

文章编号:0253-4339(2025)04-0052-09

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.04.052

叶脉仿生微通道换热器流动与传热特性的数值研究

张乾坤 李红艳 吕碧纯 郑运卓 吕继浩

(青岛科技大学机电工程学院 青岛 266061)

摘要 受望天树叶脉结构启发,在普通二级分支(MHE-SS)基础上设计了仿生二级分支(MHE-BS)、完全五级分支(MHE-CVB)和不完全五级分支(MHE-IVB)3种不同结构的微通道换热器。采用ANSYS FLUENT软件模拟20℃的冷却水在不同入口雷诺数($Re=660.07, 990.10, 1320.13$)下进入施加恒定热流密度 50 kW/m^2 的4种换热器结构,对比分析了不同工况下的流动特性、温度特性和综合传热性能。研究表明:多级仿生通道结构能够显著提高换热器综合传热性能,在不同工况下MHE-CVB相比于MHE-SS进出口压降均超过35%、传热面温度下降均超过2℃、综合传热性能强化因子均大于1.2。

关键词 微通道换热器;仿生结构;流动传热;优化设计

中图分类号:TB61⁺1;TK124

文献标识码:A

Numerical Study of Thermal-Hydraulic Characteristics of Vein Biomimetic Microchannel Heat Exchanger

Zhang Qiankun Li Hongyan Lü Bichun Zheng Yunzhuo Lü Jihao

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, 266061, China)

Abstract Microchannel heat exchangers, including a bionic secondary branch (MHE-BS), complete vein bionic branch (MHE-CVB), and incomplete vein bionic branch (MHE-IVB), were designed based on the straight secondary branch (MHE-SS) inspired by the leaf vein structure of *Parashorea chinensis*. ANSYS FLUENT software was utilized to simulate the flow and temperature characteristics of 20℃ cooling water entering these heat exchanger structures under a constant heat flux of 50 kW/m^2 at different inlet Reynolds numbers ($Re=660.07, 990.10$ and 1320.13). The research findings indicate that multistage bionic channel structure can significantly enhance the overall heat transfer performance of the heat exchanger, with MHE-CVB showing more than a 35% reduction in inlet and outlet pressure drop compared to MHE-SS under different working conditions. In addition, it showed an decrease in surface temperature by over 2℃ and a strengthening factor for comprehensive heat transfer performance exceeding 1.2.

Keywords microchannel heat exchanger; bionic structure; flow and heat transfer; optimal design

微通道换热器具有结构紧凑、传热效率高、温度均匀性好等特点,如今已被广泛应用于电子设备的散热^[1-3]。然而,近年来随着微电子领域向集成化方向进一步发展,功率密度的提高导致热通量迅速增加,简单结构已无法满足电子设备的散热需求^[4-5]。散热问题已然成为制约该领域发展的主要阻碍,亟需新的改进方案^[6]。

仿生学为微通道换热器的结构优化提供了新的思路^[7]。在数千万年的进化过程中,被子植物得益于静脉结构的多样性,使其在水分运输效率方面远高于其他现生和已灭绝的植物^[8-9]。

Luo Yuanqiang 等^[10]基于耐热植物叶脉的微观结构设计了3种具有内壁增厚图案的单条微通道,并

通过数值模拟研究了其传热与传质特性,结果表明叶脉结构启发微通道在牺牲少量传质能力的同时,能够以较小的体积提供优良的传热特性。Peng Yi 等^[11]基于真实叶脉网络,研究了二级脉的对称与非对称分布,以及三级脉密度对于微通道换热器流动与传热性能的影响,数值模拟结果表明,非对称二级脉和高密度三级脉有利于换热器综合性能的提高。Luo 和 Peng 两人的研究充分考虑了真实植物的维管束特点与叶脉分级网络,但不同植物物种之间叶脉形态和结构具有高度多样性^[12],因此在仿生结构参照的植物物种选择上还有待深入考量。

叶片对环境变化的敏感性和可塑性高于其他器官,不同水热梯度下的植物叶片性状将产生较大差

收稿日期:2024-01-17;修回日期:2024-04-25;录用日期:2024-05-22

异^[13-14]。中国云南南部的热带雨林主要是一种分布在热带季风气候下,在水分和热量上均到达了极限的热带雨林类型^[15]。龙脑香科望天树(*Parashorea chinensis*)作为该地区的代表性植物^[16],其叶片的脉络结构极具借鉴价值。本文采用图像处理手段在标本叶片上取得数据点,将拟合得到二级脉和三级脉曲线的多项式函数应用于换热器模型的建立,并针对各级脉络发挥的作用进行研究。

1 换热器设计

1.1 叶脉特征

望天树叶片主脉呈羽状。粗二级脉为简单弓形脉,脉间距规则,与中脉夹角稳定。间二级脉长度大于下端相邻二级脉的一半,基部脉形平行于粗二级脉。三级脉为对生贯穿脉,其基部与中脉垂直,向顶弯曲。四级脉呈不规则网状,五级脉自由分支^[17]。图1所示为望天树叶片的叶脉特征。

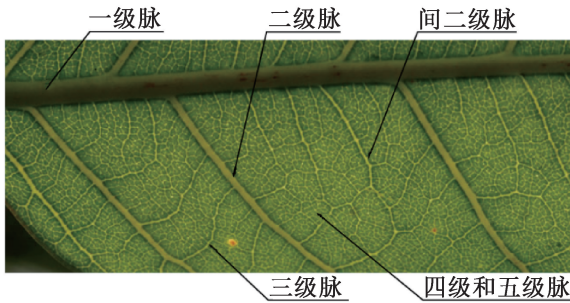


图1 望天树叶脉特征

Fig.1 Characteristics of leaf veins of *Parashorea chinensis*

1.2 拟合函数

采用 Photoshop 对望天树叶片标本图片进行处理,截取叶片中部位置高清晰度的粗二级脉图像,并通过刻度尺建立坐标系,以叶脉分支点作为坐标原点,分别以垂直和平行于一级脉方向建立 x 轴和 y 轴,最后运用 MATLAB 取得坐标点数据。为避免叶片变异带来的偏差,故选用大小、形状大致相同的5张标本图片拾取坐标点数据,并进行多项式拟合。拟合结果如表1所示。

表1 粗二级脉多项式拟合函数

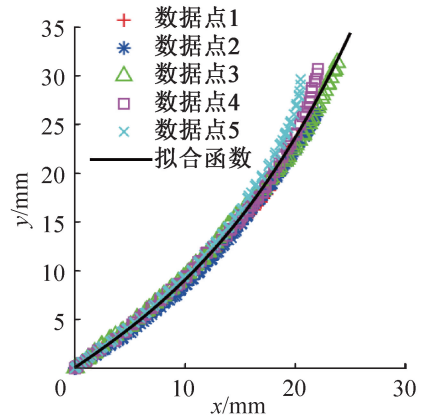
Tab.1 The major secondary vein polynomial fitting function

次数	多项式表达式	R^2
2	$y = 3.12x^2 \times 10^{-2} + 0.537x$	0.995 12
3	$y = 7.22x^3 \times 10^{-4} + 6.24x^2 \times 10^{-3} + 0.767x$	0.995 28
4	$y = -2.83x^4 \times 10^{-6} + 2.04x^3 \times 10^{-3} - 1.36x^2 \times 10^{-2} + 0.870x$	0.995 29

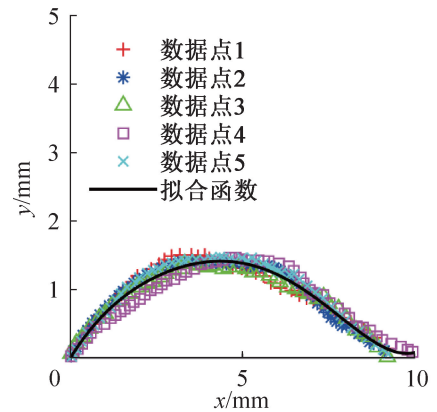
由表1可知,当多项式次数大于3次方时,高次项系数骤然减小,反映拟合优度的重要指标决定系数 R^2 提高也不显著。因此,本文采用三次多项式拟合函数构造仿生微通道的二级通道。图2(a)所示为选取的5组数据点与三次多项式拟合函数的图像。

限于换热器尺寸,需将所得三次多项式拟合函数进行整体缩放,缩放后函数如下:

$$y = 2.82x^3 \times 10^{-2} + 3.90x^2 \times 10^{-2} + 0.767x \quad (1)$$



(a) 粗二级脉选取数据点和三次多项式拟合函数



(b) 三级脉选取数据点和五次多项式拟合函数

图2 选取数据点与多项式拟合函数

Fig.2 Data points and polynomial fitting function

采用同样方法,截取叶片中部位置高清晰度的三级脉图像,以叶脉分支点作为坐标原点,分别以垂直和平行于粗二级脉切线方向建立 x 轴和 y 轴,选取数据点并进行多项式拟合。多项式拟合表达式和拟合效果如表2和图2(b)所示。

由于三级脉形态特征差异较大,为谋求最佳拟合效果,采用决定系数 R^2 最大的五次多项式拟合函数构造仿生微通道的三级脉。

同样将所得五次多项式拟合函数进行整体缩放,缩放后函数如下:

$$y = 3.38x^5 \times 10^{-3} - 3.64x^4 \times 10^{-2} + 0.147x^3 - 0.412x^2 + 0.822x \quad (2)$$

3) 恒定热流密度加热:在微通道底部设置恒定

热流密度, $-\lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} = q_w = 50 \text{ kW/m}^2$;

4) 将流体与固体耦合的固体壁面设置为耦合边界条件,且无表面滑移。

应用 ANSYS FLUENT 求解器进行数值求解。采用 SIMPLE 方法对压力和速度的耦合进行求解,压力离散应用标准格式。采用二阶迎风格式对动量方程和能量方程进行求解。能量收敛准则设置为 10^{-8} ,其余参数的收敛准则设置为 10^{-6} 。

2.2 数据采集与计算

根据设置的初始条件计算入口雷诺数 Re :

$$Re = \frac{\rho_f u_{in} D_h}{\mu_f} \quad (6)$$

式中: u_{in} 为流体入口流速, m/s ; D_h 为水力直径, m 。 D_h 由式(7)确定:

$$D_h = \frac{2HW}{H+W} \quad (7)$$

式中: H 为入口段通道高度, m ; W 为入口段通道宽度, m 。

通道内流体吸收的有效热流量 Q_{eff} 和换热器的有效热流密度 q_{eff} 如下:

$$Q_{eff} = Mc_p(T_{out} - T_{in}) \quad (8)$$

$$q_{eff} = Q_{eff}/A_h \quad (9)$$

式中: M 为质量流量, kg/s ; T_{out} 为出口流体温度, K ; T_{in} 为入口流体温度, K ; A_h 为流体与固体的接触面积, m^2 。

换热器整体传热系数 h_{eff} 定义为:

$$h_{eff} = \frac{q_{eff}}{\Delta T_m} \quad (10)$$

式中: ΔT_m 为固体与流体的温差, K 。

ΔT_m 由式(11)确定:

$$\Delta T_m = T_{sol} - T_{flu} \quad (11)$$

式中: T_{sol} 和 T_{flu} 分别为固体和流体的平均温度, K 。

努塞尔数 Nu 可由式(12)计算:

$$Nu = \frac{h_{eff} D_h}{\lambda_f} \quad (12)$$

换热器的进出口压降 Δp 计算如下:

$$\Delta p = p_{in} - p_{out} \quad (13)$$

最后,为评价微通道换热器的传热与压降特性,定义综合传热性能的强化传热因子 η [19] 如下:

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

式中: Nu_0 和 Δp_0 为参考微通道换热器的对应参数。当 $\eta > 1$ 时,表明当前换热器的综合传热性能优于参

考换热器。

2.3 网格独立性检验

为验证网格数量对计算结果的独立性,通过进出口压降 Δp 和微通道内 Nu 进行了网格独立性研究。分别使用4种不同大小的网格对 MHE-SS 进行数值模拟并计算有关参数,当入口流速设置为 1 m/s 时,4种不同网格数量下的 MHE-SS 模拟结果如表3所示。

表3 网格独立性检验

Tab.3 The grid independence validation

编号	网格数/万	$\Delta p / \text{Pa}$	相对误差/%	Nu	相对误差/%
1	690	7 635.67	0.39	4.263	0.66
2	813	7 660.53	0.06	4.241	0.14
3	933	7 662.57	0.03	4.238	0.07
4	1 102	7 665.25		4.235	

由表3可知,3号网格与计算精度最高的4号网格相比, Δp 和 Nu 的相对误差均小于 0.1% ,表明3号网格已经满足模拟要求的精度和速度。因此,后续研究全部参考3号网格进行网格划分。

2.4 数值模型验证

为了验证计算结果的合理性,将 MHE-SS 和 MHE-BS 数值计算结果与理论计算结果进行了对比。根据 $Q = Mc_p \Delta T$ 可以计算出换热器进出口温差 [19-21]。图5所示为在不同雷诺数下进出口温差的数值计算结果和理论结果。计算结果与理论结果吻合较好,最大相对误差小于 1.65% ,从而验证了数值结果的合理性与有效性。

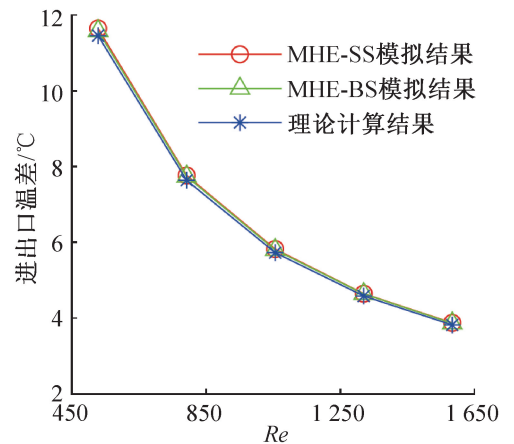


图5 模拟值与理论值

Fig.5 Simulation values and theoretical values

3 结果与分析

为模拟不同工况,设置了3组不同入口雷诺数

$Re = 660.07, 990.10, 1320.13$ 作为初始条件, 分别研究 4 种换热器结构在不同工况下的压降和温度差异。

3.1 压降性能分析

进出口压降 Δp 是评价换热器结构流动性能的重要参数。压降越低表示流体在换热器内的流阻越小, 说明换热器能够消耗更少能量带走更多热量。

图 6 所示为 4 种换热器在不同雷诺数下的进出口压降。在相同雷诺数下, 结构相似的两换热器之间的压降差距不明显, 但 MHE-CVB 和 MHE-IVB 相比 MHE-BS 和 MHE-SS 压降明显降低, 尤其 MHE-IVB, 其相比于 MHE-SS 在 3 种 Re 下的压降分别下降 41.56%、39.82%、38.05%。表明高级通道的存在有效疏导了水流, 降低了流阻, 减小了压降。值得注意的是, MHE-BS 的压降始终大于 MHE-SS, 在 3 种 Re 下压降差距分别为 284、342、359 Pa; MHE-CVB 的压降也始终大于 MHE-IVB, 在 3 种 Re 下压降差距分别为 172、568、1124 Pa, 两者的压降差距均有逐渐增大的趋势。这是由于流体在仿生通道中产生了二次流动, 流体沿通道中心由内侧向外侧流动, 这使得流体轴向流动的同时产生了径向流动, 流体微元之间发生碰撞, 流体微元与不同流速的流层之间产生附加切应力, 因而造成附加摩擦损失和摩擦系数的增大。随着 Re 的增加, 通道内流体流速的加快也使二次流的速度随之上升, 二

次流对通道的附加摩擦作用也逐渐加强, 这也是两换热器压降差距随 Re 增加而扩大的原因。

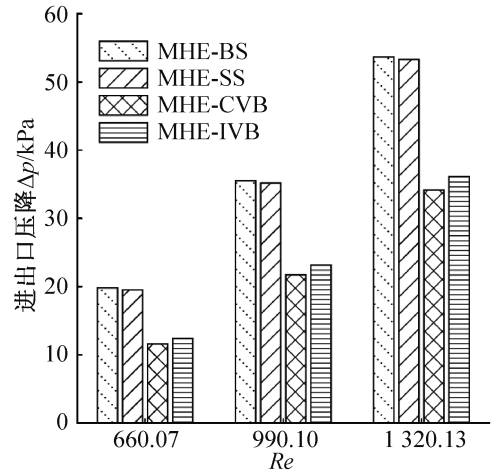


图 6 不同雷诺数下的压降

Fig.6 Pressure drops at different Reynolds numbers

图 7 所示为 MHE-BS 和 MHE-SS 在相同雷诺数 ($Re = 990.10$) 时的流线图。由图 7 可知, 在一级通道向二级通道分支处, MHE-BS 相较于 MHE-SS 会形成更强烈的涡流。这是由于仿生二级通道在分支处实际具有更大的分支角引起的。涡流的增强能够有效破坏热边界层, 有利于强化传热, 但同时也会造成压力的损失。

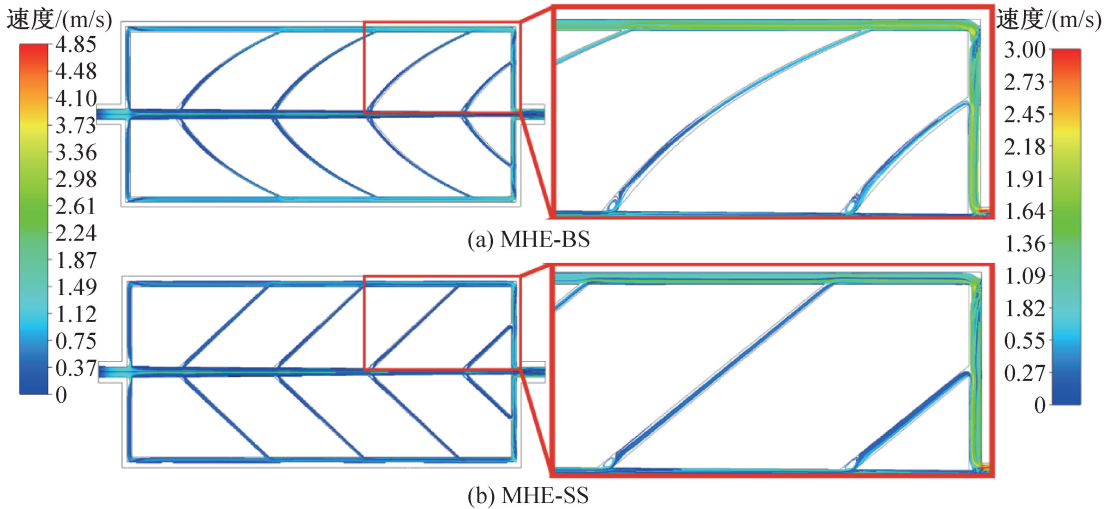


图 7 MHE-BS 和 MHE-SS 流线 ($Re = 990.10$)

Fig.7 Streamlines with MHE-BS and MHE-SS ($Re = 990.10$)

图 8 所示为 MHE-CVB 和 MHE-IVB 在不同雷诺数下的流线图。MHE-CVB 和 MHE-IVB 在压降方面得到了极大改善, 这主要得益于高级通道对水流起到的疏导作用。当流体在狭窄的四级和五级通道内流动时, 细长流道带来的压力损失将成为换热器压降升高的主要原因。间二级通道作为二级

通道的补充, 有效改善了二级通道区间内的流动情况, 并且由于通道末端不与环形通道连通, 而是通过三级通道实现回流, 省略了压力损失最大的末端细长部分, 因此相比完整的二级通道带来的压力损失更低。三级通道连通两条二级通道, 改善了 2 条二级通道之间的水流只能通过四级和五级通道流

动的局面,避免了流体绕过块状结构时产生的压力损失,由图 8 可知,平直三级通道内的水流流速更

高,通畅性更好,这也是 MHE-IVB 相比于 MHE-CVB 具有更低压降的原因。

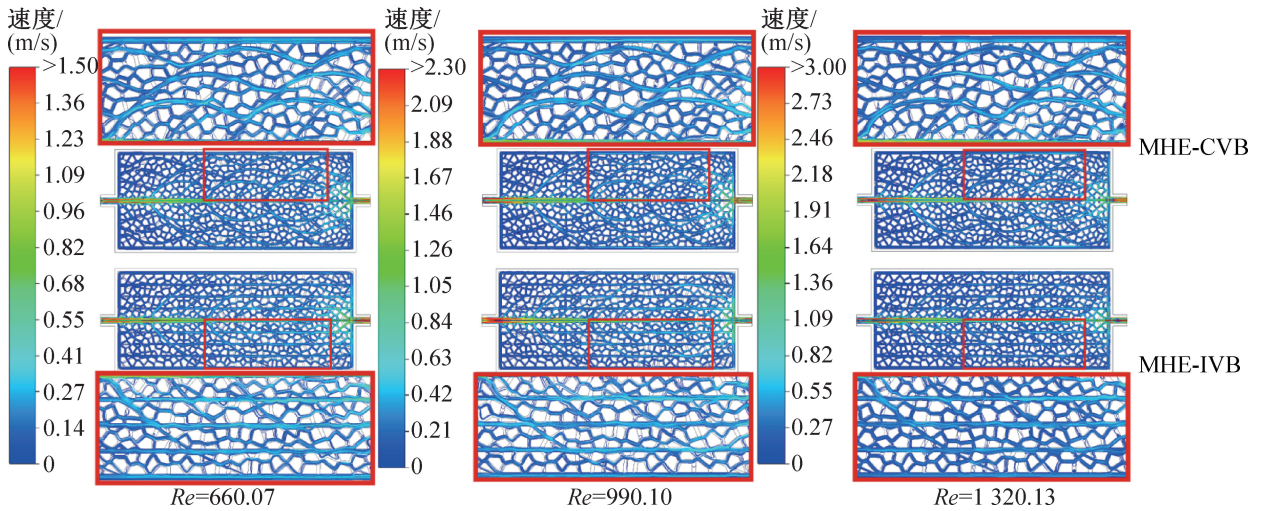


图 8 MHE-CVB 和 MHE-IVB 在不同雷诺数下的流线

Fig.8 Streamlines of MHE-CVB and MHE-IVB at different Reynolds numbers

3.2 温度性能分析

图 9 所示为 4 种换热器在不同雷诺数下的传热面平均温度。可以看出, MHE-CVB 和 MHE-IVB 相比于 MHE-BS 和 MHE-SS 传热面平均温度得到显著改善,降幅最大的 MHE-CVB 相比 MHE-SS 其传热面温度分别下降 3.43、2.66、2.26 °C,这是由于冷却流体在高级通道内流动时穿过更多的区域,增大了有效传热面积,并且在夹角处形成了更多的涡。此外,更高的 Re 意味着换热器内冷却流体流速更快,这有利于带走更多的热量,降低传热面温度。

MHE-SS 在同一 Re 下表现出相同的温度性能,两换热器内水流平均温度相差不超过 0.1 °C,这主要是由于分支通道数量不足,水流无法充分流动,无法充分发挥换热器的换热能力。

图 11 所示为 MHE-CVB 和 MHE-IVB 在不同雷诺数下的中心面温度云图。相比于 MHE-BS 和 MHE-SS, MHE-CVB 和 MHE-IVB 内部具有更多的分支通道,能够使水流充分流动,各分支通道夹角处形成的涡流也有利于传热的增强。此外,当 $Re = 1320.13$ 时, MHE-CVB 相比于 MHE-IVB 能够明显看到深蓝色低温区域由入口处向内扩展的范围更大,说明相比于平直三级通道,仿生三级通道能够将水流更通畅地输送至更远的位置,提高了温度均匀性,增强了传热性能。

3.3 综合性能分析

以 MHE-SS 为基准,图 12 所示为各换热器结构在不同雷诺数下综合传热性能的强化因子 η 对比结果。由图 12 可知, MHE-BS 的综合传热性能比 MHE-SS 略低,这表明在只具有二级分支的条件下,仿生二级通道对于温度性能的提升不足以弥补其造成的压力损失,从而使得综合传热性能下降; MHE-CVB 和 MHE-IVB 的综合传热性能相比于 MHE-SS 得到大幅提升,在不同入口 Re 下, η 均不小于 1.1,说明高级通道有助于水流的充分流动,在降低压降的同时提高了温度性能,而 MHE-CVB 比 MHE-IVB 的提升幅度更大,表明仿生三级通道相比于平直三级通道在传热方面带来的提升大于其在压降方面带来的牺牲,实际上,以 MHE-IVB 为基准, MHE-CVB 在 3 种

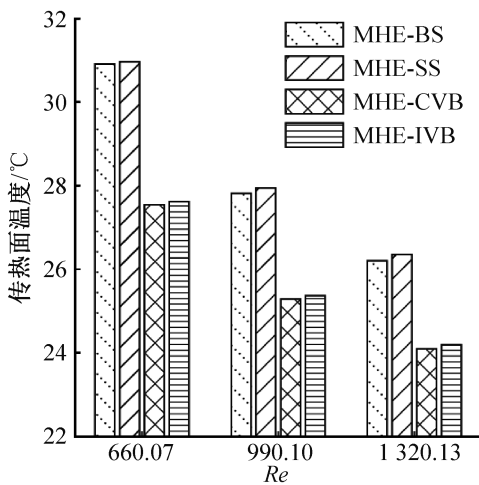


图 9 不同雷诺数下的传热面温度

Fig.9 Heat exchange surface temperature at different Reynolds numbers

图 10 所示为 MHE-BS 和 MHE-SS 在不同雷诺数下的中心面温度云图。通过对比可知, MHE-BS 和

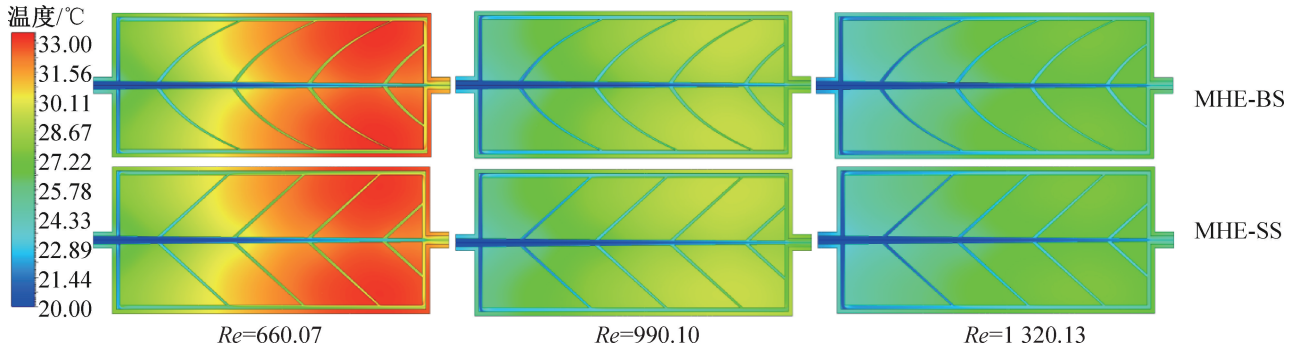


图 10 MHE-BS 和 MHE-SS 在不同雷诺数下的中心面温度云图

Fig.10 Temperature maps of the center surface of MHE-BS and MHE-SS at different Reynolds numbers

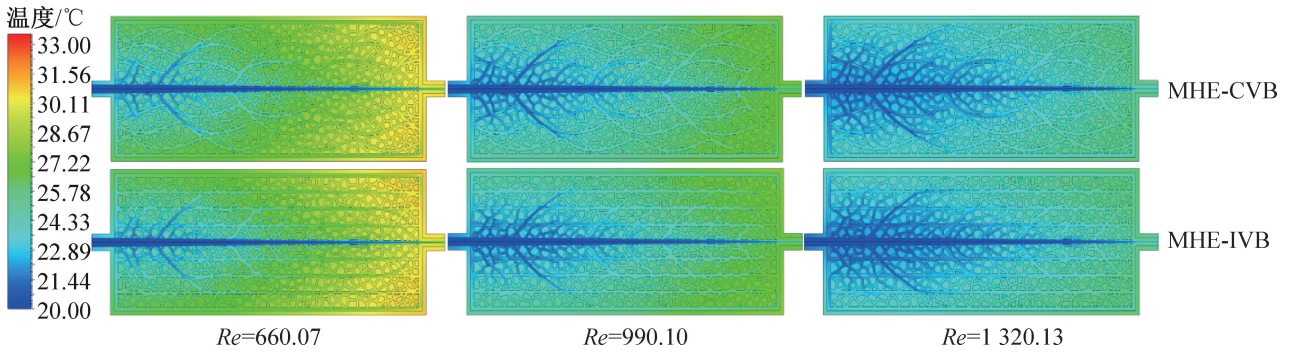


图 11 MHE-CVB 和 MHE-IVB 在不同雷诺数下的中心面温度云图

Fig.11 Temperature maps of the center surface of MHE-CVB and MHE-IVB at different Reynolds numbers

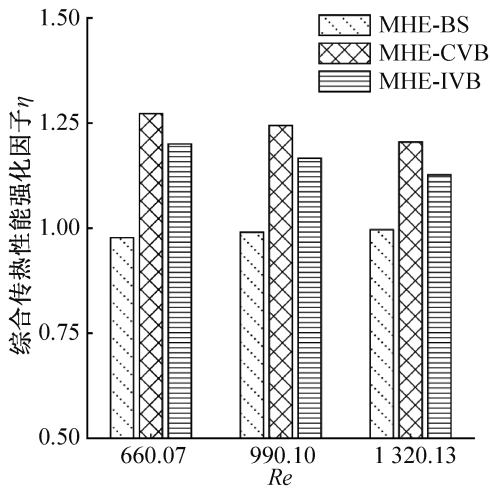


图 12 不同雷诺数下的综合传热性能强化因子

Fig.12 Heat transfer enhancement factors at different Reynolds numbers

不同 Re 下的 η 分别为 1.060、1.067、1.069, 表明 MHE-CVB 在综合传热性能上的表现要显著优于 MHE-IVB。

4 结论

将望天树叶片结构应用于换热器,设计了一种新

型仿生结构微通道,通过数值计算的方法研究了在层流状态下各级通道对微通道流动与传热性能的影响,得到如下结论:

1) 仿生二级通道更容易在分支处形成更强烈的涡流,但对换热能力提升不明显,不足以弥补流动条件恶化带来的压力损失,导致综合传热性能反而略小于平直二级通道。

2) 利用 voronoi 图原理生成的多边形空隙可以有效模拟叶片的网状四级和五级脉,四级和五级通道的存在极大改善了微通道换热器的热均匀性,显著提高了综合传热性能。

3) 间二级脉与三级脉相互配合,形成了更大的流动回路,在保障换热均匀性的同时减小了流动阻力,降低了微通道内的压降,使换热器的综合换热效果达到最优。

4) 仿生三级通道相比于平直三级通道虽然在压降方面有所欠缺,但在换热方面带来了极大提升,因此综合来看,前者对于换热器综合传热性能的改善是有利的。

参考文献

[1] LIU Huanling, SHAO Yuqiang, CHEN Zengtao, et al.

- Heat transfer and flow performance of a novel T type heat sink with GaInSn coolant [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 144: 129-146.
- [2] XIA Guodong, CHAI Lei, WANG Haiyan, et al. Optimum thermal design of microchannel heat sink with triangular reentrant cavities [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(6/7): 1208-1219.
- [3] ZHUANG Dawei, YANG Yifei, DING Guoliang, et al. Optimization of microchannel heat sink with rhombus fractal-like units for electronic chip cooling [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 116: 108-118.
- [4] 朱迅仪, 陈超伟, 张井志, 等. 歧管微通道热沉研究进展与展望[J]. *制冷学报*, 2023, 44(4): 15-33. (ZHU Xunyi, CHEN Chaowei, ZHANG Jingzhi, et al. Development and prospects of manifold microchannel heat sink research[J]. *Journal of Refrigeration*, 2023, 44(4): 15-33.)
- [5] YU Chenyang, ZHU Xu, LI Zhigang, et al. Optimization of elliptical pin-fin microchannel heat sink based on artificial neural network[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 205: 123928.
- [6] AHMED H E, SALMAN B H, KHERBEET A S, et al. Optimization of thermal design of heat sinks: a review[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 118: 129-153.
- [7] BEJAN A, LORENTE S. The constructal law of design and evolution in nature[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2010, 365(1545): 1335-1347.
- [8] 史恭乐. 被子植物演化和水循环[J]. *科学通报*, 2023, 68(12): 1487-1500. (SHI Gongle. Evolution of the angiosperms and hydrologic cycle [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(12): 1487-1500.)
- [9] SACK L, SCOFFONI C. Leaf venation: structure, function, development, evolution, ecology and applications in the past, present and future [J]. *New Phytologist*, 2013, 198(4): 983-1000.
- [10] LUO Yuanqiang, LIU Wangyu, WANG Li, et al. Heat and mass transfer characteristics of leaf-vein-inspired microchannels with wall thickening patterns [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 101: 1273-1282.
- [11] PENG Yi, YANG Xiong, LI Zhibin, et al. Numerical simulation of cooling performance of heat sink designed based on symmetric and asymmetric leaf veins [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 166: 120721.
- [12] 吴一苓, 李芳兰, 胡慧. 叶脉结构与功能及其对叶片经济谱的影响[J]. *植物学报*, 2022, 57(3): 388-398. (WU Yiling, LI Fanglan, HU Hui. The structure and function of leaf veins and their influence on leaf economic spectrum[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2022, 57(3): 388-398.)
- [13] GUAN Zhijie, ZHANG Shibao, GUAN Kaiyun, et al. Leaf anatomical structures of *Paphiopedilum* and *Cypripedium* and their adaptive significance [J]. *Journal of Plant Research*, 2011, 124(2): 289-298.
- [14] 周莹莹, 林华. 不同水热梯度下冠层优势树种叶片热力性状及适应策略的变化趋势[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(5): 733-744. (ZHOU Yingying, LIN Hua. Variation of leaf thermal traits and plant adaptation strategies of canopy dominant tree species along temperature and precipitation gradients [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(5): 733-744.)
- [15] 朱华, 谭运洪. 中国热带雨林的群落特征、研究现状及问题[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(4): 447-468. (ZHU Hua, TAN Yunhong. Community characteristics, research states and problems of tropical rain forests in China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(4): 447-468.)
- [16] 朱华, ASHTON P. 中国热带-亚热带常绿阔叶林群落交错区[J]. *科学通报*, 2021, 66(28/29): 3732-3743. (ZHU Hua, ASHTON P. Ecotones in the tropical-subtropical vegetation transition at the tropical margin of Southern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(28/29): 3732-3743.)
- [17] ELLIS B, DALY D C, HICKEY L J, 等. 叶结构手册[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012: 54-110. (ELLIS B, DALY D C, HICKEY L J, et al. *Manual of leaf architecture*[M]. Beijing: Peking University Press, 2012: 54-110.)
- [18] ZHANG Xi, HU Zijian, GUO Yayu, et al. High-efficiency procedure to characterize, segment, and quantify complex multicellularity in raw micrographs in plants [J]. *Plant Methods*, 2020, 16: 100.
- [19] HUANG Pingnan, DONG Guanping, ZHONG Xineng, et al. Numerical investigation of the fluid flow and heat transfer characteristics of tree-shaped microchannel heat sink with variable cross-section[J]. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 2020, 147: 107769.

- [20] MA D D, XIA G D, WANG J, et al. An experimental study on hydrothermal performance of microchannel heat sinks with 4-ports and offset zigzag channels[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 152: 157-165.
- [21] WU J M, ZHAO J Y, TSENG K J. Parametric study on the performance of double-layered microchannels heat sink [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 80: 550-560.

(上接第 51 页)

- [20] 吕超, 郑茂余. 土壤源热泵系统土壤热平衡的评价方法研究[J]. *制冷学报*, 2016, 37(3): 42-47. (LYU Chao, ZHENG Maoyu. Research on evaluation method of soil heat balance of ground-coupled heat pump system[J]. *Journal of Refrigeration*, 2016, 37(3): 42-47.)

通信作者简介

游田, 女, 副教授, 深圳大学土木与交通工程学院,

通信作者简介

李红艳, 女, 副教授, 青岛科技大学机电工程学院, 18661739996, E-mail: lihongyan@qust.edu.cn。研究方向: 机械结构强度分析。

About the corresponding author

Li Hongyan, female, associate professor, College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, 86-18661739996, E-mail: lihongyan@qust.edu.cn. Research fields: strength analysis of mechanical structure.

18210065523, E-mail: youtian@szu.edu.cn。研究方向: 能源地下结构, 光伏建筑一体化, 可再生能源利用, 建筑节能技术。

About the corresponding author

You Tian, female, associate professor, College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, 86-18210065523, E-mail: youtian@szu.edu.cn. Research fields: energy geo-structure, building integrated photovoltaics, renewable energy utilization, building energy efficiency.