

# 不同形状微针肋通道流动与换热性能影响研究

张秀强<sup>1,2</sup>, 华君叶<sup>1,2</sup>, 赵孝保<sup>1,2</sup>, 吴 薇<sup>1,2</sup>, 李 栋<sup>1,2</sup>, 李奇贺<sup>1,2</sup>

(1.南京师范大学江苏省能源系统过程转化与减排技术工程实验室,江苏 南京 210042)

(2.南京师范大学能源与机械工程学院,江苏 南京 210042)

**[摘要]** 采用 CFD 模拟软件,结合实验研究,针对圆形、三角形和方形截面微针肋通道流动与换热进行了三维数值模拟分析. 分别模拟了不同雷诺数  $Re$  下,三种形状肋片的绕流流场和肋阵温度场分布,并计算摩擦阻力系数  $f$ 、努谢尔特数  $Nu$  等参数评价针肋微通道流动换热性能. 结果表明,  $f$  随  $Re$  的增大而减小,且低  $Re$  下,三角形针肋的  $f$  最小.  $Nu$  随  $Re$  的增加而增大. 三种形状中,圆形针肋的  $Nu$  数最大,换热效果最好. 综合流动和换热特性评估,认为圆形针肋比方形和三角形针肋更优. 通过实验对比发现,微尺度效应对模拟结果的影响有一定的误差,但是整体趋势与模拟结果一致.

**[关键词]** 微通道热沉,微针肋,摩擦阻力系数,努谢尔特数,数值模拟

**[中图分类号]** TK124 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2018)01-0047-09

## Study on the Flow and Heat-Transfer Properties of Microchannel Heat Sink with Different Pin-Fin Shapes

Zhang Xiuqiang<sup>1,2</sup>, Hua Junye<sup>1,2</sup>, Zhao Xiaobao<sup>1,2</sup>, Wu Wei<sup>1,2</sup>, Li Dong<sup>1,2</sup>, Li Qihe<sup>1,2</sup>

(1.Engineering Laboratory for Energy System Process Conversion and Emission Control Technology of Jiangsu Province, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

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

**Abstract:** By using the CFD software and combining with experimental studies we conduct the three-dimension numerical investigation on the characteristics of flow and heat transfer in microchannel heat sink with circular, triangle and square cross-section pin-fin arrays. The flow field and temperature field of the three types pin-fin arrays are obtained for different Reynolds number ( $Re$ ). Besides, the friction coefficient ( $f$ ) and Nusselt number ( $Nu$ ) have been calculated as the criterion of the flow and heat transfer properties of micro pin-fin. The results show that the friction coefficient decreases with the increase of  $Re$ , that the frictional resistance coefficient of triangle pin-fin is the smallest with low  $Re$ . And that the  $Nu$  grows with the increase of  $Re$ , and the  $Nu$  of circular pin-fin is larger than that of triangle or square, which appears a better heat transfer performance. The assesses of the comprehensive flow and heat transfer performance indicate that the circular pin-fin has better performance than the others. Furthermore, compared with experimental outcome, the numerical results still have some deviation owing to microscale effect while the trend is consistent with experimental results.

**Key words:** microchannel heat sink, micro pin-fin, friction coefficient,  $Nu$ , numerical simulation

微通道作为常用的高效换热结构,与其他冷却方式相比,具有高面体比、体积小、换热效率突出等优势,因而在小空间高效散热领域受到广泛关注. 国外学者对微通道的换热性能进行了较多研究<sup>[1-3]</sup>,针对特定形状的针肋和特定的流动工质研究其流动传热特性,通过改进尺寸和工质物性达到优化目的. 国内对微通道的研究逐步深入,杨海明等<sup>[4]</sup>结合流动传热的准则设计了气体微通道流动换热的实验,得出了  $Re-f$  的关系曲线,并得出微通道内的复杂换热比普通通道更为高效. 阮庭德等<sup>[5]</sup>对水冷微通道散热器进行了三维数值模拟,得到了在不同进口水温 and 入口流速下,散热器温度场的分布变化,发现降低冷却液温度或提高流速能够明显改善散热器性能. 郭春海等<sup>[6]</sup>对微通道进行了数值模拟,利用通道压降,温度和总

收稿日期:2017-11-29.

基金项目:江苏省高校自然科学研究面上项目(16KJB47008)、江苏省自然科学基金面上研究项目(BK20151549).

通讯联系人:华君叶,博士,实验师,研究方向:强化传热. E-mail:huajunye@njnu.edu.cn

热阻等参数评估微通道的性能,得出了微通道最佳宽高比. 靳遵龙等<sup>[7]</sup>对不同导流角度的菱形针肋微通道的流动和换热进行了数值模拟,发现导流角度为 120°的菱形肋微通道的散热效果最好. 康宁等<sup>[8]</sup>对圆形针肋微通道的流动和换热特性进行了实验研究,并与平直微通道进行了对比,发现加入针肋可以强化微通道的换热,且针肋的叉排布置相比顺排布置具有更大的摩擦因子和换热系数. 邱德来等<sup>[9]</sup>对三角形微肋阵的流动及对流换热特性进行了实验研究,得到了水流经三角形微肋阵的压降、阻力及努谢尔特数在不同雷诺数及加热功率下的变化规律,发现雷诺数在 0~250 内,加热功率的增加会导致肋阵阻力系数和  $Nu$  的增大. 夏国栋等<sup>[10]</sup>对三种不同形状针肋微通道的流动换热特性进行了实验和模拟,发现随着雷诺数的增加长菱形针肋阻力比菱形和圆形针肋大,且具有更好的换热效果. 张承武等<sup>[11]</sup>对不同截面形状的叉排针肋的微通道进行实验,得出其流道内的流动阻力特性,发现当  $Re$  较低时,圆形针肋的流动阻力比菱形和椭圆形针肋的阻力大, $Re$  较大时,椭圆形针肋的压降最小,流动阻力也最小. 潘娜娜等<sup>[12]</sup>对微通道进行了二维和三维的数值模拟,考察不同雷诺数和底板生热量下微通道的流动和传热特性,发现当雷诺数增加到转捩点处时,微通道的传热效果明显增加,不同底板生热量对微通道的流动影响不可忽略,但对努谢尔特数和通道总压降基本无影响. 褚雯霄等<sup>[13]</sup>通过模拟几种不同截面针肋的传热性能,比较得到了在高雷诺数下,改进翼型肋的传热优势,有效提高了换热器的换热性能. 综上所述,目前对于微通道和微针肋的流动和传热研究很多,但大多集中在单一肋片和单一对比研究流动或者传热,对不同形状针肋的流动和传热综合分析研究较少,因此有必要结合实验与模拟手段针对不同形状针肋的流动与传热特性展开对比研究.

1 模型建立与数据处理

本文主要针对不同形状的三种微针肋研究其流动与换热特性,针肋的基本几何结构参数如表 1 所示,散热器底部为平面热源如图 1,尺寸与底板一致. 针肋排列方式如图 2 所示.

表 1 针肋的基本几何结构

Table 1 The basic geometric structure of pin-fin

针肋截面形状/mm	圆形	三角形	方形
通道长度 $L$	40	40	40
通道宽度 $W$	5.2	5.2	5.2
肋片高度 $H$	0.5	0.5	0.5
针肋横向间距 $S_T$	0.8	0.8	0.8
针肋纵向间距 $S_L$	1.2	1.2	1.2
针肋斜向间距 $S_D$	1.26	1.26	1.26

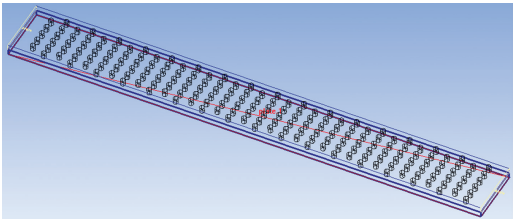


图 1 微通道散热器物理模型

Fig. 1 Physical model of microchannel heat sink

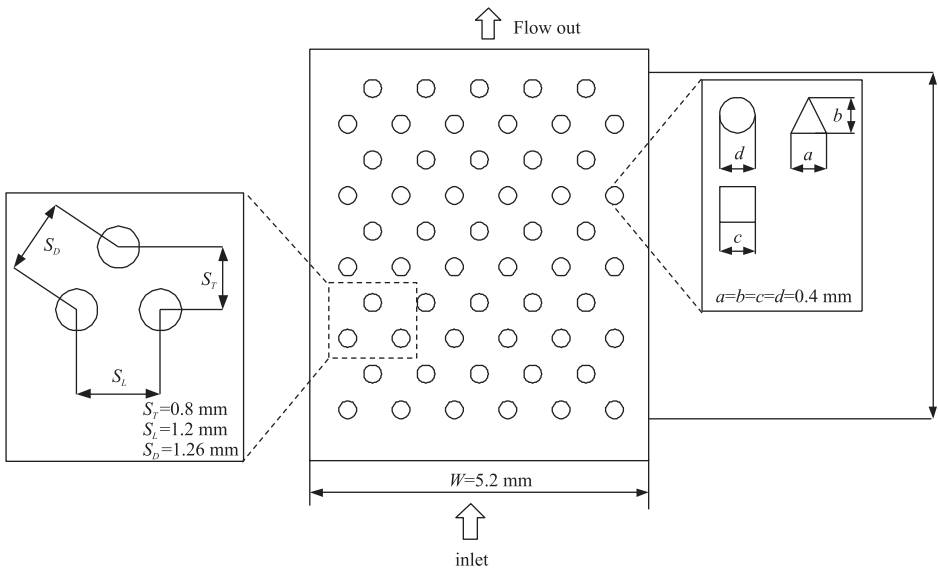


图 2 微通道表面结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of microchannel surface

1.1 计算模型假设

为简化模型,使整个微通道内流体的流动和传热模拟计算更加容易收敛,在不影响最终结果的前提

下,作出以下假设:

- (1)流动状态为稳定的层流流动.
- (2)流体工质不可压缩.
- (3)忽略热辐射效应.
- (4)热物性不随温度发生变化.
- (5)边界绝热无滑移.
- (6)材料各向同性.

1.2 边界条件设定

- (1)进口边界:入口处流体温度为 300 K,速度分别为  $Re$  等于 200、400、600、800 时的流体速度.
- (2)出口边界:压力为外界环境压力,  $P_0 = 101\ 325\ \text{Pa}$ .
- (3)底板及针肋部分均为纯铜,流体工质为水,密度  $\rho = 998\ \text{kg/m}^3$ .
- (4)重力加速度为  $g = 9.8\ \text{m/s}^2$ .
- (5)下加热壁面边界:无滑移,恒热流边界,功率为 50 W.
- (6)两侧边界:绝热边界,无滑移.

离散格式选择:连续性方程采用 Standard 格式,并用 SIMPLE 算法处理压力与速度耦合问题,动量方程采用二阶精度的迎风格式. 计算的残差设置为  $10^{-7}$ .

1.3 网格划分

本文采用对进出口区域采用结构化六面体网格,对针肋区域采用非结构化六面体网格(个别位置有四面体网格构成),对近壁面和针肋区域,由于流速和压力梯度较大,采用较密的网格,网格总数为 125 万. 通过网格依赖性检查,发现网格质量良好,满足计算要求. 网格划分如图 3 所示.

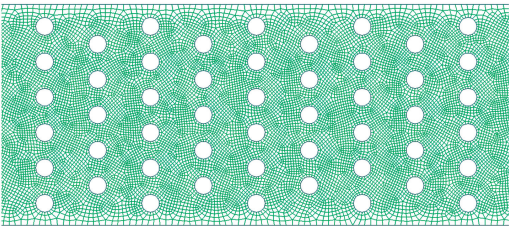


图 3 针肋截面网格示意图

Fig. 3 The grid of pin-fin section

1.4 数据处理

本文利用 ANSYS 进行三维数值模拟,并通过 Tecplot 软件得出通道进出口压力,底板表面平均温度,出口水温等数据,通过表 2 中给出的计算公式处理数据,得到相关的通道流动与换热的评价数据. 其中,  $P_s$ ,  $T_{in}$ ,  $T_{out}$  和  $A_b$  分别为通道湿周、入口水温、出口水温和有效换热面积.

表 2 微通道模拟计算数据处理公式

Table 2 The computational formula of the simulation of microchannel

参数	公式	编号
雷诺数 $Re$	$Re = \frac{u_{\max} D}{\nu}$	(1)
当量直径 $D/\text{m}$	$D = \frac{4A}{P_s}$	(2)
摩擦阻力系数 $f$	$f = \frac{2 \cdot p}{N_x \rho u_{\max}^2}$	(3)
定性温度 $T_f/^\circ\text{C}$	$T_f = \frac{T_{in} + T_{out}}{2}$	(4)
对流换热系数 $h_{av}/(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}))$	$h_{av} = \frac{P}{A_b \cdot (T_{surf} - T_f)}$	(5)
努谢尔特数 $Nu$	$Nu = \frac{h_{av} D}{\lambda}$	(6)
相对平均误差计算	$\eta = \frac{1}{n} \sum \frac{X_{\exp} - X_{\text{num}}}{\max\{X_{\exp}, X_{\text{num}}\}}$	(7)

2 速度场与温度场模拟结果

2.1 局部速度场的分布

完成以上所有设定后,对模型进行模拟计算,对不同形状针肋的模型,均选取距离底板表面 0.1 mm 处

的截面进行观察其速度场和温度场. 图 4 分别为三种形状微针肋的局部速度场,当雷诺数  $Re=200$  时,选取距离底板表面高度为  $0.1\text{ mm}$  的截面能够充分体现通道内的流动情况.

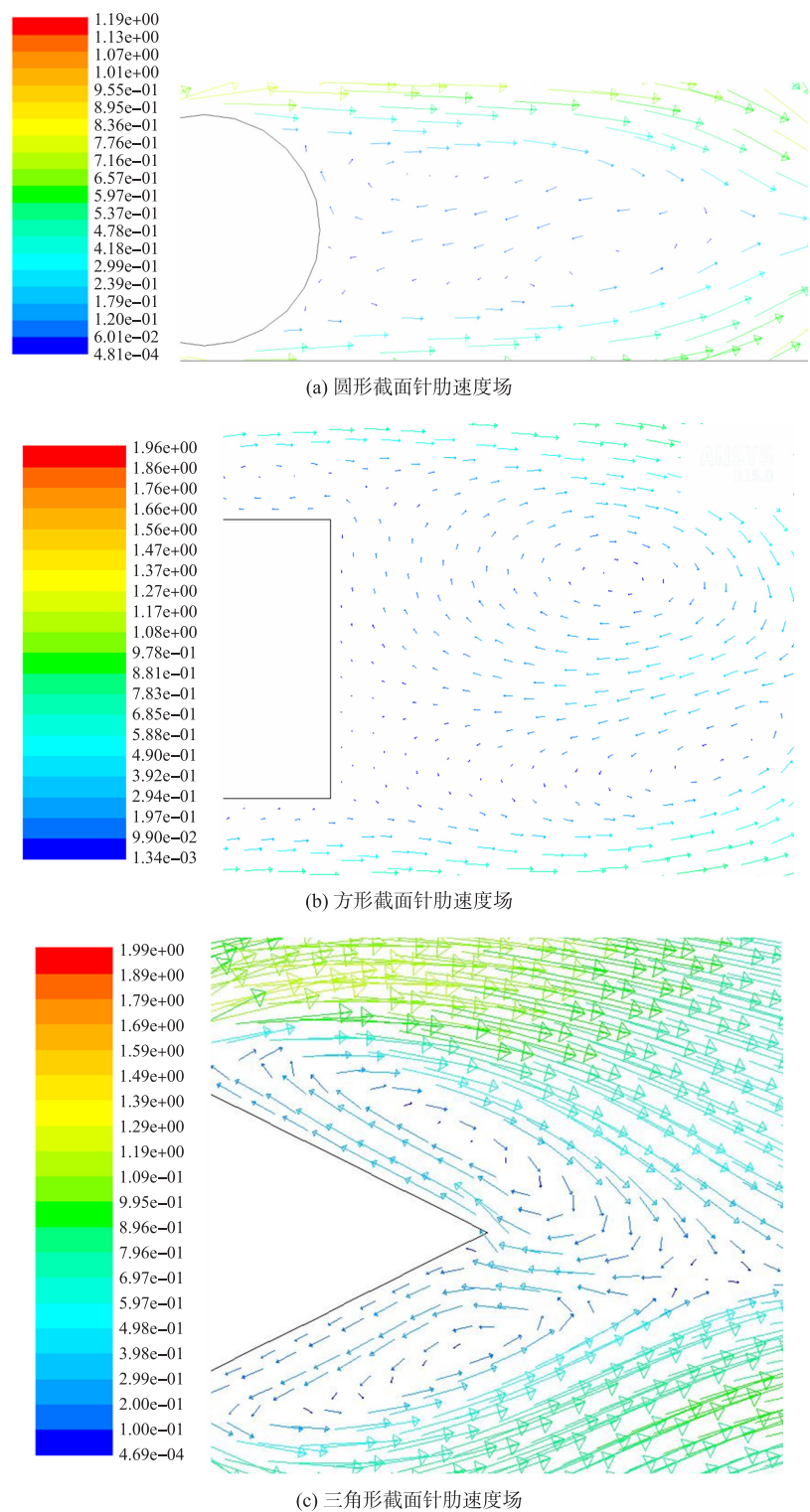


图 4 不同形状针肋的局部速度场

Fig. 4 The local velocity field of difform pin-fin

2.2 温度场分布

三种形状针肋微通道在距离底板表面  $0.1\text{ mm}$  处截面的温度场的分布,如图 5 所示. 由图 5 可知,工质进入微通道后,随着对流换热的进行,流体温度逐渐升高,从温度云图得知,在入口流体温度相同的情况下,由出口处流体温度分布可以定性得知换热效果,针肋形状为圆形时,流体在出口处温度最高,说明带出的热量也最多,换热效果更好.

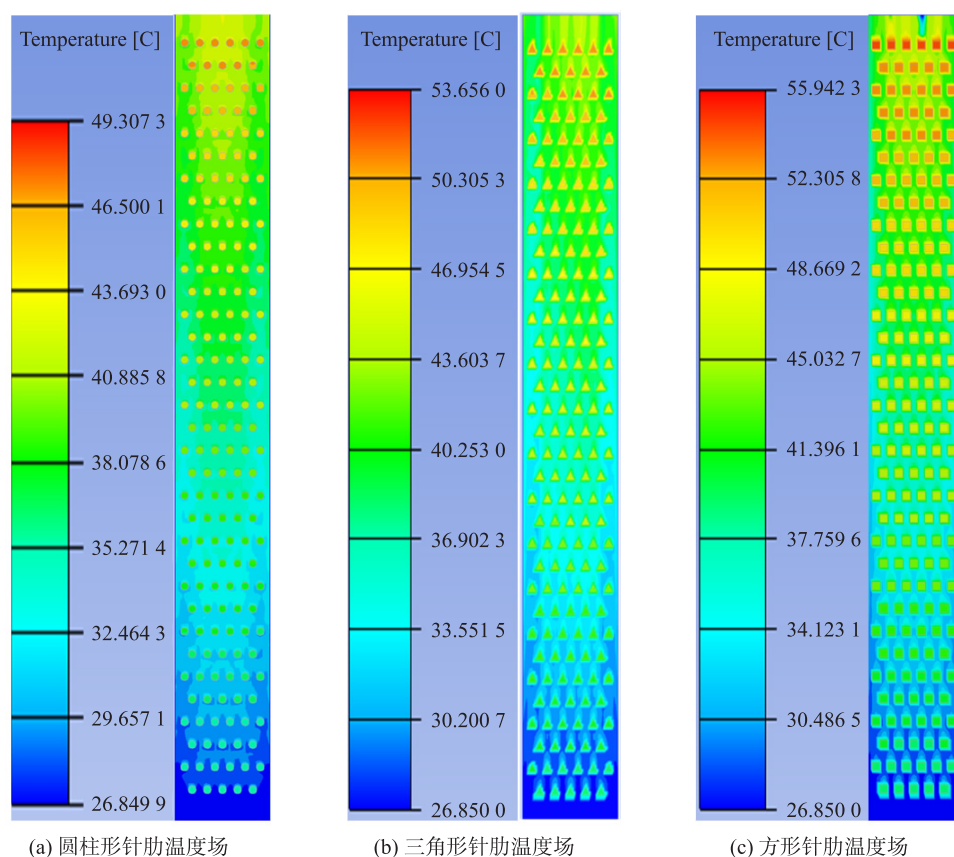


图5 不同形状微针肋的温度场分布

Fig. 5 The temperature field of difform pin-fin

### 3 模拟结果及讨论

#### 3.1 压降和雷诺数的关系

对不同形状针肋的微通道进行三维数值模拟,所得不同雷诺数  $Re$  下的压降  $\Delta p$  (流体通过微通道进出口的压力差)分布,如图6所示.由图6可知,在雷诺数  $Re$  从200增加到800的过程中,三种形状的针肋在压降表现方面差别不大:整体趋势为雷诺数  $Re$  越大,压降  $\Delta p$  越大.相比圆形针肋,三角形针肋和正方形针肋的压降最大相差分别为8.7%和6.5%.随着雷诺数  $Re$  的逐渐增大,三种针肋形状下的微通道压降呈现加速上升的趋势.

#### 3.2 摩擦阻力系数和雷诺数的关系

图7展示了不同的针肋形状下,雷诺数与摩擦阻力系数的关系.可见,雷诺数  $Re$  在200~800内,不同形状的微针肋的摩擦阻力系数  $f$  随着  $Re$  变化,呈现相同的变化规律,即  $f$  随着  $Re$  的增大而减小.根据边界层理论<sup>[14]</sup>,摩擦阻力是流体作用在扰流物体表面的切应力在流动方向上的投影,在流速较小的阶段,方形

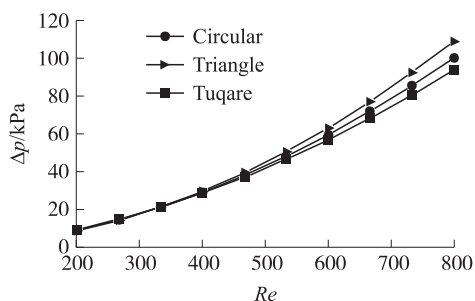


图6 雷诺数与压降的关系

Fig. 6 The relationship between Reynolds number and pressure drop

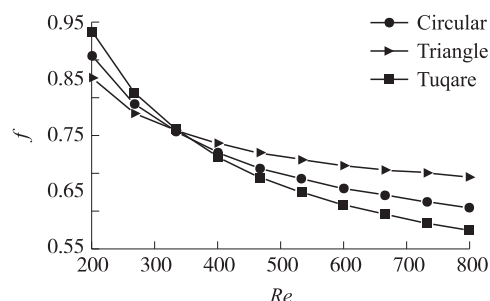


图7 雷诺数与摩擦阻力系数的关系

Fig. 7 The relationship between Reynolds number and friction coefficient

肋柱的最大速度段比圆形和三角形要长,受较厚边界层的影响,摩擦阻力也更大.而在流速较大,雷诺数在 400~800 时,由于结构原因,速度增加同样导致涡流域变细,三角形由于比圆形和方形尾部绕流区域更大,对流动的阻力更大.

### 3.3 通道底板表面温度和雷诺数的关系

图 8 展示了不同针肋形状下,通道底板表面温度和雷诺数的关系.可见,在入口水流温度为 300 K 时,不同针肋的换热底板表面的平均温度与雷诺数的关系.底板表面平均温度  $T_{surf}$  随雷诺数的增加而降低,在  $Re$  相同时,圆形针肋的换热效果最好,底板表面温度较同工况下方形针肋和三角形针肋分别降低 12.6% 和 9.8%.

### 3.4 平均换热系数/努谢尔特数与雷诺数的关系

图 9 展示了不同针肋形状下,平均换热系数和雷诺数的关系.可见,随着雷诺数的增加,平均换热系数  $h$  在持续增加,相比于三角形针肋和方形针肋,圆柱状针肋的平均对流换热系数更高,在  $Re$  为 200 时达到  $22 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

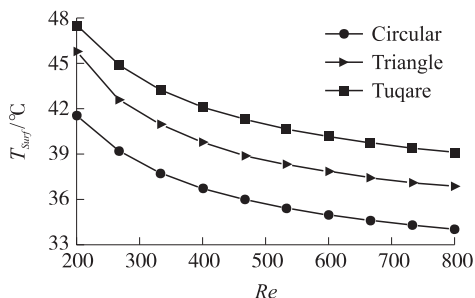


图 8 雷诺数与底板表面温度的关系

Fig. 8 The relationship between Reynolds number and surface temperature of bottom

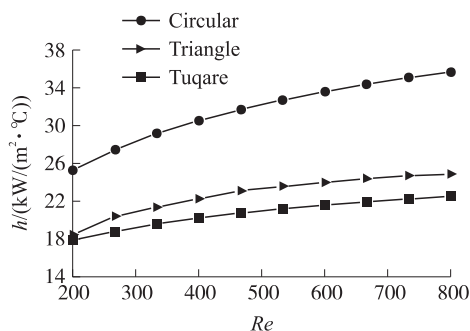


图 9 雷诺数与平均换热系数的关系

Fig. 9 The relationship between Reynolds number and average heat transfer coefficient

图 10 展示了不同针肋形状下,努谢尔特数与雷诺数的关系.可见,微通道换热中,努谢尔特数  $Nu$  随着雷诺数  $Re$  的增大而增大,圆柱形针肋在对流换热方面比三角形和方形针肋更强.

### 3.5 模拟结果与实验结果对比

实验所用为精密加工技术加工的圆形、方形、三角形微针肋阵列<sup>[15-16]</sup>,如图 11 所示,其结构与模拟模型一致,且针肋排列形式均为叉排.控制体积流量并换算为相应雷诺数,对三种针肋形状的微通道进行实验.将模拟结果与相同工况下的实验分别进行对比,并作如下整理.

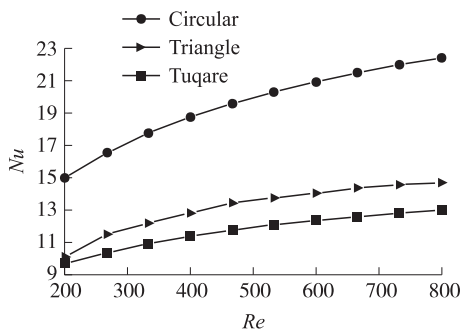


图 10 雷诺数与努谢尔特数的关系

Fig. 10 The relationship between Reynolds number and Nusselt number

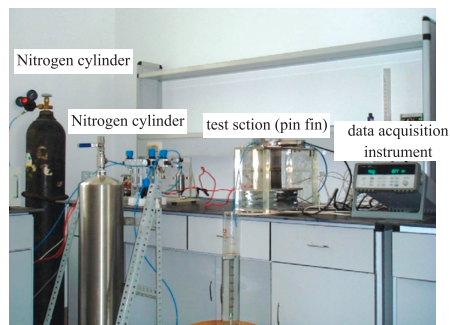


图 11 实验装置图

Fig. 11 The diagram of experimental device

#### 3.5.1 摩擦阻力系数 $f$

对比实验和模拟数据,得到不同针肋形状下,雷诺数与摩擦阻力系数的实验和模拟的对比,如图 12 所示.可见,三种针肋形状下,摩擦阻力系数均随着雷诺数的增加而减小,可以发现实验与模拟结果的趋势基本一致,且根据表 2 中式(7)计算可得,相对误差符合工程精度基本要求,其中圆柱形针肋摩擦阻力相对平均误差为 20.64%,三角形针肋摩擦阻力相对平均误差为 25.37%,方形针肋摩擦阻力相对平均误差为 8.91%.

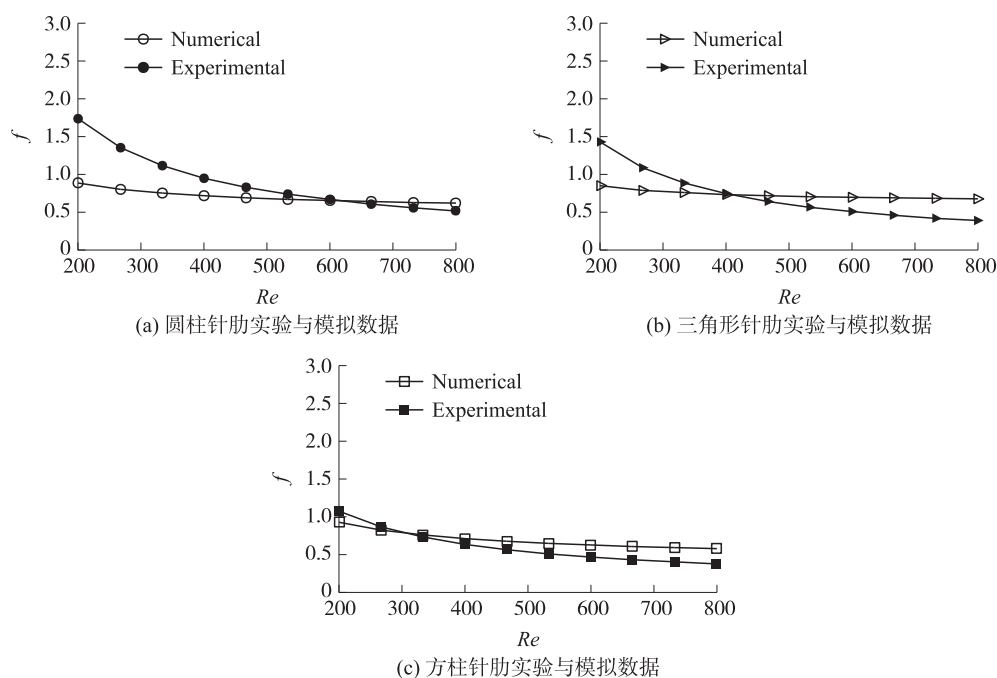
图 12  $Re-f$  实验与模拟对比

Fig. 12 The comparison of the relationship between Reynolds number and friction coefficient by experiment and simulation results

### 3.5.2 努谢尔特数 $Nu$

对比实验和模拟数据,得到不同针肋形状下,雷诺数与努谢尔特数的实验和模拟的对比,如图 13 所示.可见,三种针肋形状下,努谢尔特数均随着雷诺数的增大而增大,基本趋势一致但实验值的增加趋势比模拟值要高.根据表 2 中式(7)计算可得,圆柱形针肋  $Nu$  相对平均误差为 21.14%,三角形针肋  $Nu$  相对平均误差为 21.74%,方形针肋  $Nu$  相对平均误差为 26.17%.

通过对比实验和模拟的结果,可见,模拟与实验的误差不大,整体趋势较为接近.受微尺度效应的影响

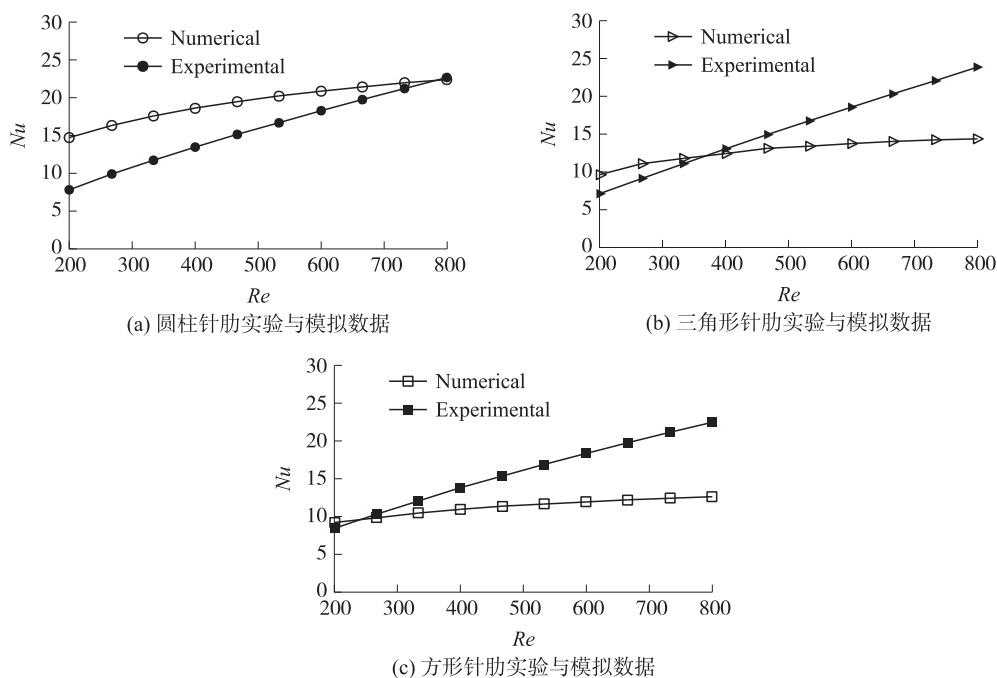
图 13  $Re-Nu$  实验与模拟对比

Fig. 13 The comparison of the relationship between Reynolds number and Nusselt number by experiment and simulation results

响以及实验现场条件的限制,现阶段模型不能完全匹配为尺度下的流动和换热特点,从而引起模拟和实验的结果误差。较低的 $f$ 代表良好的流动性能,较高的 $Nu$ 体现出更好换热效果。故在雷诺数为200~800内圆柱形针肋的 $f$ 和 $Nu$ 整体优于另外两种形状。

## 4 结语

本文通过对不同形状针肋的微通道进行三维数值模拟,发现在流动和换热方面圆形针肋比三角形针肋和方形针肋有一定的优势。

(1)雷诺数相同时,在较小雷诺数下,三角形针肋摩擦阻力系数最小。在较大雷诺数下,方形针肋摩擦阻力系数更小。

(2)在同雷诺数下,圆柱形针肋的对流换热系数优于三角形针肋和方形针肋,在 $Re=200$ 时,对流换热系数高达 $22\text{ kW}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 。当 $Re=800$ 时,对流换热系数增加到 $35\text{ kW}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 。

(3)换热过程中,对比通道底板温度可知,在相同工况下,圆形针肋比方形针肋和三角形针肋的底板温度降低了12.6%和9.8%。圆柱状针肋,在换热方面比三角形针肋和方形针肋更有优势。

(4)由于微尺度效应的影响,模拟值和实验值存在一定的误差,但模拟已经较好地反应出微通道流动换热的影响因素。

## [参考文献](References)

- [1] CHAKRAVARTHII M K D, MUTHARASU D, SHANMUGAN S. Experimental and numerical investigation of pressure drop and heat transfer coefficient in converging-diverging microchannel heat sink[J]. Heat and mass transfer, 2017, 53(7): 2 265–2 277.
- [2] HATAMI M, GANJI D D. Thermal and flow analysis of microchannel heat sink (MCHS) cooled by Cu-water nanofluid using porous media approach and least square method[J]. Energy conversion and management, 2014, 78(78): 347–358.
- [3] HASAN M I. Investigation of flow and heat transfer characteristics in micro pin fin heat sink with nanofluid[J]. Applied thermal engineering, 2014, 63(2): 598–607.
- [4] 杨海明, 朱魁章, 张继宇, 等. 微通道换热器流动和传热特性的研究[J]. 低温与超导, 2008, 36(10): 5–8.  
YANG H M, ZHU K Z, ZHANG J Y, et al. Study on the flow and heat-transfer properties of microchannel heat-exchanger[J]. Cryogenics and superconductivity, 2008, 36(10): 5–8. (in Chinese)
- [5] 阮庭德, 李保国. 芯片微通道换热器的数值模拟与分析[J]. 半导体光电, 2014, 35(2): 289–292.  
RUAN T D, LI B G. Numerical simulation and analysis of chip microchannel heat sinks[J]. Semiconductor optoelectronics, 2014, 35(2): 289–292. (in Chinese)
- [6] 郭春海, 陈希良, 杨旸, 等. 微通道换热器的数值模拟和结构优化[J]. 计算机辅助工程, 2015, 24(4): 61–67.  
GUO C H, CHEN X L, YANG Y, et al. Numerical simulation and structural optimization on microchannel heat exchangers[J]. Computer aided engineering, 2015, 24(4): 61–67. (in Chinese)
- [7] 靳遵龙, 张志超, 陈晓堂, 等. 微通道散热器新型通道设计及性能分析[J]. 低温与超导, 2013, 41(12): 63–69.  
JIN Z L, ZHANG Z C, CHEN X T, et al. Analysis and design of microchannel structure on microchannel heat sink[J]. Cryogenics and superconductivity, 2013, 41(12): 63–69. (in Chinese)
- [8] 康宁, 吴慧英, 徐法尧. 硅基内肋阵列微通道内的流动和换热特性[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(7): 1 572–1 577.  
KANG N, WU H Y, XU F X. Flow and heat transfer characteristics in silicon-based pin-fin microchannels[J]. Journal of engineering thermophysics, 2015, 36(7): 1572–1577. (in Chinese)
- [9] 邱德来, 管宁, 张承武, 等. 加热功率对三角形微肋阵内流动与对流换热特性的影响[J]. 化工学报, 2015, 66(6): 2 062–2 069.  
QIU D L, GUAN N, ZHANG C W, et al. Effect of different heating power on flow and convective heat transfer characteristics of triangle micro pin fins[J]. CIESC journal, 2015, 66(6): 2 062–2 069. (in Chinese)
- [10] 夏国栋, 崔珍珍, 翟玉玲, 等. 长菱形微针肋热沉的流动与换热特性[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(2): 130–134.  
XIA G D, CUI Z Z, ZHAI Y L, et al. Flow and heat transfer characteristics for long-diamond shaped micro pin fin[J]. Journal of China university of petroleum (edition of natural science), 2014, 38(2): 130–134. (in Chinese)

- [11] 张承武,浦龙梅,姜桂林,等. 不同截面形状微肋片内流动阻力特性[J]. 化工学报,2014,65(6):2042-2048.  
ZHANG C W,PU L M,JIANG G L,et al. Resistance characteristics of micro pin fins with different cross-section shapes[J]. CIESC journal,2014,65(6):2042-2048. (in Chinese)
- [12] 潘娜娜,潘艳秋,俞路,等. 微通道冷却器内流动和传热特性的数值模拟[J]. 强激光与粒子束,2016,28(2):7-12.  
PAN N N,PAN Y Q,YU L,et al. Numerical simulation of flow and heat transfer characteristics in microchannel cooler[J]. High power laser and particle beams,2016,28(2):7-12. (in Chinese)
- [13] 褚雯霄,李雄辉,马挺,等. 不同肋片结构的印刷电路板换热器传热与阻力特性[J]. 科学通报,2017,62(16):1 788-1 794.  
CHU W X,LI X H,MA T,et al. Heat transfer and pressure drop performance of printed circuit heat exchanger with different fin structures[J]. Chinese science bulletin,2017,62(16):1 788-1 794. (in Chinese)
- [14] 刘应中,缪国平. 高等流体力学[M]. 上海:上海交通大学出版社,2002.  
LIU Y Z,MIAO G P. Advanced Fluid Mechanics[M]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University Press,2002. (in Chinese)
- [15] HUA J,LI G,ZHAO X F,et al. Experimental study on thermal performance of micro pin fin heat sinks with various shapes[J]. Heat and mass transfer,2017,53(3):1 093-1 104.
- [16] HUA J Y,LI G,ZHAO X B,et al. Study on the flow resistance performance of fluid cross various shapes of micro-scale pin fin[J]. Applied thermal engineering,2016,107(8):768-775.

[责任编辑:陈 庆]