储能材料与器件

全钒液流电池电极压缩比对极化特性影响的多物理场模拟

周志灏，张开悦
（沈阳理工大学材料科学与工程学院，辽宁 沈阳 110159）

摘 要：电极压缩通过改变多孔电极的孔隙结构和电解液流动状态，对全钒液流电池（VFB）的传输与反应过程产生显著影响，但其对不同极化分量的竞争作用机制尚不明确。本文建立涵盖流体力学、物质传递、电荷传输与电化学反应的三维全耦合多物理场模型，系统研究压缩比（CR=0.09~0.546）对电极传输行为及电池极化特性的影响。在40 mL min^{-1}流量，200 mA cm^{-2}及50% SOC典型工况下，随着CR由0.09增至0.546，电极孔隙率由0.828降至0.647，渗透率由8.5×10^{-11} m^2降至1.0×10^{-11} m^2；由于流通空间减小，电解液平均流速由5.5×10^{-3} m s^{-1}增至1.11×10^{-2} m s^{-1}，而压力降由4.86 kPa增至80.24 kPa。极化分析结果表明，随着压缩程度增加，欧姆极化持续降低，而活化极化逐渐升高；与此同时，恒定流量条件下流速的提高增强了对流传质，使传质极化整体保持在较低水平。由此，三种极化的综合作用使总极化随压缩比增加呈先降低后升高的非单调变化，在适当压缩比下总极化达到最低值。进一步结合局部反应电流密度和反应物浓度分布可知，轻度压缩下欧姆极化降低带来的性能增益占主导，而过度压缩后活化极化的增加逐渐超过欧姆极化的降低，最终导致总极化回升。

关键词：全钒液流电池；电极压缩比；多孔电极；多物理场模拟；极化
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0821
中图分类号：TM 911　　文献标志码：A　　文章编号：2095-4239（XXXX）XX-1-12

Multiphysics Simulation of the Effects of Electrode Compression Ratio on Polarization Characteristics in Vanadium Flow Batteries

ZHOU Zhihao, ZHANG Kaiyue

Abstract: Electrode compression significantly affects the transport and reaction processes in vanadium flow batteries (VFBs) by altering the pore structure of porous electrodes and electrolyte flow behavior; however, the competing effects of compression on different polarization components remain unclear. In this study, a three-dimensional fully coupled multiphysics model encompassing fluid dynamics, mass transport, charge transport, and electrochemical reactions was developed to systematically investigate the effects of compression ratio (CR = 0.09~0.546) on electrode transport behavior and battery polarization characteristics. Under a flow rate of 40 mL min^{-1} and a current density of 200 mA cm^{-2} at 50% SOC, increasing the CR from 0.09 to 0.546 decreased the electrode porosity from 0.828 to 0.647 and the permeability from 8.5×10^{-11} to 1.0×10^{-11} m^2. Due to the reduction in the available flow space, the average electrolyte velocity increased from 5.5×10^{-3} to 1.11×10^{-2} m

收稿日期：2026-09-17；修改稿日期：2026-10-15。
基金项目：国家自然科学基金（22309121），辽宁省属本科高校基本科研业务费专项（LJ212410144035）。
第一作者：周志灏（2000—），男，硕士研究生，研究方向为液流电池多孔电极优化，E-mail：m15841620760@163.com；通信作者：张开悦（1988—），男，博士，副教授，主要研究方向为储能电池与材料电化学，E-mail：kyzhang@sylu.edu.cn。
引用本文：周志灏, 张开悦. 全钒液流电池电极压缩比对极化特性影响的多物理场模拟[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-12.
Citation：ZHOU Zhihao, ZHANG Kaiyue. Multiphysics Simulation of the Effects of Electrode Compression Ratio on Polarization Characteristics in Vanadium Flow Batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-12.

s^{-1}, while the pressure drop increased from 4.86 to 80.24 kPa. Polarization decomposition revealed that ohmic polarization continuously decreased with increasing compression, whereas activation polarization gradually increased. Meanwhile, under the constant-flow-rate condition, the increased electrolyte velocity enhanced convective mass transport, maintaining mass-transfer polarization at a relatively low level. Consequently, the combined effects of the three polarization components caused the total polarization to vary non-monotonically with increasing CR, first decreasing and then increasing, and reaching a minimum at an appropriate compression ratio. Further analysis of the local reaction current density and reactant concentration distributions showed that the performance gain associated with reduced ohmic polarization dominated under mild compression, whereas at excessive compression, the increase in activation polarization gradually outweighed the decrease in ohmic polarization, leading to an increase in total polarization.

Keywords: Vanadium flow battery; Compression ratio; Porous electrode; Multiphysics modeling; Polarization

随着风电、光伏等可再生能源在电力系统中的渗透率不断提高，其间歇性和波动性对电力系统的稳定运行和能量调节能力提出了更高要求。具有长寿命、高安全性和功率与容量独立设计等特点的液流电池，因而成为大规模、长时储能的重要候选技术[1]。其中，全钒液流电池（Vanadium Flow Battery，VFB）正、负极均采用钒基活性物质，可避免不同活性离子之间的交叉污染，并具有较高的循环稳定性和运行安全性，在大规模储能领域具有良好的应用前景[2]。然而，VFB较低的功率密度和较高的系统成本仍限制其进一步应用。提高电池功率密度的关键之一是降低运行过程中的极化损失，而多孔电极作为电解液输运、电子传导和电化学反应的耦合区域，其结构状态直接影响电池内部的传输与反应过程[3, 4]。

在实际电堆装配过程中，碳毡等多孔电极需要受到一定程度的机械压缩，以保证电极与集流体之间的有效接触并维持稳定的电池结构。因此，电极压缩是VFB实际运行中不可避免的结构因素[5]。已有研究表明，压缩对电池性能具有明显的双重影响。一方面，适度压缩能够改善电极与集流体之间的接触，降低界面接触电阻，同时缩短电子和离子的传输路径，从而降低欧姆损失[6]；另一方面，随着压缩程度增加，电极厚度和孔隙率降低，孔隙通道收缩并导致渗透率下降，从而增加电解液流动阻力[7]。与此同时，电极孔隙结构及有效反应界面的变化还会改变局部反应条件，从而影响电荷转移动力学和电池性能[8]。因此，电极压缩并非单纯改善或恶化电池性能，而是同时改变流体输运、电荷传输和电化学反应过程，其最终影响取决于不同作用之间的相对贡献。

围绕电极压缩对VFB性能的影响，已有研究主要通过实验表征和数值模拟两种方式开展。实验研究表明，压缩比会显著影响碳毡电极的孔隙结构、传输特性及电化学性能，不同研究获得的最优压缩范围也存在一定差异[9]。例如，Ghimire等通过局部解析测量研究了不同压缩程度下电极内部的流动与电化学行为，指出电极压缩会改变反应物输运和电流分布[10]；Wang等进一步研究了非均匀压缩碳毡电极的实验性能，揭示了压缩程度变化与电池性能之间的关系[11]。数值模拟则为分析压缩条件下电极内部的流动、传质和反应行为提供了进一步手段。Oh等建立了考虑电极压缩效应的数值模型，分析了压缩对VFB性能的影响[12]；Wang等针对非均匀压缩电极和蛇形流场，进一步获得了局部流速、物种浓度、局部电流密度及过电位的空间分布[13]。国内研究也逐步从单一性能分析向多物理场耦合模拟发展，例如对VFB流动、传质及反应过程开展数值研究[14, 15]，并进一步考察多孔电极非均匀压缩对内部传输行为的影响[16]。

尤其需要指出的是，压缩引起的孔隙结构变化与电解液流动变化并非独立发生。电极压缩会降低孔隙率和渗透率，使孔隙结构更加致密，不利于物质输运；但对于采用恒定体积流量运行的电池，流

通截面积的减小又会使电解液平均流速相应提高，从而增强对流输运[17]。因此，仅依据孔隙率或渗透率的降低判断压缩导致传质恶化，可能无法准确反映实际运行条件下的传质行为。已有研究进一步表明，压缩比变化会引起不同极化分量的变化，并存在一定的性能优化区间[18]。另一方面，压缩改善接触和缩短传输路径能够降低欧姆极化，但有效反应界面的变化又可能增加局部反应负荷，使活化极化发生变化[19]。国内相关研究也表明，电极结构、局部供液状态及反应分布之间存在明显耦合关系[20]。由此，压缩比对电池性能的影响实际上涉及欧姆极化降低与活化极化增加之间的竞争，以及结构收缩与恒流条件下对流强化之间的耦合。现有研究通常将总极化或电池电压作为评价指标，对欧姆、活化和传质极化进行独立提取和定量比较的研究仍相对有限，特别是在恒定流量条件下，结构收缩与对流强化对传质过程的竞争作用，以及不同极化分量之间的平衡机制，尚未得到充分阐明。

本文基于有限元方法建立包含流体动力学、物质传递、电荷传输和电化学反应的三维稳态全耦合模型，研究不同压缩比下VFB电极内部的流动、传输及反应行为，并通过实验数据对模型进行验证。在恒定电解液流量条件下，系统分析压缩比对电极孔隙结构、渗透率、流速及压力降的影响，并进一步独立提取欧姆极化、活化极化和传质极化，结合局部活性物种浓度和反应电流密度分布，揭示不同极化分量随压缩比的演变机制。重点阐明恒定流量下电极结构收缩与对流强化对传质过程的竞争作用，以及欧姆极化降低和活化极化增加之间的竞争关系，并据此解释电池总极化随压缩比呈现非单调变化的原因，进一步确定本研究条件下的适宜压缩状态，为VFB多孔电极压缩参数的优化提供理论依据。

1 模型建立与验证

1.1 几何模型与基本假设

本文基于有限元分析建立了全钒液流电池（VFB）单电池三维稳态多物理场模型，旨在解析电极压缩比对电解液流动、物质传递、电荷传输及电化学反应的影响规律。计算域沿电解液流动方向依次包括负极集流体、负极多孔电极、离子交换膜、正极多孔电极和正极集流体。正、负极的投影面积均为3 cm × 3 cm，未压缩状态下电极厚度为2.2 mm，膜材料采用Nafion 212，厚度为50.8 μm。图1（a）给出了基准单电池结构，图1（b-d）和图1（e）分别给出了不同压缩比下的电极几何结构与压缩比的定义。

电极压缩比（CR）定义为电极厚度的相对压缩量：

$$CR = \frac{h_0 - h}{h_0} \tag{1}$$

其中，h_0和h分别为电极压缩前和压缩后的厚度。随着压缩比增大，电极厚度减小而面内尺寸保持不变，压缩比通过改变电极厚度及孔隙结构参数参与多物理场耦合。

本文采用flow-through电极结构，电解液直接贯穿多孔电极，以突出电极压缩对流动、传质和反应过程的影响，并排除流场结构差异的干扰。

为降低与研究目标无关的物理过程对计算结果的干扰，模型采用以下基本假设：（1）电解液为不可压缩牛顿流体，流动状态为层流；（2）多孔电极被视为各向同性的均匀多孔介质，压缩导致的物性变化通过相应的经验关系修正；（3）电化学反应仅发生在电极纤维表面（固/液三相界面处），忽略电极纤维内部的电化学反应；（4）忽略电堆运行过程中的热效应，假设系统处于恒温状态（T_0=298.15 K）；（5）离子交换膜仅允许H^+通过，钒离子及水跨膜迁移忽略不计；（6）忽略副反应（如析氢、析氧等）的影响。

基于上述假设，模型通过流体动力学、物质传递、电荷传输和电化学动力学方程实现多物理场耦合。

1.2 多物理场控制方程

VFB电极内部同时发生电解液流动、活性物种输运、电子/离子传导以及电化学反应等多重物理过程。本文采用多物理场耦合框架对上述过程进行精确描述，其中流体速度场由Brinkman方程求解，溶液中各离子的输运由Nernst-Planck方程描述，固相和液相电势分别通过电荷守恒方程计算，而电极界面的局部反应速率则由浓度依赖的Butler-Volmer方程确定。

1.2.1 流体力学方程

电解液直接流经多孔电极，其内部流动由Brinkman方程与连续性方程描述：

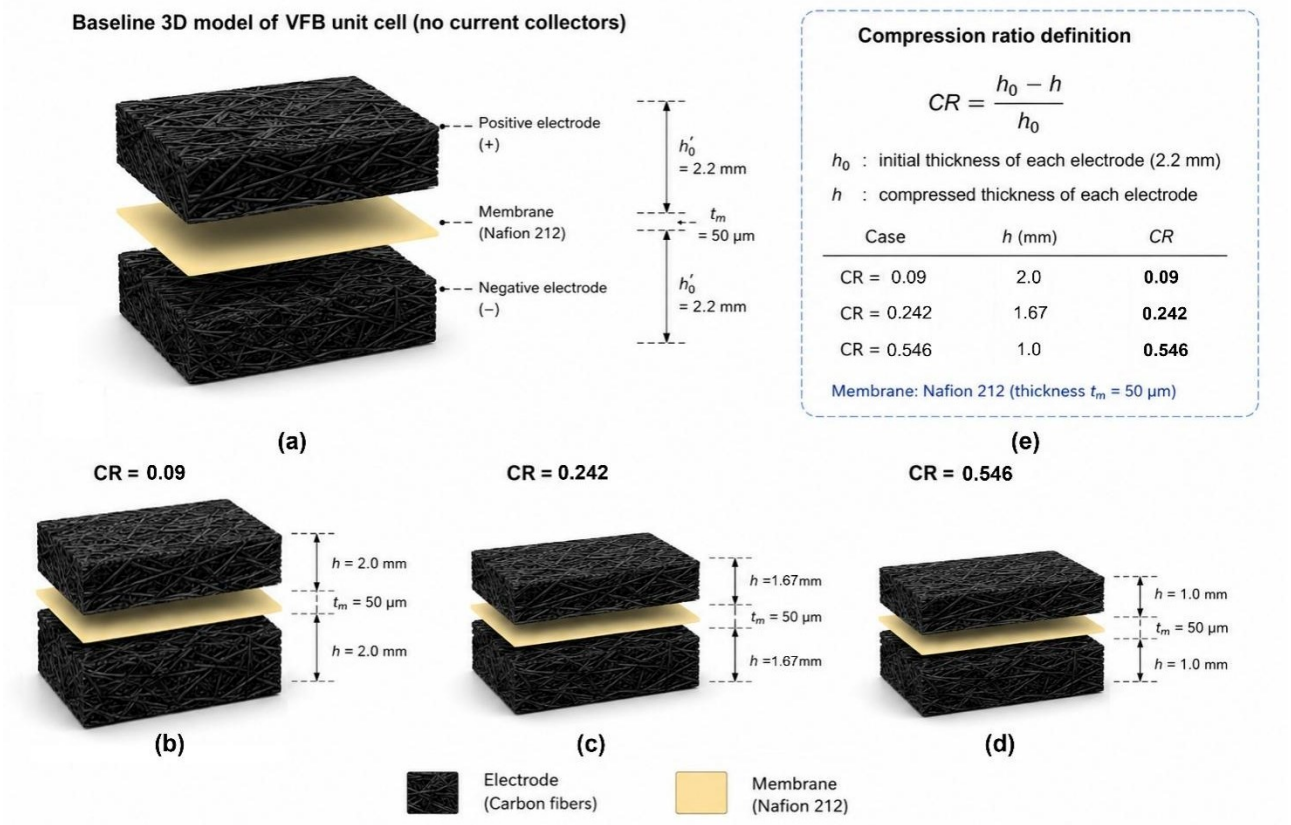


图1 VFB单电池三维几何模型示意图：(a) 基准模型；(b-d) 压缩比（CR）分别为0.09、0.242和0.546的单电池模型；(e) 电极压缩比的定义。

Fig. 1 3D geometric models of the VFB unit cell: (a) baseline model; (b-d) unit-cell models with compression ratios (CR) of 0.09, 0.242 and 0.546, respectively; (e) definition of the electrode compression ratio.

$$\frac{\rho}{\varepsilon}\left(\vec{u}\cdot\nabla\right)\frac{\vec{u}}{\varepsilon} = -\nabla P + \nabla\cdot\left[\frac{\mu}{\varepsilon}\left(\nabla\vec{u} + \left(\nabla\vec{u}\right)^{T}\right)\right] - \frac{\mu}{\kappa}\vec{u} \quad (2)$$

$$\nabla\cdot\left(\rho\vec{u}\right) = 0 \quad (3)$$

其中，ρ为电解液密度，μ为电解液动力黏度，ε为电极孔隙率，κ为渗透率，$\vec{u}$为电解液速度。

电极渗透率以及多孔电极内的有效扩散系数、有效电导率等传输参数，均由相应的经验关系（Kozeny-Carman 关系、Bruggeman 关系）根据压缩后的孔隙结构确定。

1.2.2 多组分物质传递

电解液中各离子组分（V^{2+}、V^{3+}、VO^{2+}、VO_2^{+}、H^{+}、SO_4^{2-}）通过扩散、电迁移和对流共同输运，其通量采用Nernst-Planck方程描述：

$$\vec{N}_i = -D_i^{eff}\nabla c_i - z_i\frac{D_i^{eff}}{RT}Fc_i\nabla\phi_l + \vec{u}c_i \quad (4)$$

$$\nabla\cdot\vec{N}_i = S_{m,i} \quad (5)$$

其中，$\vec{N}_i$为物种i的摩尔通量，D_i^{eff}为多孔电极中的有效扩散系数，c_i为组分浓度，ϕ_l为液相电势，$S_{m,i}$为电化学反应引起的局部物质源项。

考虑电极孔隙结构对物质扩散的影响，有效扩散系数采用Bruggeman关系进行修正：

$$D_i^{eff} = D_i\varepsilon^{1.5} \quad (6)$$

其中，D_i为电解液中物种i的本征扩散系数。由此，电极压缩通过改变孔隙率直接影响有效扩散能力。

1.2.3 电荷守恒

电极内部的电子传输和电解液中的离子传输分别由固相和液相电荷守恒方程描述：

$$\nabla\cdot\vec{i}_s = \nabla\cdot\left(-\sigma_s^{eff}\nabla\phi_s\right) = -S_a \quad (7)$$

$$\nabla\cdot\vec{i}_l = \nabla\cdot\left(-\sigma_l^{eff}\nabla\phi_l\right) = S_a \quad (8)$$

其中，$\vec{i}_s$和$\vec{i}_l$分别为固相（碳纤维骨架）和液相（电解液）的电流密度矢量，ϕ_s和ϕ_l分别为对应的相电势。σ_s^{eff}和σ_l^{eff}分别为固相和液相的有效电导率，S_a为电化学反应产生的电荷交换源项。

为量化压缩对界面欧姆损失的影响，模型在电极与集流体界面处显式引入随压缩比变化的接触电阻（面比电阻）。基于经验拟合，接触电阻随压缩

比增加呈指数衰减：

$$R_{con} = 4.375e^{-\frac{CR}{0.0605}} + 413.153e^{-\frac{CR}{0.382}} + 8.016 \quad (9)$$

其中，R_{con}为电极/集流体界面接触电阻，CR为压缩比，拟合参数通过不同压缩状态下电极/集流体界面接触电阻的实验测量数据拟合获得。该接触电阻以薄层阻抗形式耦合至两侧电极/集流体界面边界条件中。随着压缩比增加，接触电阻降低，界面电势损失减小，这是欧姆极化随压缩比增加而持续降低的重要原因之一。

1.2.4 电化学动力学与物理耦合

电极/电解液界面处的电荷转移速率由浓度依赖的Butler-Volmer方程描述。本文以充电过程为例，正极（氧化反应）和负极（还原反应）的局部体积转移电流密度$j_{loc,pos}$与$j_{loc,neg}$分别表示为：

$$j_{loc,pos} = a \cdot i_{0,pos}\left[exp\left(\frac{\alpha_a F\eta_{pos}}{RT}\right) - exp\left(-\frac{\alpha_c F\eta_{pos}}{RT}\right)\right] \quad (10)$$

$$j_{loc,neg} = a \cdot i_{0,neg}\left[exp\left(\frac{\alpha_a F\eta_{neg}}{RT}\right) - exp\left(-\frac{\alpha_c F\eta_{neg}}{RT}\right)\right] \quad (11)$$

其中，a为电极单位体积内的有效电化学活性比表面积，i_0为交换电流密度，α_a和α_c分别为阳极和阴极电荷转移系数，F、R和T分别为Faraday常数、气体常数和绝对温度。

考虑电极压缩引起的孔隙结构变化，电极单位体积内的有效电化学活性比表面积采用与孔隙率相关的经验关系进行修正：

$$a = a_0\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0}\right)^{0.75} \quad (12)$$

其中，a_0为未压缩电极的初始比表面积，ε_p为压缩后的局部孔隙率，ε_0为未压缩状态下的初始孔隙率。

交换电流密度i_0反映了物质传递场对电化学动力学的刚性约束，对于正负极分别表示为：

$$i_{0,pos} = F \cdot k_{pos} \cdot (c_{VO2})^{\alpha_c} \cdot (c_{VO})^{\alpha_a} \quad (13)$$

$$i_{0,neg} = F \cdot k_{neg} \cdot (c_{V2})^{\alpha_a} \cdot (c_{V3})^{\alpha_c} \quad (14)$$

上述电化学反应通过源项将流体、物质传递和电荷守恒方程紧密闭合。根据法拉第定律，局部电化学反应引起的物质源项和电荷源项由局部反应电流密度确定，以正极充电反应为例，生成物VO_2^+的源项和反应物VO^{2+}的消耗项分别表示为：

$$S_{VO} = \frac{j_{loc,pos}}{F} \quad (15)$$

$$S_{VO2} = -\frac{j_{loc,pos}}{F} \quad (16)$$

因此，电化学动力学与前述流动、物质传递及电荷传输方程形成闭合耦合：流场决定活性物种的对流输运，物质传递决定局部浓度，局部浓度进一步影响平衡电位和交换电流密度，而电势差决定局部反应速率；反应速率产生的物种源项和电荷源项又反向改变浓度场与电流分布。对于不同压缩比，这一耦合关系使电极结构变化能够进一步传递至局部反应动力学，并最终影响电池极化特性。

电池实际电压可表示为平衡电压扣除各类极化损失：

$$V_{cell} = E_{eq} - \eta_o - \eta_a - \eta_c \quad (17)$$

其中，η_o、η_a和η_c分别为欧姆极化、活化极化和传质极化。欧姆极化主要来源于固相、液相中的电荷传输以及电极/集流体接触电阻造成的电势损失；活化极化来源于电极界面的电荷转移动力学，由电极界面实际电势与局部平衡电势之差确定；传质极化主要由活性物种浓度变化引起的局部平衡电势偏移表征。

根据入口活性物种浓度（SOC=50%）计算理论平衡电压E_{eq}，由模型得到的实际电池电压V_{cell}确定总极化：

$$\eta_{total} = E_{eq} - V_{cell} \quad (18)$$

欧姆极化主要由固相、液相电荷传输及电极/集流体接触电阻产生的电势损失确定：

$$\eta_o = \Delta\phi_s + \Delta\phi_l + \Delta\phi_{con} \quad (19)$$

活化极化根据电极界面实际电势与局部平衡电势之差确定；传质极化根据活性物种浓度变化引起的局部平衡电势偏移确定。通过上述方法分别提取三种极化分量并进行定量比较。

1.3 边界条件与数值方法

模型在稳态条件下求解，初始荷电状态（SOC）为50%，正、负极半电池中各活性钒离子浓度均设为750 mol m^{-3}（总钒浓度1500 mol m^{-3}），温度设为298.15 K。正、负极电解液均以40 mL min^{-1}恒定体积流量泵入多孔电极，入口施加与体积流量对应的表观速度及组分浓度边界，其中表观速度随电极压缩后的有效流通截面变化，入口表观速度由恒定体积流量与压缩后有效流通截面共同确定：

$$u_{in} = \frac{Q}{w \cdot h_0(1 - CR)} \quad (20)$$

其中，Q为设定的体积流量，w为电极截面的

宽度，h_0为电极初始厚度。出口设定参考压力，各物种在出口以对流为主、扩散通量为零；其余外壁面及电极/膜界面采用无滑移条件，并设为不可渗透边界。模型允许质子（H^+）通过离子交换膜，钒离子（V^{2+}、V^{3+}、VO_2^+、VO^{2+}）及硫酸根离子（SO_4^{2-}）均不发生跨膜传输，膜界面处对各钒离子及SO_4^{2-}施加零法向通量条件；质子跨膜通量与电极反应产生或消耗的H^+相耦合，以维持体系的电荷平衡。负极集流体设为固相电势参考，正极集流体施加200 mA cm^{-2}恒流充电边界，两侧电极/集流体界面均引入随压缩比变化的接触电阻；不与集流体或膜相连的固相外表面设为电绝缘，电极/膜界面处液相电流保持连续。

本文采用有限元方法求解上述强耦合非线性方程组，高电流密度工况下采用参数化延续法以提高稳态求解的稳定性。三维计算域采用结构化六面体网格离散，共包含112500个六面体单元；进一步加密后计算得到的宏观电池电压变化小于1%，满足网格无关性要求。

图2给出了本文的整体数值模型，包括三维计算几何、计算域截面与主要边界条件、整体网格及电极/膜界面附近的局部网格，以及多物理场耦合关系。

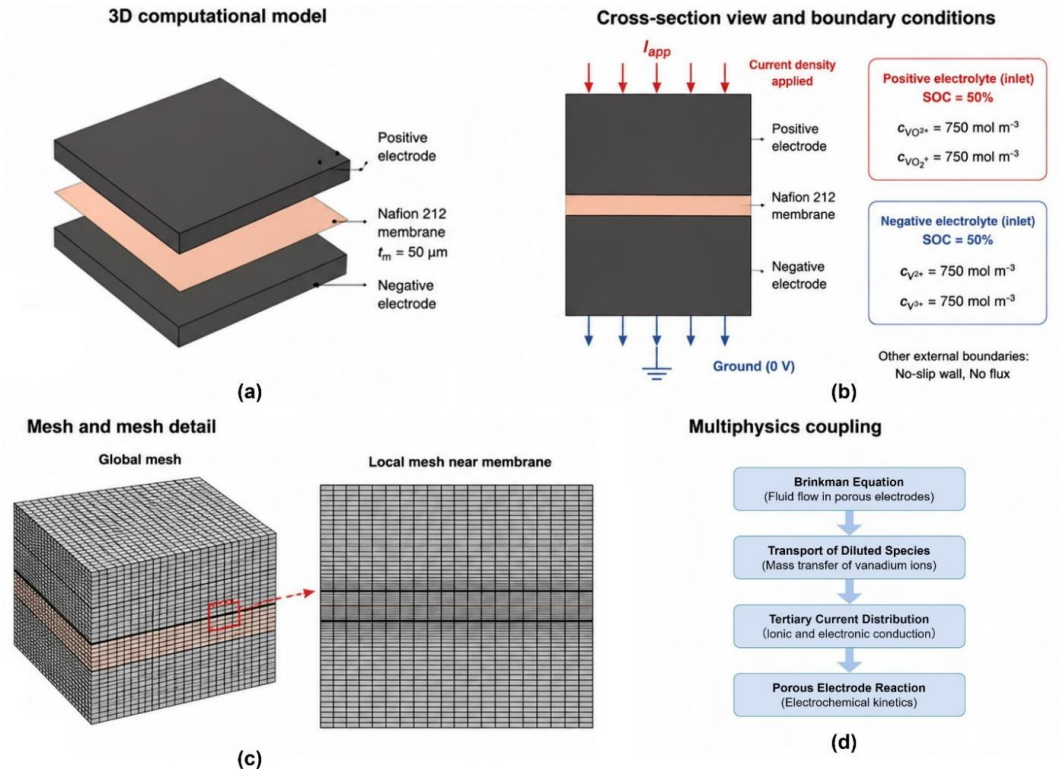


图2 VFB单电池三维计算模型与仿真框架：(a) 计算几何模型；(b) 截面视图与边界条件；(c) 全局网格及膜附近局部加密；(d) 多物理场耦合框架。

Fig. 2 3D computational model and simulation framework of the VFB unit cell: (a) computational geometry; (b) cross-sectional view and boundary conditions; (c) global mesh with local refinement near the membrane; (d) multiphysics coupling framework.

1.4 模型验证

为验证模型的可靠性，在CR=0.09、0.242和0.546条件下将模拟电池电压与实验数据对比，两者运行条件一致：正、负极半电池分别循环15 mL电解液（活性物质为1.65 M VO^{2+}或V^{3+}，支持电解质为3 M H_2SO_4）、电解液流量设定为40 mL min^{-1}、运行温度为298.15 K，恒流充电电流密度为200 mA cm^{-2}。

对比结果显示，在CR=0.09、0.242和0.546时，模型预测的单电池电压分别为1.5045 V、1.5028 V和1.5204 V，相对应的实验测量值分别为1.5186 V、1.5166 V和1.5211 V。两者的相对

误差极小，分别仅为0.93%、0.91% 和0.045%。模拟与实验结果均呈现随压缩比增加先降低后升高的非单调变化趋势，表明模型能够较好地描述不同压缩状态下的电化学响应。

1.5 实验电池与测试方法

为与模拟计算保持一致，本文采用自行搭建的 flow-through 单电池开展实验测试。实验单电池采用无流道的 flow-through 构型，电解液经端板一侧的入口直接进入多孔电极并贯穿电极，由另一侧端板出口流出，电极内部不设置蛇形或叉指流道，与本文模拟所采用的 flow-through 电极结构及入口边界条件完全一致。

实验电极采用与模拟一致的碳毡材料，正、负极投影面积均为3 cm × 3 cm，未压缩状态下电极厚度为2.2 mm。电极压缩比通过调节端板间距控制，由压缩前后电极厚度的变化确定，与模拟中的压缩比定义一致。

实验测试的电解液流量、恒流充电电流密度、初始荷电状态及运行温度等条件均与模拟保持一致（详见1.4节），从而确保实验与模拟在入口结构及运行工况上的对应关系，避免因入口结构差异对电压预测产生误判。

2 结果与讨论

2.1 压缩比对电极结构与流动特性的影响

压缩比首先改变多孔电极的孔隙结构，并进一步决定了电解液在电极内部的流动行为。由图3（a）可见，随着CR由0.09增加至0.546，电极孔隙率由0.828降低至0.647，表明压缩使电极内部的有效孔隙空间持续减少。与此同时，渗透率由8.5×10^{-11} m^{2}降至1.0×10^{-11} m^2，降幅高达88%，图3（b）。渗透率的下降幅度明显高于孔隙率，说明压缩不仅减少了孔隙体积分数，更使孔隙通道进一步受挤压而变窄，从而显著增加了电解液在电极内部的流动阻力。

在恒定体积流量40 mL min^{-1}的条件下，压缩比增加后，电极的有效流通空间减小，使电解液在多孔区域内保持相同流量所需的表观流动速度提高。如图3（c）所示，电解液平均速度由CR=0.09时的5.5×10^{-3} m s^{-1}增加至CR=0.546时的1.113×10^{-2} m s^{-1}，增幅约102%。因此，在恒定流量条件下，孔隙结构收缩并未导致平均流速降低，而是通过减小有效流通截面被动地提高了电解液流速。

然而，流速的提高并未抵消压缩造成的流动阻力增加。如图3（d）所示，压力降由4.86 kPa增加至80.24 kPa，激增约15.5倍。尤其当CR≥0.394后，压力降由23.10 kPa快速增加至40.46 kPa，并进一步升高至80.24 kPa，表明高压缩比下流动阻力呈明显的非线性攀升趋势。该变化与渗透率的快速下降相对应，说明高压缩比下孔隙结构的极度收缩与流速的强制提高共同提高了电解液输运所需的泵送压力。

图4进一步展示了不同压缩比下电极内部速度场和压力场的空间分布。随着CR增加，电极内部整体速度水平升高，与图3（c）中的平均速度变化一致；同时，入口至出口方向的压力梯度逐渐增大，且在高压缩比条件下更加剧烈。速度场和压力场的同步变化表明，压缩后较小的有效流通空间使电解液以更高速度穿透电极，但这种流速强化需要更大的压力梯度来驱动。由此，压缩比增加同时引起流动截面减小、局部速度升高和压力损失增加，形成了“结构收缩—流速强化—水力损失增加”的特征流动响应。该流动状态将进一步影响后续电极内物质传递及电化学反应过程。

2.2 压缩比对电池电化学性能的影响

在上述电极结构和流动状态变化的基础上，进一步分析压缩比对电池电化学性能的影响。如图5（a）所示，随着CR由0.09增加至0.546，电池充电电压呈现先降低后升高的变化趋势。模拟电压分别为1.5045、1.5028和1.5204 V，与前文1.4节中的实验结果变化趋势一致。电压在CR=0.242时达到最低值，表明该压缩状态下电池的总电压损失较小；当CR进一步增加至0.546时，电压明显升高，说明过度压缩会增加电池运行过程中的极化损失。因此，电池性能并不随压缩程度单调改善，而存在一个由不同传输过程共同决定的最优压缩范围。

为明确宏观电压变化的内在机制，图5（b）进一步给出了欧姆极化、活化极化、传质极化及总极化随压缩比的变化。总极化与电池电压呈一致的非单调变化，在CR=0.242附近达到最低值，随后在高压缩比下重新增加。不同极化分量表现出明显不同的响应规律。活化极化随CR增加逐渐升高，说明压缩程度提高后，维持相同外加电流所需的电荷转移过电位攀升。需要指出的是，活化极化随压

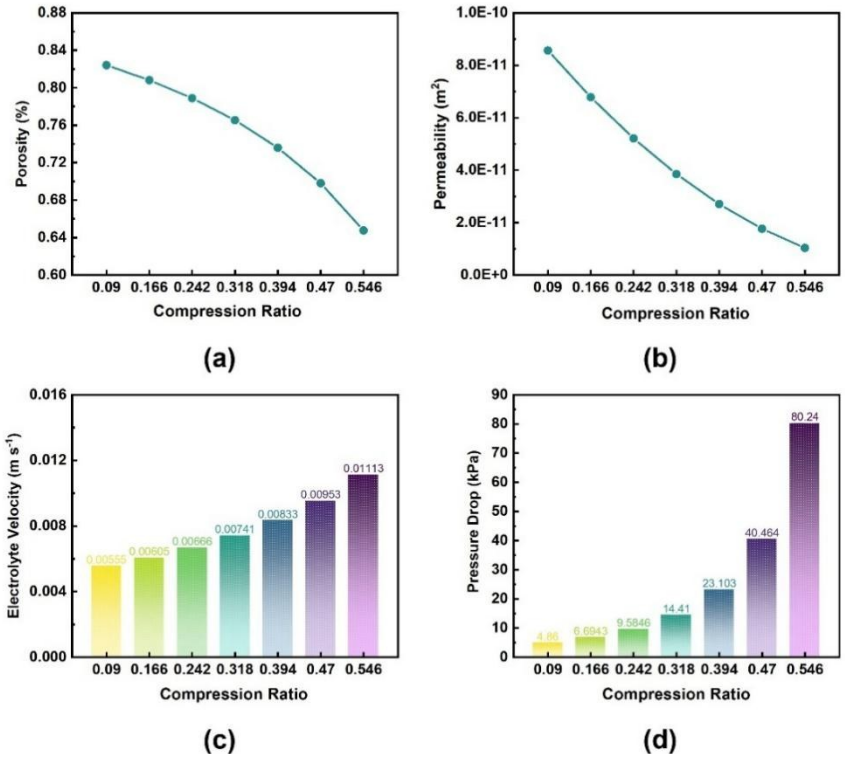


图3 不同压缩比下电极结构与流动参数的变化：(a) 孔隙率；(b) 渗透率；(c) 电解液速度；(d) 压降。

Fig. 3 Variations of electrode structure and flow parameters under different compression ratios: (a) porosity; (b) permeability; (c) electrolyte velocity; (d) pressure drop.

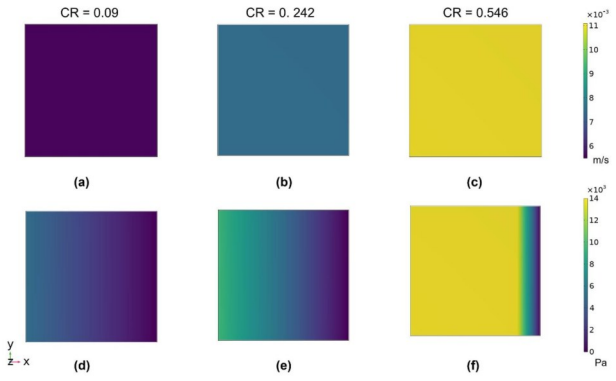


图4 不同压缩比下电极内部电解液速度和压力分布：（a-c）速度分布；（d-f）压力分布。

Fig. 4 Distributions of electrolyte velocity and pressure inside the electrode under different compression ratios: (a-c) velocity distribution; (d-f) pressure distribution.

缩比升高并非简单归因于几何面积的缩小，而是有效反应区域减小和局部反应条件恶化的综合结果，潜在原因包括：（1）压缩使相邻纤维相互接触，接触区域表面被彼此遮蔽，电解液无法进入，形成电化学不可及表面，使实际可参与反应的表面减少；（2）压缩改变电解液在纤维表面的分布均匀性，部分纤维表面虽在几何上存在，但电解液无法有效接触，从而降低了实际参与反应的面积；（3）压缩增大电极/集流体接触并降低欧姆极化的同时，可能使部分活性区域成为电解液“死区”。

与活化极化相反，欧姆极化随CR增加逐渐降低，表明压缩能够改善电极内部及电极/集流体界面的电荷传输。电极厚度随着压缩比增加而减小，使电子和离子的有效传输路径缩短；同时，压缩增强了电极与集流体之间的物理接触，有效降低了界面接触电阻（如1.2.3节所述）。因此，在本研究的压缩范围内，压缩带来的电荷传输改善能够持续降低欧姆极化。该结果与活化极化的增加形成竞争关系，也是总极化出现先降低后升高的重要原因。

传质极化在不同CR下均处于较低水平，且未表现出随压缩比持续增加的趋势。结合图3和图4可知，压缩虽然降低了电极孔隙率和渗透率，但在恒定40 mL min^{-1} 流量及50%SOC条件下，电极有效流通截面减小使电解液平均速度由5.5×10^{-3} m s^{-1} 增加至1.11×10^{-2} m s^{-1}。由此引发的对流传质强化在一定程度上弥补了孔隙结构收缩对物质传递的不利影响。因此，与采用恒定压力或恒定泵功条件的

研究不同，在本文恒定流量和50% SOC条件下，压缩比增加并未导致传质极化明显恶化。

图5（c）给出了不同CR下正极VO^{2+}和VO_2^+的平均浓度。两种活性物种浓度仅发生小幅变化，说明在所研究的运行条件下，电极内部不存在明显的反应物耗尽。由此可见，活化极化随压缩比增加的主要变化并非来自活性物种浓度的大幅降低，而主要与有效反应界面及局部反应负荷的变化有关。

这一点可以进一步由图5（d）的局部转移电流密度得到验证。随着CR增加，平均局部转移电流密度由62.5 A m^{-2}增加至75 A m^{-2}，说明在相同外加电流下，压缩后的有效反应区域需要承担更高的局部反应负荷。同时，最大局部转移电流密度随CR呈现先降低后升高的变化，在CR≈0.394附近达到最低值，随后在高压缩比下重新增加。这表明适度压缩不仅改变平均反应负荷，还能够改善电极内部反应电流的空间分配均匀性；而在过高压缩比下，结构收缩进一步加剧，使局部反应逐渐集中，从而急剧增加活化极化。

综合图5可以看出，压缩比对电池性能的影响来自不同极化过程之间的竞争博弈。随着CR增加，欧姆极化持续降低，反映出压缩对电子、离子及界面接触传输的改善；与此同时，活化极化逐渐增加，反映出有效反应区域减小和局部反应条件恶化；传质极化则在恒定流量和50% SOC条件下保持较低水平。低至中等压缩比范围内，欧姆极化的降低占主导作用，使总极化下降；当CR进一步增加后，活化极化的增加逐渐抵消甚至超过欧姆极化的降低，使总极化重新升高。因此，CR=0.242对应了欧姆传输改善与活化损失增加之间较为有利的平衡状态。

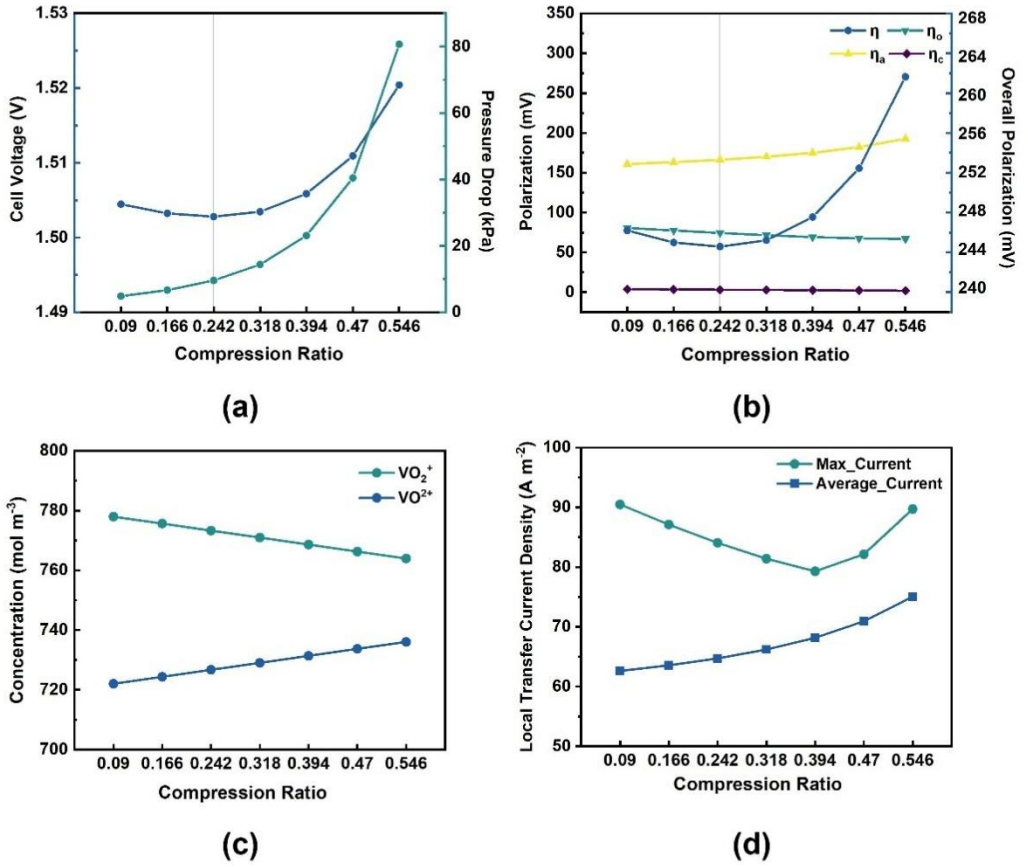


图5　不同压缩比下电池性能与电化学特性的变化：(a) 电池电压和压降；(b) 欧姆、活化、传质及总极化；(c) VO_2^+和VO^{2+}浓度；(d) 最大和平均局部转移电流密度。

Fig. 5　Variations of cell performance and electrochemical characteristics under different compression ratios: (a) cell voltage and pressure drop; (b) ohmic, activation, mass-transport and total polarization; (c) VO2+ and VO2+ concentrations; (d) maximum and average local transfer current density.

2.3 三种极化的空间分布与演变

为进一步明确不同压缩比下极化损失在电极内部的空间分布特征，图6给出了CR=0.09、0.242和0.546时欧姆极化、活化极化和传质极化的三维分布。三种极化表现出截然不同的空间特征及压缩比响应，表明电极压缩对电荷传输、电化学反应和物质传递的影响并不同步。

如图6（a-c）所示，欧姆极化随CR增加整体呈降低趋势。低压缩比下，电极较厚，电子和离子需要经过较长的传输路径，因此欧姆损失相对较高。随着CR的增加，电极厚度减小，电子和离子的有效传输距离缩短，同时电极与集流体之间的接触质量得到改善，使欧姆极化逐渐降低。该空间分布结果与图5（b）的整体变化一致，说明压缩对电荷传输的改善并非局限于局部区域，而是全局性地作用于整个电极的传输过程。需要指出的是，虽然孔隙率降低会增加液相离子传输阻力，但在本研究范围内，传输路径缩短及界面接触改善的作用占据主导地位，因此欧姆极化总体仍随CR增加而降低。

活化极化的空间分布如图6（d-f）所示，其整体水平随CR增加而升高。CR=0.09时，活化极化相对较低；当CR增加至0.242和0.546后，高活化极化区域逐渐扩大，表明压缩程度增加后，电极内部电荷转移过程需要更高的驱动过电位。结合图5（c）和（d）可以发现，正极VO^{2+}和VO_2^+浓度仅发生小幅变化，而平均局部转移电流密度由62.5 A m^{-2}增加至75 A m^{-2}。因此，活化极化的增加主要与有效反应区域减小及局部反应条件恶化有关，而不是由明显的反应物耗尽引起。高压缩比下，这种反应负荷的增加更加明显，使活化极化成为限制电化学性能的主导因素。

图6（g-i）给出了传质极化的空间分布。与欧姆极化和活化极化相比，传质极化整体处于较低水平，其空间变化也相对有限。CR=0.09时，传质极化在电极内部存在一定梯度；随着CR增加至0.242和0.546，该梯度没有进一步增强，高值区域反而有所减弱。这一结果与电极结构变化的影响方向并不完全一致：压缩降低了孔隙率和渗透率，不利于电解液在孔隙中的传输，但恒定流量条件下电极有效流通空间减小，使平均流速由5.5×10^{-3} m s^{-1}增加至1.11×10^{-2} m s^{-1}。流速增加提高了对流输运能力，从而部分抵消了结构收缩对物质传递的不利影响。因此，在本文的恒定流量和50%SOC条件下，进一步压缩电极并未导致传质极化持续增加。

综合图6可以看出，压缩比增加后，三种极化呈现出明显不同的响应：欧姆极化持续降低，活化极化逐渐升高，而传质极化保持较低水平且变化有限。这说明在本文研究条件下，压缩比对电池性能的主要影响并非来自传质受限，而是来自欧姆传输改善与电荷转移损失增加之间的竞争。低至中等压缩比下，欧姆极化的降低能够有效抵消活化极化的增加，使总极化下降；当压缩比进一步提高时，活化极化的增加逐渐占据主导，导致总极化重新升高。由此，图6从空间尺度进一步验证了图5所反映的总体极化变化规律，并说明CR=0.242附近对应了电荷传输改善与反应界面损失之间较为合理的平衡状态。

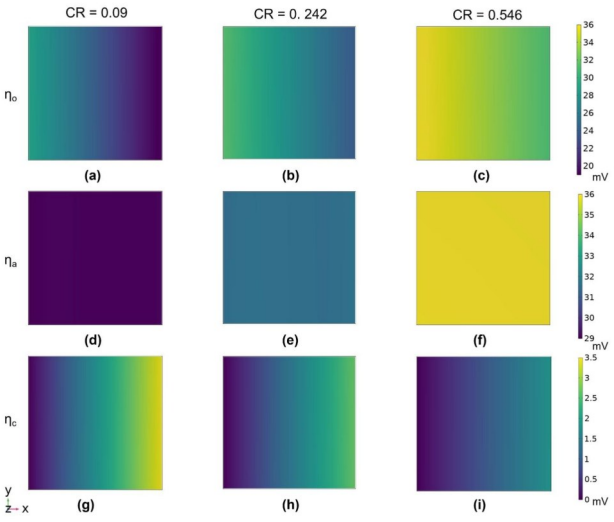


图6 不同压缩比下电极内部三种极化的空间分布：(a-c) 欧姆极化；(d-f) 活化极化；(g-i) 传质极化。

Fig. 6 Spatial distributions of the three types of polarization inside the electrode under different compression ratios: (a-c) ohmic polarization; (d-f) activation polarization; (g-i) mass-transport polarization.

2.4 最优压缩比的形成机制

综合上述结构、流动及电化学结果，电极压缩对VFB性能的影响来源于结构收缩与传输过程之间的竞争博弈。如图7所示，随着CR增加，电极厚度和孔隙率持续降低，渗透率同步下降。在恒定流量条件下，有效流通空间的减小使电解液平均速度

增加，从而增强电解液的对流输运能力，但同时导致压力损失显著增加。因此，压缩并不是单纯改善或恶化电极传输性能，而是同时改变了流动阻力、电荷传输和电化学反应边界条件。

在较低至中等压缩比范围内，电极厚度减小以及电极与集流体接触改善，使电子和离子的有效传输路径缩短，欧姆极化持续降低。与此同时，电极孔隙结构收缩和有效反应界面减少使活化极化逐渐增加，但此时欧姆极化降低所带来的收益占主导作用，因此总极化随CR增加而降低。由于恒定流量下平均电解液速度同步增加，传质极化未出现明显增加，使其对总极化变化的贡献相对有限。

当CR进一步增加时，电极结构收缩更加明显。虽然欧姆极化仍可继续降低，但有效反应界面的减少使单位有效界面承担的反应负荷进一步增加，导致活化极化持续升高。与此同时，渗透率的大幅下降使流动阻力快速增加，压力降显著升高。此时，欧姆传输改善对极化的降低作用逐渐无法抵消活化极化增加所带来的损失，因此总极化开始回升，并最终导致电池充电电压升高（极化损耗增大），性能优势减弱。

在本研究条件下，CR=0.242对应欧姆极化降低与活化极化增加之间的较优平衡状态，总极化达到最低水平。此时，适度压缩能够有效缩短电荷传输路径并改善界面接触，同时尚未造成过大的有效反应界面损失和流动阻力的急剧攀升。因此，CR=0.242可作为本研究运行条件下较为合适的电极压缩比。

需要指出的是，该最优压缩比与运行条件密切相关。本文采用恒定流量40 mL min^{-1}，因此压缩后流通空间减小所产生的流速增加能够部分补偿孔隙结构收缩对物质传递的不利影响。在不同电极材料、流量、SOC、电流密度或流场结构条件下，各极化过程的相对贡献可能发生变化，从而使较优压缩比发生改变。因此，本文结果表明，电极压缩比的优化本质上是对电荷传输、界面反应和电解液流动之间竞争关系的系统性调控，而不是单一结构参数的优化。

3 结 论

本文建立了包含流体流动、物质传递、电荷传输和电化学反应的三维全耦合多物理场模型，系统

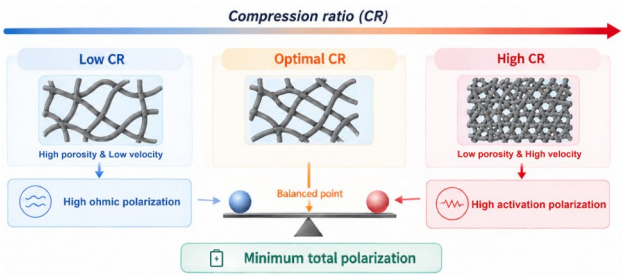


图7 不同压缩比下电极结构、流动传输与电化学极化之间的竞争关系及最优压缩比形成机制示意图。

Fig. 7 Schematic of the competition among electrode structure, flow/transport and electrochemical polarization under different compression ratios and the formation mechanism of the optimal compression ratio.

研究了电极压缩比对全钒液流电池传输行为和电化学性能的影响，并进一步定量分离了欧姆、活化和传质极化。主要结论如下：

（1）电极压缩引起的孔隙结构变化改变了电解液流动特性。恒定流量条件下，电极压缩减小有效流通空间并提高电解液平均流速，从而增强对流传质，同时伴随流动阻力显著增加。该结果表明，电极结构收缩对传输过程具有双重影响，压缩程度是调控电解液流动与传质行为的重要参数。

（2）电极压缩对三种极化过程产生不同影响。随着压缩比增加，欧姆极化持续降低，主要得益于接触与传输路径的改善；活化极化则逐渐升高，主要与有效反应区域减小及局部反应条件恶化有关。在恒定流量和50% SOC条件下，流速增加带来的对流强化能够在一定程度上抵消孔隙收缩对传质的不利影响，因此传质极化整体保持在较低水平。三种极化的竞争共同决定了电池总极化随压缩比先降低后升高的变化规律。

（3）存在由欧姆极化与活化极化竞争形成的最优压缩区间。轻度压缩时，欧姆极化降低占主导，使总极化逐渐减小；随着压缩程度进一步增加，活化极化的升高逐渐超过欧姆极化的下降，导致总极化回升。在本文研究工况下，欧姆极化降低与活化极化增加的竞争在适当压缩比处达到较优平衡，对应总极化最低和电池电压最优。该结果说明，电极压缩比并非越高越好，而应根据电极材料、流量、电流密度及流场结构等因素，在欧姆损失与活化损失之间寻求合理平衡。此外，本文的传质极化结论仅适用于中等SOC工况，充放电末期浓差极化可

能显著增大，最优压缩比也可能发生偏移，后续需进一步研究。

参 考 文 献

[1] 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): 2772-2780.
ZHANG H M. Development, cost analysis considering various durations, and advancement of vanadium flow batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9): 2772-2780.

[2] 王文琪, 金杰, 汪丽敏, 刘馨月, 程涛, 厚镛, 薛涵, 王志宇, 刘博, 刘佳保, 路旭斌. 全钒液流电池用电极材料的研究进展[J]. 电化学(中英文), 2026, 32(2): 4-35.
WANG W Q, JIN J, WANG L M, LIU X Y, CHENG T, HOU Y, XUE H, WANG Z Y, LIU B, LIU J B, LU X B. Current research progress on electrode materials for all-vanadium redox flow batteries[J]. Journal of Electrochemistry, 2026, 32(2): 4-35.

[3] 李跃林, 刘祉好, 郭森, 刘晓君, 张蓬亮, 王程程, 梁原, 王锐. 全钒液流电池的电极结构研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(2): 601-612.
LI Y L, LIU Z Y, GUO S, LIU X J, ZHANG P L, WANG C C, LIANG Y, WANG R. Research progress on electrode structure design of vanadium redox flow battery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(2): 601-612.

[4] JIANG H R, SHYY W, WU M C, ZHANG R H, ZHAO T S. A bi-porous graphite felt electrode with enhanced surface area and catalytic activity for vanadium redox flow batteries[J]. Applied Energy, 2019, 233/234: 105-113.

[5] PARK S K, SHIM J, YANG J H, JIN C S, LEE B S, LEE Y S, SHIN K H, JEON J D. The influence of compressed carbon felt electrodes on the performance of a vanadium redox flow battery [J]. Electrochimica Acta, 2014, 116: 447-452.

[6] CHANG T C, ZHANG J P, FUH Y K. Electrical, mechanical and morphological properties of compressed carbon felt electrodes in vanadium redox flow battery[J]. Journal of Power Sources, 2014, 245: 66-75.

[7] BANERJEE R, BEVILACQUA N, MOHSENINIA A, WIEDEMANN B, WILHELM F, SCHOLTA J, ZEIS R. Carbon felt electrodes for redox flow battery: Impact of compression on transport properties [J]. Journal of Energy Storage, 2019, 26: 100997.

[8] ZHANG K Y, YAN C W, TANG A. Unveiling electrode compression impact on vanadium flow battery from polarization perspective via a symmetric cell configuration[J]. Journal of Power Sources, 2020, 479: 228816.

[9] BROWN L D, NEVILLE T P, JERVIS R, MASON T J, SHEARING P R, BRETT D J L. The effect of felt compression on the performance and pressure drop of all-vanadium redox flow batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2016, 8: 91-98.

[10] GHIMIRE P C, BHATTARAI A, SCHWEISS R, SCHERER G G, WAI N, YAN Q. A comprehensive study of electrode compression effects in all vanadium redox flow batteries including locally resolved measurements[J]. Applied Energy, 2018, 230: 974-982.

[11] WANG Q, QU Z G, JIANG Z Y, YANG W W. Experimental study on the performance of a vanadium redox flow battery with non-uniformly compressed carbon felt electrode[J]. Applied Energy, 2018, 213: 293-305.

[12] OH K, WON S, JU H. Numerical study of the effects of carbon felt electrode compression in all-vanadium redox flow batteries[J]. Electrochimica Acta, 2015, 181: 13-23.

[13] WANG Q, QU Z G, JIANG Z Y, YANG W W. Numerical study on vanadium redox flow battery performance with non-uniformly compressed electrode and serpentine flow field[J]. Applied Energy, 2018, 220: 106-116.

[14] 祁梦瑶, 侯一晨, 陈磊, 杨立军. 新型径向流动全钒液流电池单元数值模拟[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(10): 3209-3220.
QI M Y, HOU Y C, CHEN L, YANG L J. Numerical simulation of a novel radial all-vanadium flow battery cell[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(10): 3209-3220.

[15] 王振宇, 郭子啸, 范新庄, 赵天寿. 全钒液流电池中蛇型和插指型流道的对比[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(4): 1121-1130.
WANG Z Y, GUO Z X, FAN X Z, ZHAO T S. Comparative study between serpentine and interdigitated flow fields for vanadium redox flow batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(4): 1121-1130.

[16] 王庆泰, 张赛, 王杰敏. 全钒液流电池多孔电极非均匀压缩的数值模拟[J]. 化工进展, 2024, 43(6): 2940-2949.
WANG Q T, ZHANG S, WANG J M. Numerical simulation for non-uniform compression of porous electrodes in vanadium flow batteries[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(6): 2940-2949.

[17] YUE M, LV Z, ZHENG Q, LI X, ZHANG H. Battery assembly optimization: Tailoring the electrode compression ratio based on the polarization analysis in vanadium flow batteries[J]. Applied Energy, 2019, 235: 495-508.

[18] CHEN W, KANG J L. Optimization of electrolyte flow and vanadium ions conversion by utilizing variable porosity electrodes in vanadium redox flow batteries[J]. Chemical Physics, 2020, 529: 110577.

[19] 王瑄, 叶强. 全钒液流电池电堆局部供液不足导致副反应加剧的现象[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1455-1467.
WANG X, YE Q. The aggravation of side reactions caused by insufficient localized liquid supply in an all-vanadium redox flow battery stack[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5): 1455-1467.

[20] 张爱芳, 魏邦达, 李卓昊, 杨洋, 杨添强, 姚俊, 张杰, 刘飞, 李浩秒, 王康丽, 蒋凯. 全钒液流电池建模及SOC在线估计研究进展[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(3): 1036-1049.
ZHANG A F, WEI B D, LI Z H, YANG Y, YANG T Q, YAO J, ZHANG J, LIU F, LI H M, WANG K L, JIANG K. Research progress on modeling and SOC online estimation of vanadium redox-flow batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(3): 1036-1049.