

微柱体对微通道热沉综合性能影响的数值分析

冯振飞^{1,2}, 罗小平¹, 郭峰¹, 李海燕¹, 王兆涛¹

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东广州 510641;

2. 广西大学广西石化资源加工及过程强化技术重点实验室, 广西南宁 530004)

摘要:为强化微通道热沉的传热性能,设计一种内置微柱体的微通道热沉,并采用数值方法研究微柱体对微通道热沉内流体流动、传热及综合性能的影响。分析了进口雷诺数、微柱体的错位量对内置微柱体微通道热沉(微柱通道)的压降、热阻和努塞尔数的影响,并与光滑微通道热沉(光滑通道)进行对比。采用热阻与泵功的关系、熵产原则及性能评价准则对微通道热沉的综合性能进行评价。结果表明,微柱通道压降和努塞尔数随雷诺数增大而增大,热阻反而减小;在研究的雷诺数范围内,微柱通道压降比光滑通道的平均高84.3%,热阻平均低27.8%,而努塞尔数平均高54.5%;有错位量的微柱通道热阻比无错位量的平均低8.9%,而努塞尔数平均高12.6%;微柱通道综合性能优于光滑通道,且有错位量的微柱通道更优。

关键词:微通道;微柱体;数值模拟;流动;传热

中图分类号:TK 124 **文献标志码:**A

引用格式:冯振飞,罗小平,郭峰,等.微柱体对微通道热沉综合性能影响的数值分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(3):122-128.

FENG Zhenfei, LUO Xiaoping, GUO Feng, et al. Effects of micro-cylinders on overall performance of micro-channel heat sinks: numerical simulation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(3):122-128.

Effects of micro-cylinders on overall performance of micro-channel heat sinks: numerical simulation

FENG Zhenfei^{1,2}, LUO Xiaoping¹, GUO Feng¹, LI Haiyan¹, WANG Zhaotao¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Petrochemical Resource Processing and Process Intensification Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to enhance the heat transfer performance of micro-channel heat sinks, a micro-channel heat sink with micro-cylinders is presented and the effects of micro-cylinders on the fluid flow, heat transfer and overall performance in the micro-channel heat sinks are studied numerically. The effects of the inlet Reynolds number and micro-cylinder offset value on the pressure drop, thermal resistance and Nusselt number are analyzed, and these results are compared with those of the plain micro-channel heat sink. Then the overall performance on the micro-channel heat sink is evaluated by using the thermal resistance-pumping power relation, entropy generation principle and performance evaluation criterion. It is found that the pressure drop and Nusselt number increase and the thermal resistance decreases with the increase of the Reynolds number. For the studied Reynolds number range, there are the 84.3% average increase in the pressure drop, a 27.8% average decrease in the thermal resistance and a 54.5% average increase in the Nusselt number for the micro-channel heat sink with micro-cylinders, in comparison with the plain micro-channel heat sink. There are a 8.9% average decrease in the thermal resistance and a 12.6% average increase in the Nusselt number for micro-channel heat sinks with the micro-cylinder offset

收稿日期:2016-06-17

基金项目:国家自然科学基金项目(21276090);广西自然科学基金项目(2014GXNSFBA118051);广西石化资源加工及过程强化技术重点实验室主任基金项目(2015Z012)

作者简介:冯振飞(1980-),男,讲师,博士研究生,研究方向为微纳米尺度传热。E-mail:zffeng@gxu.edu.cn。

通讯作者:罗小平(1967-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为强化传热与节能。E-mail:mmxpluo@scut.edu.cn。

value being nonzero, compared with that with the micro-cylinder offset value being zero. The overall performance in the micro-channel with micro-cylinders is much better than that of the plain micro-channel. Furthermore, the overall performance in the micro-channel with micro-cylinder offset value being nonzero is much better.

Keywords: micro-channel; micro-cylinder; numerical simulation; flow; heat transfer

工业中诸多领域的突破性进展是由微型化技术和先进的冷却技术推动的。在现代高科技中起到重要作用的微芯片是典型的代表。由于其高度集成化和微型化,使得工作时热流密度急剧增加,稳定性不断下降。为保证高热流密度微芯片正常工作,迫切需要高效的散热技术和微型化的散热装置^[1]。微通道热沉因具有结构紧凑、散热效率高、功耗低及使用的冷却液少等优点^[2-3],自其被 Tuckerman 等^[4]提出以来,学者们不断研究以进一步强化其传热性能。强化微通道热沉传热有很多种方法,如使用强化的工质、改进微通道的结构形状等。由于这些方法不需要增加额外的动力(除进出口泵功外),因此成为学者们研究的热点^[5]。纳米流体属于强化工质中的一种,其较基液具有高导热率。Azizi 等^[6]对圆柱型微通道内 Cu-水纳米流体的对流传热研究发现,纳米流体可强化微通道传热,强化效果最大可达 23%。然而, Rimbault 等^[7]对微通道热沉内 Cu-水纳米流体的流动与传热的试验研究发现,低浓度纳米流体的传热效果稍有增强,但是压降也提高。此外,由于纳米流体易发生团聚使纳米粒子沉积,致使纳米流体在工作时稳定性降低,还有研究者^[8]发现,从热力的观点来看,使用强化微通道表面(如正弦波形通道)的方法来增强传热的效果比使用强化工质(如纳米流体)的方法更有效,且稳定性和可靠性更高。夏国栋等^[9]研究了硅基长菱形微针肋热沉的流动和传热特性。Chai 等^[10]研究了微通道两侧壁面带有不同形状肋片的层流流动与传热特性。Yadav 等^[11]研究了微通道内置微圆柱肋的流动和传热特性。Chen 等^[12]研究了带有纵向涡发生器微通道内流体的流动和传热。笔者采用数值方法研究微柱体对微通道热沉内流体流动、传热和综合性能的影响,分析不同错位量、不同雷诺数条件下,微柱体对微通道热沉的流动压降、热阻和努塞尔数的影响,并从热阻与泵功的关系、熵产原则及性能评价准则等方面对微通道热沉综合性能进行评价。

1 数值模拟

1.1 物理模型

本研究的基本微通道热沉结构与文献[13]中的一致。铜基热沉共蚀刻有 21 条微槽,槽宽 $W =$

231 μm ,槽高 $H = 713 \mu\text{m}$,槽长 $L = 44.764 \text{ mm}$,并盖上 PC(聚碳酸酯)板形成微通道结构。基于热沉里微通道结构的周期性和计算机的运算能力,取一微通道单元进行模拟,并考虑邻近通道固体表面的影响。通道内设有 10 个微柱体,即为微柱通道(MCC),见图 1(a)。模型的具体几何参数见图 1。基于不同的微柱体错位量 S ,可得 3 种不同规格微柱通道 MCC-0、MCC-1 和 MCC-2,对应的 S 值分别为 0、60 和 120 μm 。为对比有无微柱体的微通道热沉内流体的流动、传热和综合性能,还模拟了光滑矩形微通道(PMC)。

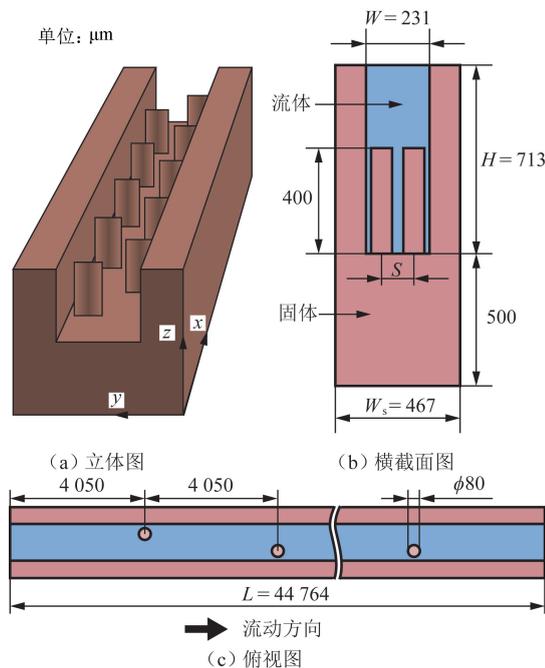


图 1 微柱通道结构示意图

Fig. 1 Structure of micro-channel with micro-cylinders

1.2 数值方法

微通道内的工质为去离子水。为简化计算,假设:(1)流体流动为单相连续不可压缩的稳态层流;(2)模型的热传递为稳态,且忽略热辐射影响;(3)除流体的黏度随温度呈分段线性变化外,固体和流体的物性参数均为常数;(4)忽略体积力。

基于这些假设,可得到流体域连续方程、动量方程和能量方程分别为

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0, \quad (1)$$

$$\rho(\mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U}), \quad (2)$$

$$\rho c_p (\mathbf{U} \cdot \nabla T_f) = \lambda_f \nabla^2 T_f. \quad (3)$$

对于固体域, $\mathbf{U} = 0$ 。固体域的传热分析仅需要能量方程

$$\lambda_s \nabla^2 T_s = 0. \quad (4)$$

式中,下标 f 和 s 分别表示流体和固体; \mathbf{U} 为流体速度矢量, m/s; p 为压力, Pa; T 为温度, K; μ 、 ρ 、 c_p 、 λ_f 分别为流体相应温度的黏度、密度、比热和热导率, Pa·s、kg/m³、J/(kg·K) 和 W/(m·K); λ_s 为固体热导率, W/(m·K)。

模型采用均匀速度入口边界条件,给定进口速度 u_{in} 分别为 1.33、1.99、2.6、3.32、3.98 m/s,入口温度 T_{in} 为 288.1 K;通道出口采用压力出口条件,相对压力 $p_{out} = 0$ Pa;通道底面恒热流加热,热流密度 q 为 2 MW/m²;两侧面设为周期性边界条件,固液接触面设为固液交界面边界条件,其余壁面绝热。采用有限体积法离散控制方程组,并由 CFD 软件进行求解,收敛残差为 10⁻⁶。

1.3 网格划分

鉴于微柱通道几何结构的复杂性,采用六面体和四面体混合的网格模式对计算域进行划分。在流体域的壁面,特别是固体域和流体域交界处的壁面,进行网格细化处理。为保证计算精度及节省计算时间和内存,对每种规格的微通道热沉单元模型进行网格独立性验证。各模型的最终网格数见表 1。

表 1 各计算模型的网格单元数

Table 1 Numbers of grid elements for each model

型号	固体域网格数	流体域网格数	总网格数
PMC	3 170 893	4 195 008	7 365 901
MCC-0	3 210 046	4 063 390	7 273 436
MCC-1	3 163 178	4 035 735	7 198 913
MCC-2	3 207 831	4 019 586	7 227 417

2 结果及其讨论

2.1 模型有效性验证

为验证数值模型的有效性,将光滑矩形微通道的数值计算结果与试验结果^[13]进行对比。图 2 为光滑矩形微通道进出口的压降及温差的数值结果与试验结果对比。压降和温差计算式分别为

$$\Delta p = p_{in} - p_{out}, \quad (5)$$

$$\Delta T = T_{out} - T_{in}. \quad (6)$$

其中

$$p_{in} = \frac{\int p(x, y, z) dA_{in}}{\int dA_{in}},$$

$$T_{out} = \frac{\int \rho c_p u(x, y, z) T_f(x, y, z) dA_{out}}{\int \rho c_p u(x, y, z) dA_{out}}.$$

式中, Δp 为进出口压降, Pa; ΔT 为进出口温差, K; p_{in} 为进口压力, Pa; T_{out} 为出口温度, K; A_{in} 、 A_{out} 分别为进出口面积, m²; $p(x, y, z)$ 、 $u(x, y, z)$ 、 $T_f(x, y, z)$ 分别为流体域坐标 (x, y, z) 处微元体的压力、速度和温度, Pa、m/s 和 K。

图 2 中 Re 为雷诺数,计算式为

$$Re = \frac{\rho u_{in} d_h}{\mu}, \quad (7)$$

其中

$$d_h = \frac{2WH}{W+H}.$$

式中, d_h 为通道的水力直径, m; μ 为流体进口温度对应的黏度, Pa·s。

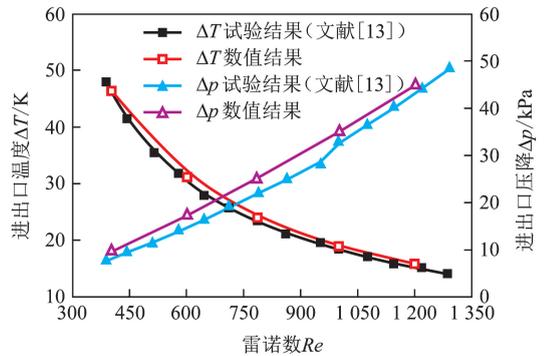


图 2 数值结果与试验结果对比

Fig. 2 Comparison of numerical results with experimental results

由图 2 可见,进出口压降和温差的数值结果与试验结果比较吻合,最大误差分别为 14.8% 和 2.8%,考虑到试验测量具有一定的误差,因此本数值方法计算的结果是可靠的,进而验证了本数值方法的有效性,可以用于微柱通道热沉模型的计算。由图 2 还可见,进出口温差随着雷诺数的增加逐渐减小,且减小的趋势变缓。这是因为在热流密度一定的条件下,由能量平衡得到的进出口温差与流体的流速成反比关系。进出口压降随雷诺数的增加逐渐增大,但增速较平缓。这是因为流体的黏度随温度变化所致。

2.2 压降特性

流体在通道内流动时,因流体的黏性而产生流动阻力,表现为流体压力沿程逐渐降低。图 3 为 3 种不同规格的微柱通道及光滑通道进出口压降随雷诺数变化关系。由图 3 可见,在相同雷诺数下,微柱

通道(MCC-0、MCC-1、MCC-2)压降明显高于光滑通道(PMC)。在研究的雷诺数范围内,微柱通道压降比光滑通道平均高84.3%,最高达112.3%。这是由于微柱体的存在使得通道的流通面积突缩突放,流阻增大,且微柱体后面产生尾涡区,尾涡区内的旋涡消耗有用的机械能,亦增大流阻。由图3还可见,随着雷诺数的增大,微柱通道与光滑通道压降的差异逐渐变大,这是由于增大雷诺数使得尾涡区内的旋涡加剧,从而增大了流阻。微柱通道中MCC-1的压降最大,MCC-2次之,MCC-0最小。表明微柱通道压降随错位量增大先增大而减小。这是由于错位量影响了流体流动的路径及混合程度。错位量为0时,对应为MCC-0通道,沿流动方向看,相邻两微柱体重叠,流体可同时从微柱体两侧绕流。而随错位量增大,对应为MCC-1通道,沿流动方向看,相邻两微柱体部分重叠,流体会选择流通面积较大一侧,即阻力较小一侧流过,使得流体流动的路径呈S字型,增长流动路径,促进流体混合,进而增大了流阻。随错位量进一步增大,对应为MCC-2通道,沿流动方向看,相邻两微柱体有间隙,大部分流体可在通道中间区域流动,流动路径减小,流阻下降。

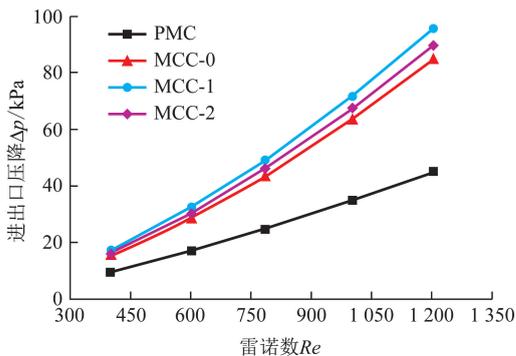


图3 进出口压降随雷诺数变化

Fig. 3 Variation of pressure drop of inlet and outlet with Reynolds number

2.3 传热特性

电子器件散热必须均匀,以免局部过热或过冷而产生热应力降低电子器件寿命。对于使用微通道热沉散热的电子器件,要想提高寿命,必须提高微通道热沉底面温度的均匀性,这可通过降低微通道热沉的热阻实现。微通道热沉对流传热过程中总热阻定义为

$$R_T = \frac{T_{w,\max} - T_{in}}{qA_w} \quad (8)$$

式中, R_T 为总热阻, K/W ; A_w 为热沉底面面积, m^2 ; $T_{w,\max}$ 为底面最高温度, K 。

图4为3种不同规格的微柱通道及光滑通道热阻随雷诺数变化的关系。由图4可见,热阻随雷诺数增加逐渐下降,低雷诺数时下降趋势稍快,高雷诺数时下降趋势略缓。在相同雷诺数下,微柱通道热阻明显低于光滑通道,有错位量的微柱通道(MCC-1、MCC-2)热阻略低于无错位量微柱通道(MCC-0)。在研究的雷诺数范围内,微柱通道热阻比光滑通道平均低27.8%,有错位量的微柱通道热阻比无错位量平均低8.9%。表明微柱通道热沉底面温度的均匀性优于光滑通道热沉,且有错位量的微柱通道热沉更优。

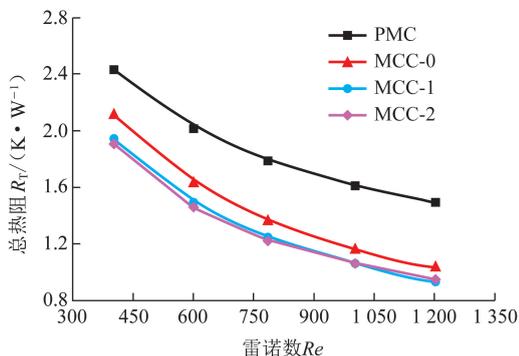


图4 热阻随雷诺数的变化

Fig. 4 Variation of thermal resistance with Reynolds number

微通道的传热特性可用努塞尔数 Nu 进行评估。 Nu 定义为

$$Nu = \frac{qA_w d_h}{\lambda_f A_{if} [T_w - 0.5(T_{in} + T_{out})]} \quad (9)$$

其中

$$T_w = \frac{\int T_s(x, y, 0) dA_w}{\int dA_w}$$

式中, A_{if} 为流固接触面积, m^2 ; T_w 为底面平均温度, K ; $T_s(x, y, 0)$ 为固体域坐标 $(x, y, 0)$ 处微元体的温度, K 。

图5为3种规格微柱通道及光滑通道努塞尔数随雷诺数变化的关系。由图5可见,努塞尔数随雷诺数增大而增大。在相同雷诺数下,微柱通道的努塞尔数明显高于光滑通道,表明微柱通道的传热性能优于光滑通道。这是由于微柱体的存在加剧了通道内冷流体的混合,重新发展了微柱体附近的边界层,扩展了传热面积。在研究的雷诺数范围内,微柱通道努塞尔数比光滑通道平均高54.5%,有错位量的微柱通道努塞尔数比无错位量平均高12.6%。由图5还可见,相同雷诺数下,微柱通道中MCC-1

的努塞尔数最大, MCC-2 次之, MCC-0 最小。MCC-1 的流动路径近似 S 形, 这可促进流体混合, 增长传热时间, 进而强化了传热。MCC-2 和 MCC-1 通道在低雷诺数时努塞尔数相近, 且比 MCC-0 高许多, 表明错位微柱体在低雷诺数时强化传热效果更为显著。

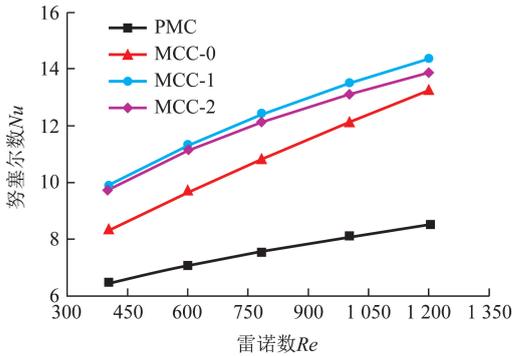


图5 努塞尔数随雷诺数的变化

Fig. 5 Variation of Nusselt number with Reynolds number

2.4 综合性能评价

在实际工程设计中, 低阻高效传热的微通道热沉是工程师所追求的。微柱体强化微通道传热的同时也增大了流阻。须对微柱通道的综合性能进行评价, 以对其性能的优劣进行判断。由于热阻与泵功的关系直接反映微通道热沉运行的经济性, 因此采用热阻与泵功的关系评价微通道热沉的性能^[14]。泵功的定义为

$$P = \Delta p q_v \quad (10)$$

式中, P 为泵功, W ; q_v 为体积流量, m^3/s 。

图6为3种不同规格的微柱通道及光滑通道热阻随泵功变化的关系。由图6可见, 在相同泵功下, PMC 通道热阻最大, MCC-0、MCC-1 和 MCC-2 通道热阻相近, MCC-1 和 MCC-2 通道略低于 MCC-0, 表明微柱通道热阻明显比光滑通道低, 有错位量的微柱通道热阻略低于无错位量的微柱通道。这也表明微柱通道热沉的经济性明显优于光滑通道, 且有错位量的更优些。

微通道热沉的对流换热过程包含热量传递过程和流体流动过程, 这些不可逆过程都会引起系统的熵产。熵产越小, 系统的有用能损失就越少, 即能源的有效利用程度越高。有学者采用熵产原则评价微通道热沉的性能^[15-17]。根据 Bejan^[18]的熵产模型可得, 因传热不可逆引起的局部体积熵产为

$$S_T = \frac{\lambda_f}{T_f^2} \left[\left(\frac{\partial T_f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_f}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_f}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (11)$$

式中, S_T 为传热局部体积熵产, $W/(m^3 \cdot K)$ 。

因流动不可逆引起的局部体积熵产为

$$S_F = \frac{\mu}{T_f} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (12)$$

式中, S_F 为流动局部体积熵产, $W/(m^3 \cdot K)$; u 、 v 、 w 为速度矢量 U 在 x 、 y 、 z 方向的分量, m/s 。

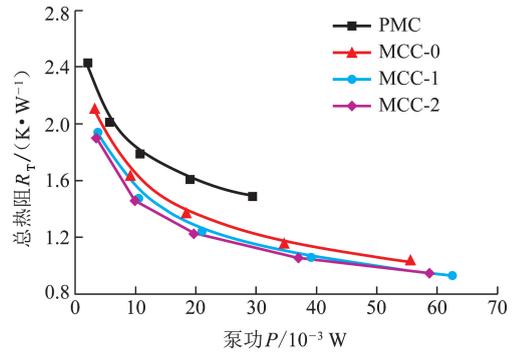


图6 热阻随泵功的变化

Fig. 6 Variation of thermal resistance with pumping power

为了便于比较, 定义无量纲总熵产率为^[15]

$$S^* = \frac{\int (S_T + S_F) dV}{M c_p} \quad (13)$$

式中, S^* 为总熵产率, 无量纲; V 为流体的体积, m^3 ; M 为质量流量, kg/s 。

图7为3种不同规格的微柱通道及光滑通道无量纲总熵产率随雷诺数的变化关系。

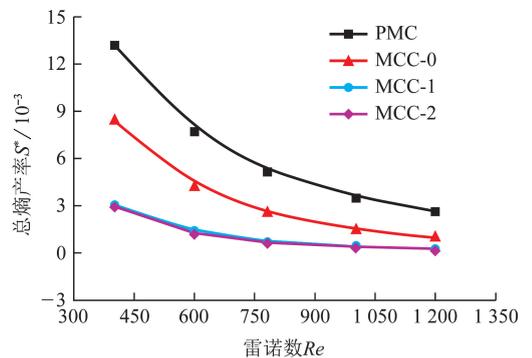


图7 总熵产率随雷诺数的变化

Fig. 7 Variation of total entropy generation rate with Reynolds number

由图7可见, 无量纲总熵产率随雷诺数增大逐渐减小, 表明在研究的雷诺数范围内, 因传热不可逆引起的熵产占主导地位。这是由于微通道热沉的压降和热阻随雷诺数增大分别增大和减小, 即流动熵产和传热熵产随雷诺数增大分别增大和减小, 只有传热熵产占总熵产的比重较大才会使得总熵产率随

雷诺数增大逐渐减小。由图7还可见,在相同雷诺数下,微柱通道总熵产率明显比光滑通道低,表明微柱体能改善微通道热沉的传热性能,从而减少在传热过程中的有用能损失,而且有错位量的微柱通道的有用能损失低于无错位量的微柱通道,低雷诺数时尤为显著。这也表明了有错位量的微柱通道的传热性能优于无错位量的。

性能评价准则被广泛地应用于评价微通道热沉的综合性能^[15,17,19]。为此引入综合评价因子,定义为

$$\eta = \frac{Nu/Nu_0}{(\Delta p/\Delta p_0)^{1/3}} \quad (14)$$

式中, η 为综合评价因子;下标0代表光滑微通道,即为PMC通道。

图8为3种规格微柱通道综合评价因子随雷诺数变化的关系。由图8可见,综合评价因子均大于

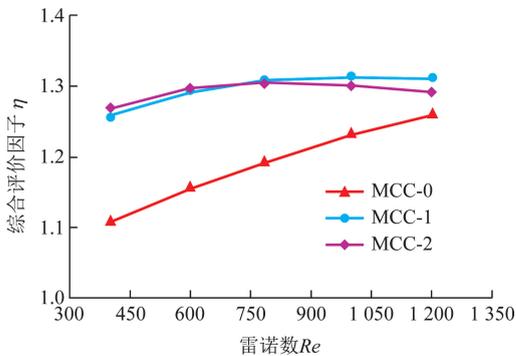


图8 综合评价因子随雷诺数的变化

Fig. 8 Variation of overall performance factor with Reynolds number

1,最大值达1.31,表明微柱体对微通道热沉性能的提升具有重要性。在整个雷诺数的研究范围内,MCC-1和MCC-2通道的综合评价因子均大于MCC-0,低雷诺数时更显著。表明有错位量的微柱通道的综合性能优于无错位量的微柱通道,尤其在低雷诺数时。由图8还可见,随雷诺数的增加,MCC-0通道的综合评价因子逐渐增加,MCC-1和MCC-2通道的综合评价因子先缓慢增大,后缓慢减小。表明无错位量的微柱通道MCC-0在整个雷诺数的研究范围内, Nu 增量占主导,而对于有错位量的微柱通道MCC-1和MCC-2,低雷诺数时, Nu 增量占主导,高雷诺数时 Nu 增量受压降增量抑制。由此可见,不能一味地使用提高流速的方法强化传热。低雷诺数时MCC-2通道综合评价因子略高于MCC-1,高雷诺数时反而略低,表明高错位量的微柱通道在低雷诺数时综合性能更优。

3 结论

(1) 微柱通道压降随雷诺数增加而增大;同雷诺数下,微柱通道压降明显高于光滑通道,且微柱通道压降随错位量增大先增后减。在研究的雷诺数范围内,微柱通道压降比光滑通道平均高84.3%。

(2) 微柱通道热阻和努塞尔数随雷诺数增加分别减小和增大;在研究的雷诺数范围内,微柱通道热阻比光滑通道平均低27.8%,而努塞尔数平均高54.5%;有错位量的微柱通道热阻比无错位量平均低8.9%,而努塞尔数平均高12.6%。

(3) 采用热阻与泵功的关系、熵产原则及性能评价准则对微通道热沉的综合性能进行评价,微柱通道热沉综合性能优于光滑通道热沉,且有错位量的微柱通道热沉更优。

参考文献:

- [1] 刘用鹿,罗小兵,刘伟.基于扰流的蜂窝层叠微通道热沉散热试验研究[J].半导体光电,2010,31(4):563-566.
LIU Yonglu, LUO Xiaobing, LIU Wei. Experimental study on the multilayered honeycomb microchannel heat sink design based on the flow disruption [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010,31(4):563-566.
- [2] 王丽凤,邵宝东,程赫明,等.矩形微通道热沉内单相稳态层流流体的流动与传热分析[J].应用数学和力学,2013,34(8):855-862.
WANG Lifeng, SHAO Baodong, CHENG Heming, et al. Fluid flow and heat transfer analysis of single-phase steady laminar flow in rectangular micro-channel heatsinks [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2013,34(8):855-862.
- [3] 冯振飞,何荣伟,朱礼,等.周向平行细通道夹套的换热特性[J].过程工程学报,2015,15(6):901-908.
FENG Zhenfei, HE Rongwei, ZHU Li, et al. Heat transfer characteristics of a jacket with circumferential parallel minichannels [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2015,15(6):901-908.
- [4] TUCKERMAN D B, PEASE R E W. High-performance heat sinking for VLSI [J]. IEEE Electronic Device Letters, 1981,2(5):126-129.
- [5] 夏国栋,翟玉玲,崔珍珍,等.带有内肋的凹穴型微通道热沉的熵产及传热特性分析[J].中国科学:技术科学,2013,43(8):860-866.
XIA Guodong, ZHAI Yuling, CUI Zhenzhen, et al. Characteristics of entropy generation and heat transfer in a microchannel with fan-shaped reentrant cavities and inter-

- nal ribs [J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 43(8):860-866.
- [6] AZIZI Z, ALAMDARI A, MALAYERI M R. Convective heat transfer of Cu—water nanofluid in a cylindrical microchannel heat sink [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 101:515-524.
- [7] RIMBAULT B, NGUYEN C T, GALANIS N. Experimental investigation of CuO—water nanofluid flow and heat transfer inside a microchannel heat sink [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 84: 275-292.
- [8] KHOSHVAGHT-ALIABADI M, SAHAMIAN M, HESAMPOUR M, et al. Experimental study on cooling performance of sinusoidal—wavy minichannel heat sink [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 92:50-61.
- [9] 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 Guodong, CUI Zhenzhen, ZHAI Yuling, 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.
- [10] CHAI L, XIA G D, WANG H S. Numerical study of laminar flow and heat transfer in microchannel heat sink with offset ribs on sidewalls [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 92:32-41.
- [11] YADAV V, BAGHEL K, KUMAR R, et al. Numerical investigation of heat transfer in extended surface microchannels [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 93:612-622.
- [12] CHEN C, TENG J T, CHENG C H, et al. A study on fluid flow and heat transfer in rectangular microchannels with various longitudinal vortex generators [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 69:203-214.
- [13] QU W, MUDAWAR I. Experimental and numerical study of pressure drop and heat transfer in a single-phase microchannel heat sink [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45(12):2549-2565.
- [14] XIE G N, SHEN H, WANG C C. Parametric study on thermal performance of microchannel heat sinks with internal vertical Y-shaped bifurcations [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 90:948-958.
- [15] WANG Y S, ZHOU B, LIU Z C, et al. Numerical study and performance analyses of the mini-channel with discrete double-inclined ribs [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 78:498-505.
- [16] SHI Z Y, DONG T. Entropy generation and optimization of laminar convective heat transfer and fluid flow in a microchannel with staggered arrays of pin fin structure with tip clearance [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 94:493-504.
- [17] CHAI L, XIA G D, WANG H S. Parametric study on thermal and hydraulic characteristics of laminar flow in microchannel heat sink with fan-shaped ribs on sidewalls—part 3: performance evaluation [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 97:1091-1101.
- [18] BEJAN A. *Entropy generation minimization* [M]. New York: CRC Press, 1996.
- [19] LI Y L, ZHANG F L, SUNDEN B, et al. Laminar thermal performance of microchannel heat sinks with structural vertical Y-shaped bifurcation plates [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 73(1):185-195.

(编辑 沈玉英)