

温度和阴极湿度对质子交换膜燃料电池的影响

马菁¹, 马强¹, 王俊杰¹, 郭镇松¹, 孙亚松²

(1.长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710018; 2.长安大学 能源与电气工程学院, 陕西 西安 710018)

摘 要:温度和阴极湿度直接影响质子交换膜燃料电池(PEMFC)的功率密度与内部水分布,由于二者的耦合作用,在工程实际中,PEMFC 的高效可靠运行往往需要同时考虑二者的调节关系。因此,针对这一问题,提出了工作温度与阴极湿度双参数对 PEMFC 性能的协同影响分析。文中对于逆流形式单直通道的 PEMFC,构建了三维稳态模型。通过与实验结果对比,验证了模型的正确性,并根据电压变化研究了不同组合下 PEMFC 功率密度和内部水分布特性。结果表明,在不同电压阶段,质子交换膜(PEM)对温度和阴极湿度的敏感性不同,对两者进行耦合分析,可获得较高的质子交换膜电导率和较宽的功率密度调节域。

关 键 词:质子交换膜燃料电池;工作温度;阴极湿度;电池性能;协同分析

中图分类号:TM911.4

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2023)06-1162-08

为了实现交通领域碳中和目标,发展氢能源燃料电池汽车十分必要。近年来,我国先后出台了相关政策,有力促进了以质子交换膜燃料电池汽车的快速发展^[1-2]。相比于纯电动汽车,质子交换膜燃料电池汽车以氢为“燃料”,具有续航足、加氢快、寿命长等优势,近年来受到各国的青睐^[3]。

PEMFC 作为质子交换膜燃料电池汽车的核心动力部件,具有能量转换效率高、排放零污染、耐久性强等优点^[4-5]。工作温度与进气湿度对 PEMFC 性能产生重要影响,不当的工作温度和进气湿度会造成“阳极拖干”和“阴极水淹”等问题^[6]。

为解决上述问题,国内外学者对工作温度和进气湿度开展了相关研究。樊林浩等^[7]通过构建三维模型发现:在阳极低加湿的工况下,逆流进气比顺流进气更有利于提升电池性能。Xing 等^[8]研究发现适当提升阴极侧的工作温度,会提高 PEM 的电导率、提升还原反应动力学速率,从而提升电池性能。陆佳斌等^[9]采用实验与仿真相结合的手段,研究了阴极湿度对电池性能的影响,结果表明:增大电流密度、降低阴极湿度,可提升电池性能;此外电池反应

产生的水会优先补充到 PEM 中,当 PEM 的含水量达到工作阈值后,反应生成的水会进入扩散层,使扩散层内液态水饱和度增加。蒋杨等^[10]构建了一维 PEMFC 模型,发现采用阳极充分加湿或阴极低加湿的方式,可有效降低“阳极拖干”和“阴极水淹”的风险,改善电池内部受热情况。但是,在实际运行中,PEMFC 处于多参数动态变化过程。目前研究大多集中于分析单一参数变化对 PEMFC 性能的影响^[11-16],关于多参数变化对 PEMFC 性能的影响研究相对较少。

本文通过耦合分析工作温度与阴极湿度 2 个参数对不同电位下电池输出性能和水分布的影响,得到在不同电压阶段下,电池对温湿度的敏感性影响,为电池的实际运行策略提供参考。

1 物理模型和几何参数

1.1 PEMFC 物理模型

本文以逆流形式^[17]的单直通道的 PEMFC 为研究

收稿日期:2022-11-25

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51976014)、陕西省重点研发计划(2020GY-200)与西安市科技计划项目(2022JH-GXQY-0074)资助

作者简介:马菁(1986—),长安大学副教授,主要从事车载燃料电池动力系统研究。

通信作者:孙亚松(1986—),长安大学教授,主要从事氢燃料电池水热管理研究。e-mail:sunyasong@chd.edu.cn

对象,探究工作温度与阴极湿度对电池性能的影响。采用 Nafion112 质子交换膜,催化剂为铂金属,催化层铂碳质量比为 20%,扩散层孔材料为碳。图 1 为单体 PEMFC 的几何模型,具体几何参数见表 1。

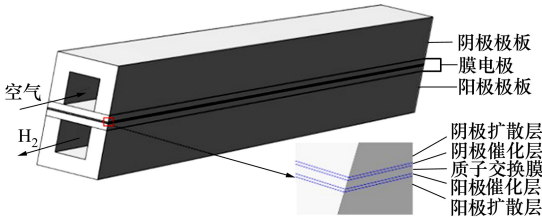


图 1 PEMFC 几何模型

表 1 PEMFC 几何参数

组成部件	长/mm	宽/mm	高/mm
质子交换膜	30	2	0.03
阴/阳极催化层	30	2	0.01
阴/阳极扩散层	30	2	0.20
阴/阳极流道	30	1	1.00
阴/阳极极板	30	2	1.50

1.2 PEMFC 数值模型

为防止出现“阳极拖干”,阳极进气湿度假定为 100%^[10]。在保证各项传输与反应合理的前提下,对数值模型做出如下假设:

- 1) 工作压力为常压,混合气体遵守理想气体状态方程^[18];
- 2) 在稳态条件下运行;
- 3) 由于电池内部流速较低,为层流流动^[19];
- 4) 气体扩散层和催化剂层均为各向同性、均质、不可压缩的多孔材料^[20];
- 5) PEM 不允许气体通过^[21];
- 6) 不考虑流道内液态水传输。

基于上述假设,建立 PEMFC 的三维数学模型。连续方程^[20-21]

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho \mathbf{u}) = S_m \quad (1)$$

式中: ρ 为混合气体密度, kg/m^3 ; ε 为多孔介质孔隙率; $\mathbf{u}$ 为速度场, m/s ; S_m 为质量源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

动量守恒方程^[8,11]

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\varepsilon \nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon \mu \nabla \mathbf{u}) + S_u \quad (2)$$

式中: μ 为混合物的动力黏度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; S_u 为动量源项, $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}$ 。

能量守恒方程^[21]

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho c_p \mathbf{u} T) = \nabla \cdot (k^{\text{eff}} \nabla T) + S_Q \quad (3)$$

式中: c_p 为气体比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为温度, K ; k^{eff} 为有效导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; S_Q 为能量源项, W/m^3 。

组分守恒方程^[9,14]

$$\nabla \cdot (\varepsilon u c_k) = \nabla \cdot (D_k^{\text{eff}} \nabla c_k) + S_k \quad (4)$$

式中,下标 k 为气体组分 H_2 、 O_2 、 H_2O 和 N_2 ; c_k 为组分浓度, mol/m^3 ; D_k^{eff} 为有效扩散系数; S_k 为组分源项, $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

电荷守恒方程^[8]

$$\nabla \cdot (\sigma_s^{\text{eff}} \nabla \phi_s) = i_s \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_m^{\text{eff}} \nabla \phi_m) = i_m \quad (6)$$

式中: σ_s^{eff} 和 σ_m^{eff} 为固相和膜相有效电导率, S/m ; ϕ_s 和 ϕ_m 分别为固相和膜相电势, V ; i_s 和 i_m 分别为电子流和质子流源项, A/m^3 。

电化学动力学守恒方程^[19]

$$i_a = \alpha_a i_a^{\text{ref}} \left[\frac{(1-s) \varepsilon c_{\text{H}_2}}{c_{\text{H}_2}^{\text{ref}}} \right]^{0.5} \cdot \left[\exp\left(\frac{-\beta_a F \eta_a}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-\beta_c F \eta_a}{RT}\right) \right] \quad (7)$$

$$i_c = \alpha_c i_c^{\text{ref}} \left[\frac{(1-s) \varepsilon c_{\text{O}_2}}{c_{\text{O}_2}^{\text{ref}}} \right]^{0.5} \cdot \left[\exp\left(\frac{-\beta_a F \eta_c}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-\beta_c F \eta_c}{RT}\right) \right] \quad (8)$$

式中: a 为单位体积内电催化表面积, m^{-1} ; i_a^{ref} 为参考电流密度, A/m^3 ; β 为传递系数; η 为过电位, V ; $c_{\text{H}_2}^{\text{ref}}$ 和 $c_{\text{O}_2}^{\text{ref}}$ 为氢气和氧气参考浓度, mol/m^3 ; s 为液态水饱和度和。

液态水传输方程^[8]

$$\nabla \cdot \left(\rho_w^l D_c \nabla s - \frac{\rho_w^l k_r^l \mu_w^g \mathbf{u}_g}{k_r^g \mu_w^l} \right) = M_w S_w^l \quad (9)$$

式中: ρ_w^l 为液态水密度, kg/m^3 ; D_c 为毛细管扩散系数; k_r^l 和 k_r^g 分别为液态水和气态水相对渗透率, m^2 ; μ_w^l 和 μ_w^g 分别为液态水和气态水的动力黏度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; M_w 为水的分子质量, kg/mol ; S_w^l 为液态水向气态水及溶解水转化的源项, $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

溶解水传输方程^[8]

$$\nabla \cdot \left(n_d \frac{i_M}{F} \right) - \nabla \cdot (D_{w-M} \nabla c_w^d) - \nabla \cdot \left(\frac{k_{p,M} c_w^d \nabla p}{\mu_w} \right) = S_w^d \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{M_{\text{pem}}}{\rho_{\text{mem}}} c_w^d \tag{11}$$

$$\sigma_m = (0.513\ 9\lambda - 0.326) \cdot \exp\left[1\ 268\left(\frac{1}{303.15} - \frac{1}{T}\right)\right] \tag{12}$$

式中： n_d 为电渗系数； i_M 为团聚体体积分(膜内 $i_M = 1$ ，催化层内 $i_M = 0.2$)； c_w^d 为溶解水浓度， mol/m^3 ； D_{W-M} 为膜中水扩散系数； $k_{p,M}$ 为水在膜中的渗透率， m^2 ； S_w^d 为溶解水源项， $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ； λ 为 PEM 含水量； σ_m 为 PEM 电导率， S/m ； M_{pem} 为 PEM 摩尔质量， kg/mol ； ρ_{mem} 为 PEM 密度， kg/m^3 。

有关数值模型的边界条件为：

阴阳极两侧流道入口为气体入口，其入口质量流量定义为^[10]

$$m_a = \frac{I_{\text{ref}} \rho_g^a R_a A}{2 F c_{\text{H}_2}} \tag{13}$$

$$m_c = \frac{I_{\text{ref}} \rho_g^c R_c A}{2 F c_{\text{O}_2}} \tag{14}$$

式中： I_{ref} 为参考电流密度， A/m^2 ； ρ_g^a 和 ρ_g^c 分别代表阳极和阴极混合气密度， kg/m^3 ； R_a 和 R_c 分别为阳极和阴极入口混合气的化学计量比； A 为燃料电池的活化面积， m^2 ； $c_{\text{H}_2,\text{in}}$ 和 $c_{\text{O}_2,\text{in}}$ 分别为流道入口氢气和氧气的摩尔浓度， mol/m^3 ，可以通过 (15) ~ (16) 式求得^[10]

$$c_{\text{H}_2,\text{in}} = \frac{p_g^a - R_{\text{H},a} p_{\text{sat}}}{R T_0} \tag{15}$$

$$c_{\text{O}_2,\text{in}} = \frac{p_g^c - R_{\text{H},c} p_{\text{sat}}}{R T_0} \tag{16}$$

式中： p_g^a 和 p_g^c 分别为阳极和阴极入口处混合气压力， kPa ； $R_{\text{H},a}$ 和 $R_{\text{H},c}$ 分别为阳极与阴极入口湿度； p_{sat} 为水蒸气的饱和蒸汽压，是压力和温度的函数； T_0 为入口处温度， K 。此外，阴阳两极出口压力为常压条件。

上述数值模型的具体参数见表 2。

表 2 数值模型的参数

参数	数值	参数	数值
扩散层孔隙率	0.6	催化层孔隙率	0.5
扩散层渗透率/ m^2	6.2×10^{-12}	催化层渗透率/ m^2	6.2×10^{-13}
扩散层接触角/ $(^\circ)$	100	催化层接触角/ $(^\circ)$	100
扩散层电导率/ $(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	300	催化层电导率/ $(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	300
H_2 参考浓度/ $(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	40.88	O_2 参考浓度/ $(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	40.88
阳极催化层比表面积/ m^{-1}	100 000	阴极催化层比表面积/ m^{-1}	100 000
阳极化学计量	1.2	阴极化学计量	2.0
阳极压力/ Pa	101 325	阴极压力/ Pa	101 325
PEM 等效摩尔质量/ $(\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1})$	1.1	PEM 密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 980
阳极传递系数	0.5	阴极传递系数	0.7
阳极铂载量/ $(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2})$	0.1	阴极铂载量/ $(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2})$	0.4

1.3 正交设计方案

由于 PEMFC 常见工作温度范围为 $60 \sim 80^\circ\text{C}$ ，且阴极进气加湿不宜超过 100%。本文选取 3 种工作温度 ($60, 70, 80^\circ\text{C}$) 和 3 种阴极湿度 ($40\%, 70\%, 100\%$) 进行正交研究，具体组合方案见表 3。

表 3 正交设计方案

阴极湿度/%	工作温度/ $^\circ\text{C}$		
	60	70	80
40	A1	A2	A3
70	B1	B2	B3
100	C1	C2	C3

2 结果与讨论

2.1 网格无关性分析与有效性验证

为了验证仿真模型的正确性，将 C3 组合下的电池极化曲线的仿真与实验结果^[22] 进行对比。实验中，使用的质子交换膜型号为 Nafion112，有效面积为 $1.0\ \text{cm} \times 1.0\ \text{cm}$ ，阳极铂载量为 $0.1\ \text{mg}/\text{cm}^2$ ，阴极铂载量为 $0.4\ \text{mg}/\text{cm}^2$ ，铂碳质量比为 20%，阴阳极化学计量比分别为 2.0, 1.2，工作温度为 80°C ，阴阳极湿度均为 100%，工作压力为 101.325 kPa。从图 2 可以看出，两者结果吻合良好，它们之间的积分相对误差为 4.07%。并且，两者之间的最大误差出

现在电压为 0.45 V 时,此时,两者之间的相对误差为 6.74%。

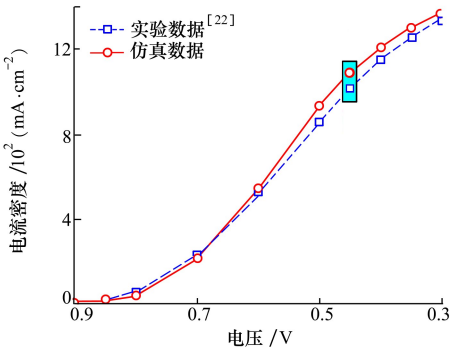


图 2 仿真模型验证

表 4 给出了 0.5 V 电压、80℃工作温度、100%阴极湿度条件下,电池的电流密度。从表中可以看出,随着网格数的增加,电流密度区域稳定。当网格数大于 78 960,网格数对计算结果影响较小;且与网格数为 157 920 的电流密度值相比,它们之间的相对误差小于 0.002%。综合计算精度和计算效率,在后续研究中,选取网格数 78 960。

表 4 不同网格数下的电流密度

网格数	20 160	39 480	78 960	131 600	157 920
电流密度/ (mA · cm ⁻²)	942.91	940.45	934.12	934.13	934.13

2.2 反应物浓度分布

图 3~4 分别给出了 C3 组合下,0.5 V 电压时,PEMFC 内部氧气与氢气的分布图。

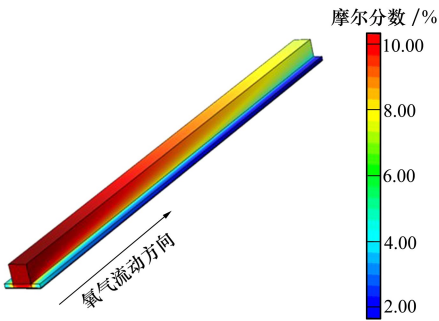


图 3 氧气摩尔分数分布

从图 3 可以看出,在燃料电池内部多孔区域中,氧气沿着流动方向逐渐被消耗,其浓度分布呈阶梯降低趋势;在阴极肋板下多孔区域的边界处氧气浓度分布较低,最小值约为 0.18%。从图 4 中可以看

出,阳极侧氢气浓度分布较为均匀,这保证了阳极侧催化层充分的氢氧化反应;此外,在 100%阳极加湿的条件下,电池阳极侧水相摩尔分数维持在 50%附近,避免了“阳极拖干”现象。

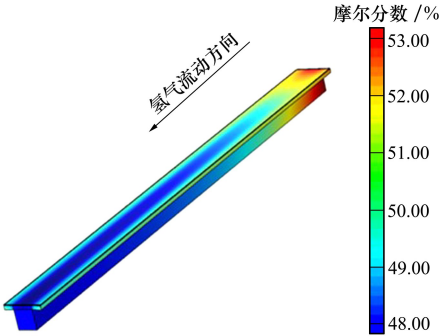


图 4 氢气摩尔分数分布

2.3 PEM 电导率与含水量

PEM 电导率是影响电池欧姆损失的关键因素;含水量可以反映出 PEM 内部湿润程度,对 PEM 寿命具有重要影响。图 5~6 分别表示 PEM 含水量和电导率与电压的关系曲线。为了更好分析 9 组电池的性能,根据电压变化分为高电位(0.9~0.7 V 电压)、中电位(0.7~0.5 V 电压)和低电位(0.5~0.3 V 电压)3 个阶段。

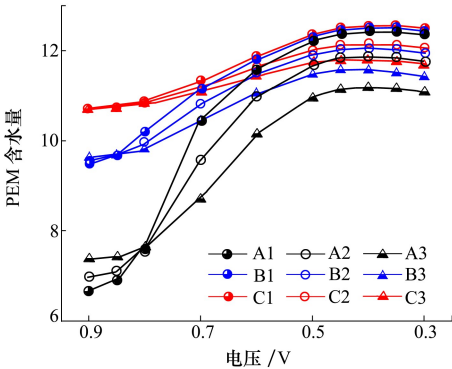


图 5 PEM 含水量与电压关系

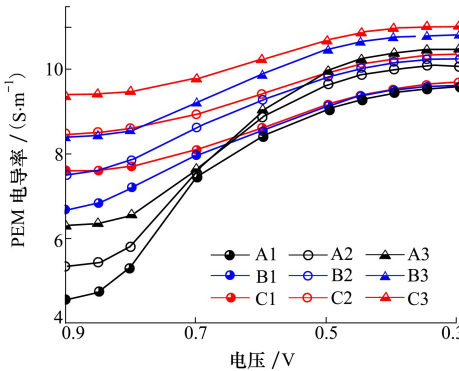


图 6 PEM 电导率与电压关系

从图 5 可以看出,随着电压的降低,温度越高 PEM 含水量越低,阴极湿度越高 PEM 含水量越高。在高电位阶段,阴极湿度对 PEM 含水量影响最为明显。这是由于在高电位阶段,电化学反应速率较慢,电渗拖拽作用并不显著,此时压差扩散是影响 PEM 含水量的主要因素。因此,在高电位阶段,阴极湿度对 PEM 含水量影响最显著。在中电位阶段,随着电压的降低,PEM 逐渐湿润,阴极湿度对 PEM 含水量的影响逐渐削弱。在低电位阶段,各组电池的 PEM 内部含水量逐步趋于稳定。

图 6 表明,温度越高,PEM 电导率越大;阴极湿度越大,PEM 电导率越大。在高电位阶段,与温度相比,湿度对 PEM 电导率的影响更显著。而在低电位阶段,电导率几乎不受湿度影响。这是含水量逐渐饱和导致的结果。

相比单一改变温度或湿度,同时调节温度和阴极湿度可以使电池在各工作点有更小的欧姆内阻。在高电位阶段,采用“阴极高加湿”方案,可以使 PEM 含水量与电导率保持在较高的值;在中电位阶段,由于 PEM 逐渐湿润,可以逐步降低阴极加湿度保证多孔域的透气性;在低电位阶段,由于 PEM 含水量已经达到饱和,此时采用“阴极高温”可以使得 PEM 电导率更高,并且同时采用“阴极低加湿”,可有效缓解阴极多孔区域“水淹”现象。

为了更加直观地描述 PEM 含水量分布规律,图 7 给出了在 0.5 V 电压下,9 组 PEM 电池的含水量。A1 电池(60℃、40% 阴极湿度)和 A2 电池(70℃、40% 阴极湿度)内部含水量最大差值为 0.31 和 0.59,与之相比,A3 电池(80℃、40% 阴极湿度)内部含水量的最大差值为 0.80。这容易导致 PEM 内部容易出现局部皱缩甚至脱水的现象,增加电池的欧姆损耗,并降低电池的耐久性。结合 B3(80℃、70% 阴极

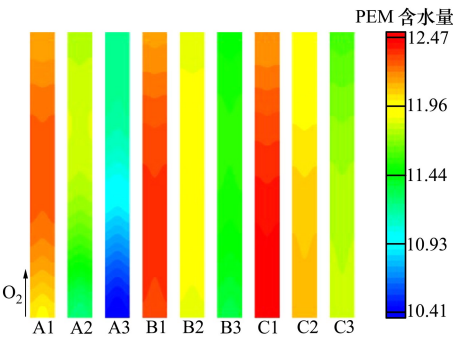


图 7 0.5 V 电压下 PEM 含水量

湿度)和 C3(80℃、100% 阴极湿度)电池含水量分布发现,当工作温度较高时,采用较高的阴极湿度,可以有效避免 PEM 局部含水量偏低的现象。

2.4 阴极扩散层液态水饱和度

在高电位阶段,电池内部反应速率较慢,多孔区域发生“水淹”的风险较低。并且,电池反应产生的水会优先补充到 PEM 中,当 PEM 含水量达到工作阈值后,反应生成的水会进入扩散层,增加扩散层液态水的饱和度。因此,为分析电池内部多孔区域液态水分布对电池性能的影响,图 8 和图 9 分别给出了在 0.5 V 电压下,阴极扩散层的液态水饱和度分布以及对应的阴极催化层与扩散层交界面处的电流密度。

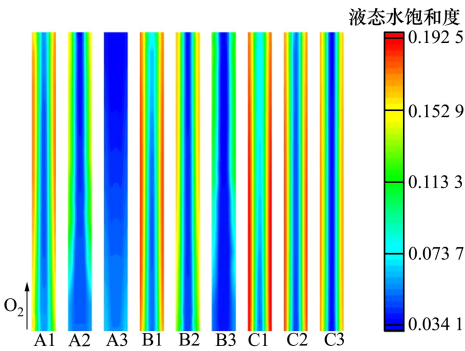


图 8 阴极扩散层液态水饱和度

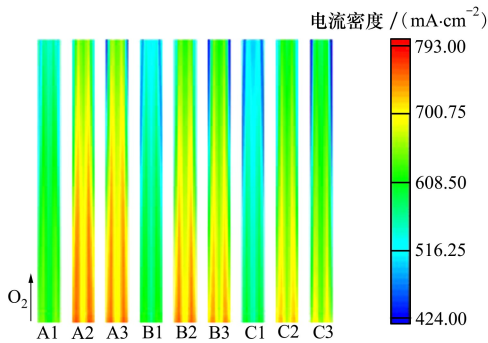


图 9 阴极催化层与扩散层交界面电流密度

从图 8 可以看出,A3 电池扩散层流道下方与肋板(极板与多孔区域接触部分)下方的液态水饱和度分布最为均匀,最大差值仅为 0.06,这有效保障了氧气在整个扩散层的均匀、稳定传质。其余 8 组电池内部水含量最大值均超过 0.10,在流道下方与肋板下方区域内液态水饱和度存在明显的断层,扩散层内部流动不稳定,部分液态水无法被及时送入流道,导致肋板下方区域氧气的传质阻力增大。

对比图 8 和图 9,可以发现随着阴极湿度的增大,电池肋板下方扩散层液态水饱和度逐渐提升,导致这部分区域氧气传输受阻严重,反应物得不到及时补充,电化学反应变缓,阻碍电池性能提升。在 9 组电池中,A2 和 A3 电池具有更高电流密度。

总的来看,阴极湿度越低,扩散层液态水饱和度分布更加均衡。在中低电位阶段,采用较低的阴极湿度可以有效减少多孔区域液态水含量,降低“水淹”风险,利于提升电池电流密度。另外,温度的提升也会使液态水饱和度下降,提升电池的输出性能。

2.5 功率密度

功率密度可以直观反映燃料电池的输出性能,图 10 给出了 9 组电池的电压与功率密度变化曲线。从图中可以看出:在高电位阶段,9 组电池电化学反应速率均较低,其功率密度相差不大。在中电位阶段,A2 电池(70℃ 工作温度、40%阴极湿度)的功率密度最大。这是由于经过高电位阶段,电池内部逐渐湿润,PEM 含水量与电导率迅速上升,电池内部反应速率增大,产水量相应增加。结合图 8 可以看出,高阴极湿度会使电池内部积水过多而堵塞多孔区域,进而阻碍氧气的传输,导致电池功率密度下降。此外,较高的温度会制约阴极入口处氧气的比重,导致催化层表面缺氧,同样降低了电池的输出性能。在低电位阶段,虽然阴极侧反应速率进一步提高,产水量更多,但由于电池内部温度逐步上升,0.5 V 时 A2、A3、B2 和 B3 电池内部液态水所占的比重更少,氧气的传质过程不会受到阻碍。此外,由图 5 可知,电压低于 0.5 V 时,PEM 含水量已经达到饱和,低电位阶段随着电压的降低,电池内部“水淹”会加剧。因此,中低湿度与中高温组合的这 4 组电池在低电位阶段展现出更好的性能。

从整个过程来看,温度维持在 60℃,单一地改变电池阴极湿度无法使电池的功率密度有较大提升;同样湿度维持在 70%,单一调节电池工作温度,

电池的功率密度也并不是在每个电压下都能达到 9 组电池中的最大值。因此,单一地改变温度或湿度对提高电池输出性能具有一定的局限性。同时调节温度和阴极湿度,可以在不同电压下,获得更宽的电池功率密度调节范围。

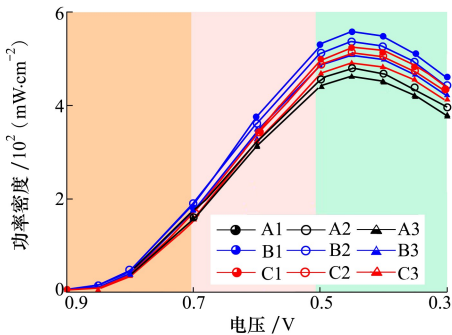


图 10 电压与功率密度变化图

3 结 论

本文构建了逆流形式的单直通道 PEMFC 三维模型,分析了工作温度和阴极湿度对电池性能及内部水分布和水含量的协同影响,结论如下:

- 1) 高中电位阶段,相比温度的变化,调节湿度对于 PEM 特性的影响更显著,低电位阶段 PEM 特性对温度更敏感;
- 2) 从电池寿命角度考虑,中低电位阶段,在较高的工作温度下,适当增加电池的阴极湿度,可防止 PEM 靠近流道入口处局部干燥,延长电池寿命。
- 3) 液态水多分布于肋板下方多孔区域,这部分区域易发生“水淹”,致使电池局部电流密度偏低;
- 4) 从电池输出性能的角度考虑,相比单独改变燃料电池工作温度或阴极湿度,协同改变两参数可获得更宽的电池功率密度的调节域。随着电压降低,适当提高工作温度并降低阴极湿度,可有效提升电池功率密度,且可在一定程度上改善多孔区域内水分布特性。

参考文献:

[1] 李建林,李光辉,郭丽军,等. “十四五”规划下氢能应用技术现状综述及前景展望[J]. 电气应用, 2021, 40(6): 10-16
LI Jianlin, LI Guanghui, GUO Lijun, et al. Overview and prospect of hydrogen energy application technology under the 14th five year plan[J]. Electrotechnical Application, 2021, 40(6): 10-16 (in Chinese)

[2] 马建,刘晓东,陈轶嵩,等. 中国新能源汽车产业与技术发展现状及对策[J]. 中国公路学报, 2018, 31(8): 1-19
MA Jian, LIU Xiaodong, CHEN Yisong, et al. Current status and countermeasures for China's new energy automobile industry

- and technology development[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(8): 1-19 (in Chinese)
- [3] DJILALI N. Computational modelling of polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells: challenges and opportunities[J]. Energy, 2006, 32(4): 269-280
- [4] ALI A S, EBRAHIM A, ELNAZ Z, et al. Three-dimensional simulation of different flow fields of proton exchange membrane fuel cell using a multi-phase coupled model with cooling channel[J]. Energy, 2021, 234: 121247
- [5] TURKMEN A C, CELIK C. The effect of different gas diffusion layer porosity on proton exchange membrane fuel cells[J]. Fuel, 2018, 222: 465-474
- [6] FARCAS A C. A Proposed control technique for water management in proton exchange membrane fuel cells[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2776: 145-152
- [7] 樊林浩, 张国宾, 焦魁. 高电流、低加湿工况下 PEMFC 的性能研究[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(4): 870-876
FAN Linhao, ZHANG Guobin, JIAO Kui. Investigations on PEMFC performance under high current density and low humidification[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(4): 870-876 (in Chinese)
- [8] XING L, LIU X T, ALAJE T, et al. A two-phase flow and non-isothermal agglomerate model for a proton exchange membrane (PEM) fuel cell[J]. Energy, 2014, 73: 618-634
- [9] 陆佳斌, 申欣明, 陈明, 等. 阴极湿度与电流密度对 PEMFC 性能的协同影响[J]. 电源技术, 2021, 45(8): 1018-1022
LU Jiabin, SHEN Xinming, CHEN Ming, et al. Synergistic effect of cathode humidity and current density on performance of PEMFC[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(8): 1018-1022 (in Chinese)
- [10] 蒋杨, 焦魁. 质子交换膜燃料电池建模及水热传输特性分析[J]. 热科学与技术, 2019, 18(3): 200-205
JIANG Yang, JIAO Kui. Modeling and analysis of water and heat transfer characteristics of proton exchange membrane fuel cell [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2019, 18(3): 200-205 (in Chinese)
- [11] LU J B, WEI G H, ZHU F J, et al. Pressure effect on the PEMFC performance[J]. Fuel Cells, 2019, 19(3): 211-220
- [12] SHEN J, ZENG L P, TU Z K, et al. Numerical investigation of temperature distribution of proton exchange membrane fuel cells at high current density[J]. Journal of Porous Media, 2019, 22(7): 813-829
- [13] LIU Y F, GAO J H, PEI P C, et al. Effects of dynamic changes in inlet temperature on proton exchange membrane fuel cell[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2019, 11(4): 044302
- [14] YANG T F, SHEU B H, GHALAMBAZ M, et al. Effects of operating parameters and load mode on dynamic cell performance of proton exchange membrane fuel cell[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 45(2): 2474-2487
- [15] WEI G H, LU J B, ZHANG Q L, et al. Analyze the effects of flow mode and humidity on PEMFC performance by equivalent membrane conductivity[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(9): 4592-4605
- [16] RAJ A, SHAMIM T. Investigation of the effect of multidimensionality in PEM fuel cells[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 86: 443-452
- [17] 王世学, 齐贺, 李桦. 一种新型进气方式对燃料电池水管理效果的影响[J]. 热科学与技术, 2013, 12(4): 354-359
WANG Shixue, QI He, LI Hua. Influence on water management using new inlet gas humidification design for PEFC[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2013, 12(4): 354-359 (in Chinese)
- [18] 高强, 张拴羊, 徐洪涛, 等. 肋片结构对质子交换膜燃料电池性能影响模拟研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(7): 215-222
GAO Qiang, ZHANG Shuanyang, XU Hongtao, et al. Simulation study on the effect of fin structure on the performance of proton exchange membrane fuel cell[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(7): 215-222 (in Chinese)
- [19] ZHANG G B, JIAO K. Three-dimensional multi-phase simulation of PEMFC at high current density utilizing eulerian-eulerian model and two-fluid model[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 176: 409-421
- [20] HU G L, LI G N, ZHENG Y Q, et al. Optimization and parametric analysis of PEMFC based on an agglomerate model for catalyst layer[J]. Journal of the Energy Institute, 2014, 87(2): 163-174
- [21] LIU H J. Research on liquid water distribution in PEMFC cathode porous media[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2020, 15(7): 6717-6736
- [22] XING L, CAI Q, LIU X T, et al. Anode partial flooding modelling of proton exchange membrane fuel cells: optimization of electrode properties and channel geometries[J]. Chemical Engineering Science, 2016, 146: 88-103

Effects of temperature and cathode humidity on performance of PEM full cell

MA Jing¹, MA Qiang¹, WANG Junjie¹, GUO Zhensong¹, SUN Yasong²
(1.School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710018, China;
2.School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710018, China)

Abstract: The performance of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) is significantly influenced by their temperature and cathode humidity, as they affect power density and internal water distribution. The interdependent nature of these two parameters necessitates their simultaneous consideration in practical engineering to achieve high efficiency and reliable PEMFC operation. Therefore, this study proposes a synergistic analysis of the dual-parameter effect of working temperature and cathode humidity on PEMFC performance, using a three-dimensional steady-state model for counter-flow single-channel PEMFCs. The model's correctness is verified through comparison with experimental results, and the resulting power density and internal water distribution characteristics of PEMFCs are studied based on voltage changes. The findings indicate that the sensitivity of the proton exchange membrane (PEM) to temperature and cathode humidity varies at different voltage stages. Coupling analysis of these two factors enhances proton exchange membrane conductivity and expands the range of power density adjustment. Consequently, this study provides crucial insights into the interplay between temperature and cathode humidity in PEMFCs, facilitating the design and optimization of PEMFC systems for practical engineering applications.

Keywords: proton exchange membrane fuel cell; operating temperature; cathode humidity; battery performance; synergistic analysis

引用格式:马菁, 马强, 王俊杰, 等. 温度和阴极湿度对质子交换膜燃料电池的影响[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(6): 1162-1169

MA Jing, MA Qiang, WANG Junjie, et al. Effects of temperature and cathode humidity on performance of PEM full cell [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(6): 1162-1169 (in Chinese)