

矩形微通道的传热与阻力特性 及其场协同理论分析

范爱武, 郭少龙, 黄素逸, 刘伟

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

Heat Transfer and Flow Characteristics in Rectangular Micro Channels and Analysis With Field Synergy Theory

FAN Aiwu, GUO Shaolong, HUANG Suyi, LIU Wei

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: It is of great importance to develop micro channels with high heat transfer coefficient and low flow resistance for high heat flux electronic devices. In the present study, the authors made an optimization on a diamond-shaped pin fin to improve its overall performance. Heat transfer and flow characteristics in rectangular micro channels fitted with the original and optimized pin-fins were compared through numerical simulation. The computation results show that, under the same Reynolds number, heat transfer coefficient of the micro channel with the optimized pin-fin is larger than its counterpart of the micro channel with the original pin-fin, while its flow resistance is smaller. In other words, the micro channel fit with the optimized pin-fin demonstrates a better overall thermal-hydraulic performance. Based on the field-synergy theory, calculations of the averaged field-synergy angles were performed. The results of the averaged field-synergy angles are in good agreement with those of the numerical simulations.

KEY WORDS: micro channel; pin-fin; heat transfer coefficient; flow resistance; field synergy theory

摘要: 开发高效低阻的微通道对于冷却高热流密度的电子器件意义重大。文中通过数值模拟方法,对一种钻石形针肋进行了优化设计,并对安装有原型和改进型针肋的矩形微通道的传热与阻力特性进行了对比研究。计算结果表明:在相同雷诺数下,安装改进型针肋的微通道的换热效果明显优于未改进的情况,流动阻力反而更小,因而综合性能也更好。基于对流换热场协同原理和发展的流场物理量协同原理,计算

两种微通道内速度与温度梯度的协同角、以及速度与压力梯度之间的协同角,这些角度的相对大小与数值计算得到的结论是一致的。

关键词: 微通道; 针肋; 传热系数; 流动阻力; 场协同理论

0 引言

随着电子工业技术的不断发展,小尺寸和高集成度成为电子产品的发展趋势。集成度的快速提高使得器件热流密度变得特别高,而传热温差却较小,传统的冷却技术已不能满足要求,因此急需发展新的冷却技术^[1-2]。例如,有的学者对微型热管冷却技术进行了研究^[3-4],还有许多学者对装有各种肋片的微通道冷却性能进行了实验和模拟^[5-10];然而研究表明,在微通道中安装各种肋片之后,虽然能够有效增强换热,但同时也会增加流动阻力。因此,发展高效、低阻的冷却技术显得非常迫切。

强化传热技术已经发展到第4代^[11],但其主要指导理论仍然是熵产最小原理^[12]。近年来,过增元^[13-14]提出了场协同理论,用来指导对流换热的强化。场协同理论指出,要强化传热,速度矢量和温度梯度之间的夹角要小。许多研究者对该理论进行了验证和发展^[15-20]。

本文对一种钻石形针肋进行改进,通过数值模拟方法对安装有原型和改进型针肋的矩形微通道的传热与阻力特性进行了对比研究,基于场协同原理进行了验证和分析。

1 数值模拟方法与结果

1.1 模拟对象与方法

图1和图2分别为2种钻石形针肋和矩形微通

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2007CB206903);国家自然科学基金项目(51076054, 51036003)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2007CB206903); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51076054, 51036003).

道的示意图,原型针肋的横截面为边长 0.8 mm、顶角 60°的菱形,肋高 4.0 mm。改进型针肋是将原型针肋左右两侧各切去 0.1 mm 而形成的。矩形微通道宽 23 mm,高 4.0 mm,长 40.0 mm。2 种针肋均交错布置,相邻肋片的间距为 0.4 mm。几何建模采用 Solidworks 软件,数值计算应用通用的 CFD 软件 Fluent 6.3。由于本研究中微通道的最大雷诺数为 140,流动状态为层流,因此,计算模型选用三维、层流、稳态、双精度模型。文献中有关学者^[21-22]也采用了与本文相同的计算模型,其精度具有较高的可靠性。进口为速度进口条件,矩形微通道下表面为恒热流边界条件,上表面和侧面为绝热边界条件,出口为自由出流边界条件。采用均匀网格划分方法,考察了网格数对计算结果的影响,正式计算的网格数分别为 1 288 312 和 1 215 809。各参数的收敛标准为相对误差小于 1.0×10^{-6} 。采用液态水作为工质,其进口温度为 20℃,最低进口流速以矩形微通道下表面温度不超过 60℃作为控制标准。

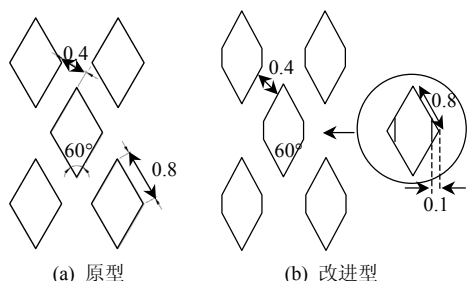


图 1 钻石形针肋示意图(单位: mm)

Fig. 1 Schematics of original and modified diamond-shaped pin fins(mm)

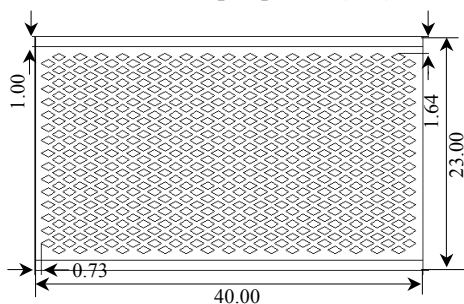


图 2 矩形微通道横截面示意图(单位: mm)

Fig. 2 Horizontal cross-section of the micro channel(mm)

1.2 数值模拟结果

1.2.1 数据处理方法

微通道热沉的冷却性能用平均换热系数 h 、平均努赛尔特数 Nu 、平均热阻 R 评价,其计算公式分别如式(1)~(3)所示,微通道内的雷诺数 Re 按式(4)进行计算:

$$h = Q / A(T_w - T_f) = q / (T_w - T_f) \quad (1)$$

$$Nu = hD_h / \lambda = qD_h / \lambda(T_w - T_f) \quad (2)$$

$$R = (T_w - T_f) / q \quad (3)$$

$$Re = \rho u_m D_h / \mu_f \quad (4)$$

式中: Q 为热沉下表面总的换热量; q 为热流密度; T_w 为热沉下表面平均温度; T_f 为流体平均温度; A 为换热面积(微通道与电子器件的接触面积); D_h 为微通道特征尺寸。 λ 、 ρ 和 μ_f 分别为水的导热系数、密度与动力黏度。 u_m 为冷却水在微通道中的平均流速。微通道热沉的阻力特性用进出口压降 Δp 来衡量,综合性能用 $h/\Delta p$ 来评价。

1.2.2 计算结果

2 个微通道均计算了 6 个不同进口速度工况,分别为 0.05、0.06、0.07、0.08、0.09 和 0.10 m/s。由于 2 种针肋形状不同,导致微通道内的实际平均流速有所差别,从而相同进口速度所对应的雷诺数也有所不同。2 个微通道的传热与阻力特性的主要计算结果见图 3—图 8。

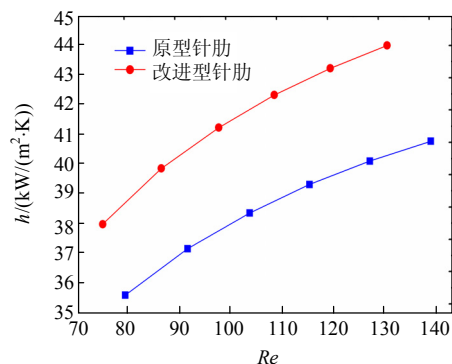


图 3 对流换热系数 h 随雷诺数 Re 的变化

Fig. 3 Variation of convection heat transfer coefficient with the Reynolds number

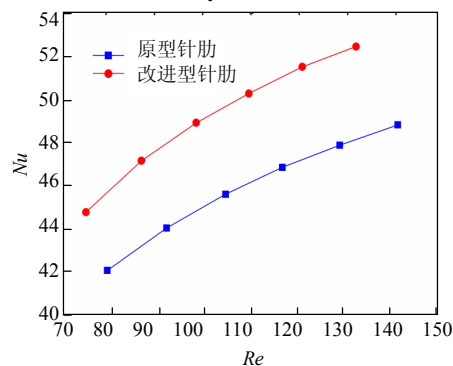


图 4 努谢尔特数 Nu 随雷诺数 Re 的变化
Fig. 4 Variation of Nusselt number with the Reynolds number

从图 3 和图 4 可以看到,2 个矩形微通道的平均对流换热系数 h 和平均努谢尔特数 Nu 均随着雷诺数 Re 的增加而增大,冷却水进出口温差和传热

热阻均随着雷诺数 Re 的增大而减小，表明冷却效果都随冷却水流量的增大而增强。从图 3 和图 4 还可以发现，装有改进型针肋的微通道的冷却效果明显优于原型针肋的情形，因此，在相同雷诺数下，装有改进型针肋的微通道的冷却水进出口温差以及传热热阻均要小于原型针肋的情形，这从图 5 和图 6 可以很明显地看出来。

由图 7 可见，2 个微通道的进出口压差 Δp 均随雷诺数 Re 的增加而增大。在相同雷诺数 Re 下，冷却水的进出口压差改进型针肋的情况下更小，说

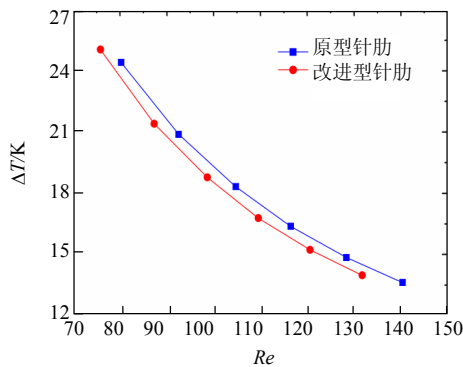


图 5 进出口温差 ΔT 随雷诺数 Re 的变化

Fig. 5 Variation of the temperature difference with the Reynolds number

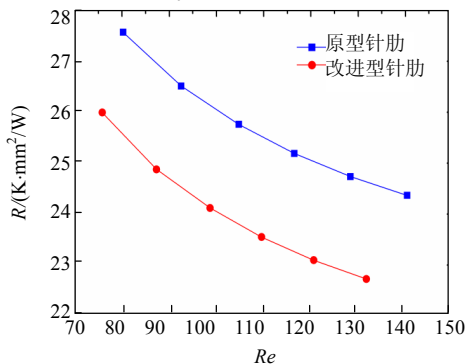


图 6 传热热阻 R 随雷诺数 Re 的变化

Fig. 6 Variation of heat transfer resistance with the Reynolds number

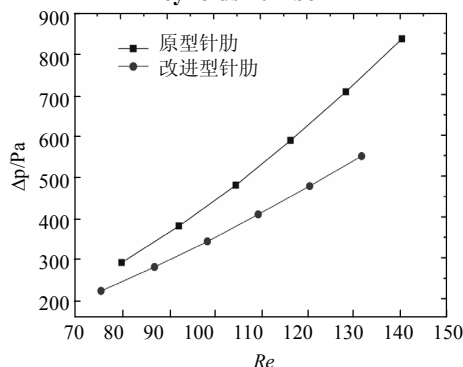


图 7 进出口压差 Δp 随雷诺数 Re 的变化

Fig. 7 Variation of the pressure drop with the Reynolds number

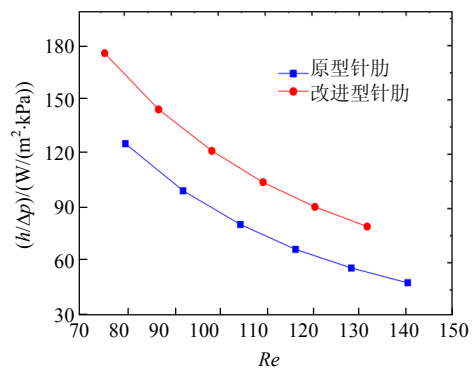


图 8 $h/\Delta p$ 随雷诺数 Re 的变化

Fig. 8 Variation of the ratio $h/\Delta p$ with the Reynolds number

明改进型针肋的流动阻力更小。随着雷诺数的增大，这种差别更加明显。图 8 示出了微通道传热与流动的综合性能评价指标 $h/\Delta p$ 随雷诺数 Re 的变化关系。图中可见，2 种微通道的 $h/\Delta p$ 均随着雷诺数 Re 的增加而减小。综合图 3、图 7 和图 8 分析可知，这是由于进出口压差 Δp 比对流换热系数 h 随雷诺数 Re 的增加而增大的幅度要大的缘故。

2 场协同理论分析

忽略流体黏性耗散热的情况下，对流换热的能量方程为

$$\rho c_p (U \nabla T) = k \nabla^2 T \quad (5)$$

过增元认为^[13-14]，如果将式(5)中的对流项看作为内热源，就可把对流问题比拟为有内热源的导热问题来处理，所不同的是此热源是流场的函数而已。假设速度场与热流场之间的夹角为 β ，则

$$U \nabla T = |U| |\nabla T| \cos \beta \quad (6)$$

基于此，过增元提出了对流换热的场协同原理，即速度矢量与温度梯度的夹角 β 对于对流换热强度起着重要的作用。当 β 的全场平均值小于 90° 时，其值愈小则对流换热系数愈大。 β 的计算式为

$$\beta = \arccos \frac{U \nabla T}{|U| |\nabla T|} \quad (7)$$

后来，刘伟对场协同原理做了发展，并定义了多个协同角，其中 θ 反映速度矢量与压力梯度之间的协同性。 θ 的平均值越小，表明驱使流体运动消耗的总泵功越小，其表述为^[19-20]

$$\theta = \arccos \frac{U(-\nabla p)}{|U| |\nabla p|} \quad (8)$$

图 9 显示了 2 个微通道的平均协同角 β 随 Re 的变化关系。从图中可见，安装改进型针肋的微通道

内速度矢量与温度梯度之间的协同角 β 小于安装原型针肋的微通道的对应协同角。因此,在改进型针肋的情况下流体与壁面间的换热得到了加强,这与图3和图4中计算结果反映的规律是一致的。图10显示了2个微通道的平均协同角 θ 随 Re 的变化关系。图中可见,在相同 Re 数下,安装改进型针肋的微通道内的流体速度矢量与压力梯度之间的协同角 θ 小于原型针肋情况下的对应协同角,说明针肋改进后流体速度与驱动力之间的协同性变好,流动阻力减小。

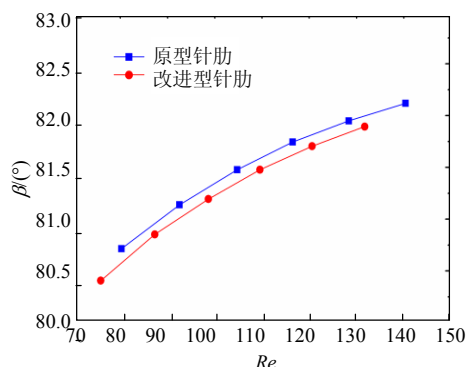


图9 协同角 β 随 Re 的变化

Fig. 9 Variation of the synergy angle β with the Reynolds number

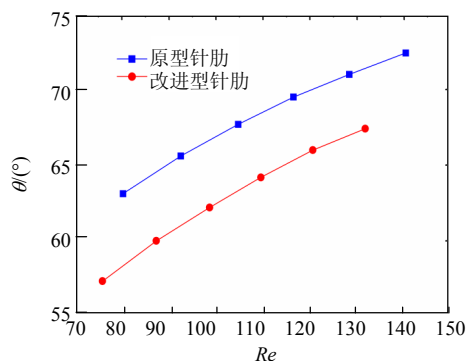


图10 协同角 θ 随 Re 的变化

Fig. 10 Variation of the synergy angle θ with the Reynolds number

3 结论

应用数值模拟方法,对安装原型和改进型针肋的矩形微通道内的传热与流动特性进行了对比研究。结果表明:在相同雷诺数 Re 下,针肋优化后的换热效果明显好于未改进的情况,同时流动阻力更小,因此其传热与流动的综合性能更加优秀。基于过增元提出、刘伟发展的对流换热场协同原理,计算并比较了2种微通道内的场协同角 β 和 θ ,这些角度的相对大小与数值模拟的结果完全吻合。

参考文献

- [1] Tuckerman D B, Pease R F W. High performance heat-sinking for VLSI [J]. IEEE Electron Device Letter, 1981, 2(55): 126-129.
- [2] Morini G L. Single-phase convective heat transfer in microchannels: a review of experimental results[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 43(7): 631-651.
- [3] 熊建国, 刘振华. 平板热管微槽道传热面上纳米流体沸腾换热特性[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(23): 105-109.
Xiong Jianguo, Liu Zhenhua. Boiling heat transfer characteristics of nanofluids on flat heat pipe evaporator with micro-grooved surface [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(23): 105-109 (in Chinese).
- [4] 李银惠, 唐琼辉, 徐进良. 零切角曲面微热管传热性能的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 34-40.
Li Yinhui, Tang Qionghui, Xu Jinliang. Experimental study on the thermal performance of wire-bonded flat micro heat pipe [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 34-40 (in Chinese).
- [5] Sparrow E M, Grannis V B. Pressure drop characteristics of heat exchangers consisting of arrays of diamond-shaped pin fins [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1991, 34(3): 589-600.
- [6] Jiang P X, Xu R N. Heat transfer and pressure drop characteristics of mini-fin structures[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2007, 28(5): 1167-1177.
- [7] Jeng T M. Thermal performance of in-line diamond-shaped pin fins in a rectangular duct[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2006, 33(9): 1139-1146.
- [8] Kishimoto T, Sasaki S. Cooling characteristics of diamond-shaped interrupted cooling fin for high-power LSI devices[J]. Electronic Letters, 1987, 23(9): 456-457.
- [9] Hong F J, Cheng P. Three dimensional numerical analyses and optimization of offset strip-fin microchannel heat sinks [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009, 36(7): 651-656.
- [10] Li J, Peterson J P, Cheng P. Three-dimensional analysis of heat transfer in a micro-heat sink with single phase flow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(19-20): 4215-4231.
- [11] Bergles A E. ExHFT for fourth generation heat transfer technology [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(2-4): 335-344.
- [12] Bejan A, Kraus A D. Heat transfer handbook[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003: 395-398.
- [13] Guo Zengyuan. Mechanics and control of convective heat transfer-coordination of velocity and heat flow fields[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(7): 597-600.
- [14] Guo Z Y, Tao W Q, Shah R K. The field synergy (coordination) principle and its applications in enhancing single phase convective heat transfer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(9): 1797-1807.
- [15] Tao W Q, Guo Z Y, Wang B X. Field synergy principle for enhancing convective heat transfer-its extension and numerical verification [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(18):

- 3849-3856.
- [16] Tao W Q, He Y L, Qu Z G, et al. Application of the field synergy principle in developing new type heat transfer enhanced surfaces[J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2004, 11(4): 433-449.
- [17] Cai R X, Gou C H. Discussion of the convective heat transfer and field synergy principle[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(25-26): 5168-5176.
- [18] Cheng Y P, Lee T S, Low H T, Numerical simulation of conjugate heat transfer in electronic cooling and analysis based on field synergy principle[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(14-15): 1826-1833.
- [19] Liu W, Liu Z C, Guo Z Y. Physical quantity synergy in laminar flow field of convective heat transfer and analysis of heat transfer enhancement[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(12): 3579-3586.
- [20] Liu W, Liu Z C, Ming T Z, et al. Physical quantity synergy in laminar flow field and its application in heat transfer enhancement

[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(19-20): 4669-4672.



范爱武

收稿日期：2010-09-20。

作者简介：

范爱武(1973)，男，博士，副教授，从事强化传热和微尺度燃烧等方面的研究，faw@mail.hust.edu.cn;

郭少龙(1988)，男，硕士研究生，从事强化传热研究，guoshaolong1988@126.com;

黄素逸(1940)，男，教授，从事强化传热研究，suhuang@public.wh.hb.cn;

刘伟(1956)，男，教授，从事强化传热和电子器件冷却方面的研究，w_liu@hust.edu.cn。

(责任编辑 王庆霞)