号实验段相比, 9 号实验段压降随流量的变化较大, 说明在相同肋高下, 直径对压降的影响较大.

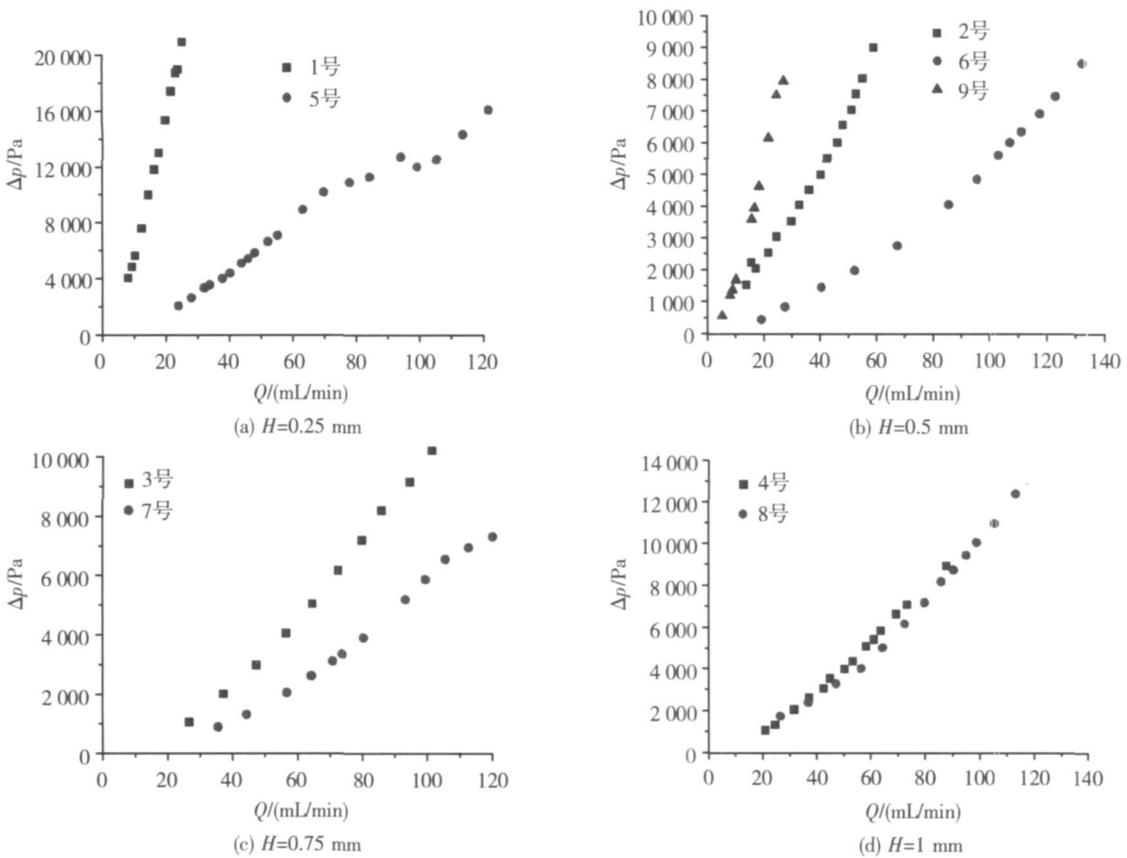


图 4 顺排及叉排排布针肋压力降与流体流量的变化关系

Fig.4 Variation of the measured pressure drop with volume flow rate at staggered and in-line arrays

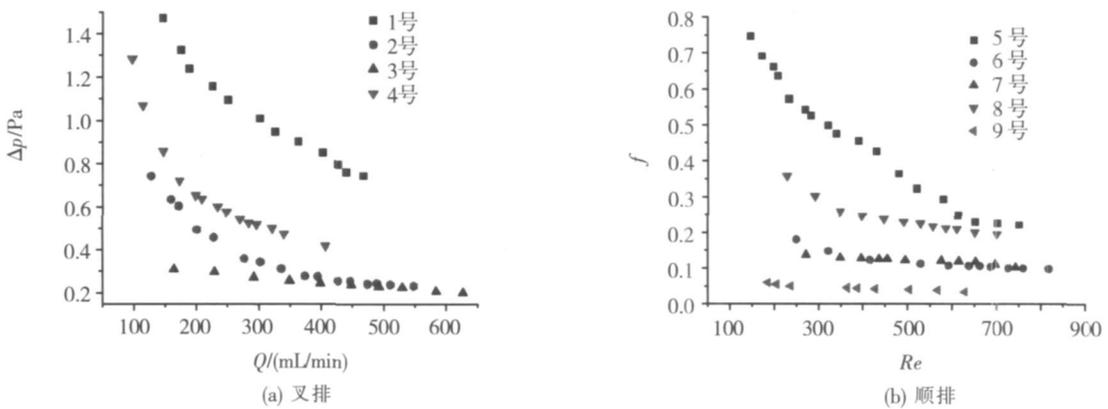


图 5 微/小针肋 $f-Re$ 关系曲线

Fig.5 f vs Re for micro/mini pin fins

3.2 摩擦阻力系数与雷诺数变化关系

图 5 为叉排及顺排排布下微/小针肋摩擦阻力系数 f 与 Re 之间的关系。从 (a)、(b) 两图中可以看出, 摩擦阻力系数 f 均随着 Re 的增大而减小, 而当 Re 大于 500 时, f 则趋于常数。同时还发现, 叉排排布下, 与其他实验段相比, 3 号实验段 f 随 Re 的增加变化较小; 同样, 在顺排排布下, 6 号、7 号及 9 号实验段 f 随 Re 的增加变化较不明显。说明当微/小针肋的肋高与直径的比值为 1 和 1.5 时, f 值变化最小, 最利于流动。比较两图, 叉排排布下的 f 值明显大于顺排排布下的 f 值。

图 6 为相同肋高下 (均为 0.5 mm), 不同直径 (分别为 0.5

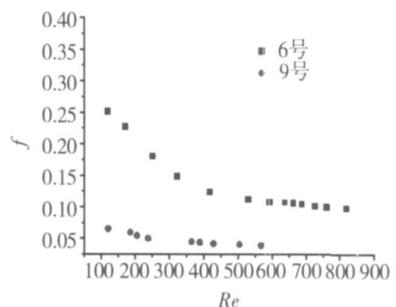


图 6 6 号和 9 号实验段 $f-Re$ 关系曲线

Fig.6 f vs Re for No.6 and No.9 devices

mm 和 0.3 mm) 的 6 号及 9 号微 / 小针肋摩擦阻力系数 f 与 Re 之间的关系. 从图 6 中可以看出, 直径较小的微 / 小针肋摩擦阻力系数明显小于直径较大的微 / 小针肋.

本文选用常规尺度下的经验关联式与肋高为 0.5 mm 的实验段的实验结果进行对比, 所选用的经验关联式如表 2 中所示. 实验数据与经验关联式的符合度通过平均相对误差 (MAE) 的形式给出, MAE 的定义为:

$$MAE = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{|f_{exp} - f_{pred}|}{f_{pred}} \times 100\% . \quad (4)$$

图 7 给出了 2 号和 6 号实验段的实验结果与现有经验关联式结果之间的比较. 实验值与关联式预测值的 MAE 值在表 3 中列出. 从图 7 及表 3 可以看出, Chilton and Generaux 等人的关联式与实验值较符合, MAE 仅为 6.78%, 但其流体为空气.

表 2 摩擦阻力系数经验关联式

Table 2 Correlations for the friction factor

关联式	文献	流体	流态	H/D	形状及排布	摩擦阻力系数
1	Gaddis and Gnielski ^[8]	所有	层流	长管	圆柱叉排和顺排	$f = \frac{280\pi \left\{ \left[\left(\frac{S_L}{d} \right)^{0.5} - 0.6 \right]^2 + 0.75 \right\}}{Re \left[4 \frac{S_L S_T}{d^2} - \pi \right] c^{1.6}}$ 式中, c 为: 当 $\frac{S_L}{d} \geq \frac{1}{2} \sqrt{2 \frac{S_T}{d} + 1}$ 时, $c = \frac{S_T}{d}$; 当 $\frac{S_L}{d} < \frac{1}{2} \sqrt{2 \frac{S_T}{d} + 1}$ 时, $c = \frac{S_d}{d}$.
2	Moores and Joshi ^[9]	水	$Re = 200 \sim 10\,000$	短管 $0.5 < \frac{H}{D} < 1$	圆柱叉排	$f = 19.04 \left(\frac{h}{d} \right)^{-0.742} Re^{-0.502}$
3	Chilton and Generaux ^[10]	空气	层流	长管	圆柱叉排	$f = \frac{106}{Re}$

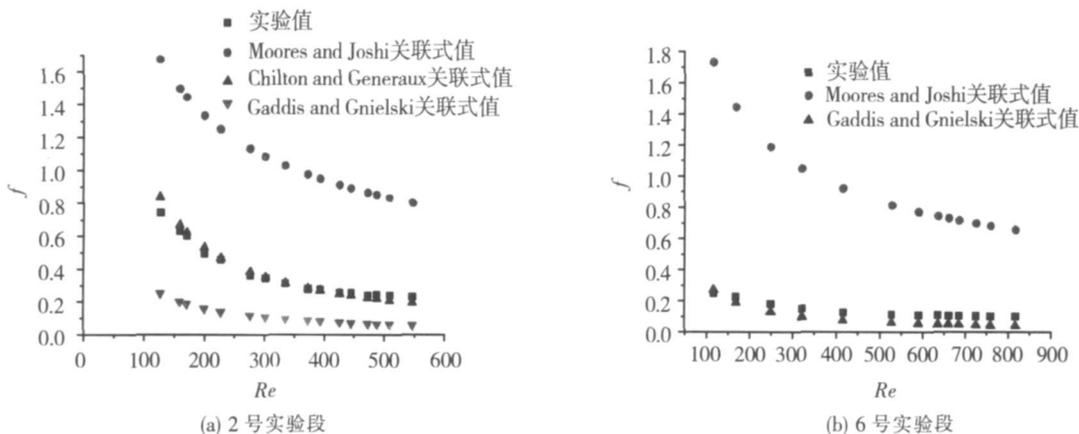


图 7 2 号及 6 号实验段实验值与经验关联式的比较

Fig.7 $f-Re$ relationship between experimental results and theoretical values for No.2 and No.6 devices

表 3 实验值与关联值的 MAE/%

Table 3 MAE's (%) of the correlations for No 2 and No 6 devices using the tube bundle approach

Moores and Joshi	Gaddis and Gnielski	Chilton and Generaux
76.35	163.13	6.78

4 结论

本文以去离子水为工质,对 9 块不同尺寸的圆形微/小针肋进行了实验测试,并与现有的经验关联式进行了对比,得出以下结论:

(1) 压力降随着体积流量的增加而增大. 当针肋高度与针肋直径之比为 1 和 1.5 时,压力降随流体流量的变化相对较小. 相同肋高时,叉排排布下的实验段压降随流体流量变化较大. 随着肋高的逐渐增加,两种排布下压降的变化差距逐渐变小. 在相同肋高、相同排布下,直径较小的针肋会产生较大的压降. 在相同肋高下,直径对压降的影响较大.

(2) 摩擦阻力系数 f 随 Re 数的增大而减小,当 Re 数大于 500 时,摩擦阻力系数接近常数;肋高及直径的大小对摩擦阻力系数 f 的影响较大,当肋高与直径的比值为 1 和 1.5 时,结构较利于流动.

(3) 现有的宏观尺度下的经验关联式中,Chilton and Generaux 等人的关联式能较好地预测部分实验段的实验结果.

[参考文献] (References)

- [1] Zukauskas A. A. Heat transfer from tubes in cross flow[J]. *Advances in Heat Transfer* 1972, 8: 93-160
- [2] Morgan V. T. The overall convective heat transfer from smooth circular cylinders[J]. *Advances in Heat Transfer* 1975, 11: 199-264
- [3] Kosar A, Mishra C, Peles Y. Laminar flow across a bank of low aspect ratio micro pin fin[J]. *Journal of Fluids Engineering* 2005, 127: 419-430
- [4] Kosar A, Peles Y. Convective flow of refrigerant (R-123) across a bank of micro pin fins[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2006, 49: 3: 142-3: 155
- [5] Kosar A, Peles Y. Boiling heat transfer in a hydrofoil-based micro pin fin heat sink[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2007, 50: 1: 018-1: 034
- [6] Prasher R S, Dimer J, Chang JY, et al. Nusselt number and friction factor of staggered arrays of low aspect ratio micro pin-fins under cross flow for water as fluid[J]. *Journal of Heat Transfer* 2007, 129: 141-153
- [7] Krishnamurthy S, Peles Y. Gas-liquid two-phase flow across a bank of micro pillars[J]. *Phys Fluids* 2007, 19(4): 1-14
- [8] Gaddis E S, Gniewski V. Pressure drop in horizontal cross flow across tube bundles[J]. *Int Chem Eng* 1985, 25(1): 1-15
- [9] Moores K A, Joshi Y K. Effect of tip clearance on the thermal and hydrodynamic performance of a shrouded pin fin array[J]. *Heat Transfer* 2003, 125: 999-1006
- [10] Chilton T H, Generaux R P. Pressure drop across tube banks[J]. *Trans Am Inst Chem Eng* 1933, 29: 161-173

[责任编辑:刘 健]