

# 氢燃料电池特斯拉阀型极板流动分析及性能研究

解雅雯<sup>1</sup>, 吕承举<sup>2</sup>, 刘洋洋<sup>1</sup>, 王一鸣<sup>1</sup>, 陈忠言<sup>3</sup>, 李新海<sup>1\*</sup>

1. 山东建筑大学机电工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东省交通科学研究院, 山东 济南 250031;

3. 山东氢探新能源科技有限公司, 山东 济南 250109

**摘要:** 为了改善质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 双极板流场的压力与温度分布, 提高 PEMFC 的功率密度, 设计基于特斯拉阀的双极板结构, 基于 AVL FIRE™ M 构建三维多物理场耦合模型, 采用控制变量法, 对比特斯拉阀夹角、单元间距、流道间距等影响流道结构的关键几何参数对流道压降、温差、最高温度的影响。结果表明: 较小的流道间距 (6.0~7.0 mm) 有利于强化流道脊下传质; 较短的单元间距 (1.0 mm) 能够引入高频流动扰动; 适中的特斯拉阀夹角 (125°~130°) 可在可控压降范围内形成增强传质的涡旋结构。三者协同构建出高效自扰动流场, 优先保障反应物供应, 强化局域传热传质, 提高 PEMFC 的功率密度与运行稳定性。

**关键词:** PEMFC; 特斯拉阀; 双极板; 涡流; 极化曲线

**中图分类号:** U469.722; TM911.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-6397(2026)01-0027-11

**引用格式:** 解雅雯, 吕承举, 刘洋洋, 等. 氢燃料电池特斯拉阀型极板流动分析及性能研究[J]. 内燃机与动力装置, 2026, 43(1): 27-37.

XIE Yawen, LÜ Chengju, LIU Yangyang, et al. Flow analysis and performance study of Tesla valve-type electrodes in hydrogen fuel cells[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2026, 43(1): 27-37.

## 0 引言

在我国“碳达峰、碳中和”战略目标的驱动下, 氢能技术成为推动能源结构转型的关键路径之一。质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 因具备零碳排放、高能量效率等优势而备受关注, 但其性能与寿命仍受到双极板流场结构和设计参数的制约。传统的平行流道短直、流阻较低, 但气体分布不均, 排水能力差, 易导致“水淹”; 蛇形流道单一漫长, 采用高压降强制对流, 排水能力显著增强, 但流阻大, 能耗高。这种燃料电池流场设计中, 水热管理性能与系统能耗之间的根本矛盾, 也限制了电池功率密度的进一步提高。

特斯拉阀是一种无活动部件的被动式单向阀, 具有独特的非对称流阻特性, 在强化传质与传热方面展现出巨大潜力<sup>[1-2]</sup>。近年来, 学者们开始探索将其应用于 PEMFC 流场设计。Guo 等<sup>[3]</sup>研究了回路半径、倾斜角对特斯拉阀流场的影响, 与平行流场电流密度为 0.8 A/cm<sup>2</sup> 时的流场压差相比, 增大特斯拉阀的倾角和回路半径可使电压分别升高 16.3% 和 31.1%。Xu 等<sup>[4]</sup>设计了一种新型带隔板的特斯拉阀, 采用该技术优化后流道的 Fanning 摩擦因数降低 16.4%, 并略微提高了散热特性。Gong 等<sup>[5]</sup>研究发现, 与平行流场相比, 多级特斯拉阀流场的反向和正向峰值净功率分别提高了 19.89% 和 3.90%; 与蛇形流场相

**收稿日期:** 2026-01-06

**基金项目:** 山东省自然科学基金项目 (ZR2021QE065)

**第一作者简介:** 解雅雯 (1998—), 女, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要研究方向为氢燃料电池流道设计, E-mail: 1973384045@qq.com。

**\*通信作者简介:** 李新海 (1989—), 男, 济南人, 工学博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为氢燃料电池电堆系统及关键部件技术, E-mail: lixinhail9@sdjz.edu.cn。

比,反向峰值净功率提高了 12.19%。Zhang 等<sup>[6]</sup>提出了一种以双对称特斯拉阀流道为阴极的仿生流道结构,通过采用前倾角为 30°的挡板对双对称特斯拉阀流场进行结构改进,与前倾角为 15°的挡板相比,挡板改进后电池的功率密度提高了 17.6%。苏春雷等<sup>[7]</sup>分析了挡板高度、阀距、级数对特斯拉阀单向导通性的影响并进行了相应优化,发现优化后单级特斯拉阀的单向导通性提高了 20.82%,六级结构正向压降降低,而反向压降显著升高,且可节省超 24.52%的空间。许建民等<sup>[8]</sup>设计了一种冷却液异侧进出的双流道特斯拉阀液冷板冷却结构,新结构使电池温差和压降分别降低了 1.52%、11.16%,液冷板综合性能提高了 4.81%。

尽管已有研究证实特斯拉阀流场具备一定优势,然而,关于特斯拉阀几何参数对流道内流动阻力与传热过程的系统性影响,尤其是温度场均匀性方面的量化分析,目前仍较为缺乏。本文将特斯拉阀结构应用于 PEMFC 双极板设计,借助其诱导的二次流与涡旋结构强化换热效能,从而提高电堆的整体性能。基于 AVL FIRE™ M 构建特斯拉阀流道三维多物理场耦合数值模型,开展计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 仿真,以流体压力与流道温度分布为评价指标,研究特斯拉阀关键几何参数对 PEMFC 热管理性能的影响规律,以为高功率密度 PEMFC 双极板结构优化提供新的思路与理论依据。

## 1 特斯拉阀流道数值计算模型

### 1.1 几何模型

设计的单级特斯拉阀单元结构如图 1 所示。特斯拉阀主要由直流道 L1、L2、L3,以及连接 L1、L2 的环形流道 S 构成,L3 置于 S 内部,图中  $\alpha$  为特斯拉阀夹角。

为探究特斯拉阀结构的多级效应,在兼顾计算效率与流道间相互作用的基础上,建立了包含三流道、六级特斯拉阀单元的流道简化模型,如图 2 所示。模型所涉及的关键几何参数包括:单元间距  $L$  (相邻特斯拉阀单元之间的距离)、流道间距  $B$  (相邻并联流道的中心距)、 $\alpha$ 。

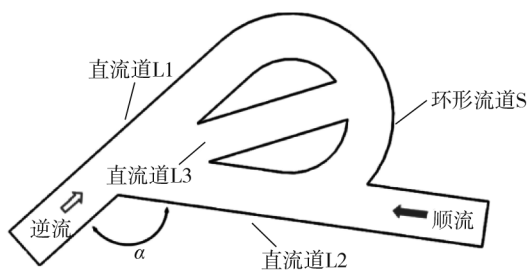


图 1 单级特斯拉阀单元结构

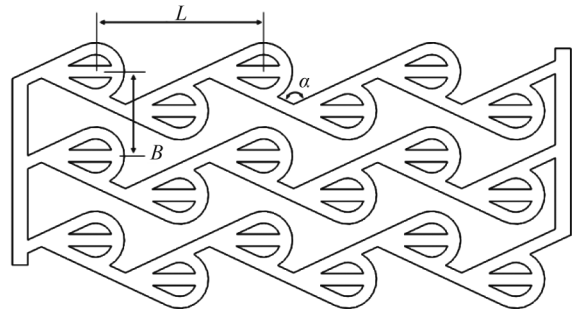


图 2 三流道六级特斯拉阀流道及几何参数

### 1.2 基本控制方程及边界条件

#### 1.2.1 基本控制方程

PEMFC 是一个多物理场耦合系统,其控制方程主要基于守恒定律,描述了 PEMFC 内部发生的质量、动量、能量传递过程<sup>[9-13]</sup>。质量守恒方程为:

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

式中: $\epsilon$  为孔隙率; $\rho$  为流体密度; $\mathbf{u}$  为流体速度矢量; $S_m$  为质量源项,为催化层电化学反应消耗或生成的质量; $t$  为时间。

压降分析贯穿于整个流动区域,其物理本质由动量方程控制。采用三维稳态不可压缩 Navier-Stokes 方程描述流道内气体流动,动量方程为:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_u, \quad (2)$$

式中:  $\boldsymbol{\tau}$  为黏性应力张量;  $p$  为流体压力;  $\mathbf{S}_u$  为动量源项, 适用于气体扩散层和催化层。

对于 PEMFC 气体扩散层 (gas diffusion layer, GDL) 多孔介质区域, 引入达西-福希海默修正项对  $\mathbf{S}_u$  进行修正:

$$\mathbf{S}_u = -\left(\frac{\mu}{K} + \frac{\rho C_F}{\sqrt{K}} |u_1|\right) \mathbf{u}_1, \quad (3)$$

式中:  $K$  为渗透率,  $K = 1.2 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ ;  $\mu$  为动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $C_F$  为惯性因数,  $C_F = 0.1$  (通过压降试验数据拟合确定);  $u_1$  为流体速度,  $\text{m/s}$ 。

能量守恒方程描述整个电池的温度分布, 是热管理的核心。能量守恒方程为:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_p \mathbf{u} T) = \nabla \cdot (k^{\text{eff}} \nabla T) + S_T, \quad (4)$$

式中:  $c_p$  为定压比热容;  $T$  为热力学温度;  $\nabla \cdot (\rho c_p \mathbf{u} T)$  为对流项;  $k^{\text{eff}}$  为有效导热系数;  $\nabla \cdot (k^{\text{eff}} \nabla T)$  为热传导项;  $S_T$  为热源项, 包括活化极化热 (电化学反应阻抗)  $S_{T,\text{act}}$ 、欧姆热 (质子、电子传输阻力)  $S_{T,\text{ohm}}$ 、电化学反应热 (熵热)  $S_{T,\text{rev}}$ 。  $S_T$  的计算式为:

$$S_T = S_{T,\text{act}} + S_{T,\text{ohm}} + S_{T,\text{rev}} = j \eta_{\text{act}} + (\sigma_s |\nabla \phi_s|^2 + \sigma_m |\nabla \phi_m|^2) + j \left( \frac{T \Delta S}{nF} \right), \quad (5)$$

式中:  $j$  为局部电流密度;  $\eta_{\text{act}}$  为局部活化过电位, 可由 Butler-Volmer 方程求解得到;  $(\sigma_s |\nabla \phi_s|^2)$  为欧姆热前项, 表征电子在 GDL、双极板中传输产生的热, 其中,  $\sigma_s$  为电子电导率,  $\nabla \phi_s$  为电子相电势梯度; 欧姆热后项  $(\sigma_m |\nabla \phi_m|^2)$  为质子在膜和离子相中传输产生的热, 其中,  $\sigma_m$  为质子 (离子) 电导率,  $\nabla \phi_m$  为质子相电势梯度;  $T \Delta S / (nF)$  为可逆热电压, 其中,  $\Delta S$  为反应的熵变,  $n$  为反应中转移的电子数 (一般取 2),  $F$  为法拉第常数。当 PEMFC 工作温度为  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  时,  $T \Delta S / (nF)$  约为  $0.15 \text{ V}$ 。

PEMFC 的工作本质是电化学反应与反应物传输的耦合过程<sup>[14-15]</sup>。因此, 描述带电粒子传输的电荷守恒方程和描述反应气体浓度分布的组分守恒方程是模型的核心。

各反应组分的传输由组分守恒方程控制, 该方程描述了组分  $i$  的浓度变化由对流项、扩散项和电化学反应 (源项  $S_i$ ) 共同决定, 其通用表达式为:

$$\nabla \cdot (\mathbf{u} c_i) = \nabla \cdot (D_i^{\text{eff}} \nabla c_i) + S_i, \quad (6)$$

式中:  $c_i$  为组分  $i$  的浓度;  $D_i^{\text{eff}}$  为组分  $i$  在多孔介质中的有效扩散系数;  $S_i$  为源项, 在催化层中,  $S_i$  由 Butler-Volmer 动力学方程确定, 例如阴极催化层氧气消耗源项  $S(\text{O}_2) = -j_1 / (4F)$ , 其中,  $j_1$  为局部转移电流密度, 由 Butler-Volmer 方程确定。

电池内部的电流生成与传输由两个独立的电势场描述, 主要包括质子和电子传输, 分别描述了电池内部的电势分布和电流生成, 其控制方程如下:

$$\nabla \cdot (\sigma_m^{\text{eff}} \nabla \phi_m) + S_{\phi_m} = 0, \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_s^{\text{eff}} \nabla \phi_s) + S_{\phi_s} = 0, \quad (8)$$

式中:  $\sigma_m^{\text{eff}}$  为膜的有效质子电导率, 是膜含水量和温度的强函数;  $\sigma_s^{\text{eff}}$  为固相有效电子电导率;  $S_{\phi_m}$  和  $S_{\phi_s}$  分别为质子源相和电子源相, 是电化学反应在催化层中产生的电荷, 根据电荷守恒定律,  $S_{\phi_m} = -S_{\phi_s} = j_1$ , 该方程建立了局部的反应气体浓度和反应驱动力 (即活化过电位) 之间的定量关系, 从而实现了对电化学、物质传输及电荷传递等多物理过程的自耦合。

### 1.2.2 建模假设条件

为了提高仿真计算速度, 降低计算机的负荷并优化结果, 建模时采用下列合理性假设: 1) 电池在稳态条件下工作; 2) 反应气体符合理想气体定律; 3) 反应产生的小液滴按气态处理, 忽略冷凝水的生成; 4) 忽略重力的影响; 5) 忽略接触热阻; 6) GDL、催化层 (catalyst layer, CL) 均匀且各向同性, 质子交换膜 (proton

exchange membrane, PEM)完全隔绝气体,气体扩散过程符合菲克定律;7)忽略泄漏电流。

### 1.2.3 边界条件

建模基于质量、动量、能量、电荷守恒定律以及组分输运方程。计算域包括流道、GDL、CL、PEM、极板等,膜电极沿 $z$ 方向各部件的参数如表1所示。本文中基于AVL FIRE™ M构建三维多物理耦合模型,通过多尺度仿真揭示PEMFC运行过程中的动态交互机制。

表1 膜电极沿 $z$ 方向各部件的参数

GDL厚度/mm	CL厚度/mm	PEM厚度/mm	流道深度/mm	极板厚度/mm
0.20	0.01	0.05	1.00	1.50

在数值模拟中,设置流体阴、阳极入口为质量流量入口边界,出口为压力出口边界,采用特斯拉阀结构的逆流布置方式。计算域边界条件包括流体的入口和出口,以及电池内部的多孔介质区域,入口流速根据实际工况确定。为确保PEMFC的稳态运行,除反应气体质量流量外,还需合理设置阴、阳极入口相对湿度与温度,以及反应气体化学计量比等对电池电化学性能影响显著的关键参数。相关参数的设置综合考虑了流体流动、传质、电化学反应等多物理场耦合机制,并通过正交试验验证了其活化极化、欧姆极化及浓差极化行为表征的有效性<sup>[9]</sup>。模型中的物性参数,如膜的质子电导率、GDL的孔隙率与渗透率等,均严格参照典型试验与文献中的标准化数据,并基于PEMFC的典型运行工况开展模拟,以保证模拟的合理性与可比性。数值模拟的操作条件和物性参数如表2所示。

表2 数值模拟的操作条件和物性参数

工作压力/kPa	工作温度/K	法拉第常数/( $C \cdot mol^{-1}$ )	液态水密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )	通用气体常数/( $J \cdot mol^{-1}$ )
101.325	353.15	96487	1000	8.314
阳极入口相对湿度/%	阴极入口相对湿度/%	阳极入口质量流量/( $kg \cdot s^{-1}$ )	阴极入口质量流量/( $kg \cdot s^{-1}$ )	阳极出口压力/kPa
100	100	$10^{-6}$	$10^{-5}$	250
阴极出口压力/kPa	氢气扩散系数/( $m^2 \cdot s^{-1}$ )	氧气扩散系数/( $m^2 \cdot s^{-1}$ )	CL孔隙率	GDL孔隙率
230	$3.1 \times 10^{-5}$	$2.8 \times 10^{-5}$	0.4	0.38
CL泊松比	GDL泊松比	阳极化学计量比	阴极化学计量比	开路电压/V
0.2	0.2	1.4	2.0	0.9

### 1.3 网格独立性验证

特斯拉阀流场的几何网格模型及边界层如图3所示。网格划分采用差异化策略,对膜电极区域网格进行加密<sup>[16-17]</sup>。设置输出电压为0.6V,对不同网格数下的电流密度变化进行数值模拟,结果如表3所示,表中相对误差为以网格数932328为基准计算而得。由表3可知:当网格数大于等于932328时,电流密度的相对误差小于1%并趋于稳定,因此选择网格数为932328作为后续数值模拟的基础。

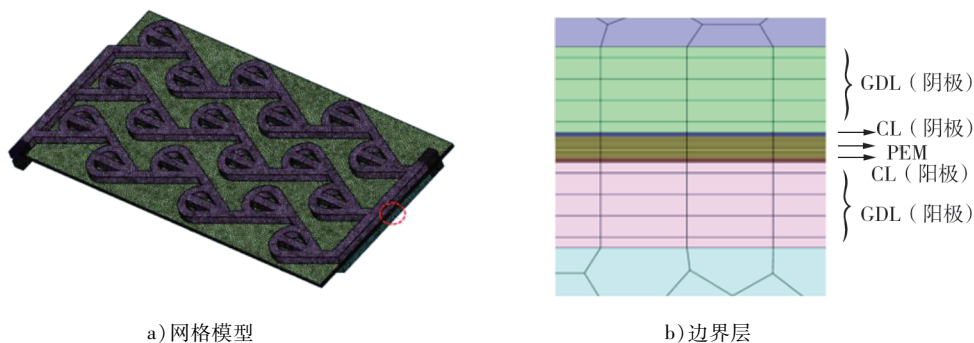


图3 特斯拉阀流道多面体网格模型及边界层

基于模型的几何参数与边界条件,建立三维数值解析模型<sup>[18-19]</sup>。受限于缺乏流场测试设备,仅可进行 PEMFC 性能测试,因此通过对比数值计算和试验得到的极化曲线,验证三维数值模型的准确性,结果如图 4 所示。由图 4 可知:计算结果与试验数据总体吻合,仅在欧姆极化区域内观察到稍大的偏差,但未超过 8%,表明模型具有较高的准确性,故将该模型作为流道优化的基本模型。

表 3 网格数对数值模拟结果的影响

网格数	电流密度/ ( $A \cdot m^{-2}$ )	相对误差/ %
615 732	11 691	1.68
932 328	11 891	
1 280 788	11 822	0.58
1 460 311	11 981	0.76

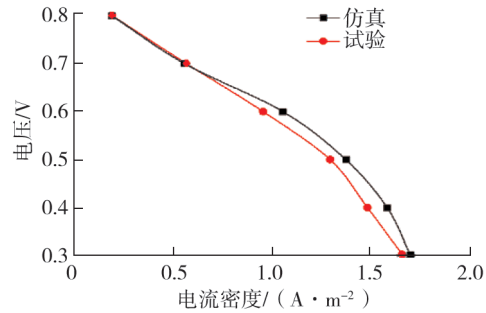


图 4 模型与试验极化曲线对比

## 2 特斯拉阀流道结构参数对流场特性的影响

采用控制变量法,依次分析特斯拉阀关键几何参数( $\alpha$ 、 $L$ 、 $B$ )对 PEMFC 流道内流体流动与传热特性的影响<sup>[20-22]</sup>,从物理机理层面揭示几何结构与宏观性能的内在联系,为后续面向 PEMFC 实际工作环境的优化设计提供参考。流道内流体流动与传热特性的核心评价指标为决定系统效率与稳定性的关键参数:流道的压降  $\Delta p$ 、温差  $\Delta T$ 、最高温度  $T_{max}$ 。

### 2.1 $\alpha$ 的影响分析

$\alpha$  是调控非对称流阻和热能生成的关键参数。令  $L$  和  $B$  保持不变,设置  $\alpha$  为  $120^\circ$ 、 $125^\circ$ 、 $130^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $140^\circ$  共 5 种情况,分析  $\alpha$  对  $\Delta p$ 、 $\Delta T$ 、 $T_{max}$  的影响,结果如表 4 所示。由表 4 可知:1)  $\Delta p$  随  $\alpha$  的增大呈单调递减趋势,其中, $\alpha$  为  $125^\circ \sim 135^\circ$  时降幅较小,其余区间降幅显著; $\alpha$  由  $120^\circ$  增大至  $140^\circ$ , $\Delta p$  由 120.15 Pa 降低至 69.36 Pa,降幅高达 42.27%,该变化源于  $\alpha$  对流动分离与二次流强度的主导作用。2)  $\Delta T$  和  $T_{max}$  随  $\alpha$  的增大呈单调上升趋势,其中, $T_{max}$  前期增长较快,后期趋缓; $\Delta T$  在  $\alpha$  大于  $125^\circ$  后急剧增大,当  $\alpha$  为  $120^\circ$  时,尽管流道内流动扰动强烈有利于强化换热,但  $\Delta T$  仅为  $7.5^\circ C$ 。

表 4  $\alpha$  对流道  $T_{max}$ 、 $\Delta p$ 、 $\Delta T$  的影响

$\alpha/(\circ)$	$T_{max}/K$	$\Delta T/K$	$\Delta p/Pa$
120	361.00	7.50	120.15
125	361.46	7.91	105.23
130	362.00	8.70	99.46
135	362.12	9.33	95.56
140	362.19	9.69	69.36

较小的  $\alpha$  显著增强了特斯拉阀流道的非对称性,诱导产生更为强烈的二次流与旋涡结构。虽然这会导致流动阻力和压降增大,但剧烈的流体扰动有效强化了气体与流道壁面及膜电极之间的对流换热,从而更高效地导出电化学反应生成的热量,使得 PEMFC 工作温度降低。相反,增大  $\alpha$  可使流动更为顺畅、压降减小,但流场扰动强度和换热能力相应减弱,反应热易在局部积聚。上述流动-传热的耦合效应对 PEMFC 性能影响如图 5 所示。由图 5 可知:不同  $\alpha$  下的极化曲线与功率密度曲线整体变化趋势相似,但在高电流密度区间,性能出现显著分化; $\alpha = 125^\circ \sim 130^\circ$  时,电池展现出最优的功率输出与运行稳定性,因为在此夹角范围内,特斯拉阀实现了在“生成足够强度的二次流以协同增强传质与散热”与“避免因流动阻力过大导致寄生功耗过高”之间的最佳平衡;当  $\alpha = 120^\circ$  时,过大的流动阻力抵消了散热优势;当  $\alpha \geq 135^\circ$  时,流场扰动过弱,难以有效缓解高电流密度下出现的浓差极化与热量累积,从而导致电池性能衰退。

不同  $\alpha$  下的流道压力和温度分布云图分别如图 6、7 所示。由图 6、7 可得以下结论。

1) 总体上,随着夹角  $\alpha$  的增大,流道内的压力均匀地减小,温度升高。

2) 当  $\alpha$  较小时, 流道方向发生急剧改变, 此时在通道内侧弯折处会出现一个明显的低压涡核区, 而在外侧弯折处则因流体的冲击和流动滞止, 出现一个局部高压区。这种现象诱发强烈的流动分离与涡旋耗散, 导致壁面剪切应力增大和流动能耗散加剧, 引起显著的局部压力损失, 流道  $\Delta p$  增大, 这意味着维持冷却所需的功率大幅增加, 直接降低了 PEMFC 的输出效率, 整体压力梯度变得非常陡峭; 同时, 高流阻导致流量降低与流动滞区形成, 虽局部扰动强烈, 但整体携热能力不足, 易在双极板对应区域形成局部过热, 破坏膜电极的水热平衡。

3) 适度的二次流在有效破坏热边界层、增强换热的同时, 仍能保持充足的流量, 为膜电极提供均匀、稳定的温度环境, 这种均匀的温度分布对确保电流密度分布一致、反应界面水含量稳定至关重要, 进而保障 PEMFC 的高效稳定运行。

4)  $\alpha$  继续增大, 流动过于平顺, 换热强度减弱, 虽压降进一步降低, 但流道出口温度升高, 可能导致电堆整体工作温度偏离最佳范围, 反而增大了膜脱水的风险。

综上,  $\alpha$  优化的本质是在降低 PEMFC 系统能耗与加强 PEMFC 系统均匀散热之间寻求最佳平衡。当  $\alpha$  为  $125^\circ \sim 130^\circ$  时能够实现这一平衡: 既能提供足够的流动扰动以保证温度均匀、避免局部热点, 又能将流动阻力控制在合理范围内, 最大化电堆的整体效率。

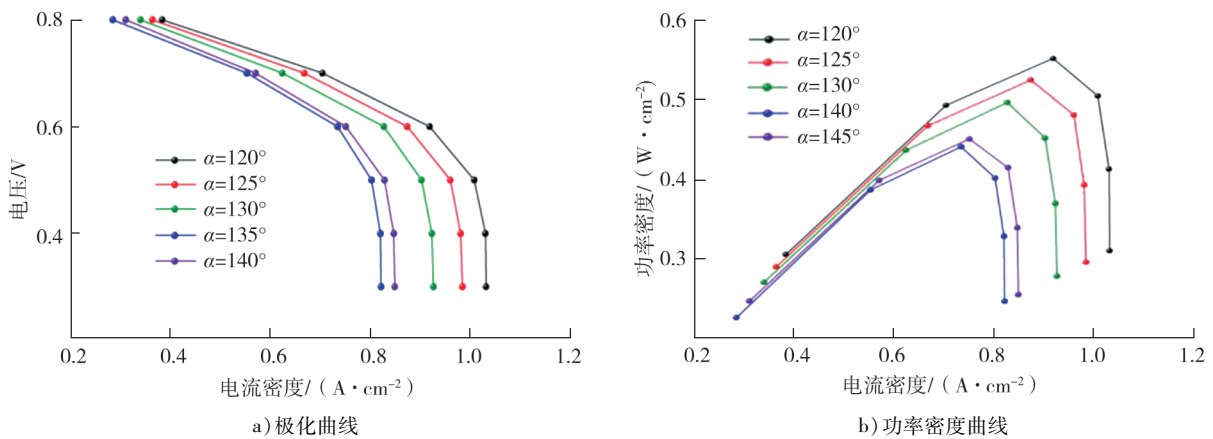


图5 不同  $\alpha$  下的极化曲线和功率密度曲线

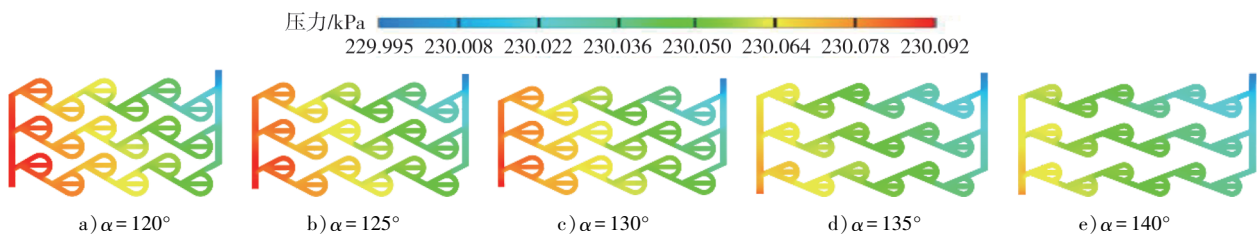


图6 不同  $\alpha$  下流道压力分布云图

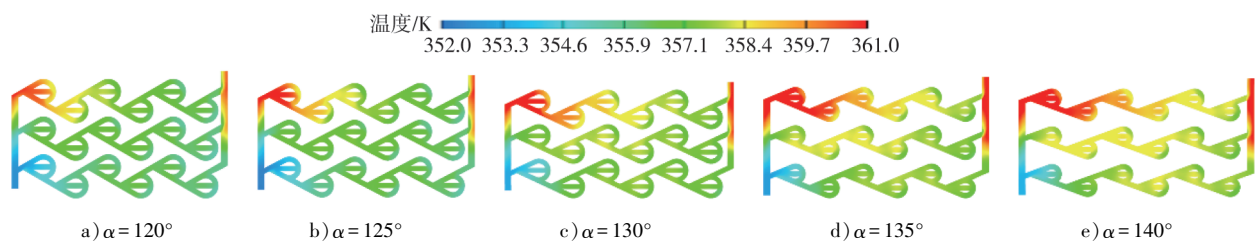


图7 不同  $\alpha$  下流道温度分布云图

## 2.2 L 的影响分析

特斯拉阀流道通常由多个基本单元串联构成,  $L$  决定了上游单元的尾流与下游单元的相互作用强度, 从而影响整条流道的宏观性能, 因此,  $L$  对多单元特斯拉阀的性能协同性和结构紧凑性影响显著。

模型采用六级特斯拉阀单元串联的结构,以确保流动充分发展。根据第 2.1 节确定的最优范围,将  $\alpha$  固定为  $130^\circ$  并保持  $B$  不变, $L$  分别设为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mm,仿真分析  $L$  对特斯拉阀流道内流动过程和累积效应的影响,结果如表 5 所示。由表 5 可知: $L$  对  $\Delta p$ 、 $\Delta T$  和  $T_{\max}$  的影响呈非线性关系; $\Delta p$  随  $L$  增大先增大后减小; $T_{\max}$  和  $\Delta T$  先减小后增大,在  $L=2.0\sim 2.5$  mm 时  $T_{\max}$  和  $\Delta T$  均较大。较长的  $L$  可导致流道有效扰动区域减少,对流换热效率下降,造成热量积累。

表 5  $L$  对流道  $T_{\max}$ 、 $\Delta p$ 、 $\Delta T$  的影响

$L/\text{mm}$	$T_{\max}/\text{K}$	$\Delta T/\text{K}$	$\Delta p/\text{Pa}$
0.5	361.75	8.46	66.93
1.0	361.52	7.98	70.33
1.5	361.45	7.80	64.16
2.0	361.84	8.65	61.94
2.5	361.87	8.70	56.96

不同  $L$  下的流道极化曲线和功率密度曲线如图 8 所示。由图 8 可知: $L=0.5$  mm 的结构在整个电流密度范围内性能均最优,尤其在峰值功率区更为显著。更小的  $L$  意味着更高的扰动频率,这种高频“冲刷”效应,能够持续破坏扩散层表面的浓度边界层和热边界层,从而维持较高的反应物浓度和更均匀的温度分布。随着  $L$  增大,高频扰动优势减弱,电堆性能随之下降,但压降并非最低。

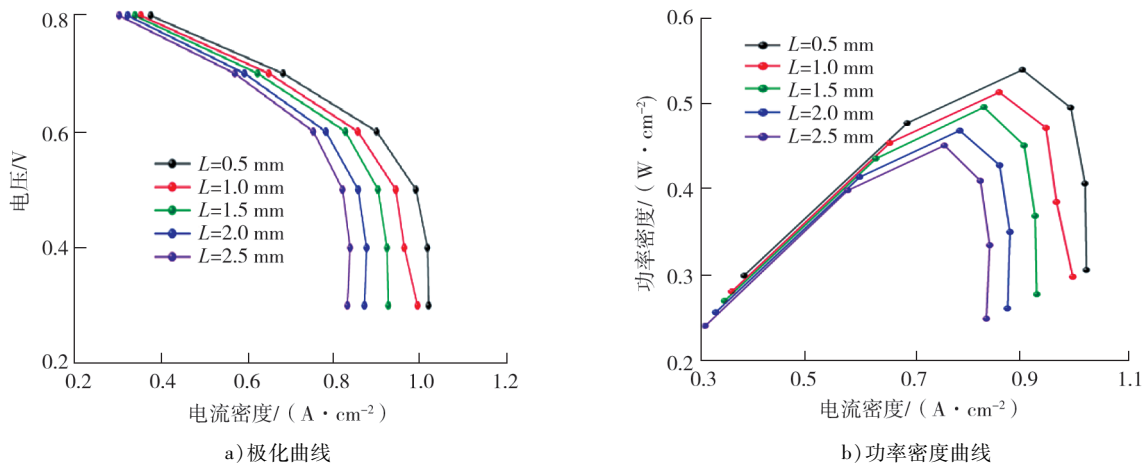


图 8 不同  $L$  下流道的极化曲线和功率密度曲线

不同  $L$  下流道压力、温度分布云图分别如图 9、10 所示。

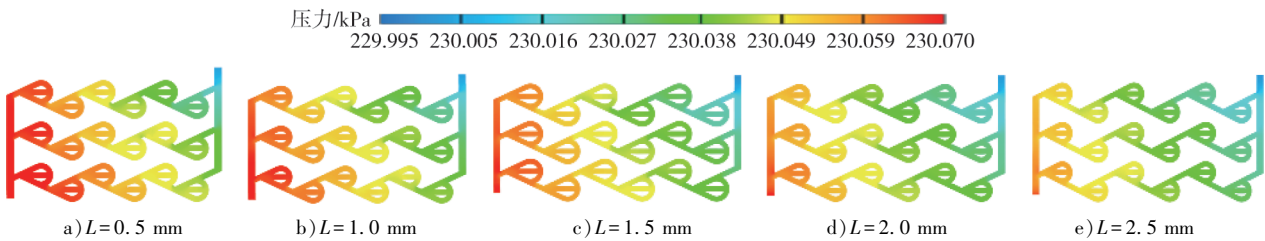


图 9 不同  $L$  下流道压力分布云图

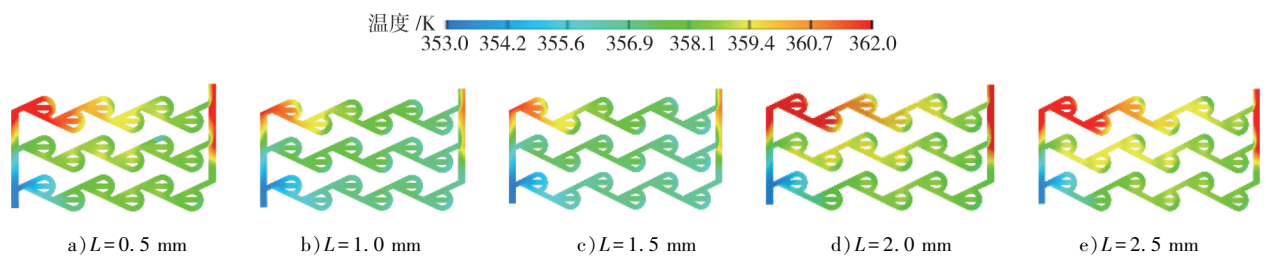


图 10 不同  $L$  下流道温度分布云图

由图 9、10 得以下结论。

1) 不同  $L$  下, 流道前段 (特别是前两个单元) 均出现了显著的高压高温区, 表明流道前段氢气反应剧烈, 产生了大量的热, 使其温度快速升高; 而流道后段则因流动能衰减、扰动减弱, 导致换热能力显著下降, 热量进一步累积, 出口处出现局部高温。

2) 当  $L$  过小 (0.5 mm) 时, 上游单元产生的扰动和湍流尾流尚未充分发展和衰减, 便直接冲击下游单元的入口, 这种无序的相互作用导致流体碰撞加剧、动能耗散增强, 出现前陡后缓的轴向温差分布, 这导致电流密度分布不均, 电堆前段面临过热膜脱水的风险, 而后段则因温度相对较低造成水凝结甚至水淹。合理的流道优化设计应综合权衡系统运行稳定性、功率输出、工艺可行性等多方面因素。因此, 尽管  $L=0.5$  mm 时电堆的功率密度最高, 但其在热管理方面存在明显不足, 加之尺寸过小所带来的加工复杂、成本高昂及易堵塞等实际工艺难题, 该方案并非最佳选择。

3) 当  $L$  增至 1.0 mm 时, 云图呈现出理想的周期性流动与均匀的温度变化。上游尾流在进入下游单元前获得更充分的发展空间, 流动之间的干涉减弱, 使得流场趋于稳定的周期性发展,  $\Delta p$  下降; 同时, 这种流动“接力”模式强化了传热效应在流道轴向的分布, 双极板上形成了均匀的轴向温度场, 确保了膜电极各处的反应速率一致, 这是实现电堆高性能和长寿命的关键因素之一。在 PEMFC 中, 流道设计应着眼于系统整体性能的最优, 而非单一指标的极致优化。因此, 尽管  $L=1.0$  mm 时电池的功率密度并非最高, 但该间距实现了增强传质与降低功耗之间的最佳平衡, 因而可作为最优选择。

4) 当  $L$  过大 (2.0、2.5 mm) 时, 上游单元产生的涡旋在漫长的流动过程中因流体黏性而完全耗散, 下游单元在近乎无扰动的层流状态下工作, 单元间热关联显著减弱, 压降减小。由于入口区域缺乏有效扰动, 整体的对流换热系数下降。为了带走电堆持续产生的热量, 流体与壁面之间必须维持更高的平均温差来驱动传热过程, 直接表现为系统整体温度被迫升高, 并且每个单元近乎处于独立、低效的工作状态, 温度分布的均匀性也可能进一步下降, 膜电极脱水风险加大。另外,  $L$  过大还导致流道结构冗长, 降低了 PEMFC 系统的紧凑性和空间利用率。

综上所述,  $L$  优化的本质是调控特斯拉阀多单元间涡旋动力的“接力”效率, 以实现轴向温度分布的最大均匀化。 $L=1.0$  mm 时, 单元间的协同作用最强, 在维持合理流阻的同时, 实现最佳的温度均匀性控制和单位长度上最高的压降增益, 为电堆高效、稳定运行提供了保障。

### 2.3 B 的影响分析

$B$  直接影响流体流动的径向约束程度, 改变了流道脊部的宽度。在  $\alpha=130^\circ$ 、 $L=1.0$  mm 的最优情况下,  $B$  分别为 6.0、6.5、7.0、7.5、8.0 mm, 仿真分析  $B$  对流场性能的影响。 $B$  对流道  $T_{\max}$ 、 $\Delta T$ 、 $\Delta p$  的影响如表 6 所示。由表 6 可知:  $T_{\max}$ 、 $\Delta T$ 、 $\Delta p$  随着  $B$  的增大而近乎线性下降。这表明, 增大  $B$  降低了流道密度, 使反应气体在单个流道内的流通更为通畅, 流动阻力减小, 整体对流换热能力增强。

不同  $B$  下的极化曲线和功率密度曲线如图 11 所示。

由图 11 可知:  $B$  对电池极化性能的影响与表 6 所示流动-传热特性完全相反, 即峰值功率密度随  $B$  增大而单调下降,  $B=6.0$  mm 时系统性能最优,  $B=8.0$  mm 时性能最差。这一矛盾揭示了 PEMFC 流场设计中更深层次的机制, 流道内看似“通畅”的流动, 并不等同于反应位点的“可达性”。当  $B$  较小时, 流道间距窄, 脊部面积相应减小, 这使得位于流道脊部下方的催化剂层更容易通过横向扩散获得来自两侧流道的反应气体, 尤其是在阴极侧。同时, 较窄的间距也增强了流道间可能存在的压力差, 促进了气体在 GDL 内的横向渗透。尽管此时流道内  $\Delta p$  和温度略高, 但极佳的脊下传质能力确保了高电流密度下催化剂层反应物的充足供应, 从而显著提高了电池的极限电流密度与峰值功率。反之, 当  $B$  过大时, 虽然单流道内流动顺畅, 但过宽的脊部成为反应物传输的瓶颈, 导致脊下区域严重缺乏反应物, 浓差极化急剧增大, 使

表 6  $B$  对流道  $T_{\max}$ 、 $\Delta T$ 、 $\Delta p$  的影响

$B/\text{mm}$	$T_{\max}/\text{K}$	$\Delta T/\text{K}$	$\Delta p/\text{Pa}$
6.0	361.89	8.74	80.23
6.5	361.54	8.39	76.25
7.0	361.13	7.97	73.43
7.5	360.79	7.64	70.96
8.0	360.68	7.61	70.13

得电堆性能严重受限。

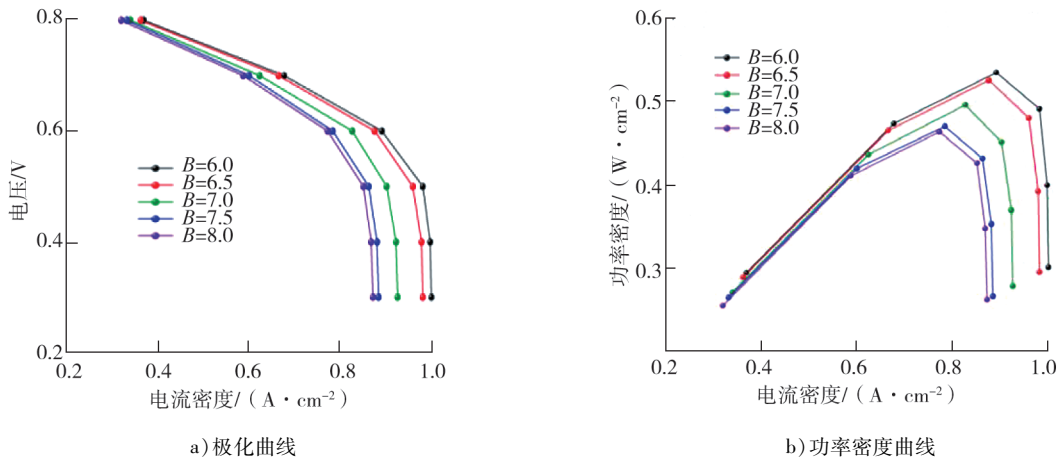


图 11 不同  $B$  下的极化曲线和功率密度曲线

通过对不同  $B$  下流道温度、压力分布进行仿真,系统分析  $B$  对流道内的流动结构与传热特性的影响规律,结果如图 12、13 所示。

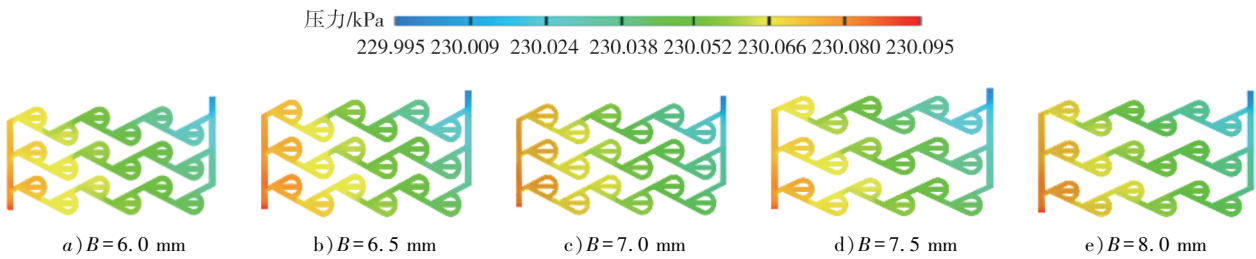


图 12 不同  $B$  下流道压力分布云图

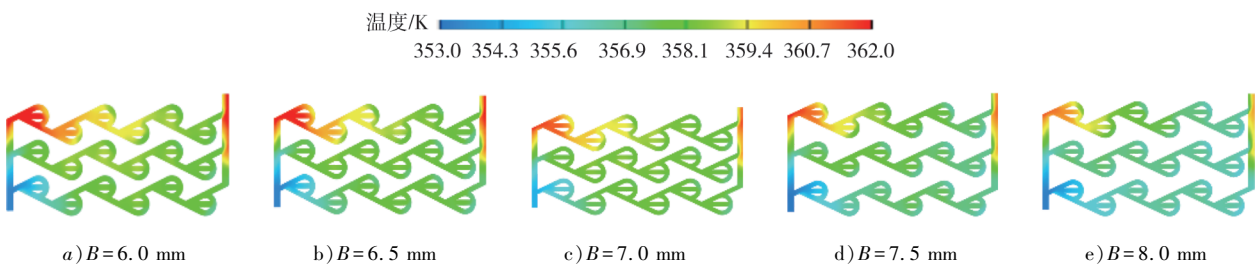


图 13 不同  $B$  下流道温差和压降分布云图

由图 12 可知:当  $B$  由 6 mm 增大至 8 mm,流道内的整体压力分布形态和压力梯度并未发生显著改变。原因为:特斯拉阀的压降主要来源于流道转向产生的形阻,而  $B$  并未直接改变流道单元的几何形状,因此对总压降的影响相对较弱。这一特性对 PEMFC 系统具有积极意义,即可以在不显著增加流动阻力的情况下减小  $B$  从而压缩双极板的面积。

由图 13 可知: $T_{\max}$  和  $\Delta T$  均随  $B$  的增大而减小。原因为: $B$  较小时,流道布局密集,流道间存在明显的热干扰现象,导致热量在局部区域聚集,不利于在膜电极上形成均匀的温度分布;随着  $B$  增大,可为每条流道提供更充分的换热空间,减小流道间的干扰,从而促进温度场的均匀化,增强了 PEMFC 的散热效果,降低了因冷却不均导致的局部热点风险。

综上所述,对参数  $B$  的优化通常需要结合双极板的整体尺寸与设计要求进行综合权衡,这实质上是在散热性能与结构约束之间寻求平衡,其核心在于平衡流道内的流动阻力与脊区下方的扩散传质阻力之间的矛盾。适度减小  $B$  能够有效增强脊下传质能力,由此带来的性能增益显著高于其所引起的流动阻力

增加,具有积极的综合收益。

### 3 结论

本文中通过 CFD 数值模拟,深入研究了特斯拉阀冷却流场的关键几何参数对 PEMFC 热管理性能的影响,得出以下主要结论。

1) 特斯拉阀夹角  $\alpha$  是影响流动阻力和温度均匀性的关键参数。 $\alpha$  增大能显著降低流道压降,但会削弱换热强度,导致流道最高温度和温差升高。 $\alpha = 125^\circ \sim 130^\circ$ , 可使流道在压降与温差之间达到最佳平衡。

2) 单元间距  $L$  显著影响多级特斯拉阀的流动协同性与温度分布。 $L$  过小导致单元间流动干涉加剧,压降与温升过高; $L$  过大则减弱换热效果。 $L = 1.0 \text{ mm}$  时,特斯拉阀单元间的协同作用最强,在维持合理流阻的同时,实现最佳的温度均匀性。

3) 流道间距  $B$  对反应气体在催化层的横向扩散能力影响显著,是解决脊下传质瓶颈的关键。减小  $B$  能够显著缓解浓差极化,提高 PEMFC 性能。

#### 参考文献:

- [1] THOMPSON S M, PAUDEL B J, JAMAL T, et al. Numerical investigation of multistaged Tesla valves[J]. Journal of Fluids Engineering, 2014, 136: 091102.
- [2] LU Y B, WANG J F, LIU F, et al. Performance optimisation of Tesla valve-type channel for cooling lithium-ion batteries [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 212(25): 118583.
- [3] GUO H, TIAN S, WANG L, et al. Numerical study of Tesla valve flow field on proton exchange membrane fuel cell performance[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50: 1573–1583.
- [4] XU L, LIN H W, HU N Y, et al. Multi-objective optimization towards heat dissipation performance of the new Tesla valve channels with partitions in a liquid-cooled plate[J]. Energies, 2024, 17(13): 3106.
- [5] GONG F, YANG X L, ZHANG X, et al. The study of Tesla valve flow field on the net power of proton exchange membrane fuel cell[J]. Applied Energy, 2023, 329: 120276.
- [6] ZHANG Y, HE S R, JIANG X H, et al. Performance and configuration optimization of proton exchange membrane fuel cell considering dual symmetric Tesla valve flow field[J]. Energy, 2024, 288: 129791.
- [7] 苏春雷, 丘东亮, 叶楷, 等. 特斯拉阀结构参数对单向导通性的影响及优化研究[J]. 高校化学工程学报, 2025, 39(6): 9.
- [8] 许建民, 杨炜, 武颂, 等. 双流道特斯拉阀液冷板传热分析及其多目标优化[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(11): 54–66.
- [9] 许隆华. 基于特斯拉阀液冷通道的动力电池散热结构设计与优化[D]. 南昌: 华东交通大学, 2025.
- [10] DE VRIES S, FLOREA D, HOMBURG F, et al. Design and operation of a Tesla-type valve for pulsating heat pipes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 105: 1–11.
- [11] WAHIDI T, CHANDAVAR R A, YADAV A K. Stability enhancement of supercritical CO<sub>2</sub> based natural circulation loop using a modified Tesla valve[J]. The Journal of supercritical fluids, 2020, 166: 105020.
- [12] AZARAFZA A, ISMAIL M S, REZAKAZEMI M, et al. Comparative study of conventional and unconventional designs of cathode flow fields in PEM fuel cell[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 116: 109420.
- [13] 龚繁. 基于特斯拉阀的进气换向式 PEMFC 流场研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2023.
- [14] WANG Y, WANG X, FAN Y, et al. Numerical investigation of tapered flow field configurations for enhanced polymer electrolyte membrane fuel cell performance[J]. Applied Energy, 2022, 306: 118021.
- [15] DENG T, RAN Y, ZHANG G, et al. Design optimization of bifurcating mini-channels cooling plate for rectangular Li-ion battery[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 139: 963–973.
- [16] 芦彦兵. 锂离子电池微通道冷板优化设计及换热性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [17] 皇甫宜耿, 石麒, 李玉忍. 质子交换膜燃料电池系统建模仿真与控制[J]. 西北工业大学学报, 2015, 33(4): 682–687.
- [18] 商显上, 李新海, 魏宁, 等. 氢燃料电池蛇形流道中阻块形状和分布对传质特性的影响[J]. 热力发电, 2022, 51(11): 90–99.

- [19] 曹艺萌. 无人船用氢燃料电池流道优化与系统性能评估预测研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2025.
- [20] 侯健,杨铮,贺婷,等. 质子交换膜燃料电池热管理问题的研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(1):19-30.
- [21] 胡卓煊,丁效誉,许佳寅. 特斯拉阀通道结构毛细芯对环路热管启动性能的影响[J]. 化工进展,2024,43(11):6031-6038.
- [22] 罗燕,马季红,王旭,等. 水下质子交换膜燃料电池系统的设计与热管理分析[J]. 机械制造,2025,63(10):53-59.

## Flow analysis and performance study of Tesla valve-type electrodes in hydrogen fuel cells

XIE Yawen<sup>1</sup>, LÜ Chengju<sup>2</sup>, LIU Yangyang<sup>1</sup>, WANG Yiming<sup>1</sup>,  
CHEN Zhongyan<sup>3</sup>, LI Xinhai<sup>1\*</sup>

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Shandong Transportation Research Institute, Jinan 250031, China;

3. Shandong Fuel Cell Power in Technology Co., Ltd., Jinan 250109, China

**Abstract:** To improve the pressure and temperature distribution within the bipolar plate flow field of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), thereby enhancing its thermal management performance, a bipolar plate structure based on the Tesla valve is designed. A three-dimensional multiphysics coupled model is constructed based on AVL FIRE™ M, and the variable control method is employed to compare the influence of key geometric parameters such as Tesla valve angle, unit spacing, and channel spacing on pressure drop, temperature difference, and maximum temperature as the flow channel structure varied. The results indicate that a smaller channel spacing (6.0–7.0 mm) facilitates enhanced mass transfer under the ribs, a shorter unit spacing (1.0 mm) introduces high-frequency flow disturbances, and a moderate Tesla valve angle (125°–130°) generates vortex structures that improve mass transfer within a controllable pressure drop range. These three factors work synergistically to form an efficient self-disturbing flow field, which prioritizes reactant supply and actively strengthens local heat and mass transfer, thereby improving the power density and operational stability of the PEMFC.

**Keywords:** PEMFC; Tesla valve; bipolar plate; vortex; polarization curve

(责任编辑:臧发业)