

双向弯曲波浪形微通道的传热与流动特性

邵光逸, 王 波*

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2025年9月8日; 录用日期: 2025年9月16日; 发布日期: 2025年10月14日

摘 要

在圆柱形锂离子电池的热管理系统中, 蛇形板散热器因其散热效果好而被广泛应用。为进一步提升传热性能, 提出了一种双向弯曲波浪形微通道散热器, 通过数值模拟研究了通道结构、振幅和波长对其传热和流动特性的影响。结果表明, 缩放结构和平行结构的双向弯曲波浪形微通道有利于改善壁面温度均匀性, 其中缩放结构的微通道由于流通截面变化剧烈, 局部流体速度显著提高, 压降上升, 二次流强度增大, 传热性能得到强化的同时摩擦阻力也显著增加; 当通道振幅为2 mm, 波长为8 mm时, 摩擦系数的最大增幅为169%, 努塞尔数的最大增幅为28%, 壁面最高温度降低0.03 K, 最大温差减小7.9%。在等泵功耗条件下, 平行结构双向弯曲波浪形微通道的综合热工性能优于缩放结构。研究结果揭示了不同通道结构双向弯曲波浪形微通道的性能, 可为电池散热系统的优化设计提供参考。

关键词

双向弯曲波浪形微通道, 电池热管理, 强化换热, 通道形状, 传热与流动特性, 综合性能因子

Heat Transfer and Flow Characteristics of Bidirectional Curved Wavy Microchannels

Guangyi Shao, Bo Wang*

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: September 8, 2025; accepted: September 16, 2025; published: October 14, 2025

Abstract

In the thermal management system of cylindrical lithium-ion batteries, serpentine cold plates are widely utilized due to their excellent heat dissipation performance. To further enhance heat transfer efficiency, a bidirectional curved wavy microchannel heat sink is proposed. The effects of channel configuration, amplitude, and wavelength on its thermal and flow characteristics were investigated

*通讯作者。

through numerical simulations. Results indicate that bidirectional curved wavy microchannels with converging-diverging and parallel structures contribute to improved wall temperature uniformity. Specifically, the converging-diverging microchannel exhibits significant variations in cross-sectional area, leading to markedly increased local fluid velocity, elevated pressure drop, and enhanced secondary flow intensity. While heat transfer performance is improved, the frictional resistance also increases substantially. At a channel amplitude of 2 mm and wavelength of 8 mm, the maximum increase in friction factor reaches 169%, and the maximum increase in Nusselt number is 28%, accompanied by a reduction in the maximum wall temperature of 0.03 K and a decrease in the maximum temperature difference of 7.9%. Under equal pumping power conditions, the comprehensive thermal-hydraulic performance of the parallel bidirectional curved wavy microchannel surpasses that of the converging-diverging structure. The findings elucidate the performance characteristics of bidirectional curved wavy microchannels with different configurations, providing valuable insights for the optimized design of battery thermal management systems.

Keywords

Bidirectional Curved Wavy Microchannel, Battery Thermal Management, Heat Transfer Enhancement, Channel Geometry, Heat Transfer and Flow Characteristics, Comprehensive Performance Factor

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

圆柱形锂离子电池广泛用于电动汽车和储能系统中, 随着其能量密度和功率密度不断提升, 高效热管理技术已成为相关领域的研究热点与工程难点[1]-[3]。Tuckerman 和 Pease [4]最早提出了微通道的概念。这种结构可承受高达约 100 W/cm² 的热通量, 并具有尺寸小、重量轻、结构紧凑和冷却剂需求低等优点[5][6]。已经有广泛的研究证明波浪形微通道的换热性能要优于传统直微通道, 并且有许多研究致力于改变波浪形的结构参数来优化换热性能。Sui 等[7]提出了一种正弦波状微通道, 与普通直微通道在恒定热流和恒定壁温条件下的共轭传热模拟进行了比较。随后, Sui 等[8]对矩形正弦微通道内的流动摩擦和换热进行了实验研究, 验证了正弦微通道的综合强化效果。Sharma 和 Khan[9]比较了椭圆波和正弦波微通道的热工水力性能, 发现在大多数模型中, 椭圆波微通道通常比正弦波微通道表现出更好的热工水力性能。Khoshvaght-Aliabadi 等[10]和 Lin 等[11]进一步提出了波长沿流向减小或振幅增大的波浪形通道设计。这种设计表现出更低的热阻和更均匀的底壁温度分布或可以根据实际散热需要调整微通道沿流动方向的相对波幅, 有效解决局部过热问题。Lin 等[11]研究讨论了通道高度、通道纵横比对波浪形通道传热和流动特性的影响。在通道的几何截面形状上: Kose 等[12]比较了矩形、三角形和梯形微通道散热器的传热性能。除了平行的波浪壁, 微通道还可以设计有会聚 - 发散对称波浪壁[13]-[15]。然而, 对称波浪形的热性能似乎比平行波浪形的差。在圆柱形锂离子电池的热管理系统中, 波浪形微通道可适配电池表面曲率、增加接触面积, 有利于降低圆柱形电池模组的最高温度与最大温差。Yogeshwar 等[16]提出了一种新型双蛇形通道冷板, 与传统的单蛇形通道冷板相比, 降低了电池模块的最高温度和温度不均匀性, 但未深入研究这种微通道的结构参数对其散热性能的影响规律。

为了进一步提升蛇形微通道冷板的性能, 设计了一种双向弯曲波浪形微通道(Bidirectional Curved Wavy Microchannel, BCWM), 并通过数值模拟研究了流道结构、振幅和波长对微通道传热与流动特性的

影响, 为 BCWM 散热器的优化设计和性能试验提供参考。

2. 数值模拟

2.1. 物理模型

平板微通道散热器如图 1(a)所示, 由许多沿高度方向平行的波浪形微通道组成。双向弯曲波浪形微通道散热器如图 1(b)所示, 由平板微通道散热器经辊轮轧制而成。其流道结构考虑了两种不同设计——缩放结构与平行结构。缩放结构 BCWM 的上下壁面厚度一致, 流道截面沿流动轴线方向呈现剧烈的周期性缩放变化, 如图 2(a)所示。平行结构 BCWM 的上下壁面是平行的, 截面沿流动轴线方向变化程度很小, 如图 2(b)所示。缩放结构 BCWM 与平行结构 BCWM 的俯视图一致, 如图 2(c)所示。单个通道总长为 112 mm, 两端的直通道是为了防止模拟过程中回流现象的产生而设计, 长度为 8 mm, 属于非加热段, 波状区域属于加热段。两种微通道局部流体域的正视图与俯视图如图 3 所示, 波峰到波谷的中间截面称之为喉部, 即 B、D、F、H 截面。入口流道截面是边长为 1 mm 的正方形, 四周的壁厚均为 1 mm。综合考虑电池尺寸、通道阻力和加工要求, 微通道水平面上的振幅 $A_1 = 3.22$ mm, 波长 $\lambda_1 = 24$ mm, 垂直面上的振幅 A_2 与波长 λ_2 如表 1 所示。对于普通波浪形微通道(Ordinary Wavy Microchannel, OWM), 振幅 $A_2 = 0$ 。

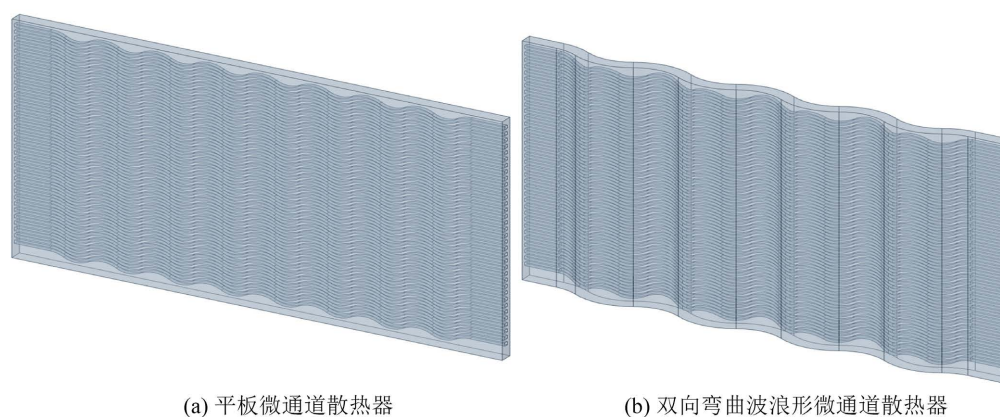


Figure 1. Schematic diagram of microchannel heat sinks: (a) flat plate microchannel heat sink; (b) bidirectional curved wavy microchannels heat sink

图 1. 微通道散热器示意图: (a) 平板微通道散热器; (b) 双向弯曲波浪形微通道散热器

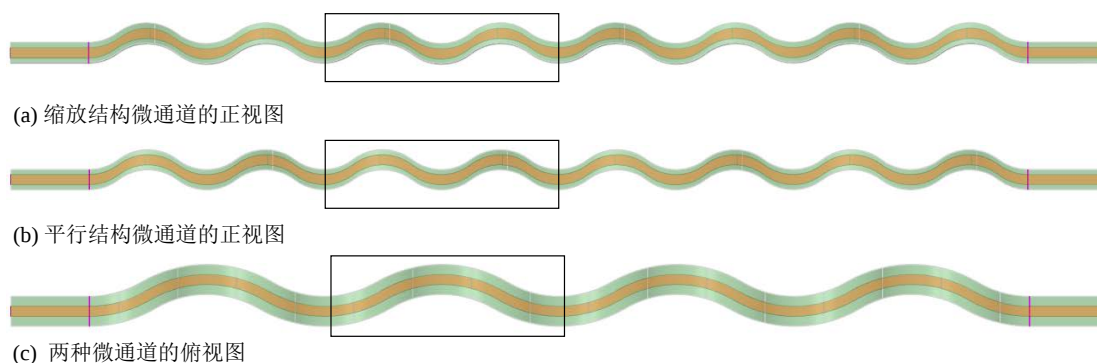


Figure 2. Microchannel schematics of scaling structure and parallel structure

图 2. 缩放结构与平行结构的微通道示意图

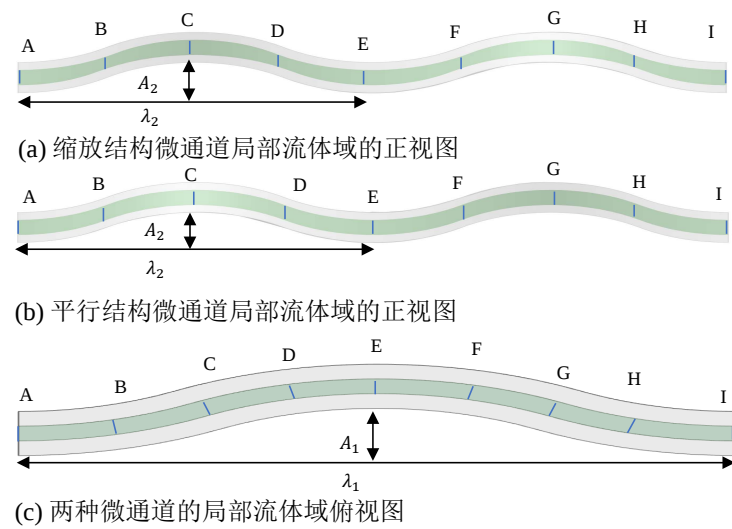


Figure 3. Local cross sections of fluid domain in two channels
图 3. 两种通道流体域局部截面示意图

Table 1. Structure parameters of microchannels
表 1. 微通道结构参数

模型序号	平行结构		模型序号	缩放结构	
	A_2	λ_2		A_2	λ_2
M1	2	8	M6	2	8
M2	2	12	M7	2	12
M3	2	16	M8	2	16
M4	3	12	M9	3	12
M5	4	16	M10	4	16

2.2. 控制方程

通道中的流体为水, 流动状态为稳定的层流, 水的进出口温差很小, 可忽略物性参数变化。控制方程包括连续性方程、动量方程、流体域能量方程与固体域能量方程, 如式(1)~(4)所示。

$$\nabla u = 0 \quad (1)$$

$$\rho(u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \cdot \nabla u) \quad (2)$$

$$\rho c_p (u \cdot \nabla T_f) = \lambda_f \nabla^2 T_f \quad (3)$$

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

式中, 下标 f 和 s 分别表示流体和固体, u 为流体速度矢量, 单位为 m/s , T 为温度, 单位为 K , μ 为粘度, 单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$, ρ 为密度, 单位为 kg/m^3 , c_p 为比热容, 单位为 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, λ 为导热系数, 单位为 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

2.3. 边界条件

通道的上下壁面为周期性边界条件。假设电池产热均匀, 加热段前后壁面为 2500 W/m^2 的均匀热流 [17]。其他外壁面均为绝热边界条件, 内壁面为流固耦合界面。流体域入口采用速度入口, 出口采用压力出口, 压力为 1 atm 。入口流体的温度为 293.15 K 。

2.4. 求解方法

采用 ANSYS FLUENT (2020R1) 进行数值模拟。速度和压力耦合求解采用 SIMPLE 算法。压力修正方程的离散采用标准格式, 动量和能量方程的离散采用二阶迎风格式。当连续性和能量方程的残差分别小于 1×10^{-6} 和 1×10^{-8} 时, 判定计算收敛。

2.5. 数据处理

雷诺数:

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (5)$$

努塞尔数:

$$Nu = \frac{hD}{\lambda_f} \quad (6)$$

摩擦系数:

$$f = \frac{2\Delta p D}{\rho u^2 l} \quad (7)$$

在恒定泵功耗条件下, 微通道的综合性能因子:

$$\eta = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (8)$$

式中, D 为通道的水力直径, 单位为 m, h 为通道的换热系数, 单位为 $W/(m^2 \cdot K)$, l 为加热段通道沿流动方向的长度, 单位为 m, η 为综合性能因子, 下标 0 代表平行结构的 BCWM [18]。

2.6. 网格无关性验证

以 M2 为例, 在入口速度为 0.8 m/s、入口流体的温度为 293.15 K 和 2500 W/m² 恒定热流的条件下, 通过数值模拟所得通道的 Nu 随网格数量 N 的变化情况如图 4 所示。结果表明, 当网格数量为 172 万时, 与网格数量为 254 万所得 Nu 的相对误差仅为 0.18%, 可满足网格无关性要求。所有其他模型也均进行了网格无关性验证。

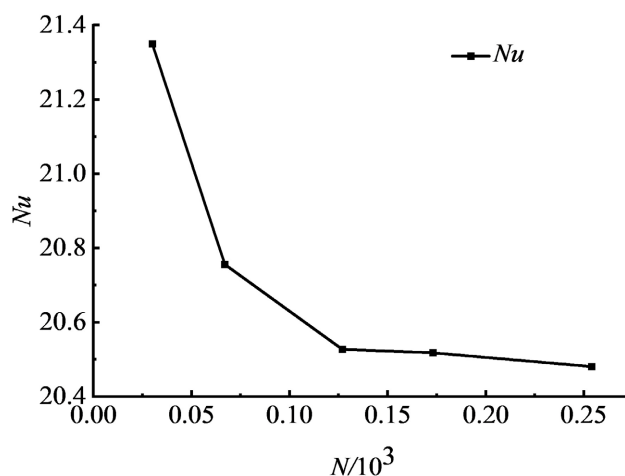


Figure 4. Grid independence test

图 4. 网格无关性测试

2.7. 模型可靠性验证

对 Sui 等[8]开展的矩形截面正弦微通道试验进行数值模拟。如图 5 所示, 模拟结果与实验数据吻合较好。

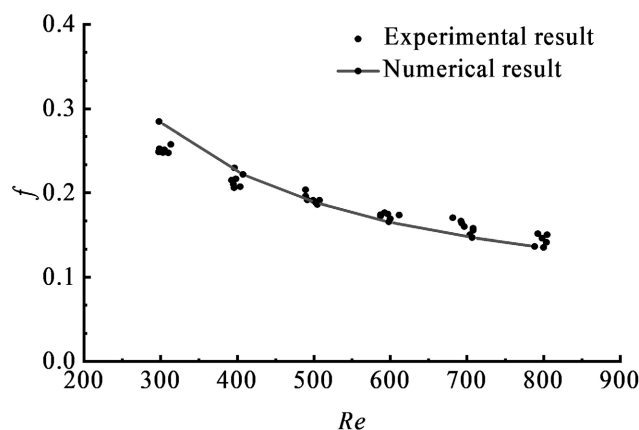


Figure 5. Model validation

图 5. 模型可靠性验证

3. 结果与分析

3.1. 流动特性

如图 6 所示, 在相同的 Re 下, 缩放结构 BCWM 的 f 均大于平行结构的 BCWM。随着 Re 的增加, f 减小, 这是因为流速升高使得近壁面附近的边界层变薄, 通道中流动摩擦阻力减小, 且随着 Re 的增加缩放结构微通道的 f 下降更快。两种通道的 f 均随着波长 λ_2 的增加而减小, 随着振幅 A_2 的增加而增大。当 $Re = 300$ 左右时, 与 OWM 相比, M1 至 M10 的 f 增幅分别为 154.98%、58.84%、34.74%、122.73%、112.37%、587.09%、113.32%、52.24%、634.61%和 663.30%。与相同振幅 A_2 和波长 λ_2 的平行结构通道相比, 缩放结构通道 M6 至 M10 的 f 分别增加了 169%、34%、12.9%、229%和 259%。

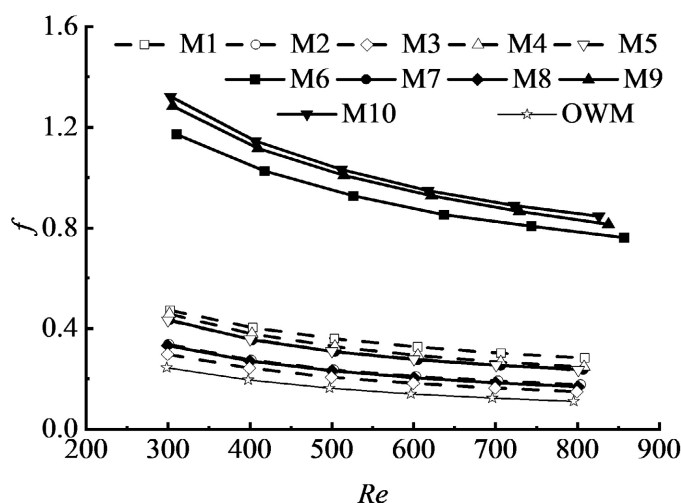


Figure 6. Variation of friction coefficient

图 6. 摩擦系数变化规律

图 7 分别展示了 M2、M4、M7 和 M9 在入口流速为 0.5 m/s 条件下, 9 个局部截面的速度和静压差的变化规律。如图 7(a)所示, 四个通道中流体的流速在局部呈现相似的周期性变化规律, 喉部位置(B、D、F 和 H)的流速最高, 高度方向波峰(C 和 G)和波谷(A、E 和 I)处的流速较低, 因为 A~C 和 D~E 属于上升段, A 处的流速要高于 C 处, E 处的流速要高于 G 处。反之 C~E 和 G~I 属于下降段, 流速增加。振幅较大的通道流速更高且喉部到非喉部的速度变化更大。在波长和振幅相同的条件下, 由于缩放结构通道在喉部的流通面积更小, 流道截面积的变化更剧烈, 其流速的最大值更高, 并且速度变化也更剧烈。如图 7(b)所示, 两种不同流道结构中流体静压差沿通道长度方向呈现波动性周期变化, 喉部位置(B、D、F 和 H)的流速增大, 动压升高, 静压减小, 与入口截面的静压差增大。缩放结构通道的局部截面静压更小, 静压差更大。振幅较大的通道静压差更大且喉部到非喉部的静压差变化更大。在喉部截面 D 处, M9 比 M7 的静压差增加了 280%, M4 比 M2 的静压差增加了 55%。

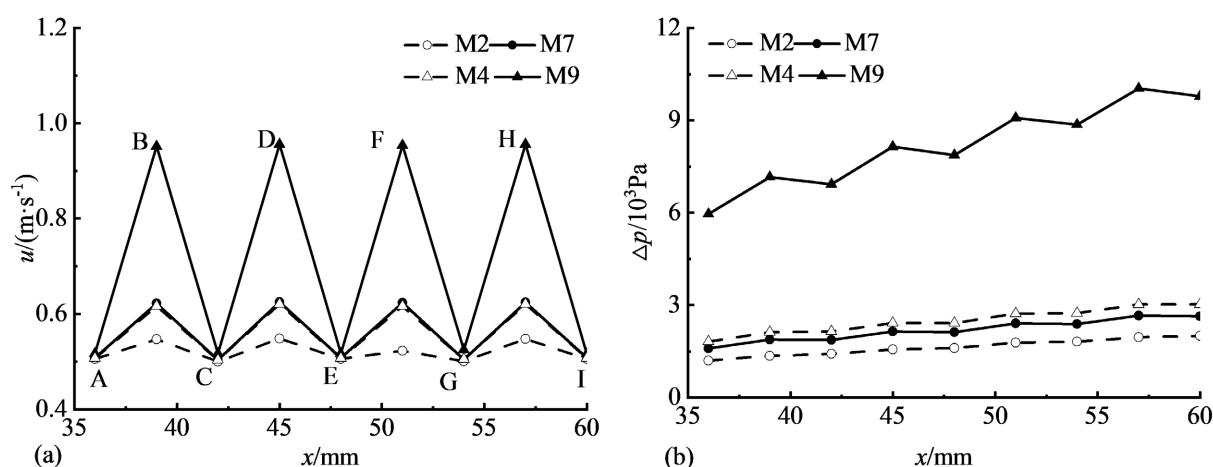


Figure 7. Variation of local flow characteristics: (a) flow velocity; (b) static pressure difference

图 7. 局部流动特性变化规律: (a) 流速; (b) 静压差

两种结构通道的表面摩擦系数云图如图 8 所示, 其定义式为:

$$C_f = \frac{2\tau_w}{\rho u^2} \quad (9)$$

式中, τ_w 是局部壁剪应力。

结果表明, 缩放结构通道的表面摩擦系数高于平行结构通道。振幅较大的通道具有更高的表面摩擦系数。由于喉部的壁面剪应力更高, 喉部的摩擦系数更高, 这种差异在缩放结构和较高振幅下更加明显。

局部截面上的二次流强度:

$$Se = \frac{\rho_f D U_s}{\mu}, U_s = D J_{ABS}^n, J_{ABS}^n = \frac{1}{A} \int_A |\omega^n| dA \quad (10)$$

式中 U_s 是二次流特征速度, J_{ABS}^n 是主流方向涡通量绝对值的平均值, A 是横截面积, ω^n 是垂直于横截面涡量的分量[19]。

从图 9 可以看出, 振幅更大的通道具有更大的二次流强度, 缩放结构 BCWM 的二次流强度比平行结构的通道高。4 种通道的二次流强度均在喉部位置取得极大值。在喉部截面 D 处, M9 比 M7 的二次流强度增加 120%, M4 比 M2 的二次流强度增加 37%。

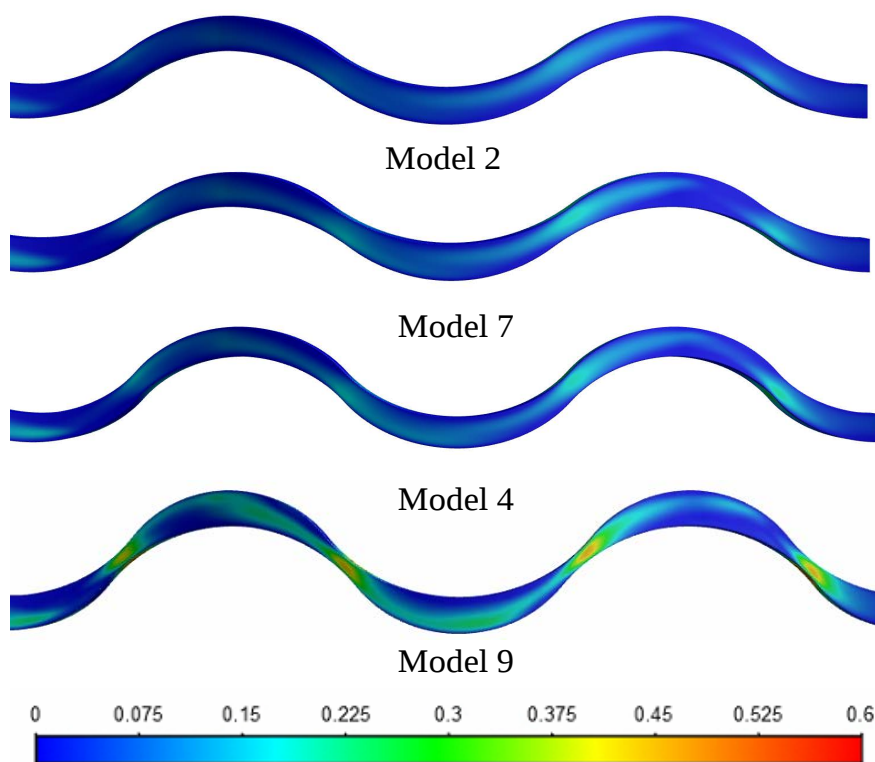


Figure 8. Contour plots of skin friction coefficient

图 8. 表面摩擦系数云图

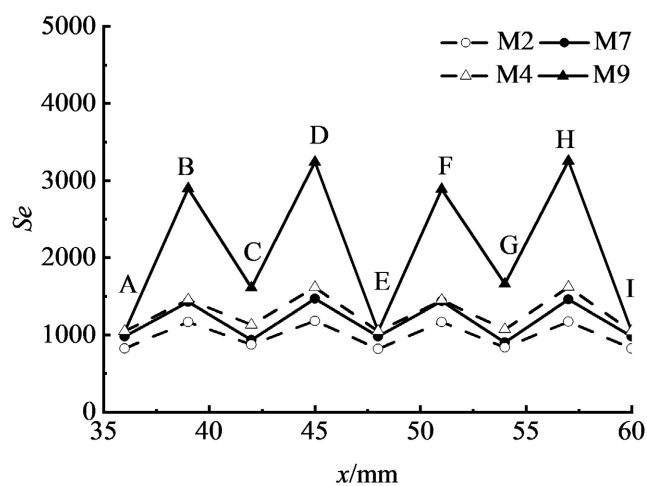


Figure 9. Variation of local secondary flow intensity

图 9. 局部二次流强度变化规律

3.2. 传热特性

如图 10 所示, 在相同的 Re 下, 缩放结构 BCWM 的 Nu 均大于平行结构 BCWM。两种类型通道的 Nu 均随着 Re 的增加而增大, 这是因为当 Re 增加时, 通道内流体流速增加, 换热加强。且随着 Re 增加, 缩放结构微通道的 Nu 的上升更快。两种通道的 Nu 均随着波长 λ_2 的增加而减小, 随着振幅 A_2 的增加而增大。当 $Re = 800$ 左右时, 与 OWM 相比, M1 至 M10 的 Nu 的增幅分别为 97.6%、61.1%、44.0%、

176.5%、161%、287%、170.3%、126.5%、268%和 239.5%。与相同振幅 A_2 和波长 λ_2 的平行结构通道相比, 缩放结构通道 M6 至 M10 的 Nu 分别增加了 28%、9.9%、3.2%、33.4%和 30%。

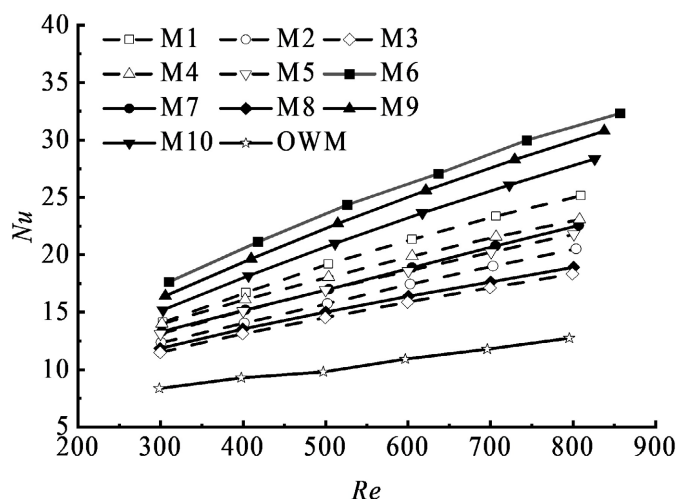


Figure 10. Variation of Nusselt number

图 10. 努塞尔数变化规律

如图 11(a)所示, 当入口流速为 0.5 m/s 时, M2 和 M7 两个通道的流体温度均呈线性上升。由于流体与壁面间的对流换热随流速周期性波动, 壁面温度也呈现一定的波动性。平行结构通道的耦合壁面温度高于缩放结构的耦合壁面温度。两种通道的 Nu 沿流动方向的变化规律如图 11(b)所示, 均呈现波动性变化。因为缩放结构通道的局部位置流速更高, 对流换热系数更大, 因而局部 Nu 更大, 壁面与流体的温差更小。加热壁面的最高温度和最大温差也是评价散热器性能的指标之一。

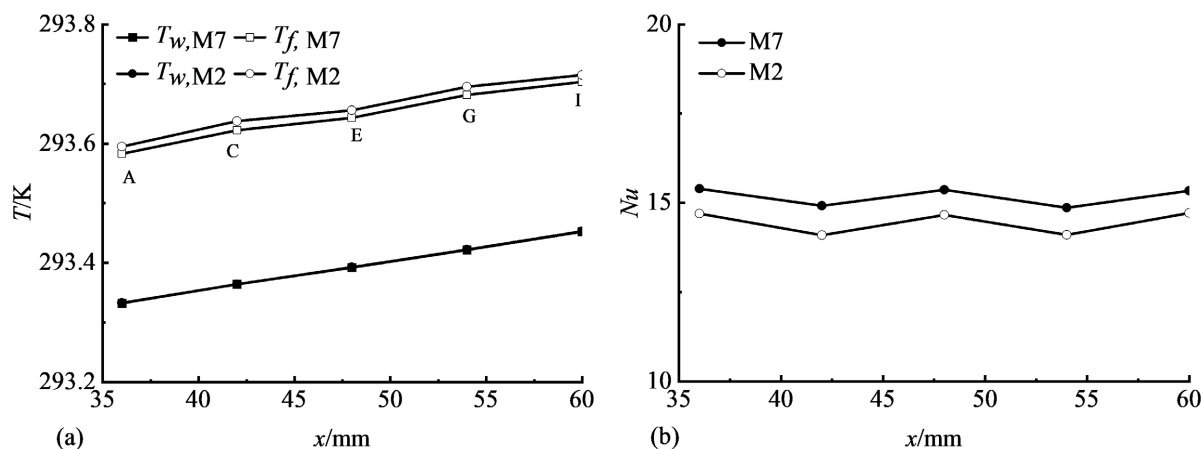


Figure 11. Variation of local heat transfer characteristics: (a) fluid temperature and coupled wall surface temperature; (b) Nusselt number

图 11. 局部传热特性变化规律: (a) 流体温度与耦合壁面温度; (b) 努塞尔数

如图 12 与图 13 所示, 与 OMW 相比, 缩放结构与平行结构 BCWM 的最高温度分别最大降低了 0.2 K 和 0.17 K, 最大温差分别最大降低了 28.15%和 22.6%。缩放结构 BCWM 因其更好的传热性能, 壁面最高温度和最大温差更低。相比于 M1, M6 的最高温度降低了 0.03 K, 最大温差降低了 7.1%。

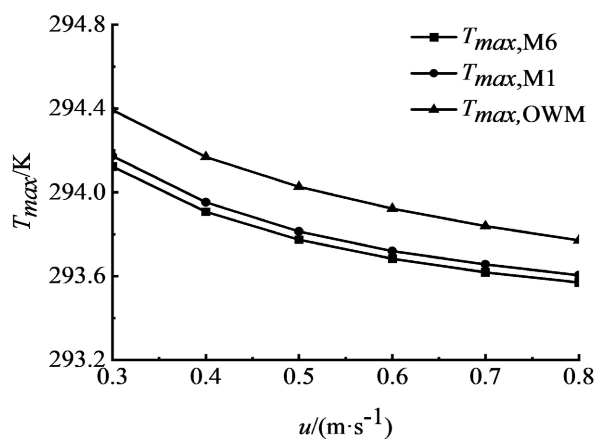


Figure 12. Maximum wall temperature

图 12. 壁面最高温度

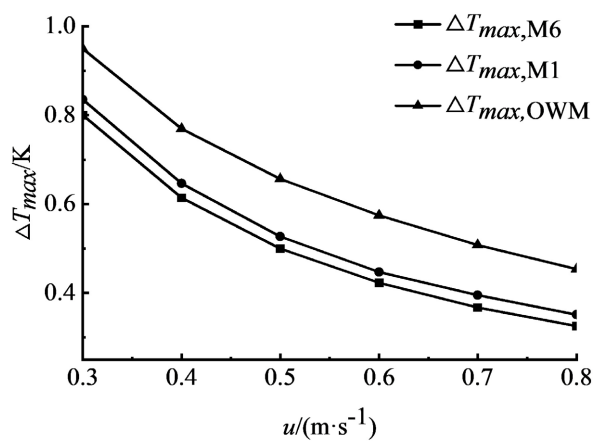


Figure 13. Maximum wall temperature difference

图 13. 壁面最大温差

3.3. 综合性能

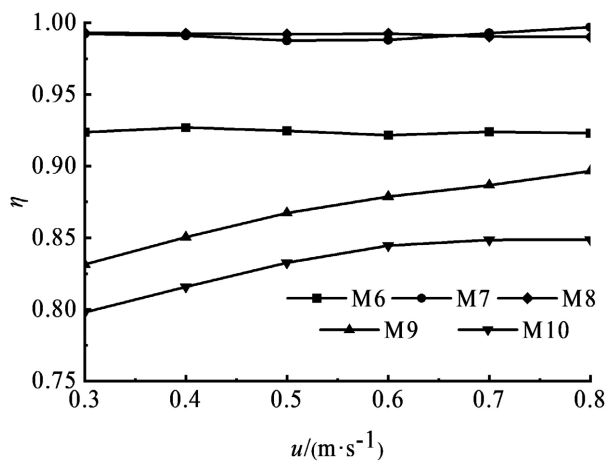


Figure 14. Comprehensive performance factor

图 14. 综合性能因子

如图 14 所示, 在相同的入口流速下, 缩放结构 BCWM 的综合性能因子均要小于 1, 在 0.798 至 0.993 的范围。这意味着在相同的泵耗下, 平行结构 BCWM 的热工水力综合性能更好。缩放结构能以更高的阻力和能耗为代价, 提高壁面的温度的均匀性, 这对控制电池组最大温差也是有意义的。

4. 结论

本文通过数值模拟研究了缩放流道和平行流道的 BCWM 在不同振幅和波长条件下的流动与传热特性, 得出以下主要结论:

- 1) 缩放流道结构的喉部流速、二次流强度和摩擦阻力更大, 与平行流道相比, 摩擦系数最大增幅达 259%。
- 2) 缩放流道结构的换热性能更好, 与平行流道相比, 努塞尔数最大增幅达 33.4%, 壁面最高温度降低 0.03 K, 最大温差降低了 7.1%, 更有利于改善壁面温度均匀性。
- 3) 在等泵功耗下, 平行结构 BCWM 的热工水力综合性能优于缩放结构 BCWM。

参考文献

- [1] Lin, Y., Luo, Y., Li, W., Cao, Y., Tao, Z. and Shih, T.I. (2021) Single-Phase and Two-Phase Flow and Heat Transfer in Microchannel Heat Sink with Various Manifold Arrangements. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **171**, Article 121118. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121118>
- [2] Deng, T., Ran, Y., Zhang, G., Chen, X. and Tong, Y. (2019) Design Optimization of Bifurcating Mini-Channels Cooling Plate for Rectangular Li-Ion Battery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **139**, 963-973. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.082>
- [3] 王波, 孙聪聪, 王雅亮, 等. 基于 PCM 的锂电池保温及预热性能研究[J]. 化学工程, 2022, 50(6): 23-28.
- [4] Tuckerman, D.B. and Pease, R.F.W. (1981) High-Performance Heat Sinking for VLSI. *IEEE Electron Device Letters*, **2**, 126-129. <https://doi.org/10.1109/edl.1981.25367>
- [5] Wang, Z., Wang, X., Yan, W., Duan, Y., Lee, D. and Xu, J. (2011) Multi-Parameters Optimization for Microchannel Heat Sink Using Inverse Problem Method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **54**, 2811-2819. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.01.029>
- [6] 沈佳飞, 王波, 周秋平, 等. 转折角对 Z 形通道印刷电路板式换热器中二氧化碳流动与换热特性的影响[J]. 上海理工大学学报, 2023, 45(4): 352-363.
- [7] Sui, Y., Teo, C.J., Lee, P.S., Chew, Y.T. and Shu, C. (2010) Fluid Flow and Heat Transfer in Wavy Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **53**, 2760-2772. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.022>
- [8] Sui, Y., Lee, P.S. and Teo, C.J. (2011) An Experimental Study of Flow Friction and Heat Transfer in Wavy Microchannels with Rectangular Cross Section. *International Journal of Thermal Sciences*, **50**, 2473-2482. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.06.017>
- [9] Sharma, A. and Khan, M.K. (2022) Heat Transfer and Flow Characteristics of Varying Curvature Wavy Microchannels. *International Journal of Thermal Sciences*, **185**, Article 108096. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.108096>
- [10] Khoshvaght-Aliabadi, M., Feizabadi, A. and Nouri, M. (2021) Design of Novel Geometries for Minichannels to Reduce Junction Temperature of Heat Sinks and Enhance Temperature Uniformity. *Applied Thermal Engineering*, **192**, Article 116926. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116926>
- [11] Lin, L., Zhao, J., Lu, G., Wang, X. and Yan, W. (2017) Heat Transfer Enhancement in Microchannel Heat Sink by Wavy Channel with Changing Wavelength/Amplitude. *International Journal of Thermal Sciences*, **118**, 423-434. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.05.013>
- [12] Kose, H.A., Yildizeli, A. and Cadirci, S. (2022) Parametric Study and Optimization of Microchannel Heat Sinks with Various Shapes. *Applied Thermal Engineering*, **211**, Article 118368. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118368>
- [13] Wang, G. and Vanka, S.P. (1995) Convective Heat Transfer in Periodic Wavy Passages. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **38**, 3219-3230. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00051-a](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00051-a)
- [14] Ghaedamini, H., Lee, P.S. and Teo, C.J. (2013) Developing Forced Convection in Converging-Diverging Microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **65**, 491-499. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.06.036>

- [15] Ramgadia, A.G. and Saha, A.K. (2013) Numerical Study of Fully Developed Flow and Heat Transfer in a Wavy Passage. *International Journal of Thermal Sciences*, **67**, 152-166.
- [16] Yogeshwar, D., Repaka, R. and Marath, N.K. (2024) A Double Serpentine Channel Liquid Cooling Plate for Hotspot Targeted Cooling of Lithium-Ion Batteries in a Battery Module. *International Journal of Thermal Sciences*, **209**, Article 109521.
- [17] 肖咏坤. 基于液冷的 21700 锂离子电池散热结构设计与冷却性能分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2023.
- [18] Webb, R.L. (1981) Performance Evaluation Criteria for Use of Enhanced Heat Transfer Surfaces in Heat Exchanger Design. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **24**, 715-726. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(81\)90015-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(81)90015-6)
- [19] Song, K. and Wang, L. (2013) The Effectiveness of Secondary Flow Produced by Vortex Generators Mounted on Both Surfaces of the FIN to Enhance Heat Transfer in a Flat Tube Bank FIN Heat Exchanger. *Journal of Heat Transfer*, **135**, Article 041902.