

# 不同形状疏水性微肋阵内流场 Micro-PIV 流动可视化研究

秦露雯<sup>1</sup>, 华君叶<sup>1,2</sup>, 张秀强<sup>1</sup>, 赵孝保<sup>1,2</sup>, 祝 叶<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

(2. 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)

**[摘要]** 运用 Micro-PIV 显微粒子图像测速系统对不同截面形状、不同接触角微肋阵的流动特性展开可视化研究. 通过制备接触角为  $83^\circ$ 、 $99.5^\circ$ 、 $121.5^\circ$ 、 $151.5^\circ$  的疏水表面, 研究  $Re$  数为 100~450 时工质绕流圆形、椭圆形和菱形微肋阵速度与流线变化, 并对流场进行分析. 实验结果表明, 在圆形微肋阵中尾涡的出现相比于宏观尺度有明显延迟, 直到  $Re$  达到 250 时在中间的圆柱尾部才出现对称漩涡. 对比 3 种形状微肋阵可发现, 椭圆形具有的流线型结构和菱形具有的细长结构不易发生边界层分离. 在经过疏水性处理后, 圆形针肋尾部的边界层分离明显延迟, 接触角为  $151.5^\circ$  的表面边界层最晚分离.

**[关键词]** 疏水性微肋阵, 微肋阵, 接触角, 流场, Micro-PIV 系统

**[中图分类号]** TK124 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2019)02-0007-11

## Micro-PIV Measurement and Numerical Simulation of Flow Field in Micro Pin-Fin Heat Sink with Different Shapes

Qin Luwen<sup>1</sup>, Hua Junye<sup>1,2</sup>, Zhang Xiuqiang<sup>1</sup>, Zhao Xiaobao<sup>1,2</sup>, Zhu Ye<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** The micro-particle image velocimetry (Micro-PIV) system has been used to visualize the flow distribution of micro pin-fin arrays with different shapes and contact angles. By preparing hydrophobic surfaces with contact angles of  $83^\circ$ ,  $99.5^\circ$ ,  $121.5^\circ$  and  $151.5^\circ$ , the velocity and streamline of working fluid flows across circular, ellipse and diamond micro pin-fin arrays when Reynolds numbers ranging from 100 to 450 have been analyzed, and the flow field has been investigated as well. The experimental results show that the appearance of vortices at the back of circular pin-fin is significantly delayed compared with the macroscale, and that symmetrical vortices do not appear at the tail of middle cylinder until Reynolds number reaches 250. Comparing the three kinds of micro pin-fin arrays, it can be found that the ellipse with the streamlined structure and the diamond with slender structure cause the results that the boundary layer separation is not easy to occur. After hydrophobic treatment, the separation of boundary layer at the tail of circular pin-fin is significantly delayed, and the boundary layer of the surface with contact angle of  $151.5^\circ$  is separated latestly.

**Key words:** hydrophobic micro pin-fin array, different shapes of pin-fin, contact angle, flow field, Micro-PIV system

微通道一直被广泛应用于高效散热领域, 微肋阵热沉作为微通道的变形因其体积小、高面体比而具有较好的强化传热效果得到研究人员广泛关注. 近年来, 不同形状、不同布置方式的微针肋热沉内流动和换热特性得到了广泛研究<sup>[1-3]</sup>. 研究表明不同形状微肋阵的流动对系统热沉性能有着较大影响. 张承武等<sup>[4]</sup>实验研究了 3 种不同截面形状微肋阵的流动阻力特性, 发现受微尺度效应的影响, 随着流量增大, 针肋形状对流动的影响逐渐增强; 3 种微肋阵中菱形摩擦阻力最小, 圆形摩擦阻力最大. 杨宇辰等<sup>[5]</sup>通过对直径为  $200\ \mu\text{m}$  不

收稿日期: 2019-02-27.

基金项目: 江苏省高校自然科学研究面上项目(16KJB470008)、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, 高级实验师, 研究方向: 强化传热. E-mail: huajunye@njnu.edu.cn

同孔隙率圆形微肋阵内流动和传热特性进行数值模拟,发现随着  $Re$  的增加,针肋尾部涡的数量逐渐增加;微肋阵孔隙率较大时热流密度上升,会导致微通道的努谢尔数  $Nu$  上升. Guan 等<sup>[6-7]</sup> 利用数值方法研究了肋柱高度、直径和热流密度对涡流分布、温差和换热性能的影响,结果表明,针肋高度和直径对传热性能的影响大于其他因素. 邱德来等<sup>[8]</sup> 通过实验研究三角形微肋阵内加热功率对流动和换热的影响,发现当雷诺数较低时微肋阵的热阻会随加热功率增大而增加,而  $Re$  大于 200 时,热阻将不再受加热功率影响.

总体来说,对于不同形状的微通道内流动和传热特性的研究已有很多,而由于流场和微尺度流动特性的复杂性,粒子图像测速技术(Micro-PIV)已成为深入研究微肋阵周围流动分布的有效方法. 为了进一步研究微肋阵内流动性能,谢海波等<sup>[9]</sup> 通过 Micro-PIV 技术对几种典型微管道的流场进行实验测试,发现 Micro-PIV 是适用于微米级流场检测最有效的实验手段. Zhai 等<sup>[10]</sup> 将 Micro-PIV 与数值模拟相结合,得到了雷诺数在 70~320 之间带针肋和腔室的微通道内矢量场和速度分布. 他们将微通道中换热的增强归因于针肋和腔室的存在,冷热流体在二次流的作用下更容易在腔室中混合. Wang 等<sup>[11-12]</sup> 对微通道内单针肋下游的局部温度分布和换热系数进行了数值模拟和  $\mu$ PIV 实验研究. 结果表明,硅制针肋的存在和针肋周围产生的非均匀热有利于降低针肋尾部的表面温度. 徐明等<sup>[13]</sup> 提出一种基于低密度粒子图像的测速技术,利用 Micro-PIV 对长直微通道的速度场进行测量,极大方便了极细通道和复杂结构微通道内流场测量. 崔珍珍<sup>[14]</sup> 基于 Micro-PIV 可视化实验系统对 Y 型进口微通道内气液两相混合流流场进行了测量,研究表明 Y 型通道中会生成形状规则、大小均一的液弹,其速度场呈阶梯形分布. Xu 等<sup>[15]</sup> 对交错排列方形和圆形针肋的微通道流动特性进行了实验研究,并通过  $\mu$ PIV 测量系统研究了微肋阵的速度场和尾迹流态,研究发现,叉排针肋的平均流速波动和平均横向速度波动的变化与压降和摩擦系数的增加无关.

随着研究的深入,有部分学者开始研究表面特性对微通道流动性能的影响. 祝叶等<sup>[16]</sup> 制备了不同接触角的圆形、椭圆和菱形微肋阵,并对其流动和换热特性进行了实验研究,结果表明疏水性处理可大大降低摩擦阻力系数,同时菱形的综合性能在  $Re>1\ 200$  时最优. 姜桂林等<sup>[17]</sup> 在圆形、椭圆形和菱形微肋阵上分别制备了 3 种不同疏水性的表面,研究表面特性对微肋阵减阻的影响,结果表明,接触角越大,减阻率越好. 综上所述,目前对于微针肋热沉流场的实验研究有很多,但大多集中在几种常规形状的微通道且仅对流场的流动特性进行分析,对不同表面特性、不同形状微肋阵内流动特性的研究与分析尾部涡流形态相结合的研究还比较少. 本文在 3 种形状的微肋阵中制备 4 种不同接触角的表面,结合 Micro-PIV 可视化实验研究系统对不同形状微肋阵内的流场进行对比研究.

1 微通道实验件与实验系统

1.1 微肋阵尺寸

实验段如图 1 所示,由微通道以及与工质流动方向垂直的针肋构成,通道长  $L=47\text{ mm}$ ,宽  $W=5\text{ mm}$ ,高  $H=0.5\text{ mm}$ ,由横截面分别为圆形、椭圆以及菱形的针肋叉排形成微肋阵,针肋尺寸如表 1 所示. 实验前将实验段放入超声波振荡器中清洗 30 min,随后在洗净的实验件上盖上透明玻璃,并用 704 硅橡胶密封形成封闭流道.

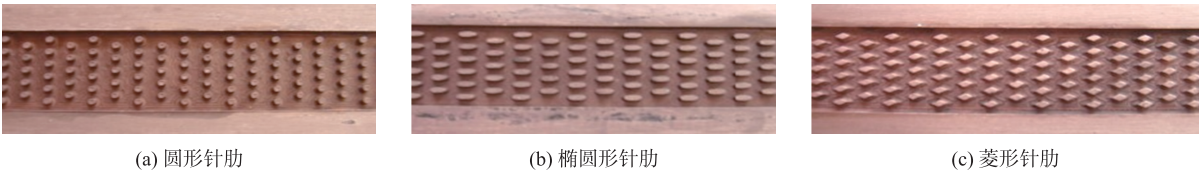


图 1 实验段照片  
Fig. 1 Local physical map of micro pin-fin heat sinks

表 1 微针肋热沉实验尺寸  
Table 1 Dimension of micro pin-fin heat sinks

针肋形状	短轴 $a$	长轴 $b$	当量直径 $D$	针肋横向间距 $S_T$	针肋纵向间距 $S_L$	针肋斜向间距 $S_D$
圆	0.4	0.4	0.4	0.8	1.2	1.26
椭圆	0.4	0.8	0.3	0.8	1.2	1.26
菱形	0.4	0.8	0.18	0.8	1.2	1.26

1.2 不同接触角疏水性微肋阵的制备

疏水性溶液制备过程如下:在乙酸丁酯中溶解环氧改性有机硅并和乙醇混合形成稀溶液,先加入少量正硅酸四乙酯硅氧烷水解促进剂,再加入醋酸 pH 调节剂搅匀,然后将浓度为 2%的全氟辛基三乙氧基硅氧烷缓缓加入溶剂中,最后加入固化剂并搅拌均匀<sup>[18]</sup>. 将配制好的超疏水溶液用喷笔均匀喷涂到铜片上,在 88 ℃真空干燥箱中静置 2 h. 图 2 为水滴在超疏水表面的实物图.

如图 3 所示,使用接触角测试仪(上海中晨 JC-2000)对疏水性处理前后的紫铜表面进行接触角测量,液滴体积为 8  $\mu\text{L}$ ,测量过程中,通过对实验段不同位置的接触角取平均值得到微肋阵的接触角.

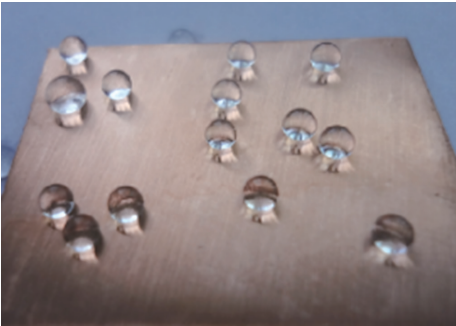


图 2 超疏水表面水滴实物图  
Fig.2 Local physical map of droplet on superhydrophobic surface

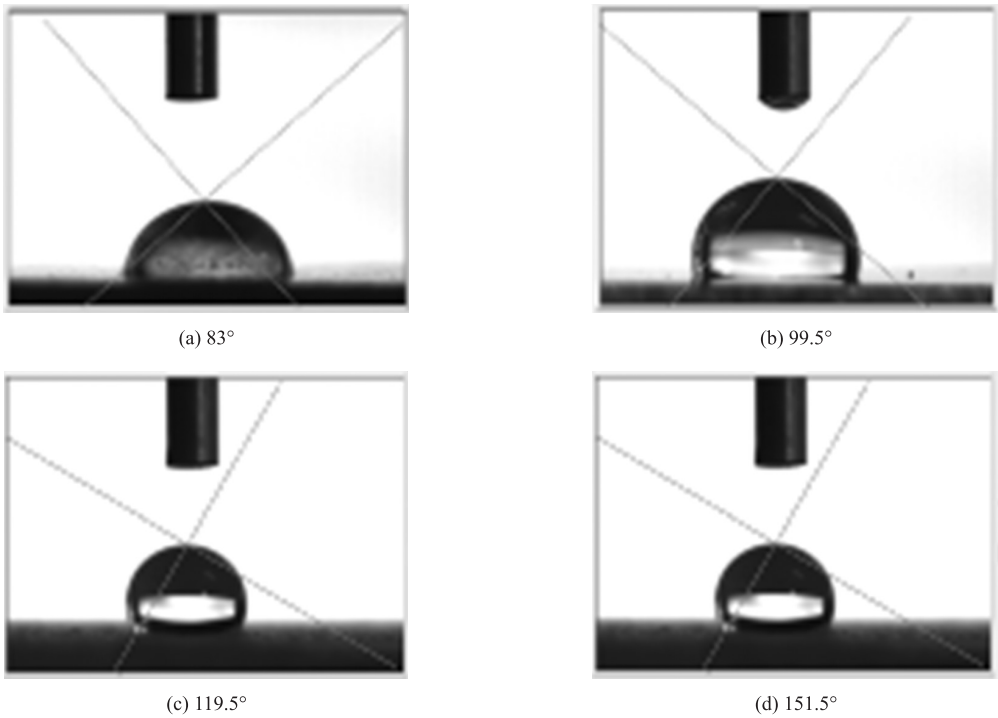


图 3 紫铜光面与不同涂层接触角测试  
Fig.3 Measurement of contact Angle of different coatings on copper surface

在对微肋阵进行疏水性处理后,将实验段放入温度为 85 ℃的超声波振荡器内清洗 3 h 后取出,测量各个实验段的接触角,对比发现清洗前后接触角变化均小于 2°,证明疏水涂层的疏水性能能够在较高水温的不间断冲刷下保持稳定. 微肋阵实验段在经过疏水性处理后的尺寸如表 2 所示.

用电镜扫描对涂覆并固化了疏水性涂层的椭圆形微肋阵表面厚度进行测量,结果如图 4 所示. 对接触角为 99.5°、119.5°和 151.5°的涂层进行测量,厚度分别为 15、44.5 和 75.5  $\mu\text{m}$ .

1.3 Micro-PIV 实验系统

Micro-PIV 系统如图 5 所示,实验台主要由 Micro-PIV 测量系统、实验测量段和驱动系统 3 部分组成. 测量系统的主要部件有 YAG200-15-QTL 激光器、CCD 相机、KCC-RREM-OLY 显微系统以及同步控制器. 实验中选择密度 1.51  $\text{g}/\text{cm}^3$ 、直径 2  $\mu\text{m}$  的三聚氰胺甲醛树脂微球作为示踪粒子,和超纯水按体积比 1:10 进行

表 2 实验段微肋阵几何尺寸

Table 2 Geometric dimension of micro pin-fin array

in experimental section				mm
圆	$d$	$W$	$S$	
83°	0.500	3.500	1	
99.5°	0.530	3.470	—	
121.5°	0.589	3.411	—	
151.5°	0.651	3.349	—	

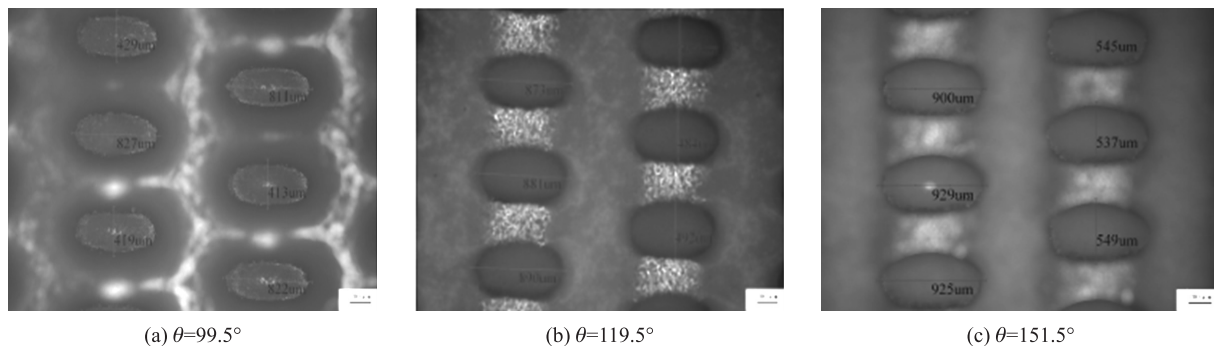


图 4 紫铜微肋阵实验段扫描电镜图

Fig. 4 Scanning electron microscope of experimental section of copper micro pin-fin array

混合. Micro-PIV 测速基本原理如图 6 所示,实验前将荧光示踪粒子撒播在工质中,当脉冲光源经过荧光滤色镜时会反射到工质上,示踪粒子被 532 nm 的脉冲激光诱导后会发出 610 nm 的红光,这种红光能透过 CCD 相机中滤光装置被捕捉<sup>[19]</sup>. 实验过程中通过调节平流泵的流量值来控制微通道内流速.



图 5 Micro-PIV 系统实物图

Fig. 5 Local physical map of Micro-PIV system

#### 1.4 实验数据处理

微肋阵中雷诺数由下式进行计算:

$$Re = \frac{\rho u_{\max} D}{\mu} \quad (1)$$

微肋阵的特征尺寸采用水力直径,  $u_{\max}$  为通道内最小截面处流速值,公式为:

$$u_{\max} = \frac{G_m}{\rho H (W - ND)} \quad (2)$$

式中,  $N$  为与流动方向垂直的肋片个数最大值.

流动阻力系数由下式计算:

$$f = \frac{2\Delta p}{n\rho u_{\max}^2} \quad (3)$$

式中,  $n$  为沿流动方向的针肋个数.

## 2 实验数据分析

实验中通过控制流量来改变雷诺数的大小,对不同雷诺数下圆形肋柱的尾流进行了测量. 考虑到雷诺数较小时示踪粒子粘壁严重,对结果处理有一定影响;而雷诺数较大时,示踪粒子位移过大,相邻两帧图像无法准确捕捉到示踪粒子,因此实验在  $Re$  数为 100~450 下进行.

工质流进实验件后,首先在未布置针肋的通道中均匀流动,接着进入有针肋的区域,随着通道变窄,流速迅速增加,流动过程中由于针肋的阻挡,流体冲击针肋前部并发生分离,随后沿着肋的侧壁进行流动换

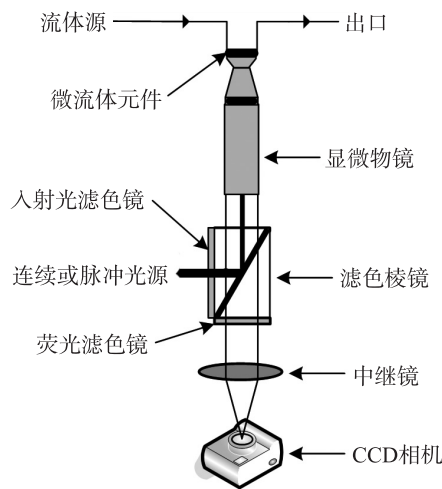


图 6 Micro-PIV 工作原理图

Fig. 6 Operation schematic diagram of Micro-PIV system



热,绕流针肋后和另一侧的来流相遇,相互作用后冲击下一排肋柱,再次分离改变流动方向,如此循环,直至经过最后一排肋柱。

实验所用示踪粒子直径为  $2\text{ }\mu\text{m}$ ,和超纯水按 1:10 的体积比混合,图 7 和图 8 是不同接触角的圆形微肋阵在  $2\times/0.06$  显微物镜下所成的像,图中两帧图像之间的时间间隔  $\Delta t=0.001\text{ }\mu\text{s}$ 。

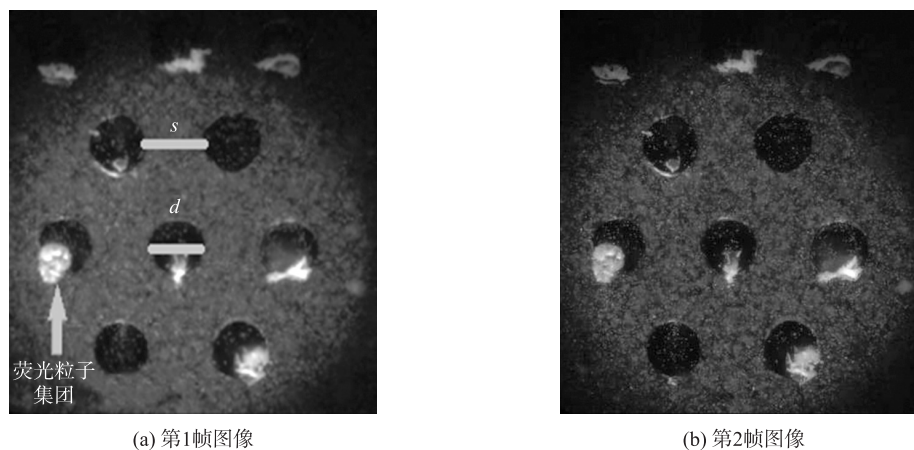


图 7  $83^\circ$ 微肋阵内的粒子图像

Fig. 7 Particle image in  $83^\circ$  micro pin-fin array

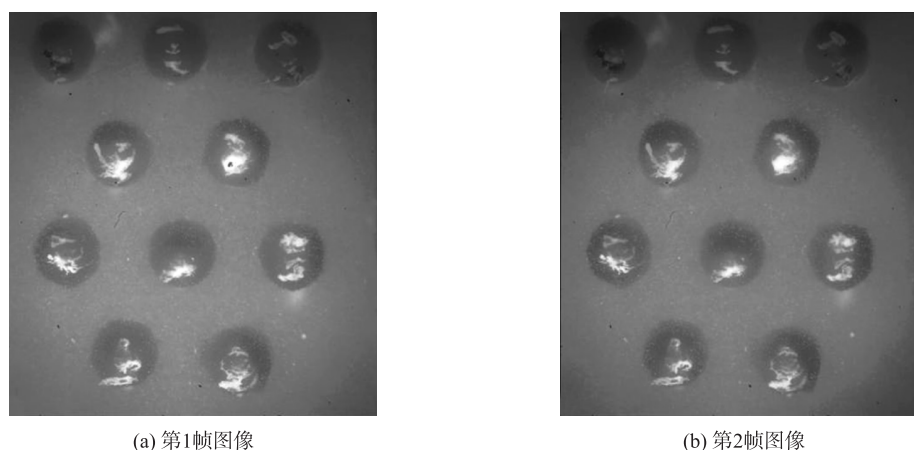


图 8  $151.5^\circ$ 微肋阵内的粒子图像

Fig. 8 Particle image in  $151.5^\circ$  micro pin-fin array

从图中可知,少量粒子从通道顶部间隙穿过,在  $83^\circ$ 微肋阵中拍出的粒子图像比较清晰,而经过疏水性涂层的喷涂后,表面的薄膜可能会反光致使图片发白,示踪粒子不易辨别。另外,由于相邻两帧图像间隔很短,荧光粒子随流体的流动无法通过肉眼准确观察,但通过电脑对矢量场的捕捉和计算能够得到较为准确的测量结果。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 绕流不同接触角圆形微肋阵实验结果分析

实验选取微通道中后部肋柱进行测量,该处流动已充分发展。采用 Micro-PIV 系统得到圆形微肋阵中 24~25 排圆柱在不同  $Re$  数下的流线如图 9 所示。

观察图 9 可知,当  $Re=100$  时,25 排最中间的圆柱首先产生回流现象,圆柱尾部在  $Re$  达到 150 时出现了涡结构,随着  $Re$  数的增加,当  $Re\geq 250$  时尾部出现两个对称的小漩涡;当  $Re$  数继续增大,圆柱尾部的涡结构逐渐脱离针肋,稳定地出现在针肋的后部。而宏观尺度下,在  $5<Re<40$  时就有两个对称的涡结构出现<sup>[20]</sup>,由此可见微尺度下绕流柱体现象中涡流的出现相对于常规尺度有一定的滞后。图中其他 4 个圆柱,当  $Re=150$  时出现非对称涡结构,但随着  $Re$  的增大,圆柱尾部涡结构逐渐趋于对称。

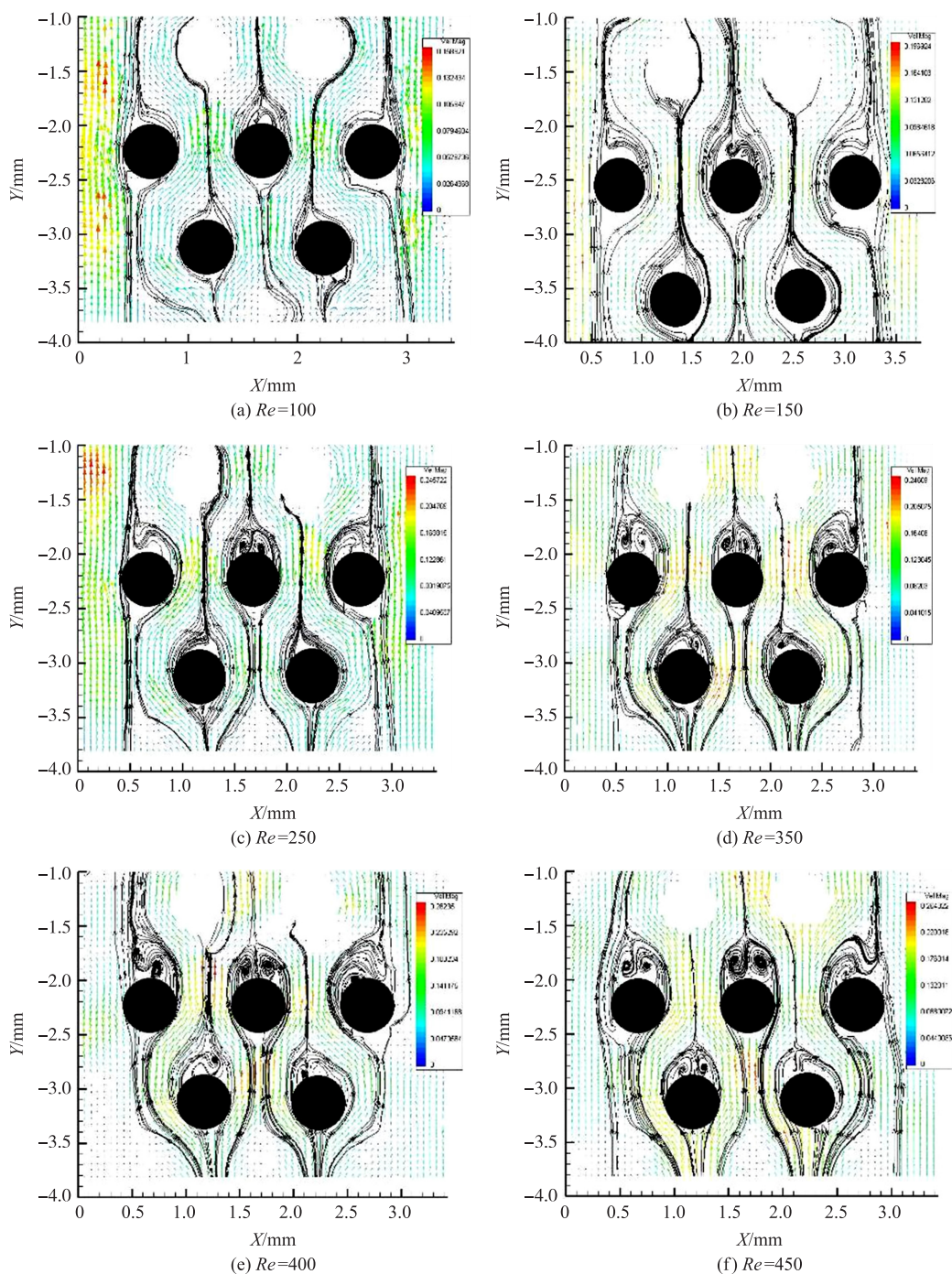


图 9 83°圆形微肋阵的流线图

Fig. 9 Streamline diagram of 83° circle micro pin-fin heat sinks

为了更好地研究针肋尾部涡流的产生和脱落情况,将涡流在针肋侧壁产生的点与针肋在流动方向上的直径所形成的夹角记为  $\varphi$ ,将针肋尾部形成完整涡结构的长度记为  $L_v$ ,如图 10 所示. 随雷诺数的上升,位于微肋阵中间列的圆柱尾部回流长度  $L_v$  和分离角  $\varphi$  的变化曲线如图 11 所示. 由图可知,圆形微肋阵内不同排圆柱尾部分离角度和回流长度均随  $Re$  上升而增大;而由于上游针肋的阻滞作用,在相同  $Re$  下,上游微肋阵尾部的  $L_v$  值小于下游.

按照实验步骤分别制备了接触角为 99.5°、121.5°、151.5° 的圆形微肋阵,工质在  $Re$  数从 100 到 450 下分别扰流微肋阵.

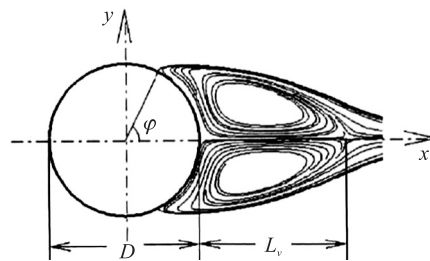


图 10 圆柱稳态尾流分离角和回流长度示意图

Fig. 10 Schematic diagram of separation angle and return length of cylinder steady wake flow



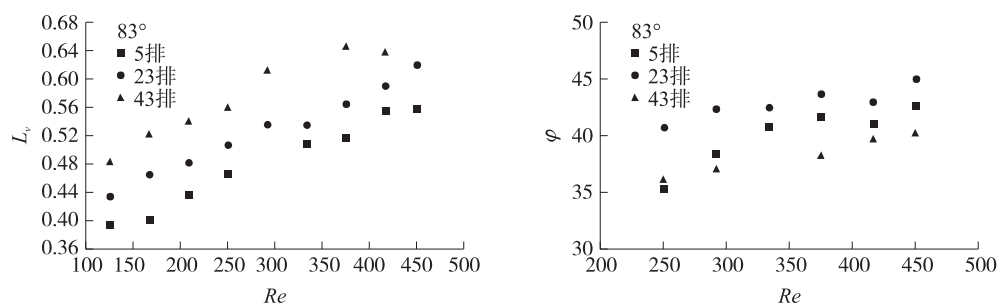
图 11 不同  $Re$  微肋阵回流长度和分离角变化规律

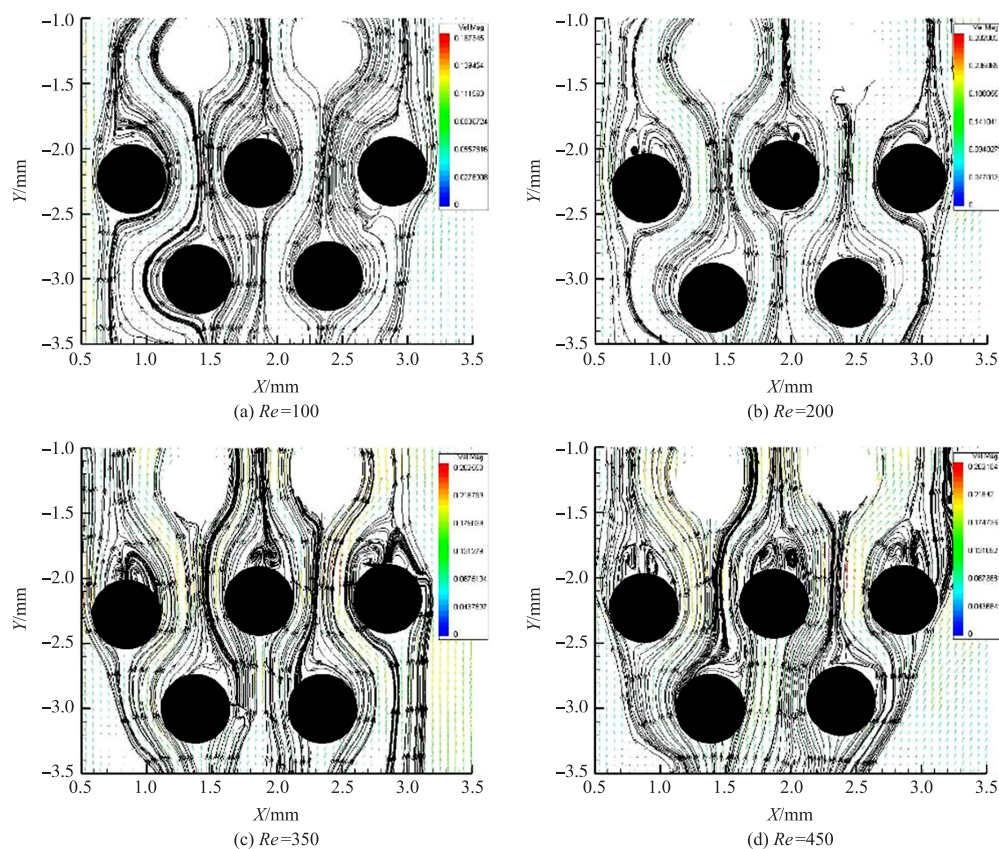
Fig. 11 Changing rules of separation angle and return length under different Reynolds number in micro pin-fin arrays

图 12 为流体绕流接触角为  $99.5^\circ$  圆形微肋阵的流线图。当  $Re = 100$  时,接触角为  $99.5^\circ$  的圆形微肋阵最中间的圆柱首先发生回流;当  $Re$  达到 200 时,开始出现微小的涡结构;直到  $Re = 450$ ,最中间圆柱后部才形成两个完整的对称涡结构,相比于接触角  $83^\circ$  的微肋阵中涡结构的出现明显延迟。

图 13 为绕流接触角为  $121.5^\circ$  圆形微肋阵的流线图。当  $Re = 100$  时,最中间的圆柱尾部出现了回流;当  $Re$  达到 200 时,针肋尾部形成了单个完整的涡结构;随着  $Re$  的增大,当  $Re = 450$  时,最中间圆柱尾部的对称涡结构已经形成,且脱离针肋尾部,相比于接触角为  $83^\circ$  和  $99^\circ$  的微肋阵涡结构的出现明显延迟。

图 14 为绕流接触角为  $151.5^\circ$  圆形微肋阵的流线图。随着  $Re$  的增加,直到  $Re = 350$  时尾部才出现不稳定涡结构,且尾部的涡结构所占面积较其他接触角明显减小。

从图 12~14 中可以发现,接触角的增大会导致涡结构出现明显延迟,因此在研究不同接触角的微肋阵时选取的流速不同。不难看出经过疏水处理后的表面,接触角越大,针肋尾部出现回流时的流速越大,形成尾涡的  $Re$  数也逐渐上升。针肋后部涡流的出现会增大流动阻力,接触角越大的微肋阵产生的涡流面积越小,因此,减阻效果越好。这是因为疏水表面的微纳米结构使空气和水之间流动滑移增大,降低了摩擦阻力,延迟了边界层分离的出现,从而降低了压差阻力。

图 12  $99.5^\circ$  圆形微肋阵的流线图Fig. 12 Streamline diagram of  $99.5^\circ$  circular micro pin-fin heat sinks

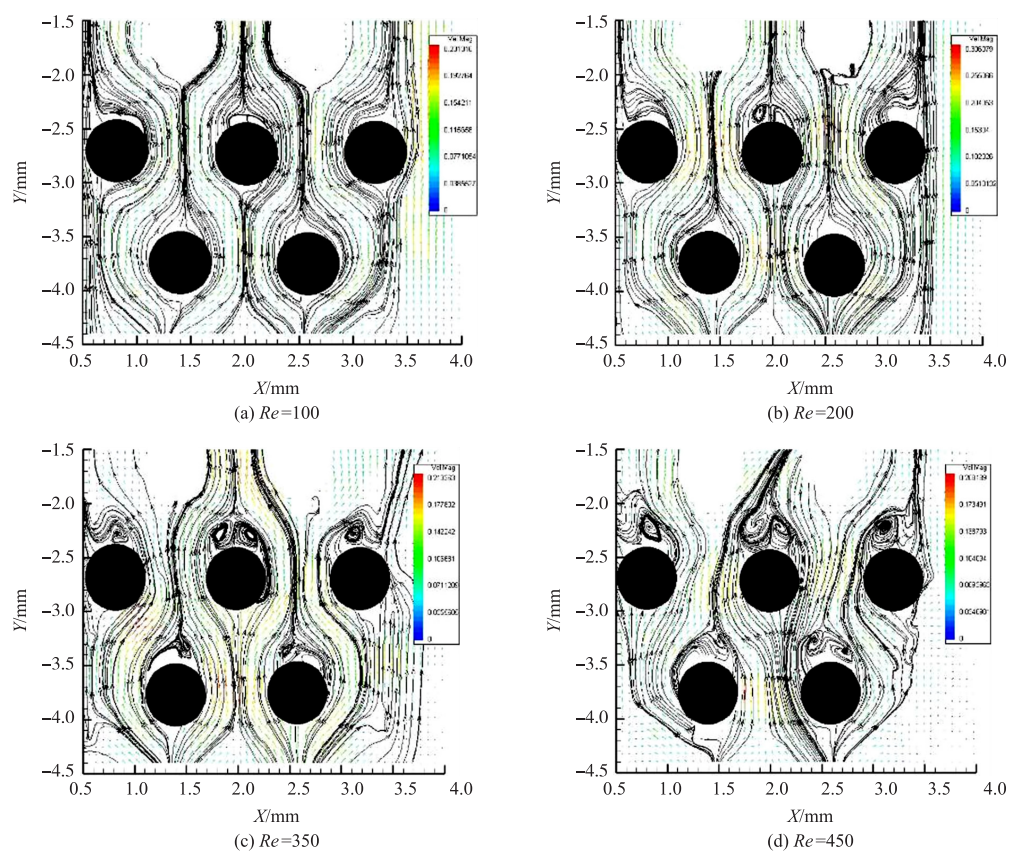


图 13 121.5° 圆形微肋阵的流线图

Fig. 13 Streamline diagram of 121.5° circular micro pin-fin heat sinks

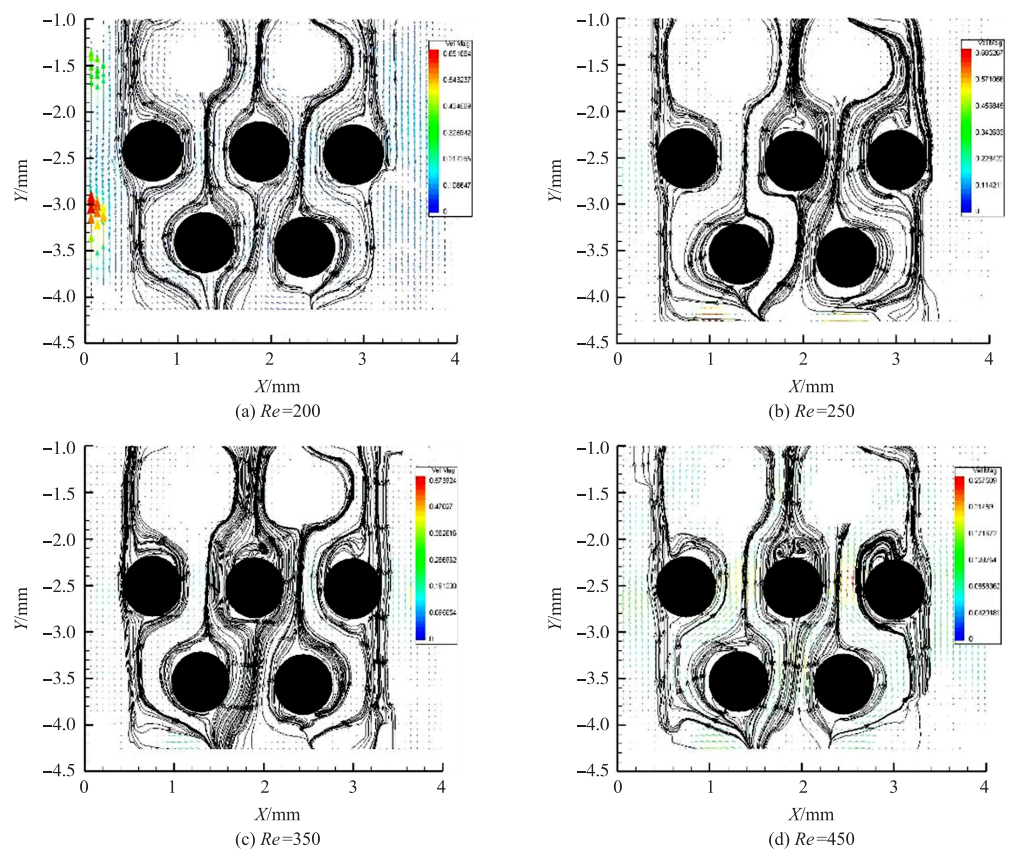


图 14 151.5° 圆形微肋阵的流线图

Fig. 14 Streamline diagram of 151.5° circular micro pin-fin heat sinks



### 3.2 绕流不同形状微肋阵实验结果分析

不同雷诺数下流体绕流椭圆形 24~25 排微肋阵尾流流场迹线如图 15 所示. 从图中可以看出, 在  $Re$  从 100 到 450 之间, 椭圆微肋阵未发生边界层分离. 微通道中相邻两针肋之间形成了渐缩通道, 工质在流动过程中由于流道突然变窄, 导致流速上升, 由于椭圆形针肋具有的流线型结构, 导致在两相邻针肋的最大短轴处流速达到最大.

流体在不同雷诺数下绕流菱形 24~25 排微肋阵尾流流场迹线如图 16 所示. 从图中可以看出, 菱形微肋阵和椭圆形一样均未发生边界层分离. 工质流经微肋阵时, 通过两相邻菱形针肋之间构成的渐缩渐扩通道, 流速会上升, 在逐渐流到下一排针肋的过程中, 流速逐渐降低.

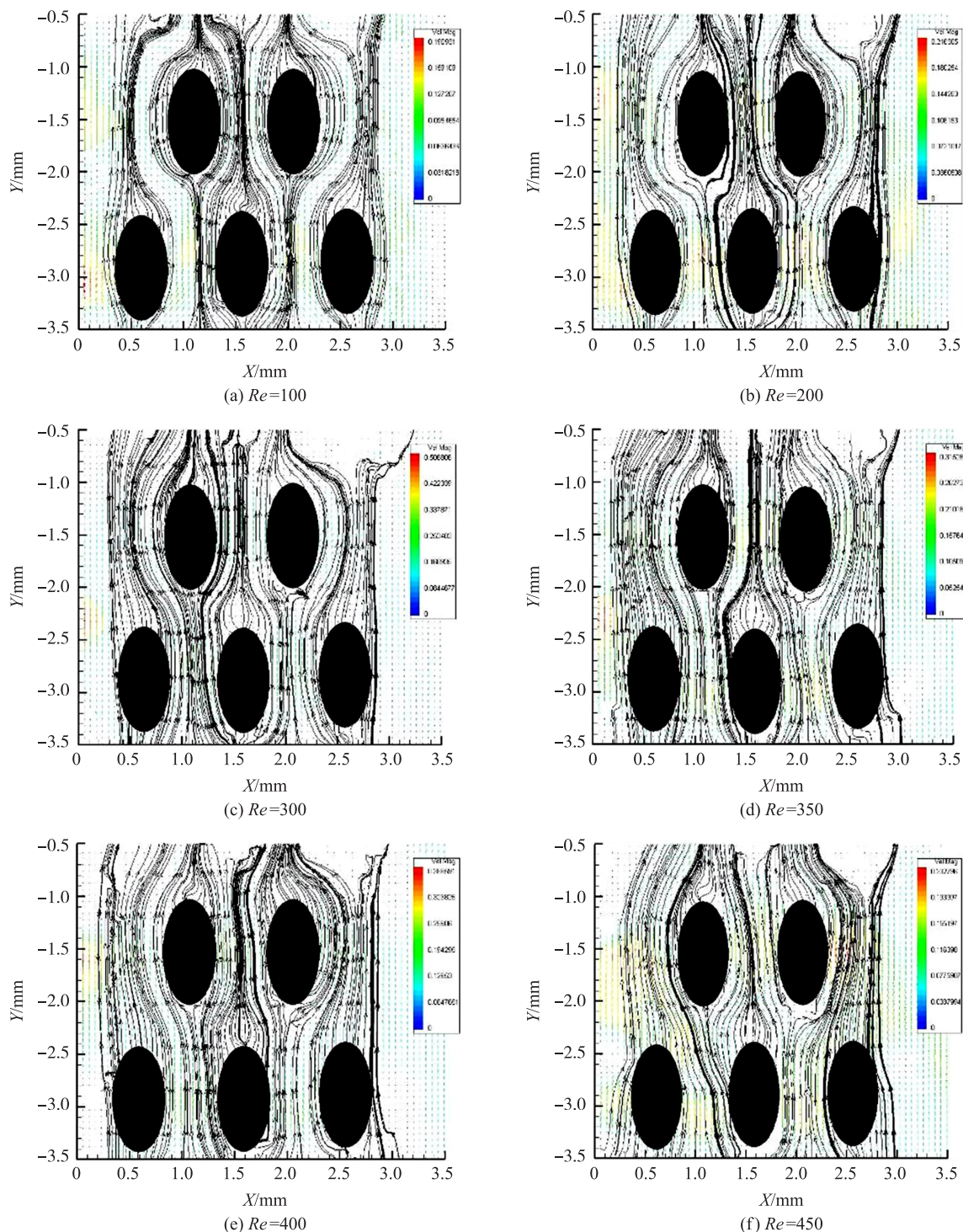


图 15 83°椭圆形微肋阵的流线图

Fig. 15 Streamline diagram of 83° ellipse micro pin-fin heat sinks



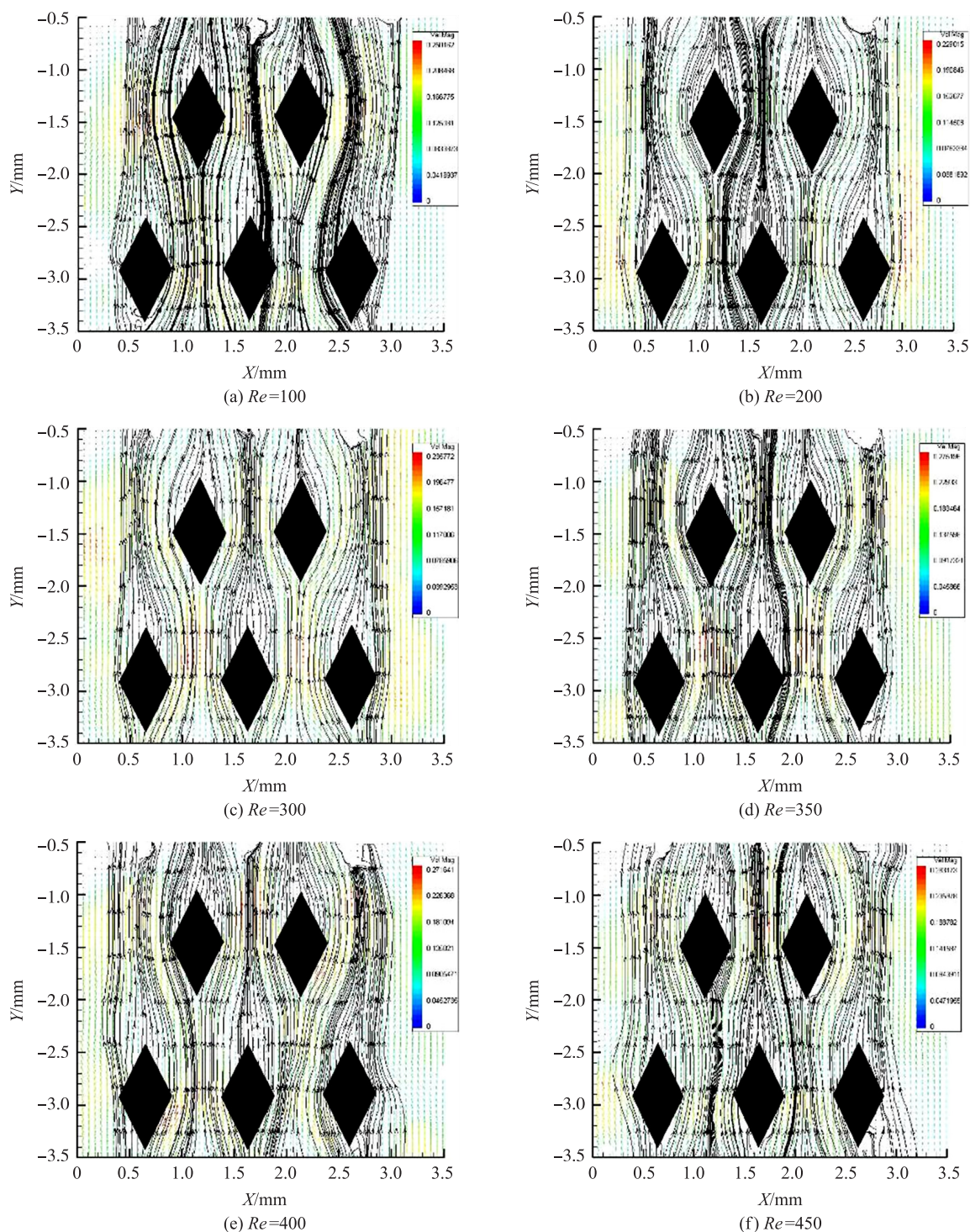


图 16 83°菱形微肋阵的流线图

Fig. 16 Streamline diagram of 83° diamond micro pin-fin heat sinks

对比流体绕流圆形、椭圆形和菱形微肋阵流线图可以看出,圆形微肋阵中最先出现涡流,而椭圆和菱形微肋阵在实验条件下针肋尾部均未出现涡流。圆形微肋阵中首先在靠近针肋尾部的地方产生回流,随着  $Re$  数增大,涡结构逐渐趋于对称,并渐渐远离针肋尾部。相比于流线型较短的圆形针肋,工质绕流流线型良好的椭圆形和迎流方向出现尖角的菱形微肋阵时,尾部没有出现涡流,减少了边界层分离的发生,大大降低了流动时的压差阻力。

## 4 结论

本文通过 Micro-PIV 系统对圆形、椭圆形、菱形微肋阵进行流动可视化实验研究,同时在圆形微肋阵

上制备接触角为  $99.5^\circ$ 、 $121.5^\circ$ 、 $151.5^\circ$  的疏水表面,研究不同疏水性、不同形状对流动的影响. 研究发现在流动方面椭圆形和菱形针肋相比于圆形针肋具有一定的优势.

(1) 在接触角为  $83^\circ$  的圆形微肋阵中,尾涡的出现相比于宏观尺度有明显延迟,直到  $Re = 250$  时最中间的针肋尾部才出现两个对称的漩涡.

(2) 在经过疏水性处理的圆形微肋中,接触角为  $151.5^\circ$  的微肋阵比  $99.5^\circ$  和  $121.5^\circ$  的微肋阵边界层分离明显延迟,说明接触角越大,边界层分离得越晚且产生的尾涡面积逐渐减小.

(3) 流体绕流流线型良好的椭圆形针肋和具有细长结构的菱形针肋时不易发生边界层分离.

### [参考文献] (References)

- [1] REZAEI O,AKBARI O A,MARZBAN A,et al. The numerical investigation of heat transfer and pressure drop of turbulent flow in a triangular microchannel[J]. Physica E:low-dimensional systems and nanostructures,2017,93:179–189.
- [2] LI Y,XIA G,JIA Y,et al. Experimental investigation of flow boiling performance in microchannels with and without triangular cavities — a comparative study[J]. International journal of heat & mass transfer,2017,108:1511–1526.
- [3] PRAJAPATI Y K,PATHAK M,KHAN M K. Bubble dynamics and flow boiling characteristics in three different microchannel configurations[J]. International journal of thermal sciences,2017,112:371–382.
- [4] 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)
- [5] 杨宇辰,夏国栋,陈卓,等. 不同孔隙率圆形微针肋热沉流动及传热特性[J]. 工程热物理学报,2017(8):128–132.  
YANG Y C,XIA G D,CHEN Z,et al. Flow and heat transfer characteristics across circular shaped micro pin-fin heat sinks with different porosity[J]. Journal of engineering thermophysics,2017(8):128–132.(in Chinese)
- [6] GUAN N,LIU Z G,ZHANG C W. Numerical investigation on heat transfer of liquid flow at low Reynolds number in micro-cylinder-groups[J]. Heat & mass transfer,2012,48(7):1141–1153.
- [7] GUAN N,TAO L,GUI L J. Influence of heating load on heat transfer characteristics in micro-pin-fin arrays[J]. Heat & mass transfer,2016,52(2):393–405.
- [8] 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):2062–2069.  
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):2062–2069.(in Chinese)
- [9] 谢海波,傅新,杨华勇,等. 典型微管道流场数值模拟与 Micro-PIV 检测研究[J]. 机械工程学报,2006,42(5):32–38.  
XIE H B,FU X,YANG H Y,et al. Simulation and Micro-PIV research on classical microchannel flow[J]. Chinese journal of mechanical engineering,2006,42(5):32–38.(in Chinese)
- [10] ZHAI Y,XIA G D,CHEN Z,et al. Micro-PIV study of flow and the formation of vortex in micro heat sinks with cavities and ribs[J]. International journal of heat & mass transfer,2016,98:380–389.
- [11] WANG Y,NAYEBZADEH A,YU X,et al. Local heat transfer in a microchannel with a pin fin-experimental issues and methods to mitigate[J]. International journal of heat & mass transfer,2017,106:1191–1204.
- [12] WANG Y,SHIN J H,WOODCOCK C,et al. Experimental and numerical study about local heat transfer in a microchannel with a pin fin[J]. International journal of heat & mass transfer,2018,121:534–546.
- [13] 徐明,王昊利. 基于低密度粒子图像叠加的 Micro-PIV 速度场测量[J]. 实验流体力学,2013,27(2):106–112.  
XU M,WANG H L. Measurement of velocity by Micro-PIV technique based on overlap of low density particle images[J]. Journal of experiments in fluid mechanics,2013,27(2):106–112.(in Chinese)
- [14] 崔珍珍. 微针肋热沉结构优化及 Micro-PIV 系统下单相与两相可视化研究[D]. 北京:北京工业大学,2013.  
CUI Z Z. Study on structure optimization of micro-pin fin for heat transfer enhancement and single and two phase flow visualization based on Micro-PIV system[D]. Beijing:Beijing University of Technology,2013.(in Chinese)
- [15] XU F,PAN Z,WU H. Experimental investigation on the flow transition in different pin-fin arranged microchannels[J]. Microfluidics & nanofluidics,2018,22:11.

(下转第 24 页)

- surface[J]. CIESC journal, 2017, 68(6): 2473–2482. (in Chinese)
- [4] ZHANG R, HAO P F, ZHANG X W, et al. Supercooled water droplet impact on superhydrophobic surfaces with various roughness and temperature[J]. International journal of heat and mass transfer, 2018, 122: 395–402.
- [5] 杨宝海, 王宏, 朱恂, 等. 速度对液滴撞击超疏水壁面行为特性的影响[J]. 化工学报, 2012, 63(10): 3027–3033.  
YANG B H, WANG H, ZHU X, et al. Effect of velocity on behavior of droplet impacting superhydrophobic surface[J]. CIESC journal, 2012, 63: 3027–3033. (in Chinese)
- [6] PATIL N D, BHARDWAJ R, SHARMA A. Droplet impact dynamics on micropillared hydrophobic surfaces[J]. Experimental thermal and fluid science, 2016, 74: 195–206.
- [7] LIU Y, MOEVIUS L, XU X. Pancake bouncing on superhydrophobic surfaces[J]. Nature physics, 2014, 10(7): 515–519.
- [8] LECLEAR S, LECLEAR J, ABHIJEET, PARK K C, et al. Drop impact on inclined superhydrophobic surfaces[J]. Journal of colloid and interface science, 2016, 461: 114–121.
- [9] JIN Z Y, WANG Z N, SUI D Y, et al. The impact and freezing processes of a water droplet on different inclined cold surfaces[J]. International journal of heat and mass transfer, 2016, 97: 211–223.
- [10] YIN C C, WANG T Y, CHE Z Z, et al. Oblique impact of droplets on microstructured superhydrophobic surfaces[J]. International journal of heat and mass transfer, 2018, 123: 693–704.
- [11] LI X L, ZHANG L, MA X W, et al. Dynamic characteristics of droplet impacting on prepared hydrophobic/superhydrophobic silicon surfaces[J]. Surface and coatings technology, 2016, 307: 243–253.
- [12] JOSSERAND, CHRISTOPHE, THORODDSEN S T. Drop impact on a solid surface[J]. Annual review of fluid mechanics, 2016, 48: 365–391.
- [13] 刘冬薇, 宁智, 吕明, 等. 液滴撞击超疏水壁面反弹及破碎行为研究[J]. 计算力学学报, 2016, 33(1): 107–113.  
LIU D W, NING Z, LÜ M, et al. Rebounding and splashing behavior of water droplet impacting on superhydrophobic surface[J]. Chinese journal of computational mechanics, 2016, 33: 107–113. (in Chinese)
- [14] YAN J H, YANG K, ZHANG X B, et al. Analysis of impact phenomenon on superhydrophobic surfaces based on molecular dynamics simulation[J]. Computational materials science, 2017, 134: 8–16.
- [15] 李西营, 高丽, 刘勇. 超疏水表面上液滴撞击动力学研究[J]. 广州化工, 2011, 39(22): 39–41.  
LI X Y, GAO L, LIU Y. Study on the dynamics of water droplet impacting superhydrophobic surface[J]. Guangzhou chemical industry, 2011, 39(22): 39–41. (in Chinese).

[责任编辑: 严海琳]

(上接第 17 页)

- [16] 祝叶, 管宁, 李栋, 等. 不同截面形状超疏水微肋阵内对流换热特性[J]. 化工学报, 2017, 68(1): 74–82.  
ZHU Y, GUAN N, LI D, et al. Convection heat transfer characteristics of super-hydrophobic micro pin-fins with different cross-sectional shapes[J]. CIESC journal, 2017, 68(1): 74–82. (in Chinese)
- [17] 姜桂林, 管宁, 张承武, 等. 不同截面疏水性微肋阵内减阻特性[J]. 化工学报, 2016, 67(4): 1258–1268.  
JIANG G L, GUAN N, ZHANG C W, et al. Characteristics of drag reduction in different cross sections of hydrophobic micro pin fins[J]. CIESC journal, 2016, 67(4): 1258–1268. (in Chinese)
- [18] 姜桂林, 张承武, 管宁, 等. 水在不同管径超疏水性微管内的流动特性[J]. 山东科学, 2015, 28(1): 20–27.  
JIANG G L, ZHANG C W, GUAN N, et al. Flow characteristics of water in super-hydrophobic micro-tubes with different diameters[J]. Shandong science, 2015, 28(1): 20–27. (in Chinese)
- [19] 王鹏伟. 多孔介质微流动特性的实验研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014.  
WANG P W. Experimental Study on the Micro Flow Characteristics in Porous Media [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2014. (in Chinese)
- [20] JOHN T J. Parametric study on the combined thermal and hydraulic performance of single phase micro pin-fin heat sinks part I: square and circle geometries[J]. International journal of thermal sciences, 2010, 49: 2177–2190.

[责任编辑: 严海琳]