

气体扩散层孔隙率梯度对质子交换膜燃料电池水管理的影响

程植源,周荣良,李嘉颖,纪嘉树,闫伟*

山东大学 能源与动力工程学院,山东 济南 250061

摘要:为了研究孔隙率对气体扩散层(gas diffusion layer, GDL)内水分布的影响,使用 COMSOL Multiphysics 软件构建质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)模型,以单一孔隙率为 0.4 的 GDL 为基准,设计小梯度双层、大梯度双层、4 层梯度 3 种不同 GDL 分布结构,对其极化曲线和水含量进行仿真分析。结果表明:相比基准 GDL,具有梯度结构的 GDL 可以有效防止“水淹”现象发生,并能在一定程度上提升电池性能;在平均孔隙率相同时,可以通过加大孔隙率梯度或增加孔隙率梯度分层数量来提高电池阴极侧的排水性能,从而提升电池电流密度;使用具有较大梯度分布与较多梯度分层的 GDL 能有效提升燃料电池的水管理效率和电池性能。该研究可以有效解决燃料电池的“水淹”问题。

关键词:PEMFC; GDL; 水摩尔分数; 孔隙率梯度

中图分类号:TM911.4

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)03-0041-07

引用格式:程植源,周荣良,李嘉颖,等. 气体扩散层孔隙率梯度对质子交换膜燃料电池水管理的影响[J]. 内燃机与动力装置, 2022, 39(3): 41-47.

CHENG Zhiyuan, ZHOU Rongliang, LI Jiaqi, et al. Effect of porosity gradient of gas diffusion layer on water management of PEMFC[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022, 39(3): 41-47.

0 引言

质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)具有工作温度低、零污染、无腐蚀等优点,在新能源汽车领域,特别是零排放交通运输领域一直保持相当的研究热度^[1]。膜电极(membrane electrode assembly, MEA)由质子交换膜、催化层与气体扩散层(gas diffusion layer, GDL)构成,是 PEMFC 的核心部件,其中, GDL 由多孔材料制成,具有导电性,能够收集电流、传输气体和排水^[2]。PEMFC 在运行时产生的液态水,可能会使扩散层出现“水淹”现象,阻碍气体到达反应位点,减小催化剂的有效活性面积,同时使燃料电池的活化损耗和浓差损耗增大^[3],因此,对 GDL 进行优化设计是提升 PEMFC 性能的重要途径。研究表明,孔隙率的变化对 GDL 的性能具有决定性影响。刘洪建^[4]在典型工况下研究了 GDL 在不同孔隙率下液态水的分布情况,结果表明,随着孔隙率减小,流道下方的水饱和度呈直线增长,肋下则先增大后减小;李姣等^[5]通过二维模拟研究了扩散层孔径分布的变化对电池性能的影响;何玉松等^[6]利用具有多反射固体边界的多弛豫时间格子玻尔兹曼方法模拟了微扩散层内的单相流动,并分析了孔隙率对微扩散层孔隙结构和渗透率的影响;张宁等^[7]研究了阴极扩散层孔隙率单一分布、

收稿日期:2022-01-13

基金项目:山东省重大科技创新工程项目(2020CXGC011005)

第一作者简介:程植源(1997—),男,广东中山人,硕士研究生,主要研究方向为新能源汽车技术, E-mail: 958261020@qq.com。

*通信作者简介:闫伟(1973—),男,济南人,工学博士,教授,主要研究方向为新能源汽车技术、汽车及电池热管理技术、智能驾驶与车联网技术、智能制造 4.0 技术, E-mail: 13355412608@163.com。

线性梯度分布、随机分布等情况,得出孔隙率对阴极氧气传输和水管理的影响。

GDL 作为气体和液体的传输通道,孔隙率是决定 GDL 性能的关键参数,孔隙率的变化对燃料电池的水管理具有重要影响^[8]。本文中基于 COMSOL Multiphysics 软件建立 PEMFC 三维模型,并通过改变 GDL 的梯度分布结构,研究孔隙率的梯度结构对燃料电池内部排水性能和电性能的影响。

1 模型建立

1.1 模型假设

研究时遵循以下假设:1)PEMFC 在等温、稳态下工作;2)GDL 和催化层为均质多孔介质,且不同孔隙率梯度分布的 GDL 内每层皆为均质多孔介质;3)反应气体均为理想气体;4)反应气体在流道中以层流流动^[9-11]。

1.2 几何模型

采用某燃料电池制造公司提供的几何模型,为了计算简便,选取其中 2 条具有代表性的流道进行研究。燃料电池的具体结构参数如表 1 所示,PEMFC 整体结构如图 1 所示。

表 1 燃料电池的主要参数

流道长度/mm	流道厚度/mm	流道宽度/mm	扩散层厚度/mm	催化层厚度/mm	质子交换膜厚度/mm
26	0.4	1	0.2	0.01	0.025
催化层孔隙率	扩散层孔隙率	扩散层导电率/(S·m ⁻¹)	电池电压/V	电池温度/K	
0.4	0.30/0.35/0.40/0.45/0.50	300	0.85	353.15	

1.3 控制方程

H₂ 和 O₂ 的电化学反应使 PEMFC 产生电能,常用电化学方程表达。反应过程存在电子、质子、H₂、O₂ 和水的输运过程,在电池内质量、动量、能量和组分均守恒。

质量守恒方程^[12]为:

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho)}{\partial t} + \nabla(\varepsilon\rho u) = 0, \quad (1)$$

式中: ε 为孔隙率; ρ 为各相密度,kg/m³; u 为各相速度,m/s; t 为时间,s。

动量守恒方程^[12]为:

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho\mu)}{\partial t} + \nabla(\varepsilon\rho\mu u) = -\varepsilon\nabla p + \nabla(\varepsilon\mu\nabla u) + S_N, \quad (2)$$

式中: μ 为黏度,kg/(m·s); p 为压力,Pa; S_N 为动量源项,N/m³。

能量守恒方程^[12]为:

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla(\varepsilon\rho c_p u T) = \nabla(k^{\text{eff}}\nabla T) + S_Q, \quad (3)$$

式中: c_p 为定压比热,J/(kg·K); T 为温度,K; k^{eff} 为有效导热效率,W/(m·K); S_Q 为能量源项,W/m³。

组分守恒方程^[12]为:

$$\frac{\partial(\varepsilon c_k)}{\partial t} + \nabla(\varepsilon u c_k) = \nabla(D_k^{\text{eff}}\nabla c_k) + S_k, \quad (4)$$

$$c_k = \rho x_k, \quad (5)$$

式中: c_k 为各气体组分密度,kg/m³; D_k^{eff} 为扩散系数,m²/s; S_k 为源项; x_k 为气体组分的质量分数; k 为组分,当 $k=a$ 时代表阳极, $k=c$ 时表示阴极。

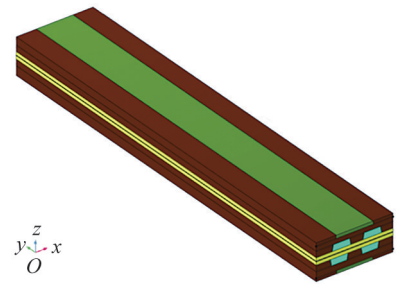


图 1 燃料电池整体结构示意图

一般使用 Butler-Volmer 方程描述催化层发生的化学反应,电化学方程^[12]为:

$$S_k = j_{k,ref} \left(\frac{C_k}{C_{k,ref}} \right)^{r_k} \left(e^{\frac{\alpha_k F}{RT} \eta_k} - e^{-\frac{\alpha_k F}{RT} \eta_k} \right), \quad (6)$$

式中: η_k 为过电位, V; r_k 为浓度指数; α_k 为传递系数; $j_{k,ref}$ 为参考交换电流密度, A/m²; C_k 为气体摩尔浓度, kmol/m³; $C_{k,ref}$ 为参考摩尔浓度, kmol/m³; $k=a$ 时, C_k 为氢气摩尔浓度, $C_{k,ref}$ 为氢气参考摩尔浓度, $k=c$ 时, C_k 为氧气摩尔浓度, $C_{k,ref}$ 为氧气参考摩尔浓度; F 为法拉第常数, C/mol; R 为气体常数, J/(mol·K)。

1.4 仿真设计与模型检验

为了探究 GDL 的孔隙率对电池排水性能的影响,首先对单一孔隙率的 GDL 进行仿真,不同电池电压和 GDL 孔隙率下对应的最大水摩尔分数和平均水摩尔分数如表 2、3 所示。由表 2、3 可知,增大孔隙率可以有效提升 GDL 的排水能力,工作电压大于 0.6 V 时,最大水摩尔分数随着孔隙率的增大而减小,即在小电流密度工况下,燃料电池反应生成水的量减少;孔隙率越大则平均水摩尔分数越小,说明增大孔隙率能有效优化扩散层内的水分布。

表 2 不同电池电压和 GDL 孔隙率对应的最大水摩尔分数

孔隙率	电压 0.5 V	电压 0.6 V	电压 0.7 V	电压 0.8 V
0.30	0.352 27	0.351 67	0.358 27	0.255 57
0.35	0.351 87	0.351 40	0.351 26	0.238 43
0.40	0.351 94	0.351 15	0.341 48	0.224 95
0.45	0.352 06	0.350 87	0.329 61	0.214 20
0.50	0.352 17	0.350 78	0.316 71	0.205 48

表 3 不同电池电压和 GDL 孔隙率对应的平均水摩尔分数

孔隙率	电压 0.5 V	电压 0.6 V	电压 0.7 V	电压 0.8 V
0.30	0.183 18	0.171 88	0.149 14	0.098 27
0.35	0.177 64	0.164 59	0.140 82	0.094 91
0.40	0.172 81	0.158 19	0.133 40	0.090 39
0.45	0.168 43	0.152 66	0.126 64	0.085 31
0.50	0.164 21	0.147 86	0.120 49	0.079 45

不同孔隙率下的电池极化曲线由图 2 所示。由图 2 可知,燃料电池的电流密度随着孔隙率的增大而增大,在大电流密度工况下尤为明显,说明增大孔隙率能有效提升燃料电池的输出功率。

根据上述可知,改变孔隙率是优化燃料电池输水性能和功率密度的重要方法。然而,孔隙率过大可能导致质子交换膜和催化层附近的水含量偏低,影响反应效率和电池寿命^[13]。为了保证电池的良好排水性能且在质子交换膜附近保证一定的水摩尔分数,应进行孔隙率梯度设计。选取单一孔隙率为 0.4 的 GDL 作为基准 GDL 进行模拟,为保证孔隙率梯度分布是唯一影响 GDL 排水性能的因素,保持平均孔隙率为 0.4,将 GDL 沿催化层到气体通道方向(称为厚度方向)进行分层,平均分为 2 层梯度或 4 层梯度结构,孔隙率沿厚度方向逐层递增,分别为:孔隙率为 0.35/0.45 的小梯度双层 GDL、孔隙率为 0.30/0.50 的大梯度双层 GDL 和孔隙率为 0.30/0.35/0.45/0.50 的 4 层 GDL,研究孔隙率梯度结构及其变化对缓解“水淹”能力的影响。

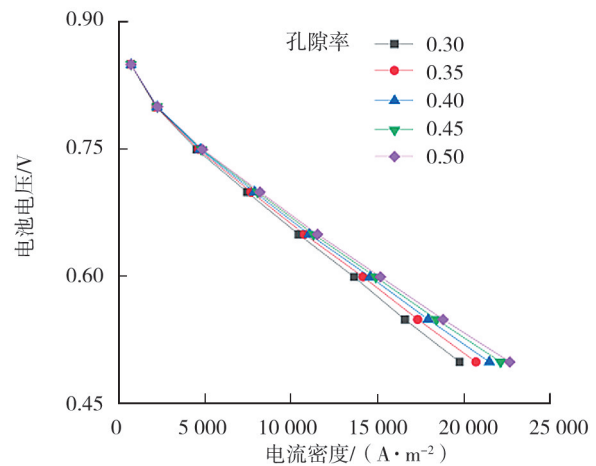


图 2 不同孔隙率下的电池极化曲线

研究分析电压为 0.50~0.85 V 时不同方案 GDL 的水摩尔分数和水分布。此外,研究采用 GDL 孔隙率结构优化后 PEMFC 的极化曲线,分析孔隙率梯度分布对电池性能的影响。

采用梯度设计后,工作电压为 0.8 V 时,水摩尔分数分布如图 3 所示。由图 3 可知:在工作电压为 0.8 V 时,采用孔隙率梯度分布的 GDL 后,扩散层内的最大水摩尔分数明显下降;相比于单一孔隙率,采用小梯度双层 GDL、大梯度双层 GDL 和 4 层 GDL 后,最大水摩尔分数分别下降了 0.04、0.07、0.07。采用进行孔隙率梯度分布设计后的 GDL 能有效地缓解“水淹”问题。这一结论与文献^[14]的试验结果一

致,仿真结果可信。

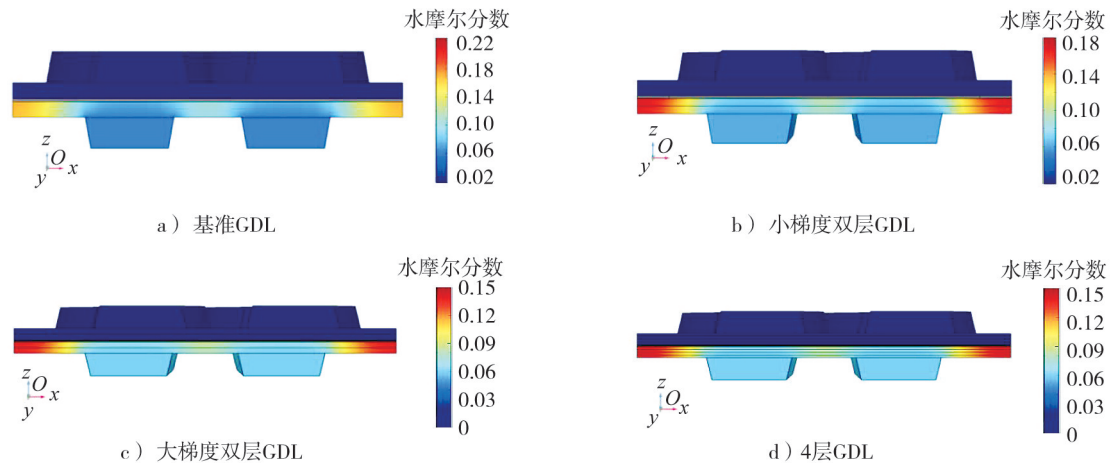


图3 电压为0.8 V时不同方案电池的水摩尔分数分布

2 模拟结果分析

2.1 电流密度

不同孔隙率分层的极化曲线如图4所示。由图4可知:相比于基准GDL,采用不同孔隙率梯度设计后,均能不同程度地提高电池的输出性能;当PEMFC处于大电流密度工况时,在相同的工作电压下,双层梯度结构GDL和4层梯度结构GDL均能使电池有更良好的电流密度输出,而4层梯度GDL和大梯度双层GDL对电流密度的提升效果近似,且两者均比小梯度双层GDL有更加优异的输出性能;当工作电压大于0.7 V时,GDL梯度结构优化对电池的输出性能影响不大。

孔隙率梯度设计优化了电池的排水能力,增大了氧气与催化层接触面积,提高了催化层内氧气的化学反应效率,电池性能得到提升;对于大电流密度工况,由于该工况更容易发生“水淹”,故双层梯度和4层梯度GDL能够更好地缓解“水淹”现象,对该工况下的电池性能有更好的提升效果。

2.2 基准GDL与小梯度双层GDL的水管理分析

采用双层孔隙率梯度设计后,不同电池电压下小梯度双层GDL与基准GDL的最大水摩尔分数和平均水摩尔分数如表4、5所示。

表4 基准和小梯度双层GDL的最大水摩尔分数

GDL	电压 0.5 V	电压 0.6 V	电压 0.7 V	电压 0.8 V
基准	0.351 94	0.351 15	0.341 48	0.224 95
小梯度双层	0.342 38	0.341 91	0.330 28	0.181 00

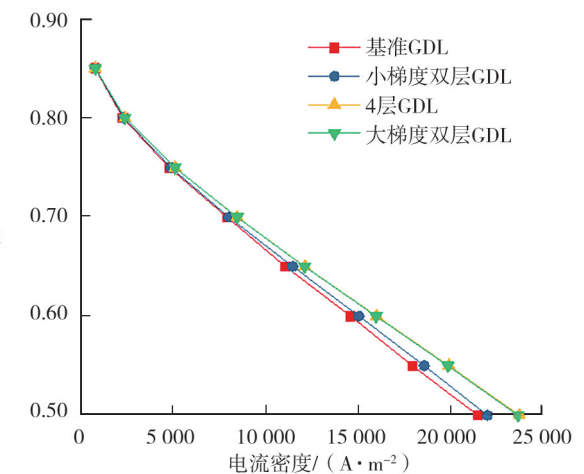


图4 不同孔隙率分层的极化曲线

表5 基准和小梯度双层GDL的平均水摩尔分数

GDL	电压 0.5 V	电压 0.6 V	电压 0.7 V	电压 0.8 V
基准	0.172 81	0.158 19	0.133 40	0.090 39
小梯度双层	0.162 50	0.148 84	0.124 67	0.083 26

由表4知:孔隙率为0.40,电压由0.8 V下降到0.7 V时,PEMFC内部的含水量明显上升,最大水摩尔分数从0.224 95上升到0.341 48;当电压由0.7 V下降到0.5 V时,最大水摩尔分数几乎没有变化;平

均孔隙率相同、电池电压为 0.8 V 时,与基准 GDL 相比,小梯度双层 GDL 的最大水摩尔分数下降到 0.181 00;GDL 在小电流密度工况下的排水性能得到改善;在大电流密度工况下,即当电池电压低于 0.7 V 时,该双层 GDL 的最大水摩尔分数与基准 GDL 相当。由此可得,小梯度双层 GDL 在小电流密度工况下具有比基准 GDL 更好的排水性能;而在电池处于大电流密度状态时,小梯底双层 GDL 对最大水摩尔分数影响不大。

由表 5 可知:采用双层 GDL 后,全工况下的平均水摩尔分数整体近似平行下降。这说明在大电流密度工况下,小梯度双层 GDL 能有效降低整体水含量,即优化了液态水在 GDL 内的分布。因此,采用具有孔隙率梯度的 GDL 对解决大电流密度工况下的“水淹”问题具有积极意义。

电池电压为 0.6 V 时,距离阴极流道入口 15 mm 处,双层梯度 GDL 与基准 GDL 的水分布云图如图 5 所示。

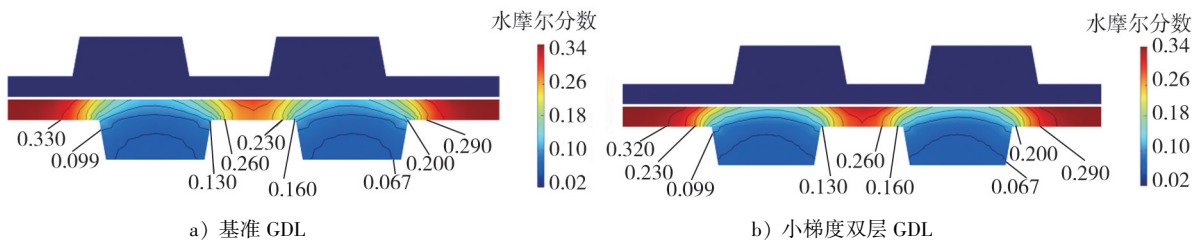


图 5 小梯度双层 GDL 与基准 GDL 的水摩尔分数分布云图

由图 5 可知:基准 GDL 和小梯度双层 GDL 的最大水摩尔分数均为 0.34,最小水摩尔分数均为 0.02;但由于靠近流道处的扩散层孔隙率较大,小梯度双层 GDL 内的水含量相对更少,水位较低,且这一现象在靠近流道处的扩散层内更为明显。

2.3 4 层梯度 GDL 的水管理分析

为进一步研究孔隙率梯度的变化对扩散层排水性能的影响,设计一种孔隙率沿厚度方向分布分别为 0.30/0.35/0.45/0.50 的 4 层 GDL,并与基准 GDL 和小梯度双层 GDL 进行比较,结果如表 6、7 所示。电池电压为 0.6 V 时,4 层梯度 GDL 水摩尔分数分布云图如图 6 所示。

表 6 基准、小梯度双层和 4 层 GDL 的最大水摩尔分数

GDL	电压 0.5 V	电压 0.6 V	电压 0.7 V	电压 0.8 V
基准	0.351 94	0.351 15	0.341 48	0.224 95
小梯度双层	0.342 38	0.341 91	0.330 28	0.181 00
4 层	0.341 92	0.341 41	0.312 64	0.150 53

表 7 基准、小梯度双层和 4 层 GDL 的平均水摩尔分数

GDL	电压 0.5 V	电压 0.6 V	电压 0.7 V	电压 0.8 V
基准	0.172 81	0.158 19	0.133 40	0.090 39
小梯度双层	0.162 50	0.148 84	0.124 67	0.083 26
4 层	0.156 92	0.141 34	0.115 89	0.077 58

由表 6、7 及图 6 可知:采用 4 层 GDL 后,PEMFC 的排水能力比采用双层梯度 GDL 时更强;电压为 0.7、0.8 V 时,4 层 GDL 的最大水摩尔分数相比于小梯度双层 GDL 分别下降了 0.017 64、0.030 47;在大电流密度工况下,4 层 GDL 的最大水摩尔分数为 0.341 92,与小梯度双层 GDL 相当;全工况下,平均水摩尔分数曲线整体近似平行下移,GDL 的整体排水能力进一步增强,大电流密度工况下的“水淹”现象得到更好的缓解,GDL 内部的水分布进一步优化;相比于基准 GDL 和小梯度双层 GDL,4 层 GDL 内的水位更低,水含量更少,水管理能力进一步提升。

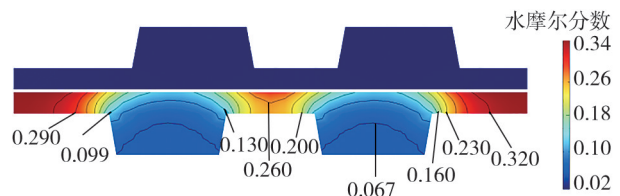


图 6 4 层梯度 GDL 水摩尔分数分布

因此,增大孔隙率梯度结构的变化可以进一步优化 GDL 的排水能力,在大电流密度工况下尤为明显。

2.4 大梯度双层 GDL 的水管理分析

不同电池电压下,基准、小梯度双层、4 层和大梯度双层 GDL 的最大水摩尔分数和平均水摩尔分数如

表 8、9 所示。

表 8 基准、小梯度双层、4 层和大梯度双层 GDL 的最大水摩尔分数

GDL	电压 0.5 V	电压 0.6 V	电压 0.7 V	电压 0.8 V
基准	0.351 94	0.351 15	0.341 48	0.224 95
小梯度双层	0.342 38	0.341 91	0.330 28	0.18100
4 层	0.341 92	0.341 41	0.312 64	0.150 53
大梯度双层	0.341 93	0.341 34	0.312 05	0.150 08

表 9 基准、小梯度双层、4 层和大梯度双层 GDL 的平均水摩尔分数

GDL	电压 0.5 V	电压 0.6 V	电压 0.7 V	电压 0.8 V
基准	0.172 81	0.158 19	0.13 340	0.090 39
小梯度双层	0.162 50	0.148 84	0.124 67	0.083 26
4 层	0.156 92	0.141 34	0.115 89	0.077 58
大梯度双层	0.156 76	0.141 22	0.115 73	0.077 50

由表 8、9 可知:大梯度双层 GDL 内的水摩尔分数与 4 层 GDL 时几乎一致,说明增大孔隙率梯度能够提升 GDL 的排水能力;增大孔隙率梯度后,工作电压为 0.8 V 时,相比基准 GDL 和小梯度双层 GDL,大梯度双层 GDL 最大水摩尔分数分别下降了 0.074 87 和 0.030 92,排水性能优化明显;另外,相比小梯度双层 GDL,大梯度双层 GDL 在电池电压为 0.7 V 时拥有更优异的排水能力,最大水摩尔分数比基准 GDL 下降了 0.029 43,而小梯度双层 GDL 仅下降了 0.011 20;大梯度双层 GDL 的排水性能与 4 层 GDL 的平均水摩尔分数几乎一致。

电压为 0.6 V 时,大梯度双层 GDL 在距离流道入口 15 mm 的水摩尔分数分布云图如图 7 所示。

由图 7 可知,电压为 0.6 V 时,大梯度双层 GDL 在距离流道入口 15 mm 的截面液面分布与 4 层 GDL 近似,均具有良好的排水能力。

因此,增大孔隙率梯度变化的剧烈程度可以进一步强化 GDL 的排水性能,且与改变梯度变化效果相当,能更好地防止“水淹”发生。

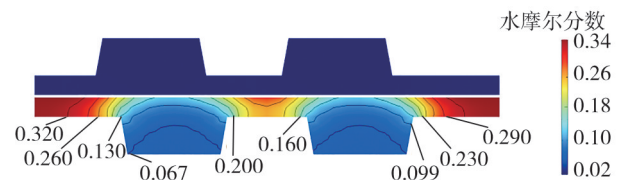


图 7 大梯度双层 GDL 水摩尔分数分布

3 结论

利用 COMSOL Multiphysics 软件构建 PEMFC 三维模型,设计了不同孔隙率梯度分布的 GDL,分析了梯度分布结构在不同工况下对电池排水能力和电池性能的影响。在保持平均孔隙率不变的情况下,对单层、双层及 4 层 GDL 进行模拟分析。

1) 孔隙率为 0.30~0.50 时,可以通过增大 GDL 的孔隙率来提升氢燃料电池的排水性能,缓解“水淹”问题,从而提升电池的输出性能,特别是在大电流密度工况下性能提升更明显。

2) 采用平均孔隙率为 0.40 的 GDL 时,通过按梯度增加扩散层层数或梯度变化提高电池的水管理能力,有效提升电池性能;因此,通过对扩散层进行合理的孔隙率梯度设计可以提升燃料电池的水管理能力和输出性能,且水管理能力和输出性能提升的趋势相同。

参考文献:

- [1] CHEN H, PEI P, SONG M. Lifetime prediction and the economic lifetime of proton exchange membrane fuel cells[J]. Applied Energy, 2015, 142: 154-163.
- [2] KANDLIKAR S G, GAROFALO M L, LU Z. Water management in apemfc: water transport mechanism and material degradation in gas diffusion layers[J]. Fuel Cells, 2011, 11(6): 814-823.
- [3] 何煜祥,陈会翠,章桐,等. 质子交换膜燃料电池微孔层 CFD 模型研究[J]. 汽车技术, 2019(1): 1-6.
- [4] 刘洪建. PEMFC 水热管理及性能优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [5] 李姣,郭航,叶芳,等. 扩散层结构对质子交换膜燃料电池性能的影响[J]. 节能, 2020, 39(4): 72-74.

- [6]何玉松,白敏丽,郝亮. 质子交换膜燃料电池微扩散层孔隙结构与渗透率的孔隙尺度模拟[J]. 上海交通大学学报, 2020,54(10):1053-1064.
- [7]张宁,张小娟. 阴极扩散层孔隙率不同分布对 PEMFC 性能的影响[J]. 电源技术,2017,41(9):1296-1298.
- [8]杨兴林,冯娟. 船用动力氢燃料电池扩散层孔隙率的仿真研究[J]. 船舶工程,2018,40(增刊1):363-367.
- [9]刘玮琳. 车用质子交换膜燃料电池瞬态响应特性研究[D]. 广州:华南理工大学,2010.
- [10]刘舜,徐洪涛,张拴羊,等. 扩散层孔隙率对 PEMFC 性能影响的模拟研究[J]. 热能动力工程,2021,36(7):122-128.
- [11]罗鑫,陈士忠,夏忠贤,等. 气体扩散层厚度对 PEMFC 性能的影响[J]. 可再生能源,2018,36(1):144-150.
- [12]弗朗诺·巴尔伯. PEM 燃料电池:理论与实践[M]. 李东红,连晓峰,译. 北京:机械工业出版社,2016:159-164.
- [13]张宁,肖金生,詹志刚,等. 扩散层孔隙率随机分布对燃料电池性能的影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2010,34(3):600-603.
- [14]詹志刚,张永生,肖金生,等. 质子交换膜燃料电池梯度扩散层水传输研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2007(9):45-48.

Effect of porosity gradient of gas diffusion layer on water management of PEMFC

CHENG Zhiyuan, ZHOU Rongliang, LI Jiaqi, JI Jiashu, YAN Wei*

School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China

Abstract: In order to study the effect of porosity on the water distribution in the gas diffusion layer (GDL), a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) model is built by COMSOL multiphysics software. The GDL in the porosity of 0.4 is taken as benchmark. Three different GDL distribution structures are designed, including two layers' GDL with low gradient and high gradient, coupling with a four layers' GDL with certain gradient. Their polarization curves and water content are simulated and analyzed. The results show that compared with the GDL of benchmark, the GDLs with gradient structure can effectively prevent "water flooding" and improve the performance of the PEMFC. With the same average porosity, the drainage performance of the cathode side of the battery can be improved by increasing the porosity gradient or the number of layers of the porosity gradient, so as to improve the current density. Using GDL with larger gradient distribution and more gradient stratification can effectively improve the water management efficiency and cell performance of fuel cells. Therefore, this research can provide a reference for solving the problem of fuel cell flooding.

Keywords: PEMFC; GDL; mole fraction of water; porosity gradient

(责任编辑:刘丽君)