DOI: 10.19666/j.rlfd.202512051

基于矩形电极的全钒液流电池流道结构优化设计

靖博文[1]，崔双双[2]，王 锐[2]，鲁 正[1]，施 悦[1]
（1. 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院，黑龙江 哈尔滨 150000；
2. 北京低碳清洁能源研究院，北京 102211）

［摘 要］【目的】全钒液流电池适合大规模长时储能，但高投资成本和低能量密度使其应用受限。流道能够改善电池内的物质输运方式进而提高性能，本文探究了不同流道构型对电池内关键参数的影响规律。【方法】研究基于三维多物理场耦合仿真模型，针对应用于矩形电极的交指型流道开展了从整体到局部的系统性优化设计，评价了不同流道构型对流速、浓度、过电位和电池效率的影响。【结果】结果表明，采用主流道与电极长度方向平行，支流道呈单根交错排列，且支流道宽度和肋宽均为 3 mm 的流道构型时，电极内部的流动与传质能力将达到最优。此时在所研究的 12 种流道结构参数组合下，浓差极化降至 0.26 mV 的最低水平，且电池的能量效率达到 89.58%。【结论】该液流电池流道构型所对应的最佳流量为 7.5 mL/min，如果在保持电池总厚度不变时适当增加电极压缩比和电解液流量，则电池将取得更高的端电压和效率，且最高温升始终维持在 3 ℃内。本研究为高性能液流电池流道设计提供了参考依据。

［关 键 词］全钒液流电池；多物理场耦合；交指型流道；优化设计；能量效率

［引用本文格式］靖博文，崔双双，王锐，等. 基于矩形电极的全钒液流电池流道结构优化设计[J]. 热力发电，2026，55(9)：8.
Jing B W, Cui S S, Wang R, et al. Optimization of flow field design for vanadium flow battery with rectangular electrodes[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(9): 8.

Optimization of flow field design for vanadium flow battery with rectangular electrodes

Jing Bowen[1], Cui Shuangshuang[2], Wang Rui[2], Lu Zheng[1], Shi Yue[1]
(1. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150000, China;
2. National Institute of Clean and Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China)

Abstract: [Objective] Vanadium flow batteries (VFBs) are promising candidates for large-scale and long-duration energy storage. However, their practical application is still constrained by high capital cost and low energy density. Flow field design plays a critical role in enhancing mass transport within the electrodes and thereby improving overall battery performance. This study aims to clarify the influence of different flow field configurations on key parameters in VFBs. [Methods] A three-dimensional multi-physics coupling numerical model was established, incorporating fluid flow, mass transport, charge conservation in both solid and liquid phases, electrochemical reaction kinetics, and heat generation. The model was applied to a laboratory-scale vanadium flow battery with a rectangular electrode area of 4 cm ×7 cm. Based on the validated framework, a systematic optimization of interdigitated flow fields was conducted from global layout to local structural parameters, including main channel orientation, branch channel arrangement, branch channel width and rib width. Subsequently, the study conducted a parametric sensitivity analysis on the optimized flow channel, focusing on electrolyte flow rate, initial state of charge (SOC), and electrode compression ratio. This analysis quantitatively evaluated key performance indicators including velocity, concentration, polarization, terminal voltage, and power-based energy efficiency, aiming to

收 稿 日 期：2025-12-17 修 回 日 期：2026-01-14 接 受 日 期：2026-01-20
基 金 项 目：国家能源集团科技创新项目（GJNY-23-138）
Supported by: Science and Technology Innovation Project of CHN Energy Investment Group (GJNY-23-138)
第一作者简介：靖博文（2001），男，硕士研究生，主要研究方向为基于多场耦合理论的全钒液流电池流场优化设计，j_zephyr@163.com。
通信作者简介：鲁正（1989），男，博士，助理研究员，主要研究方向为船舶污染防治技术，604207471@qq.com。

investigate the interrelationships among these physical parameters. [Results] The simulation results demonstrate that aligning the main channels parallel to the electrode length direction significantly enhances under-rib convection by increasing the number of ribs and shortening branch channel length, thereby improving electrolyte penetration into deep electrode regions. A single alternating interdigitated arrangement of inlet and outlet branch channels effectively suppresses preferential flow toward the outlet side and reduces flow dead zones near the electrode edges. The optimal flow field configuration is achieved when both the branch channel width and rib width are 3 mm, under which concentration polarization is minimized to 0.26 mV, representing the lowest value among the 12 investigated flow-field structural parameter combinations. Meanwhile, the maximum temperature decreases to approximately 26.45 ℃, and the power-based energy efficiency reaches 89.58%. [Conclusion] Parametric analyses reveal that an electrolyte flow rate of 7.5 mL/min provides an optimal balance between enhanced mass transport and increased pumping losses. When coordinated with appropriate flow rate under a constant total cell thickness, higher compression ratios lead to increased terminal voltage and efficiency, with the maximum temperature rise remaining below 3 ℃. This research provides guidance for the flow field design of high-performance vanadium flow batteries.
Key words: vanadium flow battery; multi-physics coupling; interdigitated flow field; optimization design; energy efficiency

以风、光为首的可再生能源的发电能力依赖于气候状况，由此引起的发电间歇性和波动性对并网造成了巨大挑战[1-2]。储能系统可实现电能时空转移以便电网的统一调度，提高可再生能源消纳能力，防止“弃风弃光”引起的能源浪费[3]。在多种新型储能技术中，液流电池因其功率与容量解耦、本征安全且响应速度快等特性，在大容量长时储能场景中具有显著应用优势[4]。其中，全钒液流电池技术最成熟，但较高的初投资使其较主流储能技术缺乏竞争力，商业化进程受阻[5-6]。为解决上述问题，亟需提升功率密度与能量效率以降低系统规模和单位储能成本。

目前，针对液流电池电极和电解液等关键材料以及电堆尺度的系统控制策略和状态预测的研究都取得了显著成效[7-11]。而对结构优化的研究则以流道结构设计为主，基于有限元的数值模拟方法因设计效率高而被广泛采用。

Wang 等人[12]发现，当化学计量比大于 1 000 时，引入流道结构的性能优于无流道结构，这是由于较长的流径将成为影响传质的主要因素。Yin 等人[13]利用三维稳态模型探究了碳毡电极中雕刻交指型流道的影响，与在集流板侧设置同类流道和无流道构型相比，该构型在高流速下的系统效率优势明显。Huang 等人[14]发现，蛇形流道的功率和能效相比平行、交指型流道更好，当蛇形流道的截面从矩形变为梯形时，离子浓度分布均匀性会得到改善。Xiao 等人[15]进一步考察了其他截面形状的特点，发现其能量效率表现为：半圆形<梯形<矩形<三角形，因为半圆形截面的雷诺数最大。增加压力损失以换取传质能力也是一种重要优化思路。Lu 等人[16]据此在流道拐角处加入阻块，改良了阻断式蛇形流道，并确定了最优效率下的阻块厚度。类似地，Pan 等人[17]提出了名为“死区补偿流场”的通用性流道优化方式，其将任意类型连续流场内相邻流道中的低压差区域视为死区，通过减小死区中流道的高度来提高传质效能。此外，还有一些对流道进行完全重新设计的方案。Liu 等人[18]模仿蛛网设计出一种八边形液流电池和配套流道，并探究了流道分支数对传质和能效的影响；Wang 等人[19]受到叶脉的启发，设计出了叶脉状仿生流场，并通过改变电极内、外侧流道占比的方式再次提高了电池性能。另外，借助机器学习和拓扑优化等技术辅助流道设计，已成为该领域的前沿方向之一，具有良好的发展潜力[20-22]。

流道会影响液流电池内多种物理过程，而部分研究所用模型的物理场不完善，导致分析局限于压降和流速，且多数研究没有考虑电池运行时的温度变化。此外，现有流道设计主要基于方形电极，其设计方案可能隐性依赖于方形结构的高度对称性。因此，本研究通过构建更完整的流场−电化学场−物质传递场−温度场的多物理场耦合模型，对更常用的矩形全钒液流电池开展流道优化设计，系统探究流道整体布局、排布方式和关键尺寸参数对电池性能的影响，筛选出最佳流道构型。最后，研究针对优选出的流道开展了关键参数敏感性分析，探究不同运行条件下的电池性能特性。

1 仿真模型

图 1 为液流电池的工作原理。液流电池主要由单电池、泵、储罐和连接管路构成。电解液从储罐通过泵统一输送，反应后流回储罐形成回路；外电路通过极耳接入，以驱动电池实现储、释能过程。

在全钒液流电池中，负极电解液含 2、3 价钒离子，正极电解液含 4、5 价钒离子，其充放电的主反应过程可由下式表述。

负极侧：

$$V^{3+}+e^{-}\underset{\text{放电}}{\overset{\text{充电}}{\rightleftharpoons}}V^{2+},\ E_{0,-}=-0.255\ \text{V} \tag{1}$$

正极侧：

$$VO^{2+}+H_2O\underset{\text{放电}}{\overset{\text{充电}}{\rightleftharpoons}}VO_2^{+}+2H^{+}+e^{-},\ E_{0,+}=1.004\ \text{V} \tag{2}$$

式中：$E_{0,-}$为反应的负极标准电极电势，V；$E_{0,+}$为反应的正极标准电极电势，V。

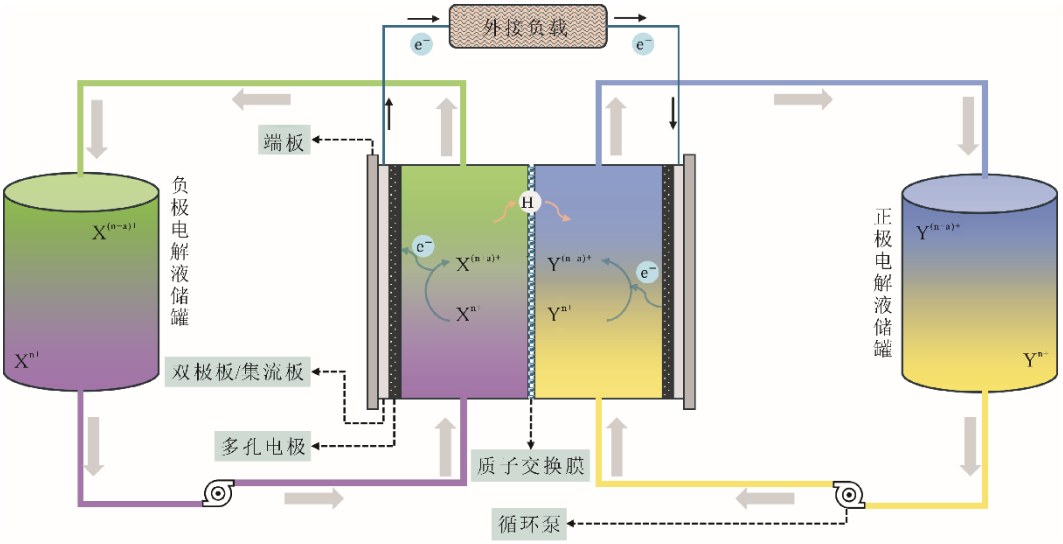


图 1 液流电池工作原理

Fig.1 Working principle of the flow battery

1.1 模型假设

为保证计算精度并提高求解效率，本文在建模过程中对全钒液流电池的运行过程作如下合理假设：

1）电池在常温常压条件下运行，水基电解液的密度变化可忽略，因而视为不可压缩流体；

2）所用电解液总钒浓度为 1.7 mol/L，可近似视为稀溶液，离子间的相互作用较弱，溶液物性参数不随浓度改变[23-24]；

3）析氢、析氧副反应由水的电化学窗口（1.23 V）与 VFB 的充放电电位区间重叠所致，在本研究选用的截止电压范围内并不明显，予以忽略；

4）离子互串引发的自放电反应主要影响电池的长周期运行性能，与流道构型关联较小，仅考虑电极上发生的主反应；

5）忽略重力作用及各部件间的接触电阻；

6）在宏观尺度上将多孔碳毡电极视为各向同性材料，各处孔隙率均匀。

1.2 流场模型

电解液存在于流道和电极内，其流动特性可用表 1 方程描述。

表 1 流场涉及的方程及符号说明

Tab.1 Equations and notations used in the flow field

公式名称	内容描述	公式	符号含义	编号
Navier-Stokes 方程	流道中电解液的动量守恒	$\frac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial t}+(\boldsymbol{V}\times\nabla)\boldsymbol{V}=f-\frac{1}{\rho}\nabla p+\frac{\mu}{\rho}\nabla^2\boldsymbol{V}$	ρ为密度；t 为时间；$\boldsymbol{V}$ 为速度矢量；p 为压力；f 为体积力；μ为动力黏度	(3)
Brinkman 方程	电极中电解液的动量守恒	$\frac{\rho}{\varepsilon_p}\left(\frac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial t}+(\boldsymbol{V}\cdot\nabla)\frac{\boldsymbol{V}}{\varepsilon_p}\right)=-\nabla p+\nabla\cdot\left\{\frac{1}{\varepsilon_p}\left[\mu(\nabla\boldsymbol{V}+(\nabla\boldsymbol{V})^{\mathrm{T}})-\frac{2}{3}\mu(\nabla\cdot\boldsymbol{V})\mathbf{I}\right]\right\}-\left(\frac{\mu}{\kappa}+Q\right)\boldsymbol{V}-\beta_{\mathrm{F}}\lvert\boldsymbol{V}\rvert\boldsymbol{V}$	ε_p为孔隙率；I 为单位张量；κ为渗透率；Q 为体积力源项；β_{F} 为惯性阻力系数	(4)

1.3 物质传递模型

电解液含各价态钒离子和硫酸解离形成的相关离子，离子的传递特性可用表 2 方程描述。

1.4 电场模型

液流电池的电位和电流密度的分布规律可用表 3 方程描述。

1.5 电极动力学模型

极化是电极反应的重要动力学特征，直接影响反应速率，并对电池整体性能产生显著作用，其可用表 4 方程描述。

表 2 物质传递场涉及的方程及符号说明
Tab.2 Equations and notations used in the mass transfer field

公式名称	内容描述	公式	符号含义	编号
物质守恒方程	各离子的物质守恒关系	$\frac{\partial c_i}{\partial t}+\nabla\cdot\boldsymbol{N}_i=M_{i,\mathrm{tot}}$	下标 i 为物种类别；c 为离子浓度；N 为物质通量；下标 tot 为总和；M 为电极反应或硫酸解离产生的源项	(5)
Nernst-Planck 方程	反应引起的离子通量变化	$\boldsymbol{N}_i=-D_{i,\mathrm{eff}}\nabla c_i-z_i u_{\mathrm{m},i}Fc_i\nabla\phi_\mathrm{l}+c_i\mathbf{u}$	z 为离子电荷数；F 为法拉第常数；u_m 为电迁移率；D_eff 为有效扩散系数；ϕ_l 为电解质电位	(6)

表 3 电场涉及的方程及符号说明
Tab.3 Equations and notations used in the electric field

公式名称	内容描述	公式	符号含义	编号
Nernst 方程[25]	电池的开路电压（平衡电位）	$E_\mathrm{eq}=E_\ominus+\frac{RT}{nF}\ln\frac{c_5\cdot c_2\cdot c_{\mathrm{H}^+}^2}{c_4\cdot c_3}$	E_eq 为电池平衡电位；$E_\ominus$ 为标准电池电位；R 为理想气体常数；T 为体系温度；n 为反应转移的电子数；下标 2、3、4、5 为各价态钒离子；下标 H^+为氢离子	(7)
电解液中的电流密度方程		$\boldsymbol{i}_\mathrm{e}=\sum\boldsymbol{i}_i=-\sigma_\mathrm{e}^\mathrm{eff}\nabla\varphi-F\sum z_iD_{i,\mathrm{eff}}\nabla c_i$	$\boldsymbol{i}_\mathrm{e}$ 为电解液的总电流密度；$\sigma_\mathrm{e}^\mathrm{eff}$ 为电解液有效电导率；φ为电势	(8)
电解液有效电导率计算公式		$\sigma_\mathrm{e}^\mathrm{eff}=\frac{F^2}{RT}\sum z_i^2D_{i,\mathrm{eff}}\nabla c$	$\boldsymbol{i}_i$为物种 i 离子产生的电流密度	(9)

表 4 电极动力学涉及的方程及符号说明
Tab.4 Equations and notations used in electrode kinetics

公式名称	内容描述	公式	符号含义	编号
Butler-Volmer 方程[26]	极化与电流密度和离子浓度的关系	$\begin{cases}\nabla\boldsymbol{i}_{\mathrm{net},-}=AF\tau_{0,-}(c_{2,\mathrm{s}})^{\alpha_{\mathrm{c},-}}(c_{3,\mathrm{s}})^{\alpha_{\mathrm{a},-}}\cdot\\ \left[\left(\frac{c_{2,\mathrm{l}}}{c_{2,\mathrm{s}}}\right)\exp\left(\frac{\alpha_{\mathrm{c},-}F\eta_{\mathrm{act},-}}{RT}\right)-\left(\frac{c_{3,\mathrm{l}}}{c_{3,\mathrm{s}}}\right)\exp\left(\frac{-\alpha_{\mathrm{a},-}F\eta_{\mathrm{act},-}}{RT}\right)\right]\\ \nabla_{\mathrm{net},+}=AF\tau_{0,+}(c_{4,\mathrm{s}})^{\alpha_{\mathrm{c},+}}(c_{5,\mathrm{s}})^{\alpha_{\mathrm{a},+}}\cdot\\ \left[\left(\frac{c_{4,\mathrm{l}}}{c_{4,\mathrm{s}}}\right)\exp\left(\frac{\alpha_{\mathrm{c},+}F\eta_{\mathrm{act},+}}{RT}\right)-\left(\frac{c_{5,\mathrm{l}}}{c_{5,\mathrm{s}}}\right)\exp\left(\frac{-\alpha_{\mathrm{a},+}F\eta_{\mathrm{act},+}}{RT}\right)\right]\end{cases}$	下标–为负极；下标+为正极；下标 s 为电极表面；下标 l 为溶液本体；$\boldsymbol{i}_\mathrm{net}$ 为反应电流密度；A 为电极比表面积；α_c 为电极还原传递系数；α_a 为电极氧化传递系数；η_act 为活化过电位	(10)
	电极的活化过电位	$\eta_\mathrm{act}=-\frac{2RT}{F}\sinh^{-1}\left(\frac{\boldsymbol{i}_\mathrm{net}}{2F\tau_0\sqrt{c_\mathrm{R}c_\mathrm{O}}}\right)$	τ_0为反应速率常数；下标 R 为还原态；下标 O 为氧化态	(11)
	电极的浓差过电位	$\eta_\mathrm{c}=\frac{RT}{nF}\ln\frac{c_\mathrm{s}}{c_\mathrm{l}}=\frac{RT}{nF}\ln\left(1-\frac{\boldsymbol{i}_\mathrm{net}}{nFk_\mathrm{m}c_\mathrm{l}}\right)$	η_c 为浓差过电位；k_m 为有效传质系数	(12)

1.6 温度场模型

液流电池运行时存在焦耳热、极化热和反应热 3 种热源，电池的温度特性可用表 5 方程描述。

表 5 温度场涉及的方程及符号说明
Tab.5 Equations and notations used in the temperature field

公式名称	内容描述	公式	符号含义	编号
欧姆定律	电池中的焦耳热	$Q_\mathrm{j}=-(\boldsymbol{i}_\mathrm{s}\cdot\nabla\phi_\mathrm{s}+\boldsymbol{i}_\mathrm{e}\cdot\nabla\phi_\mathrm{e})$	Q_j 为焦耳热热流量；$\boldsymbol{i}_\mathrm{s}$ 为固相电流密度	(13)
电化学热计算公式	浓差极化与活化极化产热，反应引起的可逆热	$Q_\mathrm{m}=\left(\phi_\mathrm{s}-\phi_\mathrm{e}-E_\mathrm{eq}+T\frac{\partial E_\mathrm{eq}}{\partial T}\right)\boldsymbol{i}_\mathrm{net}$	Q_m 为电化学热热流量；ϕ_S 为固相电势；ϕ_e 为液相电势	(14)
热量守恒方程	电池内的热源、热传导与对流传热关系	$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}+\rho C_p\boldsymbol{V}\cdot\nabla T=\nabla\cdot(\lambda\nabla T)+Q_\mathrm{h}$	C_p 为电解液比定压热容；λ为导热系数；Q_h 为总热流量	(15)

1.7 储液罐模型

为减少储罐中相界面变化和物质动态传递的计算成本，研究引入了物质瞬间混合且浓度分布均匀的假设，将储罐简化为使用微分方程描述的零维模型：

$$c_{i,\mathrm{res}}=\frac{\partial c_{i,\mathrm{res}}}{\partial t}\cdot B_{\mathrm{res}}(S_{\mathrm{in}}\cdot q_{\mathrm{flow}}\cdot c_{i,\mathrm{res}})-N_i \tag{16}$$

式中：下标 res 为储罐；B 为体积，m^3；S_{in} 为电解液入口截面积，m^2；q_{flow} 为电解液入口流速，m/s；N 为离子流入电池的摩尔流率，mol/s。

1.8 评价指标

研究引入了均匀性因子，用于评估不同流道构型下的速度和浓度在电极内分布的一致性。能量效率代表了液流电池能量转换和利用的能力，在流道结构优化所用的稳态模型中，由于不涉及时间尺度，可以采用基于功率的方式等效计算能量效率[19]。各评价指标的计算方式见表 6。

表 6 全钒液流电池评价指标计算方式

Tab.6 Calculation methods of evaluation metrics for vanadium flow battery

公式名称	描述内容	公式内容	符号含义	编号
速度均匀性因子	电极内速度分布一致性	$U_{\mathrm{v}}=1-\frac{1}{v_{\mathrm{avg}}}\sqrt{\frac{1}{B_{\mathrm{e}}}\iiint(v-v_{\mathrm{avg}})^2\,d(B_{\mathrm{e}})}$	U_{V} 为速度均匀性；U_{c} 为浓度均匀性；下标 avg 为电极内均值	(17)
浓度均匀性因子	电极内各离子浓度分布一致性	$U_{\mathrm{c}}=1-\frac{1}{c_{i,\mathrm{avg}}}\sqrt{\frac{1}{B_{\mathrm{e}}}\iiint(c_i-c_{i,\mathrm{avg}})^2\,d(B_{\mathrm{e}})}$		(18)
能量效率计算公式		$\xi=\frac{P_{\mathrm{net}}}{P_{\mathrm{total}}}=\frac{P_{\mathrm{total}}-P_{\mathrm{pump}}-P_{\mathrm{loss}}}{P_{\mathrm{total}}}$	ξ为能量效率；P_{net} 为净可用功率；P_{total} 为放电功率；P_{pump} 为泵功率；P_{loss} 为总极化功率	(19)

2 求解设置与精度验证

2.1 初始参数

研究为全参数化建模，以实验室 4 cm×7 cm 矩形电池为研究对象，模型计算域包含多孔电极、隔膜和流道 3 部分，各类参数与初始值见表 7—表 11。

表 7 电池结构参数

Tab.7 Structural parameters of the battery

项目	数值	项目	数值
隔膜厚度 L_{m}/μm	50	电极初始厚度 H_{e}/mm	2.5
电极长度 L_{e}/mm	70	负极储罐体积 $B_{\mathrm{res,-}}$/cm^3	40
电极宽度 W_{e}/mm	40	正极储罐体积 $B_{\mathrm{res,+}}$/cm^3	40

表 8 操作条件

Tab.8 Operating conditions

项目	数值	项目	数值
电解液流量 Q_{f}/(mL·min^{-1})	25	充电截止电压 V_{top}/V	1.6
出口压力 p_{out}/Pa	0	放电截止电压 V_{bot}/V	1.0
体系初始温度 T_{env}/℃	25	充/放电搁置时间 t_{p}/s	30
充/放电流密度 i_{apply}/(mA·cm^{-2})	160	泵效率 η_{p}	0.65

表 9 电极物性参数

Tab.9 Physical property parameters of the electrode

项目	数值	项目	数值
比表面积 $a_{\mathrm{v,m}}$/m^{-1}	1×10^5	电导率 σ_{S}/(S·m^{-1})	1 000
纤维直径 d_{p}/μm	10	导热系数 λ_{S}/(W·(m·K)$^{-1}$)	0.1
孔隙率 η_{p}	0.95	比热容 $c_{\mathrm{s,p}}$/(J·(g·K)$^{-1}$)	1.6
Kozeny-Carman 常数 K_{KC}	4.28	电极密度 ρ_{S}/(g·cm^{-3})	0.3

表 10 电解液物性参数

Tab.10 Physical property parameters of the electrolyte

项目	数值	项目	数值
V^{2+}初始浓度 $c_{2,0}$/(mol·m^{-3})	850	电解液黏度 μ/(Pa·s)	4.928×10^{-3}
V^{3+}初始浓度 $c_{3,0}$/(mol·m^{-3})	850	H^+扩散系数 D_{H}/(m^2·s^{-1})	9.31×10^{-9}
VO^{2+}初始浓度 $c_{4,0}$/(mol·m^{-3})	850	V^{2+}扩散系数 D_2/(m^2·s^{-1})	2.4×10^{-10}
VO_2^+初始浓度 $c_{5,0}$/(mol·m^{-3})	850	V^{3+}扩散系数 D_3/(m^2·s^{-1})	2.4×10^{-10}
H^+负极初始浓度 $c_{\mathrm{H,0,-}}$/(mol·m^{-3})	4 448	VO^{2+}扩散系数 D_4/(m^2·s^{-1})	3.9×10^{-10}
H^+正极初始浓度 $c_{\mathrm{H,0,+}}$/(mol·m^{-3})	5 098	VO^{2+}扩散系数 D_5/(m^2·s^{-1})	3.9×10^{-10}
电解液电导率 σ_{e}/(S·m^{-1})	25	电解液比热容 c_{p}/(J·(g·K)$^{-1}$)	3.2
电解液密度 ρ_{l}/(kg·m^{-3})	1 500		

表 11 电化学参数

Tab.11 Electrochemical parameters

项目	数值	项目	数值
负极速率常数 $k_{0,-}$/(m·s^{-1})	1.7×10^{-7}	正极标准电势 $E_{0,+}$/V	1.004
负极标准电势 $E_{0,-}$/V	–0.255	氧化传递系数 α_{a}	0.5
正极速率常数 $k_{0,+}$/(m·s^{-1})	6.8×10^{-7}	还原传递系数 α_{c}	0.5

2.2 边界条件

边界条件用于限定解空间，保证模型在数学上的可解性与物理上的合理性。

流场采用充分发展的恒流量速度入口：

$$\boldsymbol{V}\cdot\boldsymbol{V}_{\mathrm{b}}=0 \tag{20}$$

式中：$\boldsymbol{V}_{\mathrm{b}}$ 代表边界处的速度矢量，m/s。

除进/出口通道外，其余边界均为无滑移壁面且离子通量为 0：

$$-\boldsymbol{n}\cdot(-D_{i,\mathrm{eff}}\nabla c_i-z_i u_{\mathrm{m},i}Fc_i\nabla\phi_{\mathrm{l}}+\boldsymbol{V}c_i)=0 \tag{21}$$

式中：$\boldsymbol{n}$ 为单位法向量。

除进/出口通道外，其余边界均设置为热绝缘：

$$-\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{q}=0 \tag{22}$$

$$\boldsymbol{q}=-\lambda\Delta T \tag{23}$$

式中：$\boldsymbol{q}$ 为热通量矢量，W/m^2。

除电极−双极板接触面外，其余边界均设置为电绝缘：

$$-\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{i}_{\mathrm{e}}=0 \tag{24}$$

$$-\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{i}_{\mathrm{s}}=0 \tag{25}$$

负极−双极板接触面电接地，边界电势为 0：

$$\phi_{\mathrm{s}}=0 \tag{26}$$

2.3 模型精度验证

使用无流道实验室电池的端电压数据对无流道瞬态模型进行校核（图 2），为避免首次充放电的不稳定性，校核数据选取 3.36 A 恒电流运行时第 3 次循环的充放电曲线。在相同测试条件下，实验重复进行了 3 次，每次充放电曲线基本重合，表明实验结果具有良好的可重复性，可用于仿真模型的校核。

图 2 的结果表明，实验和仿真模型得出的电池端电压变化趋势一致：在充、放电的初期和末期斜率明显增大，其余时间变化平缓。模拟结果展现出比实验略小的总过电位，这是由于模型未考虑电池构件间的接触内阻导致总内阻被低估[27]。模拟得出的放电时间稍长则是因为模型忽略了副反应与互串反应。

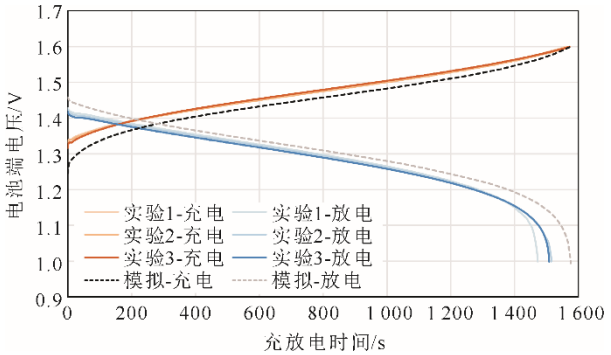


图 2 模拟结果与实验结果对比

Fig.2 Comparison between the simulation results and the experimental results

如果适当补偿由接触内阻引起的约 58 mV 的电压损失，则模拟结果和实验结果将高度一致，此时平均电压误差小于 0.006 7 V（0.55%），这说明模型可正确反映全钒液流电池的反应机理及电化学性能。

3 结果与讨论

3.1 流道布局方式

本节研究了流道布局方式对电池性能的影响，2 种交指型流道构型如图 3 所示，2 种初始构型的流道宽和肋宽一致。其中，构型 1-A 的主流道平行于电极的宽边，构型 1-B 的主流道平行于电极的长边，且进、出口位置也随主流道方向相应调整。

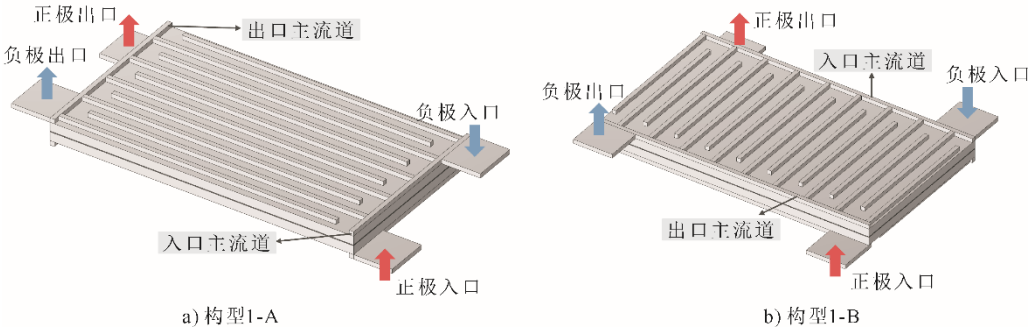


图 3 2 种交指型流道构型

Fig.3 Two interdigitated flow field configurations

图 4 为电解液流入 2 种交指型流道构型后的速度分布。由图 4a)、图 4b)可知，电解液流入后接触主流道内壁改变流向，引起的扰动加快了电解液的渗入速度。入口支流末端被阻塞迫使电解液流入电极，直至靠近出口流道后渗出，因此支流末端处电极内流速高于附近区域。在电极内，由于距离支流始端的分流区域和末端的阻塞区均最远，支流道中部流速略低于两端，在支流更长的构型 1-A 中，该

现象更明显。整体来看，流动死区主要分布在电极边缘的支流道附近，特别是强制对流效应更弱的进出口对侧角落处；相比之下，构型 1-B 中的流速分布更均匀且流速均值更高。

根据图 4c)、图 4d)可知，肋下更大的压力梯度导致其流速总是高于流道下方。在构型 1-A 中，流速在临近电极边缘的前 2 个肋下较低，从第 3 个肋处开始明显升高，并在电极中部达到最高值；在构型 1-B 中，流速在第 2 个肋下便出现跃升。这是因为电解液总体倾向于沿进出口对角方向流动，而位于电极边缘的支流与电极对角线的平均距离最大，尤其是构型 1-A。此外，构型 1-B 在电极长、宽方向上的流速峰值均高于构型 1-A，且高流速区的分布更广，说明电解液渗透更充分；在流速沿厚度方向衰减的情况下，近膜侧流速仍然保持较高水平。

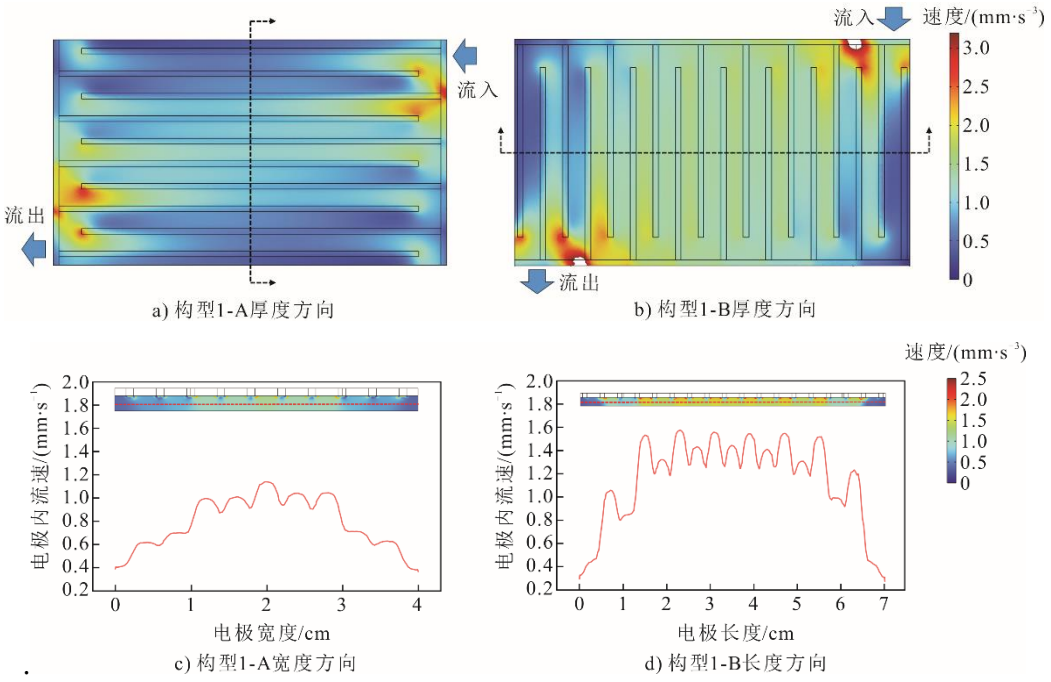


图 4 电解液流入 2 种流道构型后的速度分布

Fig.4 Velocity distribution of the electrolyte after flowing into two flow channel configurations

图 5 为 2 种构型放电时电极厚度中截面与电极长度中截面反应物 V^{2+}浓度分布。在近双极板侧，肋下对流主导传质，较高流速有利于反应物补充和浓度的维持；隔膜一侧距流道更远，传质由效率更低的扩散作用主导，且已有部分反应物被消耗，故此处离子浓度较低。电极边缘与最外侧支流道之间存在显著的低浓度区，因为此处缺乏额外的支流促进对流传质，限制了物质更新，但在出口处电解液重新汇集使浓度回升。2 种流道在远离出口处的反应物浓度均维持在较高水平，但构型 1-A 出口侧的低浓度区范围明显大于构型 1-B，表明后者在最外侧支流道附近具有更强的对流补偿能力，可抑制局部极化升高。

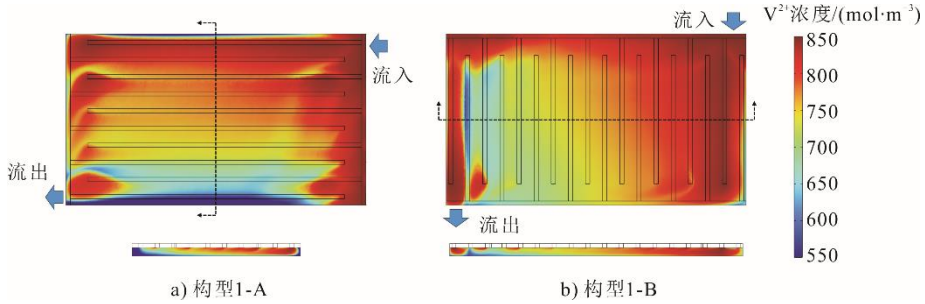


图 5 2 种流道构型中 V^{2+}浓度分布

Fig.5 Distribution of V^{2+} concentration of two flow channel configurations

表 12 为使用构型 1-A 和 1-B 时电极内部分参数值。从表 12 可知，构型 1-B 在平均流速和平均浓度方面分别较构型 1-A 提高 32.51%和 2.76%，同时其流速与浓度均匀性亦有改善。这得益于构型 1-B 更小的流动死区带来的更强的传质能力，能实现反应物的快速补充，从而保持电极内离子浓度相对均匀，保证反应充分进行并提升平衡电位，也能避免局部浓度过低引发的高浓差极化。若将流速低于平均值的区域视为低流速区，则死区中的流速远小于平均值[28-29]。当流道结构能够增强电解液在电极内的渗透能力并改善流速分布时，电极中流动死区的占比便会随之减小，从而同步提升平均流速和反应物平均浓度。因此，构型 1-B 平均流速与平均浓度更高实质上反映其流动死区范围的缩小和传质条件的改善，而流动死区的减小也提高了构型 1-B 的均匀性指标。

表 12 使用构型 1-A 和 1-B 时电极内部分参数值
Tab.12 Partial parameter values inside the electrode under configurations 1-A and 1-B

参数归属	流速均值/($mm\cdot s^{-1}$)	流速均匀性	V^{2+}浓度均值/($mol\cdot m^{-3}$)	V^{2+}浓度均匀性
构型 1-A	0.983 1	0.507 6	741.23	0.884 8
构型 1-B	1.302 7	0.591 9	761.65	0.923 3
相对变化量/%	+32.51	+16.61	+2.76	+4.35

放电时正、负极反应均放热，加之电流会引发焦耳热，导致电池温度升高，放电时不同流道构型的温度分布如图 6 所示，不同流道构型下的电池温度参数如表 13 所示。由图 6 可知，电池温度在靠近出口的负极外表面处达到最高值。构型 1-B 因流速较高而具有更强的对流传热效率，其温度峰值以及平均值均比构型 1-A 略低，更好的散热性能有助于其在高电流密度下更稳定地运行。

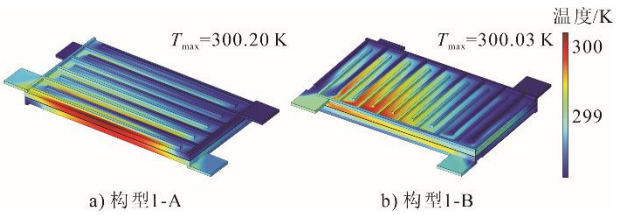


图 6 2 种流道构型的温度分布
Fig.6 Temperature distribution of two flow channel configurations

表 13 不同流道构型下的电池温度参数　　单位：℃
Tab.13 Battery temperature parameters under different flow field configurations

参数归属	温度均值	平均温升	温度最高值
构型 1-A	25.75	0.75	27.05
构型 1-B	25.71	0.71	26.88
相对温升变化量/%	–0.16	–5.33	–0.63

综上，构型 1-B 在流动、传质和传热各方面的表现均优于构型 1-A，在保证较强肋下对流的同时，兼顾了较好的流速均匀性和适中的压力损失，有利于实现更高的充、放电性能和更稳定的温度控制，宜作为后续优化基准。

3.2 支流道排布方式

为探究进、出口支流排布方式对流动与传质特性的影响，研究基于构型 1-B 提出了另外 2 种交指型流道变体，具体如图 7 所示。在支流道间距不变的前提下，构型 2-A 的进、出口支流呈 2 根 1 组交替排列，而构型 2-B 的支流呈 3 根 1 组交替排列，各个构型支流道总数目相同。

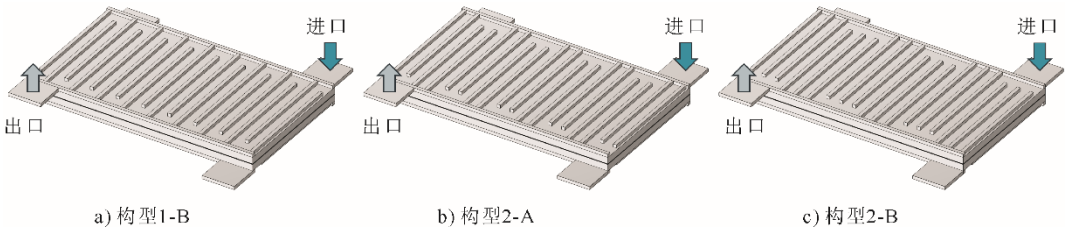


图 7 不同流道排布方式
Fig.7 Different flow field arrangements

不同流道构型的电极内厚度中截面及其中心截线上的速度分布如图 8 所示。根据图 8 可知，随着每组流道中的支流数目增加，电极宽边附近的流动死区面积不断增大，在构型 2-A 与 2-B 之间的差异尤为明显。按照从左至右的方向，构型 1-B、2-A 和 2-B 中的流速分别在第 2、3、4 根肋下首次跃升，而电极中部流速相对稳定的区域不断收窄。相较于构型 1-B，构型 2-A、2-B 的流速均匀性分别降低了 2.52%和 57.76%。这是因为各相邻进口支流道间的压差和各相邻出口支流道间的压差并不明显，难以形成有效的强制对流效应。

构型的改变使首个进口支流的位置向内移动，

电解液流入其中的流阻增大；又因为附近转角处会产生较高局部损失，使电解液经电极内部直接流入出口支流道的压降低于流入最近处入口支流，导致部分电解液未在电极内充分分散便立即流出。这既不利于传质，也会因高压降损害电池能量效率，而构型 1-B、2-A、2-B 的进出口压差分别为 1 733.8、1 742.0、2 023.5 Pa。

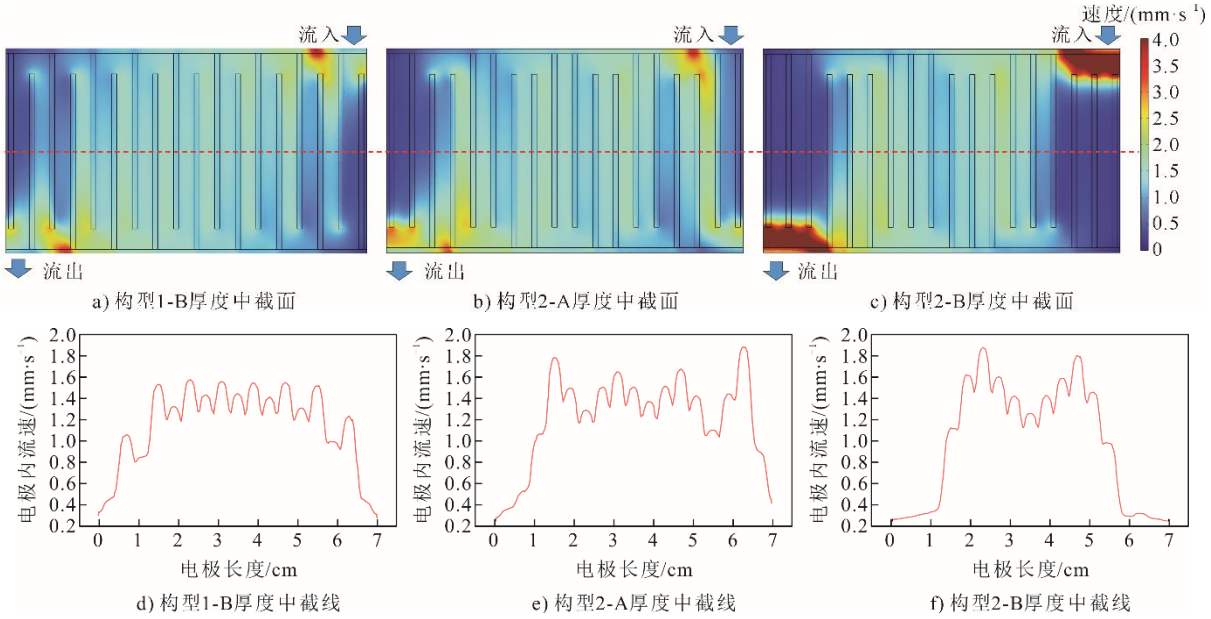


图 8 不同流道构型电极内厚度中截面及其中心截线上的速度分布

Fig.8 Velocity distributions on the mid-thickness cross-section and its centerline within electrodes with different flow channel configurations

放电时，不同流道构型中电极内 V^{2+}浓度均值和电极内各价钒离子浓度均匀性如图 9 所示。

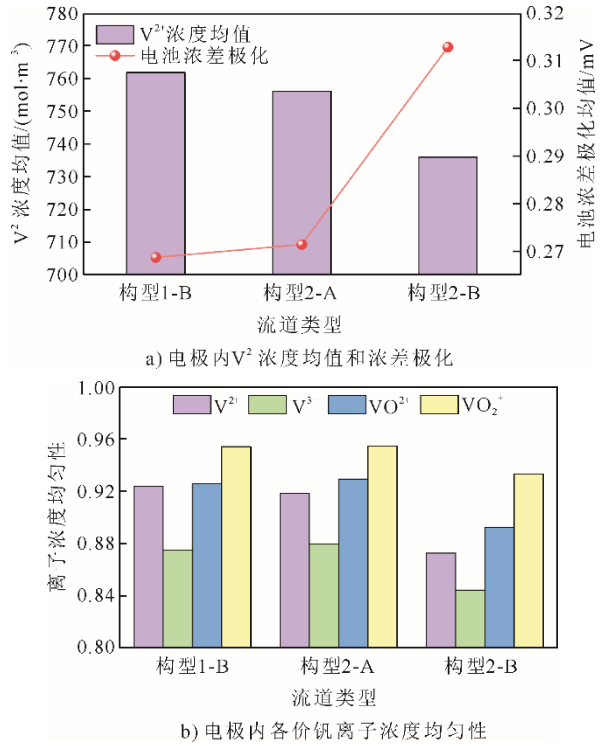


图 9 不同流道构型中电极内 V^{2+}浓差极化和离子浓度参数

Fig.9 Parameters of V^{2+} concentration polarization and ion concentration in electrodes with different flow channel configurations

由图 9 可知，随着 3 种流道构型中的高、低流速区变得明显，反应物更难渗入电极内，导致电极内 V^{2+}等离子的平均浓度下降，到达电极表面的可用反应离子更少，电池整体浓差极化加剧。浓度均匀性与流速均匀性呈正相关，流速均匀性下降时浓度均匀性也会随之恶化，进而提高电池浓差极化。此外，VO^{2+}与 VO_2^+离子的扩散系数均高于 V^{2+}与 V^{3+}，因而正极钒离子的浓度均匀性总是优于负极，可知浓差极化主要由负极贡献。

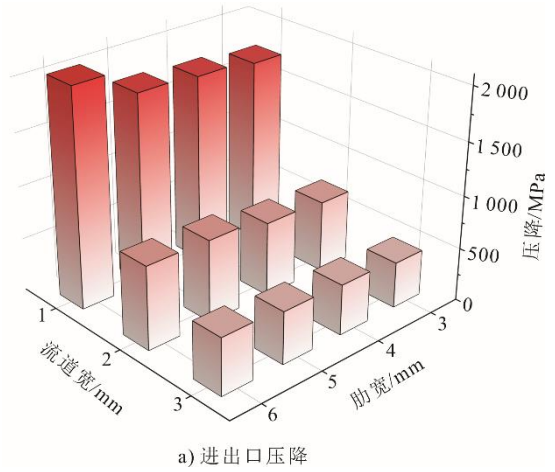
综上，构型 1-B 中的流速与浓度分布相较于构型 2-A 和构型 2-B 更均匀，具有更优秀的流动−传质能力，宜作为下一步优化的基准。

3.3 流道结构参数

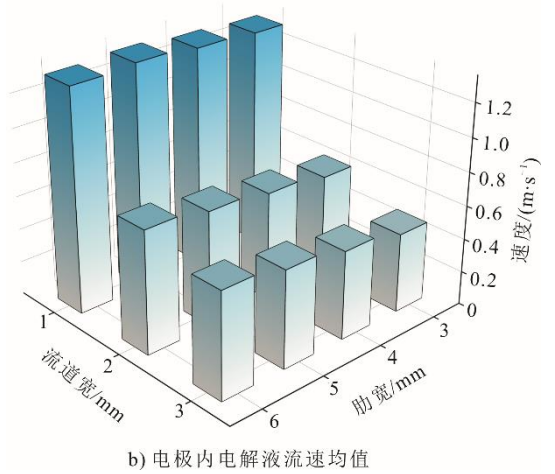
为进一步探索流道结构参数对电池性能的影响，本节以构型 1-B 为基础，对肋宽 R 和流道宽度 C 进行调整，探索了 12 种肋宽−流道宽组合下的电池性能。构型 R3C1 表示肋宽为 3 mm 而流道宽为 1 mm 的构型。

放电时，不同流道构型中进出口压降及电极内电解液流速均值如图 10 所示。根据图 10 可知：压降随流道宽度增加而减小，因为宽流道中的电解液流速低于窄流道，流道宽度从 1 mm 增至 2 mm 引

起的压降变化最显著；肋宽越大则压降越大，因为电解液在电极内单次的流动距离增加，而多孔介质中的流阻远大于流道流阻。在流道宽度一定的相邻构型中，R6C1 与 R5C1 之间的压降变化最大，从 2 059.6 Pa 下降了 11.9%至 1 814.3 Pa，而其余相邻构型间的压降变化较小。对于流道宽为 1 mm 的结构，其电极内流速相近；对于其他肋宽或流道宽恒定的构型组，流速变化趋势与压降一致。较高的电极内流速依赖于支流道间充分的肋下对流与相邻区域中较强的压差驱动。高流速与低压降难以兼得，在 12 种构型中，R5C1 的电极内平均流速最大，R3C3 则最小。



a) 进出口压降

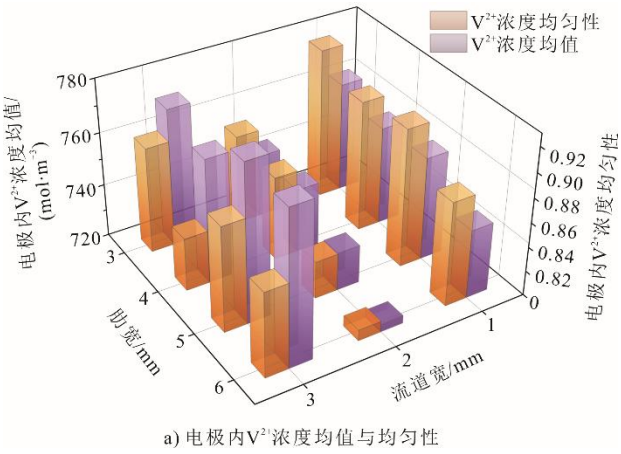


b) 电极内电解液流速均值

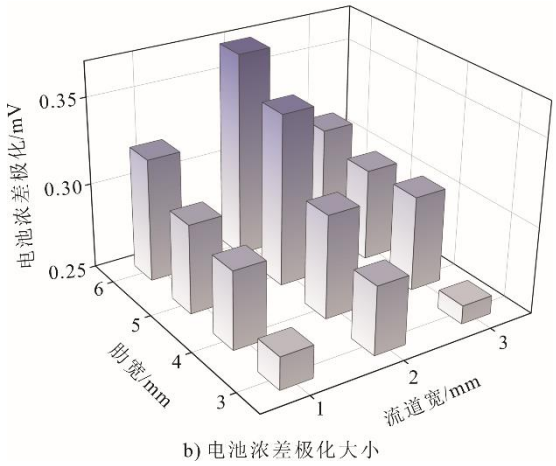
图 10 不同流道构型中进出口压降及电极内电解液流速

Fig.10 Pressure drops across inlet and outlet and the electrolyte flow velocity within electrodes in different flow channel configurations

放电时，不同流道构型中电极内 V^{2+}浓度均值与均匀性和电池浓差极化大小如图 11 所示。由图 11 可知，反应物浓度均值及其均匀性与流速均值没有显著相关性，因为浓度参数不仅与流速大小有关，还受到流速分布和反应速率的综合影响。当流道宽度为 2 mm 时，各肋宽下对应的 V^{2+}离子平均浓度和均匀性大都低于流道宽为 1 mm 和 3 mm 的构型，说明这些构型中反应物供给受限，而浓差极化也更高。这是由于更窄流道中的流速更大，物质局部供给充足；而更宽流道在电极表面的覆盖面积更大，可供电解液向多孔电极内部渗入的区域增加。若将每种结构的 V^{2+}浓度均值与均匀性从高至低排序，则当 2 种参数在所有构型中的排名均靠前且排名次序相差较小时，该结构引起的浓差极化会较低，而 R3C3 的浓差极化为 0.26 mV，在 12 种构型中处于最低水平，电池的能量效率达到 89.58%。



a) 电极内V^{2+}浓度均值与均匀性



b) 电池浓差极化大小

图 11 不同流道构型中电极内 V^{2+}浓度均值、均匀性和浓差极化

Fig.11 Mean concentration, uniformity, and concentration polarization of V^{2+} within electrodes in different flow channel configurations

综上，构型 R3C3 兼具低压降和低浓差极化，利于减小辅助功耗和电压损失，宜作为 4 cm×7 cm 电池的最优交指型流道。

3.4 关键参数敏感性分析

为进一步深入理解 R3C3 构型对关键参数变化

的响应特性，本节将针对电解液流量、初始 SOC 和电极压缩比 3 种参数进行敏感性分析。

3.4.1 电解液流量

电池运行时，高电解液流量利于反应物供应，但也会增加泵的能耗[30]。因此本小节将研究 2.5~75.0 mL/min 流量范围内电池中的物理量及能量效率的变化规律与特性，具体如图 12 所示。

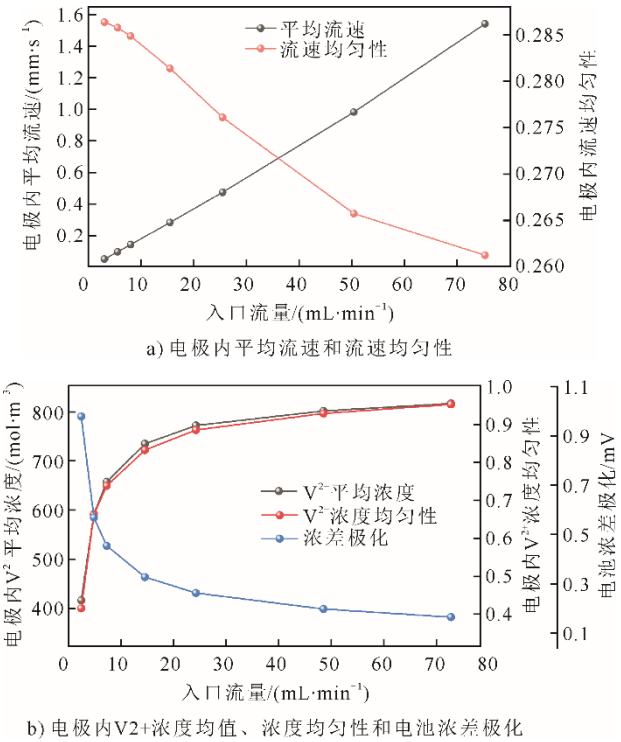


图 12 入口流量对电极内流动与传质性能的影响
Fig.12 Effects of inlet flow rate on flow and mass transfer characteristics in the electrode

提高入口流量使电极内流速增加，但流速均匀性持续降低。增加流速利于电极表面参与反应的 V^{2+}迅速更新，在反应物消耗速率基本不变时，浓度均值将逐渐接近 850 mol/m^3 的入口浓度，故其增长速率随之减缓。由于强对流效应在促进离子混合与输送方面的作用超过了流场不均匀带来的影响，浓度均匀性会随浓度均值的增加而同步改善。浓差极化逐渐从 0.980 mV 降低至 0.162 mV，且在流量为 2.5~15 mL/min 内的变化最为明显。

图 13 为入口流量对电池能量效率和温度的影响。根据图 13，增加流量时电池的能量效率先增加后减少，在 7.5 mL/min 时达到最高值 89.62%。这是因为电化学极化基本不变而浓差极化持续降低，且降低速率下降，提高流量在减小浓差极化与增加输出电压方面的作用被削弱。另一方面，电池的进出口压降从 40.1 Pa 近似线性增加至 1 560.2 Pa，使电池实际可利用的净输出功率降低。此外，电池温度与流量呈负相关：7.5 mL/min 流量下，电池最高温度较进口温度仅升高 2.85 ℃，不会引起电解液沉淀，可认为该流量即为 R3C3 交指型流道对应的最优流量。

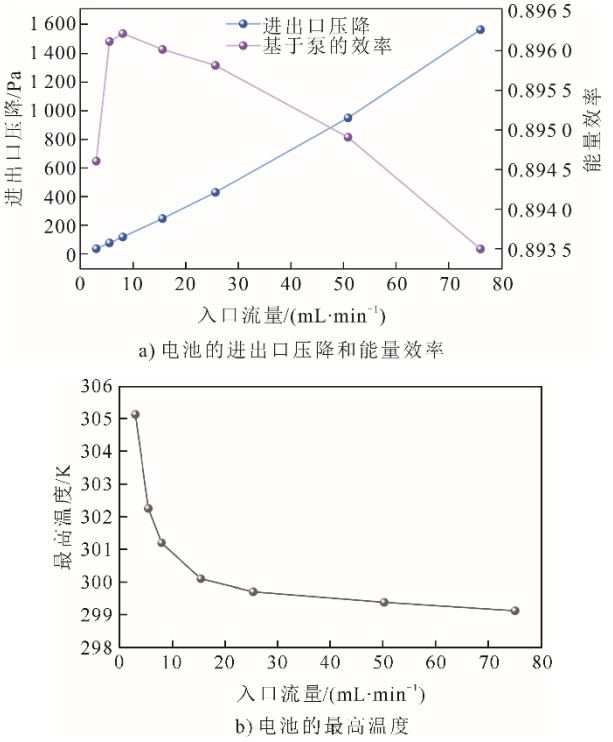


图 13 入口流量对电池能量效率和温度的影响
Fig.13 Effects of inlet flow rate on battery energy efficiency and temperature

3.4.2 初始 SOC

本节以最优电解液流量下的构型 R3C3 为参考，探究其初始 SOC 在电池的常见运行区间内 0.2~0.8 变化时的性能表现，采用稳态模拟等效分析其放电过程[18]，具体如图 14 所示。由图 14 可知，随着初始 SOC 升高，浓差极化持续降低，表明反应物的表面浓度相对于本体浓度的不足程度减弱。这是由于入口浓度提高，使更多活性离子在对流与扩散作用下进入电极内部，而恒流放电时反应物消耗速率基本不变，从而改善了电极表面的反应物供应。活化极化高于浓差极化，并随 SOC 增加呈现先降后升趋势，在 SOC 为 0.6 时达到最低值 5.65 mV，其原因在于此时氧化态与还原态离子的浓度接近，交换电流密度达到最大。尽管欧姆极化仍占主导，但结构不变时电池内阻恒定，故总极化变化趋势受活化极化控制。初始 SOC 的升高提高了平衡电位

导致端电压增加，而 SOC 变化对电池最高温度的影响不足 0.05 ℃，可以忽略。

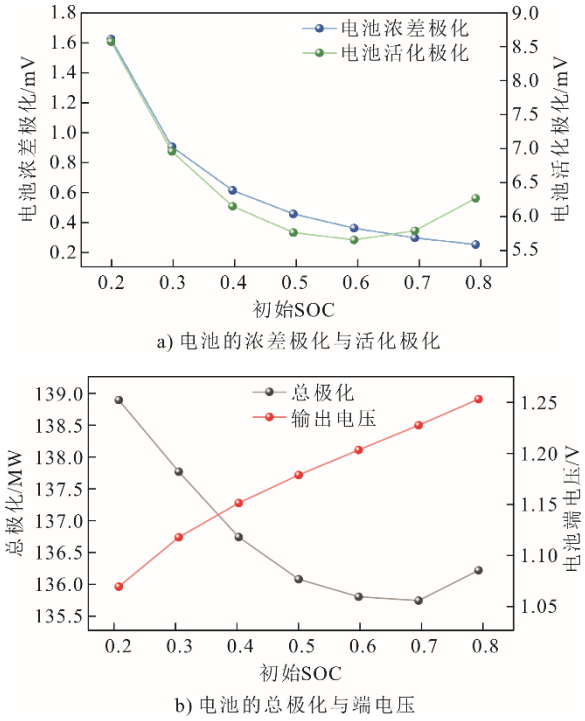


图 14 初始 SOC 对电池极化和输出电压的影响
Fig.14 Effects of initial SOC on battery polarization and output voltage

3.4.3 电极压缩比

对于引入了流道板的全钒液流电池，在电极框的构型不变时，流道和电极的总厚度是一定的，改变流道板的厚度即可调整流道深度进而影响电极的压缩比。本节选取 20%~60%常用范围内的压缩比进行分析，电极初始厚度为 2.5 mm，其他参数详见表 14，不同电极压缩比下电极内平均流速和进出口压降、电极内 V^{2+}浓度均值与均匀性、电池端电压和能量效率如图 15 所示。

表 14 不同电极压缩比对应的流道深度和电极受压厚度
单位：mm

Tab.14 Flow channel depths and compressed electrode thicknesses corresponding to different electrode compression ratios

电极压缩比	20%	30%	40%	50%	60%
流道深度	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
电极受压厚度	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00

压缩比升高时，电极厚度减小导致孔隙率与渗透性降低，电解液更难渗入电极深处。在此条件下，电极最大厚度减小削弱了深处的传质需求，但肋下高流速区的相对影响范围并未减小。同时，流道加深降低了流动阻力，增大相邻进、出口支流道间的压差，从而强化肋下对流；而电极内流动阻力的增加及渗流路径缩短又对其形成抑制。在多因素共同作用下，电极内平均流速与进出口压降呈先减后增的变化趋势，分别在压缩比 30%和 40%处出现极值。

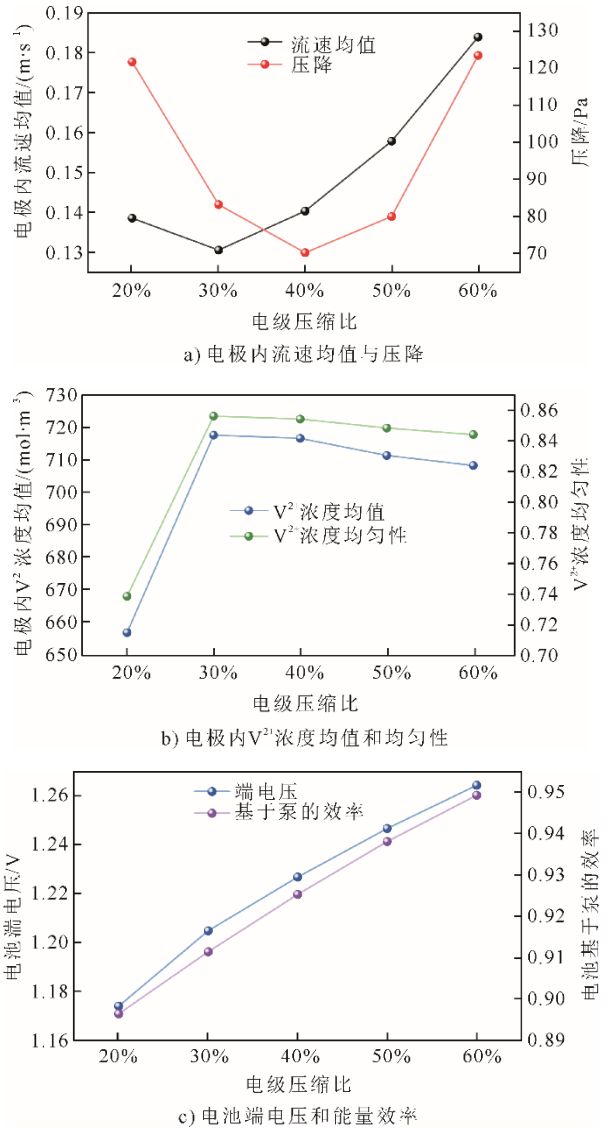


图 15 电极压缩比对流动、传质和电池性能的影响
Fig.15 Effects of electrode compression ratio on flow, mass transfer, and battery performance

电极内 V^{2+}平均浓度及其均匀性亦呈先升后降的趋势，并在压缩比为 30%时达到最大值。压缩比低于 30%时，对肋下对流的强化作用占优；当压缩比进一步增大，孔隙率显著降低，限制了流道下方区域的离子供给，整体传质性能随之下降。

随着压缩比提高，多孔电极有效电导率增加、欧姆内阻降低，相同电流密度运行时的总极化持续减小，从而降低了电池不可逆热的生成量，该效应

一定程度上抵消了高压缩比下局部传质受限带来的影响。当压缩比提升至 60%时，电池最高温度降至 27.26 ℃，端电压和能量效率分别提升至 1.26 V 和 94.9%。这表明在综合考虑极化现象的改善与流动能耗变化的前提下，采用较高压缩比有助于抑制电池温升并提升能效水平。

综上所述，3 种参数均会显著影响电池性能，但其作用机制各不同。电解液流量变化能调节流动状态与传质行为，在 2.5~15.0 mL/min 的低流量区间对浓差极化的改善明显，流速相较于最低值每提高 20%则浓差极化降低约 3.34%，但流速升高后强制对流对于传质的强化作用趋于饱和。初始 SOC 直接决定入口离子浓度，其相较于最低值每提高 20%则浓差极化降低约 5.65%，不过电池实际运行时必然会经历不同的 SOC 状态。相比之下，电极压缩比既改变了电极的孔隙结构与渗透特性，又同步影响了有效电导率和流道−电极内耦合流动，使传质与反应过程在多个层面发生协同变化，压缩比相较最低值每提升 20%则浓差极化降低约 10.19%。

综合比较可知，在交指型流道构型确定的前提下，电池整体性能对电极压缩比的变化最为敏感，建议在实际设计中优先优化该参数。

4 结　论

本研究采用有限元方法建立了含流场−电化学场−物质传递−温度场的全钒液流电池仿真模型，以实验室 4 cm×7 cm 矩形电池为研究对象，从流道布局、支流道排布和流道结构参数三方面对其交指型流道进行了系统性优化，并探索了电解液流量、初始 SOC 和电极压缩比变化时对电池流速、浓度、过电位和能量效率的影响规律，结论如下。

1）交指型流道主流道沿电极长边布置时可获得更高的电极内流速与反应物浓度，并有利于降低电池温度。该布局通过缩短支流长度、增加肋数量，强化了肋下对流，提升了电极深处的流速与传质能力。

2）入口与出口支流道单条交替排列的流道构型可获得最优的钒离子分布均匀性，能有效抑制电解液在进入电极后快速流向出口，从而减小进出口附近的流动死区。

3）当采用构型 R3C3 时，电池具有 431.2 Pa 的最低压降，且综合传质与传热性能最优，浓差极化和最高温度分别降至 0.26 mV 和 26.45 ℃。

4）在最优构型下，电解液最佳流量为 7.5 mL/min，此时能量效率达到 89.62%。在保持电池总厚度不变的条件下，适度增加电极压缩比和电解液流量可进一步提升电池端电压与效率，且温升始终控制在 3 ℃内。

[参 考 文 献]

[1] 白明雨, 金也, 苏士焜, 等. 全钒液流电池电极材料改性策略的研究进展[J]. 石油学报(石油加工), 2026, 42(3): 725.
Bai M Y, Jin Y, Su S K, et al. Research progress on modified materials and methods for all-vanadium flow battery electrodes[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2026, 42(3): 725.

[2] Wang H, Pourmousavi S A, Soong W L, et al. Battery and energy management system for vanadium redox flow battery: a critical review and recommendations[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 58: 106384.

[3] Aramendia I, Fernandez-Gamiz U, Martinez-San-Vicente A, et al. Vanadium redox flow batteries: a review oriented to fluid-dynamic optimization[J]. Energies, 2021, 14(1): 176.

[4] 厉震. 全钒液流电池在光储微网系统的应用[J]. 吉林电力, 2025, 53(2): 1.
Li Z. Application of vanadium redox battery in photovoltaic microgrid system[J]. Jilin Electric Power, 2025, 53(2): 1.

[5] NASA. Electrically rechargeable REDOX flow cell: US3996064A[P]. 1976-12-07.

[6] 张华民. 全钒液流电池的技术进展、不同储能时长系统的价格分析及展望[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(9): 2772.
Zhang H M. Development, cost analysis considering various durations, and advancement of vanadium flow batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9): 2772.

[7] Wang W H, Wang X D. Investigation of Ir-modified carbon felt as the positive electrode of an all-vanadium redox flow battery[J]. Electrochimica Acta, 2007, 52(24): 6755.

[8] Xiang H X, Tan A D, Piao J H, et al. Efficient nitrogen-doped carbon for zinc-bromine flow battery[J]. Small, 2019, 15(24): 1901848.

[9] Liu T, Li X F, Zhang H M, et al. Progress on the electrode materials towards vanadium flow batteries (VFBs) with improved power density[J]. Journal of Energy Chemistry, 2018, 27(5): 1292.

[10] 张红, 邱亚, 李金中, 等. 基于功率自适应的全钒液流电池储能系统充放电控制策略[J]. 高压电器, 2025, 61(11): 175.
Zhang H, Qiu Y, Li J Z, et al. Charging and discharging control strategy for vanadium flow battery energy storage system based on power adaptation[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(11): 175.

[11] Clemente A, Montiel M, Barreras F, et al. Vanadium redox flow battery state of charge estimation using a concentration model and a sliding mode observer[J]. IEEE Access, 2021, 9: 72368.

[12] Wang Q, Qu Z G, Jiang Z Y, et al. The numerical study of vanadium redox flow battery performance with different electrode morphologies and electrolyte inflow patterns[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 33: 101941.

[13] Yin C, Gao Y, Xie G Y, et al. Three dimensional multi-physical modeling study of interdigitated flow field in

porous electrode for vanadium redox flow battery[J]. Journal of Power Sources, 2019, 438: 227023.
[14] Huang Z B, Mu A L. Flow field design and performance analysis of vanadium redox flow battery[J]. Ionics, 2021, 27(12): 5207.
[15] Xiao G Z, Yang G A, Zhao S X, et al. Battery performance optimization and multi-component transport enhancement of organic flow battery based on channel section reconstruction[J]. Energy, 2022, 258: 124757.
[16] Lu M Y, Jiao Y H, Tang X Y, et al. Blocked serpentine flow field with enhanced species transport and improved flow distribution for vanadium redox flow battery[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 35: 102284.
[17] Pan L, Sun J, Qi H H, et al. Dead-zone-compensated design as general method of flow field optimization for redox flow batteries[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2023, 120(37): e2305572120.
[18] Liu X, Du H L, Gao J Y, et al. Design of a cobweb bionic flow field for organic redox flow battery[J]. Journal of Power Sources, 2024, 591: 233848.
[19] Wang T H, Yuan Z. Enhanced performance and reduced pumping loss in vanadium flow battery enabled by a leaf-vein-inspired flow field design[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 114(Part A): 115720.
[20] Zhou T H, Liu Z Y, Yuan S W, et al. Machine-learning assisted analysis on coupled fluid-dynamics and electrochemical processes in interdigitated channel for iron-chromium flow batteries[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 496: 153904.
[21] Chen C H, Yaji K, Yamasaki S, et al. Computational design of flow fields for vanadium redox flow batteries via topology optimization[J]. Journal of Energy Storage, 2019, 26: 100990.
[22] 李建林, 梅岩竹, 王茜, 等. 全钒液流电池建模研究现状及展望[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(12): 4618.
Li J L, Mei Y Z, Wang Q, et al. Current status of vanadium redox flow battery modeling and research advances in data-driven approaches[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(12): 4618.
[23] 孙洁. 基于流道结构设计的液流电池多孔电极中离子传质改进研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 10.
Sun J. Mass transfer enhancement for ions within porous electrodes of redox flow batteries via flow field designs[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 10.
[24] Ali E, Kim J, Park H. Numerical analysis of modified channel widths of serpentine and interdigitated channels for the discharge performance of vanadium redox flow batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 53: 105099.
[25] 邵军康, 李鑫, 邱亚, 等. 全钒液流电池多场耦合建模研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1881.
Shao J K, Li X, Qiu Y, et al. Multi-field coupling modeling of vanadium redox battery[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1881.
[26] Kim Y, Choi Y Y, Yun N R, et al. Activity gradient carbon felt electrodes for vanadium redox flow batteries[J]. Journal of Power Sources, 2018, 408: 128.
[27] You D J, Zhang H M, Chen J. A simple model for the vanadium redox battery[J]. Electrochimica Acta, 2009, 54(27): 6827.
[28] 马相坤, 张华民, 邢枫, 等. 全钒液流电池流场模拟与优化[J]. 电源技术, 2012, 36(11): 1647.
Ma X K, Zhang H M, Xing F, et al. Simulation and optimization of flow field of all vanadium redox flow battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2012, 36(11): 1647.
[29] 魏宇歌, 曾义凯. 基于叉指型流场的全钒液流电池流动模拟[J]. 电工技术, 2022(12): 22.
Wei Y G, Zeng Y K. Flow simulation of all vanadium redox flow battery based on interdigital flow field[J]. Electric Engineering, 2022(12): 22.
[30] 姜鹏, 曾坤, 邹涛, 等. 电解液输送系统对全钒液流电池储能系统性能影响[J]. 电源技术, 2023, 47(6): 776.
Jiang P, Zeng K, Zou T, et al. Effect of electrolyte transport system on performance of vanadium redox flow battery energy storage system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(6): 776.

（责任编辑　邓玲惠）