

# 螺杆集成方式对燃料电池电化性能的影响

张智明<sup>1,2</sup>, 胡 淞<sup>1,2</sup>, 施晓珺<sup>1,2</sup>, 杨代军<sup>1,2</sup>

(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)

**摘要:** 以 15 片单体电池组成燃料电池电堆为研究对象, 进行电化性能、交流阻抗与内部接触压力分布的试验测试. 系统全面地研究了螺杆集成方式燃料电池电堆电化性能的影响, 深入剖析集成力大小和加载方式对燃料电池电堆内欧姆交流阻抗和内部接触压力分布的作用机制, 螺杆集成方式不利于电堆电化性能的高功率输出. 得出电堆内压力分布均匀性和燃料电池电化性能的提高不应仅局限于集成力大小, 更重要的是均匀的集成力加载方式, 以及配合端板结构进行优化和匹配.

**关键词:** 燃料电池质子交换膜; 集成力; 欧姆阻抗; 压力分布; 电化性能

**中图分类号:** TM911.4

**文献标志码:** A

## Experimental Study of Clamping Force to Electromechanical Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack

ZHANG Zhiming<sup>1,2</sup>, HU Song<sup>1,2</sup>, SHI Xiaojun<sup>1,2</sup>, YANG Daijun<sup>1,2</sup>

(1. School of Automobile Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** This study is mainly on electrochemical performance testing, electrochemical impedance spectroscopy (EIS) testing and contact pressure distribution testing with a fuel cell stack of 15 cells, systematically study the influence of assembly force to the electrochemical performance of fuel cell stack. Experiment results show that the assembly force and loading type have influence on the internal ohmic impedance and pressure distribution, and bolt assembly is negative to the high power output of fuel cell performance. The results indicate improvement of fuel cell performance and uniformity of contact pressure should non only consider the assembly force, but also more attention to the uniform loading type and optimization of end plate structure.

**Key words:** fuel cell proton exchange membrane; assembly force; ohmic impedance; pressure distribution; electrochemical performance

目前车用质子交换膜燃料电池发动机核心是电堆, 由上百个单体电池通过前后端板, 采用螺杆将循环层叠结构串联集成在一起. 电池单体典型结构包括膜电极、双极板和密封件, 膜电极包括气体扩散层、质子交换膜和催化剂层. 膜电极置于双极板间组成一种“三明治”结构, 密封件为电堆提供气密性保障, 燃料电池的反应气体(氢气/空气)主要在双极板流道传输, 通过扩散作用穿过气体扩散层到达催化剂层发生电化学反应. 为保证电堆的正常工作, 需要提供足够大的力将双极板、密封胶和膜电极集成在一起, 保证电堆内单体电池间的紧密接触, 接触界面存在于双极板与膜电极之间, 具体是双极板脊背和膜电极上的气体扩散层发生接触, 电子通过接触面传递, 形成电流. 因此, 电堆是一种典型的“多接触面的层叠结构”, 电堆集成力分配形式及大小会使接触界面上受力和产生变形, 进而影响燃料电池电化性能.

目前, 电堆集成工艺主要依赖经验和手工集成, 效率低且精度较差<sup>[1]</sup>. 电堆集成受力使双极板脊背与扩散层接触面上压力重新分布, 主要基于 2 个原因: 一是螺杆集成方式带来的预紧受力不均, 二是双极板存在间隔分布的流场和脊背. 接触压力大的部分在双极板脊背下方, 气体扩散层受压导致脊背间距离缩短, 电子传输路径缩短, 有利于电子传输; 但同时扩散层流道侵入量增大, 影响流道内反应气体的传输和扩散, 进而影响燃料电池电化性能. 本文针对螺杆集成力施加形式和大小对燃料电池电化性能的影响, 通过试验研究的方法, 分析其影响

收稿日期: 2017-04-11

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51405344); 中央高校基本科研业务费专项资金(22120170230)

第一作者: 张智明(1979—), 男, 讲师, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为燃料电池汽车发动机关键技术、多场耦合、疲劳损伤、电堆集成设计方法. E-mail: zhangzm@tongji.edu.cn

规律。

Lee 等<sup>[2]</sup>通过试验研究了单电池在不同螺杆菌力和气体扩散层对燃料电池电化学性能的影响以及密封件的相对螺杆菌位置对接触压力分布的影响。Lin 等<sup>[3]</sup>利用压敏纸可视化技术表征气体扩散层与双极板间接触压力分布,进而讨论不同螺杆菌组态和螺杆菌力对燃料电池电化学性能的影响。Montanini 等<sup>[4]</sup>利用 Tekscan 公司提供的 I-Scan 系统,借由 1 936 个成矩阵排列的压感电阻组成的薄膜传感器,准确测量了单电池双极板与扩散层之间压力分布情况,但其成本昂贵。Liu 等<sup>[5]</sup>发展一种基于响应面分析的研究方法,探讨集成力和端板螺杆菌位置对接触压力分布的影响。Wang 等<sup>[6]</sup>设计液压集成端板提供均匀接触压力,与传统螺杆菌集成结构相比,燃料电池电化学性能有所提升。Bates 等<sup>[7]</sup>建立了一个 16 片燃料电池堆 3D 有限元模型来预测电堆内部接触压力分布,然而试验结果和模型预测结果存在偏差。

这些学者关于螺杆菌力对燃料电池电化学性能影响研究多集中在螺杆菌力本身,而由螺杆菌力及其引起的电堆内部接触压力分布和接触电阻对燃料电池电化学性能影响研究不足。本文以 15 片单电池组成的电堆,开展燃料电池电化学性能试验、交流阻抗试验和感压纸试验,测量质子交换膜燃料电池堆在车用条件下(包含温度、湿度、进气压力等操作条件)螺杆菌集成力大小、不同施加形式对燃料电池电化学性能变化影响,借助极化曲线( $I-V$  曲线)、交流阻抗曲线(EIS 曲线)和接触压力分布,全面深入研究集成力对燃料电池电化学性能的影响,并深入剖析集成力对电化学性能的影响机理。

## 1 试验准备

试验用电堆为同济大学燃料电池实验室现有 15 片单电池的燃料电池电堆,MEA 为日本戈尔公司生产,所用石墨双极板与膜电极尺寸为  $256\text{ mm} \times 256\text{ mm}$ 。该电堆目前累计工作 1 000 h 左右,采用 4 个螺杆菌的点加载集成方式,均匀分布在电堆端板左右两侧。为评估集成力对电堆电化学性能影响,在进行电堆性能试验和接触界面压力分布测试之前,需要建立一定的集成力测量方法标定现有电堆集成力的大小以及螺杆菌集成力与电堆接触界面上接触压力的量化关系系数。

### 1.1 电堆现有螺杆菌集成力的测量标定

在试验之前,需预先得到实验室原有电堆集成

力,从而与本次试验集成力对比以便评估该集成力是否满足电堆性能最佳要求。

具体步骤如下:

(1) 电堆去除与其连接的管道以及传感器,置于压力机上,试验用压力机如图 1 所示。

(2) 压力机操作调零。

(3) 操作压力机下降,在显示器恰好有示数变化时刻停止下降,并记录显示器示数  $f'$ 。

(4) 松开电堆上的所有集成预紧螺杆菌,在松开的过程中显示器示数不断上升,最终保持  $f$  不变,表明螺杆菌完全松开。

(5)  $f-f'$  即为原有电堆集成力,经试验测得为 2 638 N(去除仪器误差,可近似为 2 600 N)。

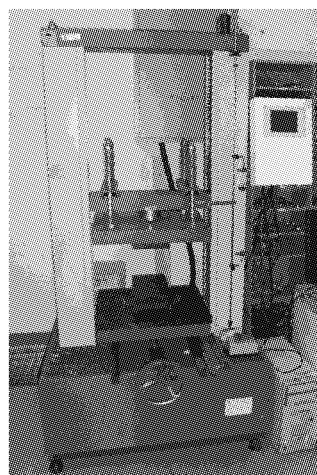


图 1 试验用电堆集成压力机

Fig.1 Clamping fuel cell stack and assembly compression machine

### 1.2 集成力-扭矩转换系数

试验中采用预置式扭矩扳手仅能测出每个螺杆菌的扭矩,而无法得到电堆集成力。因此,试验前预先测得压力-扭矩之间的转换系数  $K_t$ ,以便通过扭矩得到施加在燃料电池电堆端板上的螺杆菌合力。定义集成力-扭矩转换公式为

$$T = K_t F d \quad (1)$$

式中: $T$  为螺杆菌集成扭矩大小; $K_t$  为压力-扭矩转换系数,该系数与螺栓-螺杆菌结构的材料、摩擦有关; $F$  为单个螺杆菌集成力; $d$  为螺杆菌直径。结合式(1), $K_t$  试验测量计算方法如下:

(1) 在 4 螺杆菌组态下电堆每个螺杆菌上施加扭矩大小为  $T_1$ 。

(2) 采用和上述测量集成力相同测量方法测得集成力  $F_1 = f_1 - f'_1$ 。

(3) 代入式(1),得到  $K_{t1}$ 。

(4) 施加不同大小的扭矩  $T_2$ 、 $T_3$ , 重复上述步骤, 得到  $K_{t2}$ 、 $K_{t3}$ .

(5)  $K_{t1}$ 、 $K_{t2}$ 、 $K_{t3}$  取平均值  $\bar{K}=1.67$ .

(6) 最后通过 8 螺杆组态验证, 在 8 螺杆组态下电堆每个螺杆施加转矩  $T_4$ , 通过  $\bar{K}=1.67$  计算得  $F'_4$ , 置于压力机下实测得  $F_4$ ,  $F_4$  与  $F'_4$  相差在 5% 以内即可认为  $K_t=\bar{K}=1.67$ .

## 2 试验原理及试验方法

试验目的: ①通过感压纸试验测试螺杆集成条件下电堆内双极板和扩散层间的压力分布随螺杆集成力的变化; ②通过燃料电池电化学性能试验进一步分析在不同螺杆集力大小、不同组态形式下燃料电池电堆的极化特性曲线变化规律; ③通过燃料电池交流阻抗试验进一步分析在不同螺杆集力大小、不同压力形式作用下燃料电池接触电阻的变化规律. 综合分析不同集力对接触电阻、接触压力乃至对燃料电池电化学性能影响机理.

### 2.1 燃料电池电化学性能测试-极化特性曲线

极化特性曲线也称伏安曲线, 通过测试电池在不同外界负载条件下电流与电压间的关系来考察电池的对外放电能力的曲线, 是对燃料电池电化学性能进行表征的一项重要手段<sup>[8]</sup>.

使用的电堆由 15 片单电池组成, 内置绝缘板、缓冲板等部件, 电堆组装如图 2 所示.

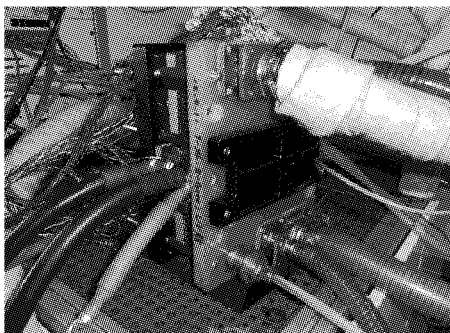


图 2 电堆电化学性能测试现场

Fig.2 Assembly stack's electrochemical performance testing scene

燃料电池电化学性能测试平台为加拿大绿光 G500 系列(greenlight G500 test station), 由氢气系统、空气系统、冷却系统及控制系统组成, 该平台不仅可以精确测量和控制电堆运行的参数如温度、湿度、进气压力和流量等, 还可以通过平台内置电子负载控制电堆的工作电流, 模拟车载工况. 电堆具体运行条件设置如表 1, 表中, A 为阳极, C 为阴极.

表 1 电堆运行的设定条件

化学计量比		进气压力/kPa		进气温度/°C		相对湿度/%		冷却液出口温度/°C	冷却液流速/(L·min <sup>-1</sup> )
A	C	A	C	A	C	A	C		
1.2	4.0	60	60	65	65	100	100	70	4.5

### 2.2 EIS 测试-交流阻抗曲线

V-I 极化特性曲线反映燃料电池的电化学性能, 该测试方法是一种直流响应, 其结果是几个独立因素的综合结果, 不能提供电堆内部的电化学反应动力学信息. EIS 曲线测试是区分不同电压损耗最常用的技术, 通过对电堆的 EIS 进行测量和分析, 可以得到燃料电池的电化学极化电阻、欧姆极化电阻和浓度极化电阻等数据<sup>[9]</sup>.

交流阻抗谱也称电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy), 是一种用于研究电极过程动力学、电极表面现象以及测定固体电解质电导率的电化学测量方法. 其原理是把系统想象成黑匣子, 在待测试样两端施加一个小幅交流振荡的电压或电流信号, 通过观察试样的阻抗随频率的变化来对试样的电化学性能进行表征.

对于稳态系统, 施加外部激励电流信号可以为

$$i(t) = I \cos(2\pi f t + \psi) \quad (2)$$

式中:  $I$  为电流幅值;  $\psi$  为初始相位角;  $f$  为信号频率. 获得的电压相应信号为

$$u(t) = U \cos(2\pi f t + \phi) \quad (3)$$

式中:  $U$  为电压幅值;  $\phi$  为相位角. 令  $\phi = \psi - \varphi$ , 则不同频率下的阻抗函数可表示为

$$Z(j\omega) = u(t)/i(t) = |Z(j\omega)| \cos \phi + j |Z(j\omega)| \sin \phi = Z'(\omega) + jZ''(\omega) \quad (4)$$

式中:  $|Z(j\omega)|$  为函数模值;  $\phi$  为函数相位角.

作出以其实部作为横坐标、虚部作为纵坐标的 Nyquist 图, 可以得到不同交流信号频率下阻抗值分布图. 理论上标准燃料电池 EIS 曲线包含欧姆、阳极和阴极活化、质量传输等几部分损耗和阻抗. 但是实际情况下, 燃料电池的阳极活化损耗弧线非常小, 常被阴极活化损耗弧线遮盖, 最终呈现如图 3 所示的情况.

由于燃料电池是典型的电化学反应非线性系统, EIS 是分析其内部复杂反应过程的有效工具, 近年来被越来越广泛应用于对燃料电池的内部参数测定、性能评估与检测、结构与运行条件优化及基于电化学参数的建模与控制等方面的研究.

EIS 测试采用日本菊水电子工业株式会社 Kikusui-KFM2150 燃料电池阻抗测试仪(Kikusui

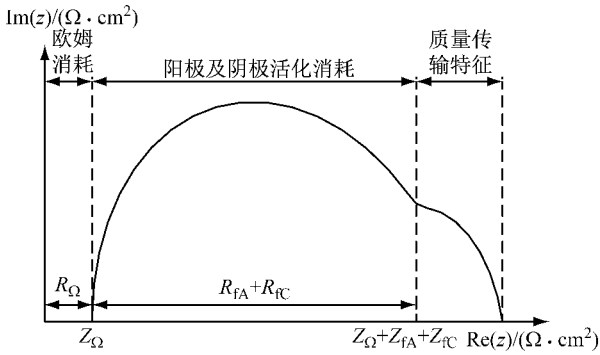


图 3 实际 EIS 曲线

Fig.3 Actual EIS curve

KEM2150 system fuel cell scanner) 与其制造的电子负载装置 PLZ-4W 系列集成, 按照燃料电池的输出容量搭建阻抗测试系统, 可测试 10 mHz 至 20 kHz 的阻抗。电堆在阻抗测试时工作电流密度为  $200 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 交流干扰电流密度为  $20 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 干扰电流频率范围为 10 kHz 至 100 mHz, 其他测试条件不变, 设备连接如图 4 所示。

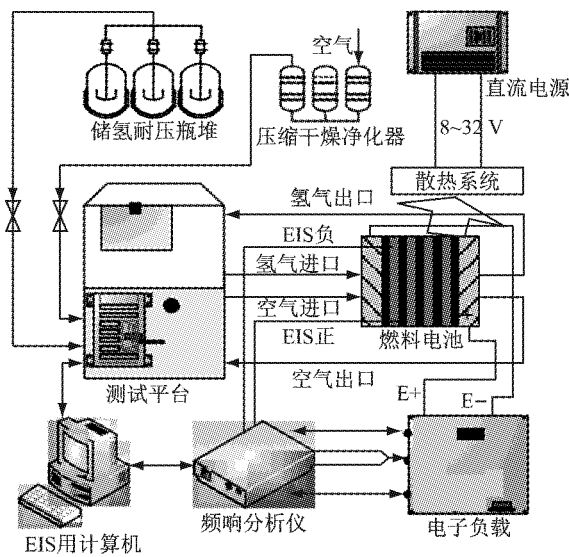


图 4 EIS 实验系统设备结构

Fig.4 EIS testing equipment structure

### 2.3 压力分布测试-界面压力可视化技术

感压纸测试试验采用富士 FUJI-FILM I&I Imaging & information (ultra super low pressure) 系列双片式<sup>[10]</sup>。其构造如图 5。当感压纸受压, 微粒子球会破裂和颜色剂材料作用后产生颜色, 透过微粒子分子控制 (particle size control) 技术, 可用来感应不同大小的压力与分布。由于试验电堆较小, 加载的集成力小, 估计压强后选取富士 LLLW 型号感压纸, 此型号感压纸可以显示 0.2~0.5 MPa 大小的压强。试验后, 将感压纸取出, 根据颜色的深浅可以粗

略判别界面接触压力的大小和接触压力的分布。

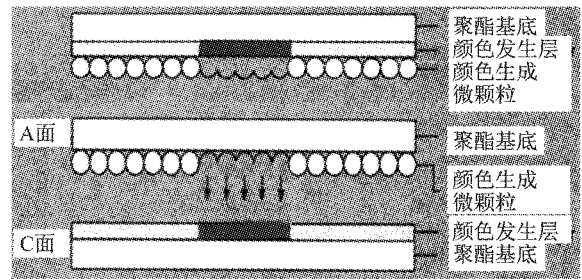


图 5 感压软片构造

Fig.5 Ultra pressure testing film structure

电堆采用螺杆集成方式, 使用预置式扭矩扳手, 对角锁紧, 通过测量和控制两端板间距保证组装力的一致性和均匀性。螺孔组态位置、螺杆锁紧顺序如图 6 所示, 每个螺杆旋转 1/8 圈, 螺杆选用  $M8 \times 1.25$ , 设定为 4、8 孔螺杆组态, 4 孔螺杆锁紧顺序为 1 至 4, 8 孔螺杆锁紧顺序为 1 至 8。扭矩-集成合力对应关系如表 2 所示。

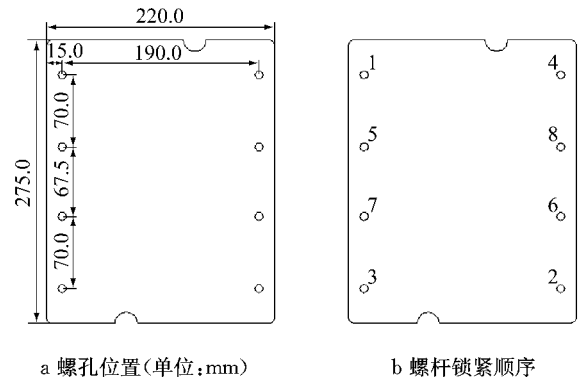


图 6 螺孔位置与锁紧顺序

Fig.6 Bolt position and locking order

表 2 不同集成合力与扭矩转换系数的关系

Tab.2 Transfer factor of different assemble force and torque

集成合力/N	单个扭矩/(N·m)	
	4 螺杆	8 螺杆
2 000	6.7	3.4
2 600	8.1	4.1
3 000	10.0	5.0
3 800 <sup>1)</sup>		6.4

注: 1) 3 800 N 的试验数值没有进行 4 螺杆测试, 因为在进行 8 螺杆测试时, 螺杆已经很紧, 若采用 4 螺杆可能对燃料电池膜电极产生破坏。

## 3 测试结果及分析

### 3.1 极化曲线测试结果

该试验针对 4、8 螺杆集成合力为 2 000 N、3 000 N、3 800 N 三种的燃料电池电化学性能进行测试。

并提取在进行本试验之前最近一次性能测试结果,即合力为 2 600 N 时的 8 螺杆燃料电池电化学性能曲线.结果如图 7、图 8.由图 7a 可见,2 000 N、4 螺杆电压值低于 3 000 N、4 螺杆,图 7b 可见,2 000 N、8 螺杆电压值低于 2 600 N、8 螺杆,2 600 N、8 螺杆电压值低于 3 000 N、8 螺杆.图 7b 中,高电流密度区域 3 800 N、8 螺杆电压值低于 3 000 N、8 螺杆,甚至在电流密度为  $920 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$  时低于 2 600 N、8 螺杆.图 8a 和图 8b 中,在相同集成力下,8 螺杆组态集成电堆电压高于 4 螺杆组态集成电堆电压.

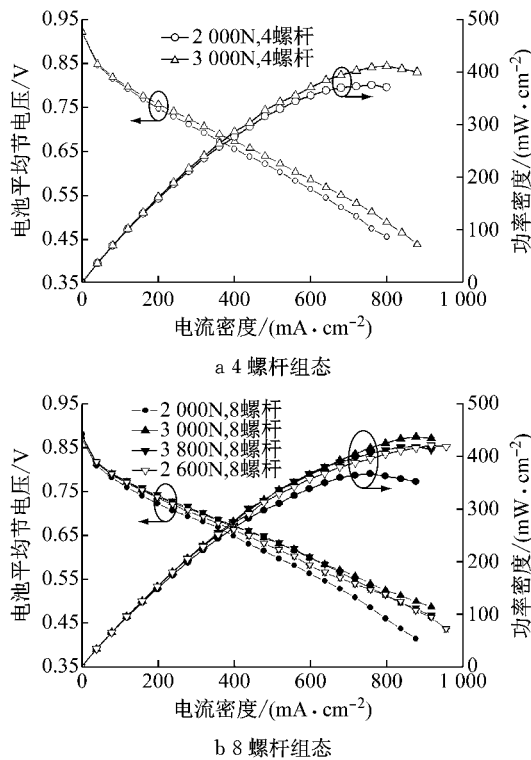


图 7 不同集成力的电化学性能曲线

Fig.7 Electrochemical performance curve of different assembly force

3.2 交流阻抗试验测试结果

在 EIS 测试结束后,原始数据不便于直接分析,

表 3 电堆等效电路图拟合参数值

Tab.3 Equivalent circuit diagram fitting parameter value of fuel cell stack

形式	$R_1 / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$\frac{Z_Q}{s^n} / (10^{-4} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2})$	$n$	$R_2 / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$O / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_3 / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$
2 000 N、4 螺杆	5.792	2.768	0.881 9	$1.871 \times 10^7$	0.057 77	30.54
3 000 N、4 螺杆	5.055	3.109	0.872 1	$3.865 \times 10^6$	0.001 68	95.22
2 000 N、8 螺杆	5.646	3.535	0.845 1	$4.841 \times 10^5$	0.081 30	29.28
3 000 N、8 螺杆	4.315	2.917	0.889 9	$3.809 \times 10^6$	0.001 95	80.99
3 800 N、8 螺杆	4.442	3.664	0.852 8	$6.211 \times 10^6$	0.069 83	32.59

图 9 中, $R_1$  为系统的欧姆阻抗,主要反映电荷转移至外电路的难易程度,其值与电流密度无关,包

括电解质的离子电阻、电解质与电极的接触电阻,以及电极、电流收集层和电极引线的电子电阻.  $Q$  为常

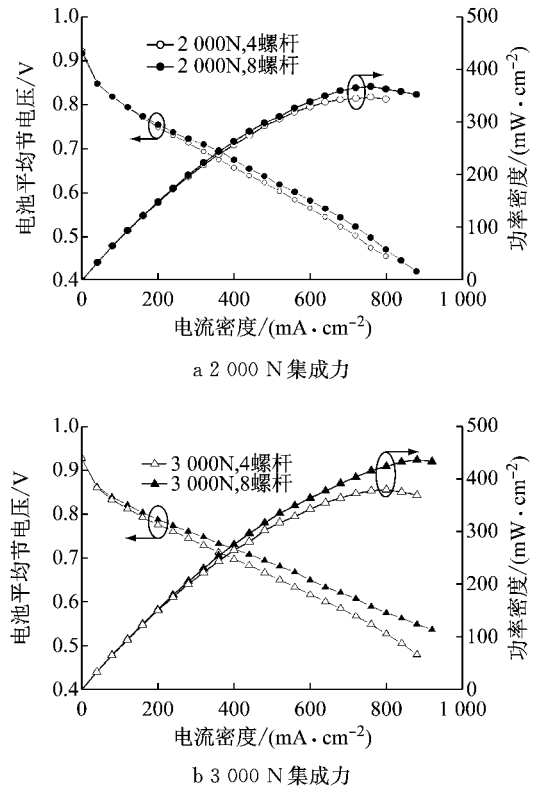


图 8 不同螺杆集成力下的电化学性能曲线

Fig.8 Electrochemical performance curve of different bolts assembly force

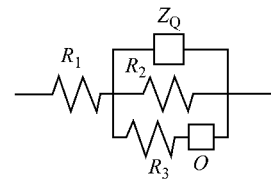


图 9 燃料电池电堆等效电路

Fig.9 Equivalent circuit diagram of fuel cell stack

括电解质的离子电阻、电解质与电极的接触电阻,以及电极、电流收集层和电极引线的电子电阻.  $Q$  为常

相位角元件,其阻抗为  $Z_Q = (j\omega)^{-n} / Y_0 = s^{-n} / Y_0$ , 参数  $n$  为量纲一化的指数,  $n=1$ ,  $Q$  相当于理想电容  $C$ ;  $n=0$ ,  $Q$  相当于纯电阻  $R$ ;  $n=-1$ ,  $Q$  相当于电感  $L$ . 电阻  $R_2$  由于阻值过大,在并联的等效电路中可忽略不计.  $R_3$  为法拉第阻抗,反映了电化学反应的动力学特性,影响  $R_3$  的主要因素是电极表面的反应环境和反应气在催化层附近的活跃度.  $O$  为有限扩散阻抗,反映燃料气体在电堆中的质量传输阻抗.

图 10 为 Zsimpwin 在 2 000 N、8 螺杆菌时的拟合示例,叉点为试验源数据,直线为拟合值,一致程度较高,故等效电路  $R(QR(OR))$  可取. 不同螺杆菌、不同集成力的交流阻抗试验结果如图 11 所示.

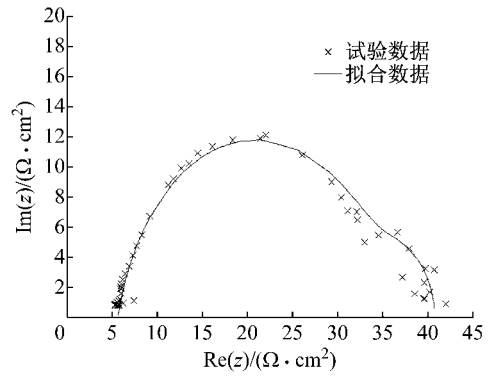


图 10 2 000 N、8 螺杆菌的 Zsimpwin 拟合曲线  
Fig. 10 Zsimpwin fitting curve of 2 000 N, 8 bolts

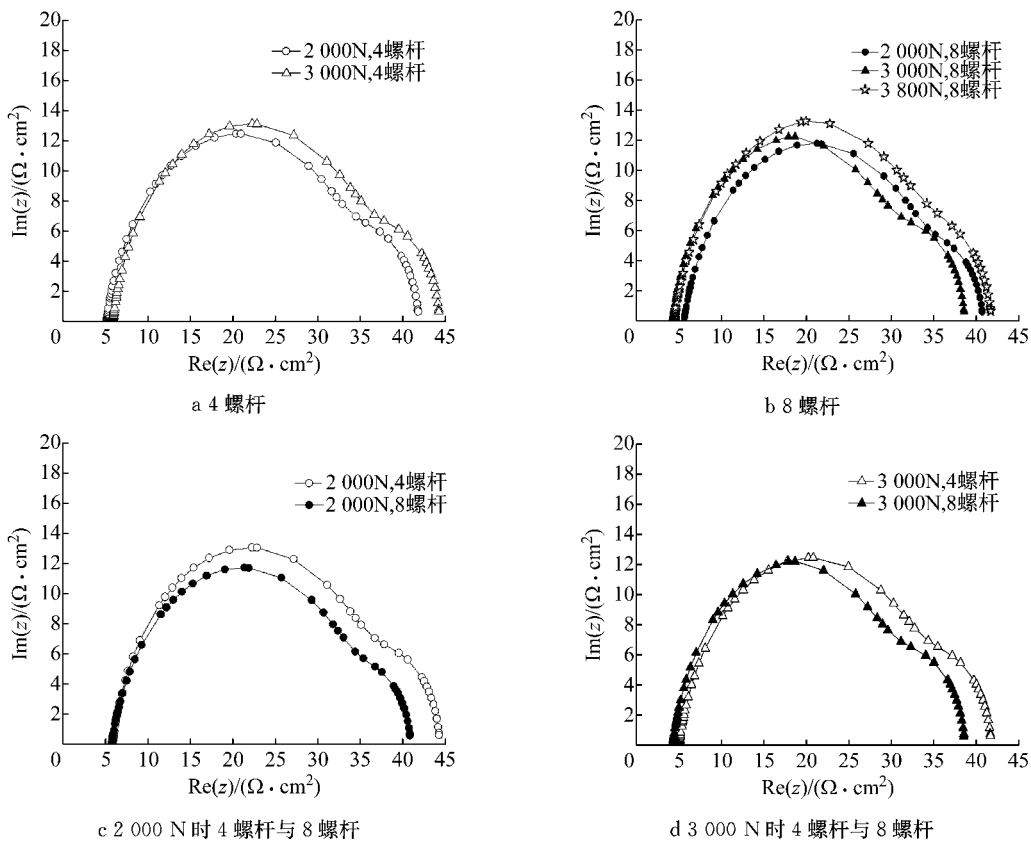


图 11 EIS 曲线  
Fig. 11 EIS fitting curve

结合表 3 数据以及拟合后的 EIS 曲线,由图 11a 可见,在 4 螺杆菌集成组态下,当集成力从 2 000 N 上升到 3 000 N 时,  $R_1$  减小  $0.737 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ;有限扩散阻抗明显下降;图 11b 中,在 8 螺杆菌集成组态形式下,当集成力从 2 000 N 上升到 3 000 N 时,电堆欧姆阻抗值  $R_1$  减小  $1.331 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,减小的幅度大于 4 螺杆菌集成组态形式,同时有限扩散阻抗明显下降;但当集成力继续上升至 3 800 N 时,  $R_1$  略有上升,上升值为  $0.127 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,但是反应传输阻力的有限扩散阻

抗值升高明显;图 11c 和图 11d 中,在相同集成力下,8 螺杆菌的各部分阻抗小于 4 螺杆菌.

### 3.3 电堆压力分布测试结果

#### 3.3.1 电堆内接触应力分布

将感压纸裁剪至略大于膜电极有效面积,置于电堆中第 7 片膜电极及其接触的双极板间,电堆集成力分别为 2 000 N、3 000 N 和 3 800 N,8 螺杆菌组态施加相应的扭矩值由表 2 所得,静置 10 min,然后取出压感片,结果如图 12 所示.

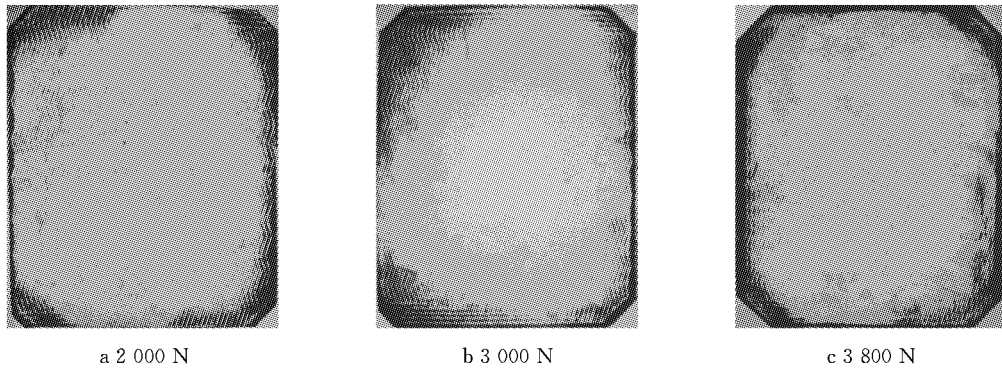


图 12 8 螺栓集成电堆中间压力分布

Fig.12 Middle pressure distribution of fuel cell stack with 8 bolts

从图 12 可见,密封件所处位置的感压纸颜色较深且清晰,且随着集成力增加,密封件位置的感压纸颜色加深,而感压纸中间颜色很浅.其原因是:双极板流道区域没有接触到膜电极而呈现浅色,对于脊背区域呈浅色部分是由于接触压力低于压感纸的敏感度(0.2 MPa).而且随着集成力增加,靠近螺栓的四周接触压力明显增大,形成局部压力集中区域.螺栓力的点加载集成方式容易造成流场接触面间压力分布不均,局部压力大.对比图 12 中情况,集成力为 3 000 N 时,流场接触面接触均匀度优于 2 000 N 时;集成力为 3 800 N 时,流场接触面的接触压力均匀度下降,低于 3 000 N 时.接触压力分布存在不对称现象,2 000 N 时的压感片表现得最为明显.

为对上述结论进一步解释,针对端板间的高度进行了测量,上端板具体结构如图 13 所示.

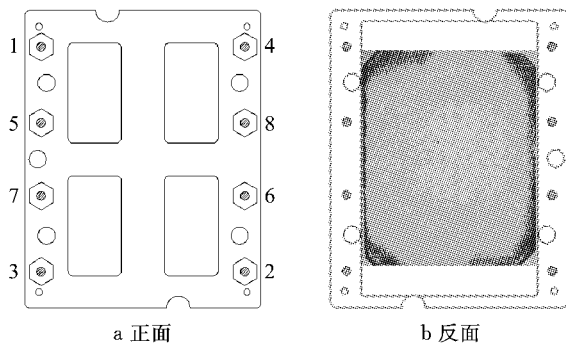


图 13 电堆上端板具体结构

Fig.13 Structure of fuel cell stack top end plate

上端板为环氧树脂材料,且结构复杂,其上除有 8 个螺栓孔外,还有载荷连接孔、定位孔等,端板厚度为 20 mm,背面有 11 mm 深的凹槽,用来安装缓冲块等,整体结构刚度相对较差.在螺栓施加扭矩之后,左右边由于 8 个螺栓的均匀分布,上下端板的距离基本保持一致,而上下边由于只有顶角的 4 个螺栓,变形明显,有圆弧凹槽的地方由于应力集中,在 3 000 N 集成力时比 4 个顶角高 1 mm,总集成力上

升至 3 800 N,高度差更明显.即端板在受压时中间略微鼓起,4 个角下沉,且随着压力的越大,端板的变形越明显,这种现象也越明显.所以会产生 3 800 N、8 螺栓时第 7、8 片双极板间的压力分布均匀性反而劣于 3 000 N、8 螺栓时的试验结果.

接着进行 4 螺栓和 8 螺栓在相同集成力下接触压力分布对比,如图 14 和 15 所示.

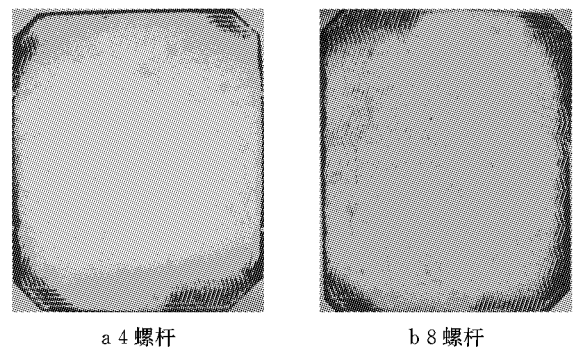


图 14 2 000 N 时螺栓电堆中间压力分布

Fig.14 Middle pressure distribution of fuel cell stack with 2 000 N

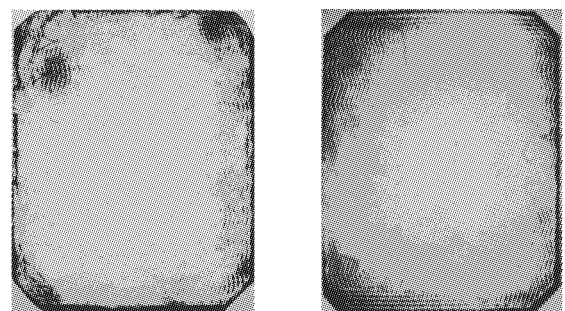


图 15 3 000 N 时螺栓电堆中间压力分布

Fig.15 Middle pressure distribution of fuel cell stack with 3 000 N

从图 14 和 15 中可以看出,8 螺栓的压力分布相对优于 4 螺栓,在集成合力 2 000 N 下,8 螺栓相比 4 螺栓,压力分布改善不明显.在集成合力 3 000 N



下,8 螺杆相比 4 螺杆时压力分布改善明显。

### 3.3.2 单片燃料电池压力分布

为了使压感软片效果明显,使用单片燃料电池再次进行试验,同时可将结果推广到燃料电池电堆上,将压感片置于 2 块双极板之间,施加上集成为 3 000 N 及 3 800 N 相应的扭矩,静置 5 min,然后取出感压软片,如 16 所示。

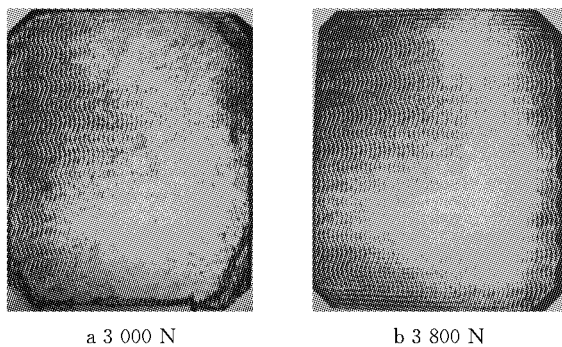


图 16 8 螺杆燃料电池中间压力分布

Fig. 16 Middle pressure distribution of fuel cell stack with 8 bolts

从图 16 中可以看出,边框的颜色较深且清晰,中间右侧颜色浅,3 800 N、8 螺杆相比于 3 000 N、8 螺杆,接触部分颜色加深,接触部分面积增加,但右侧仍然呈现大片空白。现象产生原因如下:对试验各端板进行检查,发现上端板上表面存在倾斜,即上端板左右高度存在 0.5 mm 偏差,致使左右受力不均,造成内部刚度较差的缓冲板产生了厚度方向上的变形。因此,可以看出电堆内部压力分布与螺杆集成为力施加方式和端板结构都有关系。

可以看出,目前螺杆集成为力的施加方式不利于电堆内部压力分布一致性,也损害电堆电化性能的输出,因此,后续为提高燃料电池内部压力分布一致性,提高燃料电池电化性能输出,应改变螺杆集成为力施加方式,改为面加载力的电堆集成设计方法,并应配合端板结构优化来提升电堆电化功率输出。

## 4 结语

(1) 接触压力分布确实会对燃料电池电堆性能产生影响,压力分布越均匀性能越优,8 螺杆大于 4 螺杆。

(2) 在螺杆的“点加载”集成为力作用下,端板容易发生变形,试验中感压纸上显示接触压力分布不均,燃料电池电化性能下降。

针对“点加载”的集成受力问题,可以采取如下 3 种改进方案提高电堆内部接触压力均匀性:

(1) 优化端板结构,如增加厚度、采用抗弯强度高的材料,简化结构,减少由于结构复杂所带来的应力集中。

(2) 将端板预先制造一个上翘弧度,这样在电堆集成受力后端板变形小,受压接触均匀性变好。

(3) 采用“面加载”捆绑电堆集成方式代替“点加载”螺杆的紧固集成方式。

### 参考文献:

- [1] 干频,刘冬安,冯力中,等. 金属极板燃料电池电堆接触压力的分布规律[J]. 机械设计与研究, 2010, 25(5): 134.  
GAN Pin, LIU Dong'an, FENG Lizhong, *et al.* Research on influence of assembly process on pressure distribution of PEMFC stack[J]. Machine Design and Research, 2010, 25(5):134.
- [2] LEE W K, HO C H, VAN ZEE J W, *et al.* The effects of compression and gas diffusion layers on the performance of a PEM fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 1999, 84(1): 45.
- [3] WEN C Y, LIN Y S, LU C H. Experimental study of clamping effects on the performances of a single proton exchange membrane fuel cell and a 10-cell stack[J]. Journal of Power Sources, 2009, 192(2): 475.
- [4] MONTANINI R, SQUADRITO G, GIACOPPO G. Measurement of the clamping pressure distribution in polymer electrolyte fuel cells using piezoresistive sensor arrays and digital image correlation techniques[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(20): 8484.
- [5] LIU D A, LAI X M, NI J, *et al.* Robust design of assembly parameters on membrane electrode assembly pressure distribution [J]. Journal of Power Sources, 2007, 172(2): 760.
- [6] WANG X, SONG Y, ZHANG B. Experimental study on clamping pressure distribution in PEM fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2008, 179(1): 305.
- [7] BATES A, MUKHERJEE S T, HWANG S W. Simulation and experimental analysis of the clamping pressure distribution in a PEM fuel cell stack [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(15): 6481.
- [8] 范宝安,刘祥丽,朱庆山. 伏安曲线拟合法研究燃料电池的极化阻力[J]. 电源技术研究与设计, 2009, 33(12): 1072.  
FAN Bao'an, LIU Xiangli, ZHU Qingshan. Investigation of polarization resistance of fuel cells by fitting current-voltage curves [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2009, 33(12):1072.
- [9] O'HAYRE R, CHA S W, COLELLA W, 等. 王晓红,译. 燃料电池基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.  
O'HAYRE R, CHA S W, COLELLA W, *et al.* Translated by WANG Xiaohong. Fuel cell fundamentals [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2007.
- [10] LIGGINS A B. The practical application of Fuji prescale pressure-sensitive film[M]. [S.l.]: Springer US, 1997.