

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-11

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260427001

带反向凸起凹坑的平板通道空气传热与压降特性的多目标优化

李政道¹ 任华华² 张卓¹ 郭浩博¹ 陶文铨¹

(1 西安交通大学能源与动力工程学院 热流科学与工程教育部重点实验室 西安 710049;

2 阿里云计算有限公司 杭州 311121)

摘要 电池和芯片在运行过程中会产生大量热量,若不能及时散热将显著降低其运行安全性、寿命和性能。低效散热将导致更高的冷却能耗,降低整体能效。因此,传热表面的结构优化对电池和芯片的热管理至关重要。本文提出一种新型带反向凸起的凹坑板,研究了影响其传热性能的关键参数。结果表明,与凹坑深度相关的2个参数(R_1 和 R_2)及凹坑倾角(α)对其流动传热性能影响显著。为进一步优化性能,采用XGBoost算法和NSGA-II多目标遗传算法,以努塞尔数(Nu)和压降(Δp)为优化目标,通过基于熵权法的TOPSIS算法确定当前三变量设计空间内的最优折中解。采用等泵功下的性能评价准则(PEC)作为传热性能评估指标,数值模拟结果表明,在所研究的雷诺数(Re)范围内,PEC约为1.55,表明强化传热效果显著。

关键词 凹坑;传热强化;XGBoost;多目标优化

中图分类号: TK124;TK172

文献标识码: A

Multi-Objective Optimization of Air Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics in Parallel Channels Composed of Dimpled Plate with Reverse-Side Protrusion

Li Zhengdao¹ Ren Huahua² Zhang Zhuo¹ Guo Haobo¹ Tao Wenquan¹

(1. Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Alibaba Cloud Computing Co., Ltd., Hangzhou 311121, China)

Abstract

Objective Air-cooled, parallel-plate channels used in battery packs, electronic chips, and compact heat exchangers are commonly limited by the trade-off between heat transfer and pressure drop. Although dimpled surfaces can intensify near-wall mixing at a relatively low manufacturing cost, their overall thermal-hydraulic performance is highly sensitive to the geometric configuration. To address this issue, this study investigates a novel parallel-plate channel equipped with a dimpled plate featuring reverse-side protrusions. This study aims to clarify the effects of major geometric parameters on the coupled flow and heat transfer characteristics, and to identify an optimal compromise design that enhances heat transfer while suppressing the pressure drop.

Methods A three-dimensional, periodic unit of a plate channel was established and solved using steady-state computational fluid dynamics. Air was treated as an incompressible fluid with constant thermophysical properties. Periodic boundary conditions were adopted for the inlet and outlet of the computational domain. Grid independence was achieved at approximately 5.68 million cells. The numerical method was validated against published pillow plate experimental data. Three geometric parameters were selected as decision variables, namely the depth of the large dimple ($R_1=2.5-4.0$ mm), the depth of the small dimple ($R_2=0.5-2.0$ mm), and the dimple inclination angle ($\alpha=30^\circ-60^\circ$). A total of 64 design cases were used to construct the sample database. Based on these CFD data, Extreme Gradient Boosting (XGBoost) surrogate models were trained for Nu and Δp . The trained models were then coupled with the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGAII) to perform multi-objective optimization, and the entropy-weighted technique for order preference by

收稿日期:2026-04-27;修回日期:2026-05-18;录用日期:2026-05-23

责任编辑:王亚薇



移动阅读

similarity to ideal solution (TOPSIS) was employed to determine the best compromise solution.

Results and Discussions Univariate analysis reveals that R_1 , R_2 , and α all have significant influences on the thermal-hydraulic performance. Increasing R_1 intensifies the flow separation and reattachment and enlarges the recirculation zone. Consequently, the heat transfer performance (h) increases rapidly. However, once R_1 exceeds a certain level, the increase in h becomes much smaller than the increase in frictional resistance (f), resulting in a turning point in the comprehensive performance. Both h and f increase rapidly with an increase in R_2 ; beyond a certain threshold, further increases in R_2 , cause the trends of h and the performance evaluation criteria (PEC) gradually flatten out. Additionally, h and f show a tendency to increase and then decreasing with the increase of α . The XGBoost surrogate model reproduces the CFD results with high accuracy. The maximum deviations are only 0.44% for Nu and 3.31% for Δp , while the coefficients of determination (R^2) reach 0.999 6 and 0.998 2, with root mean square errors of 2.94 and 6.42, respectively. Fourteen nondominated solutions were obtained on the Pareto front. The highest ranked compromise solution selected by entropy-weighted TOPSIS corresponds to $R_1=2.8$ mm, $R_2=0.6$ mm, and $\alpha=47^\circ$. Further CFD simulations over $Re=5\,000$ – $10\,000$ confirm that the optimized structure had superior overall heat transfer performance.

Conclusions The dimpled plate with reverse-side protrusions provides an effective passive strategy for enhancing air-side heat transfer in parallel-plate channels. However, maximizing thermal-hydraulic performance requires a rational combination of large dimple depth, small dimple depth, and inclination angle, rather than merely increasing geometric disturbances. The XGBoost, NSGAII, and TOPSIS frameworks provides a reliable and efficient approach for the multi-objective design of enhanced heat transfer surfaces. For the present channel, the optimized geometry achieves a PEC of approximately 1.55 under equal pumping power over the entire investigated Re range, indicating substantial comprehensive performance improvements, promising application potential in battery thermal management, chip cooling, and other compact forced-air cooling devices.

Keywords dimple; heat transfer enhancement; XGBoost; multi-objective optimization

随着社会经济和科学技术的发展,电池和芯片不断朝着尺寸小型化、功能多样化和规模集成化方向发展,带来了高热流密度器件的冷却问题,处理不好会严重降低设备运行的稳定性和效率。为此,需要提高冷却剂流量或降低冷却剂温度,以确保电池和芯片在安全温度范围内工作,但这也会导致更高的能耗^[1-3]。为了应对日益严峻的能源危机和环境问题,探索高效节能的强化传热技术成为当前能源研究的主题。

在众多传热强化的被动技术中,凹坑、翅片^[4]及纳米流体^[5]等被广泛应用。其中,凹坑通过有限的扩展面积即可显著强化湍流^[6],并具有低压降、制造成本低、维护简单等优点^[7],应用前景广阔。近年的研究包括:M. Gürdal等^[8]将纳米流体、磁场效应和凹坑相结合,可实现基于等泵功的性能评价准则(performance evaluation criteria, PEC)为1.126。Meng Xianlong等^[9]在激光无线供电系统的接收端采用凹坑和凸起强化散热,使 Nu 提高30%~54%,但阻力系数增大62.5%~282.1%。Liao Wenling等^[10]针对纸机干燥筒排气余热利用,提出在换热管内壁组合布置凹坑与凸起结构。所设计双凹坑管结构的等泵功下PEC在 $Re=5\,000$ 时达到最大值1.29。R. Deeb^[11]模拟了球形、椭圆形、水滴形和凸轮形凹坑在攻角为 0° 和 180° 下的流动传热特性。结果显示, 0° 攻角水滴形凹坑板的整体传热效果最佳,等泵功下PEC最高可

达1.33。S. R. Al-Haidari等^[12]在圆管内壁引入球形凹坑结构,可实现最高等泵功PEC=1.408。S. A. A. Mehrjardi等^[13]综合研究了水滴形凹坑和CuO/水纳米流体对壳管式换热器流动传热性能的影响。当两侧纳米颗粒质量分数均为1%时,等泵功下PEC达到最高,为1.253。A. Dağdeviren等^[14]采用水滴形凹坑、体积分数为2.0%的 Fe_3O_4 纳米颗粒及0.3 T恒定磁场以强化传热,可使等泵功下PEC达到1.325。K. Mashayekh等^[15]所设计的螺旋椭圆凹坑管在 $Re=5\,000$ 时获得最高等泵功PEC=1.15。

综上所述,国内外学者从多方面利用凹坑来强化传热。然而,增强对流传热通常会使得压降急剧增加。因此,有必要考虑如何在强化传热的同时控制压降以实现性能最优。以上综述表明在圆管内壁引入球形凹坑结构,可实现最高等泵功PEC=1.408^[12],但对于本文研究的平板型换热面则尚未见PEC达到1.41的报道,且关于凹坑板在传热增强及压降降低两方面同步优化的研究相对有限^[16,17]。

本文针对具有反向凸起凹坑的平板通道进行了优化研究。以 Nu 和 Δp 为优化目标,采用多目标优化方法对结构进行优化,最后将优化后的传热和压降性能与基准结构进行对比。本研究中PEC以相同条件下的光滑平板通道为参考结构,用于表明反向凸起凹坑结构在等泵功约束下相对于常规平板通道的强化效果。这与M. Gürdal等^[8]所选择参考结构相

一致。

1 物理模型与数值方法

1.1 物理模型

本文研究了一种具有反向凸起凹坑的平板通道。基本结构如图1所示,方形板边长 $L_1=L_2=960$ mm,高度 H_1 为 15 mm。此类结构已广泛应用于电池冷却、数据中心的空气冷却等工程。考虑到流动方向上结构具有周期性,为节省计算资源,选取其中一个典型重复单元进行研究,其边长为 $L_3=60$ mm,

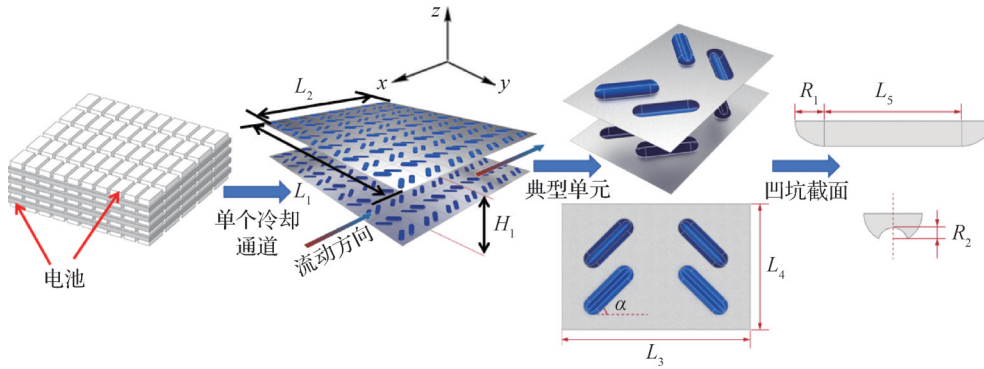


图1 凹坑板的物理模型

Fig.1 Physical model of dimpled plate

1.2 控制方程

基于此类换热器的工程应用范围,可假定传热过程为不可压缩、定常、常物性且无内热源的湍流传热问题,控制方程如式(1)~式(3)所示^[18]。

连续性方程:

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

动量方程:

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

能量方程:

$$\rho c_p (U \cdot \nabla)T = \lambda \nabla^2 T \quad (3)$$

式中: p 为流体压力,Pa; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; U 为速度矢量, m/s ; μ 为流体动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; T 为流体温度,K; c_p 为流体比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; λ 为流体导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

对以上简化假设合理性做简要说明。首先,在本研究的 Re 范围内,空气流动的马赫数远低于 0.3,可近似视为不可压缩流动;其次,对于本研究中充分发展的湍流流动,定常模拟的时均结果与非定常模拟的时均统计结果偏差极小,能够准确反映流动传热的平均特性;此外,本研究目的为探究该新型反向凸起凹坑结构所带来的空气传热与压降特性变化,而非真实条件下的温度分布,只与流体特性及传热表面几何形状有关,与热源分布无关。因此本研究

$L_4=40$ mm。在本研究中,凹坑中心区域长度 $L_5=14$ mm,大凹坑深度 R_1 、小凹坑深度 R_2 及凹坑倾角 α 为变量。

本文作为该新型反向凸起凹坑结构的初步研究,主要目标是证明其强化传热效果,并以 R_1 、 R_2 及 α 这3个主要变量为基础开展优化分析。但若对几何因素进行全参数系统分析,变量维度和计算工作量将显著增加。因此,本文所得结果为在当前三变量设计空间内的优化结果,虽非全局最优,但已具有显著的应用价值。

的模拟结果可靠,与真实工况的偏差在工程可接受范围内。

采用 SST $k-\omega$ 湍流模型。为简洁起见,这里不列出模型方程,详情可参见文献[19,20]。

1.3 数值方法与边界条件

本研究针对凹坑板通道的一个典型重复单元进行了周期性数值模拟。计算采用商业 CFD 软件 ANSYS Fluent 17.2 完成,控制方程采用有限体积法离散,速度与压力耦合采用 SIMPLE 算法,对流项采用二阶迎风格式离散。

边界条件规定如下:

1) 流动方向上采用周期性边界条件(即计算域的进口与出口互设为周期对应面),并通过在 Fluent 中指定质量流量 0.0055 kg/s 作为驱动力,对应雷诺数 $Re=10\,000$,其定义为:

$$Re = \frac{\rho q_m D_e}{\rho L_3 H_1 \mu} \quad (4)$$

$$D_e = \frac{4A_c}{P} = \frac{4L_1 H_1}{2(L_1 + H_1)} \quad (5)$$

式中: q_m 为质量流量, kg/s ; D_e 为当量直径,m; A_c 为流通截面积, m^2 ; P 为湿周,m。

由于采用了周期性边界条件,需给定上游体积平均温度参考值,本研究中设定为 293.15 K ,以满足

Fluent对热力学周期性计算的要求。

2) 计算域上下表面为无滑移壁面, 壁面温度设为 360 K。

3) 左右两侧设为对称边界。

本文采用空气为工质, 其物性参数如下: ρ 为 1.128 kg/m^3 , c_p 为 $1005 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, λ 为 $0.0276 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, μ 为 $1.91 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$, Pr 为 0.699。

1.4 网格独立性考核

采用非结构化网格对流场区域进行离散。针对 6 组不同网格数量进行了网格独立性考核, 以 h (对流传热系数) 和 f (达西摩擦因子) 作为判断指标。结果如图 2 所示, 当网格数从 431 万增至 568 万时, h 和 f 的变化分别仅为 0.94% 和 1.08%。因此, 当网格数达到约 568 万时, 可认为网格独立性已满足要求。

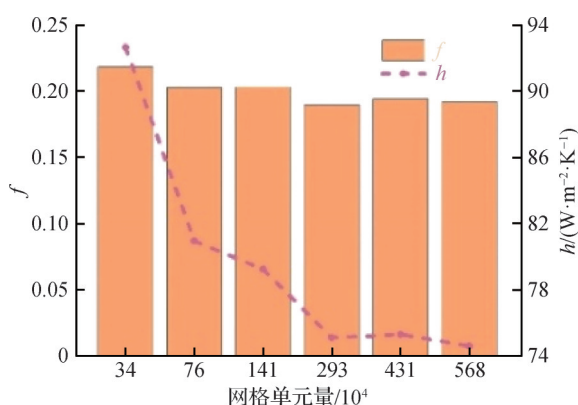


图2 网格独立性考核

Fig.2 Grid-independence assessment

1.5 数值模型验证

为验证本研究所用数值模型的准确性, 构建了一个与 M. Piper 等^[21] 实验相同的枕形板通道模型。采用与本文相同的湍流模型和计算设置, 对该模型进行数值模拟, 并将结果与其实验数据进行对比, 如图 3 所示。可以看出, Nu 和 Δp 与实验测量值的偏差分别在 4.6% 和 5.3% 以内, 这表明本文所采用的数值模型可靠, 可用于本研究。

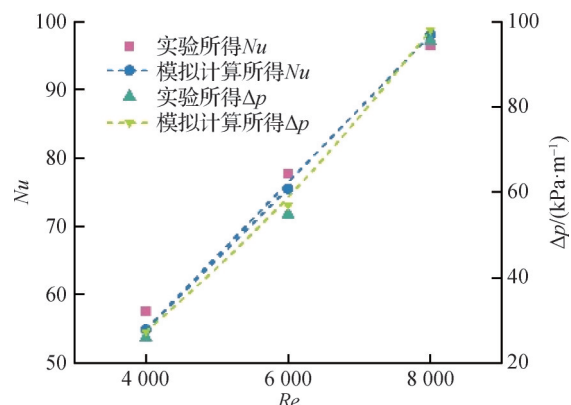
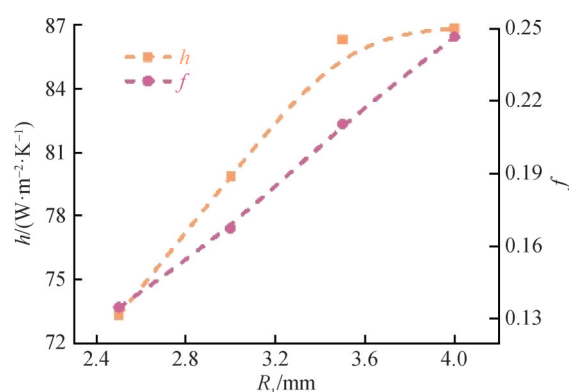
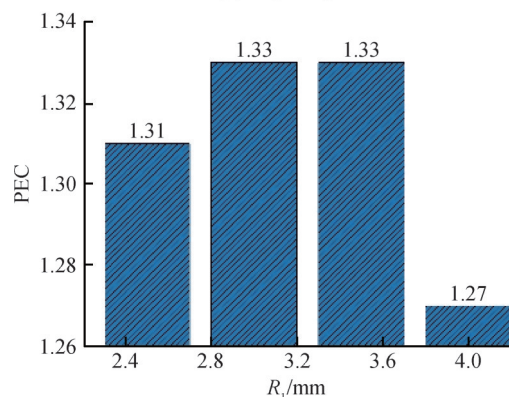


图3 数值模型验证

Fig.3 Validation of numerical model



(a) h 及 f 随 R_1 变化



(b) PEC 随 R_1 变化

图4 流动与传热特性随 R_1 的变化

Fig.4 Variation of fluid flow and heat transfer characteristics with R_1

2 结果与讨论

2.1 单变量分析

2.1.1 大凹坑深度 R_1 的影响

图 4 所示为凹坑板的流动与传热特性随凹坑深度 R_1 变化的 ($R_2=0.5 \text{ mm}$, $\alpha=50^\circ$)。可以看出, 当 R_1 较小时, h 和 f 随 R_1 的增加而迅速上升, 导致 PEC 显著提高; 但当 R_1 增大至一定程度后, h 的提高幅度有限, 其增幅远小于 f 的增幅, 故 PEC 曲线出现拐点并开始大幅下降。

为解释上述结果产生的原因, 图 5 所示为 4 种不同 R_1 下 $x=15 \text{ mm}$ 截面的湍动能 (turbulent kinetic energy, TKE) 云图、温度场与流线及涡量幅值分布。

由图 5(a) 可知, 当 R_1 从 2.5 mm 增至 4.0 mm 时, 高湍动能区由凹坑前缘和后缘的小范围区域逐渐扩展至凹坑后部及近壁区域, 说明凹坑加深强化了流动分离、再附着和二次流。该过程增强了主流与近壁区流体之间的掺混, 使局部热边界层变薄, 因此 h 随 R_1 的增加而提高。

图5(b)进一步表明,随 R_1 增加,凹坑后缘流线弯曲幅度增大,低温主流更容易进入凹坑区域,局部热边界层厚度减薄进而强化冷流体与壁面换热。但当 R_1 过大时,凹坑内部分区域温度显著低于主流,阻碍了换热的进一步增强,使 h 的上升变缓。同时过大的 R_1 会使通道阻力过强,压降上升速率超过传热收益,从而形成图4中的PEC拐点。

图5(c)中的涡量幅值也验证了上述判断。 R_1 从

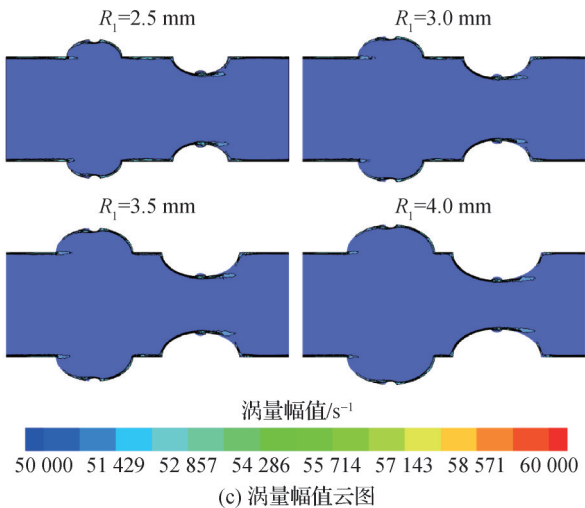
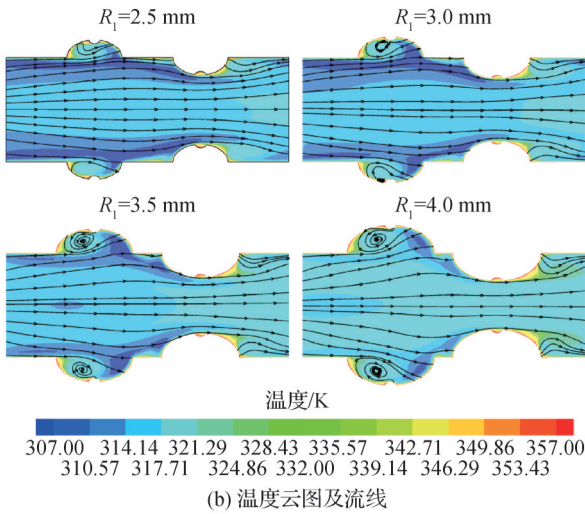
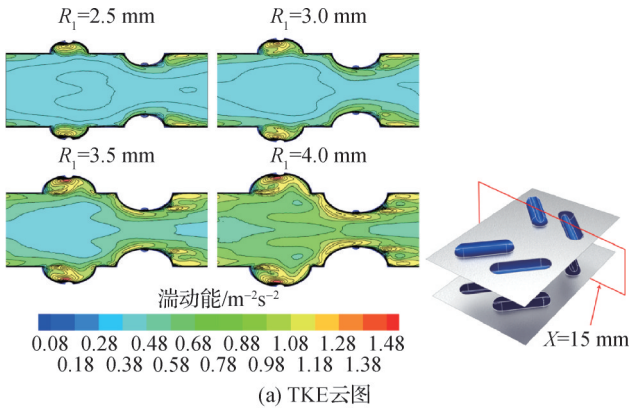


图5 不同 R_1 时 $x=15$ mm截面的云图

Fig.5 Contours at $x=15$ mm cross-section for different R_1

2.5 mm增至4.0 mm时,截面最大涡量幅值由50 826 s^{-1} 增至64 286 s^{-1} ,增幅约26.5%,表明局部剪切和旋涡强度明显增强。同时,更强的分离和回流会显著增加流动阻力,导致 f 增长快于 h ,因此PEC在较大 R_1 下出现下降。

2.1.2 小凹坑深度 R_2 的影响

图6所示为 R_2 在0.5~2.0 mm时 h 、 f 和PEC的变化,其中 $R_1=2.5$ mm, $\alpha=30^\circ$ 。可以看出,随着 R_2 增大, h 和 f 均迅速增大。但当 R_2 增至一定程度时, h 和PEC的变化趋势逐渐平缓。

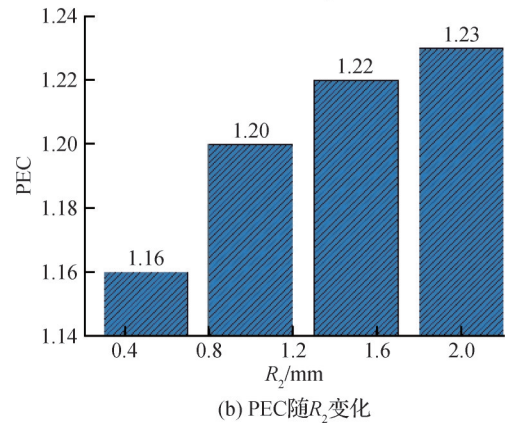
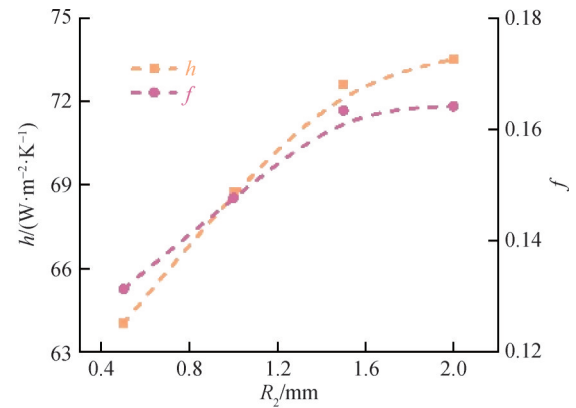


图6 流动与传热特性随 R_2 的变化

Fig.6 Variation of fluid flow and heat transfer characteristics with R_2

从速度云图来看(图7(a)), R_2 从0.5 mm增至2.0 mm时,对流场的影响呈现出先增强后趋于平缓的趋势。当 R_2 由0.5 mm增至1.0 mm时,在凹坑空腔凸起位置,低速区逐渐扩大,表明涡流强度增强;此外,周围的高速区明显扩展和强化,表明局部加速和边界层扰动更显著。然而,当 R_2 继续从1.5 mm增至2.0 mm时,这2个特征区域的流场变化趋于平缓,表明流体扰动强度的增长开始趋于饱和。这意味着在较大 R_2 下,继续增大 R_2 对边界层的影响减弱,故传热和阻力的增长变慢。

由温度云图 7(b)可知,随 R_2 增大,凹坑凸起附近的高温区被压缩至更薄的近壁层,说明热边界层显著变薄。但当 R_2 由 1.5 mm 继续增至 2.0 mm 时,温度场变化幅度减小,边界层扰动趋于饱和。

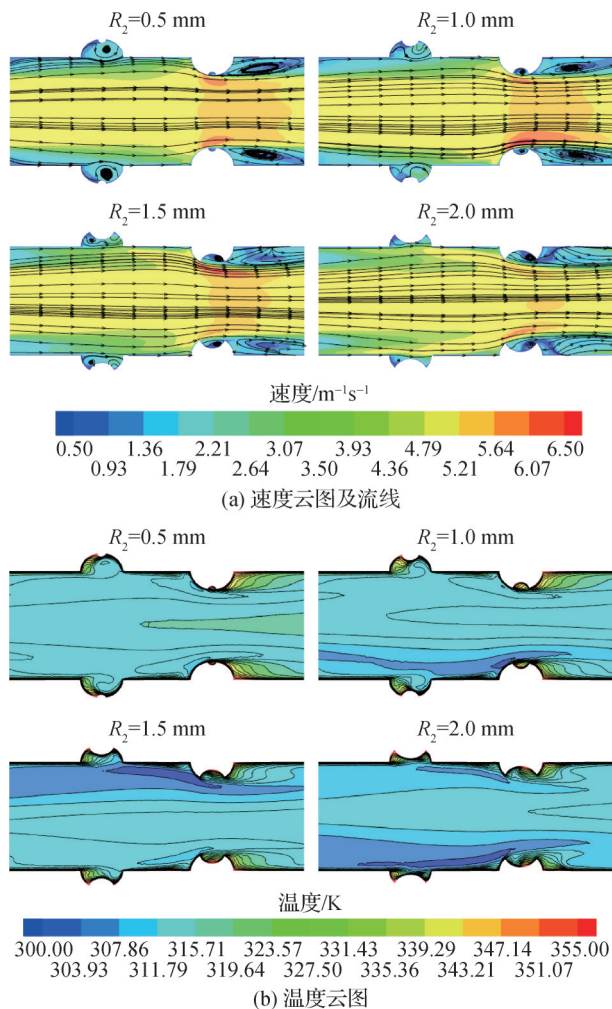


图 7 不同 R_2 时 $x=15$ mm 截面的速度、温度云图及流线
Fig.7 Velocity, temperature contours and streamlines at $x=15$ mm cross-section for different R_2

图 8 中的 h 分布与前述结论一致,较大 h 区域主要集中于迎风面和再附着区,并随 R_2 的增加而扩大。总体而言, R_2 增大可强化冲击和再附着换热,但过大的 R_2 会使传热收益渐缓,PEC 增幅减小。

2.1.3 凹坑倾角 α

图 9 所示为凹坑板整体传热性能随倾角 α 的变化 ($R_1=3$ mm, $R_2=1.5$ mm)。可以看出, h 和 f 均随 α 的增加先升高后降低。当 α 增大至一定程度时,曲线均出现拐点,对应 α 约为 40° 。

为进一步研究 α 变化对整体传热性能的影响,绘制了 4 种 α 下 $x=15$ mm 截面的 TKE 云图、温度场及流线分布和上表面 h 云图,如图 10 和图 11 所示。

由图 10(a)和 10(b)可知,当 α 由 30° 增至 40° 时,

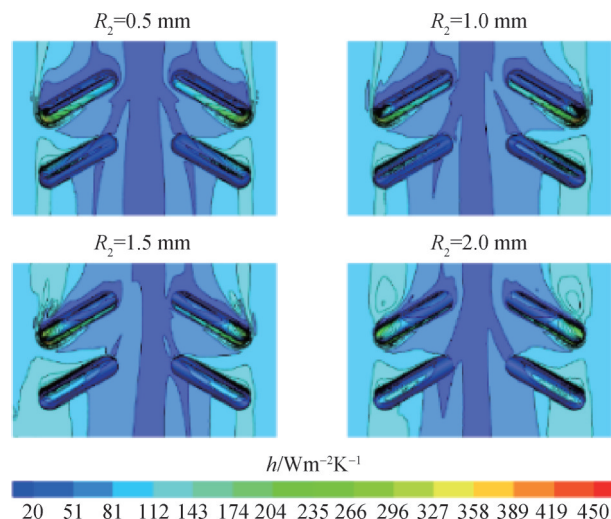
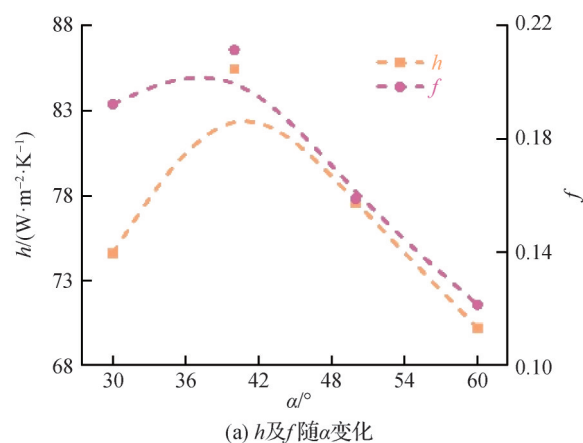
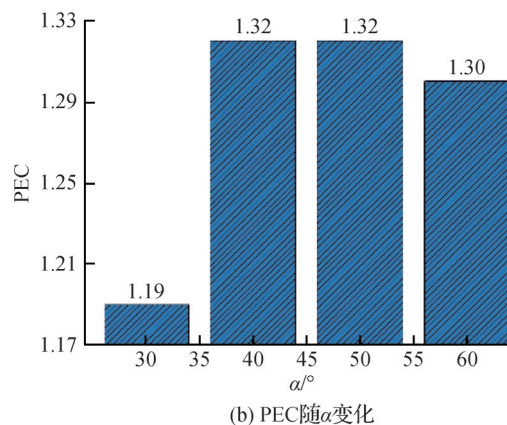


图 8 不同 R_2 时 h 分布云图

Fig.8 Contours of h for different R_2



(a) h 及 f 随 α 变化



(b) PEC 随 α 变化

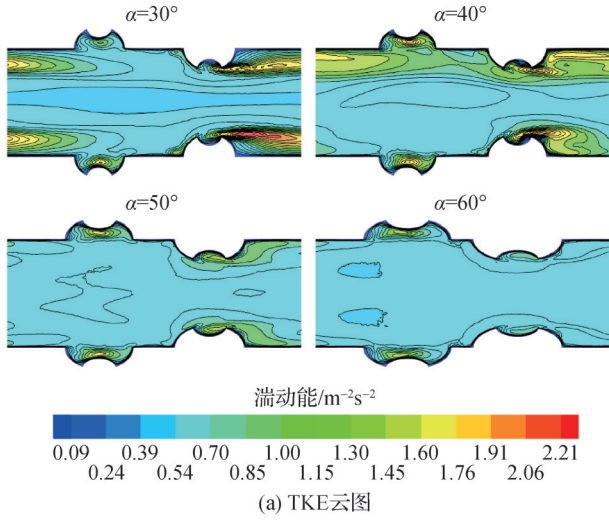
图 9 流动与传热特性随 α 的变化

Fig.9 Variation of fluid flow and heat transfer characteristics with α

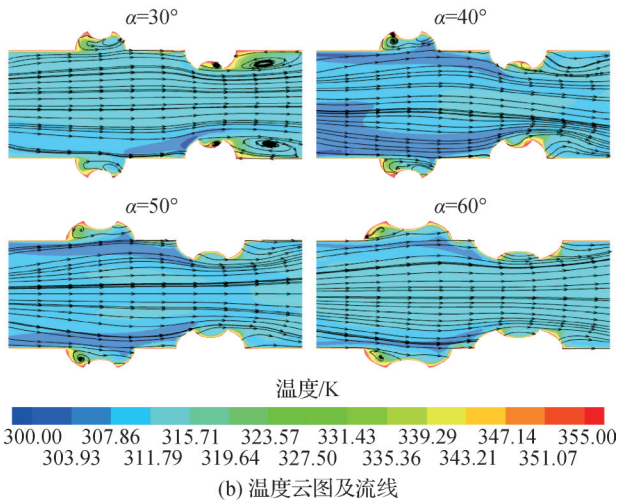
凹坑诱导的旋涡掺混增强,低温主流更充分地 与壁面换热,热边界层明显减薄;对应地,图 11 中凹坑后部及再附着区的局部 h 显著增大。因此,在该阶段 h 和 f 同时上升,传热增益较显著。

当 α 继续增大,凹坑长轴方向与主流方向更接

近,流线趋于平直,横向流动与流体混合强度减弱,导致高TKE区域和高 h 区域缩小。因此,虽然流动阻力有所减弱,使 f 下降,但PEC整体呈降低趋势。



(a) TKE云图



(b) 温度云图及流线

图10 不同 α 时 $x=15$ mm截面的TKE、温度云图及流线
Fig.10 TKE, temperature contours and streamlines at $x=15$ mm cross-section for different α

2.2 代理模型构建

根据2.1节的分析,参数 R_1 、 R_2 、 α 均对流动传热特性影响显著。因此,本文选择这3个参数作为决策变量,取值范围如表1所示。共设计了64组工况作为样本数据。该64组样本由 $4 \times 4 \times 4$ 全因子组合组成,覆盖了设计空间的边界点和内部点。

根据设计工况获得的数据,对XGBoost模型进行训练和验证。虽然样本规模相对有限,但图12和表2表明2个代理模型在已有CFD样本上的最大偏差分别仅为0.44%和3.31%, R^2 均大于0.99,说明该模型能够较好刻画当前三变量设计空间内 Nu 和 Δp 的响应关系。

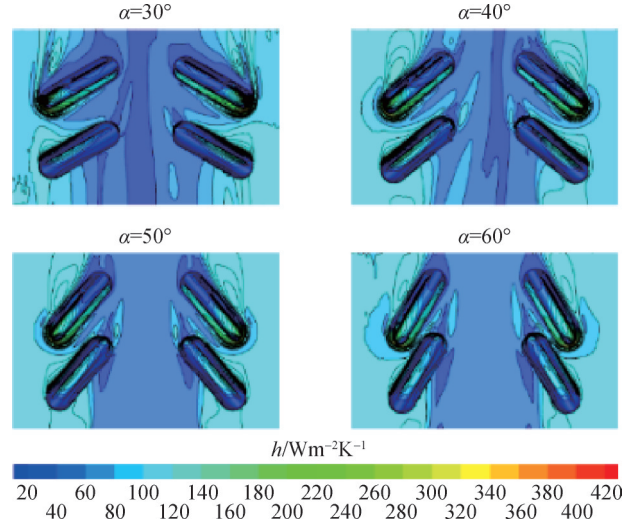


图11 不同 α 时 h 分布云图

Fig.11 Contours of h for different α

表1 决策变量取值

Tab.1 Decision variable values

决策变量	取值
R_1/mm	2.5、3.0、3.5、4.0
R_2/mm	0.5、1.0、1.5、2.0
$\alpha/^\circ$	30、40、50、60

2.3 帕累托前沿

利用训练好的2个XGBoost代理模型分别预测 Nu 和 Δp 作为目标函数,凹坑深度 R_1 、 R_2 及倾角 α 为待优化变量。可将优化问题表述为:

$$\max \text{XGBoost}(Nu) \quad (6)$$

$$\min \text{XGBoost}(\Delta p) \quad (7)$$

$$\text{s.t.}: 30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ \quad (8)$$

$$2.5 \leq R_1 \leq 4.0 \quad (9)$$

$$0.5 \leq R_2 \leq 2.0 \quad (10)$$

利用NSGA-II多目标遗传算法进行优化,经过40代迭代后,共得到14组非劣解。图13所示为由这14组非劣解组成的帕累托前沿。

为进一步评估所得帕累托前沿的收敛性、稳定性与初始种群敏感性,计算了每一代非支配解集的归一化超体积(hypervolume, HV)指标并采用不同随机种子进行了5次独立的NSGA-II优化。结果如图14与表3所示。

HV值在优化初期快速上升,表明帕累托解集的质量持续提升。在约第16代之后,HV曲线趋于稳定。因此,经过40代进化得到的最终帕累托前沿具有足够的稳定性和代表性,可用于后续的性能比较与决策分析。

此外,5次独立运行得到的最终归一化HV位于

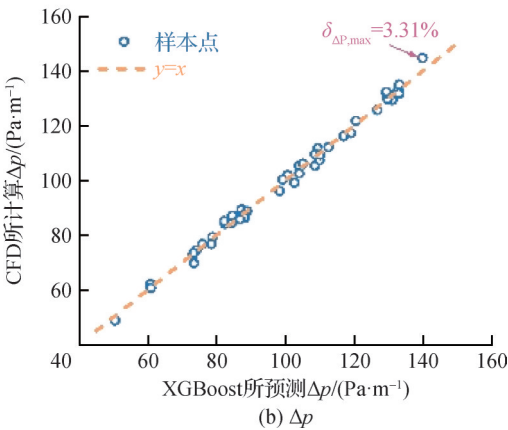
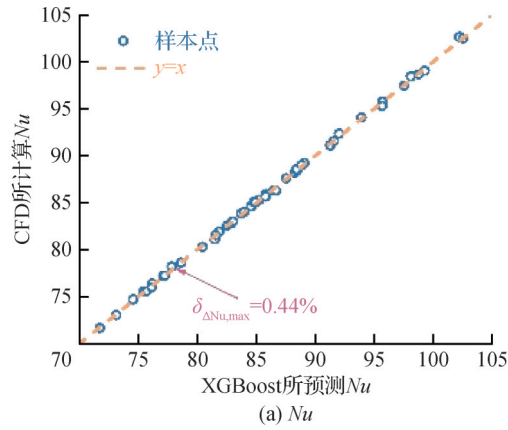


图 12 CFD 仿真结果与两个 XGBoost 模型预测的对比
Fig.12 Comparison of CFD simulation results with two XGBoost models predictions

表 2 两个 XGBoost 模型的 R^2 和 RMSE

Tab.2 R^2 and RMSE of two XGBoost models

参数	R^2	RMSE
Nu	0.999 6	2.94
Δp	0.998 2	6.42

注: RMSE 为均方根误差 (root mean square error); R^2 为决定系数 (coefficient of determina)。

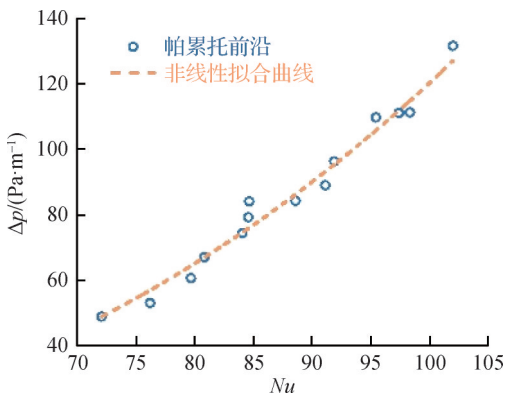


图 13 帕累托最优解集
Fig.13 Pareto optimal solutions

0.51~0.53 之间, 平均值为 0.524, 标准差为 0.008 9。这表明优化结果受初始种群影响较小, 所构建的

NSGA-II 优化框架具有较好的鲁棒性和可重复性。

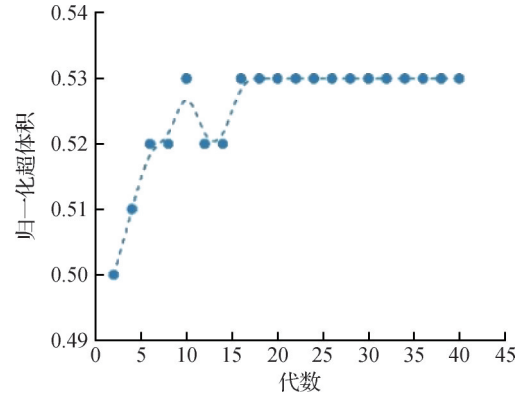


图 14 归一化超体积
Fig.14 Normalized hypervolume

表 3 不同初始种群下 NSGA-II 优化结果的敏感性分析

Tab.3 Sensitivity analysis of NSGA-II optimization results to different initial populations

随机种子	最终 HV	标准差
1	0.52	0.008 9
2	0.53	
3	0.51	
4	0.53	
5	0.53	

2.4 最优折中解的选择与分析

本文采用基于熵权法的 TOPSIS 算法对帕累托前沿上的所有解进行评价打分, 选取得分最高的解作为最优折中方案, 得到的最优结构参数如表 4 所示。

表 4 结构参数

Tab.4 Structural parameters

决策变量	取值
R_1/mm	2.8
R_2/mm	0.6
$\alpha/(\circ)$	47

为进一步验证该最优折中解的可靠性, 本文根据其结构参数建立了相应的物理模型, 并对其进行数值模拟。图 15 所示为优化结构在 $Re=4\ 000\sim 13\ 000$ 的 Nu 及相对于光滑平板综合性能 (基于等泵功的 PEC) 随 Re 的变化。该 Re 区间包含了电池热管理^[22,23]、数据中心空气冷却器^[24,25] 的主要工况 Re 范围, 具有明确的工程参考价值。结果表明, 优化结构在整个 Re 范围内均具有优异的综合流动传热性能, PEC 均约为 1.55。

图 16(温度云图及流线)表明, 优化结构在凹坑

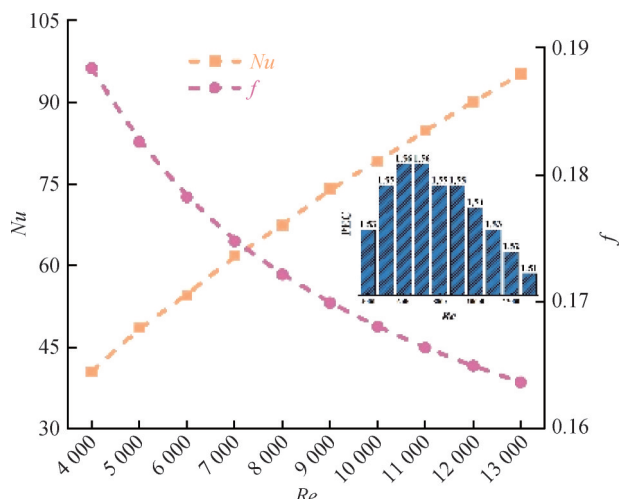


图 15 优化结构的综合性能

Fig.15 Overall performance of the optimized structure

前缘形成局部加速,在后缘形成稳定再附着和漩涡,低温主流被带入近壁面高温区,使壁面热边界层在凹坑迎风面及下游再附着区持续变薄。与单纯增大 R_1 或 R_2 不同, TOPSIS 选出的 $R_1=2.8\text{ mm}$ 、 $R_2=0.6\text{ mm}$ 和 $\alpha=47^\circ$ 避免了过大的回流滞留区和过强流动阻塞,在保持局部剪切与二次流强度的同时抑制压降增长,因此能够获得较稳定的高 PEC。

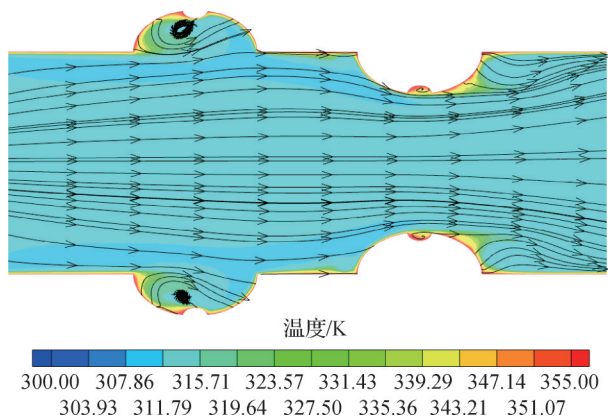


图 16 优化结构的温度云图及流线

Fig.16 Temperature contours and streamlines of the optimized structure

3 工程实现与实验验证方案

本文提出的反向凸起凹坑板可采用液压胀形、冲压成形或辊压成形等薄板加工工艺制备,结构形式与枕形板及凹凸强化板具有相似性,具备批量制造的基础。在电池模组中,该结构可作为相邻电芯间的空气导流隔板或通道壁面;在芯片/数据中心风冷场景中,可集成于风冷冷板内壁或板式换热芯体表面,以较小附加空间获得强化传热效果。

拟搭建如图 17 所示的测试系统。采用热电偶测

量进出口空气温度和壁面温度,采用差压传感器测量通道压降,并据此计算 Nu 、 f 和 PEC 。将实验结果与本文模拟结果进行对比验证,以验证该结构的实际性能。

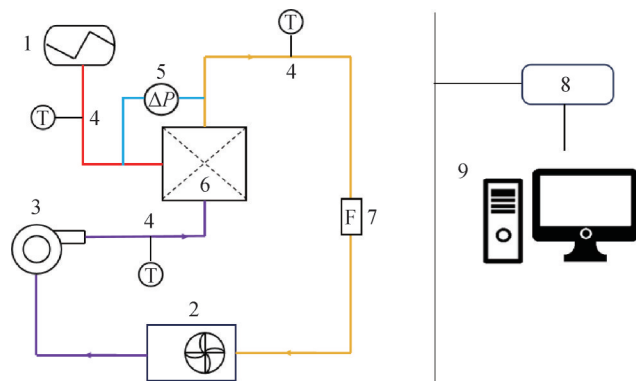


图 17 实验系统初步设计

Fig.17 Preliminary design of the experimental system

4 结论

本文提出具有反向凸起凹坑的平板通道强化空气换热新结构,分别研究大小凹坑深度 R_1 、 R_2 和凹坑倾斜角度 α 对流动传热性能的影响,并用 XGBoost 算法构建 2 个分别用于预测 Nu 和 Δp 的代理模型。随后,以 R_1 、 R_2 和 α 为优化变量, Nu 和 Δp 为目标函数,通过多目标遗传算法 NSGA-II 得到一组帕累托最优解。采用基于熵权法的 TOPSIS 算法选择最优折中方案。最后,基于得分最高的参数组合构建物理模型并进行数值仿真验证。得到如下结论:

1) 大小凹坑深度 R_1 、 R_2 和凹坑倾角 α 对流动传热特性均有显著影响。 h 和 f 均与 R_1 呈正相关,然而,当 R_1 增大至一定程度后, h 的提高幅度变得有限,其增幅远小于 f 的增幅,导致 PEC 曲线出现拐点。随着 R_2 的增加, h 和 f 快速增大,但当 R_2 增至一定值后继续增加, h 和 PEC 的增长趋势逐渐趋缓,因此 R_2 应取适中值。此外, h 和 f 随 α 的增加先升后降,在 $\alpha \approx 40^\circ$ 附近出现拐点。

2) 单变量分析表明,不同参数对整体传热性能的影响不同,需综合考虑多参数组合以获得最佳综合性能。因此,有必要采用多目标优化方法对 R_1 、 R_2 和 α 进行组合优化,以在强化传热的同时尽量降低流动阻力,实现性能的帕累托最优。

3) 优化后的结构相对于光滑平板,在所研究的 Re 范围内 PEC 约为 1.55。这表明凹坑板的流动传热特性得到显著改善。

本文受能源陕西实验室科技项目 (ESLB202408) 资助。

(The project was supported by the Science and Technology Project of Energy Shaanxi Laboratory (No. ESLB202408).)

参考文献

- [1] Tuğan V, Yardımcı U. Numerical study for battery thermal management system improvement with air channel in electric vehicles[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108515.
- [2] Alazwari M A, Abu-Hamdeh N H, Khoshaim A, et al. Effects of examine the phase change material through applying the solar collectors: exergy analysis of an air handling unit equipped with the heat recovery unit [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 41: 103002.
- [3] Alazwari M A, Abu-Hamdeh N H, Khoshaim A, et al. Using phase change material as an energy-efficient technique to reduce energy demand in air handling unit integrated with absorption chiller and recovery unit-Applicable for high solar-irradiance regions[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 42: 103080.
- [4] Dheenamma M, Soman D P, Muthamizhi K, et al. In pursuit of the best artificial neural network configuration for the prediction of output parameters of corrugated plate heat exchanger[J]. Fuel, 2019, 239: 461–470.
- [5] Gad R, Mahmoud H, Ookawara S, et al. Evaluation of thermal management of photovoltaic solar cell *via* hybrid cooling system of phase change material inclusion hybrid nanoparticles coupled with flat heat pipe [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 57: 106185.
- [6] Xie Shuai, Liang Zheng, Zhang Liang, et al. Numerical investigation on heat transfer performance and flow characteristics in enhanced tube with dimples and protrusions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 122: 602–613.
- [7] Rashidi S, Hormozi F, Sundén B, et al. Energy saving in thermal energy systems using dimpled surface technology – A review on mechanisms and applications [J]. Applied Energy, 2019, 250: 1491–1547.
- [8] Gürdal M, Pazarlıoğlu H K, Tekir M, et al. Numerical investigation on turbulent flow and heat transfer characteristics of Ferro-nanofluid flowing in dimpled tube under magnetic field effect [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 200: 117655.
- [9] Meng Xianlong, Li Xinyuan, Kong Dehai, et al. Enhanced heat transfer characteristics using dimples in the receiving end of laser wireless power transmission system [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 252: 123619.
- [10] Liao Wenling, Shi Xianfeng. Thermal-hydraulic performance of heat transfer tubes with different combinations of dimples and protrusions [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 76: 107438.
- [11] Deeb R. Impact of dimple geometry modifications on flow separation, reattachment, and heat transfer over a dimpled plate [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 280: 128081.
- [12] Al-Haidari S R, Al-Obaidi A R, Saleh Z M, et al. Enhancement of thermohydraulic performance in 3D pipe based on different concavity dimpled surfaces: numerical and experimental investigation [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 75: 107153.
- [13] Mehrjardi S A A, Mazaheri K, Khademi A. Integrated optimization and advanced thermal assesment of nanofluid-assisted and dimple-enhanced shell-and-tube heat exchangers[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2026, 69: 104429.
- [14] Dağdeviren A, Gürsoy E, Gürdal M, et al. Turbulent thermal-magneto convection in a teardrop-shaped dimpled tube: an experimental and numerical study [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2026, 220: 110403.
- [15] Mashayekh K, Etminan A, Pope K, et al. Turbulent flow and heat transfer enhancement for straight circular and twisted oval tubes with different dimple shapes [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2026, 220: 110411.
- [16] Ge Ya, Wang Shicheng, Liu Zhichun, et al. Optimal shape design of a minichannel heat sink applying multi-objective optimization algorithm and three-dimensional numerical method [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 148: 120–128.
- [17] Abbasi A, Firouzi B, Sendur P. On the application of Harris Hawks optimization (HHO) algorithm to the design of microchannel heat sinks [J]. Engineering with Computers, 2021, 37(2): 1409–1428.
- [18] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001. (Tao Wenquan. Numerical heat transfer[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.)
- [19] Menter F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598–1605.
- [20] Menter F, Kuntz M, Langtry R B. Ten years of industrial experience with the sst turbulence model [C]//Turbulence, Heat and Mass Transfer 4. Antalya, Turkey: Begell House, Inc., 2003:625–632.
- [21] Piper M, Zibart A, Tran J M, et al. Numerical investigation of turbulent forced convection heat transfer in pillow plates [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 94: 516–527.
- [22] Wang Zexu, Zou Ziwen, Zhou Yuxin, et al. Performance

comparison of battery cold plates designed using topology optimization across laminar and turbulent flow regime [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 238: 126450.

- [23] Hu Yi. Numerical investigation of the battery thermal management system using a bionic sapling - Shaped channel liquid-Cooled plate[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2026, 171: 110101.
- [24] Hamed H, Setayeshfar B, Sadat M, et al. Experimental and numerical analysis of the thermo-hydraulic performance of a cross-flow air-to-gas capsule-type plate heat exchanger [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121900.
- [25] Tong Zheming, Yang Qi, Tong Shuguang, et al. Two-stage thermal-hydraulic optimization for Pillow Plate Heat Exchanger with recirculation zone parameterization [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 215: 119033.

通信作者简介

陶文铨,男,教授,西安交通大学能源与动力工程学院,Tel: 029-82669106,E-mail: wqtao@mail.xjtu.edu.cn。研究方向:氢燃料电池的性能提升技术;数据中心的节能与低碳技术(含高热流密度芯片的冷却技术);熔融盐储能及固液相变储能技术;AI在CFD/NHT中的应用。

About the corresponding author

Tao Wenquan, male, professor, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Tel: 029-82669106, E-mail: wqtao@mail.xjtu.edu.cn. Research fields: Performance enhancement technologies for hydrogen fuel cells; Energy saving and low-carbon technologies for data centers (including cooling technologies for high heat flux density chips); Molten salt energy storage and solid-liquid phase change energy storage technologies; Application of AI in CFD/NHT.