

DOI: 10.11949/0438-1157.

微孔层/催化层界面对 PEMFC 影响的数值研究

常虹, 李丽, 谭舒健, 魁殿禄, 张恒

(中国矿业大学低碳能源与动力工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 微孔层 (MPL) /催化层 (CL) 界面对质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 中热、电传导及气、液传输有显著影响, 但受限于界面微结构的复杂性及非均匀性, 对其开展深入机理研究仍面临诸多挑战。本研究基于实验表征获取 MPL/CL 界面真实形貌, 建立二维、非等温两相流数值模型, 探究界面对电池内部多物理场分布及性能的影响规律。研究表明, 界面的存在使传质受限加剧氧气分布不均, 局部欧姆阻抗升高诱导电流密度集中, 热阻增加强化温度梯度, 液态水迁移受阻则促进水的滞留与积聚, 最终导致电池性能劣化。因此, 在数值模拟中充分考虑 MPL/CL 界面, 对于提升质子交换膜燃料电池性能预测的准确性与可信度具有关键作用。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 微孔层/催化层界面; 多物理场; 两相流; 数值模拟

中图分类号: TK91

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-09

Numerical study of the effects of the microporous layer/catalyst layer interfaces on PEMFCs

CHANG Hong, LI Li, TAN Shujian, KUI Dianlu, ZHANG Heng

(School of Low-carbon Energy and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: The microporous layer (MPL)/catalyst layer (CL) interface significantly influences heat and electronic conduction, as well as gas and liquid transport in proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs). However, due to the complexity and heterogeneity of the interfacial microstructure, conducting in-depth mechanistic investigations remains challenging. This study employs experimental characterization to obtain the realistic morphology of the MPL/CL interface, establishes a two-dimensional, non-isothermal, two-phase flow numerical model, and systematically investigates the effects of the interface on multiphysics field distributions and cell performance. The results demonstrate that the presence of the interface exacerbates mass transport limitations, resulting in heterogeneous oxygen distribution. Localized elevations in ohmic resistance leads to current density localization, while increased thermal resistance amplifies temperature gradients. Impeded liquid water transport facilitates water retention and accumulation, ultimately causing cell performance degradation. Therefore, integrating the MPL/CL interface into numerical simulations is critical for enhancing the accuracy and reliability of performance predictions in PEMFC.

Keywords: proton exchange membrane fuel cell; microporous layer/catalyst layer interface; multiphysics; two-

收稿日期: 2026-02-01 修回日期: 2026-04-30

通信作者: 张恒(1993-), 男, 副教授, hzhang1027@cumt.edu.cn

第一作者: 常虹(2002-), 男, 硕士研究生, hongchang1@cumt.edu.cn

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (2025QN1132)

引用本文: 常虹, 李丽, 谭舒健, 魁殿禄, 张恒. 微孔层/催化层界面对 PEMFC 影响的数值研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1–9

Citation: CHANG Hong, LI Li, TAN Shujian, KUI Dianlu, ZHANG Heng. Numerical study of the effects of the microporous layer/catalyst layer interfaces on PEMFCs[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1–9

phase flow; numerical simulation

引 言

随着全球能源结构向低碳化与可持续方向转型,质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cells, PEMFCs)因其能够将化学能高效转化为电能,且具有功率密度高、零排放、启动迅速等优势^[1-3],已成为重要的能源转化技术之一^[4]。典型的PEMFC主要由双极板(bipolar plate, BPP)、气体扩散层(gas diffusion Layer, GDL)、微孔层(microporous layer, MPL)、催化层(catalyst layer, CL)以及质子交换膜(proton exchange membrane, PEM)构成^[5, 6]。各功能层之间的协同作用是PEMFC稳定运行的基础,不同结构层之间不可避免形成界面区域,而界面结构与接触状态往往成为电荷与物质传输的限制环节^[7]。其中,MPL与CL在材料组成、弹性模量及表面粗糙度等方面存在差异,从而形成MPL/CL界面区域^[8]。界面接触不连续及缝隙结构降低有效接触面积,对电子与反应物的传输过程产生限制^[9]。此外,由于MPL/CL界面紧邻电化学反应区域,其结构特征对PEMFC内部传输行为及整体性能具有重要影响^[10]。

近年来,针对MPL/CL界面结构及其对传输特性的影响已开展实验和模拟研究。实验方面,Chen等^[11]揭示界面接触状态及液态水优先积聚抑制氧气传输,Prass等^[12]进一步指出界面间隙由表面粗糙度与压缩共同决定。Park等^[13]通过优化界面接触提升电池性能,Leeuwner等^[14]、Wu等^[15]及Kang等^[16]从结构调控与演化角度进一步验证了界面对传输与性能衰退的关键作用。模拟方面,Zou等^[17-18]从多相传输角度系统表明,界面几何结构与压缩耦合调控气液分布与氧扩散,明确了界面结构与传输特性的内在关系。Bajpai等^[19]、Zhang等^[20]及Bao等^[21]分别从不同尺度揭示了界面结构与应力对传输行为及液态水迁移的影响机制。然而,现有研究虽已探讨MPL/CL界面对传输特性的影响,但多基于理想化界面假设,难以同时表征不规则接触与缝隙结构,导致真实的界面形貌及其接触特征尚未得到充分表征,其对多物理场耦合传输特性及性能预测的影响仍缺乏系统认识。

本文利用光学轮廓仪表征获取MPL/CL界面形貌,并在此基础上构建包含MPL/CL界面结构的二

维、非等温两相流模型,系统分析界面结构对多物理场分布及燃料电池性能的影响,为膜电极界面优化及PEMFC性能提升提供理论依据。

1 界面模型构建

1.1 MPL/CL界面特性实验表征

为构建能真实反映MPL/CL界面形貌特征的数值模型,本文首先对多孔电极材料表面形貌进行实验表征。选用碳纸型MPL材料H14C及CL材料SCCM1291,采用OLS5000激光共聚焦显微镜对其表面起伏特性进行整体测量,如图1(a)所示^[22-25]。测试前,为提高材料表面的反射性能,对样品表面进行喷金处理,以增强测量信号质量。测试过程中,通过多区域扫描获取材料表面形貌数据,并对测量结果进行拼接与统计处理,以提高表征结果的代表性与可靠性。如图1(b)所示,MPL表面高度分布呈现明显的随机起伏特征,局部区域高度差异较大。沿界面面内方向提取代表性截线进行定量分析,其结果如图1(c)所示。可以看出,MPL表面的起伏幅度整体高于CL,且局部高度变化更为剧烈,相比之下,CL表面相对平缓,但仍具有一定随机波动。上述结果表明,MPL/CL界面具有明显的几何不规则性,难以视为理想平整接触。但需注意,该形貌对应未受压的原始状态,在燃料电池实际装配与运行过程中^[26-27],MPL与CL通常处于受压接触状态,界面几何形貌将随压缩过程发生变化。为获得更符合实际工况的界面结构,本文在实验测得的表面形貌基础上,将界面轮廓引入有限元模型,对MPL与CL的压缩接触过程进行数值模拟,重构受压状态下的界面几何形貌。压缩应力取1.5 MPa,以表征典型燃料电池装配压力水平^[19, 28]。

1.2 几何模型

本研究的几何域如图2(a)所示,相关几何参数及部分电化学条件汇总于表1。为定量评估MPL/CL界面对PEMFC多物理场分布及性能的影响,分别构建了考虑MPL/CL界面的模型与理想无界面模型。选取四个位置,以便对多场分布进行定量分析,具体位置如图2(b)所示。对于有界面的模型,在MPL/CL接触界面沿面内方向选取两个代表性位置,其中位置3对应界面接触面积较小区域,位置4对应接触面积较大区域。在无界面模型中,于相同

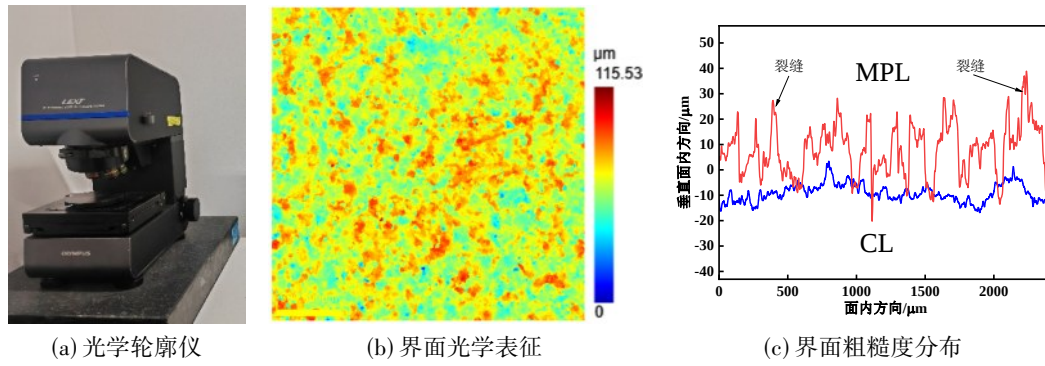


图1 MPL/CL 界面表面形貌及粗糙度特性表征

Fig.1 Surface morphology and roughness characterization of the MPL/CL interface

几何位置分别设置位置1和位置2作为对照点。通过在相同空间位置提取物理量分布,可排除几何位

置差异的影响,从而直接对比引入真实界面形貌前后的结果。

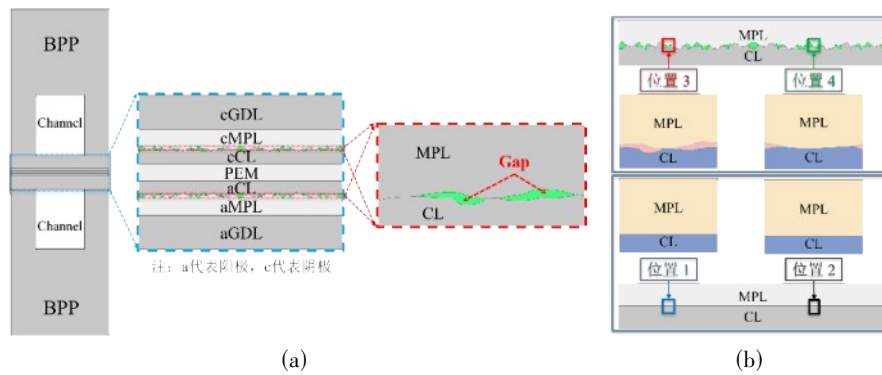


图2 (a) 计算域示意图和(b) 有界面与无界面对应研究位点

Fig.2 (a) Computational domain schematic and (b) Corresponding study sites with and without interface.

表1 基本参数

Table 1 Basic Parameters

参数	数值
模型、流道宽度/ μm	1320, 660
BPP、流道高度/ μm	1160, 800
GDL、MPL、CL、PEM厚度/ μm	180, 30, 10, 25
阴、阳极交换电流密度/ $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$	$10, 1\times 10^4$
阴、阳极传递系数	0.5, 0.45
阴、阳极活化能/ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	$50\times 10^3, 1\times 10^3$
阴、阳极比活性表面积/ m^{-1}	$1.2\times 10^5, 8\times 10^4$

1.3 模型假设

为保证模型合理性及降低模型复杂度,对两相流界面模型做出如下假设:1. 燃料电池在稳态下运行;2. 多孔介质均为各向同性;3. 燃料电池中传热方式以热传导为主;4. 电化学产生的水均为气态^[29]。

1.4 控制方程

为描述PEMFC内部电化学反应及多物理场耦合传输过程,本文建立了涵盖电荷传输、物质传输、

能量传递及相变行为在内的多场耦合数学模型。

1) 电荷传输

欧姆定律被用于求解电池中的带电粒子传输行为:

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla \phi) = R_e \quad (1)$$

其中, R_e 表示电流源项, $\text{A}\cdot\text{m}^{-3}$; σ 表示介质的电导率, $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$; ϕ 表示电势, V 。

本文数值模型中,阴、阳极的电化学反应动力学均采用 Butler-Volmer 方程进行描述,用以表征电极反应速率与过电位之间的非线性关系,其表达式如下:

$$i = i_0 a_e \left(\frac{C_i}{C_i^{\text{ref}}} \right)^{n_i} \left[\exp \left(\frac{\alpha_a F}{RT} \eta \right) - \exp \left(- \frac{\alpha_c F}{RT} \eta \right) \right] \quad (2)$$

其中, i_0 表示交换电流密度, $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$; a_e 表示电极比面积, m^{-1} ; α_a 和 α_c 分别表示阴、阳极的传递系数; C_i 和 C_i^{ref} 表示物种 i 的局部浓度和参考浓度, $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$; η 表示过电位, V 。

2) 物质传输

Stefan-Maxwell 方程被使用对多组分气体扩散过程进行模拟,表达式如下:

$$\nabla \cdot \left\{ -\rho \sum_{i=1}^3 D_i^{\text{eff}} \left[\frac{M}{M_i} (\nabla \omega_i + \omega_i \frac{\nabla M}{M}) + (x_i - \bar{x}) \frac{\nabla P}{P} \right] \right\} = R_0 \quad (3)$$

其中, ρ 表示混合物总密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ω_i 表示组分 i 质量分数; D_i^{eff} 表示组分 i 的扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; M 表示混合物平均摩尔质量, $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$; x_i 表示组分 i 的摩尔分数; P 表示系统总压力, Pa; R_0 表示反应源项, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3) 能量传递

傅里叶定律被使用求解燃料电池中温度分布:

$$0 = \nabla \cdot (k \nabla T) + R_T \quad (4)$$

其中, k 表示材料的导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 表示温度, K; R_T 表示热源项, $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

4) 水的相变

在 PEMFC 运行过程中, 气、液态之间发生相变转化, 对应的源项见式(5)^[30]:

$$R_w = \begin{cases} k_{\text{cond}}(1-S) \left(\frac{x_{\text{H}_2\text{O}} M_{\text{H}_2\text{O}}}{RT} \right) (P_{\text{sat}} - P_{\text{H}_2\text{O}}) & P_{\text{H}_2\text{O}} > P_{\text{sat}} \\ k_{\text{evp}} \varepsilon S \rho_{\text{H}_2\text{O}} (p_{\text{H}_2\text{O}} - p_{\text{sat}}) & P_{\text{sat}} > P_{\text{H}_2\text{O}} \end{cases} \quad (5)$$

其中, R_w 表示水相变源项, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$; k_{cond} 和 k_{evp} 分别代表水的凝结速率和蒸发速率, s^{-1} 和 $\text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$; S 表示液态水饱和度; ε 表示孔隙率; P_{sat} 表示水蒸气的饱和压力, Pa。

5) 液态水运输方程

在多孔介质中, 毛细压力为气、液两相压力差, 其由界面张力 γ 、接触角 θ 和特征半径 r 共同决定, 见式(6)。多孔介质中饱和度由亲水孔和疏水孔共同主导, 其控制方程见式(7), 其中疏水孔和亲水孔中的饱和度的控制方程见式(8)。

$$P_c = \frac{2\gamma \cos \theta_{c,h}}{r_{c,h}} \quad (6)$$

$$S = f_{\text{Hl}} S_{\text{Hl}} + (1 - f_{\text{Hl}}) S_{\text{H0}} \quad (7)$$

$$S_{\text{H},k} = \sum_k \frac{f_{r,k}}{2} \left[1 + v_h \operatorname{erf} \left(\frac{\ln r_{c,h} - \ln r_{0,k}}{s_k \sqrt{2}} \right) \right] \quad (8)$$

其中, P_c 为毛细压力, Pa; S_{Hl} 和 S_{H0} 分别为亲水与疏水孔隙的饱和度; f_{Hl} 为亲水孔体积分数。

2 结果与讨论

2.1 网格独立性及模型验证

为保证数值计算结果的可靠性, 首先进行了网格独立性分析, 如图 3(a) 所示。在固定工况下, 随着网格数量增加, 计算电流密度逐渐趋于稳定。当网格数量增至 2.8×10^4 时, 电流密度变化幅度小于 0.1%, 进一步加密网格对结果的影响甚微, 而计算时间显著增加。综合精度与效率, 后续模型均采用该网格数。在此基础上, 对模型进行验证, 如图 3(b) 所示。实验采用氢气流速 0.4 NLPM、空气流速 2.0 NLPM, 铂载量 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, 模拟运行条件为温度 353.15 K、压力 200 kPa、相对湿度 80%。极化曲线对比表明, 低电流密度区间, 两种模型的预测结果均与实验数据一致, 而在中、高电流密度区间, 无界面模型预测电压偏高。相比之下, 考虑真实 MPL/CL 界面形貌的模型能够更好地再现实验极化特性, 尤其在传质受限增强时, 其预测结果与实验数据更为吻合。这表明忽略界面几何不规则性会低估界面传质阻力及相应的极化损失, 从而导致对 PEMFC 性能的高估, 验证了本文模型在描述实际运行行为方面的合理性。

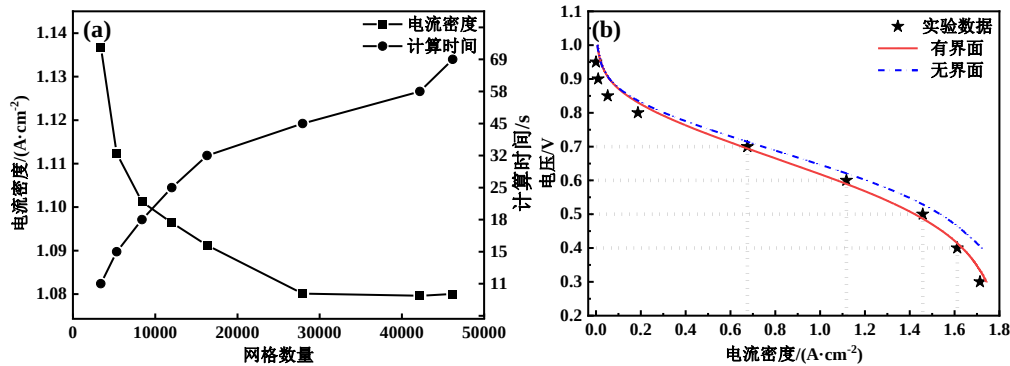


图3 (a) 网格无关性验证和(b) 模型预测与实验数据对比

Fig.3 (a) Grid independence study and (b) Comparison between model predictions and experimental data

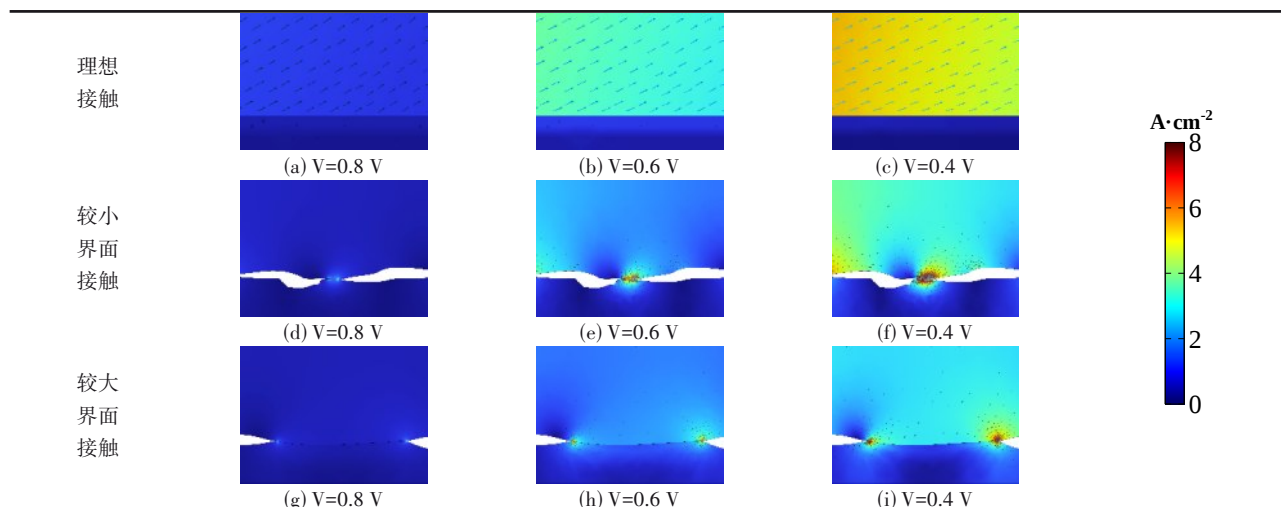
2.2 MPL/CL界面对电流密度的影响

图4展示了不同工作电压下,三种界面形态电流密度大小及方向的分布特征。因位置1和2具有相似的电流密度分布特性,故此处仅展示位置1、3和4的云图。从图中可以看出,随着工作电压降低,电流密度整体水平明显升高,MPL/CL界面接触状态对电流密度空间分布产生显著影响。在理想接触形态中,电流密度在界面上分布较为均匀。在较小界面接触中,由于界面接触有限,电流主要通过

局部接触区传导,导致局部出现明显的电流集中现象,并伴随偏转与扰动。在较大界面接触中,由于接触面积的增大会减弱局部电流集中效应,导致电流密度在接触区两侧有所增强,而中部区域分布趋于均匀,其整体特征介于理想接触与较小界面接触之间。上述结果表明,MPL/CL界面接触状态通过改变局部电流传输路径,控制了电流密度的空间非均匀分布。

图4 MPL/CL界面对电流密度分布的影响

Fig.4 Effect of the MPL/CL interface on current density distribution



2.3 MPL/CL界面对氧气浓度分布的影响

图5(a)展示了不同工作电压下,MPL/CL界面对氧气浓度分布的影响。结果表明,随着工作电压降低,CL内氧气浓度整体下降,且非均匀性逐渐增强。在相同电压下,MPL/CL界面的存在使得GDL中氧气浓度变高,CL中氧气浓度变化更明显。图5(b)展示了界面对CL中氧气分布均匀度的影响,该均匀度指标基于均方误差(Mean Square Error, MSE)计算得出。有界面模型的平均氧气浓度始终偏高,两种模型的氧气浓度非均匀性均先增加后降低,但有界面模型的非均匀性峰值更高。这是因为CL内的氧气浓度受传质阻力与电化学反应速率的影响。界面结构一方面增加氧气传输阻力,抑制氧气向CL输运,另一方面降低电流密度,降低氧气消耗速率,在两种因素的共同作用下,CL内氧气浓度略有提高,但分布非均匀性显著增强。

2.4 MPL/CL界面对温度分布的影响

图6(a)展示了不同工作电压下,MPL/CL界面对温度分布的影响。结果表明,随着工作电压降低,

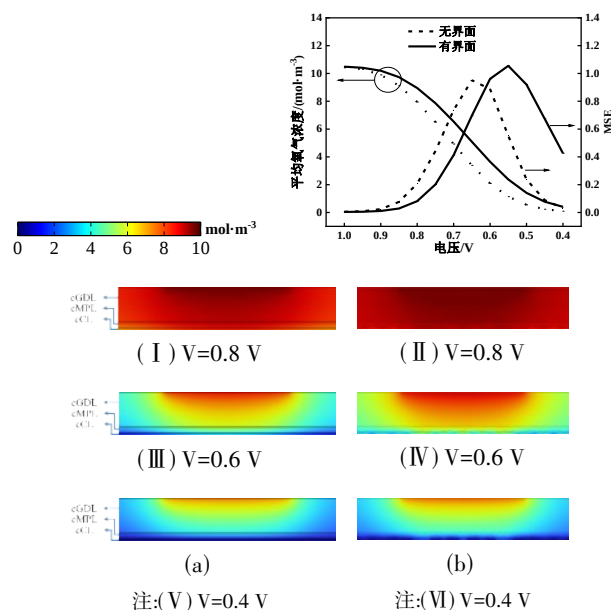


图5 MPL/CL界面对氧气浓度分布的影响

Fig.5 Effect of the MPL/CL interface on oxygen concentration distribution

电池内部温度明显升高,且高温区逐渐向阴极CL集中,温度梯度随之增大。此外,相同电压条件下,无界面模型的整体温度水平高于有界面模型。这是因为相同电压下,无界面模型电流密度更高,能够产生更多的热量。图6(b)为电池在0.4 V时,界面对MPL与CL温度分布的影响。从中可以看出,有界面模型的CL温度更高,且界面对温度分布的影响具有明显差异性。这是因为界面的存在增加了热阻,使热量在CL附近累积,导致局部温度升高。

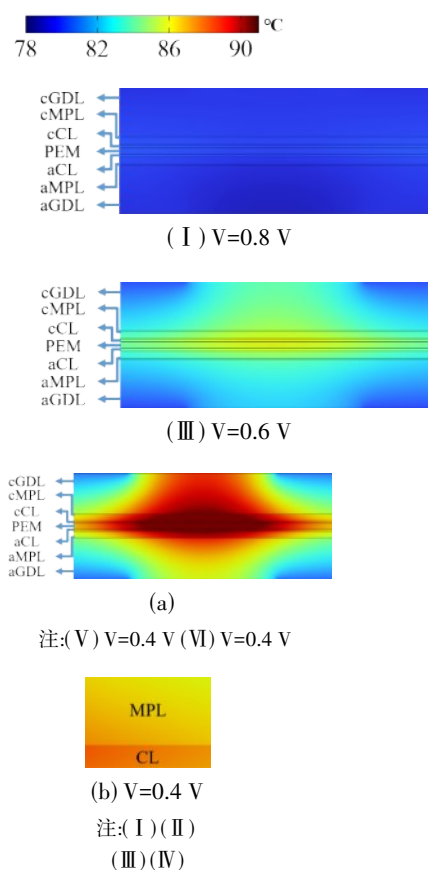


图6 MPL/CL界面对温度分布的影响

Fig.6 Effect of the MPL/CL interface on temperature distribution

2.5 MPL/CL界面对阴极液态水分布影响

图7(a)展示在不同工作电压下,MPL/CL界面对阴极侧饱和度的影响。结果表明,CL内饱和度最高,MPL内饱和度最低。GDL的饱和度在BPP和流道下方具有明显的差异性,且随着工作电压降低,无界面模型的饱和度整体呈现先增大后减小的变化趋势。此外,有界面模型的CL内饱和度高于无界面模型,GDL内饱和度低于无界面模型。这是因为液态水由阴极氧还原反应产生,并首先在反应区域

附近累积,随后在毛细压力梯度驱动下向外迁移。MPL因其强疏水特性,导致饱和度最低。GDL内的饱和度则因为肋板下方聚集的液态水呈现明显的非均匀性。在无界面模型中,随着电化学反应增强,饱和度明显升高,但在高负载工况下,随着温度升高,水的饱和蒸气压逐渐增大,导致饱和度反而降低。有界面模型因GDL内温度较低,所以没有出现饱和度降低的现象。此外,界面增加液态水传输阻力,故而有界面模型的GDL内饱和度更低。图7(b)为电池在0.4V时,界面对MPL和CL饱和度分布的影响。从中可以看出,有界面模型的CL具有更高的饱和度,而界面缝隙的饱和度介于CL和MPL之间,MPL内的饱和度基本保持不变。这是因为界面缝隙具有一定的存水能力,增加液态水传输阻力,故CL内饱和度明显升高。

图7(c)展示了无接触、部分接触和充分接触三种路径,图7(d)为界面在三种路径下对饱和度分布的影响。结果表明,饱和度沿厚度方向呈现清晰的分段特征。在CL区域维持0.25左右的较高水平,且受到接触点位影响,饱和度分布非均匀性明显。进入MPL后迅速降至0.05,界面缝隙处饱和度介于两者间。GDL内饱和度则更多受BPP影响。这是因为界面缝隙结构在无接触区域对液态水迁移形成阻力,并具有局部储水能力,使部分液态水滞留于界面附近,阻力和储水能力则由界面缝隙的具体形状主导,故而CL内饱和度具有明显非均匀性。该结果表明MPL/CL界面通过接触状态与缝隙结构的协同作用,重构了液态水在功能层之间的迁移路径与空间分布,这是理想无界面模型难以准确刻画的关键过程。

2.6 MPL/CL界面对燃料电池性能的影响

图8展示MPL/CL界面对极化曲线和功率密度的影响。从中可以看出,在相同电流密度下,界面模型的工作电压始终低于无界面的理想模型,且性能的差距随电流密度升高而不断扩大。与无界面理想模型相比,界面模型的最大功率密度较小,且功率峰值对应的电流密度更低。这是因为低电流密度区域,电压损失以活化极化为主,界面结构对反应动力学影响有限,两模型极化曲线基本重合。在中等电流密度区域,性能降低主要由欧姆极化主导,界面不完全接触会增加传导阻力,性能差异逐渐增加。在高电流密度区域,电压损失主要由浓差极化主导。液态水滞留增加氧气传输阻力,进一步

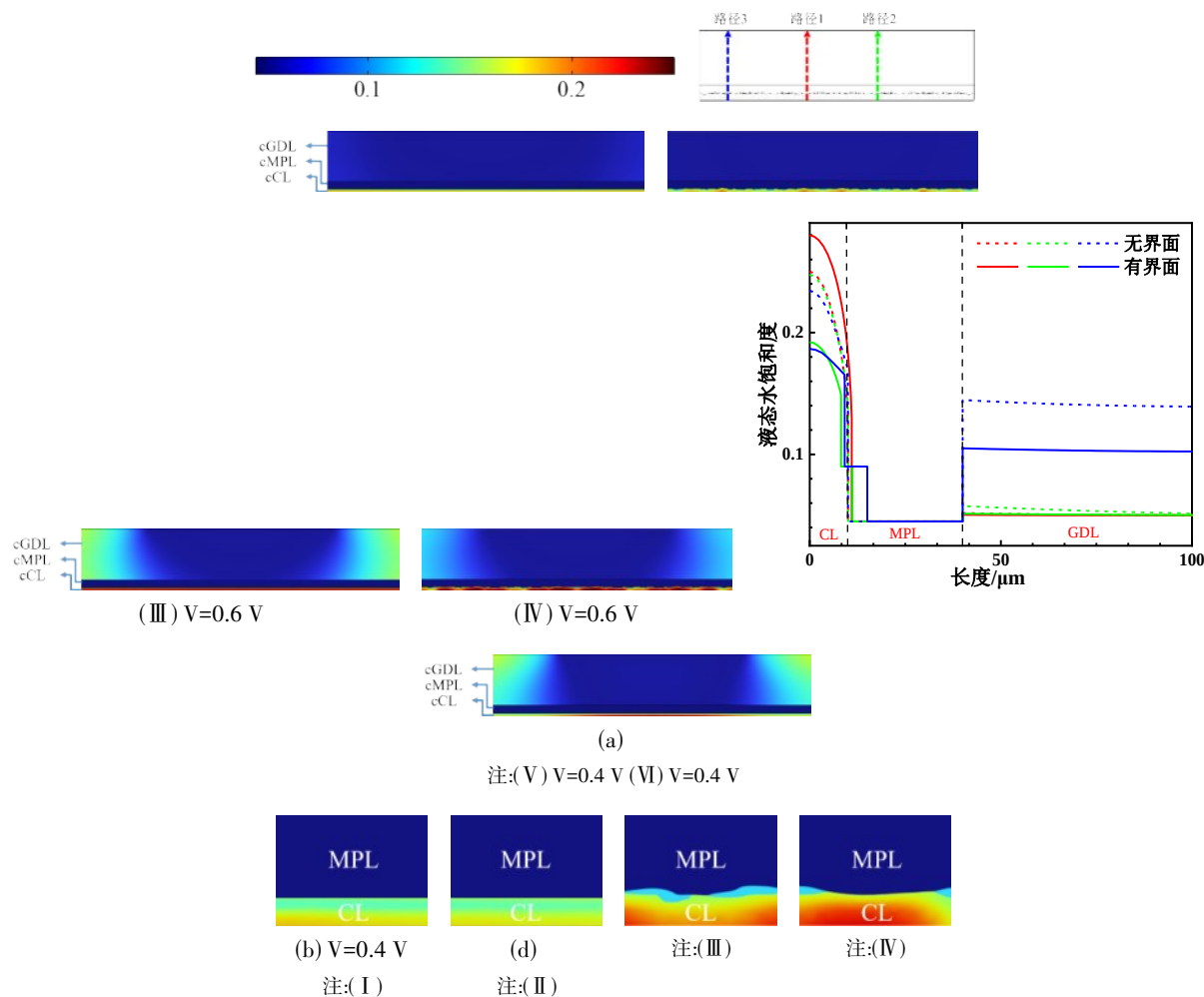


图7 MPL/CL界面对阴极饱和度分布的影响

Fig.7 Effect of the MPL/CL interface on the saturation distribution on the cathode

增加浓差极化,从而使得性能差异更为显著。综上所述,考虑MPL/CL界面能够更真实地反映燃料电池在实际运行条件下的性能衰减行为,为界面结构优化与水热管理策略的设计提供理论依据。

3 结论

本文基于光学轮廓仪实测的MPL与CL表面形貌,构建了包含真实MPL/CL界面形貌的二维、非等温两相流模型,系统评估MPL/CL界面结构对燃料电池中多场分布及性能的影响。主要结论如下:

1. MPL/CL界面显著重构了阴极侧电流密度分布。界面几何不连续性引起电流传输路径的重新分配,在较小接触点处形成电流密度峰值,而在较大接触区两侧则出现电流局部增强。忽略真实界面将低估局部电流集中风险。

2. MPL/CL界面显著增强了氧气传质阻力并加剧其分布的非均匀性。界面阻碍了氧气向阴极CL的传输,导致在中高电流密度下,CL内氧气浓度梯度显著增大,浓差极化加剧。

3. MPL/CL界面会增加热阻,导致阴极CL温度

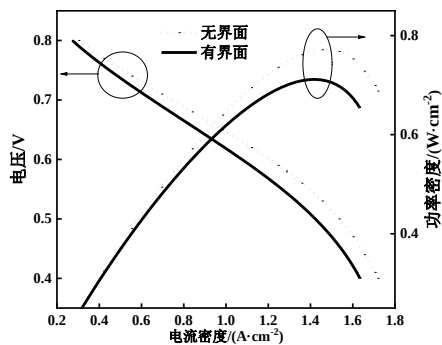


图8 MPL/CL界面对电池性能的影响

Fig.8 Effect of MPL/CL interface on cell performance

升高,形成局部热点。尽管界面模型的整体平均温度略低,但界面附近温度梯度明显增大,且有局部温度峰值的形成。

4. MPL/CL界面对液态水分布具有显著的阻滞与储水双重效应。与无界面模型相比,有界面模型中阴极CL饱和度整体提高约2%~4%,而GDL饱和度降低约5%~15%。且由于界面缝隙具备储水能力,缝隙下方阴极CL的局部饱和度可降低约0.04~0.08,该效应与缝隙尺度及其空间位置密切相关。

5. 在 $1.5\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 电流密度下,有界面模型的工作电压较无界面模型降低约0.05 V。引入界面后,最大功率密度降低约8%,且对应电流密度降低约 $0.1\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$,这表明MPL/CL界面显著压缩了燃料电池的高效运行区间。

综上,MPL/CL界面非均匀微结构会影响气-水-热-电各场分布。该结构引起电流集中,并增加热阻与传质阻力,进而增大温度梯度并形成局部热点,限制氧气传输与电化学反应,同时抑制液态水迁移并导致其滞留与聚集,最终引起燃料电池性能劣化。

参考文献

- [1] Feng Q L, Cheng M, Li H Y, et al. Uniformity improvement on in-plane current density distribution of large-area PEMFCs via introduction of along-channel gradient cathode catalyst layer: a numerical study[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, **240**: 126648.
- [2] Yang W W, Liu Z, Song L D, et al. Advancing low-Pt catalyst layer design from multi-scale to cross-scale synergy optimization for high-performance and durable proton exchange membrane fuel cell[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2026, **230**: 116681.
- [3] Liu Z, Yang W W, Zhang J R, et al. Gradient catalyst layer design for low-Pt-loading PEM fuel cell based on artificial neural network and multi-objective optimization[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, **141**: 650-664.
- [4] Yue M L, Li Z L, Roche R, et al. Degradation identification and prognostics of proton exchange membrane fuel cell under dynamic load[J]. Control Engineering Practice, 2022, **118**: 104959.
- [5] 张恒. PEMFC中耦合机械应力的传输特性多尺度多物理场研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
Zhang H. A multiscale and multiphysics study on coupled mechanical stress and transport properties of PEMFC[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021.
- [6] 王誉霖, 张晓剑, 管超, 等. 大面积质子交换膜燃料电池平行流场优化设计[J]. 工程热物理学报, 2025, **46**(3): 975-981.
Wang Y L, Zhang X J, Guan C, et al. Optimization design of flow field configuration for a large-scale hydrogen polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, **46**(3): 975-981.
- [7] Bhosale A C, Rengaswamy R. Interfacial contact resistance in polymer electrolyte membrane fuel cells: Recent developments and challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, **115**: 109351.
- [8] 李光伟, 韩雪, 邢丹敏, 等. 催化层/微孔层界面设计对PEMFC影响研究[J]. 汽车工程, 2025, **47**(1): 77-84.
Li G W, Han X, Xing D M, et al. Research on effect of catalyst layer/microporous layer interface design on the PEMFC[J]. Automotive Engineering, 2025, **47**(1): 77-84.
- [9] Qiu D K, Peng L F, Yi P Y, et al. A micro contact model for electrical contact resistance prediction between roughness surface and carbon fiber paper[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, **124**: 37-47.
- [10] Shangguan Z X, Li B, Ming P W, et al. Understanding the functions and modifications of interfaces in membrane electrode assemblies of proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, **9**(27): 15111-15139.
- [11] Chen Y C, Dörenkamp T, Csoklich C, et al. On the water transport mechanism through the microporous layers of operando polymer electrolyte fuel cells probed directly by X-ray tomographic microscopy[J]. Energy Advances, 2023, **2**(9): 1447-1463.
- [12] Prass S, Hasanpour S, Sow P K, et al. Microscale X-ray tomographic investigation of the interfacial morphology between the catalyst and micro porous layers in proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2016, **319**: 82-89.
- [13] Park J, Pasaogullari U, Bonville L J. Characterization studies of a new MEA structure for polymer electrolyte fuel cells[J]. ECS Transactions, 2015, **69**(17): 1355-1362.
- [14] Leeuwmer M J, Wilkinson D P, Gyenge E L. Novel graphene foam microporous layers for PEM fuel cells: interfacial characteristics and comparative performance[J]. Fuel Cells, 2015, **15**(6): 790-801.
- [15] Wu N R, Liu Y, Zhang S P, et al. Modulation of transport at the interface in the microporous layer for high power density proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024, **657**: 428-437.
- [16] Kang J L, Zhou Y J, Chen B H, et al. New insights of the imprint at the catalyst-layer/microporous-layer interface in PEMFC after heavy duty operation of commercial vehicles[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, **96**: 995-1005.
- [17] Zou G F, Yu Y, Chen W S, et al. Cross-scale study on water and gas transfer in proton exchange membrane fuel cell considering micro porous layer interfaces[J]. Energy Conversion and Management: X, 2025, **28**: 101255.
- [18] Zou G F, Duan K J, Chen K, et al. Mechanistic insights into interfacial water - gas transport for proton exchange membrane fuel cells: From microstructure to macroscale performance[J]. Energy Conversion and Management, 2026, **352**: 121081.
- [19] Bajpai H, Khandelwal M, Kumbur E C, et al. A computational model for assessing impact of interfacial morphology on polymer electrolyte fuel cell performance[J]. Journal of Power Sources, 2010, **195**(13): 4196-4205.
- [20] Zhang Z Y, Mao J, Wei H Y, et al. Effect of microporous layer structural parameters on heat and mass transfer in proton exchange membrane fuel cells[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, **239**: 122083.
- [21] Bao Y Y, Wang Z Z, Gan Y X. Numerical investigation of

- compressive stress and wettability effects on fluid transport in polymer electrolyte membrane fuel cell porous layers[J]. *Energy Technology*, 2022, **10**(12): 2201028.
- [22] Hizir F E, Ural S O, Kumbur E C, et al. Characterization of interfacial morphology in polymer electrolyte fuel cells: Micro-porous layer and catalyst layer surfaces[J]. *Journal of Power Sources*, 2010, **195**(11): 3463–3471.
- [23] Wang X L, Zhang H M, Zhang J L, et al. Micro-porous layer with composite carbon black for PEM fuel cells[J]. *Electrochimica Acta*, 2006, **51**(23): 4909–4915.
- [24] Zhang J, Yin G P, Wang Z B, et al. Effects of MEA preparation on the performance of a direct methanol fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, **160**(2): 1035–1040.
- [25] Kleemann J, Finsterwalder F, Tillmetz W. Characterisation of mechanical behaviour and coupled electrical properties of polymer electrolyte membrane fuel cell gas diffusion layers[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, **190**(1): 92–102.
- [26] Zhang H, Xiao L S, Chuang P A, et al. Coupled stress – strain and transport in proton exchange membrane fuel cell with metallic bipolar plates[J]. *Applied Energy*, 2019, **251**: 113316.
- [27] 周怡博. 质子交换膜燃料电池扩散层形变及其对电池传输特性和性能影响的研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- Zhou Y B. Gas diffusion layer deformation and its effect on the transport characteristics and performance of proton exchange membrane fuel cell[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [28] Kalidindi A R, Taspinar R, Litster S, et al. A two-phase model for studying the role of microporous layer and catalyst layer interface on polymer electrolyte fuel cell performance[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, **38**(22): 9297–9309.
- [29] Jin L, Wang X J, Zhu J W, et al. Sensitivity analysis of proton exchange membrane fuel cell performance to operating parameters and its applicability assessment under different conditions[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, **228**: 113727.
- [30] Sarker M, Rahman M A, Mojica F, et al. Experimental and computational study of the microporous layer and hydrophobic treatment in the gas diffusion layer of a proton exchange membrane fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, **509**: 230350.