

流道结构对燃料电池阴极氧气分布的影响

熊承盛¹，罗马吉¹，陈奔¹，涂正凯²

(1.武汉理工大学汽车工程学院，湖北武汉430070；2.武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室，湖北武汉430070)

摘要：合适的流场能提高燃料电池性能以及燃料的利用率。通过模拟研究Z型流场的不同入口分配槽与出口汇流槽的宽度，分析阴极的氧气浓度分布。结果表明，在进气流量不变的情况下，增加出口汇流槽宽度，有利于阴极的氧气浓度的提高，并且分布更均匀；增加入口分配槽宽度，氧气分布更不均匀；采用分配槽斜入口以及合适的流道分布，有利于阴极氧气浓度的均匀分布与提高。

质子交换膜燃料电池是一种将燃料的化学能直接转化为电能的发电装置^[1]

。因其能量转换效率高、环境友好、可快速启动等特点，受到了世界各国的广泛关注^[2]

。流道的设计对燃料电池的燃料分布有着重要的影响，合适的流道在提高燃料电池性能的同时能降低电池的水淹情况，提高燃料的利用率^[3]。

谭雅巍等人^[4]

实验研究了流道结构与几何尺寸对燃料电池性能的影响，发现增加流道深度以及增加流道数，可以提高燃料电池的性能。刘志祥等人^[5]

研究了燃料电池流场设计中常见的流场形式，模拟结果与测试结果得到的电池性能变化趋势基本一致，其性能由高到低依次为：渐缩流场、平行蛇形流场、网格流场。徐云飞等人^[6]

设计了一种流道渐扩型流场，并对其进行实验研究，结果表明在100%加湿的情况下，电池的性能最好。Junye Wang^[7]

基于质量和动量守恒理论，研究流场中各流道的流量分配与压降，优化了Z型结构流场。许多研究人员通过研究流道宽与脊宽之间的关系，分析燃料电池的性能变化^[8-9]

。结果表明，在高电流密度工况下，这两个参数对燃料电池的影响更显著。R

oshandel等人^[10]

研究了平行流场、蛇形流场以及仿生形流场，结果表明，仿生形流场在燃料分布均匀性上明显优于平行流场和蛇形流场，性能高于平行流场和蛇形流场的56%和26%。目前，对燃料电池流场的研究已经不少，本文通过数值计算的方式，主要研究Z型流道的入口分配槽以及出口汇流槽的结构尺寸对燃料电池阴极氧气分布的影响。计算值与实验数据的对比如图1所示，实验数据来自文献[11]。

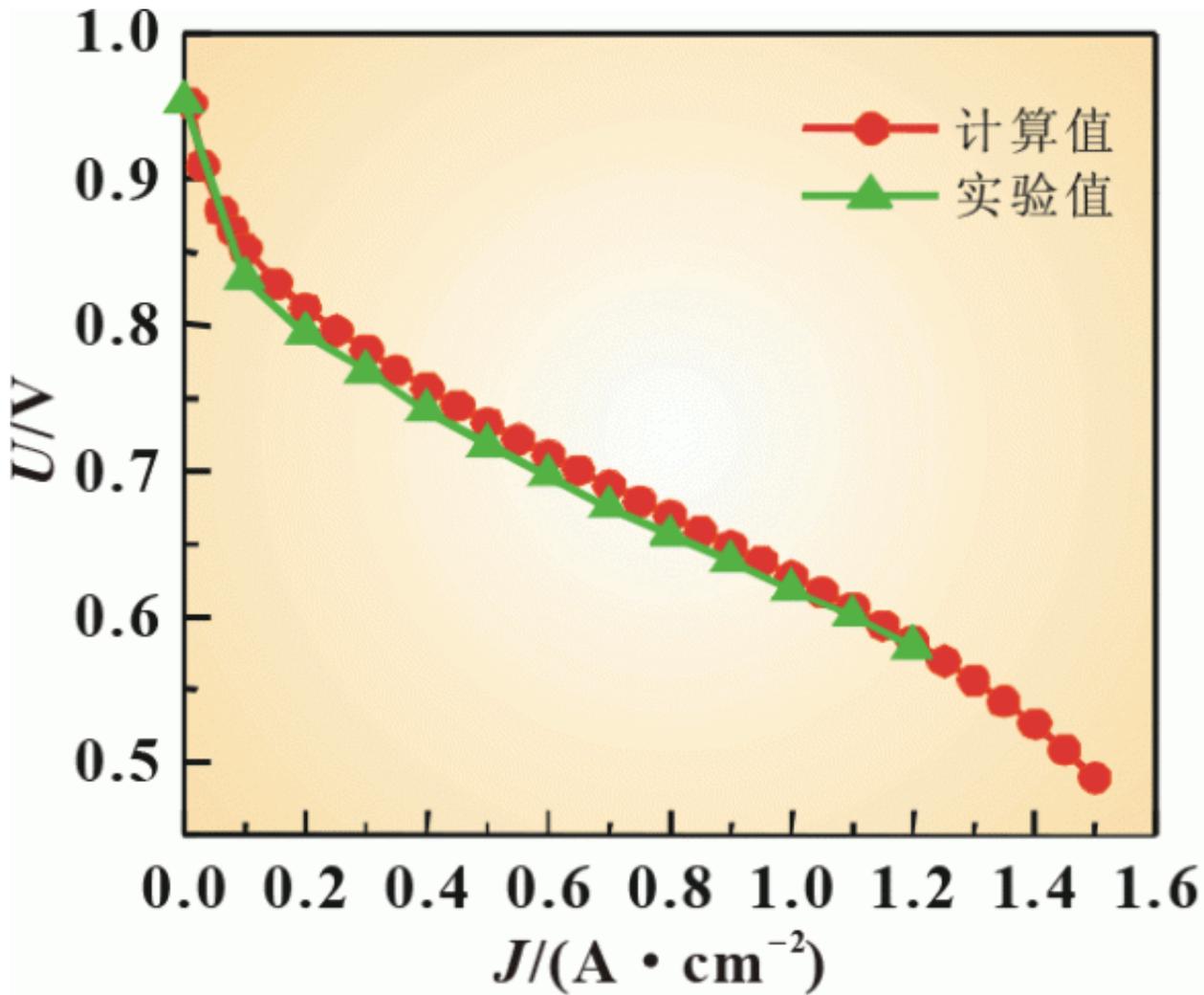


图 1 计算模型与实验数据的性能对比

1模型描述

1.1几何模型

入口分配槽与出口汇流槽的正下方没有发生电化学反应，整个反应发生在 $2cm \times 2cm$ 的催化层上。气体扩散层厚度为 $300 \mu m$ ，催化层厚度为 $10 \mu m$ ，膜厚为 $50 \mu m$ ，流道宽度为 $1mm$ ，流道深度为 $1mm$ ，脊宽为 $0.8mm$ ，流道数为11。其流道模型二维剖分图如图2所示。abcd为电化学反应区域，aefb为入口分配槽，cdgh为出口汇流槽，箭头表示流道的方向。

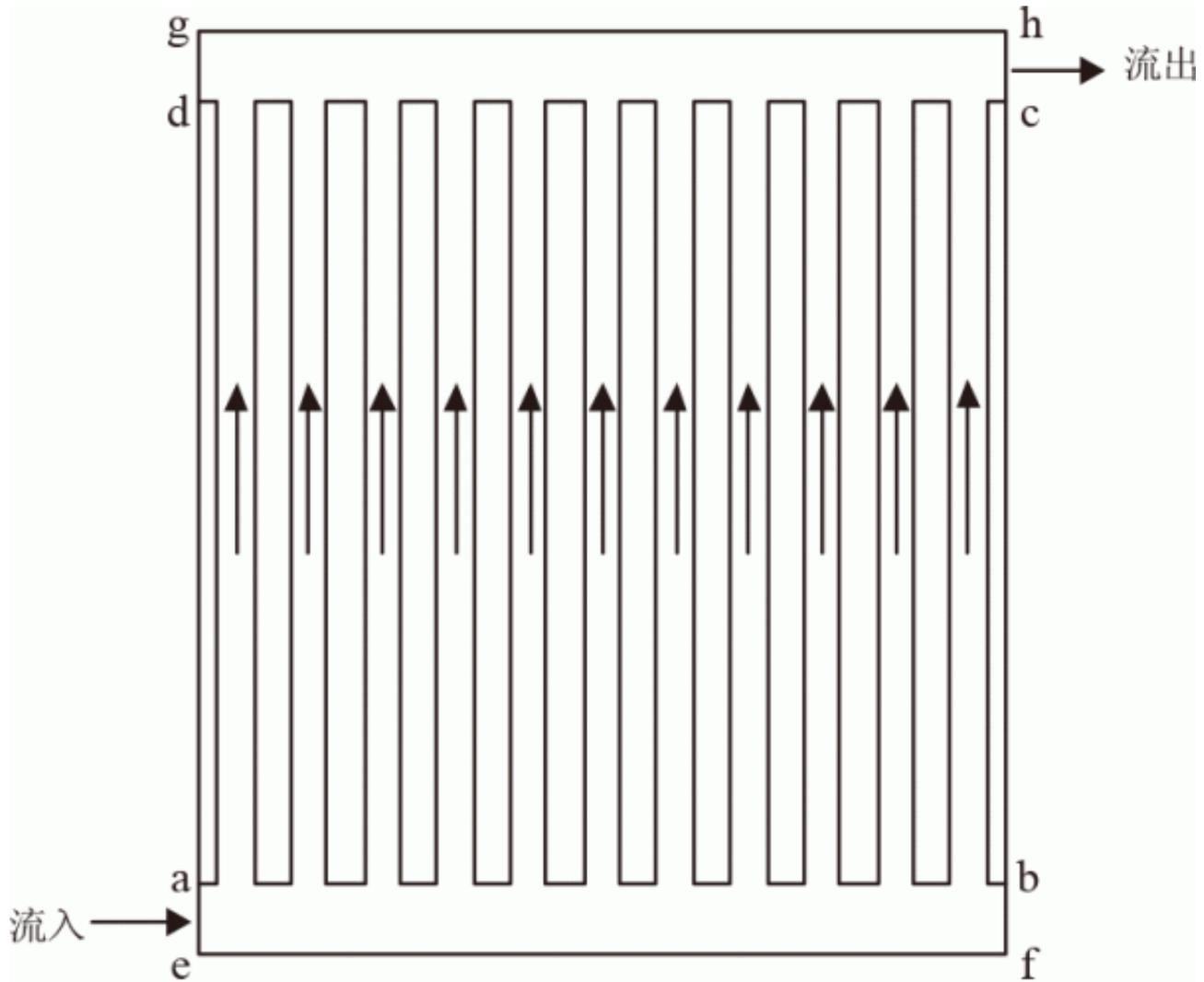


图 2 燃料电池流场的几何模型

1.2数学模型假设

燃料电池模型是基于COMSOL软件建立的三维稳态等温模型。假设电化学反应生成的水以水蒸气的形式存在；流道内的气体视为理想气体，并在流道内层流动；气体扩散层、催化层以及膜各向同性；燃料(空气和氢气)不能透过膜。

1.3数学模型方程

(1) 质量守恒方程：

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho \vec{u}) = S_{\text{mass}} \quad (1)$$

(2) 动量守恒方程：

$$\frac{1}{\varepsilon^2} \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \nabla \cdot \left\{ -p \vec{I} + \mu [\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u}) \vec{I}] \right\} + S_{\text{mom}} \quad (2)$$

(3) 组分守恒方程：

$$\nabla \cdot (-D_i \nabla c_i) + \vec{u} \cdot \nabla c_i = S_i \quad (3)$$

式中：

$$S_i = \begin{cases} S_{\text{H}_2} = -\frac{j_a}{2F} \\ S_{\text{O}_2} = +\frac{j_c}{4F} \\ S_{\text{H}_2\text{O}} = -\frac{j_c}{2F} \end{cases},$$

$$j_a = j_{a,0} \left(\frac{c_{\text{H}_2}}{c_{\text{H}_2}^{\text{ref}}} \right)^{1/2} \left(\frac{\alpha_a + \alpha_c}{RT} F \eta_a \right),$$

$$j_c = -j_{c,0} \left(\frac{c_{\text{O}_2}}{c_{\text{O}_2}^{\text{ref}}} \right) \exp\left(\frac{-\alpha_c}{RT} F \eta_c \right)。$$

1.4 边界条件和模型参数

在数值模拟中，阴/阳极的入口和出口，膜与催化层的界面采用第一类边界条件。固体壁面为无滑移边界条件。表1为计算过程中所用到的材料参数以及燃料电池的操作参数。

在计算过程中，通过改变入口分配槽和出口汇流槽的结构尺寸，研究燃料电池阴极氧气浓度分布情况，所采用的计算方案如表2所示。Case12中流道不均匀分布，流道的深度与宽度没有发生变化，流道中间部分脊宽较小，分别向两边渐渐增大。两流道之间的脊宽从左到右依次为1.1、0.9、0.8、0.7、0.5、0.5、0.7、0.8、0.9、1.1mm。阳极流场与Case6流场一致，并在计算过程中保持不变，阳极入口/出口与阴极入口/出口方向保持一致。

表 1 材料参数与操作参数

参数	值	单位	参考文献
氢气-水蒸气扩散系数	1.08×10^{-4}	m^2/s	[12]
氧气-水蒸气扩散系数	3.32×10^{-5}	m^2/s	[12]
氧气-氮气扩散系数	2.82×10^{-5}	m^2/s	[12]
氮气-水蒸气扩散系数	3.02×10^{-5}	m^2/s	[12]
阳极气体动力粘度	1.101×10^{-5}	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	[13]
阴极气体动力粘度	1.881×10^{-5}	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	[13]
气体扩散层渗透率	1.76×10^{-11}	m^2	[14]
催化层渗透率	1.76×10^{-11}	m^2	[14]
气体扩散层电导率	500	S/m	假设
催化层电导率	1 500	S/m	假设
气体扩散层孔隙率	0.6	—	[13]
催化层孔隙率	0.4	—	[13]
氢气参考浓度	56.4	mol/m^3	[12]
氧气参考浓度	3.39	mol/m^3	[12]
阳极平衡电位	0	V	计算
阴极平衡电位	1.19	V	计算
阳极交换电流密度	1×10^9	A/m^3	[13]
阴极交换电流密度	2×10^4	A/m^3	[13]
阳极气体过量系数	2	—	假设
阴气体过量系数	2.5	—	假设
阳极湿度	80%	—	[11]
阴极湿度	80%	—	[11]
工作温度	338.15	K	[11]
阳极工作压力	0.26	MPa	假设
阴极工作压力	0.26	MPa	假设
阳极入口流量	4.7874×10^{-7}	m^3/s	计算
阴极入口流量	1.4248×10^{-6}	m^3/s	计算

表 2 计算方案

项目	阴极入口分配槽	阴极出口汇流槽	流道说明
Case1	ae=bf=1 mm	dg=ch=1 mm	均匀分布
Case2	ae=bf=1 mm	dg=ch=2 mm	均匀分布
Case3	ae=bf=1 mm	dg=ch=3 mm	均匀分布
Case4	ae=bf=1 mm	dg=ch=4 mm	均匀分布
Case5	ae=bf=1 mm	dg=ch=5 mm	均匀分布
Case6	ae=bf=2 mm	dg=ch=2 mm	均匀分布
Case7	ae=bf=3 mm	dg=ch=2 mm	均匀分布
Case8	ae=bf=4 mm	dg=ch=2 mm	均匀分布
Case9	ae=bf=5 mm	dg=ch=2 mm	均匀分布
Case10	ae=bf=2 mm	dg=ch=3 mm	均匀分布
Case11	ae=2 mm, bf=1 mm	dg=ch=3 mm	均匀分布
Case12	ae=2 mm, bf=1 mm	dg=ch=3 mm	不均匀分布

2结果与分析

2.1出口汇流槽尺寸对阴极氧气浓度分布的影响

图3为在电流密度为 $1\text{A}/\text{cm}^2$ 的条件下，不同出口汇流槽宽度(即Case1, Case2, Case3, Case4与Case5)的情况下，催化层与膜的界面的氧气浓度分布。

可以看出，随着出口汇流槽宽度的增加，流道出口处的氧气浓度增加，这是因为汇流槽宽度增加，流道的压差逐渐变得均匀，如图4所示，并且中部流道的压差渐渐增加，使得中间流道的流速增加，有利于氧气的输送，从而使催化层的氧气浓度增加。同时，出口汇流槽宽度的增加，使氧气浓度最低区域向汇流槽出口方向移动。

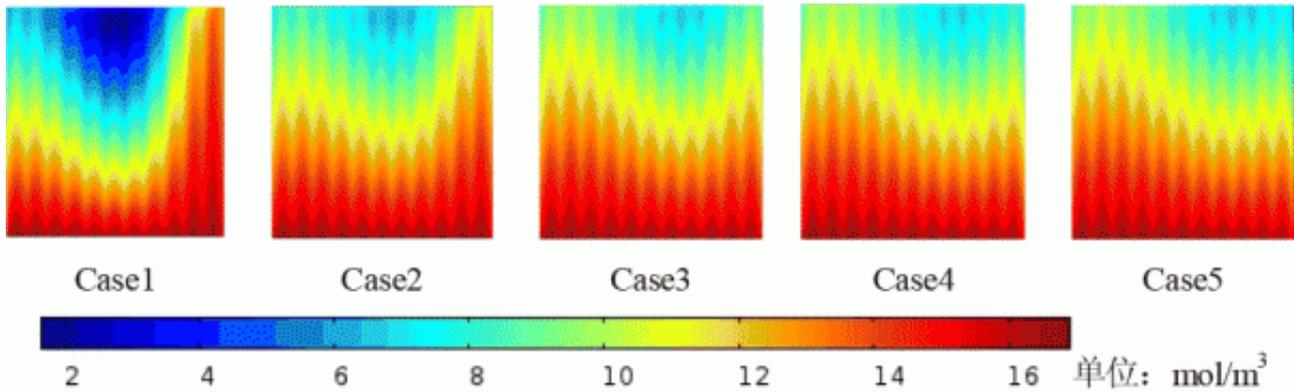


图3 催化层与膜界面的氧气浓度分布

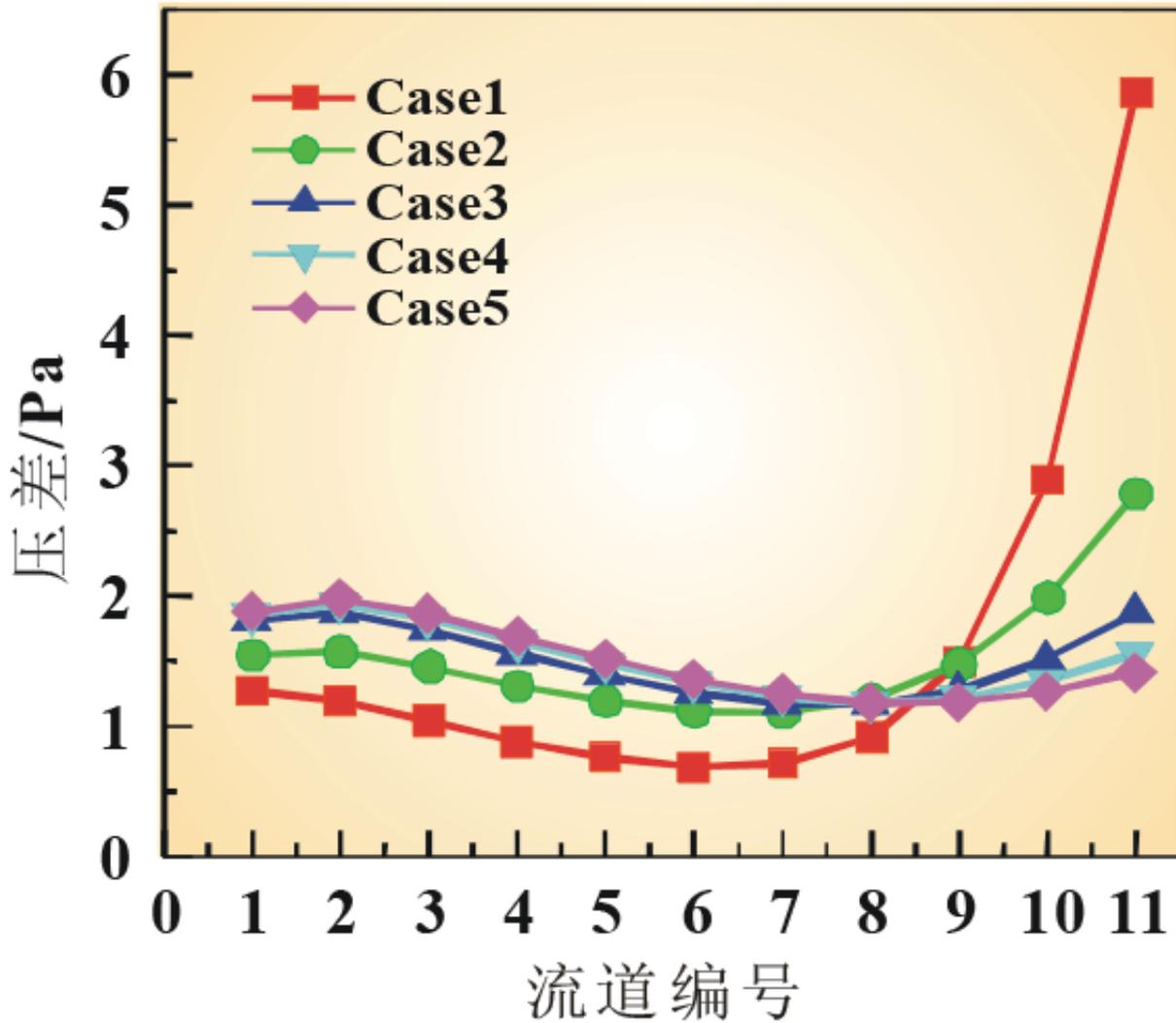


图 4 流道入口与出口的压力差

图5为5个方案的氧气浓度的最低值。随着出口汇流槽宽度的增加，最低氧气浓度逐渐增大，然后趋于稳定。这是由于进气流量是一定的，出口汇流槽宽度的增加，会降低汇流槽内的气体流速，不能将低氧气浓度的混合气及时带出汇流槽，所以汇流槽宽度增加到一定程度后，并不能继续提高最低氧气浓度。

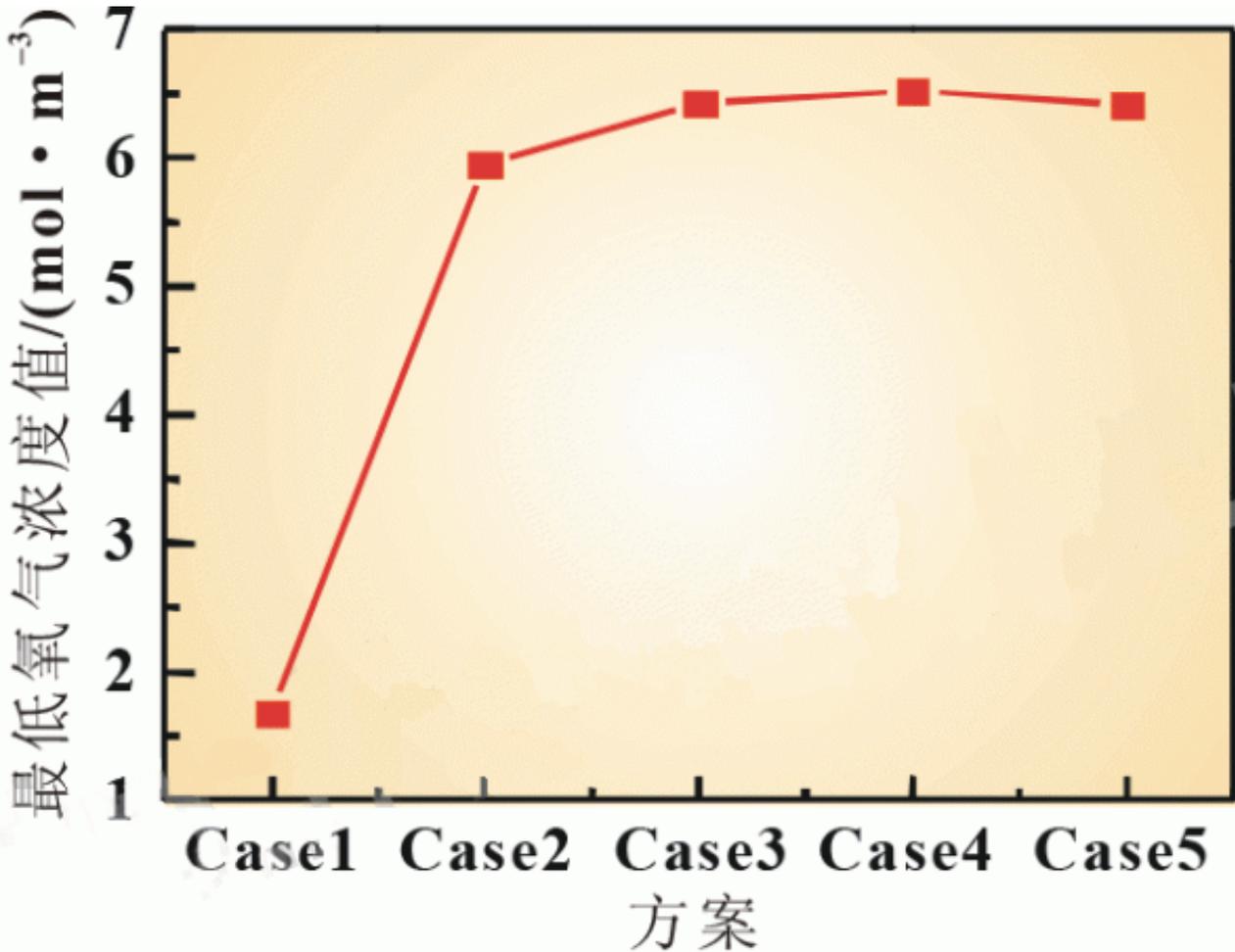


图5 5个方案的氧气浓度最低值

2.2入口分配槽尺寸对阴极氧气浓度分布的影响

图6为在电流密度为1A/cm²的条件下，不同入口分配槽宽度(即Case2, Case6, Case7, Case8与Case9)的情况下，催化层与膜的界面的氧气浓度分布。可以看出，随着分配槽宽度的增加，最低氧气浓度区域向背离槽出口的方向移动。这是因为，进气流量一定的情况下，增加分配槽宽度，分配槽内的气体流速降低，流道的压差逐渐变得不均匀，如图7所示。由于前几段流道的压降较低，流道内气体流速相对较小，氧气不容易输送，使得氧气浓度较低。

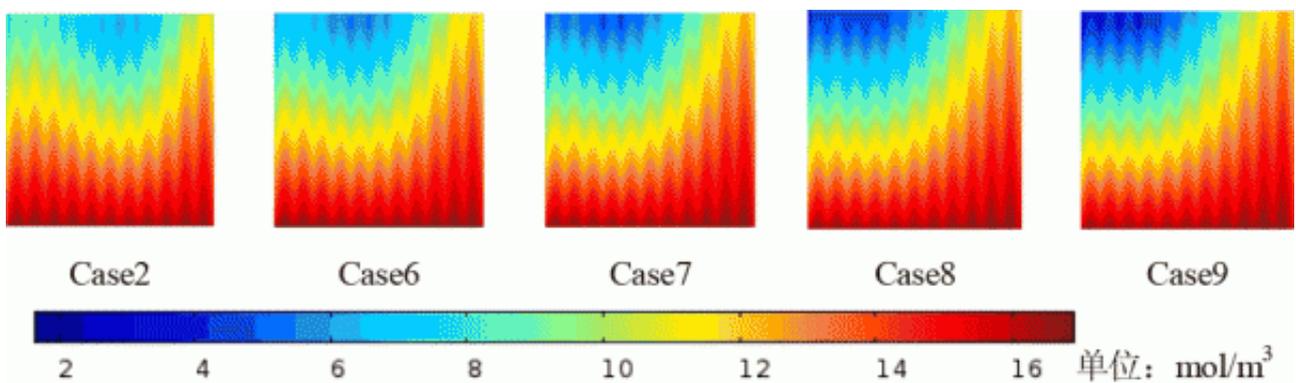


图6 催化层与膜界面的氧气浓度分布

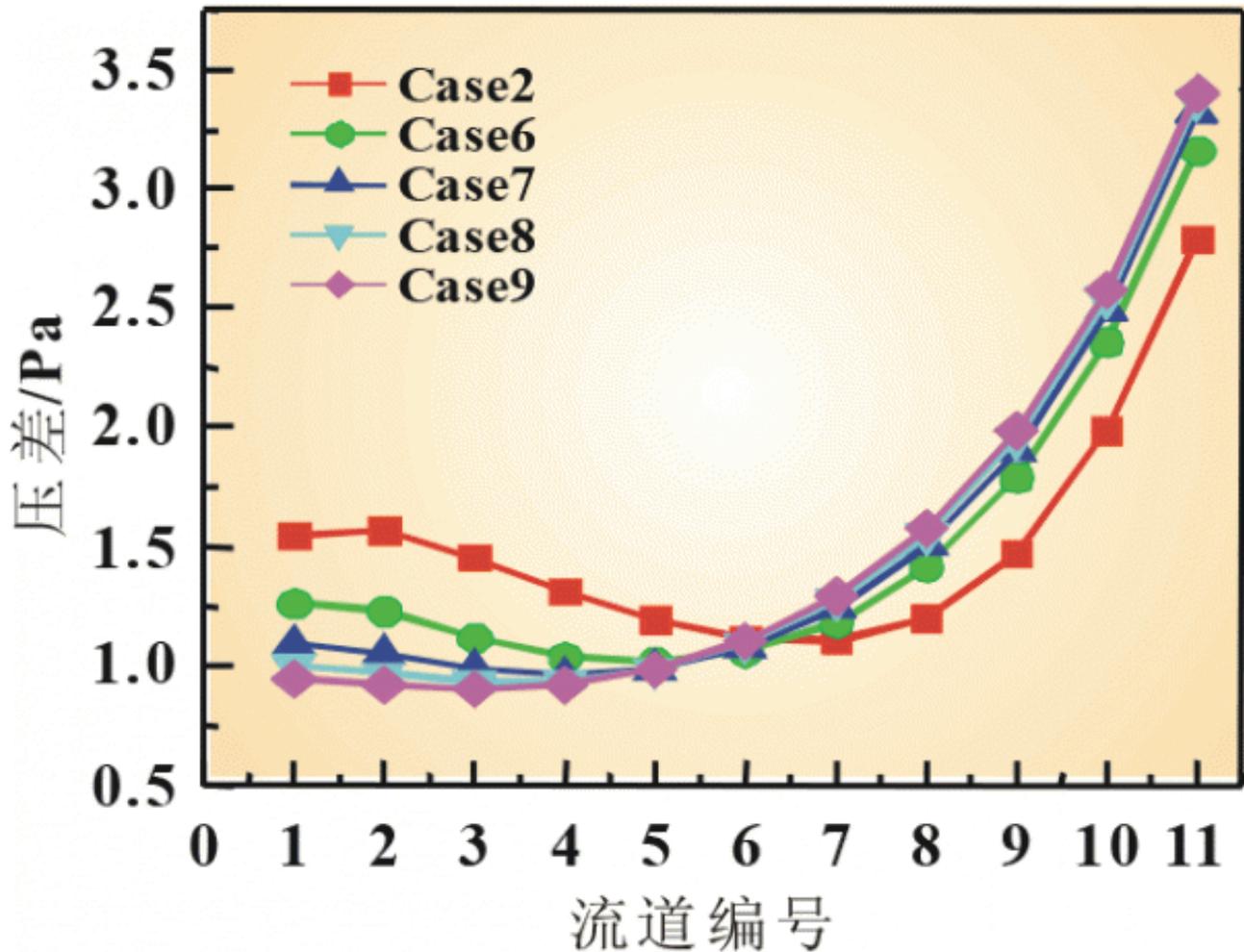


图7 流道入口与出口的压力差

2.3入口分配槽结构及流场分布对阴极氧气浓度分布的影响

图8为Case10, Case11和Case12这三种阴极流场结构下, 电流密度为1A/cm²时, 催化层与膜界面的氧气浓度分布。从Case10与Case11的对比来看, 采用斜入口分配槽的流场, 氧气浓度分布更均匀。这是因为斜入口增加了分配槽后段的阻力, 以致分配槽前段流速增加, 流道的流速分布可从流道的压差图看出, 见图9。从Case11中氧气浓度分布来看, 流道的中下游区域, 依然是最低氧浓度区域, 而氧气的最低值多集中于脊的下方, 因此, 调整流场的脊的分布状态, 有利于流道内氧气浓度的均匀分布, 调整情况如Case12。

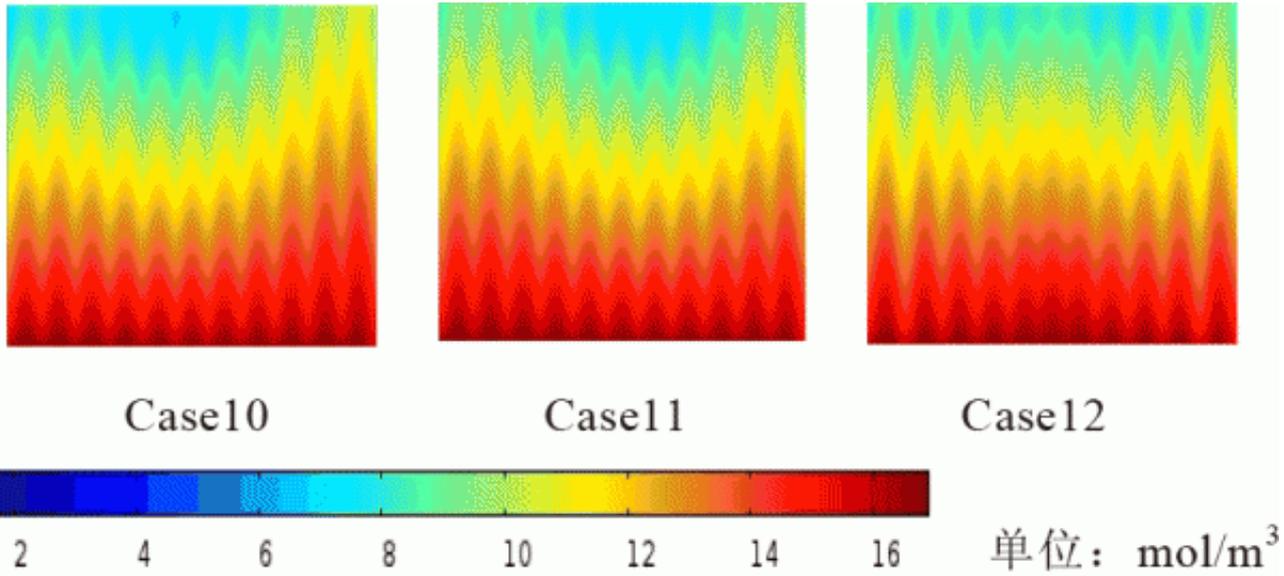


图 8 催化层与膜界面的氧气浓度分布

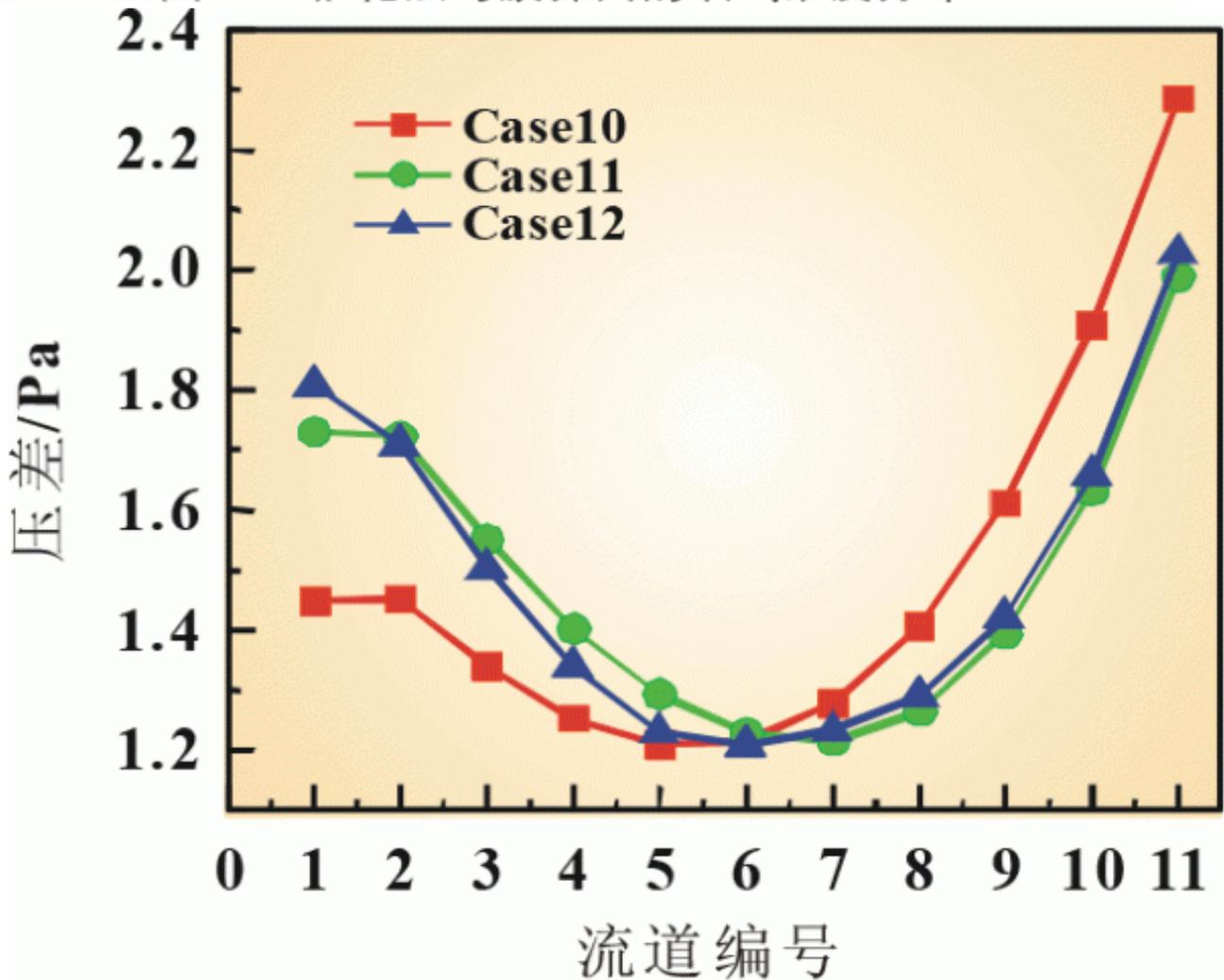


图 9 流道入口与出口的压力差

(1)增加阴极的出口汇流槽宽度,使得各流道的压降更均匀,有利于催化层内氧气浓度的提高及其均匀分布。但是宽度增大到5mm时,汇流槽流速较低,最低氧气浓度值下降。

(2)进气流量一定,增加阴极的入口分配槽宽度,降低了分配槽内的流体流速,各流道的压降均匀性较差,不利于流场内氧气的均匀分布。

(3)分配槽采用斜入口的方式,有利于提高前段流道内的流速,使氧气分布更均匀。

(4)流道间隔的不均匀设计,有利于提高脊下的氧气浓度,增加氧气分布的均匀性。

参考文献:

[1] 衣宝廉. 燃料电池——高效、环境友好的发电方式[M]. 北京:化学工业出版社,2000.

[2] 杨宇,肖荣阔. 燃料电池汽车产业的新能源发展战略研究[J]. 资源与产业,2010,12(2):16-20.

[3] MANSO A P, MARZO F F, BARRANCO J, et al. Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell. A review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37: 15256-15287.

[4] 谭雅巍,姜炜,李增耀,等. 流道结构和几何尺寸对燃料电池性能影响的实验研究[J]. 工程热物理学报,2006,27(6):1026-1028.

[5] 刘志祥,王诚,毛宗强,等. 质子交换膜燃料电池空气流场的优化设计[J]. 清华大学学报:自然科学版,2006,46(12):2081-2085.

[6] 徐云飞,陈奔,余意,等. 渐扩型流场 PEM 燃料电池性能影响研究[J]. 电池工业,2013,18(Z2): 159-162.

[7] WANG J Y. Pressure drop and flow distribution in parallel-channel configurations of fuel cells: Z-type arrangement[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35: 5498-5509.

[8] LEE S, JEONG H, AHN B, et al. Parametric study of the channel design at the bipolar plate in PEMFC performances[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(20): 5691-5696.

[9] HIGIER A, LIU H T. Optimization of PEM fuel cell flow field via

local current density measurement[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(5): 2144-2150.

[10] ROSHANDEL R, ARBABI F, KARIMI M G. Simulation of an innovative flow-field design based on a bio inspired pattern for PEM fuel cells[J]. Renewable Energy, 2012, 41: 86-95.

[11] CHEN B, WANG J, YANG T Q, et al. Mitigation studies of carbon corrosion by optimizing the opening size of the cathode outlet in a proton exchange membrane fuel cell with dead-ended anode[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 119: 60-66.

[12] XING L, MAMLOUK M, SCOTT K. A two dimensional agglomerate model for a proton exchange membrane fuel cell[J]. Energy, 2013, 61: 196-210.

[13] SUN P T. Modeling studies and efficient numerical methods for proton exchange membrane fuel cell[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011, 200(47/48): 3324-3340.

[14] FERNG Y M, SU A. A three-dimensional full-cell CFD model used to investigate the effects of different flow channel designs on PEMFC performance[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32: 4466-4476.

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/163104.html>