

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-11

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20251208001

微通道底部电极增强流动与传热特性的数值研究

徐绍钦¹ 张西龙^{1,2} 刘佳鑫¹

(1 青岛理工大学机械与汽车工程学院 青岛 266520; 2 再制造技术国家级重点实验室 北京 100072)

摘要 随着微电子器件功率密度持续升高,散热已成为制约性能的瓶颈。虽然矩形微通道换热面积大,但纯压力驱动下流动以层流为主,热边界层限制了性能提升。本文基于三维数值模型,研究了不同电极构型对流场及温度分布的影响,提出了正电极周期递增排布方式,对深入阐明电场对流体的作用机制具有重要意义。研究表明:正电极周期递增排布能够在通道底部附近有效诱发出一种周期性的“伪粗糙度”涡结构。这些涡旋通过强烈扰动黏性与热边界层,使近壁局部速度梯度显著增大,从而同时强化了对流传热、提升了整体流速并改善了减阻特性。在边界层流速方面,与常规光滑通道相比,采用周期性递增排布(结构1)的增强幅度最高,达41.6%;均匀排布(结构2)次之,为36.8%;周期性递减排布(结构3)相对较低,为32%。这一趋势同样体现在综合性能上:周期递增排布与均匀排布的综合性能评价指标(performance evaluation criterion)值分别提升了90%和70%。尤其是,在相同的施加电压和散热性能条件下,采用周期递增排布可使压降大幅降低66.7%,表现出明显优于其他两种构型的综合性能。

关键词 电流体动力学;流动特性;传热特性;边界层;电极

中图分类号: TK124;TB61¹

文献标识码: A

Numerical Study on the Enhancement of Flow and Heat Transfer Characteristics by Electrodes at the Bottom of Microchannels

Xu Shaoqin¹ Zhang Xilong^{1,2} Liu Jiaxin¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 2. National Key Laboratory for Remanufacturing, Beijing 100072, China)

Abstract Following the continuous increase in power density of microelectronic devices, heat dissipation has become a critical bottleneck limiting performance. Although rectangular microchannels offer a large heat transfer area, the flow under purely pressure-driven conditions remains predominantly laminar, and the thermal boundary layer limits further enhancement. In this study, a three-dimensional numerical model was employed to investigate the effects of different electrode configurations on flow field and temperature distribution. A positive electrode arrangement with periodically increasing spacing was proposed, providing the essential insights into the mechanism by which the electric field interacts with the fluid. The results reveal that this periodically increasing arrangement effectively induces periodic vortex structures, referred to as "pseudo-roughness," near channel bottom. These vortices strongly disturb the viscous and thermal boundary layers, significantly increasing the local near-wall velocity gradient, thereby simultaneously enhancing the convective heat transfer, increasing the overall flow velocity, and improving drag reduction. In terms of the boundary layer velocity, relative to a conventional smooth channel, the periodically increasing arrangement (Structure 1) achieved the highest enhancement of 41.6%, followed by the uniform arrangement (Structure 2) at 36.8%, and the periodically decreasing arrangement (Structure 3) at 32%. This trend was also reflected in the overall performance: the periodically increasing and uniform arrangements improved the performance evaluation criterion (PCE) by 90% and 70%, respectively. Notably, under the identical applied voltage and heat dissipation performance condition, the periodically increasing arrangement reduced the pressure drop by 66.7%, demonstrating a markedly superior overall performance compared with the other two configurations.

Keywords electrohydrodynamics; flow characteristics; heat transfer characteristics; boundary layer; electrode

收稿日期:XXXX-XX-XX;修回日期:XXXX-XX-XX;录用日期:XXXX-XX-XX

责任编辑:邵月月



移动阅读

随着电子元器件不断向微型化、薄型化、轻量化发展,高热流密度引发的热管理问题日益突出。有限面积内局部热量过度积聚,易造成电子设备温升过高、性能衰减,严重时还会引发设备失效^[1]。因此,研发结构紧凑、效率高、可靠性强的热管理技术是实现微电子器件持续冷却的关键^[2]。传统空气冷却技术(散热片、针肋阵列、风扇辅助冷却等)受自身传热能力制约,已无法满足高度集成微系统的热控制需求。相比之下,微通道冷却技术具有比表面积大、散热性能好^[3]、易于集成等优点,已成为高功率小型电子器件热管理的理想方案。然而,微通道内部流动常处于低雷诺数层流状态^[4],较厚的黏性与热边界层不仅会抑制流体的流动与传热,还会带来显著的流动阻力^[5]。电动力学主动流动控制技术因其在强化传热的同时能够调控流动而备受关注^[6]。该技术结构简单、响应快、无运动部件、噪音低、功耗小且易于集成。电流体动力学泵(electrohydrodynamics pump, EHD)作为一种非机械式泵,可通过电场与介电液体的直接耦合将电能转化为流体动能,为微流动控制提供了新途径。

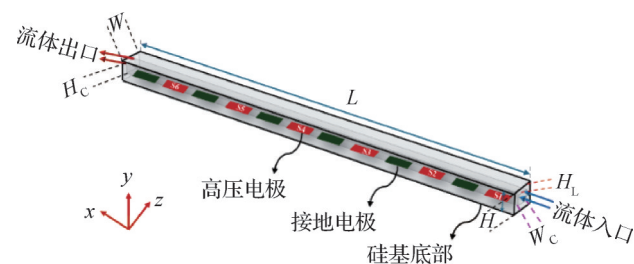
目前EHD强化传热研究主要集中在2条技术路径,分别为电荷注入型EHD泵(离子阻力泵)和感应泵。电荷注入型EHD泵依靠高压将电荷注入流体,通过离子与分子间的动量转移诱导流动。J. Darabi等^[7]研制的微注入泵虽能实现较高流速,但存在电极腐蚀、电解液劣化及稳定性不足等突出问题。Yu He等^[8]开发的器件在持续运行20 min后性能显著下降,暴露出该方法存在可靠性不足的问题。感应泵^[9]是利用行波电场与非均匀导电介质(如具有温度梯度或两相体系)的相互作用驱动流体^[10],该方法对工质特性和流场形态要求苛刻,难以应用于单相均匀介电流体。相比之下,基于Onsager-Wien效应的EHD传导泵因高安全性和稳定性成为研究热点^[11]。该机制依赖介质中存在的微量离子与可解离杂质,在中强度电场作用下通过破坏解离-复合平衡产生净电荷输运。采用非对称电极结构(如多孔环电极、鳞片差动板电极等)可有效调控库仑力分布,实现定向流体驱动^[12]。V. K. Patel等^[13]在国际空间站完成了第一代传导泵的首次长期在轨测试(2017—2018年),验证了其超过10 000 h的运行稳定性,第二代产品已于2021年开展进一步空间环境验证。与此同时,传导泵在模块化设计与多级扩展方面优势显著。

现有研究虽已验证EHD传导泵具备强化传热与流动控制的能力,但其在微通道内部诱导特定涡结构以实现“传热-降阻”协同增强的机理尚不明确^[13],

尤其是电极构型对涡旋生成模式及热力性能的影响仍有待深入。在此基础上,本研究设计了一种全新构型,分别采用周期扩大、周期缩小与均匀分布的电极排布方式,依托Onsager-Wien效应^[14-16]在微通道内生成“伪粗糙度”,进而改变原有流动结构。实验将分析不同出口流动状态与外加电场条件下,流场、压降及传热性能的变化特征,揭示EHD诱导涡的形成、演化规律及其对边界层的协同作用,为研发兼具高效散热、低流动阻力与高稳定性的微电子冷却技术提供理论参考。

1 电极排列设计

本研究采用矩形微通道作为介电流体的流体域,据此设计了电动力学微通道模型,如图1所示。结构参数如表1所示。



L 为长度; W 为宽度; H 为高度; H_L 流体域与固体域的距离; H_C 为流体域高度; W_C 为流体域宽度。

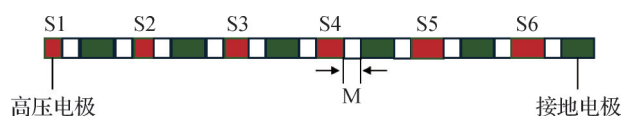
图1 微通道模型

Fig.1 Schematic of the model

表1 微通道结构参数

参数	值	参数	值
W	2	H_L	0.5
L	1	H_C	1
H	2	W_C	1

电极布置结构、正电极排布尺寸分别如图2、表2所示。电极布置于流体微通道底部,正极与接地电极的间隔宽度(D)均为1 mm。选择电绝缘材料硅为模型的基底,因此,固体区域无自由电荷,可忽略固体区域电荷输运对流体区域的影响。去离子水和硅的物理参数如表3~4所示。



S1~S6为不同正电极; D 为绝缘区域

图2 电极布置结构

Fig.2 Schematic of electrode configuration

表 2 正电极排布尺寸

Tab.2 Positive electrode configuration dimensions							mm
项目	S1	S2	S3	S4	S5	S6	M
结构 1	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	1
结构 2	1	1	1	1	1	1	1
结构 3	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1.2	1

表 3 去离子水物理参数

Tab.3 Physical properties of deionized water	
物理参数	值
密度/(kg/m ³)	997
动力黏度/(m ² /s)	$\mu(T) = 2.414 \times 10^{-5} \times 10^{\frac{247.8}{T-140}}$
电导率/(S/m)	5.5×10^{-6}
相对介电常数	78.4
Zeta 电位/mV	-50
Zeta 电位/mV	~1

表 4 硅的物理参数

Tab.4 Physical parameters of silicon	
物理参数	值
密度/(kg/m ³)	2 330
导热系数/[W/(m·K)]	148
比热容/[J/(kg·K)]	710
介电常数/(F/m)	1.04×10^{-10}

2 数值分析

2.1 数学模型

本研究选取去离子水作为工作流体,主要因其在基础机理研究中具备独特优势。去离子水属于极性介电流体,其电荷载体主要由高压电离作用下液体分子自身解离产生的微量离子对(H₃O⁺水合氢离子和OH⁻氢氧根离子)构成,而非外源溶解的盐离子。该特性有助于最大限度减少无关离子干扰,可以更清晰地揭示电场参数与电极结构对流体驱动和换热的原发性影响,并为后续研究更复杂的工质(如介电油、纳米流体)奠定理论基准。电极结构布置于微通道底部壁面,旨在通过非对称几何构型产生电场梯度,从而诱导电场力和体积力驱动流体。计算域底部共布置 6 对电极,每对均由 1 支高压电极与 1 支接地电极组成,构成基本的场致驱动单元。为系统探究电极几何非对称性对电场-流动耦合作用的影响机制,本文设计并对比了 3 种具有明确梯度特征的电极排布构型(图 2)。核心设计逻辑如下:

1)结构 1(周期性递增构型)。高压电极沿流动方向呈周期性递增排布,接地电极尺寸保持均匀。此构型建立了单一的、方向性的激励电极几何梯度,是研究梯度电场驱动流体及“伪粗糙度”效应的基础模型。

2)结构 2(均匀对称构型)。高压电极与接地电极均采用均匀尺寸。此构型消除了电极自身的几何梯度,作为对称基准结构,用于突显和量化非对称梯度构型(结构 1 与结构 3)所带来的附加电场调制效应。

3)结构 3(周期性递减构型)。高压电极沿流动方向呈周期性递减排布,接地电极尺寸保持均匀,此构型是结构 1 的梯度反向对比结构,旨在探究激励电极梯度方向改变对电场、体积力及最终流动结构的影响。

2.2 本文边界条件

本文设定初始边界条件如下:

1)微通道入口施加均匀入口速度,流速设置为 0.2~1 m/s(雷诺数范围为 220~1 000)。

2)在微通道出口设置恒定大气压力, $p=p_{out}=0$ 。

3)微通道底部施加 76.85℃的均匀稳态温度,顶部温度设置为-3.15℃。其余侧壁设为绝热边界,工质入口温度为 25℃。

4)流体通道底部的短高压电极与长接地电极连接(高压为 500~2 000 V),选择较长接地电极为-1 V,接地点电位的改变实质上是选择了不同的电位零点,而关键的物理量电极间的电位差,被明确设定为特定值,从而实现对电渗流强度和方向的精确控制,另外采用轻微负电位(-1 V)可降低接地电极表面的氧化副反应概率,减少电极极化对电渗流稳定性的干扰。所有其他外表面均为电绝缘。高压电极对正离子施加狄利克雷边界条件,对负离子施加诺伊曼边界条件;同理,接地电极对负离子施加狄利克雷边界条件,对正离子施加诺伊曼边界条件。

5)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,壁面处无温度跃变。应用 COMSOL 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。

6)本模型中,正负离子的初始体相浓度均设定为 10¹⁴ m⁻³。该取值一方面可保证强电场下产生足够库仑力,实现流体宏观驱动;另一方面符合弱电介质的典型特征,能有效规避持续电解等副反应带来

的干扰。

2.3 控制方程

本研究数值模拟遵循以下假设:1)流体为单相、不可压缩流动;2)流体处于层流流动状态;3)固体材料为均匀且各向同性;4)忽略黏性耗散、焦耳热及辐射传热;5)重力影响不予考虑。

连续性、动量和能量方程如下^[17]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = \nabla \cdot (L_i \nabla c_i - c_i \mu_i \mathbf{E}) \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; $\mathbf{u}$ 为速度矢量, m/s ; $\mathbf{g}$ 为重力加速度矢量, m/s^2 ; p 为压力, Pa ; $\boldsymbol{\tau}$ 为黏性应力张量, $\text{Pa}^{[17]}$; e 为单位质量内能, J/kg ; k 为导热系数, $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; Φ 为黏性耗散项, W/m^3 ; Q 为外部热源项, W/m^3 ^[18]; c_i 为第 i 种离子的浓度, m^{-3} ; L_i 为第 i 种离子的扩散系数, m^2/s ; μ_i 为第 i 种离子的迁移率, $\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。

2.4 数据采集与计算

经典的电渗流公式^[19]如下:

$$u_{\text{EOF}} = -\frac{\varepsilon \zeta E}{\mu} \quad (4)$$

式中: ε 为流体的介电常数; ζ 为Zeta电位, V 。

电场公式^[19]为:

$$E = \frac{V}{d} \quad (5)$$

式中: E 为电场强度, V/m ; V 为施加的电压, V ; d , m ; 为正极电压的间隔距离。

本文忽略电极板自身产热,其温差计算如下^[19]:

$$\Delta T = T_{\text{wall}} - T_{\text{fluid}} \quad (6)$$

式中: T_{wall} ($^{\circ}\text{C}$)、 T_{fluid} ($^{\circ}\text{C}$)分别为固体和流体的平均温度。

水力直径 D_h (m)为^[20]:

$$D_h = \frac{2 \times (W_c \times H_c)}{W_c + H_c} \quad (7)$$

雷诺数为^[20]:

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad (8)$$

式中: μ 为流体动力黏度。

格拉晓夫数为^[21]:

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T D_h^3}{\nu^2} \quad (9)$$

式中: β 为流体的热膨胀系数, $1/\text{K}$; ΔT 为温差, $^{\circ}\text{C}$; D_h^3 为特征长度, m (通常取流动的尺度长度,如通道的长

度或高度); ν 为流体的运动黏度, m^2/s 。

对流传热系数 h ($\text{W/(m}^2 \cdot \text{K)}$)为^[21]:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D_h} \quad (10)$$

式中: k ($\text{W/(m} \cdot \text{K)}$)为表示流体的热导率导热系数 Nu 为努塞尔数。

热流密度为^[21]:

$$q = h \cdot \Delta T \quad (11)$$

式中: ΔT 为表面(或流体)与周围介质之间的温差, $^{\circ}\text{C}$ 。

努塞尔数为^[22]:

$$Nu = \frac{h L_c}{k_f} \quad (12)$$

式中: L_c 为特征长度; k_f 为流体的导热系数。

式(13)表征微流控系统电渗流,融合了雷诺数 Re 和德拜长度 κ 对其流动规律的作用^[22]。

$$f_{\text{EOF}} = \frac{16}{Re} \left[1 - \frac{3}{2} \left(\frac{\kappa D_h}{2} \right) \coth \left(\frac{\kappa D_h}{2} \right) + \frac{3}{2} \left(\frac{2}{\kappa D_h} \right)^2 \right]^{-1} \quad (13)$$

式中: κ 为德拜长度的倒数

性能评价准则(performance evaluation criterion, PEC)为散热器的性能提供了综合评价指标,其定义如下^[23]:

$$P_{\text{EC}} = \frac{Nu/Nu_0}{(ff_0)^{1/3}} \quad (14)$$

式中: f (kg/s)、 f_0 (kg/s)分别为平均摩擦系数与基准摩擦系数。

2.5 网格独立性验证

本文进行了网格无关性验证。模型采用COMSOL中的非结构化四面体网格进行离散。通过依次增加全局网格密度,生成了不同规模的网格(网格数量为 $1.2 \times 10^6 \sim 8.7 \times 10^6$)。选取通道中心截面的最高温度和流速作为监测指标。结果表明,随着网格数量增加,上述指标逐渐趋于稳定。当网格数量达到 5.1×10^6 时,继续将网格增加至约 8.7×10^6 ,最高温度的变化幅度小于 0.8% ,流速的变化幅度小于 1.5% 。最大相对误差出现在次密网格(约 3.4×10^6)与最密网格的对比中,其中流速的最大相对误差为 2.2% ,最大温度的最大相对误差为 2.7% 。考虑到计算精度与效率的平衡,后续所有模拟均采用网格数量为 5.1×10^6 的划分方案。该方案可在保证关键物理量计算结果与最密网格相比误差小于 2% 的前提下,显著节约计算资源。

2.6 数值模拟验证

通过与 R. Deepak Selvakumar 等^[24]和 M. E.

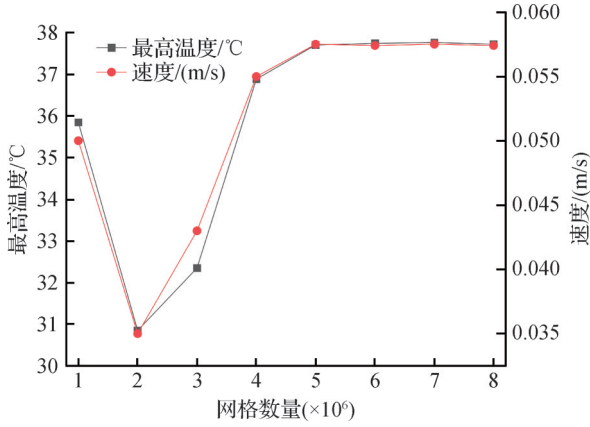


图3 不同网格数量下的最高温度与流速差异

Fig.3 Differences in maximum temperature and flow velocity under different grid numbers

Steinke 等^[25]的研究结果进行相关性对比(图4),评估了本研究所用数值模型模拟矩形微通道内流动与共轭传热的能力。将沿通道底部中心线努塞尔数分布与 R. Deepak Selvakumar 等^[24]建立的相关模型进行对比(图5),并基于 5.1×10^6 的网格密度,对比了 y 轴速度分布、最大速度、最高温度及努塞尔数。所有参数的误差均在 3% 以内,表明本研究的数值模拟结果与基准结果吻合良好,从而验证了所用数值模型的准确性。

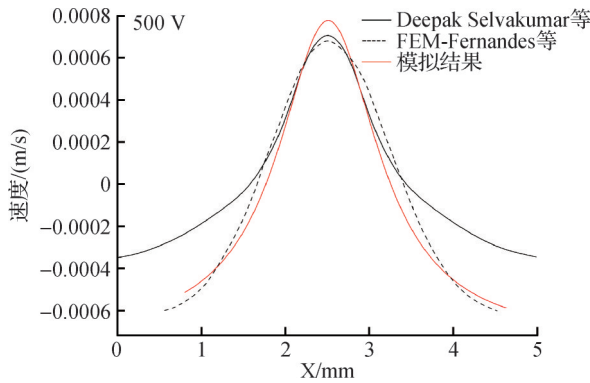


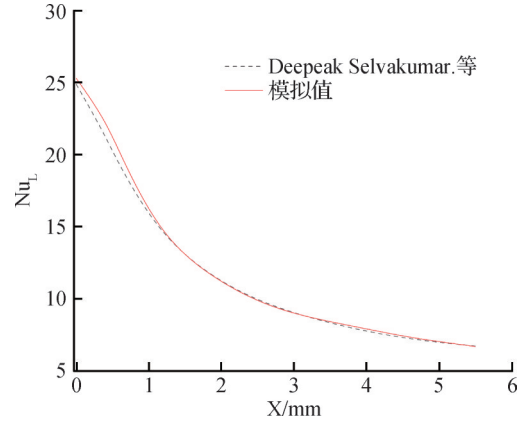
图4 本文结果与文献[24-25]研究数据的相关性对比

Fig.4 Comparison of correlation between present results and data in references [24-25]

3 结果与分析

3.1 涡旋结构分析

图6所示为电极排列方式对介电流体行为的影响。由图6可知,流体呈现出明确的定向流动趋势,始终从较短的高压电极向较长的接地电极方向运动。位于较小高压电极上方的异号电荷层释放出更多自由负电荷,促使其向较宽电极上形成的正异号电荷层迁移。这种自由电荷从短电极向宽电极的运

图5 本文仿真的努塞尔数与文献[24]的实验及数值结果对比
Fig.5 Simulated Nusselt numbers in this work are compared with experimental and numerical data from references [24]

动,体现了流体涡旋朝向较宽电极的流动方向。该涡旋由电场作用于流体内自由电荷,引发离子定向迁移而产生。当电极排列产生不均匀电场时,离子迁移速率的差异会引发局部流体剪切,导致剪切层失稳并最终发展为涡旋结构。

图7所示为电极区域流场的三维涡旋结构截面图。由图7可以观察到速度矢量的变化,突出了电极上方涡流形成的特征,生成具有局部高速梯度特征的小尺度涡旋。

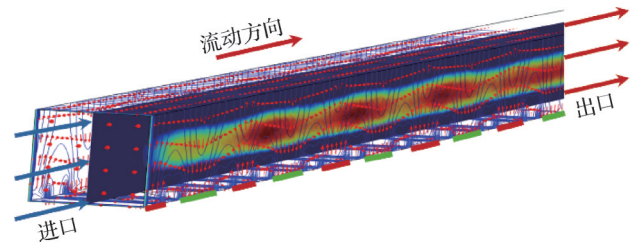


图6 电极区域流场的三维涡旋结构图

Fig.6 Three-dimensional vortex structure diagram of the flow field in the electrode region

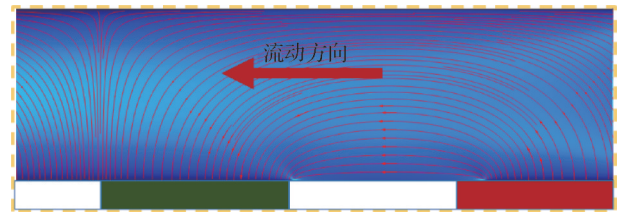


图7 电极区域流场的三维涡旋结构截面图

Fig.7 Cross-sectional view of the three-dimensional vortex structure in the flow field in the electrode region

在图8中可以明显观察到在较小的高压电极附近,每个电极对所对应的垂直涡旋结构中可观测到较强的速度分布。相反,接地电极附近的涡旋结构则更为宽泛,且表现出相对较弱的速度分布。

随着电压升高,涡旋结构变得更加明显。在 500 V 电压时,观测到的涡旋较为细薄,未形成明显的涡核中心,速度分布较低,最大速度接近 0.1 m/s。当电压升至 1 000 V 时,涡旋结构明显变宽,峰值速度达到约 0.2 m/s。这些涡旋开始呈现核状结构,突显了其周围流速显著高于 500 V 条件下产生的涡旋。该现象类似于微通道壁面粗糙度引发的湍流。

在 1 000 V 的初始阶段可观测到对称双涡结构的形成,此时可注意到 500 V 条件下的涡核直径较小,最大切向速度为 0.15 m/s。随着电压升至 1 000 V,空间电荷层开始极化,在主涡周围产生二次环流并出现明显的分层剪切现象,这也导致涡核增大,最大切向速度达到 0.2 m/s。

当电压达到 1 500 V 时,图 8a 表明涡旋的影响范围扩大,峰值速度约为 0.3 m/s。此条件下涡核尺寸逐渐减小,说明涡旋周围的剪切力显著超过体积力与惯性力。值得注意的是,两个涡旋之间出现了流速变化,表现出流型的不稳定性。这种不稳定性的产生是因为 1 500 V 水平代表一个临界转变点,此时电极边缘的电场强度逐渐超过阈值,导致离子迁移率非线性增加。这种非线性特性引发了对称双涡结构失稳,并形成偏心螺旋拓扑结构,在 2 000 V 电压条件下,如图 8b 所示,涡核尺寸未发生显著变化,但涡旋结构的峰值速度达到约 0.4 m/s。与 500 ~1 000 V 区间相比,强电场效应引起涡旋结构内剪切速度的显著变化,同时伴随着涡核的扭曲变形,促使局部形成再循环(再循环速度达到主流的 48%)。这种变化由电场的骤变梯度所引发,导致核区涡量重新分布,进而形成伪涡旋结构。

3.2 流场与压降分析

图 9 所示为 3 种不同电极构型下流体速度的变化。由图 9 可知,在施加 1 500 V 和 2 000 V 电压时,3 种结构中均清晰可见显著的红色高速聚集区,表明存在局部流动增强效应。相比之下,在较低电压(如 500 V 和 1 000 V)下,3 种结构的速度分布更为均匀。通过对比分析,结构 3 展现出最高程度的速度均匀性,仅存在少量蓝色低速条纹和局部高速区域。将结构 3 与另外 2 种结构进行对比时,可以明显看出结构 3 的平均流速始终低于结构 1 和结构 2。值得注意的是,即使在较高电压(1 500 V 和 2 000 V)下,结构 3 仍呈现出相对明显的周期性高速区域。

图 10~12 所示为结构 1 至结构 3 边界层处的流速分布。由图 10~12 可知,随着电压升高,3 种电极排布方式均能有效增强边界层处液体的流速。主要原因是施加的电场与介电流体中的离子相互作用,产生

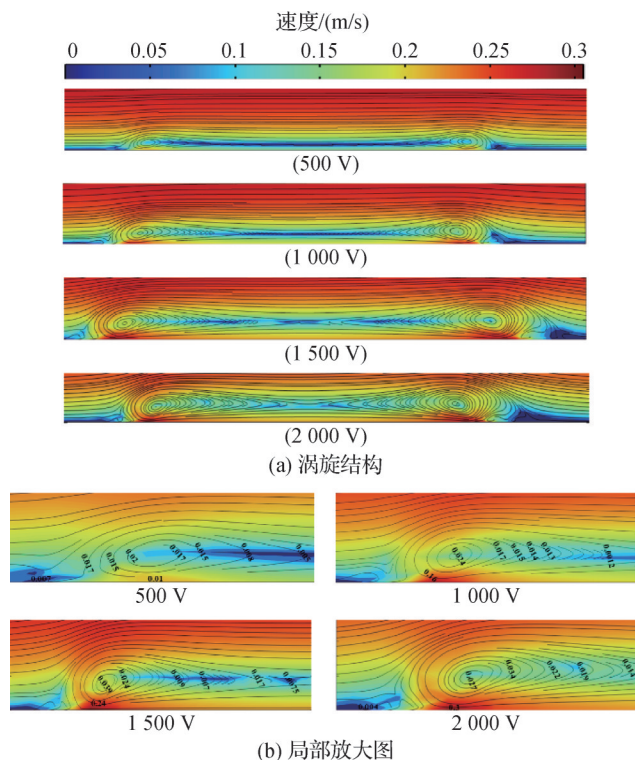


图 8 x - y 平面内的涡旋结构及其局部放大图
Fig.8 Vortex structure in the x - y plane and its partial enlarged view

直接作用于流体本身的体积力。这种诱导产生的体积力间接驱动流体运动,破坏边界层并改变边界层内的速度分布。在电场驱动下,解离离子发生定向迁移,这解释了图 10~12 中流速的周期性波动规律。结合边界层速度剖面分析可知,电极布置方式对近底部区域流体流速影响显著。在相同电压下,结构 1 的边界层速度高于结构 2 和结构 3。其中,结构 1 的最大速度达到 0.4 m/s,结构 2 为 0.35 m/s,而结构 3 仅为 0.26 m/s。相较于入口速度,结构 1 的速度增幅达 100%,结构 2 为 75%,结构 3 仅为 30%。

图 13 所示为电压从 500 V 升至 2 000 V 时,不同电极结构下压降的变化。由图 13 可知,电压通过改变电场力与流动阻力进而影响流体运动,并改变速度场与压力场的分布特性。

在结构 1 中,随着电压升高,电场力驱动流体的作用方式发生改变,导致流速与稳态值产生波动,相应的流动阻力与压力差也出现显著变化。具体而言,结构 1 的压力差随电压增加大幅下降,从约 240 kPa(500 V)降至约 80 kPa(2 000 V),降幅约为 66.7%。结构 1 中电极的周期性递增排布方式,增强了电压升高时电场对流体产生的“助推”或“整流”效应,使得流动阻力显著降低,压力差急剧减小。同时,流体速度的提升与流场的改变降低了流体与壁

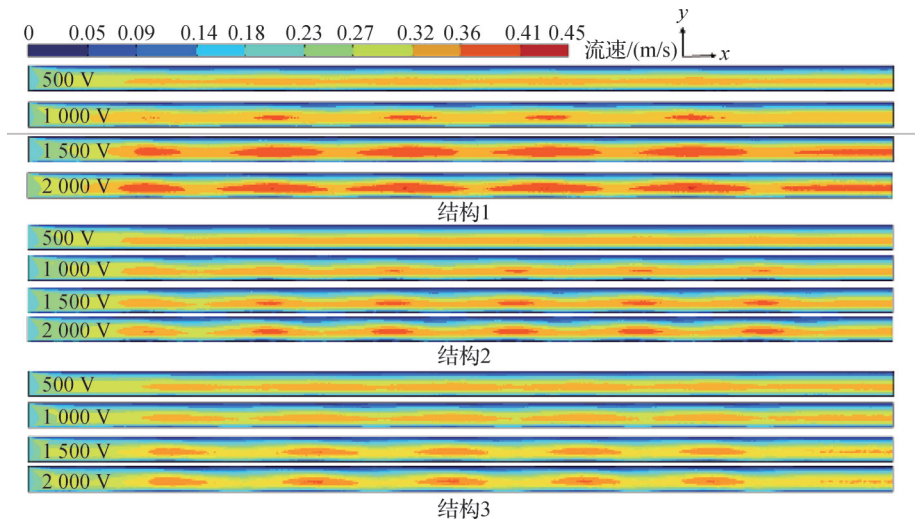


图9 x - y 平面内的速度分布

Fig.9 Velocity distribution in the x - y plane

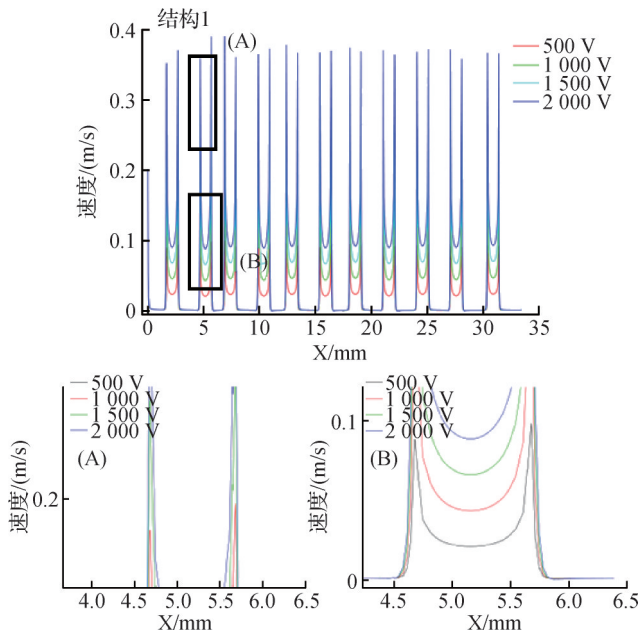


图10 结构1边界层处流速分布

Fig.10 Velocity distribution at the boundary layer of structure 1

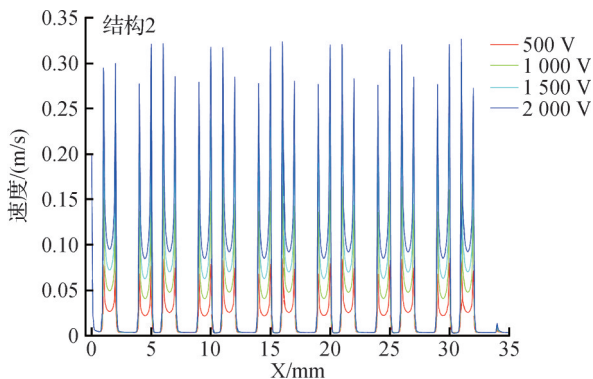


图11 结构2边界层处流速分布

Fig.11 Velocity distribution at the boundary layer of structure 2

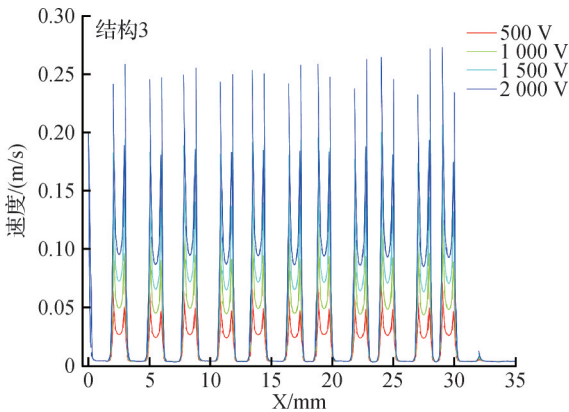


图12 结构3边界层处流速分布

Fig.12 Velocity distribution at the boundary layer of structure 3

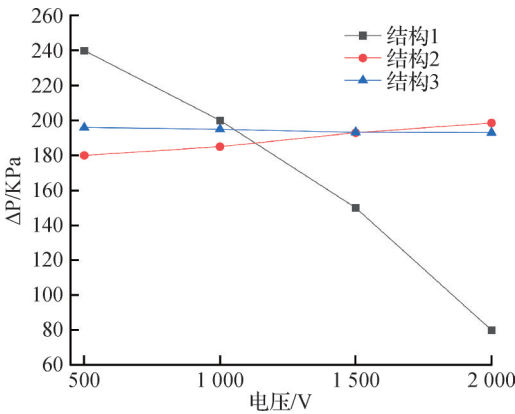


图13 不同电极排布方式下3种结构的压降

Fig.13 Pressure drops under three operating conditions with different electrode arrangements

面的相互作用,促使压力差快速下降。”

在结构2中,压力差随电压上升呈现缓慢增长趋势,从约180 kPa(500 V)升至约200 kPa(2 000 V),增幅约为11.1%。流速波动相对平缓,且流场在入口段

便已充分发展,说明电极均布结构对流体流动阻力的影响较小。流体加速产生的惯性阻力,与电场力引发的阻力变化相互抵消,使得管路压差平稳小幅上升。在结构3中,压力差在不同电压水平下保持相对稳定,始终维持在190~200 kPa。该结构中的电场与流场特性显示,电压对流动阻力的影响甚微,说明当电压变化时,电场力效应、速度调整与流道阻力之间形成了稳定的平衡。因此压力差几乎未发生显著变化,这表明结构3的电极布置方式对减阻的贡献较小。

3.3 温度性能分析

图14所示为3种结构在 x - y 平面内的温度分布。由图14可知,在结构1~3中,温度场呈现出周期性热点分布,且在500 V时出现系统性的热聚焦效应,该效应与系统内部周期性结构特征存在显著关联。该周期性结构使热流在“聚焦与扩散”之间交替,因此热点分布也呈现出与结构一致的周期性特征。该行为的根本原因在于外加电压对底部热边界层的破坏作用,电压升高会加剧该层的退化。

对于结构1、2,热梯度呈现显著平滑化,而结构3则表现出更明显的热峰结构。值得注意的是,即使在相同电压下,结构的具体设计仍能实现对热响应模式的深度调控,这突显了运行变量对热管理性能的关键影响。

在电压为500~1 000 V时,温度场内开始出现局部热扰动(图15)。传热模式从“均匀扩散”转变为“局部积聚”,其特征表现为热点数量较少、区域有限,温度升幅约为5~10 °C。当电压升至1 500~2 000 V时,这些热扰动加剧,表现为底部温度的周期性波动。在相同条件下(忽略电极板自身发热贡献),电极板处温度变化更显著,径向热输运能力得到增强(垂直于主流方向)。该结构可削弱壁面热积聚,优化截面温度均匀性,提升平均传热系数。综上所述,电极板区域传热效果更佳,其核心诱因是 Onsager-Wien 效应产生的涡旋。涡旋通过增强掺混、破坏边界层、诱导二次流及促进湍流等机制,弥补了传统热传导和低速对流在传热速率方面的固有局限,从而实现了传热系数的显著提升。

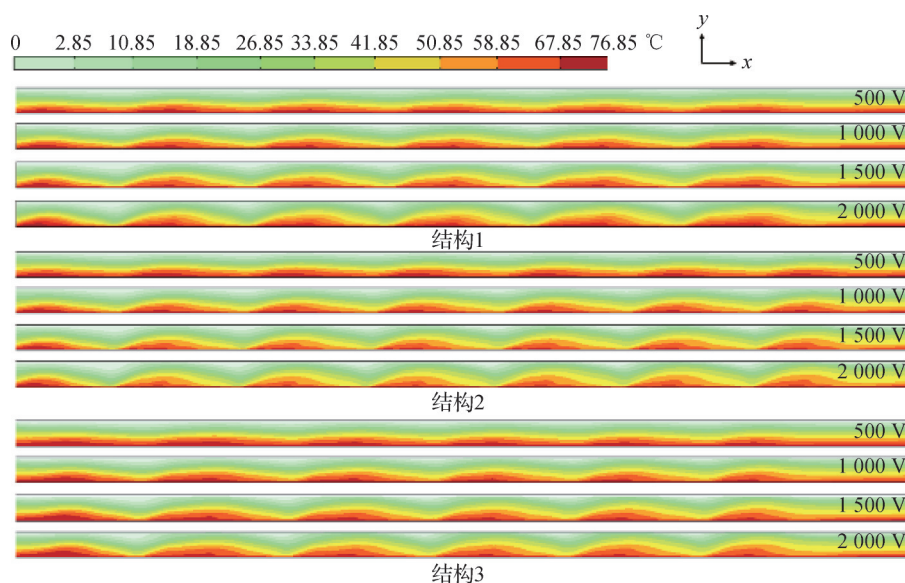


图14 x - y 平面内的温度分布

Fig.14 Temperature distribution in the x - y plane

3.4 综合性能分析

对于3种电极布置结构,其努塞尔数(Nu)均随施加电压的升高呈单调递增趋势。该现象表明,电压对3种结构的强化对流换热均具有显著的放大效应。

3种结构在500~2 000 V电压下的努塞尔数变化如图16所示。由图16可知,结构1的强化效果最显著,增幅达58.82%。说明在给定实验条件下,结构1的电极排布方式对电压变化的响应性最佳。结构2的换热强化性能介于结构1与结构3之间。在电压

为500~2 000 V时,结构2的增幅达到50%。

结构3的努塞尔数在整个实验过程中始终低于结构1和结构2。该现象表明结构3存在固有局限性,包括基准换热能力较弱、传热系数较低以及流道换热条件差。值得注意的是,尽管存在这些不足,结构3的努塞尔数增幅仍达到最高为84.62%。该结果揭示,电压驱动的“强化机制”对结构3的换热性能具有极为显著的提升作用。

综上所述,通过设计底部布置电极板的微通道

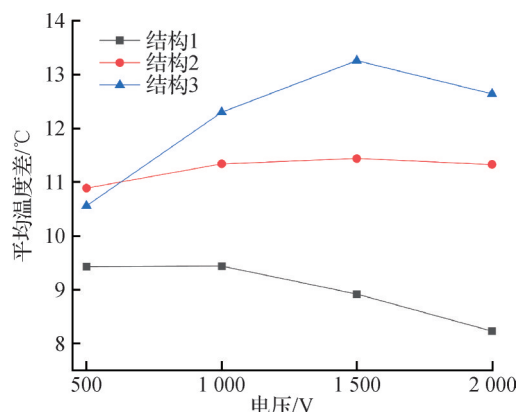


图 15 3 种结构下 500~2 000 V 电压区间的温差对比
Fig.15 Emperature difference comparison under 500~2 000 V for three cases

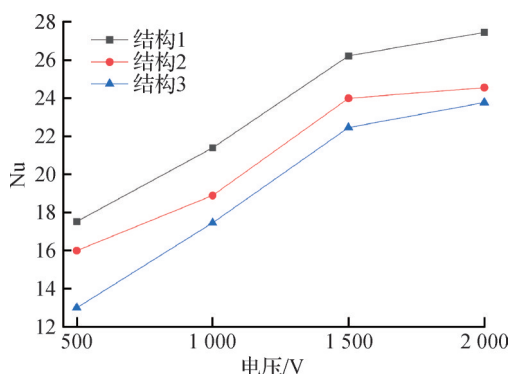


图 16 3 种结构在 500~2 000 V 电压下的努塞尔数变化
Fig.16 Nusselt numbers variation of three structures under 500~2 000 V

结构,可有效降低压力损失,并使温度分布更均匀。具体而言,结构 1 的电极布置形式展现出最低的压力损失和最优的散热性能。但单一参数不足以评估换热器的综合性能,因此本研究采用 PEC 来评估微通道的整体性能。以结构 1 的高压电极板排布方式为参考基准,PEC 值大于 1 表明改进后的集管式微通道散热结构具备更优的综合性能,且 PEC 值越高,综合性能越好。

图 17 所示为 3 种结构的 PEC 值与电压的关系。由图 17 可知,3 种结构的 PEC 值均随电压升高而增大,在 1 500~2 000 V 区间内增长速率逐渐放缓。综合换热效率与功耗来看,3 种结构均在 1 500 V 电压下实现最优换热效果。

在整个电压范围内,结构 1 和结构 2 的 PEC 值始终高于 1,表明通过优化电极板的渐进式排布方式,微通道的性能得到了显著提升。值得注意的是,在 1 500 V 电压下,结构 1 的 PEC 值增幅达到最大值 90%,结构 2 的 PEC 值最大增幅为 70%,结构 3 的 PEC 值最大增幅则为 87.5%。但需注意的是,当电压超过

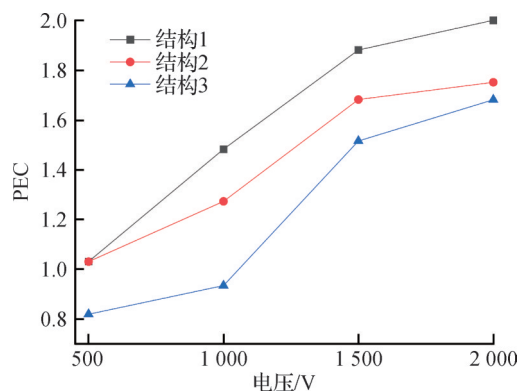


图 17 3 种结构的 PEC 值与电压的关系
Fig.17 Dependence of PEC values of the three structures on the applied voltage

2 000 V 时,3 种结构的 PEC 值、努塞尔数、温差及压力损失均呈现出劣化趋势,继续升高电压会导致微通道整体性能下降。

如前文分析所示,结构 1 的压力损失降幅显著,最高可达 66.7%,且在减阻方面表现突出,彰显了其优异的综合结构性能。综上所述,3 种电极结构均能在低雷诺数下提升矩形微通道换热器的综合性能,这表明在矩形微通道底部增设电极结构是一种有效的设计策略。

4 结论

本研究针对微通道底部电极板排布结构,重点探究了周期性由小到大、均匀分布及周期性由大到小 3 种构型。通过数值模拟方法,系统分析了不同电压条件下介流体的速度分布、压降特性、努塞尔数、温度分布及综合性能的变化规律。主要结论如下:

1) 周期性递增电极构型能显著提升综合性能。相较于均匀构型与周期性递减构型,周期性递增布局的 PEC 值分别提升 9.56%、34%。

2) 采用周期性递增电极构型可使通道温度均匀性提升 20%,有效削减温度梯度。但当电压超过 1 500 V 时,3 种结构的平均温度均出现上升。这主要是分子或原子的电荷分布随电场方向重新调整,粒子间的碰撞与摩擦消耗电能并最终转化为热能,导致高电压下产热量超过散热量。

3) 随着电压升高,周期性递增构型的努塞尔数提升 58.82%,均匀电极构型提升 50%,周期性递减构型提升 84%。但当电压达到 2 000 V 时,努塞尔数曲线趋于稳定,这主要源于高电压下形成的涡旋结构失稳,涡核内部发生极化效应,影响了传热效果。

4) 在微通道底部采用周期性递增构型时,引入的伪粗糙结构使压降降低 66.7%;均匀电极布置结构

则使压降增加 11%;周期性递减构型的压降波动较为平缓。

5)电极附近可观测到速度的周期性波动,短高压电极附近峰值速度变化显著。周期性递增结构的最大速度提升 100%,均匀结构最大速度提升 75%,周期性递减构型的最大流速提升 30%。

在微通道底部引入电极板能有效提升微通道结构的综合性能并改善温度均匀性。值得注意的是,当电压超过 1 500 V 时,3 种结构的散热能力均出现下降,其中周期性递减构型的下降幅度最为显著。周期性递增结构在 0–1 500 V 电压区间内热力性能保持稳定,同时大幅降低压降;均匀构型呈现相对均匀的温度分布,其综合性能仅次于周期性递增结构。因此,进一步优化这两种结构有助于提升其在不同电压水平下的整体性能。

声明:在本作品的准备过程中,作者使用了 COMSOL 进行数值分析。使用此工具的日期和时间 为 2025 年 1 月至 2025 年 12 月,并通过研究主题的数值模型构建指令、数据结果分析导向性提问、模拟参数优化相关诉求、计算结果可视化呈现要求等与本研究直接相关的工具输入内容,获取工具辅助生成的基础文本素材生成了相关文本。使用此工具/服务后,作者已在本作品的相应位置,明确标注了 COMSOL 软件的使用情况及相关素材的生成来源,完全符合相关学术期刊、机构的出版规范,并对出版物的内容承担全部责任。

参考文献

- [1] Zhang Xilong, Dong Wenlin, Liu Jiang, et al. The influence of pin fin structure on the flow and heat transfer characteristics of the manifold microchannel heat sink [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 261: 125119.
- [2] Li Ziyong, Luo Hailiang, Jiang Yuguang, et al. Comprehensive review and future prospects on chip-scale thermal management: Core of data center's thermal management [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 251: 123612.
- [3] Du Liang, Hu Wenbo. An overview of heat transfer enhancement methods in microchannel heat sinks [J]. *Chemical Engineering Science*, 2023, 280: 119081.
- [4] Shen Feng, Xiao Peng, Liu Zhaomiao. Microparticle image velocimetry (μ PIV) study of microcavity flow at low Reynolds number [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2015, 19(2): 403–417.
- [5] Ramadan K M, Kamil M, Tlili I, et al. Analysis of thermal creep effects on fluid flow and heat transfer in a microchannel gas heating [J]. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2021, 13(6): 061011.
- [6] Alam T, Kim M H. A comprehensive review on single phase heat transfer enhancement techniques in heat exchanger applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 813–839.
- [7] Darabi J, Rada M, Ohadi M, et al. Design, fabrication, and testing of an electrohydrodynamic ion-drag micropump [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, 11(6): 684–690.
- [8] Yu He, Li Hongru. A conditional factor VAE model for pump degradation assessment under varying conditions [J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 100: 106992.
- [9] Oda T, Aoyama M, Ohkubo T, et al. Electrohydrodynamic pumping effect in dielectric liquid using a non-uniform traveling field [C]//*Proceedings of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena-CEIDP '96*. Millbrae, CA, USA. IEEE, 2002: 662–665.
- [10] 曹生现, 颜培聪, 王恭, 等. 非匀强电场对颗粒污垢的抑垢特性 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(15): 6448–6454. (Cao Shengxian, Yan Peicong, Wang Gong, et al. Dirt inhibition characteristics of a variety of particles by non-uniform electric field [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(15): 6448–6454.)
- [11] Jungmann F, Onyeagusi F C, Teiser J, et al. Charge transfer of pre-charged dielectric grains impacting electrodes in strong electric fields [J]. *Journal of Electrostatics*, 2022, 117: 103705.
- [12] Patel V K, Robinson F, Seyed-Yagoobi J, et al. Terrestrial and microgravity experimental study of microscale heat-transport device driven by electrohydrodynamic conduction pumping [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2013, 49(6): 2397–2401.
- [13] Patel V K, Seyed-Yagoobi J, Robinson F, et al. Effect of gravity on electrohydrodynamic conduction driven liquid film flow boiling [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2016, 30(2): 429–437.
- [14] Vázquez P A, Seyed-Yagoobi J, Traoré P, et al. EHD pumping in flexible conic nozzle [C]//*2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*. Roma, Italy. IEEE, 2019: 1–4.
- [15] Gao Xuelin, Bao Xingdong, Pang Songjian, et al. The electrohydrodynamic enhancement of heat transfer on interdigitated electrodes by a charge injection pump [J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(3): 033612.
- [16] Vázquez M B, Polanco M A. On the continuity equation in space-time algebra: multivector waves, energy-momentum vectors, diffusion, and a derivation of Maxwell equations [J]. *Mathematics*, 2024, 12(14): 2270.

- [17] Temam R. Navier-Stokes Equations [M]. Providence, R. I.: AMS Chelsea Pub., American Mathematical Society, 2001.
- [18] Park H M, Lee J S, Kim T W. Comparison of the Nernst-Planck model and the Poisson-Boltzmann model for electroosmotic flows in microchannels [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2007, 315(2): 731-739.
- [19] Peng X F, Peterson G P, Wang B X. Heat transfer characteristics of water flowing through microchannels [J]. Experimental Heat Transfer, 1994, 7(4): 265-283.
- [20] 张乾坤, 李红艳, 吕碧纯, 等. 叶脉仿生微通道换热器流动与传热特性的数值研究[J]. 制冷学报, 2025, 46(4): 52-60. (Zhang Qiankun, Li Hongyan, Lü Bichun, et al. Numerical study of thermal-hydraulic characteristics of vein biomimetic microchannel heat exchanger [J]. Journal of Refrigeration, 2025, 46(4): 52-60.)
- [21] 刘小军, 傅德彬, 牛青林, 等. 燃气射流冲击传热特性的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(2): 229-235. (Liu Xiaojun, Fu Debin, Niu Qinglin, et al. Numerical simulation of heat transfer for exhausted gases jet impinging [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(2): 229-235.)
- [22] He Siyuan, Ben Mrad R. Design, modeling, and demonstration of a MEMS repulsive-force out-of-plane electrostatic micro actuator [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2008, 17(3): 532-547.
- [23] 陈超伟, 王鑫煜, 辛公明. 多孔鳍歧管微通道流动传热特性研究[J]. 制冷学报, 2022, 43(3): 62-70. (Chen Chaowei, Wang Xinyu, Xin Gongming. Flow and heat transfer characteristics in manifold microchannel with porous fins [J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(3): 62-70.)
- [24] Deepak Selvakumar R, Kong D, Kyun Lee H, et al. Enhanced heat transfer in a microchannel with pseudo-roughness induced by Onsager-Wien effect [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 233: 121122.
- [25] Steinke M E, Kandlikar S G. Single-phase liquid friction factors in microchannels [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006, 45(11): 1073-1083.

通信作者简介

张西龙,男,教授,青岛理工大学机械与汽车工程学院,18681955545, E-mail: zhangxilong@qut.edu.cn 研究方向: 芯片及大功率电子器件冷却, 新能源动力系统技术, 新能源汽车热泵空调技术, 纳米流体传热传质特性。

About the corresponding author

Zhang Xilong, Male, Professor School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology +8618681955545 Email: zhangxilong@qut.edu.cn. Research Interests: Cooling of chips and high-power electronic devices, new energy power system technologies, heat pump air conditioning technologies for new energy vehicles, heat and mass transfer characteristics of nanof