

燃料电池膜增湿器建模及仿真

常国峰^{1,2}, 徐 迪^{1,2}, 常志宏³, 许思传^{1,2}

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804; 3. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804)

摘要: 建立了膜增湿的仿真模型, 用于研究膜增湿器的传热、传质特性, 分析了气体工质参数和结构参数对传热、传质过程的影响, 主要结论如下: 湿侧压力增加, 水蒸气分子渗透量增加。干侧压力增加, 水蒸气分子渗透量减少; 干侧气体湿度增加, 会减少水蒸气分子的渗透量。湿侧气体的湿度增加, 会增加水蒸气分子的渗透量; 逆流布置的传热、传质性能优于顺流布置, 优先考虑逆流布置。

关键词: 膜; 燃料电池; 传热; 传质

中图分类号: TM911.4

文献标志码: A

Modeling and Simulation Research of Membrane Humidifier Used in Fuel Cell

CHANG Guofeng^{1,2}, XU Di^{1,2}, CHANG Zhihong³, XU Sichuan^{1,2}

(1. School of Automotive, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Established simulation model of membrane humidification to research humidifier characteristics in the process of heat and mass transfer. And an analysis was made of the effect of structural parameter and gas parameter in this process. The main conclusions are as follows: Increased pressure in wet-side will lead an increase of water vapor molecules osmotic amount. The dry-side pressure increases, while the amount of water molecule penetration would reduce. And in another aspects, effects of gas humidity on water vapor molecules osmotic amount is similar to that of pressure. The heat and mass transfer performance of counter flow layout is better than that of downstream layout, so which the former is preferred on flow channel layout choice.

Key words: membrane; fuel cell; heat transfer; mass transfer

燃料电池是可将存在于氢气和氧气中的化学能直接转化为电能的发电装置。为了提高燃料电池的转化效率, 需增加气体的湿度, 使其满足燃料电池运行的需求。

在燃料电池系统中, 膜增湿器是调节气体湿度和温度的关键零部件。水蒸气分子通过浓度差从高湿侧传递到低湿侧。传递过程受到温度、压力等气体参数的影响。本文就是针对这些影响因素通过数值模拟的方法, 分析其规律。膜增湿的数值模拟, 国内外有较多的学者做此方面的研究: Chen 和 Peng^[1]建立了板式气/气膜增湿器的动态数学模型, 通过 Simulink 软件进行了仿真, 并对不同工况、不同流动形式、不同流道尺寸和膜增湿器的动态响应进行了对比研究。Park 等^[2]借鉴前者的结论和美国 Perma Pure 公司的产品, 建立了管壳式气/气膜增湿器的数学模型, 通过 Simulink 软件进行了仿真模拟, 并对膜增湿器在不同工况、不同流动形式、不同流道尺寸及其动态响应进行了研究。

此外, Kulikovsky^[3]提出了燃料电池中水蒸气传递的数学模型, Sukkee Um 等^[4]利用计算流体力学(CFD)技术研究燃料电池中水蒸气传递过程。此外, 很多关于燃料电池数值模拟方面的文献中都有关于水蒸气在 Nafion® 膜中传递机理的研究^[5-11]。这些学者对膜加湿器的研究多集中在零维的数值模拟和试验研究, 而结合膜加湿器内部流场结构的多维数值模拟研究暂未发现公开研究文献。而多维的模拟对 gas to gas(气/气)膜加湿器的设计工作有重要的指导意义, 本文针对膜加湿器进行了多维仿真研究工作。

1 膜增湿器的数学模型

1.1 物理模型建立

由图 1 可以看出, 膜增湿器内的热量和水分子

收稿日期: 2015-12-07

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ15025606); 中央高校基本科研业务费专项基金; 上海市地面交通工具空气动力与热环境模拟重点实验室开放课题基金

第一作者: 常国峰(1976—), 男, 工学博士, 副教授。主要研究方向为新能源动力系统。E-mail: changguofeng@tongji.edu.cn

的传递是在膜两侧进行的. 本文建立的气/气膜增湿器模型是二维稳态模型. 图中, $M_{1,in}$ 、 $P_{1,in}$ 、 $T_{1,in}$ 、 $\phi_{1,in}$ 分别为干侧入口质量流量、压力、温度和湿度, $M_{1,out}$ 、 $P_{1,out}$ 、 $T_{1,out}$ 、 $\phi_{1,out}$ 分别为干侧出口质量流量、压力、温度和湿度, $M_{2,in}$ 、 $P_{2,in}$ 、 $T_{2,in}$ 、 $\phi_{2,in}$ 分别为湿侧入口质量流量、压力、温度和湿度, $M_{2,out}$ 、 $P_{2,out}$ 、 $T_{2,out}$ 、 $\phi_{2,out}$ 分别为湿侧出口质量流量、压力、温度和湿度. M_1 和 Q_1 分别为传递的质量和热量.

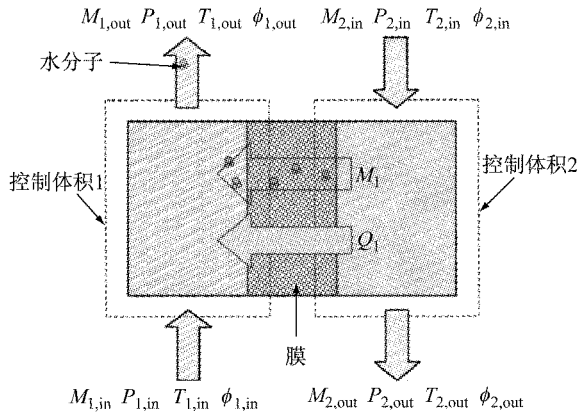


图1 膜增湿器计算控制域

Fig.1 Computational control domain of membrane humidifier

从图1可以看出,气/气膜增湿器基本单元的物理模型经过简化可以看成是由两个计算控制域组成,分别表示反应气体流道(干侧)的控制域1和表示燃料电池排气侧流道(湿侧)的控制域2. 干侧气体(反应气体)在控制域1中流动,湿侧气体(燃料电池排气)在控制域2中流动,它们之间用增湿膜隔开,由于两个控制域中的气体之间存在温度差和水蒸气分压差,热量和水分子在控制域1和控制域2之间通过膜传递. 因此,膜增湿器运行过程中发生三种物理过程:流动、传热和传质.

1.2 流动控制方程

根据流体力学,控制域内气体的流动可以用 N-S(Navier-Stokes)方程的形式来表示:

$$\frac{\partial(\rho\psi)}{\partial t} + \nabla(\rho\psi\mathbf{v}) = \nabla(\Gamma\nabla\psi) + S \quad (1)$$

式中: $\frac{\partial\rho}{\partial t}$ 为瞬态项; $\nabla(\rho\psi\mathbf{v})$ 为对流项; $\nabla(\Gamma\nabla\psi)$ 为扩散项; S 为广义源项; ψ 为通用变量; Γ 为广义扩散系数; ρ 为密度; \mathbf{v} 为速度; t 为时间.

1.3 传热控制方程

传热控制方程二维稳态的形式为

$$\frac{\partial(\rho_p T)}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

式中: C_p 为比热; T 为温度.

1.4 传质控制方程

传热控制方程二维稳态的形式为

$$\frac{\partial(\rho m_i)}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

式中, m_i 为质量.

同时通过在水的组分守恒方程中添加绝对值等于水的扩散率源项,体现水扩散对水的组分守恒方程的影响.

1.5 水在混合气体中的扩散

水在混合气体(即空气)中的扩散是一个稳态的二元扩散系,可以用菲克定理来描述,即:

$$J_w = D_{wa} \cdot \nabla C_w \quad (4)$$

式中: J_w 表示水的扩散通量; C_w 表示水的摩尔浓度; D_{wa} 表示水在空气中的扩散系数,扩散系数取决于组元的性质,系统的状态和成分. 利用富勒-斯凯特洛-吉丁斯公式,水在空气中的扩散系数可以表达为

$$D_{wa} = \frac{0.001 T^{1.75} (1/M_w + 1/M_a)^{1/2}}{P[(\sum v_w)^{1/3} + (\sum v_a)^{1/3}]^2} \quad (5)$$

其中: P 为系统的压力; v 为原子扩散容积; $\sum v$ 为分子扩散容积; M_w 和 M_a 分别为水和空气的摩尔质量.

1.6 水在增湿膜中的扩散

水在增湿膜中的扩散十分复杂,它不但受到系统状态的影响,还取决于增湿膜的化学性质. 而本文中所指的增湿膜是 Nafion® 膜. 很多学者在研究燃料电池时就对水在 Nafion® 膜的扩散做了大量的分析,这些分析和得出的结论可以用于膜增湿器的数学建模. 本文中使用的是 T E Springer 等^[12]提出来的模型:

$$\dot{m}_w = D_w \frac{C_2 - C_1}{L_m} M_w A \quad (6)$$

其中: \dot{m}_w 为水的质量扩散流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; D_w 为水在 Nafion 膜中的扩散系数, $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; C_2 和 C_1 分别为湿侧水和干侧水的摩尔浓度, $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$; L_m 为 Nafion 膜的厚度, cm ; M_w 为水的摩尔质量, $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$; A 为膜的面积, cm^2 ;

2 压力参数对膜增湿器性能影响

对膜增湿模型研究主要目的是了解膜增湿器在不同进气参数下的传热、传质特性,用以评价其是否符合燃料电池运行工况的要求. 基于此目的,研究了压力、流量、温度、流道结构等参数对传热、传质过程

的影响。

膜增湿器湿侧与干侧空气分别采用逆流和顺流的布置,并进行对比研究. 其中流道尺寸见表 1.

表 1 流道尺寸

Tab.1 Flow channel size

流道长度/mm	干侧流道高/mm	湿侧流道高/mm
300	1	1

水蒸气通过增湿膜传递的动力是膜两侧水蒸气分压差,而在相同的水蒸气质量分数的情况下,干湿两侧流道的总压不同,水蒸气分压也不同. 因此流道压力会对水蒸气传质产生直接的影响.

2.1 湿侧流动出口压力对膜增湿器性能的影响

保持膜两侧气体的温度、相对湿度、气体流量以及干侧空气流道出口压力不变,湿侧出口压力逐渐增大到 80 kPa,具体工况参数见表 2.

图 2a 表明无论是逆流还是顺流,单位面积传质量都随湿侧流道出口压力的增大而增加,这是由于

在流道内温度分布一定的情况下,湿空气的饱和蒸汽压一定,湿侧出口压力越大,流道内总压越大,水蒸气的分压也越大,传质也就增大了;而干侧空气的出口温度则基本没有变化. 从图 2b 中可以看出湿侧出口压力对增湿器的传热性能没有明显影响.

表 2 湿侧出口压力工况参数

Tab.2 Work condition parameter of outlet pressure in wet-side

	进口温度/ K	进口相对湿度/ %	出口表压力/ kPa	进口流量/ ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)
干侧	293	0	100	6
湿侧	353	100	0~80	17

在不同的湿侧流道出口压力下,逆流布置的传质和传热性能都要优于顺流布置. 从图中 2a 可以看出,每个工况点,逆流布置的单位面积传质要比顺流布置的高 $1 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. 从图 2b 中可以看出,干侧空气出口温度则要高 10 K. 进一步研究传质沿膜 x 轴方向的分布,可更好地解释这种现象.

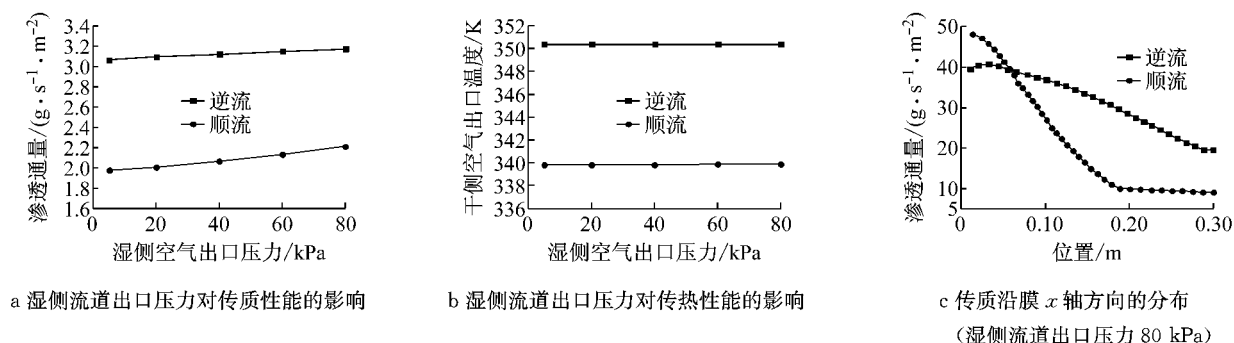


图 2 湿侧出口压力对传热传质性能影响

Fig.2 Effect of outlet pressure in wet-side on heat transfer and mass transfer performance

图 2c 表示湿侧流道出口压力为 80 kPa 时,传质沿膜的 x 轴方向(湿侧气体流动方向)的分布情况. 可以看出,在顺流情况下,传质在膜 x 轴方向迅速下降,在 0.2 m 处开始保持在 $10 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,而在逆流的情况下,虽然也是沿膜 x 轴方向下降,但是下降的趋势要小得多. 这是因为在逆流布置时,膜的温度沿膜 x 轴方向是升高的,由膜的传质特性可知,水在膜中的扩散系数随之增大,而膜两侧的水蒸气分压差是不断减小的,在这两者的作用下,单位面积传质先增大后减小,但是减小的幅度并不大;而在顺流布置时,膜的温度和两侧的水蒸气分压差都是沿膜 x 轴方向减小的. 因此,单位面积传质在流道进口处附近达到最大值,并沿 x 轴方向迅速下降.

2.2 干侧空气流道出口压力对膜增湿器性能的影响

保持膜两侧气体工质的温度、相对湿度、气体流量以及湿侧流道出口压力不变,湿侧压力从 10 kPa

增大到 100 kPa,具体工况参数见表 3.

表 3 干侧出口压力工况参数

Tab.3 Work condition parameter of outlet pressure in dry-side

	进口温度/ K	进口相对湿度/ %	出口表压力/ kPa	进口流量/ ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)
干侧空气	293	0	10~100	6
湿侧空气	353	100	0	17

从图 3a 可以看出,无论是逆流还是顺流,单位面积传质都随着干侧空气出口压力的增大而减小. 这是由于在流道内温度分布一定的情况下,湿空气的饱和蒸汽压不变,而随着干侧空气流道出口压力的增大,流道内总压增大,水蒸气分压增大,从而使膜两侧气体的水蒸气分压差减小,传质随之减少;从图 3b 可以看出,不同的干侧空气流道出口压力对干侧空气的出口温度没有影响. 这说明压力因素只影响传质,对传热基本没有影响.

在不同的干侧空气通道出口压力下,无论是传质还是传热性能,逆流布置都要优于顺流布置. 其中单位面积传质,逆流流动形式要比顺流流动形式高 $1 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,在相同的湿侧进口温度的情况下,干侧空气出口温度逆流流动形式要比顺流流动形式高

10 K.

图 3c 表示干侧空气通道出口压力为 10 kPa 时,传质沿膜 x 轴方向的分布情况. 在顺流布置时,传质在 0.08 m 处达到最大,之后不断下降,而逆流的情况下传湿量在 0.2 m 处达到最大,随后下降. 从传质

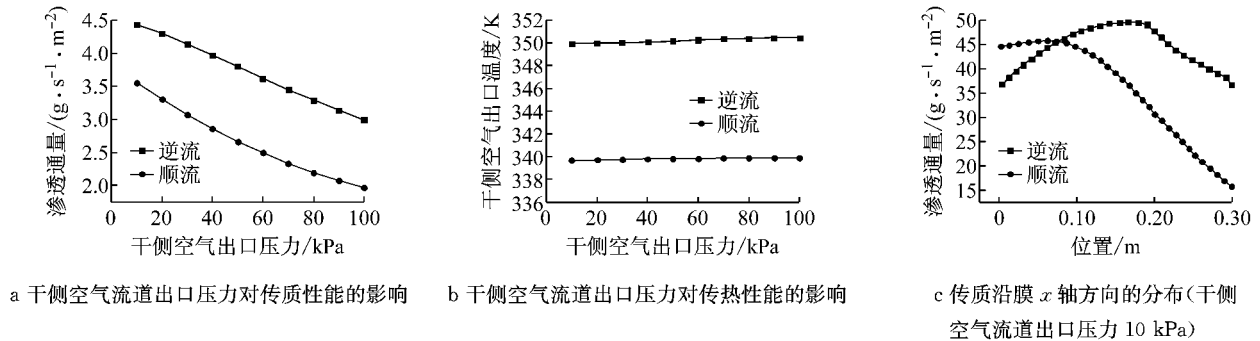


图3 干侧出口压力对传热/传质性能影响

Fig.3 Effect of outlet pressure in dry-side on heat transfer and mass transfer performance

在膜 x 轴的分布情况看出,逆流布置要比顺流布置均匀得多. 造成这种现象的原因和湿侧通道出口压力对传质分布的影响是相同的.

3 湿度参数对膜增湿器性能影响

燃料电池电堆的排气是饱和湿空气,但是膜增湿器干侧空气的相对湿度和外界环境因素有关. 因此研究干侧空气水蒸气分压对膜增湿器性能的影响规律,对膜增湿器性能满足极限工况有实际意义.

保持膜两侧气体工质的流量,温度,压力不变,干侧空气进口相对湿度增加至 100%,具体工况见表 4.

表4 湿侧出口压力工况参数

Tab.4 Work condition parameter of outlet pressure in wet-side

	进口温度/ K	进口相对湿度/ 度/%	出口表压力/ kPa	进口流量/ ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)
干侧	293	0~100	100	5
湿侧	353	100	20	17

图 4a 所示,无论是逆流还是顺流布置形式,单位面积传质随着干侧空气进口相对湿度的增大而减少. 由于湿侧和干侧空气的进口温度一定,因此膜两侧的温差一定,干侧空气出口温度基本不变,在通道内温度场不变的情况下,膜的水蒸气扩散系数不变,因此膜的单位面积传质由湿侧和干侧空气的相对湿度梯度决定,因此随着干侧空气进口相对湿度的增大,单位面积传质逐渐减少. 如图 4b 所示,干侧空气的出口温度基本不变

图 4c 表示干侧空气进口相对湿度为 100% 时,传质沿膜 x 轴方向的分布情况. 在逆流布置的情况下,膜沿 x 轴方向的温度逐渐升高,因此水蒸气在膜中的扩散系数不断增大,而膜两侧的相对湿度差是逐渐减少的. 在这两个因素的作用下,从图 4c 中可以看出,传质的最大值出现在中部 0.08 m 处,在整个膜上传质分布也较为均匀;在顺流布置的情况下,膜沿 x 轴方向的温度是逐渐降低的,膜两侧的相对

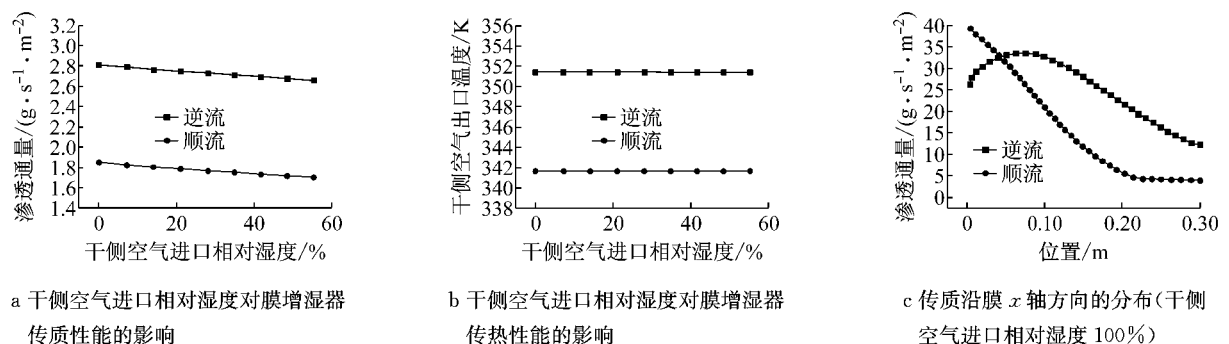


图4 干侧湿度对传热/传质性能影响

Fig.4 Effect of humidity in dry-side on heat transfer and mass transfer performance

湿度差也是逐渐减少的. 因此, 传质的最大值出现在干侧流道的入口处, 并且迅速沿 x 轴方向下降. 从传质曲线积分的角度看, 即总的传质, 逆流布置大于顺流布置.

5 结论

(1) 气体压力变化对增湿器内的传热过程影响较小, 对增湿器内的水蒸气分子传递过程有较为明显的影响: 湿侧压力增加, 水蒸气分子渗透量增加, 干侧压力增加时, 水蒸气分子渗透量减少.

(2) 干侧压力增加, 水蒸气分子渗透量减少; 干侧气体湿度增加, 会减少水蒸气分子的渗透量. 湿侧气体的湿度增加, 会增加水蒸气分子的渗透量.

(3) 逆流布置在传热、传质特性上优于顺流布置, 增湿器的设计上优先考虑逆流布置.

参考文献:

- [1] Chen Dongmei, Peng Huei. A thermodynamic model of membrane humidifiers for PEM fuel cell humidification control [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2005, 127(3): 424.
- [2] Park SangKyun, Choe SongYul, Choi Seoho. Dynamic modeling and analysis of a shell and tube type gas to gas membrane humidifier for PEM fuel cell applications [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(9): 2273.
- [3] Kulikovskiy A A. Quasi-3d modeling of water transport in polymer electrolyte fuel cells [J]. Journal of Electrochemical Society, 2003, 150(11): A1432.
- [4] Um S, Wang C Y, Chen K S. Computational study of water transport in proton exchange membrane fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2006, 156(2): 211.
- [5] Janssen G J M. A phenomenological model of water transport in a proton exchange membrane fuel cell [J]. Journal of Electrochemical Society, 2001, 148(12): A1313.
- [6] Sivertsen B R, Djilali N. CFD-based modeling of proton exchange membrane fuel cells [J]. Journal of Power Sources, 2005, 141(1): 65.
- [7] Um S, Wang C Y, Chen K S. Computational fluid dynamics modeling of proton exchange membrane fuel cells [J]. Journal of Electrochemical Society, 2000, 147(12): 4485.
- [8] Wang Chao Yang. Fundamental models for fuel cell engineering [J]. Chemical Review, 2004, 104(10): 4727.
- [9] Siegel C. Review of computational heat and mass transfer modeling in polymer-electrolyte-membrane (PEM) fuel cells [J]. Energy, 2008, 33(9): 1331.
- [10] Kamarajugadda Sai, Mazumder Sandip. On the implementation of membrane models in computational fluid dynamics calculations of polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. Computers and Chemical Engineering, 2008, 32(7): 1650.
- [11] Carcadea E, Ene H, Ingham D B, et al. Numerical simulation of mass and charge transfer for PEM fuel cell [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2005, 32(10): 1273.
- [12] Springer T E, Zawodzinski T A, Gottesfeld S. Polymer electrolyte fuel cell model [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1991, 138(8): 2334.