

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-15

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260331001

微通道换热器温度均匀性优化研究进展

王艳桐^{1,2} 徐象国¹ 黎念^{1,2}

(1 浙江大学制冷与低温研究所 杭州 310027; 2 浙江大学宁波国际科创中心 宁波 315100)

摘要 微通道换热器(microchannel heat sink, MCHS)凭借高传热系数(heat transfer coefficient, HTC)与紧凑结构,在电池热管理(battery thermal management system, BTMS)中具有广阔应用前景。针对动力电池对温度均匀性的严格要求,本文综述了单相液冷和两相液冷微通道换热器在均温优化方面的研究进展,分析了温度不均的形成机理、结构优化方法及制造可行性。结果表明,单相液冷微通道的温度不均由并联通道流量分配不均和冷却液沿程升温引起,优化进出口布置、改进歧管结构、采用仿生/拓扑流道以及设置变密度扰流结构可有效改善温度分布。两相液冷微通道的温度均匀性则受流量分配、气泡行为共同影响,需通过表面改性和特殊结构调控气液相分布。对比分析发现,单相流优化重点在于改善液相流动分配和强化下游换热,而两相流优化关键在于调控气泡行为。此外,复杂微通道结构的工程应用仍受制造成本、加工精度和长期可靠性限制。研究结果可为MCHS在BTMS中的均温结构设计与工程应用提供参考。

关键词 微通道;温度均匀性;结构优化;单相流;两相流

中图分类号: TB61¹;TB657. 5

文献标识码: A

Research Progress on Optimizing Temperature Uniformity in Microchannel Heat Exchangers

Wang Yantong^{1,2} Xu Xiangguo¹ Li Nian^{1,2}

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Ningbo International Science and Innovation Center, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

Abstract Microchannel heat sinks (MCHS) offer broad application prospects in battery thermal management systems (BTMS) due to their high heat-transfer coefficient (HTC) and compact structures. In response to the stringent requirements for temperature uniformity in power batteries, this study reviews the recent research progress in optimizing temperature uniformity across single-phase and two-phase liquid-cooled microchannel heat exchangers, analyzing the mechanisms of temperature non-uniformity, structural optimization methods, and manufacturing feasibility. The results indicate that the temperature non-uniformity in single-phase liquid-cooled microchannels is caused by the uneven flow distribution among the parallel channels and the gradual heating of the coolant along the flow path. Optimization measures, such as improving inlet and outlet arrangements, enhancing manifold structures, employing biomimetic or topological flow paths, and implementing variable-density disturbance structures, can effectively improve the temperature distribution. For two-phase liquid-cooled microchannels, temperature uniformity is influenced by the flow distribution and bubble behavior, requiring surface modification and special structures to regulate the gas-liquid phase distribution. Comparative analysis reveals that the optimization of single-phase flow focuses on improving the liquid flow distribution and enhancing the downstream heat transfer, whereas the key to two-phase flow optimization lies in controlling the bubble behavior. Moreover, the engineering applications of complex microchannel structures are limited by manufacturing costs, processing precision, and long-term reliability. These findings offer practical guidance for designing temperature-uniform structures in MCHS for BTMS.

Keywords microchannel; temperature uniformity; structural optimization; single-phase flow; two-phase flow

随着能源危机和环境污染加剧,电动汽车因零排放和节能优势受到广泛关注。作为电动汽车的能

量来源,动力电池的性能直接影响整车表现。在充放电过程中,电池内部反应会释放大量热量,若不及

收稿日期:2026-03-31;修回日期:2026-05-29;录用日期:2026-06-04

责任编辑:王亚薇



移动阅读

时散出,可能导致温度升高甚至发生热失控。研究显示,电池工作温度应控制在 $20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1-2],电池模块间温差应控制在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内^[3]。因此,除控制整体温度范围外,保证温度均匀性也是电池热管理中的关键问题。随着高功率密度和快速充电需求的增加,电池产热速率显著提高,进一步加大了温差控制难度。因此,开发高效且均温的BTMS十分重要。

自D. B. Tuckerman等^[4]于1981年提出MCHS以来,其凭借高传热性能和大比表面积,成为高热流密度散热研究热点,并广泛应用于BTMS。根据冷却剂在冷板内是否发生相变,MCHS可分为单相液冷和两相液冷微通道。随着冷板面积增大,冷却剂在流动过程中易引发温度分布不均。Wei Liting等^[5]研究表明,在圆柱形锂离子电池热管理中,柔性微通道液冷板冷却的四排电池温差可超过 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,其主要原因是单相冷却液沿程升温导致上下游换热能力差异,同时流量分配不均也会加剧温差。相比之下,两相冷却利用相变潜热能显著减小温差,同时具备更强的换热能力,但流型演变、气泡行为及流动不稳定性等因素也使温度控制更为复杂。研究表明,两相液冷板的温度均匀性受质量流量和蒸发压力等参数影响显著^[6]。

目前,微通道领域的综述多聚焦于强化传热方向,围绕结构设计、主被动强化方法或特定结构形式进行讨论。赵颀等^[7]简要回顾了单相液冷微通道在结构设计方面的研究进展,并进行了成本分析。刘雨薇等^[8]综述了单组分与混合纳米流体的强化传热特性及传热增强结构对微通道流动沸腾机制的影响。周雄等^[9]回顾了基于多孔结构的微通道散热技术的发展。然而,针对温度均匀性的机理分析和冷板结构优化的系统综述仍较少,且缺乏对单相液冷与两相液冷微通道均温性优化策略的综合性探讨。因此,本文旨在系统梳理单相液冷与两相液冷微通道在提升温度均匀性方面的冷板设计研究进展,分析了温度不均的形成机理、结构优化方法,并探讨了典型结构的制造工艺和运行可靠性,以期为BTMS中微通道均温设计提供理论依据和结构参考。

1 单相液冷微通道换热器优化策略

1.1 机理分析

单相液冷微通道主要存在2类温度不均问题:1)工质质量分布不均匀,这是实际应用中最常见的问题,广泛存在于并联微通道中,尤其是电池冷板等大面积换热器中。与流量均匀分布相比,流量分配不均可使换热器性能下降 30% ^[10];2)沿程换热能力

下降,冷却液在流动过程中持续升温,导致壁面与工质之间的温差沿程减小,下游换热能力减弱。

因此改进重点在调节流量分配与均匀上下游传热。在目前的研究中,通过优化出入口位置和调控入口歧管流场,可以打破入口循环区域并促进均匀的流量分布。仿生/拓扑结构通道数量和总传热面积增加,从而降低了热阻和压降,并实现了更均匀的温度分布。通过改变凹槽、斜通道、针肋等结构的密度,可以改变流体流动和热传递过程,从而减轻沿程的温度梯度。

为精准评估改进措施的有效性,一般借助参数进行定量分析,常见性能参数有摩擦系数、泵送功率、努塞尔数、热阻和热效率等。常见温度不均的量化参数如表1所示。C. Pistoresi等^[11]提出了相对流量偏差 σ_k 和分布不均因子 MF ,分别表征单个流道 k 中的流量相对平均值的偏差及各通道流速偏差的标准差。P. Dąbrowski等^[12]为消除参数依赖性与量纲影响,提出了归一化分布系数 Φ ,适用于速度、压降及温度等多种参数。考虑到提升均匀性的改进常伴随压降增加,Hou Qingdong等^[13]引入整体性能评估因子(performance evaluation criteria, PEC),全面考虑了压降、传热性能和温度均匀性等参数,评估换热器的整体性能。Ma Liangkun等^[14]进一步提出非均匀通道性能评价指标(performance evaluation criterion for non-uniform channels, PECNC),以完善评估体系。

1.2 分流均匀性

入口处的不利流场分布(如循环流)会导致平行通道中的流量分布不均。改变进出口布局、修改入口歧管形状或添加扰动可以调节入口处流场,是改善流量均匀性的重要途径。

R. Chein等^[15]研究了多种水平和垂直出入口配置对流量分配的影响。发现水平进液入口歧管拐角处存在流动再循环,通道间的流动均匀性较差,而垂直进液的流动冲击可显著提高流动均匀性。Lu Mingchang等^[16]通过数值模拟分析了5种不同进出口类型(I型、Z型、J型、L型和Γ型)(图1(a))的流动分布,水平出入口中,J型几乎没有流动再循环,表现出最均匀的流动分布。垂直出入口的I型和Γ型由于其碰撞结构,传热性能最好,但冲击结构会增加压降。J. C. K. Tong等^[17]为了探寻普适性最优策略。通过数值模拟评估了几何参数(歧管高度与通道宽度之比、歧管的锥形形状和入口歧管的横截面积)对流动分布的影响。发现更大的歧管高度和更大的入口歧管横截面积能实现更好的流量分布。V. Manoj Siva等^[18]发现随着流道水力直径减小,流量分布显著改

表1 单相液冷微通道温度不均量化方法

Tab.1 Methods for quantifying temperature nonuniformity in single-phase liquid-cooled microchannels

评价类型	具体表现	量化参数	数学表达
不均指标	平行通道间流量分配差异, 导致换热能力不均	相对流量偏差 σ_k	$\sigma_k = \frac{q_k - \bar{q}}{\bar{q}}$
		分布不均因子 MF	$MF = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \left(\frac{q_k - \bar{q}}{\bar{q}} \right)^2}$
		归一化分布系数 Φ	$\Phi = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - F_{n,i})^2} \times 100\%$
			$F_{n,i} = \frac{F_i}{F_{avg}}$
综合指标	综合压降、传热性能和温度均匀性	整体性能评估因子 PEC	$PEC = \frac{Nu/Nu_0}{(ff_0)^{1/3}}$
		非均匀通道性能评估标准 PECNC	$PECNC = \lambda \frac{Nu/Nu_0}{(ff_0)^{1/3}} + (1 - \lambda)e^{-\frac{S_{T_e}}{S_{T_{e0}}}}$

注: q_k 为第 k 个微通道的流量, m^3/s ; $\bar{q}$ 为微通道的平均流量, m^3/s ; N 为微通道数量; $F_{n,i}$ 为第 i 个通道中的归一化水力参数(归一化速度、通道的归一化压降、通道的归一化温降(温升)); F_i 为第 i 个通道中的参数(流速、压降、温度); F_{avg} 为所有通道平均受试参数; Nu 为努塞尔数; f 为摩擦因数; 下标 0 代表基准(使用传统流型模型为对比基准); λ 为权重因子; $(1 - \lambda)e^{-\frac{S_{T_e}}{S_{T_{e0}}}}$ 用于评估温度均匀性。

善,但会增加压降。在入口歧管修改方面,C. Anbumeenakshi 等^[19]发现梯形和三角形歧管在低流量时分配更均匀,而矩形歧管在高流量时分配不均程度更低。Liu Xiaoqin 等^[20]通过数值模拟研究了通道入口非均匀微型挡板(图 1(b))的效果。通道内流动均匀性提升,整体热阻显著降低。然而该结构实际制造困难且压降高,实用性较低。Hou Qingdong 等^[13]则提出在入口歧管内加装螺旋挡板(图 1(c))。螺旋挡板可产生离心力,引导流体进入前端通道,同时削弱惯性效应,避免过多流体涌向后端,其流动不均匀度降低了 22.57%,压降略有增加。J. Y. Song 等^[21]通过在入口歧管中布置针肋阵列来改善平行微通道中的流动均匀性(图 1(d)),合理的针肋布置抑制了歧管中的横向流、循环流和回流区,使流动更均匀,该方法对压降影响极小。因此,通过重构歧管结构或引入局部扰流元件,可有效调控入口流场并改善流量分配。且由于歧管压降在总压降中占比较小,此类方法通常不会显著增加系统压降。

在平行微通道的基础上,G. M. Harpole 等^[22]首次提出了歧管微通道换热器(manifold microchannel heat sink, MMCHS),MMCHS 由歧管层和微通道层组成,如图 1(e)所示。该结构通过分布式歧管网络将流动分割成多个较短的路径,显著减少了流动长度和相关的摩擦损失,同时保持了较高的热性能。非常适用于高功率电子器件^[23-24]。然而,进口流体的冲击导致了微通道的流量分配失衡^[25-26]。Tang Wei

等^[25]研究表明,流速增大时,超过 85% 的流体分布在出口附近的 4 个微通道(总共 10 个)。

Lin Yuhao 等^[27]对不同歧管微通道换热器(Z 型、C 型、U 型和 H 型)(图 1(f))进行了数值分析。发现歧管层的类型显著影响流动分布和温度均匀性。U 型歧管温度分布均匀性最好,Luo Yang 等^[28]认为 H 型和 U 型歧管安全性高、温度均匀性好且压降低。Pu Xiaojun 等^[29]创新性地在流道和微通道之间引入挡板,发现流动分布得以改善,并尝试采用发散/收敛歧管,其平均热阻比均匀结果下降 31.52%,但会导致不同程度的压降增加和 COP 降低。Chen Chaowei 等^[30]改变了歧管形状(图 1(g)),发现椭圆形歧管能使更多流体进入前方的微通道,温度均匀性最好。但抛物线型歧管综合性能最佳。综上,MMCHS 通过歧管层与微通道层的协同设计,在强化传热和降低压降方面优势显著,但在流量均匀分配方面仍面临挑战,其性能提升高度依赖于歧管构型与形状的优化设计。

1.3 仿生/拓扑设计

现有优化结构在一定程度上提升了换热性能,但其固有限制可能导致冷板的性能提高效果有限。鉴于自然界液体传输结构通常具备均匀分布和低流动阻力的特点,研究人员受此启发,运用仿生学和分形理论设计了新型换热器,如树状、叶脉状、蜂窝状和分形结构。这类结构具有显著优势,如大比表面积、均匀的传输路径和低运输阻力。可以降低压降

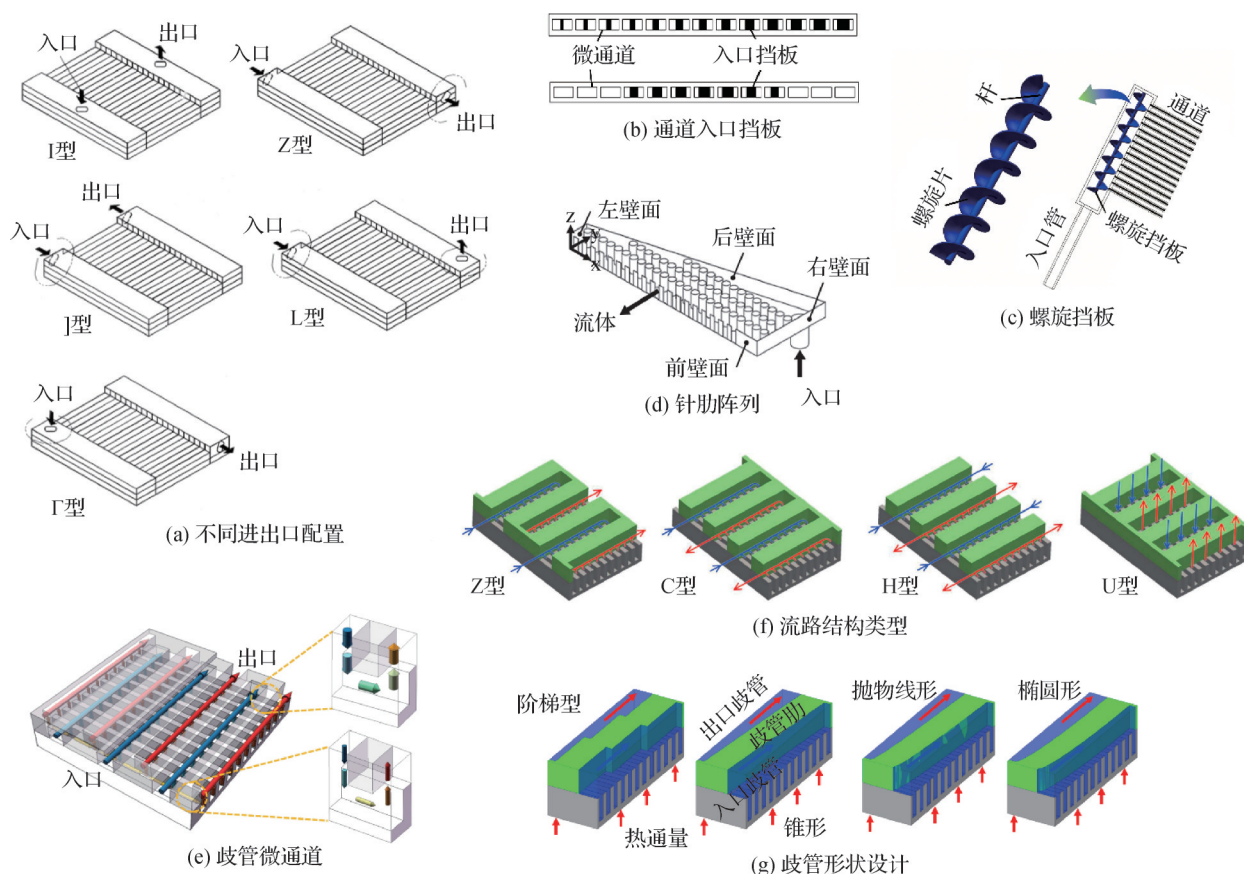


图1 分流均匀性改进结构

Fig.1 Improvement scheme for inlet diversion structure

并实现更均匀的温度分布。

E. M. Dede 等^[31]通过实验研究和数值验证发现,与传统平行通道相比,树状分形通道具有更小的热阻和更小的压降,温度分布更均匀。Ma Chuangbei 等^[32]对树状分形结构进行优化,采用Y形分形作为主结构,引入叶脉状、侧肋等次级结构(图2(a)),多出口设计降低了46%的压降,提高了温度均匀性,验证了多级分形结构对性能的优化作用。为研究树状分形换热器关键参数对性能的影响,He Ziqiang 等^[33]应用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)仿真和灰色关系分析方法,发现各参数对综合性能的影响显著性从大到小依次为:热通量>分形数>流速>分支水平,为树状分形换热器的参数设计与性能调控提供了量化依据。以上树状分形结构因其发散特性,尤其适用于圆形换热器,而叶脉分形结构则更适合矩形换热器。Liu Feifei 等^[34]设计了一种叶脉仿生液冷板(图2(b))通过正交实验发现影响冷却性能的主要因素是质量流量和通道宽度,通道角度和通道数量则是次要因素。Peng Yi 等^[35]首次提出了在二级叶脉的基础上增加三级脉络设计(图2(c))。该设计显著增加了传热面积和涡流强度,温度均匀

性更优,但压降略高。不对称结构比对称结构热力学性能更好。针对锂离子电池组热管理需求,仿生结构设计展现出良好适配性。Yao Fada 等^[36]提出了仿生蜘蛛网通道(图2(d)),冷板布置在电池两侧,最大温差仅2.1℃,相比于平行通道,温度均匀性显著提升。Zhao Ding 等^[37]提出一种蜂窝状流道,由正六边形铝块和冷却通道组成,显著增大了传热面积,散热性能和温度均匀性优良,适用于高放电率下的锂离子电池热管理。

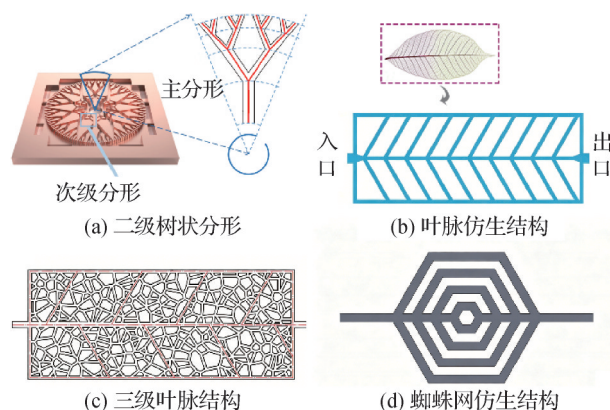


图2 仿生结构

Fig.2 The bionic structure

拓扑优化作为一种先进的数值设计方法,能够避免主观设计偏差,生成更优结构。Xie Liyao等^[38]采用拓扑优化技术提升液冷板的性能,以平均温度最小化和压降最小化为目标设计出最佳拓扑结构(图3(a)),流线型多分支结构能够减少涡流,使流速分布更均匀。Cui Kailu等^[39]发现在拓扑过程中,随着热性能权重的增加,流道数量增加,宽度变窄,速度分布均匀性得到改善。但较长的流路路径和多次流向偏转导致其压降升高。Ren Jisheng等^[40]在拓扑基础上利用仿生方法,从鱼的流线型头骨中汲取灵感,简化了拓扑结构,如图3(b)所示。这显著增强了对流传热,而不会产生大幅的压降。Qin Yechao等^[41]认为在拓扑时,不仅要考虑散热相关权重因子,还要考虑适用性,才能全面评估MCHS的整体性能。

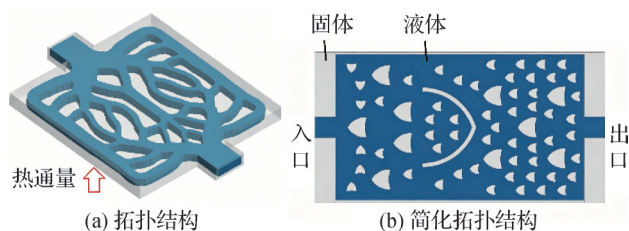


图3 拓扑结构

Fig.3 The topological structure

1.4 上下游传热均匀性改进

为提升冷板沿流动方向的温度均匀性,研究人员常采用传热增强结构来强化下游传热,如变密度凹槽、斜通道、针肋等结构。这些凸起或凹陷腔体可以中断和重新发展边界层,刺激局部涡流和二次流,以增加流动阻力为代价,提高传热效率。

Zhu Qifeng等^[42]提出“前疏后密”与“前密后疏”2种凹槽设计(图4(a)),后者显著提升了下游局部 Nu ,优化了下游传热。Lan Xin等^[43]设计了变密度斜截短斜翅微通道(图4(b))。交替倾斜通道与斜尾翼扰乱冷却剂流动,传热性能增强。斜向通道不同变密度分布对热阻和压降影响较小,但对温度均匀性影响显著。有学者基于边界层重建设计理念,提出将传统微通道的侧壁移除,仅在底部添加肋柱的针肋微通道,这增加了传热表面积并诱导二次流,但代价是更高的流动阻力。H. C. Chiu等^[44]针对传统交错排列微针鳍在温度均匀性方面存在的不足,提出了变密度排列微针鳍,发现收敛型排列在提升温度均匀性方面显著优于交错排列,但流量有所下降。Yan Yunfei等^[45-46]提出了梯度分布的针鳍阵列(图4(c))与窄槽。通过调整针鳍数量和布局改善流动均匀性,压降降低28.7%~33.4%。此外,有研究通过改

变冷却液流向,使相邻通道形成反向流动,以消除顺流布局中的冷热流体分区,提升上下游温度均匀性。A. Y. M. Ali等^[47]提出了一种收敛-发散逆流微通道设计(图4(d))。通道沿流动方向变窄,速度增加,传热增强,从而增强每条通道下游局部冷却能力。这些研究通过精确调控局部换热强度,不仅增强了整体换热性能,还尽量减小了上下游温差,为微通道换热器的设计提供了新思路。

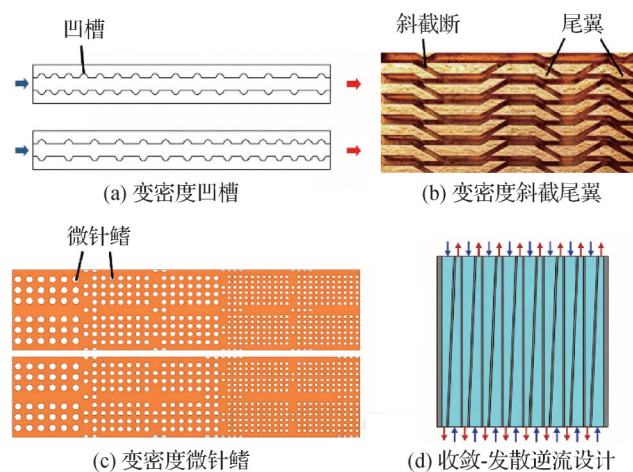


图4 上下游均温性改进结构

Fig.4 Improved upstream and downstream temperature uniformity structure

2 两相液冷微通道换热器优化策略

2.1 流动沸腾传热不均机理

温度均匀性通常由传热特性的分布决定。在两相液冷微通道中,流型与传热特性密切相关,相关研究已系统揭示了微通道沸腾的传热机制及流型转变。如图5所示,在气泡流阶段,传热系数随热通量迅速上升;段塞流阶段由于气泡与通道间的薄液膜蒸发,实现最佳传热能力;而在搅动流阶段,由于液汽界面混乱且难以有效蒸发,传热系数下降;液块流阶段则出现第二峰值;在环状流阶段,出口处发生干燥,传热系数降低^[48]。因此,为实现最佳传热均匀性,关键在于流型在冷板中的均匀分布^[49]。

2.1.1 传热不均表现形式

冷板内部的温度不均通常有2种表现形式:沿流动方向温差和垂直流道方向温差。工作流体分布不均是导致垂直流道方向传热不均的重要因素。这种流量不均会引起各通道之间流动状态的不一致,从而引发流道间传热不均匀^[50]。R. Kumar等^[51]的研究表明,微通道流动沸腾过程中流量分布的不均匀性会引发冷却剂匮乏的侧微通道首先发生沸腾,此时邻近微通道和中央微通道中则观察到弱稳定气泡流

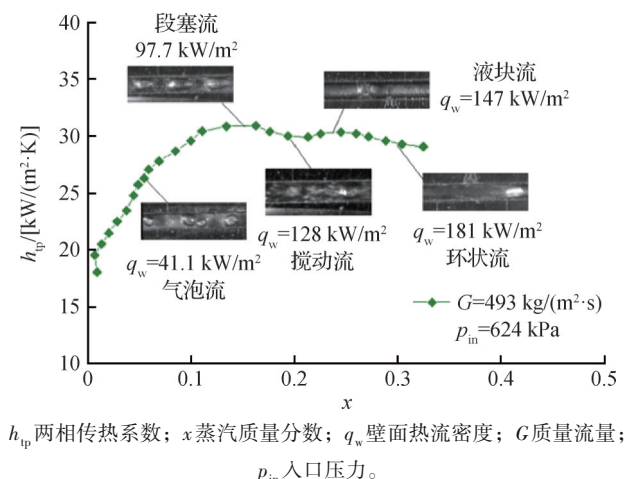


图5 传热系数与蒸气质量的关系

Fig.5 Relationship between heat transfer coefficient and vapor quality

动和单相液体流动,证明了不均匀流量分布导致不同通道流动模式的差异。D. Bogojevic 等^[52]通过实验发现,单相状态下垂直方向温差小于 1°C ,而一旦发生沸腾,则会出现不对称的流动分布,并且不同通道内出现不同流动状态,垂直方向温差增大。入口过冷度较大时,不对称流动分布更为明显。此外,两相流的不均匀分配还可能导致部分通道首先发生流动反转,从而加剧流动不均。Wang Biao 等^[53]指出,微通道的入口和出口歧管设计不精确或加热不均匀会导致流场分布不均匀。在气泡受限生长的过程中,气泡边界会向上游移动,这可能会首先改变并行微通道中多个通道的入口质量流量和压力。进而使其他通道受到流动和压力的反馈。G. Hetsroni 等^[54]发现一些渠道的流量反转会改变相邻渠道的流量分布。T. A. Kingston^[55]的实验表明,2个平行热隔离微通道间存在相互影响。当其中一个通道先沸腾时,该通道中流动阻力增加,引发 Ledinegg 不稳定性,流体被重新导向仍处于单相状态的另一通道,总质量通量仅略微降低。该研究小组进一步考虑轴向和侧壁传热,预测强热耦合的存在将使热量从流量匮乏的通道重新分配至流量过剩的通道,有利于降低流量分配不均的严重程度^[56]。

除流量分配问题外,沿流动方向上的流动模式转变会导致沿流向传热不均匀。不同的流动模式会导致不同的沸腾传热机制,显著影响局部 HTC。Li Wei 等^[57]研究表明,在去离子水流动沸腾过程中,局部 HTC 经历了先降后增的变化,指出沿流动方向存在温度不均匀性。M. Mirmanto^[58]研究发现,微通道中的局部 HTC 变化与流动方向上局部压力和饱和温度的变化相关。Chen Tailian 等^[59]发现在硅微通道中

FC-77 的流动沸腾初期,温度均匀性较好,但在增加热通量后,流动模式呈现多样性,导致局部 HTC 变化显著。Sun Jia 等^[60]指出,单相状态时,入口部分的热边界层较薄,上游局部 HTC 高于下游,而在高热通量下,下游区域的局部 HTC 稍高。Yin Liaofei 等^[61]研究显示,随着蒸气质量区的变化,通道上下游呈现不同的流型,如图 6 所示。上游从单相流转变为气泡流, HTC 沿通道快速增加。中游为受限气泡流。细长气泡周围液层强烈蒸发,局部 HTC 最大。下游环形流液膜厚度沿程衰减, HTC 稳步降低。Jia Yuting 等^[62]发现沿流向传热差异比径向通道之间更显著。高热通量下,对流沸腾区向上游移动,通道中游环状流和下游局部干涸导致温度骤升、传热系数降低和明显的压力波动。

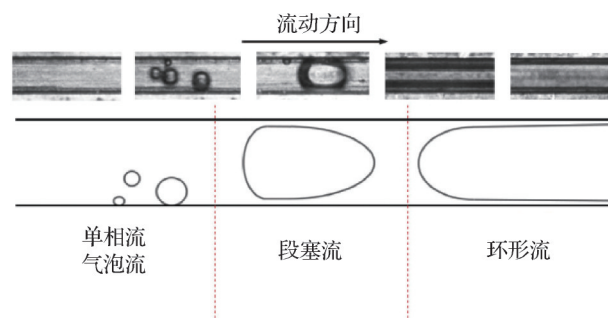


图6 微通道沸腾流动时的典型流动模式

Fig.6 Typical flow patterns during boiling flow in microchannels

2.1.2 传热不均机理

在两相流中,传热主要由相变主导。温度均匀性不仅依赖于液相流动的均匀性,还受到气相生成、迁移、聚合及排出动态过程的制约,如一个通道中气泡的受限生长可能引发流动反转,导致流量转移到其他通道,从而加剧流动不均,并使初始通道过热和干涸。此外,在高热通量条件,下游出现环形流时,若液体润湿不足易引发局部干涸,导致下游壁面温度急剧上升。有研究指出局部干涸不仅会降低通道内的温度均匀性,还会加大通道间的温度差异,是导致高热流条件下传热不均匀的主要因素^[62]。

因此,优化两相流传热均匀性的机制通常包括以下几点:1)优化流量分配;2)调节通道表面的润湿性,增加成核位点以调控气泡的生长,或确保连续的液体供应以抑制下游干涸;3)缓解气泡约束,抑制逆流。这些改进能延缓局部干涸的发生,避免临界热通量(critical heat flux, CHF)的过早出现,以实现更宽热通量范围内的冷板温度均匀分布。下面分别介绍各类改进措施。

2.2 调节流量分配均匀性

流量分配与入口歧管的流场特性及平行通道的阻力密切相关。通过优化入口布局,可以显著改善流量的均匀分配。引入入口节流装置是一种有效的策略,它能平衡各通道的阻力,均匀流量。同时抑制逆流现象,从而减少入口的压力和流量波动。此外,调整部分通道的宽度或高度,有助于将中央通道的多余流量分流至侧边通道,从而优化各通道的流量分配。

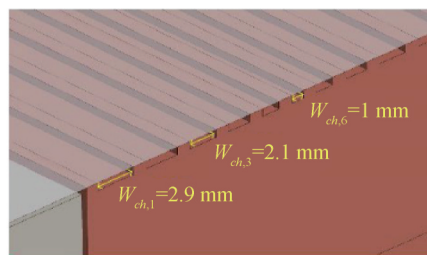
G. Hetsroni 等^[63-64]对比了侧入口和偏心前入口的流动沸腾。发现前入口设计的最高温度较低,而侧入口设计则具有更均匀的温度分布。Wang Guodong 等^[65]实验研究了不同流动配置(顶部入口、前入口和带入口限制的前入口)对8流道冷板中流动沸腾的影响。带入口限制的设计由于其能抑制逆流,实现了无温度和压力波动的稳定流动沸腾。但横截面积的减小会增加微通道系统内的压降,特别是在低出口蒸气质量条件下,节流装置可能占总压降的60%~80%^[66]。G. Singh 等^[67]针对 I 型进出口结构中侧通道接收的冷却液质量通常少于中央通道的问题,提出了一种变高度结构,如图 7(a)所示,通过减小中央通道的高度,增加其流动阻力,将多余流量转移至侧微通道,改善流量分配不均问题。有助于消除侧微通道和中央微通道之间的流动沸腾现象滞后。Jiang Chenhan 等^[68]设计了变宽度微通道,宽度从侧边到中心逐渐减小,如图 7(b)所示。实验证明该结构实现了更均匀的流型和温度分布。压降最大增加可达 39%。总体来看,节流、变高度/宽度设计改善了流量分配,但增加了通道阻力,压降增幅较大。需进一步探索新方法以解决流动不均而不增加额外压降。

2.3 表面改性

表面润湿性对微通道中的气泡成核、分布和流



(a) 变高度结构



(b) 变宽度结构

图 7 用于均匀流量分配的改进结构

Fig.7 The improved structure for uniform flow distribution

动模式演化至关重要^[69]。表面改性可分为多孔结构和纳米结构。

2.3.1 多孔结构

多孔结构包括多孔涂层、多孔粉末基质、多孔泡沫,可以为气泡成核提供微小的孔隙,调节气泡生长。此外,还能显著增加传热面积,减少沸腾起始时的壁面过热。

Luo Kai 等^[70]利用光刻工艺制备多孔侧壁,研究沸腾过程中的液体分布和再润湿机制。发现多孔壁体产生的强毛细力能够促进液态膜的稳定,并在高热通量下维持有效的薄膜蒸发。连续液态膜作为保护屏障,延缓局部干燥。Li Moran 等^[71]研究了不同激光烧蚀模式和间距(W_{aw})(图 8(a))的流动沸腾,以确定最佳激光处理参数,发现 300 μm 的消融间距、横向激光烧蚀的传热效果最好,HTC 增加了 19.4%。铜粉烧结工艺的关键参数包括铜粉颗粒大小、烧结厚度和烧结位置。Zhang Zitao 等^[72]发现,随着烧结颗粒尺寸增大,多孔涂层表面的 HTC 增加,但压降也随之增加。因其表面具有更高的亲水性,其 CHF 高于光滑通道。Zhang Donghui 等^[73]对比了不同烧结铜粉粒度(图 8(b))的多孔微通道中水的流动沸腾性能,结果表明,使用 90 μm 和 150 μm 颗粒制备的多孔微通道能够在更高热通量下维持两相流动波动。Wang Dahai 等^[74]指出当铜粉粒径过小或厚度与粒径之比过大时,毛细力不足或流动阻力过大带来的不利影响会削弱微孔层的实际吸液能力,从而导致 CHF 降低。

2.3.2 纳米结构

纳米结构包括纳米线、碳纳米管和纳米涂层,具有超高的热导率、大比表面积、优异的润湿性调控性能。引入纳米结构有助于扩大传热表面积,改变表面润湿性和流动行为,增强毛细吸液能力以实现液体重润湿,从而提高流动沸腾传热性能。

Chang Wei 等^[75-76]在平行微通道内提出了一种新的微鳍片和纳米线的分层结构。毛细力诱导的周期性且快速的液体润湿被认为是增强流动沸腾的机制。Sun Jia 等^[60]对比了光滑钛片和不同高度的 TiC 纳米线表面(图 8(c))的传热特性。研究发现,在 4 μm 纳米线表面,高热通量下侧壁出现明显局部干点。而 12 μm 纳米线表面在较高热通量下,下游仍表现为气泡聚合和限制性气泡形成,未发生回流和传热劣化。

2.3.3 混合润湿性

考虑到流路上下游流动模式的差异,理论上应对上下游不同需求采用相应的增强结构。例如,上

游需要促进成核,以减少沸腾起始时的壁面过热。下游需要增强润湿性,以避免高通量下的下游干涸。因此,润湿性图案和非均质润湿性在流动沸腾传热领域具有广阔的应用前景。

Wang Hongzhao 等^[77-78]基于氧化硅基板制备了一种润湿性图案化表面,使用聚四氟乙烯作为疏水材料,以方点形式分布于表面(图8(d))。疏水点更易成核,增强了传热性能。图案表面气泡具有更高的迁移率和更长的三重接触线。气泡在亲疏水边界时“跳跃”至疏水岛,提升气泡迁移率。Yin Liaofei 等^[79]

提出了多级增强型开放式 MCHS,上游为烧结铜粉,下游为烧结丝网微/纳米复合结构。与光滑表面相比,该开放微通道的核沸腾发生得更早,并在中高通量时显著改善壁温均匀性。并且由于其优异的亲水性,压降更小。Tan Kaiyu 等^[80]开发了一种非均质润湿性新型表面,通过分层纳米线实现上游超疏水、中游普通和下游超亲水的润湿分布,促进了上游气泡成核和下游液体供应。实验结果显示,中间区域的热聚集和下游的温度限制导致高温区域向上游迁移,抑制了入口过冷并限制了温度梯度。

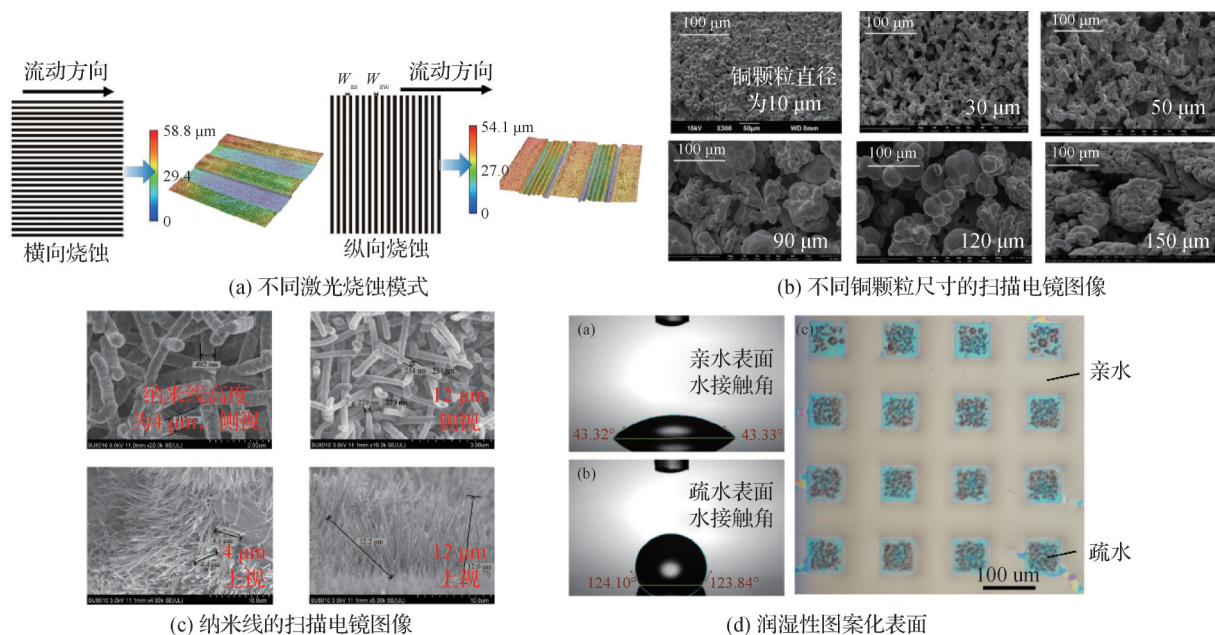


图8 表面改性结构

Fig.8 Surface modified structure

2.4 抑制逆流

2.4.1 缓解气泡限制

避免微通道中气泡约束的一种常用方法是通过结构配置(如分段或互联通道)为气泡生长和膨胀提供额外的空间。另外,开放微通道也能缓解气泡约束。其鳍顶开口可以提供气泡生长空间,促进气液分层流动。

Y. K. Prajapati 等^[81]对比了均匀、发散和分段翅片微通道(图9(a))下水流沸腾时的气泡行为。研究发现,分段翅片微通道中气泡沿上游方向的增长速率被抑制,未观察到流动反转和沸腾不稳定性。Deng Daxiang 等^[82]设计的半封闭微通道具有8个横向互联通道,结果表明这种结构为气泡形成提供了更稳定的成核位点,得以在较小的壁面过热度下触发核沸腾,同时防止气泡堵塞。Dang Chao 等^[83]对 HFE-7000 在连续型与分段型微通道中的流动沸腾

进行了实验对比,结果表明,分段型微通道的互联区域促进了液相与气相的混合与再分配,延迟了从环空流动到局部干化的过渡。Jiang Xingchi 等^[84]研究了逆流发散微通道中去离子水的流动沸腾,流动模式的可视化结果显示,下游的汽液可被邻近通道中的高过冷液体冷却,有效防止部分干化,从而显著提高了温度的均匀性。Wang Dahai 等^[85]基于使蒸汽质量沿流动方向均匀分布的思想,提出了一种逆流互连微通道(图9(b))。通过交替进液避免下游温度过高,槽结构促进核沸腾和相邻通道的流体混合。3种槽宽(0.2、0.5、0.8 mm)中,0.2 mm 槽宽由于促进气泡成核,展现出最高的散热性能。Yin Liaofei 等^[86]鉴定了开放微通道中的2种分层流动,证明这种情况下两相流动不稳定性被显著抑制。Zhao Qi 等^[87]设计了大纵横比开放微通道,发现开放间隙有助于两相流动区的气泡脱离。在致密气泡成核时,开放微通道可有效延缓流动模式转变,推迟沸腾劣化。Guo

Yanling 等^[88]设计的渐膨胀盖板(图 9(c)),因下游顶隙空间的增加而增强气泡逸出,有效延缓了分层流动的开始。此外,该设计显著改善了流动分布均匀性,表面温度分布更均匀。然而,与封闭微通道相比,开放微通道在两相流动中气液分层明显,相互作用弱,不利于提升传热性能。部分研究结合表面改性措施以增强开放式 MCHS 的流动沸腾能力^[71,89]。Yin Liaofei 等^[90]利用激光加工技术在微通道底面制造微纳米复合结构,改进结构通过将气泡锚定在微通道内,增加了液气界面的有效面积,从而在中高热通量范围内显著提升了流动沸腾的传热性能。

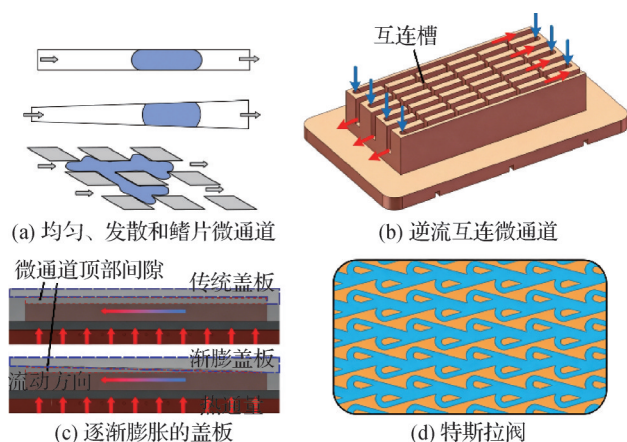


图9 结构优化设计示意图

Fig.9 Schematic diagram of structural optimization design

2.4.2 引导单向流动

特斯拉阀因其流体二极管特性而受到关注,其结构如图 9(d)所示。该特性使沸腾过程中的定向两相流动变得高效且稳定^[91-93]。实验证明,特斯拉阀能够抑制逆流,从而提高 MCHS 的性能^[94-95]。

Rui Ziliang 等^[96]设计了铜基特斯拉型微通道及带扇区凸点的微通道,结果显示带扇区凸点的微通道 HTC 比铜基特斯拉型微通道高约 45%,同时压降降低 25%,后进一步优化了带扇区凸点的微通道^[97]。Li Wenming 等^[95]研究发现,特斯拉阀能消除蒸汽回流,结合毛细结构可将混沌两相流整理为有序流动。后续研究中对比了锯齿状特斯拉微通道与岛式插入特斯拉微通道的热流体力学性能,发现岛式插入特斯拉微通道在高热通量下效果最佳,其滴形引起的气泡破裂效应能有效抑制回流和反环流^[98]。

3 典型结构制造方法

虽然微通道散热器的结构优化能显著提升传热均匀性,但考虑到 BTMS 工程应用,工艺可行性与运行可靠性是关键筛选标准。需评估各种改进结构在

规模化制造和长期运行中的局限。

常见的制造技术有蚀刻、微机械切割工艺、微电火花加工、激光加工技术、烧结、化学蒸汽沉积注塑/热压成型和 3D 打印。其中,前 4 种属于减材制造,后 4 种则是增材制造。加工技术各有其使用场景和优缺点。蚀刻法技术成熟,适用于硅基材料,但湿法精度低,干法成本高。微机械切削适合金属基微通道的快速原型制造,但批量生产效率低。微电火花加工是加工复杂 3D 金属微结构(尤其是凹槽)的优选方案,但效率和表面质量是瓶颈。激光加工材料适应性极广,可加工任意复杂微结构,适合研发阶段快速验证设计,但量产成本高。烧结法是制造多孔结构微通道的经济高效方案,尤其适合需高孔隙率的应用。化学蒸气沉积可制备高质量纳米结构,但成本高,难以批量生产,产物长期稳定性差。注塑成型成本较低,能够快速生产复杂几何形状,但可能出现焊接线,影响整体强度。3D 打印可以快速制造复杂的三维结构,节省材料但成本高,适合小批量生产^[99]。从工业制造角度出发,湿法蚀刻、烧结法、注塑成型成本较低更适用于工业大批量生产。

本文提到的微通道散热器典型结构的加工方法如表 2 所示。歧管微通道结构由歧管层和微通道层组成,仿生和拓扑结构通常具备复杂的几何特征,如多级分形通道和不规则肋条,这些特征通过传统的切割和铸造技术难以实现。然而,3D 打印技术的兴起为突破这些瓶颈提供了关键支持。虽然如此,成型精度(如表面粗糙度)和工艺稳定性仍会导致实际性能的偏差,产品在高温循环或腐蚀条件下缺乏耐久性和结构完整性的长期验证。同时,关于成本效益比的系统性研究仍显不足,尚需降低其制造和维护成本。

在表面改性方面,多孔结构制作方法多样,激光加工因其高精度和对多种材料的兼容性,越来越被认可为多孔结构制造的关键技术^[100],但通常不适合大规模生产。相比之下,烧结制造成本低且操作简便,更适合规模化制造。纳米结构可通过湿法蚀刻和化学蒸气沉积技术制作。湿法蚀刻成本低,适合大批量生产,但精度较低,且仅适用于硅基材质。目前,大多数纳米结构制备方法属于增材技术,即在微结构表面沉积或生长纳米结构^[101]。然而,在机械和压力冲击、热应力、污垢和化学腐蚀等恶劣环境中,纳米结构可能无法保持其原始形状,容易弯曲或脱落。此外,流动沸腾过程中热传递的恶化也会威胁纳米结构的长期稳定性。因此,增材型微纳结构在工程应用中仍面临挑战。迫切需要开发稳定的制造

表 2 微通道散热器典型结构的加工方法
Tab.2 Processing methods for typical structures of
microchannel heat exchangers

典型结构	制造方法
歧管微通道	激光加工技术 3D 打印
仿生/拓扑结构	激光加工技术 3D 打印 注塑成型
凹槽	微电火花加工 激光加工技术 干法蚀刻 湿法蚀刻
针鳍	微机械切割 激光加工技术 干法蚀刻 湿法蚀刻
多孔结构	激光加工技术 烧结法 热压成型 3D 打印
纳米结构	湿法蚀刻 化学蒸汽沉积

方法,以提高纳米结构的稳定性。将纳米结构与其他增强结构相结合可能是一种有效提升稳定性的方法^[99]。

4 总结与展望

本文围绕微通道换热器在电池热管理系统中的温度均匀性优化问题,综述了单相液冷与两相液冷微通道的传热不均机理、结构优化策略及典型制造方法。得到结论如下:

1)单相液冷微通道的温度不均主要由并联通道流量分配不均和冷却液沿程升温引起。优化进出口布置、改进歧管结构、设置导流或扰流元件可改善流量分配;仿生结构和拓扑优化结构通过优化流动路径、增大传热面积,在提升温度均匀性方面具有较大潜力;变密度凹槽、斜通道、针肋阵列和逆流结构可强化下游换热,减小沿程温差。改进结构需权衡传热性能增益与压降代价。

2)两相液冷微通道的温度均匀性受流量分配、气泡行为、流型演化和流动不稳定性共同影响。相比单相流,两相流可利用相变潜热提高换热能力,但气泡成核、生长、聚合、迁移及局部干涸会使传热分布更加复杂。改善流量分配、表面改性、多孔/纳米结构、混合润湿性表面、分段通道、开放微通道以及特斯拉阀等方法,可调控气液相分布、抑制逆流并延缓

干涸,从而改善温度均匀性。

3)对比单相与两相液冷微通道的优化策略可概括为:共性在于均需解决流量分配不均引起的温度非均匀性。差异在于单相液冷需利用扰流结构破坏热边界层发展,强化下游换热;两相流优化则更强调气泡动力学调控,需要兼顾气泡成核、气泡排出、液膜蒸发及再润湿。

4)从工程应用看,微通道均温结构的推广还受制造成本、加工精度和长期可靠性限制。歧管微通道、仿生/拓扑流道和复杂扰流结构通常依赖激光加工、3D 打印或精密微加工,设计自由度高但成本和耐久性仍需优化;多孔结构具备较好应用潜力,而纳米结构的长期稳定性仍需进一步研究。

基于上述讨论,本文对传热均匀性的未来研究方向提出以下建议:应进一步开发高效、低流阻且易于加工的均匀性优化构型,以促进其在实际散热场景中的应用。在推动微通道散热技术向 BTMS 等实际工程应用的集成时,必须重视其在变工况条件下的可靠性与适应性。未来研究应聚焦于从实验室规模样机向系统集成模块的转变,并结合热控策略,以验证其在真实环境中的长期均匀散热能力。

参考文献

- [1] Kizilel R, Sabbah R, Selman J R, et al. An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs [J]. Journal of Power Sources, 2009, 194 (2): 1105–1112.
- [2] Lu Languang, Han Xuebing, Li Jianqiu, et al. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles [J]. Journal of Power Sources, 2013, 226: 272–288.
- [3] Pesaran A A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations [J]. Journal of Power Sources, 2002, 110 (2): 377–382.
- [4] Tuckerman D B, Pease R F W. High-performance heat sinking for VLSI [J]. IEEE Electron Device Letters, 1981, 2 (5): 126–129.
- [5] Wei Liting, Jia Li, An Zhoujian, et al. Experimental study on thermal management of cylindrical Li-ion battery with flexible microchannel plates [J]. Journal of Thermal Science, 2020, 29 (4): 1001–1009.
- [6] Wang Yan, Gao Qing, Wang Hewu. Structural design and its thermal management performance for battery modules based on refrigerant cooling method [J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45 (3): 3821–3837.
- [7] 赵颢, 崔晓钰. 单相液冷微通道散热器结构研究进展 [J]. 制冷学报, 2025, 46 (1): 53–70. (Zhao Jie, Xie,

- Cui Xiaoyu. Research progress of microchannel heat sink structures based on single-phase flow [J]. *Journal of Refrigeration*, 2025, 46(1): 53–70.)
- [8] 刘雨薇, 陈昌辉, 刘金涛, 等. 微通道散热器传热增强研究进展[J]. *实验技术与管理*, 2025, 42(10): 69–82. (Liu Yuwei, Chen Changhui, Liu Jintao, et al. Research progress on heat transfer enhancement in microchannel heat exchangers [J]. *Experimental Techniques and Management*, 2025, 42(10): 69–82.)
- [9] 周雄, 张莉. 基于多孔结构的微通道散热技术研究现状[J]. *制冷学报*, 2025, 46(2): 17–27. (Zhou Xiong, Zhang Li. Research status of microchannel heat dissipation technology based on porous structure [J]. *Journal of Refrigeration*, 2025, 46(2): 17–27.)
- [10] Zou Yang, Tuo Hanfei, Hrnjak P S. Modeling refrigerant maldistribution in microchannel heat exchangers with vertical headers based on experimentally developed distribution results [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 64(1/2): 172–181.
- [11] Pistoresi C, Fan Yilin, Luo Lingai. Numerical study on the improvement of flow distribution uniformity among parallel mini-channels [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2015, 95: 63–71.
- [12] Dąbrowski P. Comparison of various flow maldistribution quantification methods in mini heat exchangers [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 11482.
- [13] Hou Qingdong, Xuan Yimin, Lian Wenlei, et al. A novel approach for suppressing flow maldistribution in mini-channel heat exchangers [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, 184: 108020.
- [14] Ma Liangkun, Zhu Hui, Ding Yuanyi, et al. Thermal performance of microchannel heat sink with interrupted and non-uniform width channel [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2026, 283: 129002.
- [15] Chein R, Chen J. Numerical study of the inlet/outlet arrangement effect on microchannel heat sink performance [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, 48(8): 1627–1638.
- [16] Lu Mingchang, Wang Chichuan. Effect of the inlet location on the performance of parallel-channel cold-plate [J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2006, 29(1): 30–38.
- [17] Tong J C K, Sparrow E M, Abraham J P. Geometric strategies for attainment of identical outflows through all of the exit ports of a distribution manifold in a manifold system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(17/18): 3552–3560.
- [18] Manoj Siva V, Pattamatta A, Das S K. Investigation on flow maldistribution in parallel microchannel systems for integrated microelectronic device cooling [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2014, 4(3): 438–450.
- [19] Anbumeenakshi C, Thansekhar M R. Experimental investigation of header shape and inlet configuration on flow maldistribution in microchannel [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, 75: 156–161.
- [20] Liu Xiaoqin, Yu Jianlin. Numerical study on performances of mini-channel heat sinks with non-uniform inlets [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 93: 856–864.
- [21] Song J Y, Hah S, Kim D, et al. Enhanced flow uniformity in parallel mini-channels with pin-finned inlet header[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 152: 718–733.
- [22] Harpole G M, Eninger J E. Micro-channel heat exchanger optimization [C]//1991 Proceedings, Seventh IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 1991: 59–63.
- [23] Cui H C, Zhang Z K, Yu M J, et al. A hybrid slot jet impingement/microchannel heat sink for cooling high-power electronic devices: a combined experimental and numerical study [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2024, 197: 108823.
- [24] van Erp R, Soleimanzadeh R, Nela L, et al. Co-designing electronics with microfluidics for more sustainable cooling [J]. *Nature*, 2020, 585(7824): 211–216.
- [25] Tang Wei, Sun Licheng, Liu Hongtao, et al. Improvement of flow distribution and heat transfer performance of a self-similarity heat sink with a modification to its structure[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 121: 163–171.
- [26] Chen Chaowei, Li Fei, Wang Xinyu, et al. Improvement of flow and heat transfer performance of manifold microchannel with porous fins [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 206: 118129.
- [27] Lin Yuhao, Luo Yang, Li Wei, et al. Single-phase and two-phase flow and heat transfer in microchannel heat sink with various manifold arrangements [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 171: 121118.
- [28] Luo Yang, Zhang Jingzhi, Li Wei. A comparative numerical study on two-phase boiling fluid flow and heat transfer in the microchannel heat sink with different manifold arrangements [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 156: 119864.
- [29] Pu Xiaojun, Zhao Zhongchao, Sun Mengke, et al. Numerical study on temperature distribution uniformity and cooling performance of manifold microchannel heat sink [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 237: 121779.
- [30] Chen Chaowei, Wang Xinyu, Yuan Baoqiang, et al. Investigation of flow and heat transfer performance of the

- manifold microchannel with different manifold arrangements [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 34: 102073.
- [31] Dede E M, Liu Yan. Experimental and numerical investigation of a multi-pass branching microchannel heat sink [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 55 (1/2): 51–60.
- [32] Ma Chuangbei, Sun Yunna, Wu Yongjin, et al. A bio-inspired fractal microchannel heat sink with secondary modified structure and sub-total-sub fluid transmission mode for high heat flux and energy-saving heat dissipation [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 202: 123717.
- [33] He Ziqiang, Yan Yunfei, Zhao Ting, et al. Multi-objective optimization and multi-factors analysis of the thermal/hydraulic performance of the bionic Y-shaped fractal heat sink [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 195: 117157.
- [34] Liu Feifei, Chen Yangyang, Qin Wu, et al. Optimal design of liquid cooling structure with bionic leaf vein branch channel for power battery [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 218: 119283.
- [35] 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.
- [36] Yao Fada, Guan Xin, Yang Manying, et al. Study on liquid cooling heat dissipation of Li-ion battery pack based on bionic cobweb channel [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 68: 107588.
- [37] Zhao Ding, Lei Zhiguo, An Chao. Research on battery thermal management system based on liquid cooling plate with honeycomb-like flow channel [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 218: 119324.
- [38] Xie Liyao, He Zhaowei, Zhao Yulong, et al. Research on topology optimization of liquid-cooled plates based on multi-level optimization [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 155: 107495.
- [39] Cui Kailu, Zhao Haoteng, Zhang Zitao, et al. Investigations into hydrothermal performance of porous-ribbed microchannels based on topology optimizations [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 279: 127850.
- [40] Ren Jisheng, Qiu Xianghui, Wang Shuangfeng. A liquid cooling plate based on topology optimization and bionics simplified design for battery cooling [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 102: 114171.
- [41] Qin Yechao, Li Luyi, Zhao Yu, et al. Experimental and numerical investigation of liquid-cooled microchannel heat sink by topology optimization for uniform heat source [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2026, 256: 127932.
- [42] Zhu Qifeng, Cui Yang, Zeng Jingwei, et al. Local hydrothermal characteristics and temperature uniformity improvement of microchannel heat sink with non-uniformly distributed grooves [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 47: 103113.
- [43] Lan Xin, Xie Guofang, Ji Shaobo, et al. Experimental and numerical study on the temperature uniformity of a variable density alternating obliquely truncated microchannel [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 176: 121440.
- [44] Chiu H C, Youh M J, Hsieh R H, et al. Numerical investigation on the temperature uniformity of micro-pin-fin heat sinks with variable density arrangement [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 44: 102853.
- [45] Yan Yunfei, Wu Jinhua, Xu Fulei, et al. Experimental investigation on flow and heat transfer characteristics of the drop-pressure microchannel heat sink with gradient distribution pin fin arrays and narrow slots [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 233: 121084.
- [46] Yan Yunfei, Xue Zongguo, Xu Fulei, et al. Numerical investigation on thermal-hydraulic characteristics of the micro heat sink with gradient distribution pin fin arrays and narrow slots [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 202: 117836.
- [47] Ali A YM, Abo-Zahhad E M, Elqady H I, et al. Thermal analysis of high concentrator photovoltaic module using convergent-divergent microchannel heat sink design [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 183: 116201.
- [48] Li Xuejiao, Jia Li, Dang Chao, et al. Visualization of R134a flow boiling in micro-channels to establish a novel bubbly-slug flow transition criterion [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 91: 230–244.
- [49] Fang Yidong, Yang Huinan, Huang Yuqi, et al. Flow pattern maldistribution and manipulation during two-phase cooling for power batteries: a critical review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 211: 115362.
- [50] Xiong Tong, Liu Guoqiang, Huang Shenjie, et al. Two-phase flow distribution in parallel flow mini/micro-channel heat exchangers for refrigeration and heat pump systems: a comprehensive review [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 201: 117820.
- [51] Kumar R, Singh G, Mikielwicz D. Effect of asymmetric fluid flow distribution on flow boiling in a microchannel heat sink—an experimental investigation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 213: 118710.
- [52] Bogojevic D, Sefiane K, Walton A J, et al. Two-phase

- flow instabilities in a silicon microchannels heat sink [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009, 30 (5): 854–867.
- [53] Wang Biao, Hu Yanwei, He Yurong, et al. Dynamic instabilities of flow boiling in micro-channels: a review [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 214: 118773.
- [54] Hetsroni G, Mosyak A, Pogrebnyak E, et al. Explosive boiling of water in parallel micro-channels [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2005, 31 (4): 371–392.
- [55] Kingston T A, Weibel J A, Garimella S V. Ledinegg instability-induced temperature excursion between thermally isolated, heated parallel microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 132: 550–556.
- [56] Van Oevelen T, Weibel J A, Garimella S V. The effect of lateral thermal coupling between parallel microchannels on two-phase flow distribution [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 124: 769–781.
- [57] Li Wei, Zhou Kan, Li Junye, et al. Effects of heat flux, mass flux and two-phase inlet quality on flow boiling in a vertical superhydrophilic microchannel [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 119: 601–613.
- [58] Mirmanto M. Local pressure measurements and heat transfer coefficients of flow boiling in a rectangular microchannel [J]. Heat and Mass Transfer, 2016, 52(1): 73–83.
- [59] Chen Tailian, Garimella S V. Local heat transfer distribution and effect of instabilities during flow boiling in a silicon microchannel heat sink [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54 (15/16): 3179–3190.
- [60] Sun Jia, Lin Yuhao, Li Junye, et al. Heat transfer and visualization of flow boiling on nanowire surfaces in the microchannel [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 256: 124064.
- [61] Yin Liaoifei, Jia Li. Confined bubble growth and heat transfer characteristics during flow boiling in microchannel [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 98: 114–123.
- [62] Jia Yuting, Zhang Dongxue, Wang Jingtao, et al. Investigation of local heat transfer characteristics and boiling instability mechanisms in trapezoidal ribbed-wall microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2026, 256: 127957.
- [63] Hetsroni G, Mosyak A, Segal Z. Nonuniform temperature distribution in electronic devices cooled by flow in parallel microchannels [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2001, 24(1): 16–23.
- [64] Hetsroni G, Mosyak A, Segal Z, et al. Two-phase flow patterns in parallel micro-channels [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2003, 29(3): 341–360.
- [65] Wang Guodong, Cheng Ping, Bergles A E. Effects of inlet/outlet configurations on flow boiling instability in parallel microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(9/10): 2267–2281.
- [66] Feng Shuai, Cao Weijian, Li Xin, et al. Inhibition of flow boiling instability for parallel microchannels using topological inlet restrictor at a reduced pressure drop [J]. Applied Thermal Engineering, 2026, 288: 129653.
- [67] Singh G, Kumar R, Dąbrowski P, et al. Repercussions of maldistribution on subcooled fluid boiling in microchannel heat sink [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2026, 255: 127821.
- [68] Jiang Chenhan, Lu Di, Yu Wenlong, et al. Experimental investigation on flow boiling heat transfer of R1233zd (E) in parallel microchannel heat sink with variable channel widths [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 244: 126986.
- [69] Cheng Xiao, Pan Shanshan, Liu Liu, et al. Unveiling the flow boiling heat transfer characteristics in a single high-aspect-ratio microchannel with different wettabilities [J]. Applied Thermal Engineering, 2026, 284: 129064.
- [70] Luo Kai, Li Wenming, Ma Jiaxuan, et al. Silicon microchannels flow boiling enhanced *via* microporous decorated sidewalls [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 191: 122817.
- [71] Li Moran, Zhou Jianhong, Zhang Yuanle, et al. Enhanced flow boiling heat transfer through synergistic effects of laser-ablated surface and open microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2026, 256: 127917.
- [72] Zhang Zitao, Wu Yue, He Kun, et al. Experimental investigation into flow boiling heat transfer and pressure drop in porous coated microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 218: 124734.
- [73] Zhang Donghui, Mao Jijin, Qu Jian, et al. Characterizing effect of particle size on flow boiling in sintered porous-microchannels [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 229: 120571.
- [74] Wang Dahai, Zhang Chaoyang, Hong Fangjun. Enhanced flow boiling heat transfer performance of counter-flow interconnected microchannels *via* microporous copper surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 244: 126905.
- [75] Chang Wei, Li Wenming, Ma Jiaxuan, et al. Enhanced flow boiling in microchannels integrated with hierarchical structures of micro-pinfin fences and nanowires [J].

- Langmuir, 2021, 37(30): 8989–8996.
- [76] Chang Wei, Luo Kai, Li Wenming, et al. Enhanced flow boiling of HFE-7100 in silicon microchannels with nanowires coated micro-pin fins [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 216: 119064.
- [77] Wang Hongzhao, Yang Yinchuang, He Minghao, et al. Subcooled flow boiling heat transfer in a microchannel with chemically patterned surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 140: 587–597.
- [78] Wang Hongzhao, Yang Yinchuang, Wang Ying, et al. Effects of non-wetting fraction and pitch distance in flow boiling heat transfer in a wettability-patterned microchannel [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 190: 122753.
- [79] Yin Liaofei, Yang Zhonglin, Aaker O, et al. A comparative study of flow boiling performance in smooth and multi-stage enhanced open microchannels [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 159: 108138.
- [80] Tan Kaiyu, Hu Yanwei, He Yurong. Achieving ultra-uniform temperature distribution with a heterogeneous wettability surface for two-phase flow in microchannels [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 192: 108443.
- [81] Prajapati Y K, Pathak M, Khan M K. Bubble dynamics and flow boiling characteristics in three different microchannel configurations [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 112: 371–382.
- [82] Deng Daxiang, Xie Yanlin, Huang Qingsong, et al. On the flow boiling enhancement in interconnected reentrant microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 108: 453–467.
- [83] Dang Chao, Jia Li, Peng Qi, et al. Comparative study of flow boiling heat transfer and pressure drop of HFE-7000 in continuous and segmented microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 148: 119038.
- [84] Jiang Xingchi, Zhang Shiwei, Li Yuanjie, et al. High performance heat sink with counter flow diverging microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 162: 120344.
- [85] Wang Dahai, Wang Dongyu, Hong Fangjun, et al. Improved flow boiling performance and temperature uniformity in counter-flow interconnected microchannel heat sink [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 241: 122370.
- [86] Yin Liaofei, Jiang Peixue, Xu Ruina, et al. Heat transfer and pressure drop characteristics of water flow boiling in open microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 137: 204–215.
- [87] Zhao Qi, Zhou Jianhong, Lu Mingxiang, et al. Irregular-shaped nucleated bubbles induced enhancement of subcooled flow boiling heat transfer in leaf vein inspired three-tiered open microchannels (LTOMCs) [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 211: 124281.
- [88] Guo Yaning, Li Lulu, Zhang Bo, et al. Experimental study on the flow boiling characteristics of microchannels with different gradually expanding cover plates [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 279: 127723.
- [89] Wang Shenshen, Xia Guodong, Cheng Lixin, et al. Experimental study and visualization of flow boiling in open microchannels with laser-etched micro-nanoscale composite fins [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 246: 127068.
- [90] Yin Liaofei, Zhang Kexin, Qin Tianjun, et al. HFE-7100 flow boiling in open microchannels with grid-patterned multiscale textures [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 280: 128400.
- [91] Liu Zhaoxuan, Han Qun, Han Jingwei, et al. Flow boiling in a relatively large copper heat sink comprised of Tesla microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 236: 126366.
- [92] Purwidyantri A, Prabowo B A. Tesla valve microfluidics: the rise of forgotten technology [J]. Chemosensors, 2023, 11(4): 256.
- [93] Han Qun, Lai Wenhao, Liu Zhaoxuan, et al. A comparative study of enhanced thermal performance in Tesla-type microchannels [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 239: 122157.
- [94] Han Jingwei, Liu Zhaoxuan, Li Wenming, et al. Enhanced flow boiling by manipulating two-phase flow in Tesla channel heat sink using HFE-7100 [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 210: 109571.
- [95] Li Wenming, Yang Siyan, Chen Yongping, et al. Tesla valves and capillary structures-activated thermal regulator [J]. Nature Communications, 2023, 14: 3996.
- [96] Rui Ziliang, Zhao Fei, Sun Hong, et al. Experimental research on flow boiling thermal-hydraulic characteristics in novel microchannels [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2023, 140: 110755.
- [97] Rui Ziliang, Hao Junjie, Ma Jie, et al. Research on single-phase flow and two-phase flow boiling cooling performance of microchannel thermal management system with novel Tesla Valve design [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 229: 125760.
- [98] Cao Hui, Yang Ruixue, Lu Xiaorui, et al. Thermo-hydrodynamic performances of flow boiling in Tesla-microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass

Transfer, 2026, 255: 127687.

- [99] Deng Daxiang, Zeng Long, Sun Wei. A review on flow boiling enhancement and fabrication of enhanced microchannels of microchannel heat sinks [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 175: 121332.
- [100] Wang Sheng, Chen H H, Chen C L. Enhanced flow boiling in silicon nanowire-coated manifold microchannels [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 148: 1043–1057.
- [101] Singh S K, Sharma D. Review of pool and flow boiling heat transfer enhancement through surface modification [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021,

181: 122020.

通信作者简介

徐象国,男,教授,浙江大学制冷与低温研究所,0571-87953944, E-mail: zjuxgxu@zju.edu.cn。研究方向:新能源汽车热管理,智能空调,分布式能源系统。

About the corresponding author

Xu Xiangguo, male, professor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, 86-571-87953944, E-mail: zjuxgxu@zju.edu.cn. Research fields: thermal management of new energy vehicles, intelligent air conditioning, distributed energy system.