

研究论文

PEMFC 中粗糙 GDL 表面对液态水在 GC 中 传输过程的影响

陈 黎, 栾辉宝, 陶文铨

(西安交通大学能源与动力工程学院, 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 采用商业软件 FLUENT 中 VOF 模型模拟了质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 中液态水在具有粗糙气体扩散层 (GDL) 表面的气体通道 (GC) 中的传递过程。考察了 GDL 表面润湿特性和粗糙度对液态水传输过程的影响。研究表明: 和亲水 GDL 表面相比, 疏水 GDL 表面有利于液态水的排出; 和光滑疏水 GDL 表面相比, 粗糙疏水 GDL 表面加快了液滴的排出, 减小了液滴覆盖 GDL 表面的面积; 同时, 粗糙 GDL 表面增加了 GC 中的压降。

关键词: 气体微通道; 气体扩散层; 液态水; VOF; 粗糙度; PEMFC

中图分类号: TM 911.4

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2011) 03-0643-09

Liquid water transport behaviors in micro PEMFC gas channels with rough gas diffusion layer surface

CHEN Li, LUAN Huibao, TAO Wenquan

(School of Energy & Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: This paper aims at investigating the effect of the rough gas diffusion layer (GDL) on liquid water transport behaviors in gas channels (GCs) employing the volume of fluid (VOF) in the commercial CFD package, FLUENT 6.3.26. It is found that the liquid water on the hydrophilic rough GDL tends to spread along the corner and presents as a water film with the concave surface, with many holes in the GDL covered by the liquid water, whereas the liquid water on hydrophobic rough GDL presents as the water droplet which covers less holes and can be easily drained out of the GC, indicating that a hydrophobic GDL surface is desirable in PEMFCs. Simulations then focus on investigating the effects of the rough hydrophobic GDL on the liquid water transport behaviors in GCs. The simulation results show that the droplet is inclined to form the Cassie droplet on the rough GDL surface. The water droplet is easier to be drained out of the GC with the rough GDL surface. The water coverage ratio for the cases with the rough GDL surfaces is lower than that with the smooth GDL surface. The higher the roughness is, the less the GDL surface is covered by water. The pressure drop in the GCs increases with the increase of GDL surface roughness.

Key words: micro gas channel; gas diffusion layer; liquid water; volume of fluid; roughness; PEMFC

2010-06-07 收到初稿, 2010-09-25 收到修改稿。

联系人及第一作者: 陈黎 (1985—), 男, 硕士。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50636050)。

Received date: 2010-06-07.

Corresponding author: CHEN Li, xiaochu 916 @ stu. xjtu. edu. cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50636050).

引 言

在质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 阴极催化层中 (CL), 氧气、质子以及电子发生电化学反应生成水。生成的液态水通过气体扩散层 (GDL) 到达气体通道 (GC), 最终被排出电池。如果不能及时有效地排出电池, 液态水会淹没 CL 表面, 导致电化学反应面积减小; 液态水会堵塞 GDL 孔隙, 阻碍反应气体通过 GDL 到达 CL; 液态水还会堵塞 GC, 导致反应气体分配不均, 增加 GC 中的压降。从而发生所谓的水淹现象, 导致电池性能降低^[1-2]。因此, 研究液态水在 CL、GDL 和 GC 中的传递过程非常重要。

在过去的几十年内, 众多研究者通过实验和数值模拟研究了液态水在 GC 中的传递过程。与局限于空间和时间分辨率的实验相比, 数值模拟能够详细定量地描述液态水在 GC 中的传递过程^[3-6]。文献中报道了许多基于不同理论和假设的数值模拟模型^[7-10]。近来, 由于能够追踪气液界面和考虑 GC 壁面润湿特性的影响, VOF 方法被用来研究液态水在 GC 中的动态传递过程。Cai 等^[6]采用 VOF 研究了 GC 润湿特性对电池性能的影响。他们发现具有亲水特性的 GC 壁面和具有疏水特性的 GDL 表面有利于液态水的排出和反应气体的传递。采用 VOF 方法, Zhou 等^[11-13]研究了不同形状 GC 中液态水的传递过程。Djilali 等^[3-4]研究了 GDL 表面接触角、进口空气速度等参数对液滴在 GC 中运动的

影响。这些研究工作有助于深刻理解液态水在 GC 中的传递过程。

然而, 上述文献都未考虑 GDL 粗糙表面对液态水在 GC 中传递过程的影响。图 1 显示了 GDL 表面的电镜扫描图, 从图中可以看出, GDL 结构非常复杂, 孔隙区分布不均, GDL 表面十分粗糙。在微尺度 GC 中, 和其他作用力相比, 表面张力对液态水的行为占主导作用。而表面张力和 GDL 表面粗糙度有关。因而 GDL 粗糙表面将对液态水的行为产生很大的影响。本文采用 VOF 方法研究 GDL 粗糙表面对液态水在 GC 中运动过程的影响。

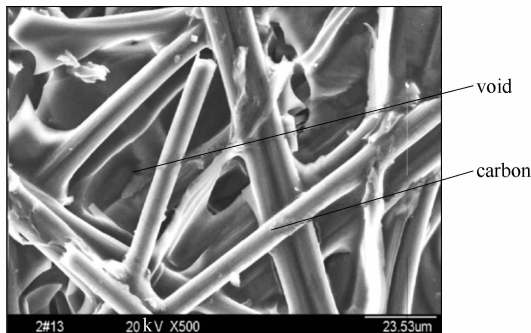


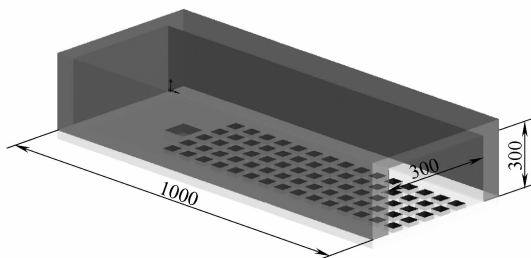
图 1 GDL 电镜扫描图

Fig. 1 Microstructure of carbon paper GDL

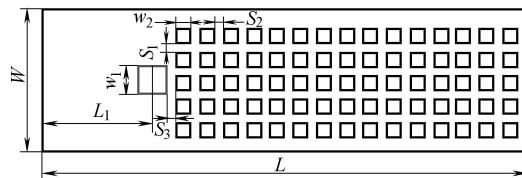
1 物理和数学模型

1.1 计算区域

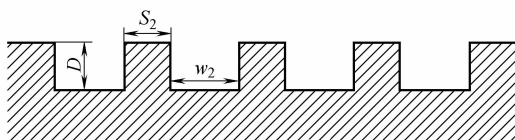
计算区域如图 2(a) 所示, 其为矩形直通通道, 由作为下壁面的 GDL 表面以及流场板中的上壁面



(a) general structure



(b) schematic diagram of GDL surface



(c) schematic diagram of roughness elements

图 2 计算区域

Fig. 2 Computational domain

和左右壁面组成。通道长度为 $1000\ \mu\text{m}$, 高度和宽度均为 $300\ \mu\text{m}$ 。液态水从位于 GDL 表面的方孔中(图 2 中 GDL 表面最大的孔)进入 GC, 进水孔边长为 $60\ \mu\text{m}$ 。在本文的模拟中, 采用孔阵来代表 GDL 粗糙表面, 如图 2 所示。方孔的边长为 $30\ \mu\text{m}$, 深度均为 $20\ \mu\text{m}$ 。GDL 为碳纤维层叠结构, 碳纤维直径大约为 $7\ \mu\text{m}$, 因此方孔的深度大约为 3 层碳纤维。GDL 表面的其他参数如表 1 所示。液态水被来自 GC 进口(左边)的空气吹动向 GC 出口运动(右边), 因此进水孔上游的 GDL 粗糙表面对液态水传输过程影响很小, 为了节省计算资源, 代表 GDL 粗糙表面的孔阵仅布置在进水孔的下游。液态水在 GC 中的运动受到很多因素的影响, 包括 GC 结构参数、GC 壁面润湿特性、空气进口速度以及液态水进口速度^[4]。本文仅研究 GDL 表面润湿特性和粗糙度对液态水传输过程的影响。在本文的模拟中, 以轮廓算术平均偏差评定表面粗糙度。基线为 $Z=0$ 。根据轮廓算术平均偏差的定义, GDL 表面粗糙度 r_{GDL} 由式(1)确定

$$r_{\text{GDL}} = w_2 D / (S_2 + w_2) \quad (1)$$

表 1 给出了不同孔阵布置所对应的表面粗糙度。其中工况 5 表示 GDL 表面为光滑表面。

表 1 数值模拟参数

Table 1 Simulation cases in present paper

Case	$L_1/\mu\text{m}$	$S_1/\mu\text{m}$	$S_2/\mu\text{m}$	r_{GDL}	Contact angle
1	200	20	20	10	$45^\circ, 125^\circ, 145^\circ$
2	200	20	40	6.67	$125^\circ, 145^\circ$
3	200	20	60	5	$125^\circ, 145^\circ$
4	200	20	80	4	$125^\circ, 145^\circ$
5	200	0	0	0	$125^\circ, 145^\circ$

1.2 VOF

由于 Re 较小, 液态水在 GC 中的运动为层流流动, 运动过程中假设温度不变。采用商业软件 FLUENT6.3.26 中的 VOF 模型模拟液态水在 GC 中的运动。采用 PLIC 更新气液界面位置^[14]。速度压力耦合采用 PISO 算法。

1.3 初始和边界条件

进口给定空气进口速度为 $10\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 出口为充分发展条件; 液态水进口速度为 $1\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。GC 上壁面和左右壁面为亲水表面, 给定接触角为 45° ; 气液表面张力系数为 $0.0725\ \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$; 壁面采用无滑移边界条件; 温度为 $330\ \text{K}$, 压力为 $101325\ \text{Pa}$ 。时间步长为 $10^{-7}\ \text{s}$ 。收敛标准为残差

小于 10^{-6} 。

1.4 网格和时间独立性考核

网格划分采用结构化正六面体网格, 网格数为 101088。图 3 为工况 1 下 $X=260\ \mu\text{m}$ 处的网格, 其中孔阵处网格局部加密。在工况 1 下, 将网格数分别增加一倍和减小一半, 得到了相近的液态水传输过程, 验证了网格独立性。在工况 1 下, 时间步长分别取为 1×10^{-7} 、 5×10^{-7} 、 $5 \times 10^{-8}\ \text{s}$, 得到了相近的液态水传输过程, 验证了所采用时间步长的独立性。

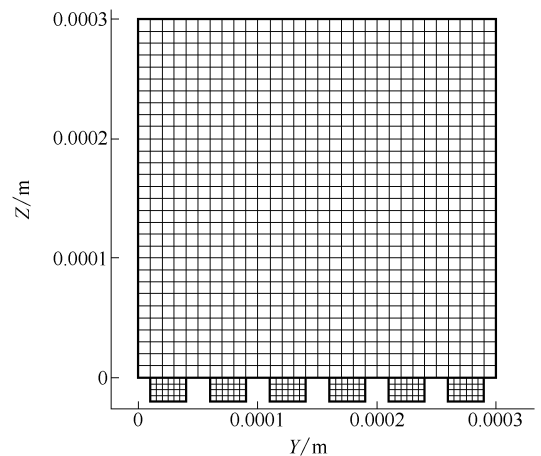


图 3 工况 1 下 $X=260\ \mu\text{m}$ 处网格划分

Fig. 3 Mesh at $X=260\ \mu\text{m}$ for case 1

2 结果和讨论

优化 GC 中水管理的目的在于降低液态水覆盖 GDL 表面的面积、减小液态水的排出时间以及降低 GC 中的压降。本文从这 3 个方面讨论 GDL 表面润湿特性和粗糙度对液态水传递过程的影响。

2.1 GDL 表面润湿特性的影响

本文模拟了工况 1 下亲水 GDL 表面和疏水 GDL 表面对液态水运动过程的影响。亲水 GDL 表面接触角设为 45° , 疏水 GDL 表面接触角设为 145° 。图 4 和图 5 显示了两种情况下液态水在 GC 中的分布情况。可以看出, GDL 表面润湿特性对液态水在 GC 中的分布影响很大。在具有亲水 GDL 表面的 GC 中, 液态水在 GC 固体壁面上铺展, 呈膜状分布, 如图 4(a) 所示。在具有疏水 GDL 表面的 GC 中, 液态水为液滴, 如图 5(a) 所示。图 4(b) 是液态水在亲水 GDL 表面的覆盖情况, 可以看出, 相当一部分 GDL 表面被液态水覆盖, 反应气体的传输被阻碍。相反, 在图 5(b)

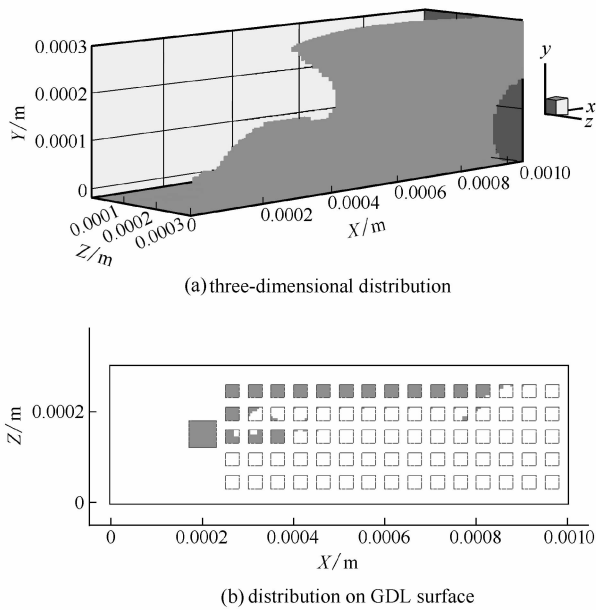


图 4 工况 1 下水在具有亲水 GDL 表面 GC 中的分布
Fig. 4 Liquid water distribution in GC of case 1 with hydrophilic GDL at $t=4.85$ ms, contact angle between water and GDL as 45°

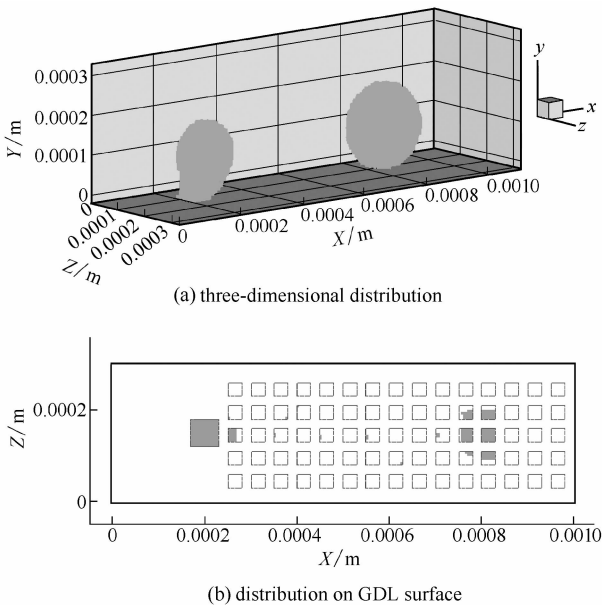


图 5 工况 1 下水在具有疏水 GDL 表面 GC 中的分布
Fig. 5 Liquid water distribution in GC of case 1 with hydrophobic GDL at $t=1.5$ ms, contact angle between water and GDL as 145°

中, 由于液态水在具有疏水 GDL 表面的 GC 中呈现为液滴, 液态水覆盖的 GDL 表面很小。因而疏水 GDL 表面有利于反应气体的传输。因而本文随

后的模拟中 GDL 表面设为疏水表面。

2.2 GDL 表面粗糙度的影响

图 6 给出了 GDL 表面接触角为 125° 和 145° 时 GC 出口处水的面积分数 A_r (水的面积和 GC 出口总面积之比: $A_r = A_{\text{liquid water}} / A_{\text{outlet}}$) 随时间的变换曲线。 A_r 为 0 时, 表明液滴还未到达 GC 出口, A_r 大于 0 表示液滴到达 GC 出口。从图中可以看出, 粗糙度不同时, 液滴到达 GC 出口的时间不同。表明粗糙表面对液滴的运动产生影响。粗糙度越大, 液滴到达 GC 出口所需的时间越短, 这表明表面粗糙度有利于液滴的排出。

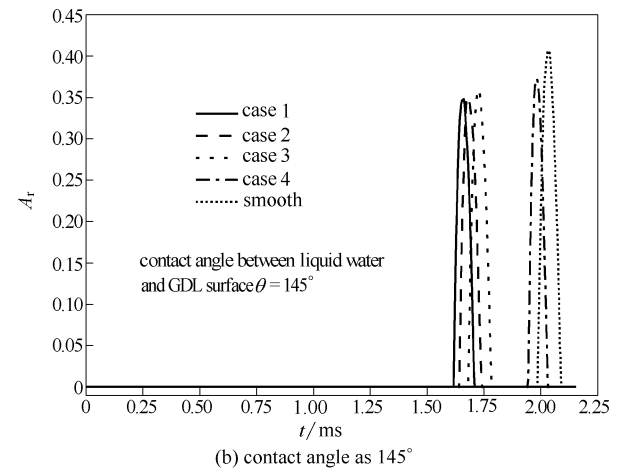
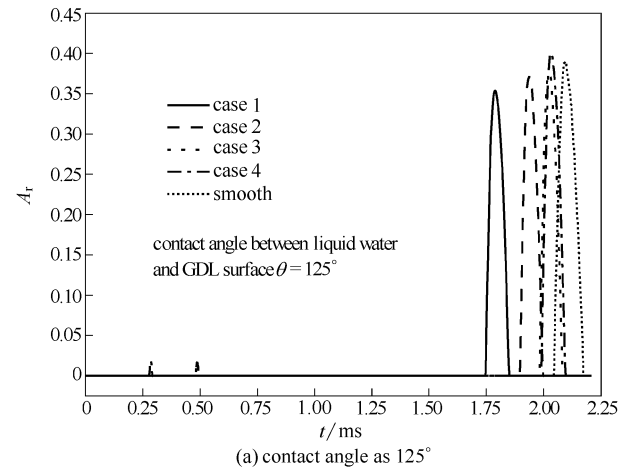


图 6 不同工况下 A_r 随时间的变化
Fig. 6 Time evolution of liquid water area fraction A_r at outlet of GC for different cases

2.2.1 液滴上的作用力分析 图 7 给出了在 GC 中的液滴的二维示意图。为了深刻理解粗糙表面对液滴运动的影响, 本文分析了作用在液滴上的力。作用在液滴上的力可以分为两类^[15]: 保持力和分离力。保持力有利于液滴附着于 GDL 表面或进水

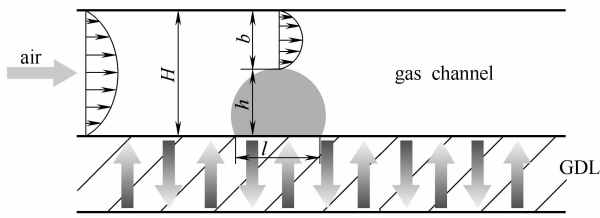


图 7 液滴在 GC 中的示意图

Fig. 7 Schematic diagram of water droplet in GC

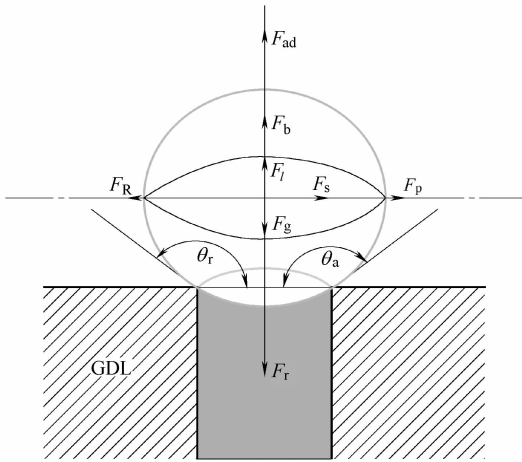


图 8 作用于液体上的力

Fig. 8 Forces acting on a water droplet

孔。分离力有利于液滴脱离 GDL 表面或进水孔向 GC 出口运动。液滴在 GC 中的运动可以分为两个阶段：液滴形成阶段（液滴未脱离进水孔）和液滴脱离阶段（液滴脱离进水孔向 GC 出口运动）。图 8 是液滴形成阶段受力示意图，在该阶段，液滴受力为：

分离力

$$\begin{cases} X \text{ 方向} \\ \text{压力: } F_p = 24\eta_a U_{in} H^2 R^2 / b^3 \\ \text{剪切力: } F_s = 24\eta_a U_{in} H R^2 / b^2 \\ Y \text{ 方向} \\ \text{气液界面处表面张力: } F_{ad} = \pi \alpha d^2 / (2R) \\ \text{浮力: } F_b = \rho_a g V \\ \text{升力: } F_l = 0.761 (f \rho_a U_{in}^2 / 2)^{1.5} \rho_a^{-0.5} R^3 / \eta_a \end{cases} \quad (2)$$

保持力

$$\begin{cases} X \text{ 方向} \\ \text{液滴变形引起的表面张力: } F_R = -\sigma(\cos\theta_r - \cos\theta_a)\pi r \\ Y \text{ 方向} \\ \text{与进水孔相连导致的表面张力: } F_T = -2\pi\sigma r \\ \text{重力: } F_g = -\rho_w g V \end{cases} \quad (3)$$

其中， η_a 为空气黏度， U_{in} 为进口空气速度， R 为液滴的半径， H 为 GC 的高度， h 为液滴的高度， b 为液滴顶部距 GC 上壁面的距离， θ_a 为前接触角， θ_r 为后接触角， σ 为表面张力， r 为进水孔半径， ρ_w 、 ρ_a 分别为水和空气的密度， V 为液滴的体积，摩擦因子 $f = 16/Re$ ， $Re = U_{in}H/\eta_a$ 。

在液滴脱离阶段，由于液滴不再和进水孔相连， F_T 消失。 F_R 为

$$F_R = -\sigma(\cos\theta_a - \cos\theta_r)\pi l/2 \quad (4)$$

式中 l 为液滴和 GDL 表面接触面积的直径。液滴所受其他力和成长阶段相同。

图 9 给出了 θ_r 为 115° 、 θ_a 为 155° 以及静态接触角为 145° 时各作用力随液滴半径的变化情况。可以看出，在微尺度 GC 中，与其他力相比，液滴所受的重力和浮力可以忽略不计。表面力占主导作用。

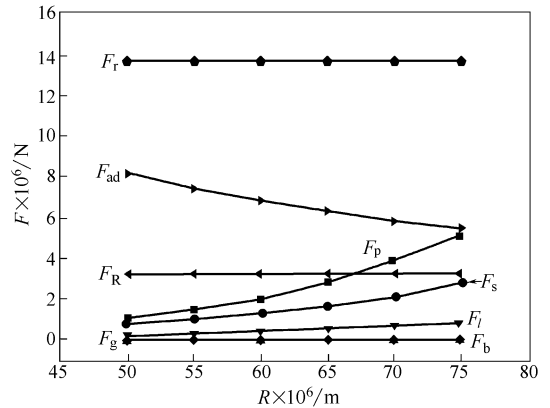


图 9 作用力与液滴半径关系

Fig. 9 Forces acting on a water droplet on smooth surface as function of water droplet size

2.2.2 粗糙度对 F_R 的影响 由于液滴在 GDL 表面滑行，本文仅分析粗糙度对液滴水平方向所受力的影响。水平方向上的力包括 F_R 、 F_p 和 F_s 。

式(4)中 πl 是三相结合线的长度，因而 F_R 和三相结合线有关，其随着三相结合线的增加而增加。图 10 和图 11 显示了不同工况下 $Z=0.14 \text{ mm}$ 处液态水的分布情况。可以看出，液态水并未填满 GDL 中的方孔，相反，其在孔阵表面滑行。一般情况下，在粗糙表面上的液滴可以用 Wenzel 模型^[16]或 Cassie and Baxter 模型^[17]描述。Wenzel 模型假设液滴完全填充和润湿粗糙表面。相反，Cassie and Baxter 模型假设液滴并不填充粗糙表面，液滴下表面同时与固体表面和空气接触。显然，

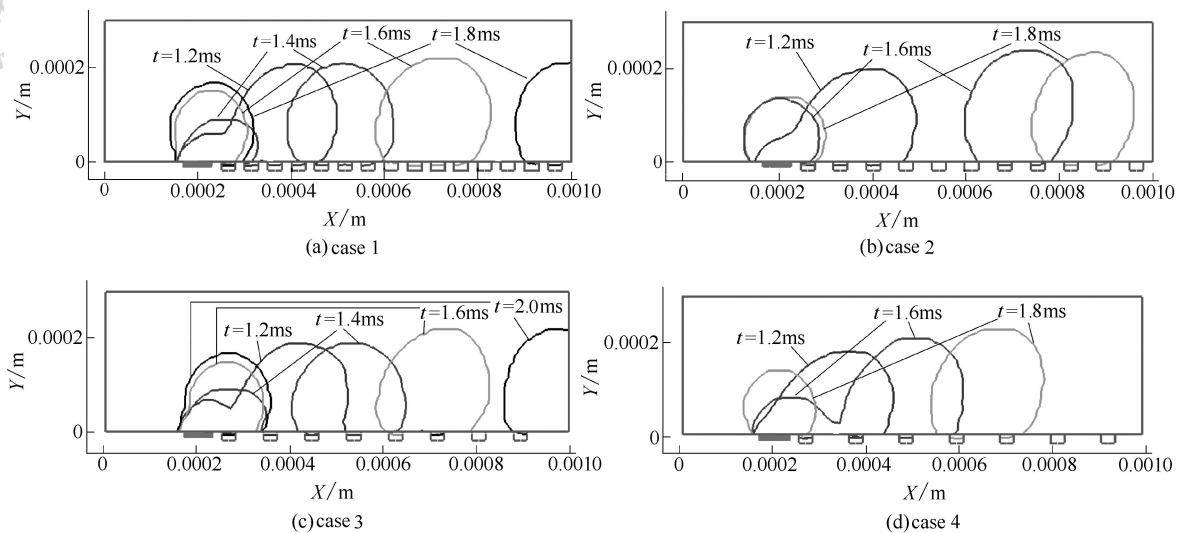


图 10 不同时刻液滴在 $Z=0.14$ mm 处的分布 (接触角为 125°)

Fig. 10 Liquid water distribution at $Z=0.14$ mm at different time for different cases with contact angle between liquid water and GDL surface as 125°

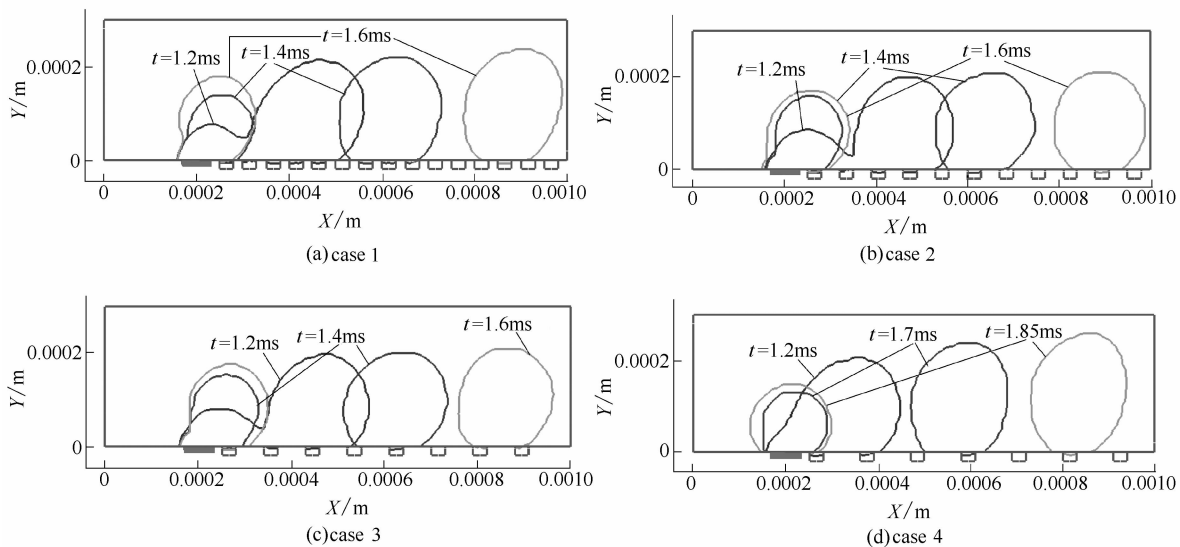


图 11 不同时刻液滴在 $Z=0.14$ mm 处的分布 (接触角为 145°)

Fig. 11 Liquid water distribution at $Z=0.14$ mm at different time for different cases with contact angle between liquid water and GDL surface as 145°

液滴在具有疏水粗糙 GDL 表面的运动符合 Cassie and Baxter 模型。如图 12(a) 所示, 液滴和 GDL 表面的接触面由气液接触面和液固接触面组成。与光滑 GDL 表面相比 [图 12(b) 所示], 三相接触线减小, 导致 F_R 减小。图 12(a) 中, 接触面半径为 $70 \mu\text{m}$, 粗糙表面上的三相接触线长度仅为光滑表面上的 $1/2$ 左右, 极大地减小了保持力 F_R , 因

而减小了液滴运动的阻力。

2.2.3 粗糙度对 F_p 和 F_s 的影响 图 13 显示了光滑 GDL 表面 (工况 5) 上 $Z=0.14$ mm 处不同时刻液态水的分布情况。比较图 10、图 11 和图 13 可以发现, 尽管给定的初始 GDL 表面接触角相同, 均为 125° 和 145° , 液滴显示出的接触角并不相同, 粗糙表面上的接触角较大。这是因为表面粗

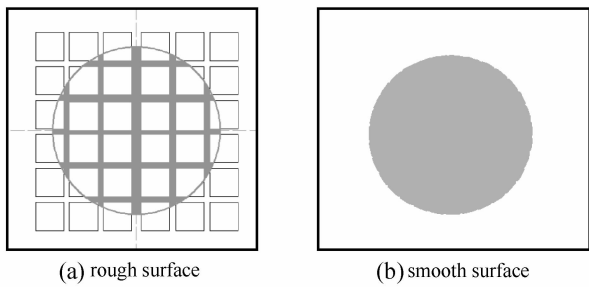


图 12 液态水和 GDL 表面的接触面积

Fig. 12 Schematic diagram of contact area between detached water droplet and GDL

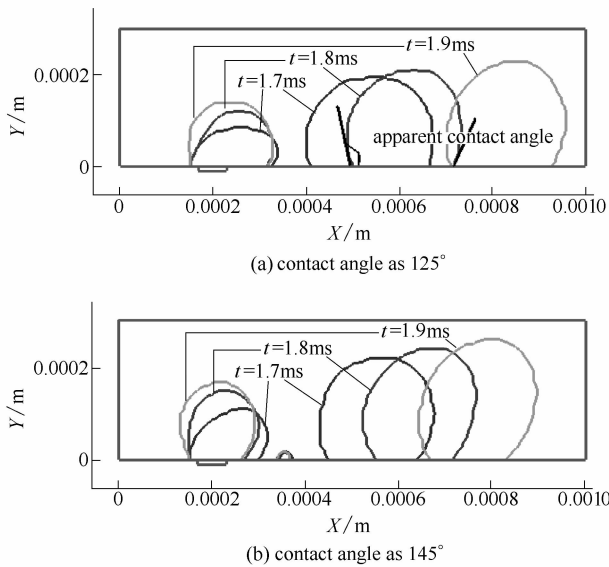


图 13 不同时刻 $Z=0.14$ mm 处液态水的分布情况 (工况 5)

Fig. 13 Liquid water distribution at $Z=0.14$ mm at different time for smooth cases

糙度能够增强粗糙表面的疏水特性,使得接触角变大^[17]。一方面,在相同的液滴体积下,接触角增加,液滴和 GDL 表面的接触面积减小,从而三相接触线减小,保持力 F_R 减小,液滴运动的阻力减小。另一方面,在相同的液滴体积下,接触角变大,使得液滴相对较高。由式 (2) 可以看出,液滴越高,分离力 F_p 和 F_s 越大,有利于液滴的排出。

2.2.4 液滴的排出时间 上文分析表明,粗糙表面有利于液滴的排出。一方面,液滴在 GDL 表面为 Cassie 液滴,三相接触线减小,使得保持力 F_R 减小;另一方面,粗糙表面增加了液滴的接触角,

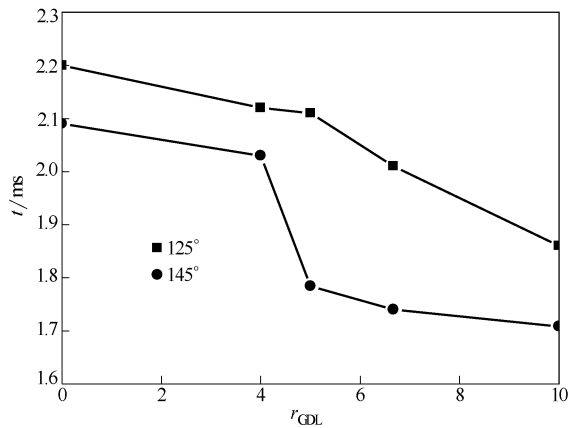


图 14 不同工况下液滴排出时间

Fig. 14 Removal time of water droplet in GC for different cases

使得液滴和 GDL 表面接触面积减小,三相接触线减小,保持力 F_R 减小;同时接触角增加,使得液滴变高,分离力 F_p 和 F_s 变大。图 14 给出了不同工况下液滴的排出时间。可以看出,粗糙度越大,排出时间越短,GDL 表面粗糙度加快了液滴的排出。

2.2.5 粗糙度对 A_{cov} 的影响 图 15 给出了不同工况下液滴覆盖 GDL 表面的面积 A_{cov} 。其中横坐标为归一化的时间(时间与排出时间之比)。曲线的峰值处表明液滴到达 GC 出口,曲线的谷值处表明液滴完全排出 GC。可以看出,粗糙 GDL 表面上的 A_{cov} 小于光滑 GDL 表面上的 A_{cov} 。由上文分析可知,这是由于粗糙表面增加了液滴的接触角,从而减小了液滴和 GDL 表面的接触面积。

2.2.6 粗糙度对压降的影响 GC 中的压降是一个非常重要的参数。压降越小,流动的阻力越小,有利于提高电池性能。图 16 是不同工况下 GC 中的压降,由于液滴在 GC 中的运动为非稳态过程,此处的压降是水从进水孔出现到离开 GC 出口的平均值。从图中可以看出,粗糙度越大,压降越大。一方面,在微尺度流动中,粗糙表面会增加流动阻力^[18-19];另一方面,粗糙度增加了液滴的接触角,使得液滴变高,较高的液滴使得 GC 变得更加堵塞,增加了压降,接触角越大,压降越大。

3 结 论

本文采用商业软件 FLUENT6.3.26 中的 VOF 模型模拟了 PEMFC 中液态水在粗糙 GDL 表面上的运动过程。研究了 GDL 表面润湿特性和表面粗

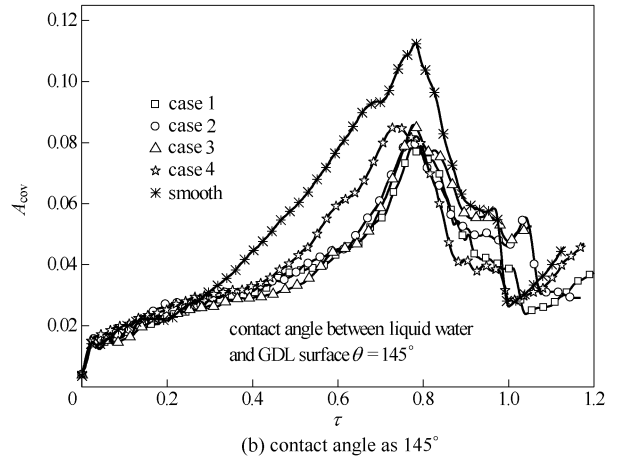
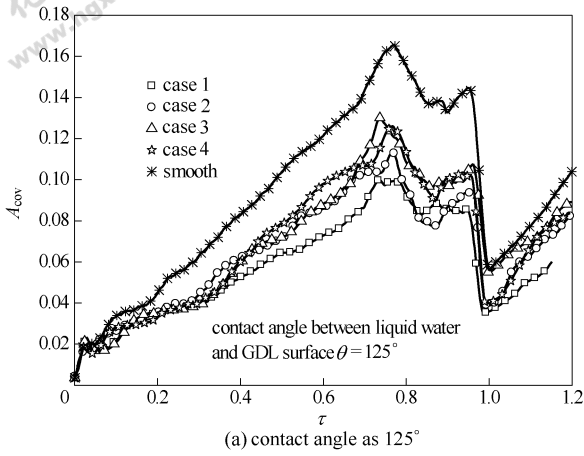


图 15 不同工况下液滴覆盖 GDL 表面的面积

Fig. 15 Time evolution of water coverage ratio on GDL surface for different cases with contact angle between liquid water and GDL

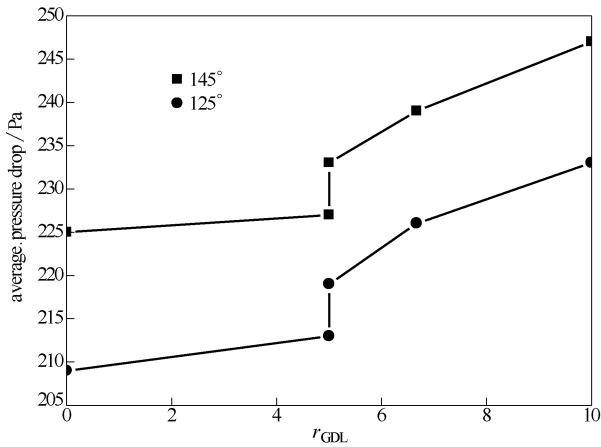


图 16 不同工况下 GC 中的压降

Fig. 16 Averaged pressure drop for different cases

糙度对液态水运动过程的影响。对 GDL 表面润湿特性的研究表明，疏水表面有利于液态水的排出和反应气体的传输。随后重点研究疏水 GDL 表面粗糙度对液滴传输过程的影响。在疏水 GDL 粗糙表面上，液滴为 Cassie 液滴，三相接触线减小，液滴的接触角增加，液滴排出 GC 的速率加快，粗糙度越大，液滴排出 GC 所需的时间越短。液滴覆盖 GDL 表面的面积减小，粗糙度越大，覆盖面积越小。GC 中的压降随着粗糙度的增加而增加。

符 号 说 明

- A——面积， μm^2
- b——液滴顶部距 GC 上壁面的距离， μm
- D——孔深， μm

- F_{sp} ——气液界面处力，N
- F_b ——浮力，N
- F_g ——重力，N
- F_l ——升力，N
- F_R ——液滴变形引起的表面张力，N
- F_r ——液滴和进水孔相连引起的表面张力，N
- f——摩擦因子， $f=1/Re$
- H——GC 的高度， μm
- h——液滴的高度， μm
- R——液滴半径， μm
- r——进水孔半径， μm
- r_{GDL} ——GDL 表面粗糙度
- S——孔间距， μm
- U——速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- V——液滴的体积， m^3
- ω ——孔边长， μm
- η ——黏度， $\text{N} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
- θ_a ——前接触角， $(^\circ)$
- θ_r ——后接触角， $(^\circ)$
- ρ ——密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- σ ——表面张力系数， $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

下角标

- a——空气
- in——进口
- w——水

References

[1] Tüber K, Pöcza D, Hebling C. Visualization of water buildup in the cathode of a transparent PEM fuel cell [J]. *J. Power Sources*, 2003, **124**: 403-414

- [2] Pasaogullari U, Wang C Y. Two-phase modeling and flooding prediction of polymer electrolyte fuel cells [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2005, **152**: A380-A390
- [3] Zhu X, Sui P C, Djilali N. Liquid water removal from a polymer electrolyte fuel cell [J]. *J. Power Sources*, 2007, **172**: 287-295
- [4] Zhu X, Sui P C, Djilali N. Three-dimensional numerical simulations of water droplet dynamics in a PEMFC gas channel [J]. *J. Power Sources*, 2008, **181**: 101-115
- [5] Zhang F Y, Yang X G, Wang C Y. Liquid water removal from a polymer electrolyte fuel cell [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2006, **153**: A225-A232
- [6] Cai Y H, Hu J. Effects of hydrophilic/hydrophobic properties on the water behavior in the micro-channels of a proton exchange membrane fuel cell [J]. *J. Power Sources*, 2006, **161**: 843-848
- [7] Wang Z H, Wang C Y, Chen K S. Two-phase flow and transport in the air cathode of proton exchange membrane fuel cells [J]. *J. Power Source*, 2001, **94**: 40-50
- [8] Natarajan D, Nguyen T Van. A two-dimensional, two-phase, multicomponent, transient model for the cathode of a proton exchange membrane fuel cell using conventional gas distributors [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2001, **148**: A1324-A1335
- [9] You L, Liu H. A two-phase flow and transport model for the cathode of PEM fuel cells [J]. *J. Heat Mass Transfer*, 2002, **45**: 2277-2287
- [10] Siegel N P, Ellis M W, Nelson D J, von Spakovsky M R. A two-dimensional computational model of a PEMFC with liquid water transport [J]. *J. Power Sources*, 2004, **128**: 173-184
- [11] Quan P, Zhou B, Sobiesiak A, Liu Z. Water behavior in serpentine micro-channel for proton exchange membrane fuel cell cathode [J]. *J. Power Sources*, 2005, **152**: 131-145
- [12] Jiao K, Zhou B, Quan P. Liquid water transport in straight micro-parallel-channels with manifolds for PEM fuel cell cathode [J]. *J. Power Sources*, 2006, **157**: 226-243
- [13] Quan P, Lai M C. Numerical study of water management in the air flow channel of a PEM fuel cell cathode [J]. *J. Power Sources*, 2007, **164**: 222-237
- [14] Youngs D L. Numerical Methods for Fluid Dynamics [M]. New York: Academic Press, 1982
- [15] He B, Lee J, Patankar N A. Multiple equilibrium droplet shapes and design criterion for rough hydrophobic surfaces [J]. *Colloids Surf.*, 2004, **248**: 101-104
- [16] Wenzel R N. Resistance of solid surface to wetting by water [J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1936, **28**: 988-994
- [17] Cassie A B D, Baxter S. Wettability of porous surfaces [J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1944, **40**: 546-551
- [18] Mala G M, Li D Q. Flow characteristics of water in microchannels [J]. *International J. Heat and Fluid Flow*, 1999, **20**: 142-148
- [19] Shen S, Xu J L, Zhou J J, Chen Y. Flow and heat transfer in microchannels with rough wall surface [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, **47**: 1311-1325