

# 质子交换膜燃料电池阴极气场设计优化

刘志春<sup>1</sup> 涂正凯<sup>2</sup> 周兵<sup>1</sup> 刘伟<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074 2. 武汉理工大学新材料复合国家重点实验室, 湖北 武汉 430070)

**摘要** 通过建立质子交换膜燃料电池阴极气场的三维简化模型, 研究了不同进气方式、不同进出气总管尺寸对电池堆流量分布的影响, 并提出从单电池流道深度的角度优化气场分布的改进方案。结果表明, 与单入口进气方式相比, 双入口进气方式效果更优; 采用 2-2 型进气方案时流量分布最为均匀, 进气功耗最小; 增大进气总管的宽度可以使电堆流量分布更加均匀; 各单电池合理采用非均匀深度流道可以有效提高电池堆流量分布均匀性。

**关键词** 质子交换膜燃料电池; 进气方式; 流量分布; 气场设计

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2012)08-1375-05

## Optimization to the Cathode Gas Field Design of the Proton Exchange Membrane Fuel Cell

LIU Zhi-Chun<sup>1</sup> TU Zheng-Kai<sup>2</sup> ZHOU Bing<sup>1</sup> LIU Wei<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, HUST, Wuhan 430074, China 2. State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Progressing, WHUT, Wuhan 430070, China)

**Abstract** The simplified three-dimensional model of the cathode gas flow field in proton exchange membrane (PEM) fuel cell was established to investigate the flow distribution characteristics in cell stacks under different gas inlet types and different manifold pipe sizes, and improved scheme for more uniformly flow distribution was proposed through the use of the non-uniform depth channels in signal cells. The results show that the double-inlet gas field types perform better than the single-inlet types, and the double-inlet and double-outlet types can obtain the best performance in flow distribution with the lowest power consumption. The flow distribution can become more uniform with the increase of the manifold pipe width. The proper use of the non-uniform depth channels can improve the flow distribution performance effectively.

**Key words** proton exchange membrane fuel cell; gas inlet types; flow distribution; gas field design

## 0 引言

质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 以其结构紧凑、效率高、工作温度低、环境友好等特点, 在移动电源领域具有巨大的发展潜力, 已成为新能源领域的研究热点之一<sup>[1]</sup>。电池堆的气场设计是 PEMFC 系统设计的一个重要方面, 研究表明各单电池流量分配的均匀性对电池堆整体性能的提高有很大影响<sup>[2]</sup>。不合理的进气结构将导致各单电池内气体流速和流量分布不均匀, 最终使电池堆各处的电流密度、功率密度及发热量等分布不均匀, 从而使电池内发生局部失水过热等问题, 使电池堆的功率受到严重限制。电堆进气总管结构以及进气方式, 是影响各单电池流量分配的重要因素, 已有一些相关的研究。一些学者采用流体网路的方法研究电池堆压

力分布和流量分配的规律<sup>[3-5]</sup>, 为电池堆系统的优化设计提供参考依据。Koh<sup>[6]</sup> 等建立了一种系统的算法来研究电池堆中压降和流量分配, 结果发现由于壁面摩擦所造成的压力损失与歧管连接点处由于流体分散和汇合所造成的压力损失相比是可以忽略的。Chang<sup>[7]</sup> 等将流量分布与电池堆性能进行了耦合分析, 发现 Z 型流场电池堆的性能较 U 型流场差。詹志刚<sup>[8]</sup> 等通过简化的电池堆气场系统模型, 发现具有一定锥度结构的变截面进气总管在 U 型进气方式时, 气体流量分配较均匀。覃有为<sup>[9]</sup> 等通过对不同进气形式进行模拟, 结果表明采用两头双进口进气的布置方案或者高压系统可以使得电堆内的不均匀性得到显著改善, 但采用高压系统会导致电

收稿日期: 2011-12-03; 修订日期: 2012-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50906026); 国家“863”计划资助项目 (No.2012AA110600)

作者简介: 刘志春 (1976-), 男, 新疆沙湾人, 讲师, 博士, 主要从事毛细泵相变回路以及电子器件冷却的研究。

池堆效率下降。目前针对电池堆流场优化研究还比较缺乏,需要进一步寻求更优的流场形式,并且还没有发现从改进电池堆的流道深度的角度以主动的适应总管进气形式来优化流量分配的文献。本文针对四种在实际电池堆中简单可行的进气方案,研究了各种方案下流场分布及压降情况,并进一步分析了进出气总管的尺寸对流量分配的影响,探析了在电池堆中采用非均匀深度流道对电池堆流量分配的作用。

## 1 数学模型

本文为了定性地分析电池堆气场的设计对其内部各单电池压降、流量和流速分配的影响,将实际的复杂的电池堆系统简化为含 100 片单电池,并且每一片单电池视为一个流道的三维模型,流道的长度和截面积参考实际电池堆的尺寸,以使所得流量、流速的结果尽可能的与实际电池接近。根据以上分析,建立如图 1 所示的模型,具体参数及网格划分见表 1,网格数约为 550000。

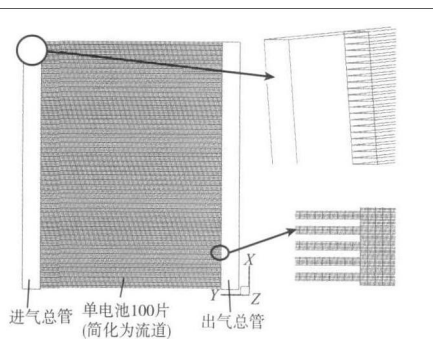


图 1 电池堆简化模型及局部网格划分示意图

Fig. 1 Schematic of simplify PEMFC stack model and local meshing

表 1 模型尺寸及网格划分

Table 1 Model dimension and meshing distribution

	宽/网格数	高/网格数	长/网格数
进气总管/mm	20~40/10~20	10/5	398/995
流道/mm	1.5~2.4/5	10/5	300/150
出气总管/mm	30/15	10/5	398/995

在进行计算之前,提出以下几点假设:

- 1) 电池堆在稳定条件下运行;
- 2) 由于压力梯度和雷诺数减小,流道内的流动设定为层流,且不可压缩;
- 3) 阴极气体为空气,加湿度为 100%,生成的水分全部析出,并忽略其影响;
- 4) 只考虑流道内的纯流动,不考虑电化学反应

及发热,假设单电池内均匀反应时,考虑氧气在流道内的消耗。

根据上述分析,建立流动相关控制方程如下:

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z}) + S_{\phi} \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为流体密度;  $u$ ,  $v$  和  $w$  分别为流体在  $x$ ,  $y$  和  $z$  轴方向的速度分量;  $\phi$  为通用变量:连续性方程中  $\phi = 1$ , 动量方程中  $\phi = u, v, w$ ;  $\Gamma_{\phi}$  为相应于  $\phi$  的广义扩散系数,其定义参见文献 [10];  $S_{\phi}$  为广义源项,在不同的方程中其意义不同。

根据法拉第定律,氧气的消耗量和电流密度的关系如下:

$$\dot{m}_{O_2} = -\frac{M_{O_2} I_c A}{4F} \quad (2)$$

由上式可以得到电池堆在  $1 \text{ A/cm}^2$  电流密度条件下稳定运行时,氧气的消耗量,再根据氧气在整个阴极其中所占比例,可得到燃料气的流量。然后基于 SIMPLE 算法,对整场的流动情况进行求解,主要计算参数如下表 2 所示:

表 2 主要计算参数

Table 2 Main calculation parameters

参数	数值	参数	数值
电流密度/ A/cm <sup>2</sup>	1	氧气体积消耗 率/kg/(m <sup>3</sup> ·s)	0.4145
过量系数	2	操作压力/MPa	0.2026
氧气消耗量/g/s	0.2487	出口压力/MPa	0
阴极入口流量/g/s	2.5420	操作温度/°C	80

## 2 基本进气方案

通过改变电池进气口和出气口的位置和个数,可以得到不同的进气设计方案。根据实际电池堆的结构,初步选定四种简单可行的进气方案进行分析,即 U 型、Z 型、2-2 型和 2-1 型,其二维结构示意图如图 2 所示。

方案 A: U 型,进气口和出气口位于电池堆的同一侧,气体在通道内沿 U 字形方向流动;

方案 B: Z 型,进气口和出气口位于电池堆的两侧,气体在通道内沿 Z 字形方向流动;

方案 C: 2-2 型,两个进气口位于进气总管的两侧,两个出气口位于出气总管的两侧,燃料气被分为均等的两份,分别从两个进口流入;

方案 D: 2-1 型,两个进气口位于进气总管的两侧,在出气总管的中间有一个出气口,燃料气被分为均等的两份,分别从两个进口流入。

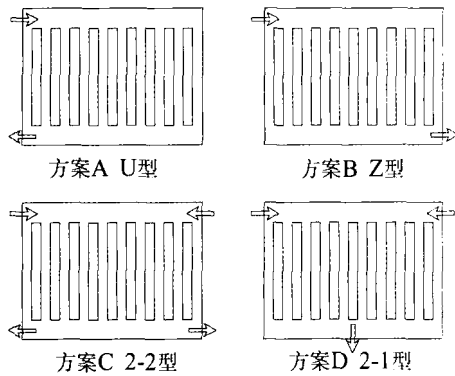


图 2 四种进气方案

Fig. 2 Four schemes of gas inlet

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 四种基本进气方案效果比较

先保持进出气总管的宽度为 30 mm, 流道深度均为 2 mm, 进行比较。

图 3 所示为四种不同进气方案下阴极气场的压力分布云图。气场内压力分布直接影响各单电池内的流量和流速分布。可以看出, 气体在气场中总的压降较电池堆实际压降小, 这是由于对电池堆简化之后, 一方面电池堆的总体尺寸较实际小, 总燃料气流量较小; 另一方面将单电池中多个小流道综合简化为一个较大尺寸流道, 从而使总体压降实际大小存在差异, 但是用于定性分析各种进气方案的优劣是可行的。

图 4 所示为四种进气方案下, 进气口和出气口之间的压差的比较。可以看出, 四种进气方案中, 方案 C 的进出口压降最小, 方案 D 的进出口压降最

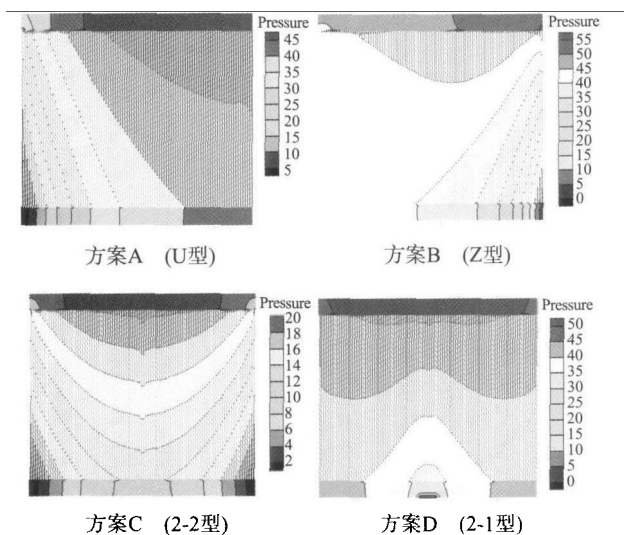


图 3 四种进气方案下阴极气场压力分布

Fig. 3 Cathode flow field pressure distribution of the four gas inlet schemes

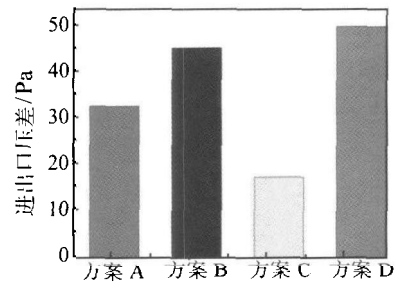


图 4 四种进气方案下进气压降比较

Fig. 4 Comparison of inlet pressure drop of the four gas inlet schemes

大。当进气量相同时, 进气功耗与进气的压降是成正比的。对整个电堆系统而言, 进出口压降越小, 空压机的寄生功率越小, 则电堆的整体效率相对提高。因此, 从这一方面来说, 方案 C 是相对较优的方案。

图 5(a)、(b)、(c)、(d) 所示分别为四种进气方案下, 各流道的进口和出口的压力分布。流道截面一定时, 流道进出口的压差直接决定对应流道的流量, 电堆中各单电池入口和出口的压差越均匀, 则个单电池内的流量越均匀, 越有利于得到较高的电池性能。从图中可以看出, 方案 B(Z 型) 的各流道的压降分布最不均匀, 最大压差达最小压差的十倍以上, 这必将导致流量的分布非常不均; 方案 C(2-2 型) 各流道的压降分布相对较均匀, 最终可以使各单电池的流道流速分布较均匀。

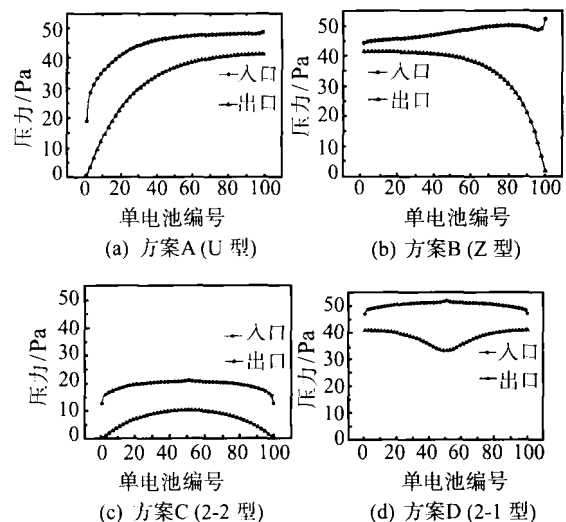


图 5 四种进气方案下各单电池入口和出口处的压力分布

Fig. 5 Inlet and outlet pressure distribution of signal cell of the four gas inlet schemes

图 6 所示为四种进气方案所对应的各单电池的流量分布比较。方案 A 和方案 B 均为单入口进气, 方案 A 中各单电池最大流量约为最小流量的 3 倍, 而方案 B 中各单电池最大流量为最小流量的 10 倍以上,

显然方案 A 要明显优于方案 B。方案 C 和方案 D 均为双入口进气, 流量分配相对来说都比较均匀, 具体来看, 方案 C 要稍优于方案 D。另外, 相对于单入口的进气方案, 采用双入口的进气方案时, 流量分布要更加均匀。这是由于, 采用双入口进气时, 气体在总管入口处的流速较小, 气体的在流道中的行程也相对变短, 这两方面使得气体在流道中由于沿程损失和局部损失而产生的压降减小, 这样更有利于整个流场中压降的均匀分布, 进而使流量分配更加均匀。

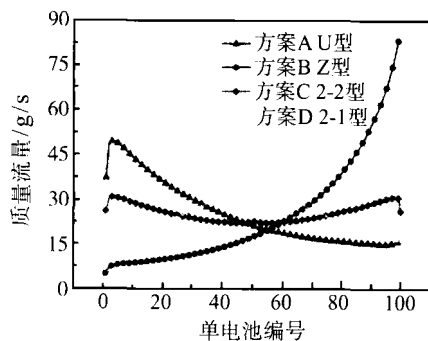


图 6 四种进气方案下各单电池流量分布比较

Fig. 6 Comparison of signal cell flow distribution of the four gas inlet schemes

综合以上分析, 其他条件相同时, 进气方案 C(2-2 型) 的进出口的压降最小, 即风机的寄生功耗最小; 同时电堆内各单电池的流量分布最均匀。因此, 进气方案 C 最有利于电池堆整体性能的提高。

### 3.2 进出气总管宽度对流量分配的影响

图 7 给出了对于 U 型和 2-2 型进气方案, 采用不同的进出气总管宽度时电池堆内的流量分配情况比较。显然, 进气总管的宽度越大, 各单电池的流量分配越均匀。电池堆中各单电池中的燃料气均通过进出气总管来进行分配和汇总, 在总的进气流量不变的情况下, 进气总管的尺寸越大, 总管内的流速越小, 总管内沿着流动方向的流速也就相对较均

匀, 这样各单电池的入口和出口条件也相对变得更加均匀, 最终使各电堆内气场分布变得更加均匀。但是增大进气总管的尺寸会到来电池堆整体尺寸的增大, 这在一些场合是受到限制的。因此, 在空间允许的情况下, 可以尽可能的增大进气总管的宽度, 以提高电堆内流场分布均匀性, 提高电池堆性能。

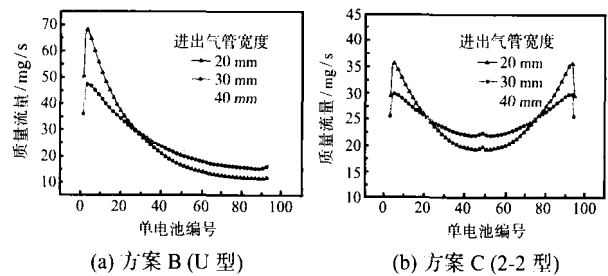


图 7 不同进出气总管宽度下电池堆的流量分配

Fig. 7 Flow distribution of PEMFC stack of the different inlet and outlet header pipe width

### 3.3 非均匀深度流道改进方案

根据上述分析, 在各单电池尺寸形状相同的情况下, 各单电池入口和出口条件越相近, 电堆内流量分布越均匀。但是由于进气方式上固有的一些限制, 总会造成各单电池之间进出口条件的差异, 这样就不可避免的导致流量的不均匀分配。鉴于这一情况, 本文提出可以采用非均匀深度流道的方法, 主动适应各单电池进出口条件的差异, 以增大各流道内流量和流速的均匀性。

图 8 给出了 U 型进气方案条件下, 采用非均匀深度流道时电堆内流量和流速分布与均匀深度流道的比较。针对 U 型流道, 由于流量随单电池编号的增加而下降, 将 100 片单电池流道按顺序 10 个一组, 共分为 10 组, 以组为单位改变流道深度, 使流道深度如图 8(a) 所示由小向大变化。可以看出, 采用非均匀深度流道时, 流量分布明显变得更加均匀, 各通道中的流速分布也变得更加均匀。流量分布均

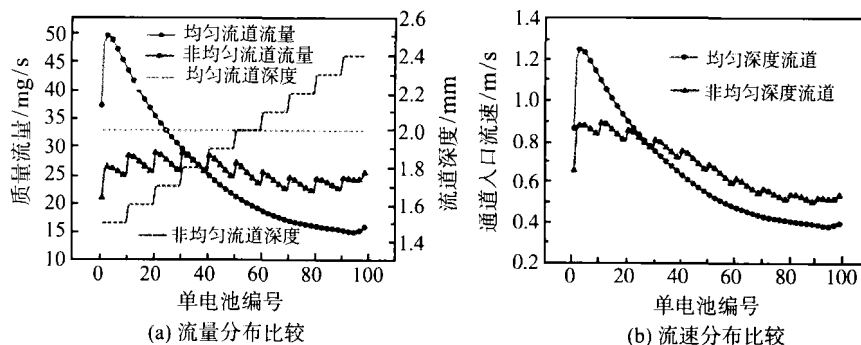


图 8 U 型进气方案下采用均匀与非均匀流道流场分布比较

Fig. 8 Comparison of flow field distribution of uniformity and asymmetry gas flow of U style gas inlet

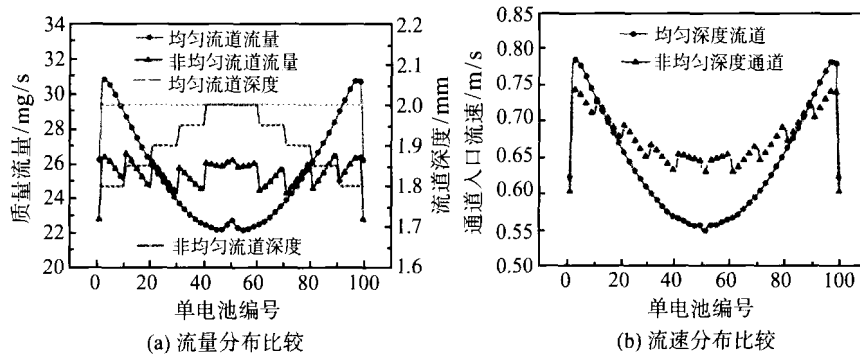


图 9 2-2 型进气方案下采用均匀与非均匀流道流场分布比较

Fig. 9 Comparison of flow field distribution of uniformity and asymmetry gas flow of 2-2 style gas inlet

匀可以使电堆内各处燃料过量系数相同,改善电堆内功率分布均匀性;流速分布均匀可以使各点电堆内排水条件更加相似,避免因为电堆内局部流速过小,而发生单电池堵水等不利情况。以上这些均为电堆整体性能的提高奠定基础。

图 9 给出了采用 2-2 型进气方案时,采用与 U 型进气方案相同的方法,根据电堆内流量分布的特点,采用如图 9(a) 中所示由小变大、再由大变小的流道深度分布规律,使电堆内流量分布变得更加均匀,忽略最边上两个流道后,可以看出,整个电堆内的流量分配围绕流道平均流量变化在 4% 范围内,这与采用均匀深度流道时的结果相比,产生了较大的提高。特别是与采用均匀深度流道的 Z 型进气方案相比,性能的提高非常明显。另外流速分布也一定程度上较改进前更加均匀。更加均匀的流量和流速分布将有利于电堆整体性能的提高。

## 4 结 论

本文建立了简化的三维电堆流量分布模型,比较了 U 型、Z 型、2-2 型和 2-1 型四种进气方案的气场分布,研究了进出气总管宽度对电堆流量分布的影响,并提出非均匀深度流道改进方案。得到如下结论:

- 1) 双入口进气方案的流量分配效果优于单入口进气方案;
- 2) 四种进气方案中,2-2 型进气方案的流量分布最为均匀,气体流动压降最小,最有利于电堆性能的提高;
- 3) 进气总管的宽度越大,电堆流量分布越均匀,在空间允许的情况下,建议尽可能地增大进气总管的宽度;
- 4) 电堆内根据均匀流道下流量分配结果,合理采用非均匀深度流道可主动适应各单电池进出口条

件的差异,提高流量分布均匀性,提高电堆性能。

## 参 考 文 献

- [1] 刘洁,王菊香,邢志娜,李伟. 燃料电池研究进展及发展探析. 节能技术, 2010, 28(4): 364-368  
LIU Jie, WANG Juxiang, XING Zhi na, LI Wei. The Investigation on Research Progress and Development of Fuel Cell [J]. Energy Conservation Technology, 2010, 28(4): 364-368
- [2] Haruhiko Hirata, Michio Hori. Gas-flow Uniformity and Cell Performance in a Molten Carbonate Fuel Cell Stack [J]. Journal of Power Sources, 1996, 63: 110-120
- [3] Z Ma, S M Jeter, S I Abdel-Khalik. Flow Network Analysis Application in Fuel Cells [J]. Journal of Power Sources, 2002, 108(1/2): 106-112
- [4] G Karimi, J J Baschuk, X Li. Performance Analysis and Optimization of PEM Fuel Cell Stacks Using Flow Network Approach [J]. Journal of Power Sources, 2005, 147(1/2): 162-177
- [5] Robert J Kee, Pavan Korada, Kevin Walters, et al. A Generalized Model of the Flow Distribution in Channel Networks of Planar Fuel Cells [J]. Journal of Power Sources, 2002, 109(1): 148-159
- [6] Joon-Ho Koh, Hai-Kyung Seo, Choong-Gon Lee, et al. Pressure and Flow Distribution in Internal Gas Manifolds of a Fuel-Cell Stack. Journal of Power Sources [J], 2003, 70(1): 54-65
- [7] Paul A C Chang, Jean St-Pierre, Jürgen Stumper, et al. Flow Distribution in Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stacks [J]. Journal of Power Sources, 2006, 162(1): 340-355
- [8] 詹志刚,黄永,张永生,等. 质子交换膜燃料电池堆压力及流量分布规律 [J]. 武汉理工大学学报 - 信息与管理工程版, 2008, 30(4): 565-567, 571  
ZHAN Zhigang, HUANG Yong, ZHANG Yongsheng, et al. Air Pressure and Flux Distribution in PEMFC Stack [J]. Journal of Wuhan university of technology(Information & Management Engineering), 2008, 30(4): 565-567, 571
- [9] 覃有为. 车用质子交换膜燃料电池系统的气场模拟及优化 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006  
TAN Youwei. Modeling and Optimization of Gas Field in PEM Fuel Cell System for Vehicle Application [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006
- [10] Patankar S V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow [M]. New York: McGraw-Hill, 1980