

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2019.05.001

## 固体氧化物燃料电池连接体新结构设计及性能优化

付全荣,魏 炜,刘凤霞,杨 潮,冯义博,帕力扎提·阿斯克爾,刘志军

(大连理工大学 流体与粉体工程研究设计所,辽宁 大连 116024;大连理工大学 化工机械与安全学院,辽宁 大连 116024)

**摘要:**固体氧化物燃料电池(SOFC)是一种将燃料的化学能直接转换成电能的发电装置,其中流场均匀性对电池性能有显著影响,而连接体内部结构是决定流场均匀性的重要因素。采用数值模拟方法对连接体进行设计,以实现电池性能的最优化。研究表明:与普通连接体相比,添加泡沫 Ni 后,流场均匀性提高了 15% 以上。通过组合不同孔隙率的泡沫 Ni,流场均匀度指数可达到 95% 以上,最大功率密度提高了 11.4%。

**关键词:**固体氧化物燃料电池(SOFC);连接体;流场均匀性;结构设计

中图分类号:TQ 515.8

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2019)05-0001-08

### New Structure Design and Performance Optimization of Solid Oxide Fuel Cell Connector

FU Quanrong, WEI Wei, LIU Fengxia, YANG Chao, FENG Yibo, PALIZHATI Asikeer, LIU Zhijun

(Research & Design Institute of Fluid and Power Engineering, School of Chemical Machinery and Safety Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Solid oxide fuel cell (SOFC) is a power generation device that converts chemical energy of fuel directly into electricity. Its flow field uniformity has a significant influence on battery performance. The internal structure of the connectome was one of the most important factors to determine the flow field uniformity. A new connectome structure was designed and a simulation was established for optimization design. The results showed that the flow field uniformity was increased by more than 15% after the addition of Ni foam. By combining foam Ni with different porosity, the flow field uniformity index can reach more than 95%, and the maximum power density is increased by 11.4%.

**Key words:** solid oxide fuel cell (SOFC); connectome; flow fields uniformity; structural design

收稿日期:2019-03-26。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21676049)。

作者简介:付全荣(1984—),男,山东泰安人,博士生。通信联系人:刘志军(1969—),E-mail: liuzj@dlut.edu.cn

引用本文:付全荣,魏炜,刘凤霞,等. 固体氧化物燃料电池连接体新结构设计及性能优化[J]. 常州大学学报(自然科学版),2019,31(5):1-8.

近年来,由于环境问题和能源危机的日益严重,大量研究聚焦在开发既高效又清洁的能源技术上。固体氧化物燃料电池(SOFC)是一种在中高温(600~1 000 ℃)下,直接将储存在燃料和氧化剂中的化学能高效、环境友好地转化成电能的最有效率的全固态化学发电装置。SOFC 因其在工作中具有无需昂贵的催化剂,可以采用天然气、煤基合成气等更安全廉价的碳氢燃料代替纯氢气等优势,使其成为当今世界能源领域的开发热点。目前,制备 SOFC 的材料已获得广泛研究,在实验室条件下 SOFC 获得的功率可高达 2 W/cm<sup>2</sup>。但将实验室尺寸电池放大后,其性能急剧下降,严重限制了商业应用。Yakabe 等<sup>[1]</sup>研究发现反应物分布的不均匀性是放大后电池性能急剧恶化的关键原因。因此,通过改进 SOFC 堆的连接体结构、优化 SOFC 流场均匀性,对提高电池性能、推进其商业化进程具有重要意义。

典型的板式 SOFC 是由阳极-电解质-阴极(PEN)和阳极侧及阴极侧的连接体构成。连接体作为 SOFC 的重要组成部件,其流场设计直接影响电池堆的传质阻力。其合理结构关系到电池的输出性能和长期稳定性。流场应使电池堆气路的压降达到最小,同时为电化学反应提供从流道到电极表面均匀分布的反应物气体,但目前对于连接体的研究工作大多集中在材料的选择和表面改性等方面,而对与复杂流动、传热、传质密切相关的连接体结构的研究还没有得到广泛关注。连接体一般可以分为 3 个区域,如图 1 所示。

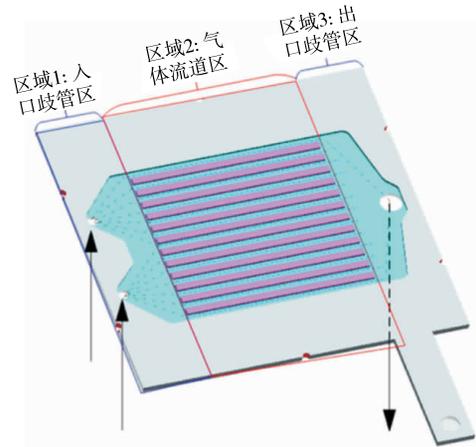


图 1 普通连接体结构图

如图 2 所示,Yakabe 等<sup>[1]</sup>对侧面开孔的气路歧管和平行直通道建立了三维数学模型(图 2(a))。Huang 等<sup>[2]</sup>在入口歧管区设置了 10 个等间距的导向叶片(图 2(b))。Jackson 等<sup>[3]</sup>将 Z 型气路歧管进行了优化,降低了进入平行直通道中气体流场的不均匀性(图 2(c))。Dey 等<sup>[4]</sup>在入口和出口歧管区添加了边长为 1.5 mm 的方形柱体,通过增加气体的扰动提高流场均匀性(图 2(d))。Duhn 等<sup>[5]</sup>设计了一种新型的气体分布器,可将气流均匀分配到平行直通道中(图 2(e))。

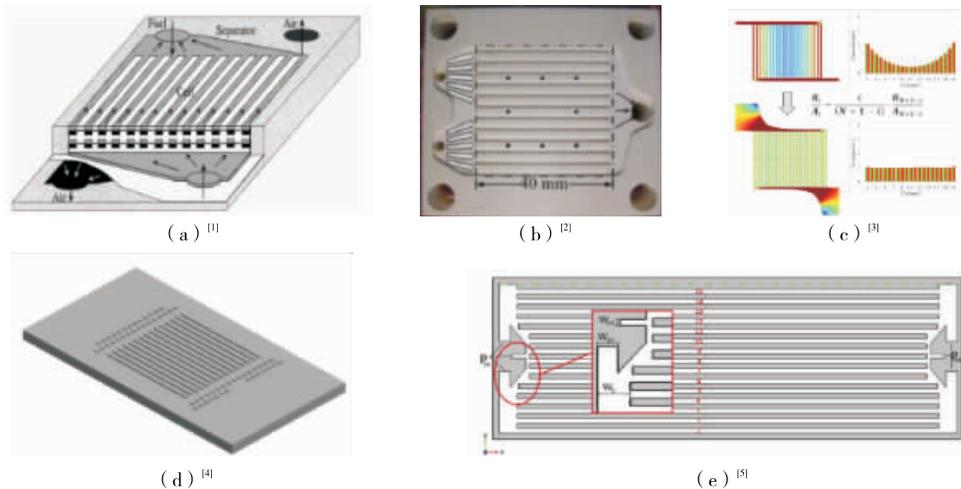


图 2 板式 SOFC 气路歧管结构图

连接体在电池堆设计中最常见的气体流道结构有蛇形结构、平行直通道结构、交叉结构及柱状结构。蛇形结构的流场和交叉结构的流场通道较长,有利于提高燃料气的利用率,但会造成较大的压降且加工成本高。在平行流场设计结构中,流道中压降较小,但流道中产生传质障碍会导致剩余流道中气流

的重新分布,造成气体分配不均。而点状流场结构虽然可以满足低传质极化的要求,但由于其电接触和支撑面积小,对单电池的性能和强度要求较高。如图 3 所示为部分板式 SOFC 气体流道示意图, Ashok 等<sup>[6]</sup>发明了常用平行直流道结构,这是目前最常用的通道结构(图 3(a))。Nguyen 等<sup>[7]</sup>在平行直通道上每隔一定间隔开凹槽,来增大各个通道中气流的扰动(图 3(b))。Dong<sup>[8]</sup>和 Su<sup>[9]</sup>等使用不连续的对称圆柱体构建了点状流场通道(图 3(c)、图 3(d))。Chen 等<sup>[10]</sup>设计了一种新型双层连接体结构,可以显著提高多孔阳极中燃料气的速度(图 3(e))。Yan 等<sup>[11]</sup>设计了一种螺旋结构连接体,可增加流入多孔电极中气体流量,提高燃料利用率(图 3(f))。

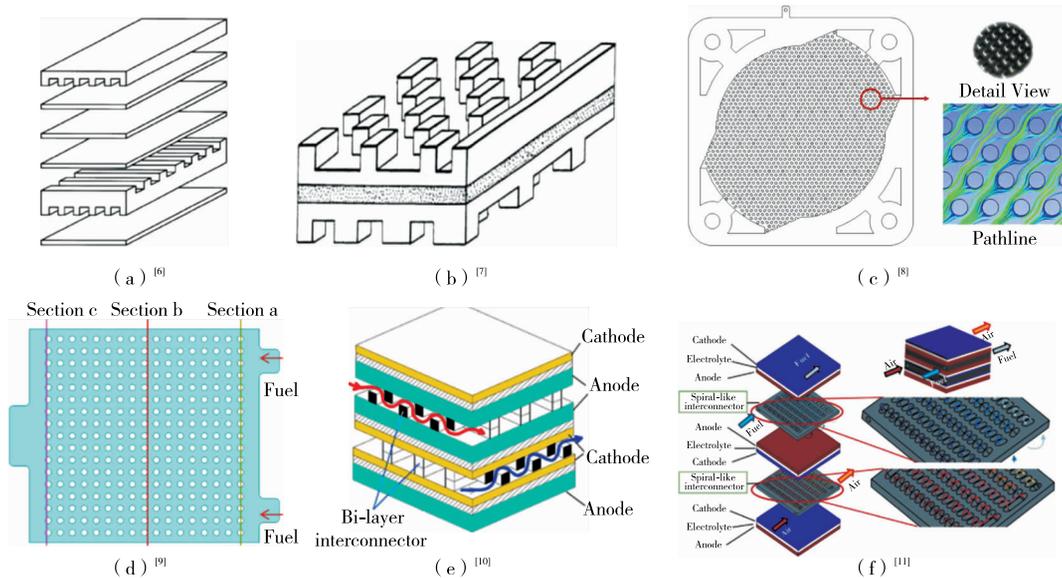


图 3 板式 SOFC 气体流道示意图

Jiang 等<sup>[12]</sup>研究了连接体与电极接触面积对阳极支撑 SOFC 性能的影响。结果表明:在  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下,当接触面积从  $4.6\%$  增加到  $27.2\%$  时,接触电阻从  $1.43\text{ }\Omega/\text{cm}^2$  下降到  $0.19\text{ }\Omega/\text{cm}^2$ ,下降比率高达  $80\%$ 。Tanner 和 Virkar<sup>[13]</sup>给出了电解质支撑 SOFC 循环单元的面积比电阻与肋尺寸间的对应关系式,并基于此关系对两种不同设计连接体电池的输出性能进行了对比分析。Zhu 和 Kee<sup>[14]</sup>研究了阳极支撑管式 SOFC 轴向分布的连接体对其输出性能的影响,发现连接体对轴向的燃料组分、温度分布、电流密度等有强烈的影响。Liu 等<sup>[15]</sup>经过对阳极支撑 SOFC 的研究发现,肋尺寸对阳极气体的运输影响可以忽略,而在阴极却出现了一个  $0.46\text{ mm}$  (占 pitch 宽度的  $23\%$ ) 宽的无氧区。基于此发现,在设计阳极支撑 SOFC 连接体时,为了降低阳极与连接体间的接触电阻,通常阳极肋尺寸应大些。Kee 等<sup>[16]</sup>建立了一种用于描述平板式 SOFC 气道中流场分布的数学模型,通过模拟无尺寸变量问题来求解质量和动量方程,来对单气道中的压降和流动均匀性进行预测,最后得到两套无尺寸变量形式,对连接体气道设计具有一定的指导意义。Kornely 等<sup>[17]</sup>研究了阳极肋尺寸和阴极肋尺寸对电池输出性能的影响,结果显示阳极肋尺寸对电池输出性能的影响可以忽略不计。Lin 等<sup>[18]</sup>提出了一种模型和解析表达式来估计肋尺寸对阳极支撑 SOFC 堆的浓差极化以及欧姆极化的影响。Chen 等<sup>[19]</sup>提出了一种新型双层连接体,此种设计不但提高了气道中气体的流动速率,而且还增强了气道中气体的扰动,使得多孔电极中的传质得到了一定提高,有效降低了浓度损耗。Andreassi 等<sup>[20]</sup>对圆形平板式 SOFC 的射线流动进行了实验研究和理论分析。Shi 等<sup>[21]</sup>对带有微气道嵌入式齿形连接体的双电极支撑 SOFC 进行了相关研究,结果发现,这种新型设计不但能够有效地加强燃料气和氧化气的通入量,而且使电池堆的结构也更

加紧凑。Li 等<sup>[22]</sup>提出了一种离散式柱形连接体,通过反应面积的最大化及电极中传质的提高,获得了较高的功率密度。

从国内外研究动态看出,对连接体的所有研究工作都在向减小浓差极化与欧姆极化的方向发展。大部分连接体采用平行直通道配置,一方面有利于 SOFC 的支撑,另一方面可以保证良好的电接触,有利于集电。虽然平行直通道流场配置的压降比点状流场大,但其对单电池的强度和性能要求相对较低。为了进一步降低平行直通道流场的压降,以及提高反应气分布的均匀性,设计了一种新的连接体结构,并对流场均匀性进行了分析。

## 1 模型描述

### 1.1 几何模型

为了使反应器分布更加均匀,将连接体设计为 2 个进气孔,1 个出气孔。将图 4 所示连接体的区域 1 进行了优化,并与传统连接体性能进行了比较。该连接体共 13 个气体通道,对于区域 1,通过添加不同孔隙率的泡沫金属 Ni 来增加气体的扰动,使流入区域 2 每个通道中的气体速度更加均匀。其中,图 4(a)为普通连接体,图 4(b)为添加导向板的连接体,图 4(c)~图 4(f)为改进的添加不同孔隙率开孔泡沫金属 Ni 的连接体。

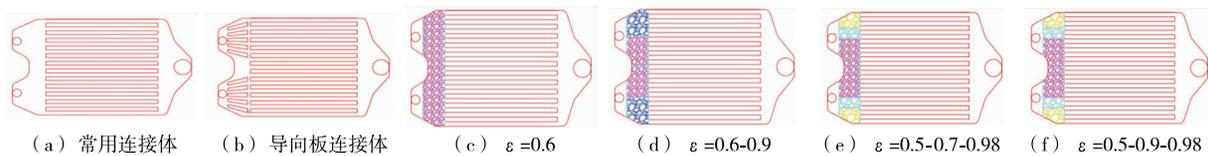


图 4 6 种不同设计的流体分布器示意图

### 1.2 输运方程

1) 质量守恒控制方程

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = Q_{br} \quad (1)$$

2) 组分传递控制方程

$$\nabla \cdot (\rho \omega_i \mathbf{V}) + \nabla \cdot \mathbf{J}_i = R_i \quad (2)$$

式中: $\rho$  是混合气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\mathbf{V}$  是速度矢量,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $Q_{br}$  是质量源项,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ;  $\omega_i$  是质量分数;  $R_i$  是生成率,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ , 利用 Faraday 定律确定, 如式(3);  $\mathbf{J}_i$  是扩散通量,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 利用扩散模型确定, 如式(4)。

$$R_i = \frac{i}{nF} S_a M_i \quad (3)$$

式中: $i$  是电极表面电流密度,  $\text{A}/\text{m}^2$ ;  $S_a$  是活性比表面积,  $\text{m}^2/\text{m}^3$ ;  $F$  是 Faraday 常数;  $n$  是电极反应转移电荷数, 模拟中为 2;  $M_i$  是物质  $i$  的摩尔质量,  $\text{kg}/\text{mol}$ 。

$$\mathbf{J}_i = -\rho D_{i,\text{eff}} \nabla \omega_i \quad (4)$$

式中  $D_{i,\text{eff}}$  为有效扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ , 可由式(5)计算。

$$D_{i,\text{eff}} = \frac{\varepsilon}{\tau} \left( \frac{1}{D_{\text{mix},i}} + \frac{1}{D_{Kn,i}} \right)^{-1} \quad (5)$$

式中: $\varepsilon$  是孔隙率;  $\tau$  是曲折度;  $D_{Kn,i}$  为 Knudsen 扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ , 可由式(6)计算;  $D_{\text{mix},i}$  为混合物平均扩

散系数,  $m^2/s$ , 可由式(7)计算。

$$D_{Kn,i} = \frac{d_p}{3} \left( \frac{8R\Theta}{\pi M_i} \right)^{0.5} \quad (6)$$

式中:  $d_p$  是孔径,  $m$ ;  $\Theta$  是热力学温度,  $K$ 。

$$D_{mix,i} = \frac{1 - x_i}{\sum_{j \neq i} x_j / D_{ij}} \quad (7)$$

式中:  $x_i$  和  $x_j$  是组分  $i$  和  $j$  的物质的量分数;  $D_{ij}$  为 Stefan-Maxwell 二元扩散系数,  $m^2/s$ , 可由式(8)计算。

$$D_{ij} = \frac{3.16 \times 10^{-4} \Theta^{1.75} (1/M_i + 1/M_j)^{1/2}}{\rho [(v_i)^{1/3} + (v_j)^{1/3}]^2} \quad (8)$$

式中:  $v_i$  和  $v_j$  是组分  $i$  和  $j$  的扩散体积,  $cm^3/mol$ 。

### 3) 动量传递控制方程

SOFC 中涉及的流动现象主要是气体在通道中的流动和气体在多孔电极区域的流动问题。气体在通道内的流动现象可以由 N-S 方程来描述

$$\rho(\mathbf{V} \cdot \nabla)\mathbf{V} = \nabla \cdot [-p\boldsymbol{\delta} + \mu(\nabla\mathbf{V} + (\nabla\mathbf{V})^T)] \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{V}$  是速度矢量,  $m/s$ ;  $p$  是混合气体总压,  $Pa$ ;  $\boldsymbol{\delta}$  为单位矩阵;  $\mu$  为混合气体动力黏度,  $kg/(m \cdot s)$ 。

气体在多孔电极区域的流动属于多孔介质渗流, Darcy 定律是渗流的基本定律, 将 Darcy 定律和 N-S 方程结合, 形成描述多孔介质流动的 Brinkman 方程

$$\frac{\rho}{\epsilon} ((\mathbf{V} \cdot \nabla) \frac{\mathbf{V}}{\epsilon}) = \nabla \cdot [-p\boldsymbol{\delta} + \frac{\mu}{\epsilon} (\nabla\mathbf{V} + \nabla\mathbf{V}^T) - \frac{2}{3} \frac{\mu}{\epsilon} (\nabla \cdot \mathbf{V}) \boldsymbol{\delta}] - \frac{\mu}{B_0} \mathbf{V} \quad (10)$$

式中  $B_0$  为多孔介质的渗透率。

### 4) 热量传递控制方程

SOFC 内的传热机制有多孔介质区域的热传导、流体区域的对流, 热量传递控制方程为

$$\rho C_p \mathbf{V} \cdot \nabla \Theta + \nabla \cdot (-k_{eff} \nabla \Theta) = Q_h \quad (11)$$

### 5) 电荷传递控制方程

电化学反应实现了电荷传递, 电荷守恒可以由欧姆定律来表示:

$$\nabla \cdot (-\sigma_e^{eff} \nabla \phi_e) = -S_a i \quad \nabla \cdot (-\sigma_{ion}^{eff} \nabla \phi_{ion}) = S_a i \quad (12)$$

$$\sigma_e^{eff} = \sigma_e \theta_{E.C} (1 - \epsilon) \quad \sigma_{ion}^{eff} = \sigma_{ion} (1 - \theta_{E.C}) (1 - \epsilon) \quad (13)$$

式中:  $\sigma_e$  和  $\sigma_{ion}$  分别是电子电导率和离子电导率,  $S/m$ ;  $i$  是电流密度,  $A/m^2$ ;  $\theta_{E.C}$  是电极材料中电子导体颗粒的体积分数, 阳极、阴极分别为 0.4, 0.6。

## 1.3 求解方法

利用商业有限元软件 COMSOL 5.3 分离式求解器进行求解。二次电流密度接口使用 MUMPS 直接线性求解器求解; 自由和多孔介质流动、多孔介质内传热接口使用 PARDISO 直接线性求解器求解; 浓物质传递接口使用迭代求解器求解。相对误差为  $1 \times 10^{-3}$ 。

## 2 模型分析

### 2.1 速度场分布

建立了三维 SOFC 几何数学模型, 全面耦合多通道 SOFC 内的多物理场传递过程, 其中包括: 质

量、动量、能量、电子和氧离子等传递过程及电化学反应。图 5 给出了入口速度为 2 m/s 时,气体流道中流场的速度分布图,可看出常用连接体中间流道速度明显高于两侧流道,而添加导向肋板后,会造成入口歧管区某些局部流场速度过高或过低,从而对平行直通流道流场有一定影响。从图 5(c)~图 5(f)可看出,添加泡沫 Ni 后明显使流场更加均匀,而且通过使用不同孔隙率的泡沫 Ni,可以明显改变不同流场区域的速度梯度,从而使整个流场更加均匀。

图 6 对 6 种连接体结构中 13 个通道中速度分布进行了比较,可看出常用连接体中间通道速度最高,是边缘两侧通道 1.7 倍,各通道流速( $u_i$ )与整个流场平均流速( $\bar{u}$ )的比值介于 0.78~1.36;添加导向肋板的连接体  $u_i/\bar{u}$  介于 0.84~1.26,流场均匀性有所改善;而添加不同孔隙率的泡沫 Ni 后, $u_i/\bar{u}$  最大介于 0.89~1.06,最小值介于 0.93~1.03,流场均匀性得到较大改善。

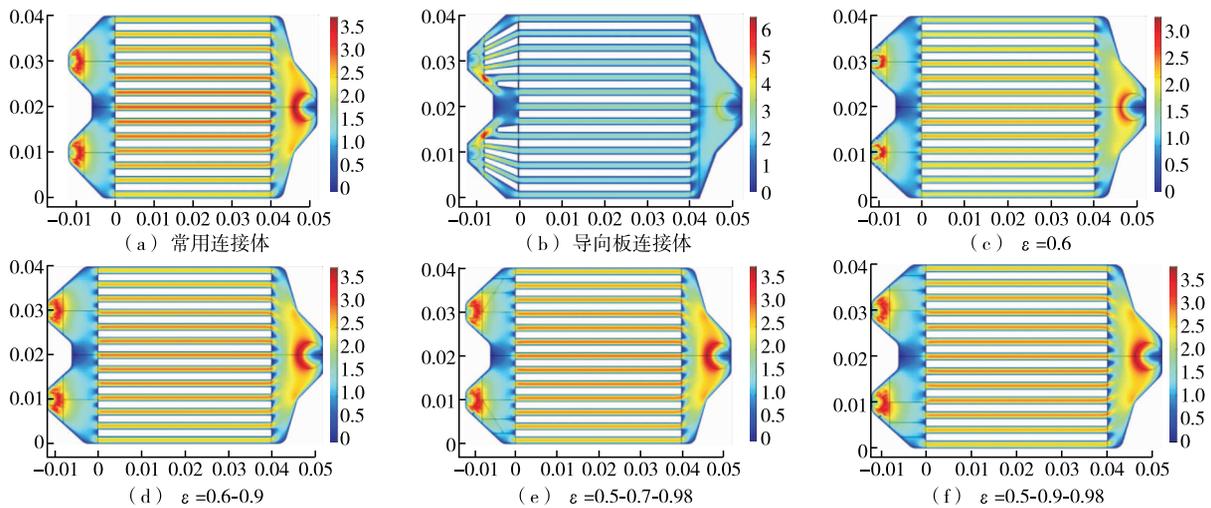


图 5 SOFC 连接体中面流场速度分布图

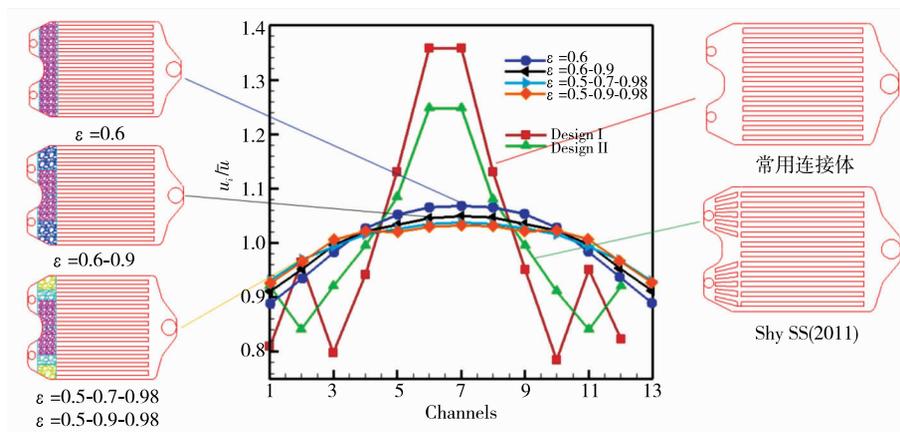


图 6 6 种连接体结构中 13 个通道中速度分布图

## 2.2 流场均匀度指数

采用流场均匀性指数(式(14))来表征流场的均匀性.对一个完美的均匀流场,流场均匀性指数是 1,非均匀性指数是 0。对非均匀流场,指数介于[0,1]之间。

$$\Gamma = \left\{ 1 - \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{u_i - \bar{u}}{\bar{u}} \right)^2 \right]^{0.5} \right\} \times 100\% \quad (14)$$

表 1 给出了 6 种设计对  $u_{\min}/u_{\max}$ ,  $u_{\min}/u_{\text{avg}}$  和流场均匀度指数  $\Gamma$  的比较结果。也可以看出,通过添加开孔泡沫金属 Ni 可以显著提高流场均匀度,与普通连接体相比,添加泡沫 Ni 后,  $\Gamma$  提高了 15% 以上。并且通过组合不同孔隙率的泡沫 Ni,流场均匀度指数可达到 95% 以上。

表 1 6 种设计的流场均匀性比较

	普通	导向板	$\epsilon=0.6$	$\epsilon=0.6-0.9$	$\epsilon=0.5-0.7-0.98$	$\epsilon=0.5-0.9-0.98$
$u_{\min}/u_{\max}$	0.795 4	0.809 4	0.831 2	0.868 0	0.897 6	0.898 4
$u_{\min}/u_{\text{avg}}$	0.873 1	0.895 8	0.891 5	0.912 8	0.928 4	0.928 9
$\Gamma/\%$	80.53	86.65	93.58	95.20	96.33	96.33

### 2.3 性能对比

如图 7 所示,对改进后的连接体( $\epsilon=0.6-0.9$ )和普通连接体的电性能进行了比较。普通连接体存在明显的浓差极化,而改进后连接体可明显降低浓差极化。且当  $I < 0.7 \text{ A/cm}^2$  时改进后连接体性能略高于普通连接体;而当  $I > 0.7 \text{ A/cm}^2$  时,改进后连接体电压和功率密度明显高于普通连接体;与普通连接体相比,最大功率密度提高了 11.4%。

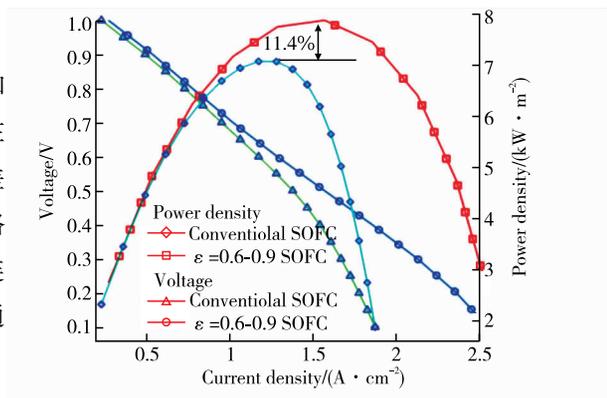


图 7 不同连接体 SOFC 极化曲线图

### 3 结 论

文章设计了一种新的连接体结构,并采用数值模拟进行了优化设计。通过添加不同孔隙率的泡沫金属 Ni 来增加气体的扰动,提高 SOFC 流场的均匀性。结果表明:

1) 与普通连接体相比,添加泡沫 Ni 后,流场均匀性提高了 15% 以上。通过组合不同孔隙率的泡沫 Ni,流场均匀度指数可达到 95% 以上。

2) 对改进后的连接体( $\epsilon=0.6-0.9$ )和普通连接体的电性能进行了比较。普通连接体存在明显的浓差极化,而改进后连接体可明显降低浓差极化。且当  $I < 0.7 \text{ A/cm}^2$  时改进后连接体性能略高于普通连接体;而  $I > 0.7 \text{ A/cm}^2$  后,改进后连接体电压和功率密度明显高于普通连接体;与普通连接体相比,最大功率密度提高了 11.4%。

### 参考文献:

[1]YAKABE H, OGIWARA T, HISHINUMA M, et al. 3-D model calculation for planar SOFC[J]. Journal of Power Sources, 2001, 102(1/2): 144-154.

[2]HUANG C M, SHY S S, LI H H, et al. The impact of flow distributors on the performance of planar solid oxide fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(19): 6280-6286.

[3]JACKSON J M, HUPERT M L, SOPER S A. Discrete geometry optimization for reducing flow non-uniformity, asymmetry, and parasitic minor loss pressure drops in Z-type configurations of fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2014, 269: 274-283.

[4]DEY T, SINGDEO D, BASU R N, et al. Improvement in solid oxide fuel cell performance through design modifica-

- tions; an approach based on root cause analysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(30): 17258-17266.
- [5] DUHN J D, JENSEN A D, WEDEL S, et al. Optimization of a new flow design for solid oxide cells using computational fluid dynamics modelling[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 336: 261-271.
- [6] KHANDKAR A C, ELANGO VAN S. Electrical connector apparatus for planar solid oxide fuel cell stacks; US5856035[P].1999-01-05.
- [7] MINH N Q, HORNE C R. Method of fabricating a monolithic solid oxide fuel cell; US5290642[P].1994-03-01.
- [8] DONG S K, JUNG W N, RASHID K, et al. Design and numerical analysis of a planar anode-supported SOFC stack [J]. *Renewable Energy*, 2016, 94: 637-650.
- [9] SU S C, HE H H, CHEN D F, et al. Flow distribution analyzing for the solid oxide fuel cell short stacks with rectangular and discrete cylindrical rib configurations[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(1): 577-592.
- [10] CHEN Q Y, WANG Q W, ZHANG J, et al. Effect of bi-layer interconnector design on mass transfer performance in porous anode of solid oxide fuel cells [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(9/10): 1994-2003.
- [11] YAN M, FU P, LI X, et al. Mass transfer enhancement of a spiral-like interconnector for planar solid oxide fuel cells [J]. *Applied Energy*, 2015, 160: 954-964.
- [12] JIANG S P, LOVE J G, APATEANU L. Effect of contact between electrode and current collector on the performance of solid oxide fuel cells[J]. *Solid State Ionics*, 2003, 160(1/2): 15-26.
- [13] TANNER C W, VIRKAR A V. A simple model for interconnect design of planar solid oxide fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 113(1): 44-56.
- [14] ZHU H Y, KEE R J. The influence of current collection on the performance of tubular anode-supported SOFC cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 169(2): 315-326.
- [15] LIU S X, SONG C, LIN Z J. The effects of the interconnect rib contact resistance on the performance of planar solid oxide fuel cell stack and the rib design optimization[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 183(1): 214-225.
- [16] KEE R J, KORADA P, WALTERS K, 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.
- [17] KORNELY M, LEONIDE A, WEBER A, et al. Performance limiting factors in anode-supported cells originating from metallic interconnector design[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(17): 7209-7216.
- [18] LIN Z J, STEVENSON J W, KHALEEL M A. The effect of interconnect rib size on the fuel cell concentration polarization in planar SOFCs[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 117(1/2): 92-97.
- [19] CHEN Q Y, ZENG M, ZHANG J, et al. Optimal design of bi-layer interconnector for SOFC based on CFD-Taguchi method[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(9): 4292-4300.
- [20] ANDREASSI L, RUBELO G, UBERTINI S, et al. Experimental and numerical analysis of a radial flow solid oxide fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(17): 4559-4574.
- [21] SHI J X, XUE X J. CFD analysis of a novel symmetrical planar SOFC design with micro-flow channels[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 163(1/2): 119-125.
- [22] LI P W, CHEN S P, CHYU M K. To achieve the best performance through optimization of gas delivery and current collection in solid oxide fuel cells[J]. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2006, 3(2): 188.

(责任编辑:李艳)