第 60 卷 第 11 期 西 安 交 通 大 学 学 报 Vol. 60 No. 11
2026 年 11 月 JOURNAL OF XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY Nov. 2026

# 新型浴缸型扰流结构冷却流道质子交换膜燃料电池热管理性能提升研究

李济仁[1,2]，高建民[1,2]，徐亮[1]，席雷[1,2]，梁锋[1]，周云龙[1]，冉泓鑫[1]，
林宏伟[1]，杨涛[3]，李云龙[1]

（1. 西安交通大学机械学院，710049，西安；2. 国家市场监督管理总局技术创新中心(终端用氢装备)，710049，西安；3. 陕西省特种设备检验检测研究院节能与碳管理研究中心，710048，西安）

**摘要**：质子交换膜燃料电池的高效运行对工作温度极为敏感，现有冷却流道设计常因强化传热与抑制流动阻力之间的矛盾，难以同时满足高热流密度下的散热需求与电池内部温度的均匀性要求。针对该瓶颈引入集成浴缸型凸起扰流结构的第五代质子交换膜燃料电池(PEMFC)新型冷却通道设计，构建电化学-热-流多物理场的全电池数值模型并进行多物理场耦合分析，系统研究了扰流结构长度比 $L_TL^{-1}$、间距比 $P_fL^{-1}$ 和宽度比 $W_TW^{-1}$ 对冷却流道传热性能 $Nu$、流动阻力 $f$ 及电池内部无量纲温度均匀性 $\sigma$ 的影响规律。研究结果表明，浴缸型凸起扰流结构通过调控流道内涡旋结构、二次流强度和边界层扰动显著提升燃料电池热管理性能，且各结构参数对电池热管理性能影响呈现复杂非线性趋势，综合传热与流动阻力分析，当 $L_TL^{-1}$ 为 0.3、$P_fL^{-1}$ 为 0.22、$W_TW^{-1}$ 为 0.1 附近时为性能最优设计区间，此时 $f$ 相较标准情况仅增加了 1.5%，而 $Nu$ 增加了 21.01%，$\sigma$ 维持在 0.993。该研究揭示了几何扰动强化传热与流动阻力之间的协同机制，可以为兼具高效热管理与低流动阻力的下一代燃料电池冷却流道设计提供数据和方法支撑。

**关键词**：质子交换膜燃料电池；多物理场耦合；电池热管理；新型冷却通道

**中图分类号**：TK91 **文献标志码**：A

**DOI**：10.7652/xjtuxb202611010 **文章编号**：0253-987X(2026)11-0108-13

# Study on Thermal Management Performance Enhancement of Proton Exchange Membrane Fuel Cells Using Cooling Channels with Novel Bathtub-Shaped Turbulators

LI Jiren[1,2], GAO Jianmin[1,2], XU Liang[1], XI Lei[1,2], LIANG Feng[1], ZHOU Yunlong[1], RAN Hongxin[1], LIN Hongwei[1], YANG Tao[3], LI Yunlong[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. National Market Supervision Administration Technology Innovation Centre (Hydrogen End-Use Equipment), Xi'an 710049, China; 3. Shaanxi Special Equipment Inspection Institute, Xi'an 710048, China)

**Abstract**: To address the demand for efficient thermal management of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs), this study investigates the enhancement of thermal management performance using cooling channels equipped with novel bathtub-shaped convex tabulators. A

收稿日期：2026-03-04。 作者简介：李济仁(2000—)，男，博士生；席雷(通信作者)，男，副研究员，硕士生导师。
基金项目：陕西省市场监督管理局科技计划资助项目(40120240331)；国家重大科技专项资助项目(2025ZD1701101)；西安交通大学青年人才支持计划资助项目(JX6J050)。
网络出版时间：2026-09-18 网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20260918.1455.002

full-cell metaphysics coupled model integrating electrochemistry, heat transfer, and fluid flow is developed to systematically investigate the effects of the tabulators' length ratio ($L_T L^{-1}$), spacing ratio ($P_f L^{-1}$), and width ratio ($W_T W^{-1}$) on the heat transfer performance ($Nu$), flow resistance ($f$) of the cooling channels and the internal temperature field uniformity ($\sigma$) of the cell. Results indicate that the bathtub-shaped convex turbulators significantly enhance the thermal management performance of the fuel cell by modulating vortex structures, secondary flow intensity, and boundary layer disturbance within the channel. Furthermore, the effects of various structural parameters on thermal management performance exhibit complex nonlinear trends. A comprehensive analysis of heat transfer and flow resistance reveals that the optimal design range is achieved when $L_T L^{-1}$ is approximately 0.3, $P_f L^{-1}$ is around 0.22, and $W_T W^{-1}$ is near 0.1. Under these conditions, f increases by only 1.5% compared to the standard case, while $Nu$ increases by 21.01%. This study reveals the synergistic mechanism between heat transfer enhancement and flow resistance induced by geometric disturbances, providing data and methodological support for the design of next-generation PEMFC cooling channels that require both high-efficiency thermal management and low flow resistance.

**Keywords**: proton exchange membrane fuel cells; metaphysics coupled; fuel cell thermal management; novel cooling channel

作为极具前景的无碳能源载体，氢能在燃烧过程中仅产生水，且其热值高于传统化石燃料[1]，是理想的清洁能源载体。将氢能转化为电能的核心装置是氢燃料电池[2]。氢燃料电池的电极则不会随着反应的进行而消耗，只要不断供给氧化剂与燃料，就能产生源源不断的电流[3]。氢燃料电池具有能源转换率高、无污染和寿命高等优点，拥有广阔的应用前景[4]。

在众多燃料电池中，第五代质子交换膜燃料电池(PEMFC)由于启动最快、寿命最长等特点，广泛用于无人机、汽车等行业[5]。PEMFC 的能量转换效率通常在 40%～60%之间，大部分剩余能量以热能形式散失。PEMFC 的电化学性能对工作温度呈现为显著敏感性[6]，高效热管理技术对于保障氢燃料电池的稳定运行、提升其整体性能以及推动整个氢能产业链的发展至关重要。

冷却流道设计是影响燃料电池热管理的阀门。冷却通道通过提供适宜的传热特性，使冷却介质快速带走电池产热并维持其内部适宜温度下热平衡。此外，冷却通道的布局还能确保膜电极组件内部不同区域获得充分冷却，从而维持电池内部的温度均匀性[7]。大量研究聚焦于冷却通道的结构设计，主要可分为 3 类：冷却通道整体优化设计、改变通道截面设计以及通道填充物设计。Zhang 等[8]为质子交换膜燃料电池创新设计了椭圆冷却通道并研究了其热传递与流动动力学效应。Chen 等[9]研究了 PEMFC 的冷却性能，对比了不同双极板设计方案。Li 等[10]强调了平板闭环脉动热管在 PEMFC 冷却中壳体导热系数与流动阻力的重要性。Deng 等[11]通过三维仿真模型研究了液冷 PEMFC 堆的传热传质过程。Ma 等[12]研究了氧化铝绝缘涂层对 PEMFC 冷却通道的影响。Yu 等[13]采用三维多物理场数值模型评估了不同阳极流场结构对燃料电池水管理与热管理的影响。结果表明，直通通道能为风冷燃料电池提供最佳温度控制和最高功率密度。Henriques 等[14]在传统平行冷却流场基础上引入侧向通道设计。Mohamed 等[15]研究了阴极平行冷却流道几何参数对温度均匀性、热响应及效率的影响。Lee 等[16]提出相分离流场新设计，将冷却空气通道与反应气体通道分离。该设计提升了风冷燃料电池的废热清除效率，并确保膜组保持充分润湿。Baik 等[17]在双极板肋区提出多孔结构设计，该方案解决了阳极肋下方氧气不足问题，提升了氧气传输效率、液态水清除及氧气分布性能。Qiu 等[18]通过数值模型分析了风冷燃料电池中的传热传质机制，并提出波浪形阴极流道底面设计。Zhao 等[19]指出改变直通道弯折角对空气冷却燃料电池性能影响显著。Yin 等[20]发现双极板阳极侧增设边缘通道可提升冷却效率并缓解膜电极脱水问题。Lim 等[21]基于平行流场提出截面堵塞设计，有效提升了热量移除与膜电极保水能力。Peng 等[22]针对 PEMFC 建议于反应气体通道出口处嵌入多孔介质，可增强空气

冷却燃料电池的保水与冷却效率。Wang 等[23]指出，在高电流密度条件下，采用金属泡沫流场的空气冷却燃料电池表现优于其他流场结构。

上述研究从多个维度对燃料电池的反应物通道与冷却通道进行了设计与优化。然而，从冷却通道换热能力这一角度出发，深入论证其对燃料电池整体及关键局部区域热均匀性的作用机制仍有待进一步探究。此外，对于微通道散热情况，内置扰流结构的冷却通道已被证明其高效的散热性能，在超高热流密度的芯片[24]，极限工况的汽轮机和航空发动机上已被集成使用[25]，但其在燃料电池领域的应用还需进一步探索。本文基于文献[7]中提出的浴缸型凸起扰流冷却通道进行进一步研究，将其与 PEMFC 全电池多物理场模型耦合，构建带浴缸型凸起扰流结构的 PEMFC 冷却流道参数化模型，系统分析并量化了长度比、间距比、宽度比对燃料电池热管理性能的非线性影响机制。

## 1 研究方法

### 1.1 几何模型

图 1 给出了带浴缸型凸起冷却流道的燃料电池几何模型，该模型主要包括双极板(BPs)、冷却通道(CCs)、气体通道(GCs)、气体扩散层(GDLs)、催化剂层(CLs)和质子交换膜(PEM)，除质子交换膜外的部件在阳极和阴极两侧对称排列，质子交换膜位于阳极和阴极组件之间的中心位。

本研究利用提出的浴缸形凸起扰流器的流线型几何结构来降低流动阻力并增强传热效果。与其余复杂的三维扰流通道设计相比，这种配置在不显著增加压降的情况下，妥善改善了冷却剂的分布和热性能。缸形凸起扰流器的详细尺寸如图 1 所示，相应的参数值列于表 1 中。

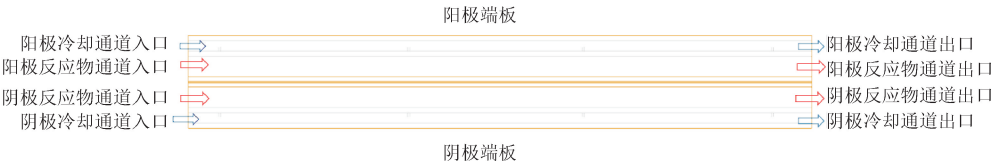



图 1 浴缸型凸起扰流冷却通道 PEMFC 几何模型

Fig. 1 Geometric model of PEMC with bathtub-type turbulator cooling channel

表 1 几何模型建模参数

Table 1 Geometric model parameters

| 几何参数 | 数值 |
|---|---|
| 双极板长度/mm | 30 |
| 双极板宽度/mm | 2 |
| 双极板高度/mm | 2 |
| 扩散层高度/mm | 0.200 |
| 催化层高度/mm | 0.010 |
| 质子交换膜高度/mm | 0.050 |
| 冷却通道宽度/mm | 1 |
| 冷却通道高度/mm | 0.500 |
| 反应物通道宽度/mm | 1 |
| 反应物通道高度/mm | 1 |
| 浴缸凸起长度/mm | 9，10，11，12 |
| 浴缸凸起宽度/mm | 0.200，0.250，0.300，0.350，0.400 |
| 浴缸凸起间距/mm | 2，3，4，5，6 |
| 浴缸凸起深度/mm | 0.150 |

研究的 PEMFC 几何模型结构示意图如图 2 所示。本研究对浴缸凸起扰流结构的长度 $L_T$、宽度 $W_T$ 和间距 $P_f$ 做出分析，采用无量纲分析以增加研究普适性，记双极板长度为 $L$，冷却通道宽度为 $W$，讨论不同浴缸凸起扰流结构参数对电池性能的影响，分别为无量纲长度比 $L_T L^{-1}$、浴流宽度比 $W_T W^{-1}$ 以及相邻间距比 $P_f L^{-1}$。采用田口设计进行方案设计，运行共计 13 组计算算例，其计算安排如表 2 所示。采用通道平均努塞尔数 $Nu$ 衡量冷却通道换热性能，范宁摩擦因子 $f$ 衡量冷却通道流动性能，无量纲温度均匀性 $\sigma$[26] 衡量燃料电池内部热均匀性。

$Nu$ 表达为对流换热热量与传导换热热量的比值，$Nu$ 越大，对流换热的贡献越显著，换热效率越高，其定义如下

$$Nu = \frac{hD}{k} \tag{1}$$

式中：$h$ 为换热系数；$D$ 为通道水力直径；$k$ 为导热系数。

$f$ 为衡量流动阻力损失的核心无量纲参数，其

值越大表示通道压降越大，其定义为

$$f=\frac{2\Delta PD}{\rho L\bar{u}^2} \tag{2}$$

式中：$\Delta P$ 为通道入出口压降；$\rho$ 为冷却流体密度；$\bar{u}$ 为流体平均速度。

无量纲温度均匀性 $\sigma$ 作为衡量器件热管理均匀性的核心指标，其值越大表明检测位置温度均匀性越好，其定义为

$$\sigma=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}[((\varphi_i-\bar{\varphi}_a))A_i]}{2|\bar{\varphi}_a|\sum_{i=1}^{n}A_i} \tag{3}$$

式中：$\varphi_i$ 表示测量点的温度；$A_i$ 为检测位置面积；$\bar{\varphi}_a$ 为测量点平均温度，其值越大表明温度均匀性越好。在本研究中，该指标用于衡量质子交换膜及阴极催化层的温度均匀性。

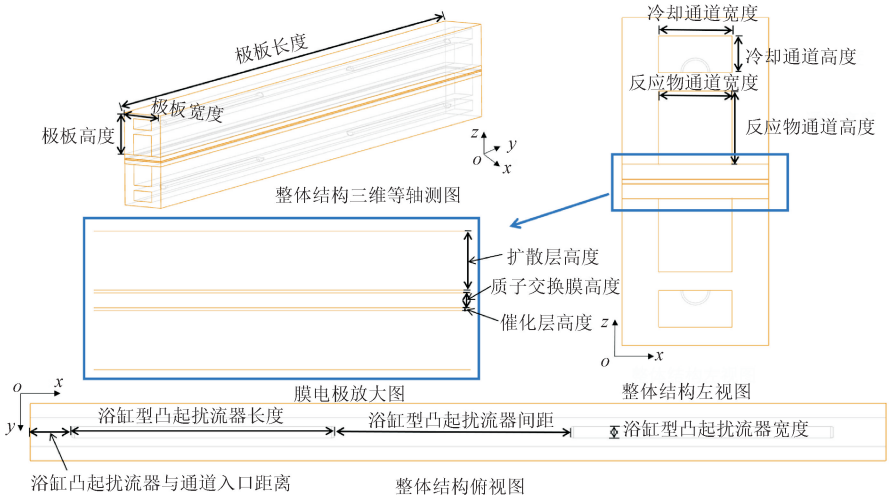



图 2　浴缸型凸起扰流冷却通道几何参数示意图

Fig. 2　Diagram of geometric parameters for bathtub-type protruding turbulent cooling channels

表 2　建模及算例安排

Table 2　Research calculation case

| 算例 | $L_TL^{-1}$ | $W_TW^{-1}$ | $P_fL^{-1}$ |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.300 | 0.150 | 0.170 |
| 2 | 0.330 | 0.150 | 0.170 |
| 3 | 0.350 | 0.150 | 0.170 |
| 4 | 0.370 | 0.150 | 0.170 |
| 5 | 0.400 | 0.150 | 0.170 |
| 6 | 0.400 | 0.100 | 0.170 |
| 7 | 0.400 | 0.125 | 0.170 |
| 8 | 0.400 | 0.175 | 0.170 |
| 9 | 0.400 | 0.20 | 0.170 |
| 10 | 0.300 | 0.150 | 0.120 |
| 11 | 0.300 | 0.150 | 0.140 |
| 12 | 0.300 | 0.150 | 0.190 |
| 13 | 0.300 | 0.150 | 0.220 |

### 1.2　数值方法建立

质子交换膜燃料电池的数值分析是一个多尺度复杂系统，为精确模拟 PEMFC 运行状态，需建立多个数学模型。本研究基于 ANSYS Fluent 18.2 通过有限体积法对控制方程进行离散化数值模拟，采用全隐式耦合多网格求解器对三维雷诺平均纳维-斯托克斯方程进行求解。扩散项、源项和对流项均采用二阶空间方案进行逼近，以确保数值精度。设定收敛标准为 RMS 标准，对连续性收敛残差设定标准为 $10^{-4}$，其余收敛残差收敛至 $10^{-6}$，在上述设定条件下计算，约 1 000 步后检测阴极催化层及质子交换膜交界面平均温度、阴阳极冷却通道出口面平均温度、进出口压力差波动不超过 1% 视为收敛。针对各类反应机制建立的数学模型及其主要控制方程如下。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial(x_i\varepsilon\rho)}{\partial t}+\nabla\cdot(\varepsilon\rho\boldsymbol{v})=S_m \tag{4}$$

式中：$x_i$ 表示气体组分的质量分数，$i=1,2,\cdots,N$，其中 $i$ 为 1 时表示气体组分为氢气，$i$ 为 2 时组分为氧气，$i$ 为 3 时组分为水蒸气；$\boldsymbol{v}$ 为当地流体微元的平均速度矢量；$\rho$ 为流体密度；$\varepsilon$ 为孔隙率；$S_m$ 为质量源项。

PEMFC 模型内的所有流体均被归类为牛顿流体。通过应用纳维-斯托克斯方程，动量守恒方程推导如下

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{v})=-\nabla p+\nabla(\mu^{\mathrm{eff}}\nabla v)+S_{\mathrm{u}} \tag{5}$$

式中：$p$ 为流体压力；$\mu^{\mathrm{eff}}$ 为混合物的有效动力黏度；$S_{\mathrm{u}}$ 为动量源项，该项在不同计算区域存在差异，气体通道中的动量源项为

$$S_{\mathrm{u}}=0 \tag{6}$$

对于扩散层和催化剂层中的空隙，其动量源项为

$$S_{\mathrm{u}}=-\frac{\mu}{K}\varepsilon v \tag{7}$$

式中：$K$ 代表气体扩散层和催化剂层的渗透率。

质子交换膜燃料电池的能量守恒方程可表述如下

$$(\rho v)\frac{\partial T}{\partial t}+(\rho c_p)(v\nabla T)=\nabla(k\nabla T)+S_{\mathrm{e}} \tag{8}$$

式中：$c_p$ 为比定容热容；$T$ 为温度；$S_{\mathrm{e}}$ 为能量源项。

燃料电池内部各组分气体遵循组分守恒方程，可表示为

$$\partial\frac{\varepsilon\rho x_i}{\partial t}+\nabla(v\varepsilon\rho x_i)=\nabla(v\varepsilon\rho D_i^{\mathrm{eff}}\nabla x_i)+S_{\mathrm{s},i} \tag{9}$$

式中：$S_{\mathrm{s},i}$ 表示 $i$ 组分质量分数的源项；$D_i^{\mathrm{eff}}$ 称为二元气体的有效扩散系数。

采用 FLUENT 燃料电池单元模块内置的电化学源项模型，加载包括 Butler-Volmer 方程描述的活化过电位、欧姆损失及浓差极化修正。电荷守恒方程可表示为

$$\nabla\cdot(k_{\mathrm{s}}^{\mathrm{eff}}\nabla\varphi_{\mathrm{s}})=S_{\varphi_{\mathrm{s}}} \tag{10}$$

$$\nabla\cdot(k_{\mathrm{m}}^{\mathrm{eff}}\nabla\varphi_{\mathrm{m}})=S_{\varphi_{\mathrm{m}}} \tag{11}$$

式中：$k_{\mathrm{s}}^{\mathrm{eff}}$、$k_{\mathrm{m}}^{\mathrm{eff}}$ 分别为固相电导率和离子电导率；$\varphi_{\mathrm{s}}$、$\varphi_{\mathrm{m}}$ 分别表示固相电位和离子电解质相电位；$S_{\varphi_{\mathrm{s}}}$、$S_{\varphi_{\mathrm{m}}}$ 分别为固相和离子传输电流的源项。

### 1.3 边界条件

冷却通道的入口边界条件定义为恒温速度入口，出口边界条件设定为压力出口；双极板壁面维持在 353.15 K 恒温状态，以模拟质子交换膜燃料电池工作条件下的热量产生[7]。数值模拟具体操作条件见表 3。

表 3 操作及边界条件

Table 3 Operation and boundary condition

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 操作温度/K | 353.150 |
| 反应物通道入口温度/K | 353.150 |
| 冷却通道入口温度/K | 343.150 |
| 反应物/冷却通道出口压强/Pa | 0 |
| 阳极相对湿度/% | 100 |
| 阴极相对湿度/% | 100 |
| 阴极操作压力/Pa | 101 325 |
| 阴极氧气计量系数比 | 3 |
| 阳极氢气计量系数比 | 3 |
| 扩散层孔隙率 | 0.700 |
| 催化层孔隙率 | 0.400 |
| 质子交换膜孔隙率 | 0.300 |
| 扩散层固有渗透率/$m^2$ | 30 |
| 催化层固有渗透率/($10^{-13}$ $m^2$) | 2 |
| 操作压力/Pa | 101 325 |
| 法拉第常数 | 96 487 |
| 参考电流密度/(A·$m^{-2}$) | 10 000 |
| 交换系数 | 1.500 |
| 氢气参考物质的量浓度/(mol·$m^{-3}$) | 54.600 |
| 氧气参考物质的量浓度/(mol·$m^{-3}$) | 3.390 |

研究选用液态水作为冷却介质，研究温度范围波动小于 20 K，其流体特性假定为 343.15 K 下的恒物性以模拟实际工作条件。冷却水性质见表 4[27]。

表 4 冷却水物性参数

Table 4 Material properties of cooling water

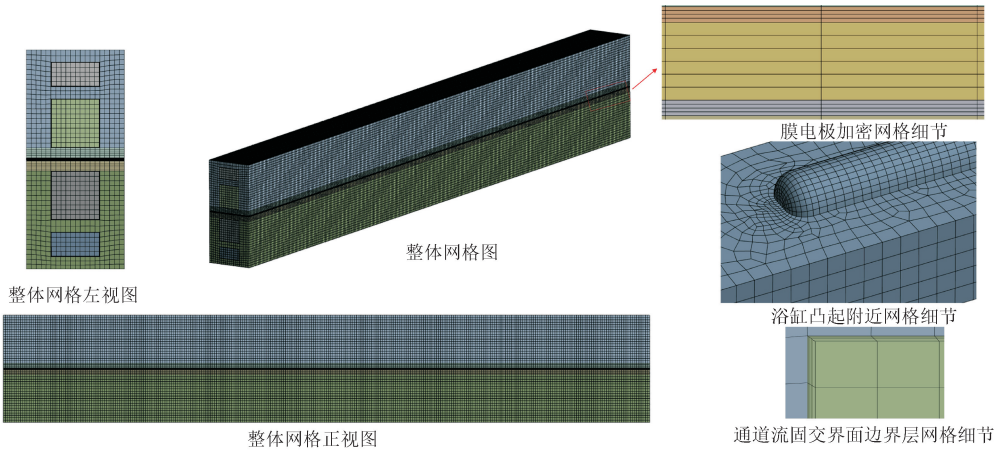
| 物性参数 | 数值 |
|---|---|
| 密度/(kg·$m^{-3}$) | 978.110 |
| 比定容热容/(J·$kg^{-1}$·$K^{-1}$) | 4 181 |
| 热导率/($W^{-1}$·$m^{-1}$·$K^{-1}$) | 0.662 |
| 动力学黏度/(Pa·s) | 0.000 354 |
| 入口雷诺数 | 2 520 |

由于浴缸式阵列的扰动效应导致通道内复杂流体混合，且入口雷诺数处于层流到湍流的过渡范围内，采用能较好地捕捉低雷诺数及过渡流区域的流动转捩与分离现象的 SST $k$-$\omega$ 模型作为湍流模型[27]。在 SST $k$-$\omega$ 模型中的近壁面处理采用近壁面近似。

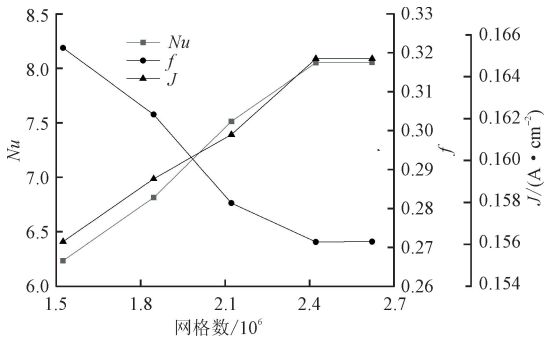
### 1.4　模型验证

研究基于 ANSYS meshing 多区域算法构建模型六面体网格，采用尺寸单元控制法对催化层、扩散层及质子交换膜的计算区域进行网格细化，保证近壁面网格第一层无量纲距离 $y^+$ 小于 1，网格划分后，最小正交质量约为 0.98，网格模型如图 3 所示。

研究采用燃料电池正负极冷却通道的平均 $Nu$、摩擦因子 $f$ 及电流密度 $J$ 作为网格质量评估指标，选取入口雷诺数 $Re=1\ 260$ 作为验证工况。基于冷却通道、气体通道及双极板的不同尺寸控制构建 5 套网格数各异的网格模型，其结果如图 4 所示。从图 4 可评估出网格 4 与网格 5 的差异低于 1%，表明网格 4 已具备足够精度用于数值计算。



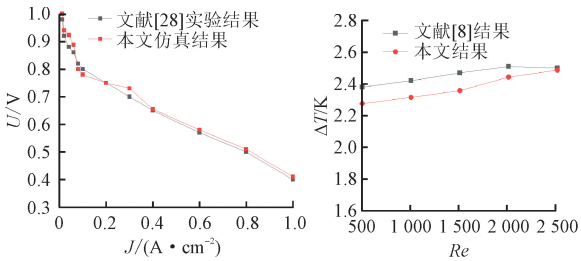

(a)网格模型




(b)网格无关性验证

图 3　网格模型验证

Fig. 3　Grid model verification




(a)电化学可行性验证　　(b)流动传热可行性验证

图 4　数值模拟方法验证

Fig. 4　Validation of the numerical simulation method

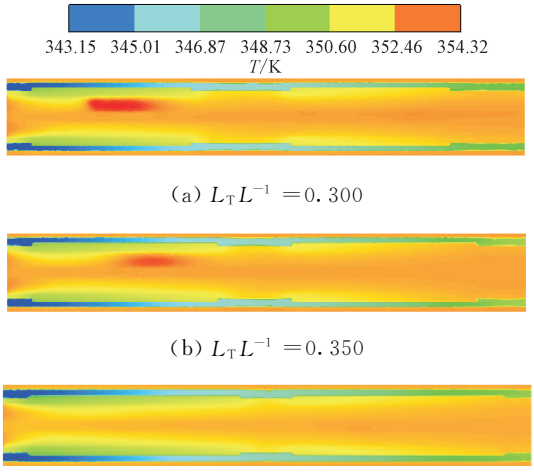
为验证数值模拟方法的精度，将基础平行气道 PEMFC 模型的计算结果与 Ozen 等[28]在 100%相对湿度、电流密度从 0.1 A·cm$^{-2}$ 增加到 1.0 A·cm$^{-2}$ 条件下的实验数据进行对比。如图 4(a)所示，当电流密度约为 0.3 A·cm$^{-2}$ 时，曲线最大偏差为 4.3%，验证了模型的电化学有效性。此外，通过将质子交换膜及阴极催化层温差 $\Delta T$ 与数值结果[8]进行对比，结果如图 4(b)所示，可知最大偏差约为 4.37%，同样验证了构建数值模型的传热有效性。

## 2　结果与讨论

### 2.1　浴缸凸起扰流结构长度对燃料电池热管理性能影响

图 5 分别展示了浴缸凸起扰流结构 $L_T L^{-1}$ 分别

为 0.300、0.350、0.400 情况下燃料电池流向整体温度云图。观察可知：在 $L_TL^{-1}$ 为 0.300 时，燃料电池阳极反应物通道入口前半程有局部温度过高区域；当 $L_TL^{-1}$ 增加至 0.350 时，局部高温区域沿流向有一定后移，且温度降低；当 $L_TL^{-1}$ 增加至 0.400 时，阳极反应物通道温度进一步降低，反应物通道温度更加均匀。




(a) $L_TL^{-1}$ =0.300

(b) $L_TL^{-1}$ =0.350

(c) $L_TL^{-1}$ =0.400

图 5 不同 $L_TL^{-1}$ 下流向温度分布云图

Fig. 5 Temperature distribution for different $L_TL^{-1}$ at streamwise direction

图 6 展示了不同 $L_TL^{-1}$ 下通道平均努塞尔数 $Nu$ 变化趋势。观察可知：$Nu$ 随 $L_TL^{-1}$ 呈现先下降后上升的趋势，当 $L_TL^{-1}$ 从 0.300 上升至 0.350 时，$Nu$ 从 16.18 下降至 12.78，降幅约为 21.01%；而当 $L_TL^{-1}$ 从 0.35 上升至 0.40 时，$Nu$ 从 12.78 上升至 19.25，增幅约为 50.63%。

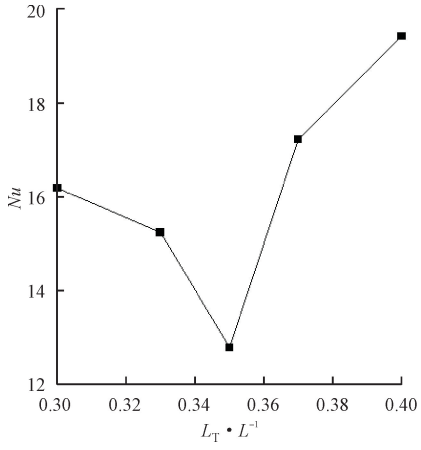
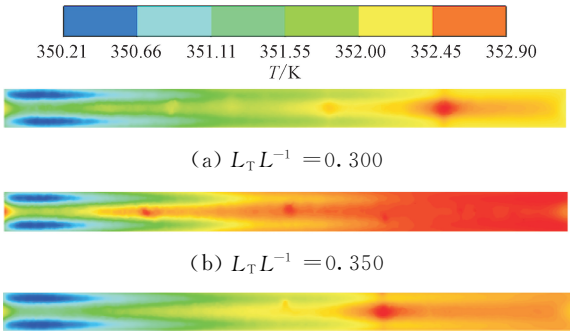



图 6 不同 $L_TL^{-1}$ 下冷却通道 $Nu$

Fig. 6 $Nu$ of cooling channels at different $L_TL^{-1}$

图 7 与图 8 分别展示了不同 $L_TL^{-1}$ 冷却通道设计情况下，燃料电池质子交换膜与阴极催化层交界面的温度变化趋势与对应温度均匀性，观察图 7 可知：随着 $L_TL^{-1}$ 从 0.300 上升至 0.350 时，该部位高温区域明显向前延伸，温度梯度加剧；而当 $L_TL^{-1}$ 从 0.350 上升至 0.400 时，沿流程前段低温区域有一定延伸，后段高温区域面积有一定减缩，温度梯度明显下降，均匀性增加。结合图 8 可以发现：当 $L_TL^{-1}$ 从 0.300 上升至 0.350 时，$\sigma$ 从 0.992 8 下降至 0.991 9，下降幅度约为 0.08%；当 $L_TL^{-1}$ 从 0.350 上升至 0.400 时，$\sigma$ 从 0.991 9 上升至 0.992 2，上升幅度约 0.03%。




(a) $L_TL^{-1}$ =0.300

(b) $L_TL^{-1}$ =0.350

(c) $L_TL^{-1}$ =0.400

图 7 不同 $L_TL^{-1}$ 下质子交换膜及阴极催化层温度分布云图

Fig. 7 Temperature distribution for different $L_TL^{-1}$ at interface between cathode catalyst and PEM layer

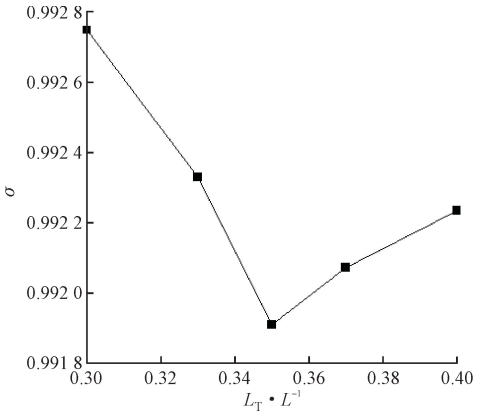
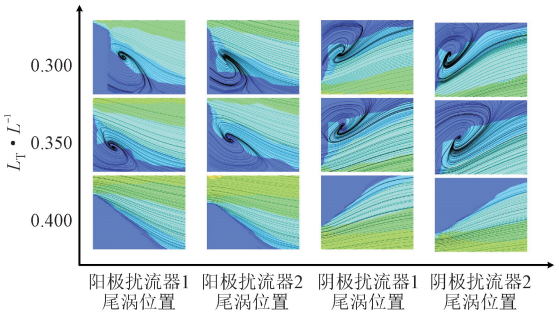



图 8 不同 $L_TL^{-1}$ 下 PEMFC 质子交换膜及阴极催化层交界面 $\sigma$

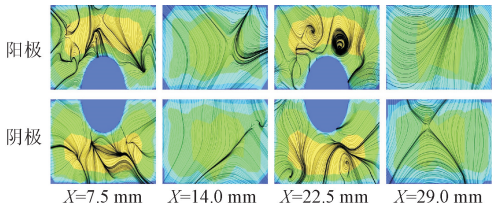
Fig. 8 $\sigma$ for different $L_TL^{-1}$ at interface between PEM and cathode catalyst layer

结合图 9 流线图分析可知，在较小 $L_TL^{-1}$ 下，流体绕过凸起后形成了清晰、紧凑且强度较高的尾涡，这些涡旋能够促进近壁面流体与主流的掺混。同时，横向流线中 $OYZ$ 平面 $X$ = 22.5 mm 位置观察到明显的二次涡结构。小尺度尾涡与横流涡旋共同作用，

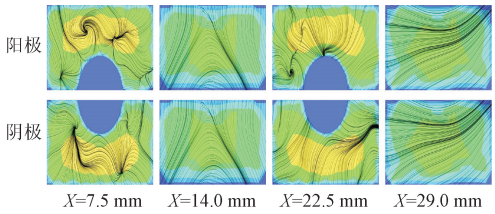
使得换热增强，因此 $Nu$ 初始值较高。当 $L_TL^{-1}$ 增加至 0.350 时，虽然依然存在涡旋，但其强度略微减弱，尾涡逐渐拉长趋于平缓，对壁面边界层周期性扰动能力下降。该 $L_TL^{-1}$ 下横向流线在多个截面上变得相对均匀、平直，未观察到明显的大尺度横流涡旋。当 $L_TL^{-1}$ 增加至 0.400 时，流向速度流线虽较为均匀，但横向流线呈现剧烈变化，多个截面均形成了充分发展、强度高、尺度大的横流涡旋团。这种长凸起结构使曲面诱导的压力梯度作用路径足够长，流体得以持续积累横向动量，最终发展为跨流道的剧烈二次流。



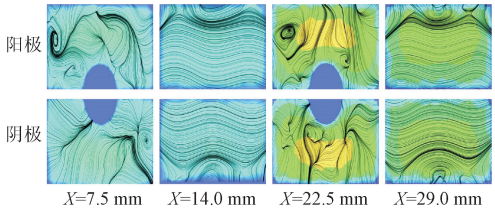

(a)流向速度流线




(b) $L_TL^{-1}$ = 0.300 横向速度流线




(c) $L_TL^{-1}$ = 0.350 横向速度流线




(d) $L_TL^{-1}$ = 0.400 横向速度流线

图 9 不同 $L_TL^{-1}$ 下燃料电池浴缸凸起冷却通道

Fig. 9 Streamwise and horizontal velocity streamlines of the protruding cooling channel in the PEMFC bath under different $L_TL^{-1}$

图 10 展示了不同 $L_TL^{-1}$ 下通道摩擦因子 $f$ 的变化趋势。观察可知：摩擦因子 $f$ 随 $L_TL^{-1}$ 呈现正相关的关系，当从 0.300 增加到 0.400 时，$f$ 从 0.343 增加至 0.381，增加幅度为 11.08%。结合前述流动分析可知，当 $L_TL^{-1}$ 上升，流体将绕经更长的凸起，流动路径更曲折、停留时间更长，即使横流在中等 $L_TL^{-1}$ 时减弱，流向主流的剪切层发展、分离区内的流体振荡及再附着过程均因长度增加而更充分，这些过程都伴随显著的机械能耗散而加剧了能量损失。

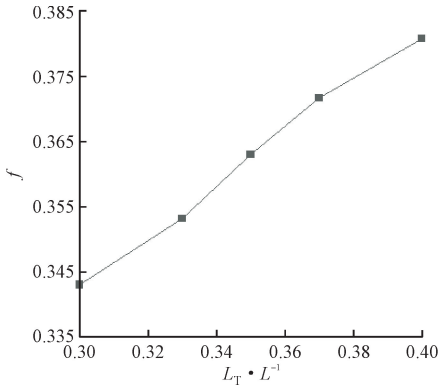
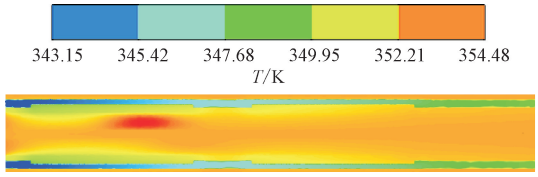



图 10　不同 $L_TL^{-1}$ 下冷却通道摩擦因子 $f$

Fig. 10　$f$ of coolant channel at different $L_TL^{-1}$

## 2.2　浴缸凸起间距对燃料电池热管理性能影响

图 11(a)、11(b)、11(c)分别展示了浴缸凸起扰流结构间距比 $P_fL^{-1}$ = 0.120，0.170，0.220 情况下燃料电池流向整体温度云图，观察可知：$P_fL^{-1}$ 与 $L_TL^{-1}$ 对燃料电池整体温度影响类似，均是通过影响阳极反应物通道高温区域分布位置而对整体热管理产生直观影响。不同 $P_fL^{-1}$ 下冷却通道 $Nu$ 如图 12 所示。$Nu$ 随 $P_fL^{-1}$ 同样呈现先下降后上升的趋势，当 $P_fL^{-1}$ 从 0.120 上升至 0.170 时，$Nu$ 从 18.590 下降至 16.180，降幅约为 12.96%；而当 $L_TL^{-1}$ 从 0.170 上升至 0.220 时，$Nu$ 从 16.180 上升至 18.430，增幅约为 12.21%。




(a) $P_fL^{-1}$ = 0.120

(b) $P_fL^{-1}$ = 0.170



(c) $P_fL^{-1}=0.220$

图 11 不同 $P_fL^{-1}$ 下流向温度分布云图

Fig. 11 Temperature distribution contour plots for different downstream flow ratio

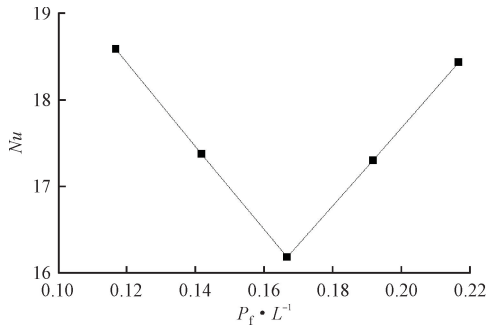
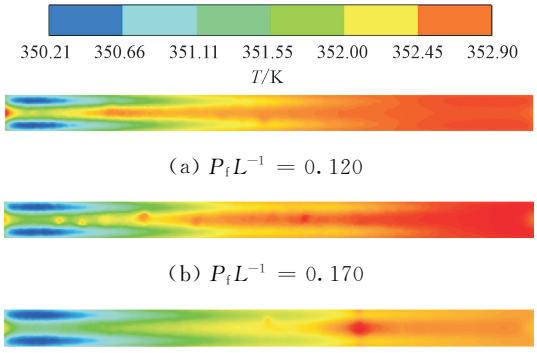



图 12 不同 $P_fL^{-1}$ 下冷却通道 $Nu$

Fig. 12 $Nu$ of cooling channels at different $P_fL^{-1}$

图 13 与图 14 分别展示了不同冷却通道 $P_fL^{-1}$ 情况下燃料电池质子交换膜与阴极催化层交界面的温度变化趋势与对应温度均匀性，观察图 13 可知，随着 $P_fL^{-1}$ 从 0.120 上升至 0.170 时，高温区域更加明显，温度梯度加剧；而当 $P_fL^{-1}$ 从 0.170 上升至 0.220 时，流程前段低温区域有一定向后延伸，温度均匀性增加。结合图 14 可以发现：当 $P_fL^{-1}$ 从 0.120 上升至 0.170 时，$\sigma$ 从 0.993 4 下降至 0.992 7，下降幅度约为 0.07%，当 $P_fL^{-1}$ 从 0.170 上升至 0.220 时，$\sigma$ 从 0.992 7 上升至 0.993 3，上升幅度约为 0.06%。此外，结合图 12 可知，冷却通道 $Nu$ 和质子交换膜及阴极催化层交界面 $\sigma$ 变化趋势变化一致，揭示冷却通道传热能力对电池内部温度均匀性的正相关性。




(a) $P_fL^{-1}=0.120$

(b) $P_fL^{-1}=0.170$

(c) $P_fL^{-1}=0.220$

图 13 不同 $P_fL^{-1}$ 质子交换膜及阴极催化层温度分布云图

Fig. 13 Temperature distribution for different $P_fL^{-1}$ at interface between catalyst and PEM layer

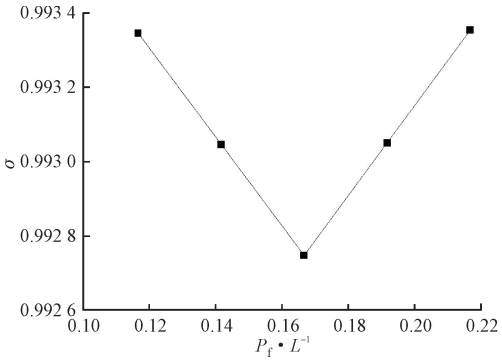
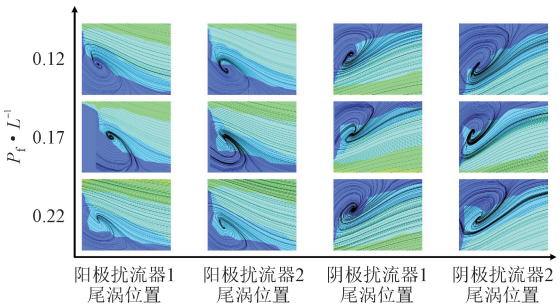


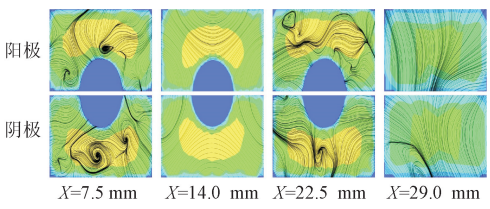

图 14 不同 $P_fL^{-1}$ 下 PEMFC 质子交换膜及阴极催化层交界面 $\sigma$

Fig. 14 $\sigma$ for different $P_fL^{-1}$ at interface between PEM and cathode catalyst layer

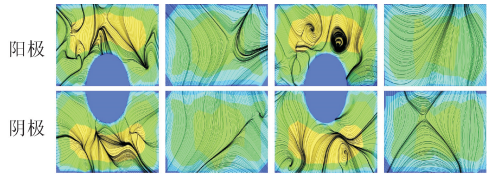
结合图 15 流线图分析，在 $P_fL^{-1}=0.120$ 情况下，上游凸起产生的尾涡与分离流尚被下游凸起捕获并干扰，这种涡-凸起相互作用在凸起间形成了尺度较大且相对稳定的回流涡团，这种横流涡旋团剧烈促进冷却通道的冷流与侧壁面换热。随着 $P_fL^{-1}$ 增至 0.170，上游凸起的尾流恰好在下游凸起前缘附近完成再附着，下游尚未能独立激发有效的涡旋脱落，因此通道换热能力较差。当 $P_fL^{-1}$ 进一步增加至 0.220，流向尾涡及横流旋涡进一步加剧，涡旋发展更为充分，产生尺度与强度更理想的涡旋，这些涡旋在向下游迁移的过程中有足够的演化空间对平边界层进行持续有效的冲刷与掺混，因而此时热管理性能更优。



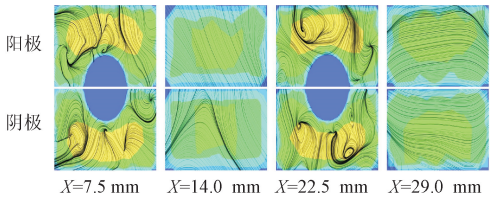

(a)流向速度流线




(b) $P_fL^{-1}=0.120$ 横向速度流线




(c) $P_fL^{-1}$ = 0.170 横向速度流线




(d) $P_fL^{-1}$ = 0.220 横向速度流线

图 15　不同 $P_fL^{-1}$ 下燃料电池浴缸凸起冷却通道流向速度流线及横向速度流线

Fig. 15　Streamwise and horizontal velocity streamlines of the protruding cooling channel in the PEMFC bath under different $P_fL^{-1}$

图 16 展示了不同 $P_fL^{-1}$ 下通道摩擦因子 $f$ 的变化趋势。观察可知，摩擦因子 $f$ 随 $P_fL^{-1}$ 增加呈现先上升后下降的关系。结合前述流动分析可知，当 $P_fL^{-1}$ 从 0.120 上升至 0.170 时，$f$ 从 0.338 上升至 0.343，上升约 1.48%；而当其继续增加至 0.220 时，$f$ 从 0.343 下降至 0.342，下降幅度约为 0.29%。这种趋势可结合图 15 流线图进行印证：当 $P_fL^{-1}$ 增至 0.170 时，上游凸起的尾流使得每个凸起都完全浸没在一个强扰动的来流中，同时促进得到发展更为充分的横流。这极大地增强了湍动能生成率，使得流动阻力最大。

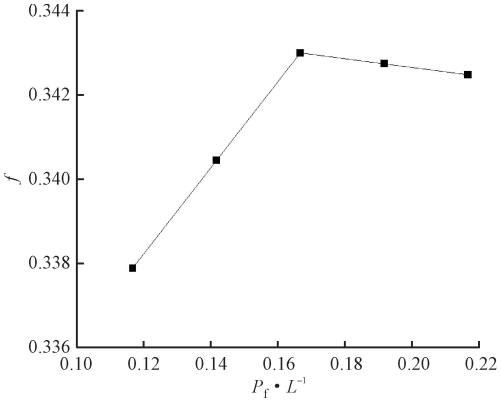
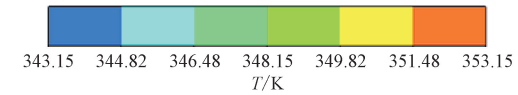



图 16　不同 $P_fL^{-1}$ 下冷却通道摩擦因子 $f$

Fig. 16　$f$ of coolant channel at different $P_fL^{-1}$

## 2.3　浴缸凸起扰流结构宽度对燃料电池热管理性能影响

图 17(a)、17(b)、17(c)分别展示了浴缸凸起扰流结构间距比 $W_TW^{-1}$ = 0.100，0.150，0.200 情况下燃料电池流向整体温度云图，观察可知，$W_TW^{-1}$ 对燃料电池整体热管理影响体现在阴阳极冷却流道的低温区域面积，随着 $W_TW^{-1}$ 从 0.100 增加至 0.150，流程前段的低温区域明显缩近，而 $W_TW^{-1}$ 从 0.150 增加至 0.200 差别却较小。图 18 给出了不同 $W_TW^{-1}$ 下冷却通道 $Nu$。观察图 18 可知，当其从 0.100 增加至 0.150 时，$Nu$ 从 21.780 下降至 19.420，降幅约为 10.84%；而当其从 0.150 增加至 0.200 时，$Nu$ 从 19.420 上升至 20.360，增幅约为 4.62%。




(a) $W_TW^{-1}$ = 0.100

(b) $W_TW^{-1}$ = 0.150

(c) $W_TW^{-1}$ = 0.200

图 17　不同 $W_TW^{-1}$ 下流向温度分布云图

Fig. 17　Temperature distribution contour plots for different downstream flow ratio

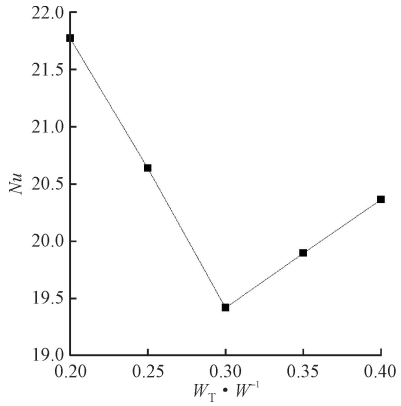



图 18　不同 $W_TW^{-1}$ 下冷却通道 $Nu$

Fig. 18　$Nu$ of cooling channels at different $W_TW^{-1}$

图 19 与图 20 分别展示了不同 $W_TW^{-1}$ 下燃料电池质子交换膜与阴极催化层交界面的温度变化趋势与对应温度均匀性，观察可知，随着 $W_TW^{-1}$ 从 0.100 上升至 0.150，该部位高温区域面积缩小，低温区域面积上升，温度梯度更为明显；而当 $W_TW^{-1}$ 从 0.150 上升至 0.200，高温区面积有一定回升，温度均匀性增加。结合图 18 可以发现：当其

从 0.100 上升至 0.150 时，$\sigma$ 从 0.993 4 下降至 0.992 2，下降幅度约为 0.12%，$W_TW^{-1}$ 从 0.150 上升至 0.200 时，$\sigma$ 从 0.992 2 上升至 0.993 3，上升幅度约为 0.11%。

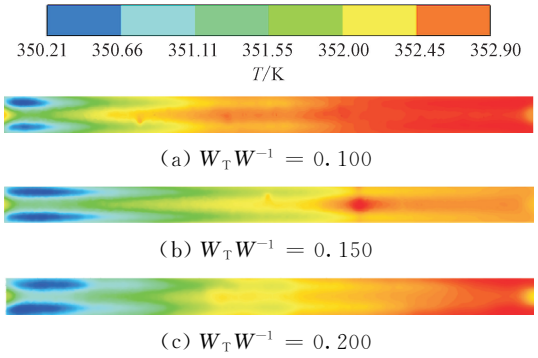



图 19 不同 $W_TW^{-1}$ 下质子交换膜及阴极催化层交界面温度分布云图

Fig. 19 Temperature distribution for different $W_TW^{-1}$ at interface between catalyst and PEM layer

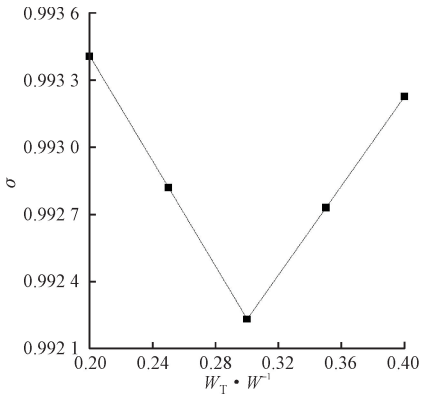



图 20 不同 $W_TW^{-1}$ 下质子交换膜及阴极催化层 $\sigma$

Fig. 20 $\sigma$ for different $W_TW^{-1}$ at interface between PEM and cathode catalyst layer

结合图 21 流线图分析，在 $W_TW^{-1}$ = 0.100 情况下，浴缸凸起扰流结构主要诱发主流方向的流动分离，分析区域有明显的尾涡形成，但横向掺混能力有限。随着 $W_TW^{-1}$ 增至 0.15，其增强的阻塞效应迫使主流产生更强烈的横向偏转与展向二次流，可在图 21 中 4 个横流界面区域清楚辨别涡旋区，但此时主流分析区域无明显尾涡形成，此时整体作用的扰动能力较弱，从而使通道换热能力下降，进而导致前述质子交换膜及阴极催化层温度均匀性恶化。而当 $W_TW^{-1}$ 进一步增加至 0.2，流向尾涡及横流旋涡进一步加剧，且涡旋发展更为充分，此时燃料电池内部浴缸凸起冷却流道内部主流有足够的演化空间对平直段的边界层进行持续而有效的冲刷与掺混，热管理性能更优。

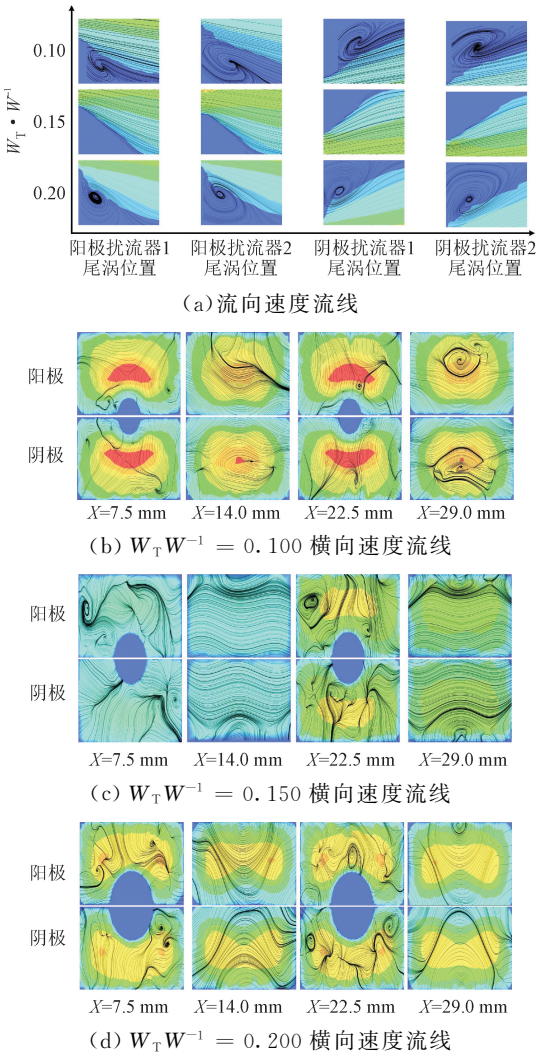



图 21 不同 $W_TW^{-1}$ 下燃料电池浴缸凸起冷却通道流向及横向速度流线

Fig. 21 Streamwise velocity streamlines and horizontal velocity streamlines of the protruding cooling channel in the PEMFC bath under different $W_TW^{-1}$

图 22 展示了不同 $W_TW^{-1}$ 下通道摩擦因子 $f$ 的变化趋势。观察可知，$f$ 随 $W_TW^{-1}$ 增加而增加，当 $W_TW^{-1}$ 从 0.100 增加至 0.200，$f$ 上升约 20.40%。凸起宽度实质上是垂直于流动方向的障碍物尺度，该宽度增加显著增强了流动的阻塞比。流体流经凸起时，被强制加速绕过其顶部和两侧，导致凸起上方近壁剪切应力随之增大，这导致摩擦因数 $f$ 近乎单调上升。结合前述流线分析可知，当 $W_TW^{-1}$ 较小时，浴缸型的凸起类似细线扰流子。此时其产生的小尺度扰动主要激发周期性、规则的小涡旋。这些涡旋能有效地周期性碰撞和破坏热边界层，促使冷流体与热壁面持续混合。当 $W_TW^{-1}$ 上升至 0.150 左右时，阻塞效应增强，横流涡旋扰流效应明显上升，使得在

流道内形成了一个低流速、高滞留时间的区域。当 $W_T W^{-1}$ 继续上升至 0.200 左右时，该阻塞效应进一步增强，流向尾涡与横流涡旋尺度进一步提升，使得 $f$ 直线上升。

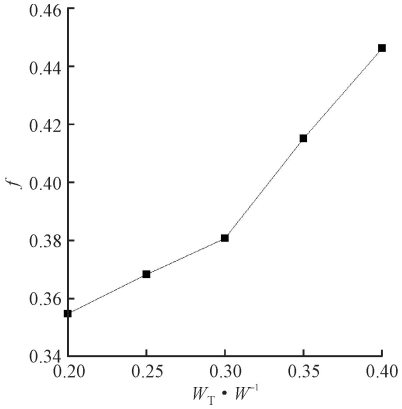



图 22　不同 $W_T W^{-1}$ 下质子交换膜及阴极催化层 $f$

Fig. 22　$f$ for different $W_T W^{-1}$ at interface between PEM and cathode catalyst layer

## 3　结　论

本研究针对燃料电池提出一种浴缸型凸起扰流冷却流道结构设计，系统研究了凸起长度比 $L_T L^{-1}$、间距比 $P_f L^{-1}$ 和宽度比 $W_T W^{-1}$ 对冷却流道传热性能 $Nu$、流动阻力 $f$ 及电池内部温度场均匀性 $\Delta T$ 的影响规律，研究结论如下。

(1) 当 $L_T L^{-1}$ 从 0.3 增至 0.4，$Nu$ 呈现先下降 21.01% 后上升 50.63% 的趋势，质子交换膜与催化层交界面无量纲温度均匀性 $\sigma$ 在 0.991 9 至 0.992 8 之间同步波动，摩擦因子 $f$ 随长度比单调上升 11.08%。较小的长度比下，紧凑排列的凸起激发高频小尺度涡旋，强化换热；较大的长度比下，弧形侧壁诱发强烈的横向二次流，通过增强截面掺混使换热能力回升。

(2) 当 $P_f L^{-1}$ 从 0.12 增至 0.22，$Nu$ 呈现先降低 12.96% 后提高 12.21% 的变化，$\sigma$ 相应在 0.992 0 至 0.993 5 之间波动，最大升幅约 0.15%。间距较小时，涡旋与凸起的相互作用形成稳定的回流涡团；间距较大时，涡旋得以充分发展、迁移，有利于增强换热效果。

(3) $W_T W^{-1}$ 从 0.1 增加 0.2 范围内增大时，$Nu$ 先下降 10.84% 后回升 4.62%，$\sigma$ 呈现先降 0.12% 后升 0.11% 的变化趋势，$f$ 随之呈现持续上升趋势，幅度约为 20.40%。其机理为：较小宽度下凸起主要激发有序的流向涡街，促进流向换热；中等宽度时阻塞效应增强但流动协同不佳，换热较差；较大宽度下强阻塞与曲面耦合生成高强度三维湍流涡团，通过增强掺混使热管理性能回升，但显著提升流动阻力。

(4)综合各参数规律，推荐以下结构设计区间：浴缸凸起扰流结构长度比 $L_T L^{-1}$ 位于 0.3，以利用充分发展的尾涡和横向二次流增强换热，同时避免流动阻力过大；凸起间距比 $P_f L^{-1}$ 最优配置取 0.22，以确保涡旋充分发展形成持续有效的热边界层扰动，且处于较小的流动阻力；凸起宽度比 $W_T W^{-1}$ 控制在 0.1，在激发必要横向掺混的同时，显著抑制因阻塞效应带来的流动阻力激增。

**参考文献：**

[1] Duan Xiongbo, Lai M C, Jansons M, et al. A review of controlling strategies of the ignition timing and combustion phase in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine [J]. Fuel, 2021, 285: 119142.

[2] Jiao Kui, Xuan Jin, Du Qing, et al. Designing the next generation of proton-exchange membrane fuel cells [J]. Nature, 2021, 595(7867): 361-369.

[3] 蔡赛杰，朱昊宁，张卓，等. 运行参数对质子交换膜燃料电池堆耐久性影响的实验研究 [J]. 西安交通大学学报，2025，59(5)：1-11.
Cai Saijie, Zhu Haoning, Zhang Zhuo, et al. Experimental study on the impact of operating parameters on the durability of proton exchange membrane fuel cell stacks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(5): 1-11.

[4] 赵鑫，郭建强，王晓兵. 燃料电池质子交换膜技术发展概述 [J]. 汽车零部件，2023(12)：85-88.
Zhao Xin, Guo Jianqiang, Wang Xiaobing. Overview of the technology development of proton exchange membrane for fuel cell [J]. Automobile & Parts, 2023(12): 85-88.

[5] 韩秉睿. 氢内燃机和氢燃料电池的应用 [J]. 汽车画刊，2024(3)：36-38.
Han Bingrui. Applications of hydrogen internal combustion engines and Hydrogen fuel cells [J]. Auto Bild, 2024(3): 36-38.

[6] 母华. 中国氢能及燃料电池车发展需国家路线图 [J]. 高科技与产业化，2020(1)：24-29.
Mu Hua. The development of Hydrogen energy and fuel cell vehicles in china requires a national roadmap [J]. High-Technology & Industrialization, 2020(1): 24-29.

[7] Li Jiren, Gao Jianmin, Xu Liang, et al. Investigation on thermal management enhancement in proton exchange membrane hydrogen fuel cell based on cooling

channels design with bathtub-shaped turbulators [J]. Renewable Energy, 2026, 256: 124720.

[8] Zhang Xiang, Huang Ying, Ma Zongpeng, et al. Study on heat transfer enhancement performance of cooling channel with elliptical dimples in a proton exchange membrane fuel cell [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 153: 107343.

[9] Chen Xi, Hu Shenglin, Luo Yan, et al. Performance study on cooling channel of PEMFC stack integrated with shrinkable honeycomb structure [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 262: 125267.

[10] Li Yuyang, Liu Enhai, Peng Ming, et al. The theoretical model of thermal resistance for flat-plate CLPHP and its heat transfer performance in PEMFC cooling [J]. Energy, 2025, 315: 134374.

[11] Deng Qihao, Meng Kai, Chen Wenshang, et al. Study on the heat and mass transfer mechanisms of liquid-cooled PEMFC stacks based on non-isothermal model [J]. Energy Conversion and Management, 2024, 313: 118628.

[12] Ma Haoran, Liu Junheng, Liang Wenwen, et al. Effects of PEMFC cooling channel insulation coating on heat transfer and electrical discharge characteristics of nanofluid coolants [J]. Applied Energy, 2024, 357: 122514.

[13] Yu Xianxian, Chang Huawei, Zhao Junjie, et al. Effects of anode flow channel on performance of air-cooled proton exchange membrane fuel cell [J]. Energy Reports, 2022, 8: 4443-4452.

[14] Henriques T, César B, Branco P J C. Increasing the efficiency of a portable PEM fuel cell by altering the cathode channel geometry: a numerical and experimental study [J]. Applied Energy, 2010, 87(4): 1400-1409.

[15] Mohamed W A N W, Atan R. Experimental thermal analysis on air cooling for closed-cathode polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(33): 10605-10626.

[16] Lee J, Gundu M H, Lee N, et al. Innovative cathode flow-field design for passive air-cooled polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell stacks [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(20): 11704-11713.

[17] Baik K D, Yang S H. Development of cathode cooling fins with a multi-hole structure for open-cathode polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. Applied Energy, 2020, 279: 115815.

[18] Qiu Diankai, Peng Linfa, Tang Jiayu, et al. Numerical analysis of air-cooled proton exchange membrane fuel cells with various cathode flow channels [J]. Energy, 2020, 198: 117334.

[19] Zhao Chen, Xing Shuang, Chen Ming, et al. Optimal design of cathode flow channel for air-cooled PEMFC with open cathode [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(35): 17771-17781.

[20] Yin Cong, Gao Yan, Li Kai, et al. Design and numerical analysis of air-cooled proton exchange membrane fuel cell stack for performance optimization [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 245: 114604.

[21] Lim K, Jung Y, Vaz N, et al. Enhancing heat removal and $H_2O$ retention capability of passive air-cooled polymer electrolyte membrane fuel cells by tailoring cathode flow-field design [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2022, 169(11): 114508.

[22] Peng Ming, Chen Li, Zhang Ruiyuan, et al. Improvement of thermal and water management of air-cooled polymer electrolyte membrane fuel cells by adding porous media into the cathode gas channel [J]. Electrochimica Acta, 2022, 412: 140154.

[23] Wang Zixuan, Tongsh C, Wang Bowen, et al. Operation characteristics of open-cathode proton exchange membrane fuel cell with different cathode flow fields [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 49: 101681.

[24] Zhou Yunlong, Xu Liang, Xi Lei, et al. Deep learning-based multi-objective optimization under varying operating conditions for teardrop rib microchannels [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 75: 107090.

[25] Xi Lei, Xu Liang, Gao Jianmin, et al. Cooling performance analysis and structural parameter optimization of X-type truss array channel based on neural networks and genetic algorithm [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 186: 122452.

[26] Li Jiren, Xu Liang, Tian Qiuxia, et al. Heat transfer characteristic and optimization design of alter diameter array impingement cooling structure [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 257(Part B): 124364.

[27] Dwivedi A, Khan M M, Pali H S. A comprehensive review of thermal enhancement techniques in microchannel heat exchangers and heat sinks [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2023, 148(23): 13189-13231.

[28] Ozen D N, Timurkutluk B, Altinisik K. Effects of operation temperature and reactant gas humidity levels on performance of PEM fuel cells [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 59: 1298-1306.

（编辑 武红江）