

钢带间距对质子交换膜燃料电池堆封装力的影响

柳海涛^{1,2}, 白书战^{1*}, 吴明华², 杨荣昌², 郝富强²

1. 山东大学核科学与能源动力工程学院, 山东 济南 250061;

2. 山东国创燃料电池技术创新中心, 山东 潍坊 261000

摘要:为提高质子交换膜燃料电池堆的效率稳定性和使用寿命,以典型大型质子交换膜燃料电池堆为研究对象,采用等效刚度模型,仿真分析电堆封装力及其分布,计算不同封装力下的孔隙率和接触电阻,提出燃料电池堆在不同钢带间距条件下的最佳封装力及其选取准则。分析结果表明:钢带间距增大,对应的最优封装力呈增大趋势;钢带间距为 40 mm 时,最优封装力为 32.8 kN,通过应力标准差和应变标准差判断该封装力在合理范围内,此时对应的接触电阻为 5.35 $\mu\Omega$,孔隙率为 0.747。

关键词:燃料电池;等效刚度模型;封装力;孔隙率;接触电阻;钢带间距

中图分类号:TM911

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)04-0016-10

引用格式:柳海涛,白书战,吴明华,等. 钢带间距对质子交换膜燃料电池堆封装力的影响[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(4): 16-25.

LIU Haitao, BAI Shuzhan, WU Minghua, et al. The influence of steel strip spacing on the clamping load of a proton exchange membrane fuel cell stack [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(4): 16-25.

0 引言

燃料电池不受卡诺循环限制,能量转换效率较高,而且具有零排放、无污染、噪声低、安装灵活等优点。燃料电池的主要应用领域包括交通运输、固定发电站等,其中在交通运输领域,燃料电池汽车被视为新能源汽车的终极绿色解决方案^[1]。

燃料电池电堆封装力影响电堆的性能和可靠性,确定封装力时需重点考虑两方面因素:1)膜电极的气体扩散层(gas diffusion layer, GDL)孔隙率。当封装力过大时, GDL 发生不均匀的挤压变形,导致极板肋部下方的 GDL 厚度减小,孔隙率降低,极板非肋部下方的 GDL 被挤入流道内,造成气流通道的横截面积减小,相应气体流量减小,电堆性能降低,孔隙率降低还导致气体传质传输量减少,进一步降低电堆性能;当封装力过小时,孔隙率增加,材料有效接触面积降低,高孔隙率对应的表面粗糙度可能增大,进一步加剧界面接触不充分。孔隙率过高可能导致材料自身电阻增大(如碳纤维的导电性降低),孔隙率过低阻碍气体扩散(如氧气传输受阻)。因此,需通过优化孔隙率(通常控制在 70%~80%),在电子传导和气体传质之间取得平衡。2)接触电阻。封装力增加时,双极板与 GDL 之间的接触面积增大,微观粗糙表面

收稿日期:2025-06-10

基金项目:国家重点研发计划项目氢进万家 2 期(2022YFB4004400)

第一作者简介:柳海涛(1988—),男,山东大学硕士研究生,山东国创燃料电池技术创新中心高级工程师,主要研究方向为燃料电池,E-mail:liuhaitaowhut@126.com。

***通信作者简介:**白书战(1979—),男,山东莘县人,工学博士,教授,博士生导师,主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制技术、整机开发与可靠性技术及新能源汽车技术,E-mail:baishuzhan@sdu.edu.cn。

的接触点增多,显著降低接触电阻。大量试验及理论分析形成的工程经验表明:接触电阻随封装力的增加呈现先快速下降后趋于平缓的趋势^[2-8]。

电堆在高温、低温、振动等复杂的工况环境下运行时,GDL 孔隙率和接触电阻均影响电堆封装力的变化,在一定程度上影响电堆的整体性能。封装力过大或过小都对电堆的性能产生明显影响,甚至出现长堆“塌腰”(燃烧电池堆结构变形,中间部分出现凹陷)问题,严重影响电堆的性能和使用^[9-12]。解决电堆在复杂工况下因封装力受环境与设计导致的电堆性能下降、结构失稳甚至“塌腰”等严重故障,有效控制封装力并提高电堆在长期运行中的可靠性和稳定性,是当前技术中的难点。

现阶段,对燃料电池封装力的研究已经较为广泛,人们通过长期试验研究和仿真分析等方法发现了最优封装载荷的存在^[13-14]。比较有代表性的研究包括:文献[15-17]建立了考虑接触电阻和气体扩散层性能随封装载荷变化的电池性能计算模型,发现任何材料的双极板都存在以最大输出功率为目标的最优封装载荷;文献[18]首次通过试验研究了封装载荷对电池性能的影响,发现电池性能并非随着封装压力的增加单调变化,存在最优封装载荷使电池性能最佳。

本文中研究燃料电池封装力和孔隙率及接触电阻之间的关系及原理,通过仿真建模的方法,分析不同封装力对孔隙率和接触电阻的影响,以建立最优封装力的数值模拟方法,为燃料电池封装力的理论研究和工程应用提供参考。

1 燃料电池堆结构

质子交换膜燃料电池堆是一种利用氢气和氧气通过电化学反应产生电能的设备,核心部件包括膜电极(membrane electrode assembly, MEA)、阳极板、阴极板、密封条、集流板、端板、钢带等,其中阴极板-阳极板-膜电极为一层单电池。燃料电池堆结构如图1所示,主要技术参数如表1所示。

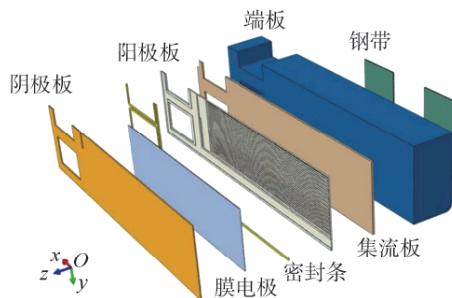


图1 质子交换膜燃料电池堆结构

表1 燃料电池的主要技术参数

单体电压/V	封装力/kN	电流密度/(A·cm ⁻²)	电堆片数	封装方式
0.62	40	2 000	40	钢带封装

2 仿真模型建立

利用 Abaqus 软件搭建仿真模型,其中各部件的尺寸参数和弹性模量、泊松比等物性参数以及其他电池参数以实际燃料电池的参数进行输入。第一层单电池(靠近钢带侧)的膜电极状态能够较好地反映电堆的性能,为了更好地模拟第一片膜电极的受力情况,对电堆两端分别保留5层,其余电堆堆芯部分等效成一个整体,所有结构部件采用六面体网格进行仿真建模。搭建的某燃料电池结构模型如图2所示,单电池模型如图3所示。

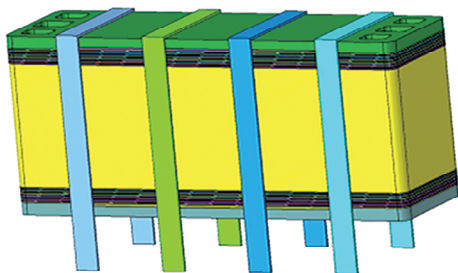


图2 某燃料电池结构模型

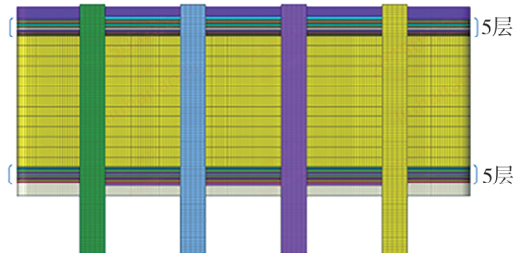


图3 单电池仿真模型

2.1 等效刚度模型建立

MEA 由不同材料组成,结构相对复杂,故对膜电极进行分区处理,分别测试每个分区的弹性模量,膜电极分区如图 4 所示。利用串联刚度和并联刚度计算式进行等效刚度计算,得到 MEA 的弹性模量关键物性参数,作为仿真输入。采用同样的方法计算阳极板和阴极板的等效刚度^[19-20]。

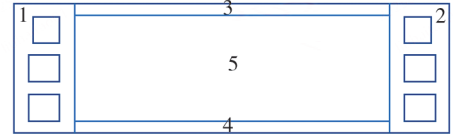


图 4 膜电极 (MEA) 分区

等效刚度

$$K=EA/L, \quad (1)$$

式中: K 为膜电极刚度, N/m ; E 为膜电极弹性模量, N/mm^2 ; A 为膜电极垂直于封装力方向的横截面积, m^2 ; L 为膜电极长度, m 。

2.2 网格无关性验证

对整体模型进行网格无关性验证,在不同网格数量条件下,对钢带施加 40 kN 封装力,取电堆上部第一层膜电极的平均接触压力,根据相对偏差判断仿真结果是否受网格数量的影响。

不同位置的接触压力与平均接触压力的偏差

$$\delta=(p_m-p_a)/p_a, \quad (2)$$

式中: p_a 为平均接触压力, MPa ; p_m 为最大接触压力, MPa 。

网格无关性验证如表 2 所示。由表 2 可知:以 600 万网格计算结果为基准,当网格数量大于 400 万时,偏差在 1% 以内,可忽略不计。

表 2 网格无关性验证

网格数/万	p_a/MPa	$\delta/\%$	网格数/万	p_a/MPa	$\delta/\%$
100	0.796	6.13	400	0.841	0.83
200	0.823	2.95	500	0.846	0.24
300	0.833	1.77	600	0.848	0

考虑仿真计算精度和效率,网格数采用 416 万。

3 仿真计算及结果

3.1 仿真模型及边界条件

仿真模型网格划分完成后进行边界条件设置,1) 根据各部件材料的测试数据及等效刚度数据设置弹性模量、泊松比;2) 各部件之间的接触关系设为普通接触,并根据实际接触情况设置摩擦因数;3) 对下端板的 x 、 y 、 z 三个方向施加约束;4) 对钢带施加不同的封装力;5) 分别对不同间距状态下的钢带进行建模,仿真计算封装力。边界条件设置如图 5 所示,封装力和钢带间距示意图如图 6 所示。

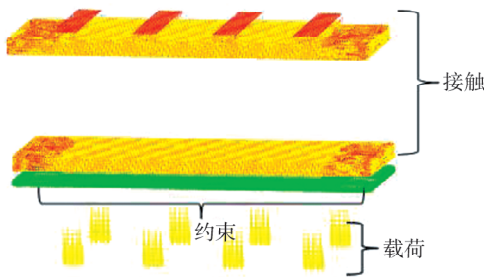


图 5 边界条件设置

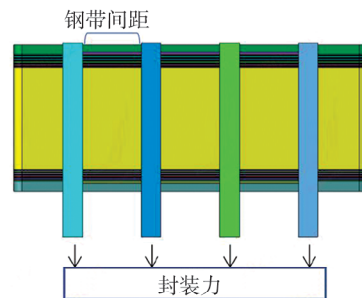


图 6 封装力和钢带间距示意图

3.2 仿真结果

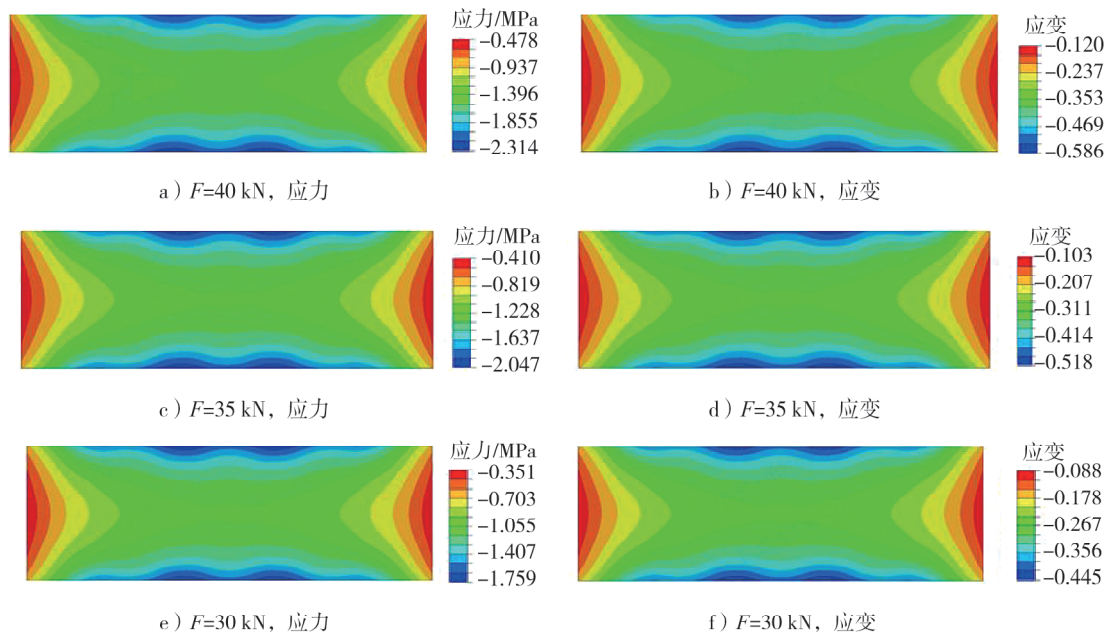
钢带间距 a 分别为 40、45、50、55、60 mm 时,不同封装力 F 下膜电极的平均接触应力和平均应变结果(由于 MEA 受压,提取的应力和应变为负,取绝对值即可)如表 3、4 所示,不同钢带间距和封装力下膜电极的接触应力和应变云图如图 7~11 所示。

表 3 不同封装力和钢带间距下第一层和最后一层膜电极的平均接触应力

F/kN	第一层膜电极平均接触应力绝对值/MPa					最后一层膜电极平均接触应力绝对值/MPa				
	$a=40\text{ mm}$	$a=45\text{ mm}$	$a=50\text{ mm}$	$a=55\text{ mm}$	$a=60\text{ mm}$	$a=40\text{ mm}$	$a=45\text{ mm}$	$a=50\text{ mm}$	$a=55\text{ mm}$	$a=60\text{ mm}$
40	1.411	1.375	1.334	1.285	1.255	1.271	1.258	1.245	1.231	1.219
35	1.233	1.202	1.166	1.124	1.098	1.112	1.101	1.089	1.077	1.067
30	1.057	1.030	0.999	0.963	0.941	0.953	0.944	0.934	0.923	0.914
25	0.881	0.859	0.833	0.803	0.784	0.795	0.786	0.778	0.769	0.762
20	0.705	0.687	0.666	0.642	0.628	0.636	0.629	0.622	0.615	0.610
15	0.529	0.515	0.500	0.482	0.461	0.477	0.472	0.467	0.462	0.448
10	0.353	0.344	0.333	0.321	0.314	0.318	0.315	0.311	0.308	0.305

表 4 不同封装力和钢带间距下第一层和最后一层膜电极的平均应变

F/kN	第一层膜电极平均应变绝对值					最后一层膜电极平均应变绝对值				
	$a=40\text{ mm}$	$a=45\text{ mm}$	$a=50\text{ mm}$	$a=55\text{ mm}$	$a=60\text{ mm}$	$a=40\text{ mm}$	$a=45\text{ mm}$	$a=50\text{ mm}$	$a=55\text{ mm}$	$a=60\text{ mm}$
40	0.357	0.348	0.337	0.325	0.317	0.321	0.318	0.315	0.311	0.308
35	0.312	0.304	0.295	0.284	0.277	0.281	0.278	0.275	0.272	0.270
30	0.267	0.260	0.253	0.243	0.238	0.241	0.239	0.236	0.233	0.231
25	0.223	0.217	0.210	0.203	0.198	0.201	0.199	0.197	0.194	0.193
20	0.178	0.174	0.168	0.162	0.159	0.161	0.159	0.157	0.156	0.154
15	0.134	0.130	0.126	0.122	0.116	0.121	0.119	0.118	0.117	0.113
10	0.089	0.087	0.084	0.081	0.079	0.080	0.080	0.079	0.078	0.077



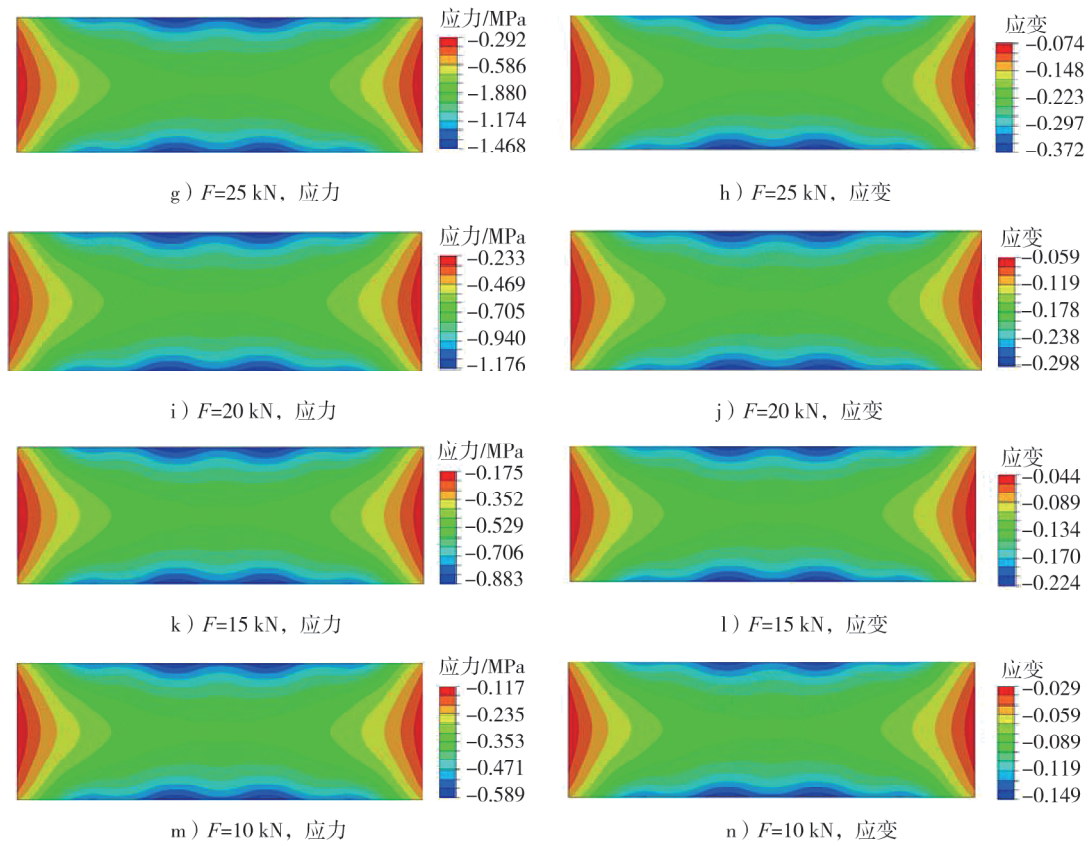
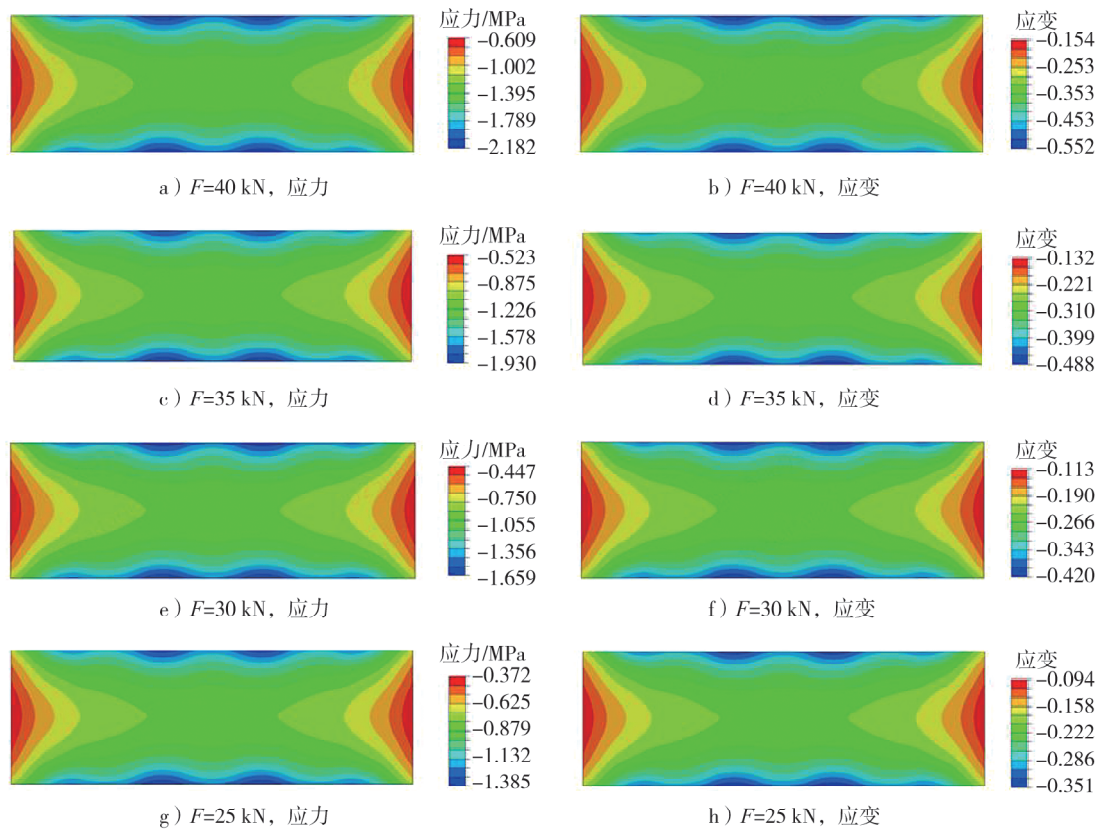


图 7 钢带间距为 40 mm 时不同封装力下膜电极的应力和应变云图



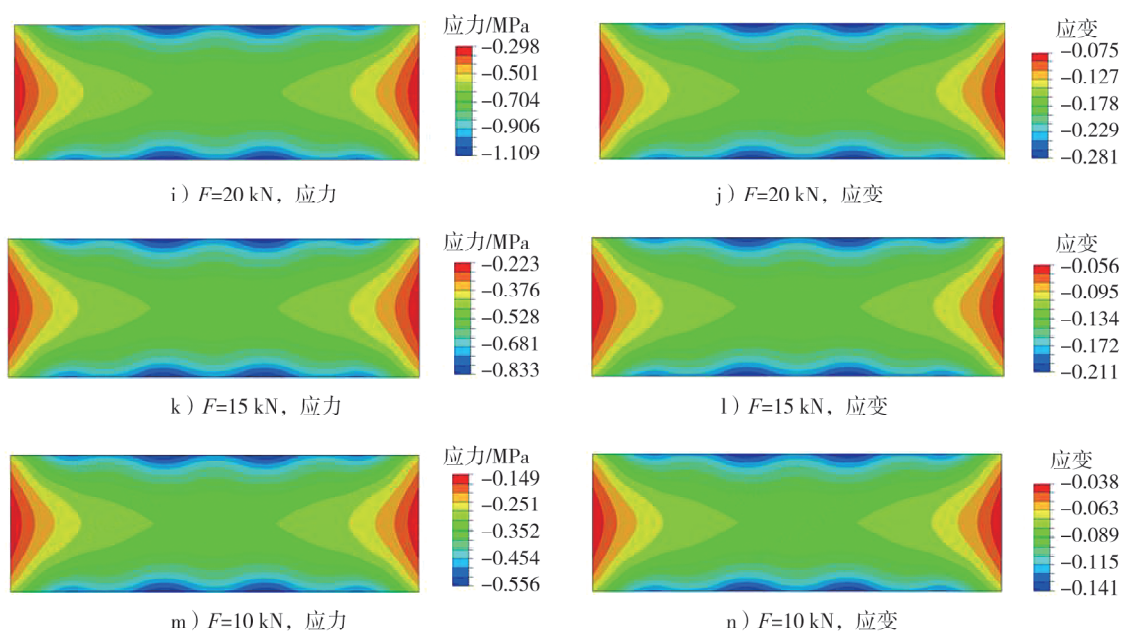
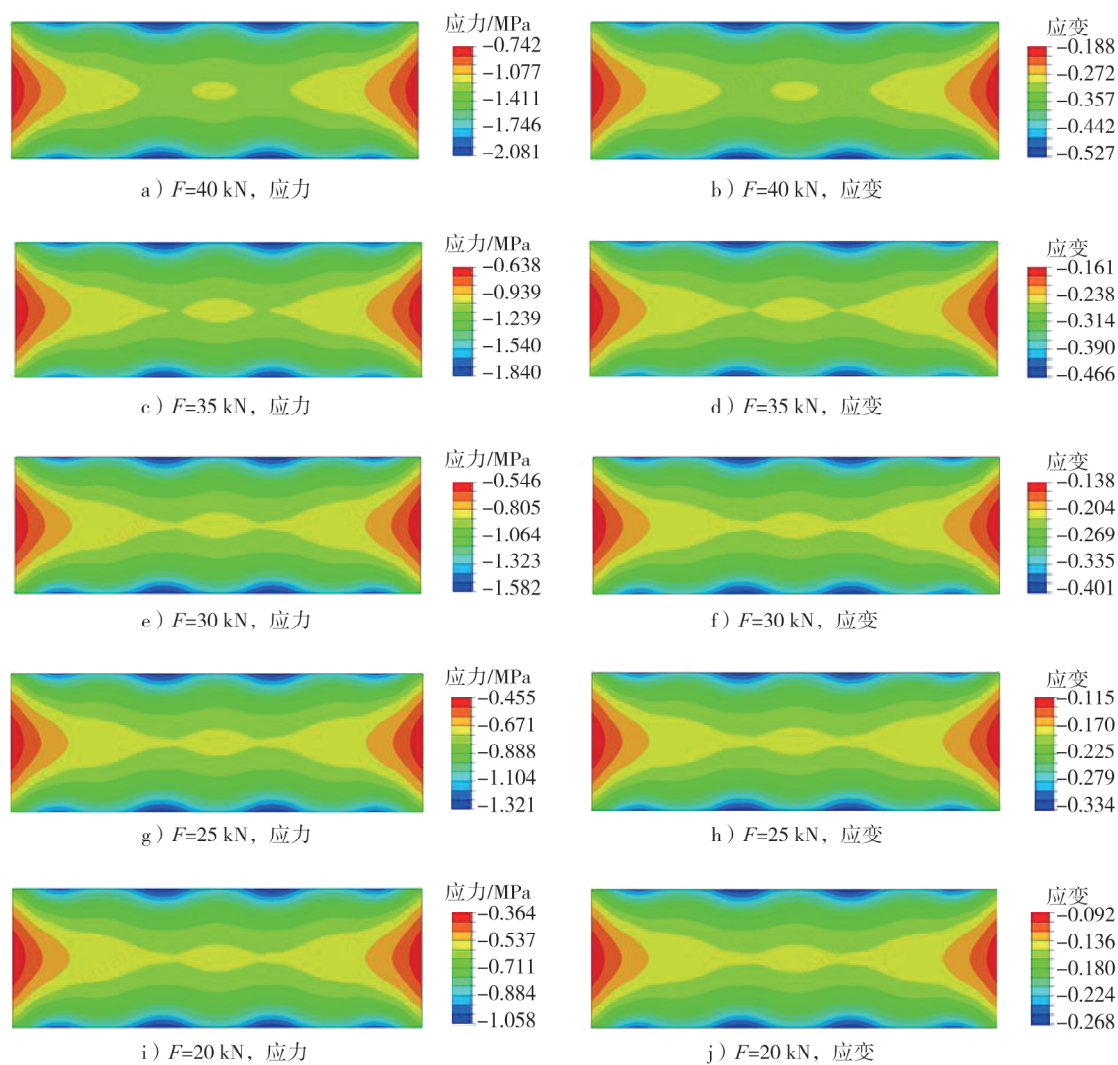


图8 钢带间距为45 mm时不同封装力下膜电极的应力和应变云图



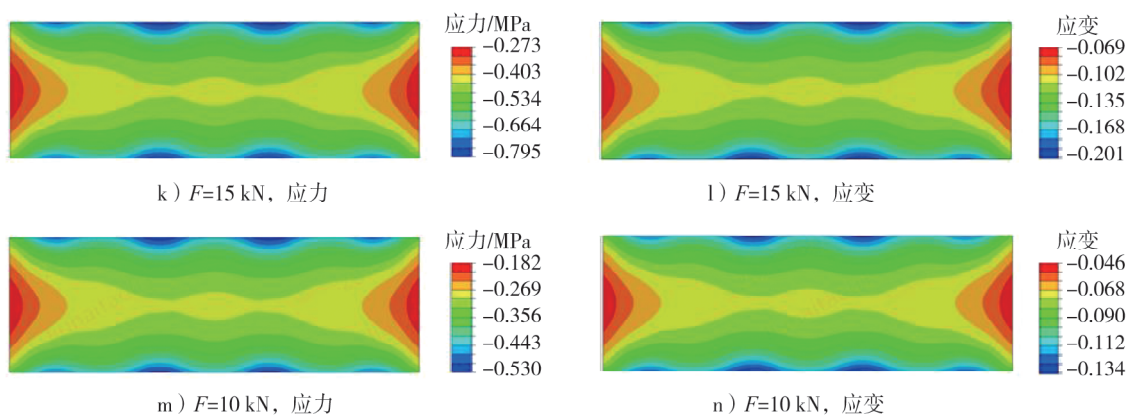
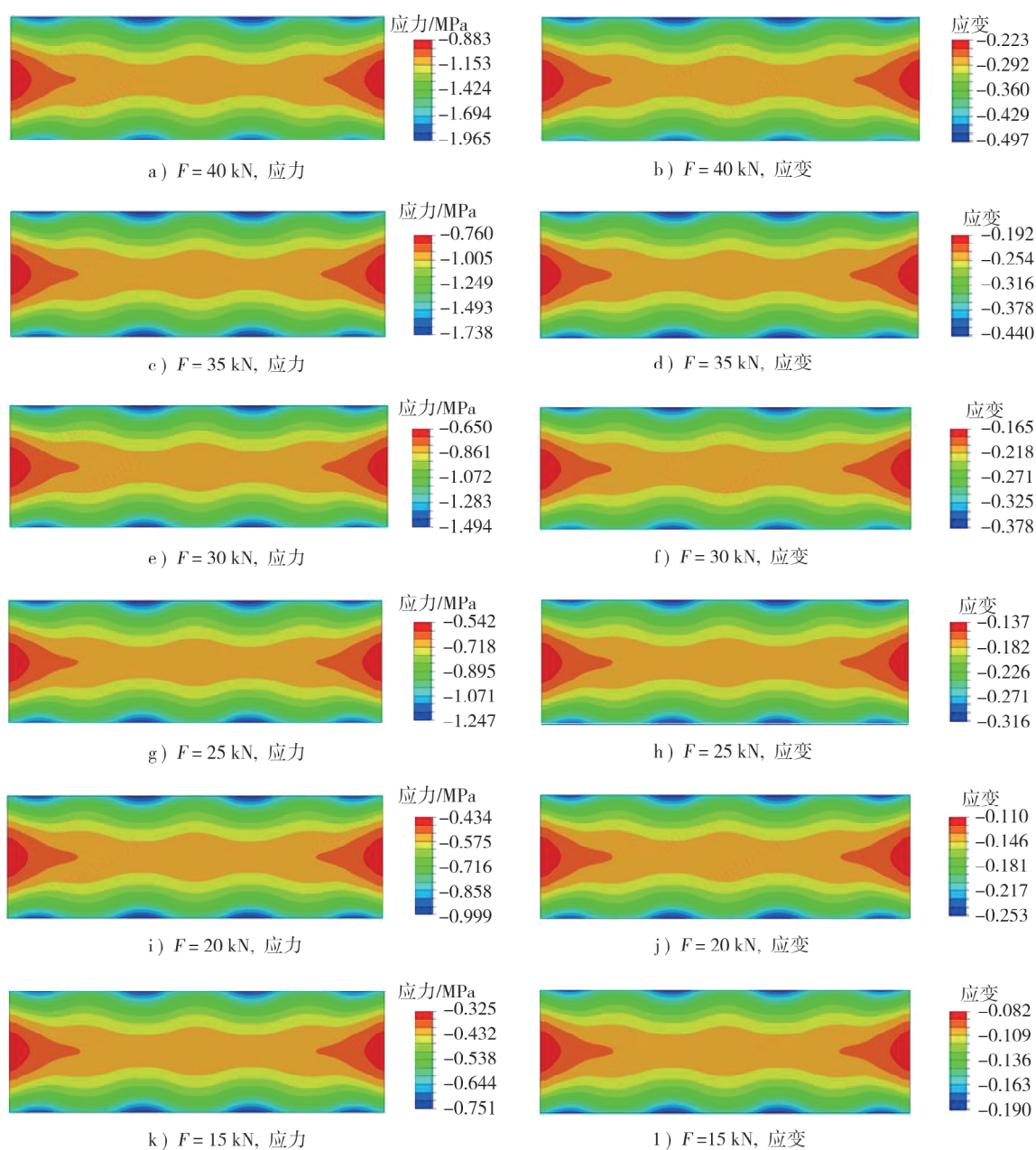


图9 钢带间距为 50 mm 时不同封装力下膜电极的应力和应变云图



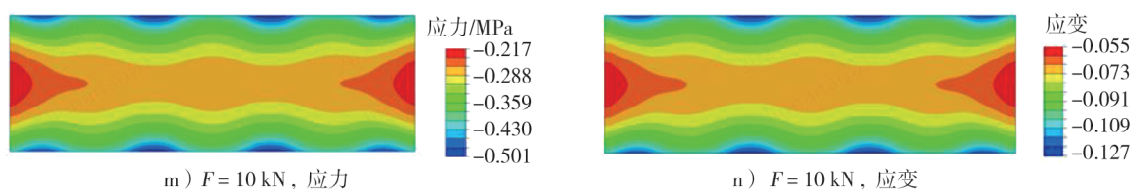


图10 钢带间距为 55 mm 时不同封装力下膜电极的应力和应变云图

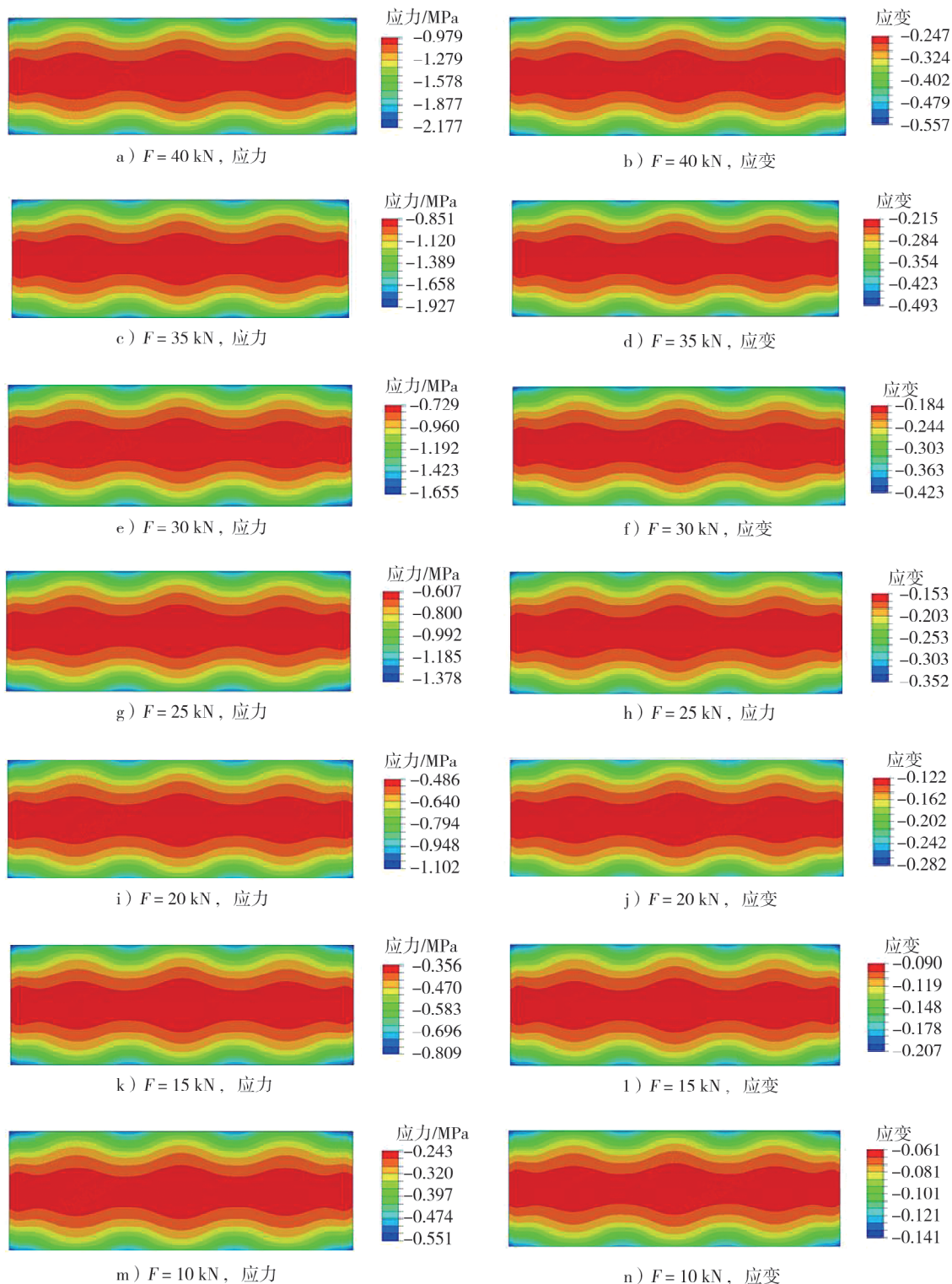


图11 钢带间距为 60 mm 时不同封装力下膜电极的应力和应变云图

由表 3、4 及图 7~11 可知:同一钢带间距下,膜电极的平均接触应力和平均应变随封装力的增大而增加;同一封装力下,膜电极的平均接触应力和平均接触应变随钢带间距的增大而减小。

根据接触压力和孔隙率之间的关系,得到孔隙率

$$\bar{\theta}_{\text{GDL}} = \frac{\theta_{\text{GDL}} - \varepsilon_{\text{V}}}{1 - \varepsilon_{\text{V}}}, \quad (3)$$

式中: θ_{GDL} 为气体扩散层的初始孔隙率, ε_{V} 为体积应变。

由于碳纸可压缩性强,其泊松比仅为 0.01,受压时基本不产生横向变形,其体积应变可认为是压缩方向的线应变^[21]。

碳纸体积应变

$$\varepsilon_{\text{V1}} = \varepsilon_z = \ln(h/h_0), \quad (4)$$

式中: ε_z 为压缩方向的线应变; h 为受力后碳纸变形长度,mm; h_0 为未受力碳纸初始长度,mm。

以 $\mu\Omega$ 为单位的气体扩散层与极板之间接触电阻 R_{con} 的数值

$$\{R_{\text{con}}\} = 2.2163 + 3.5306 / \{p_{\text{con}}\}, \quad (5)$$

式中: $\{p_{\text{con}}\}$ 为以 MPa 为单位的气体扩散层和极板之间的接触压力 p_{con} 的数值。

将仿真得到的平均接触应力和平均应变带入式 (3)~(5),可得到接触电阻和孔隙率之间的关系,如图 12 所示。由图 12 可知:接触电阻随封装力的增加呈现先快速下降后趋于平缓的趋势;孔隙率随封装力的增加呈现加快降低的趋势,两者在某一封装力下有一个交点,该交点即为该钢带间距条件下的最优封装力。

经仿真计算,得到不同钢带间距条件下最优封装力及对应的接触电阻和孔隙率,如表 5 所示。

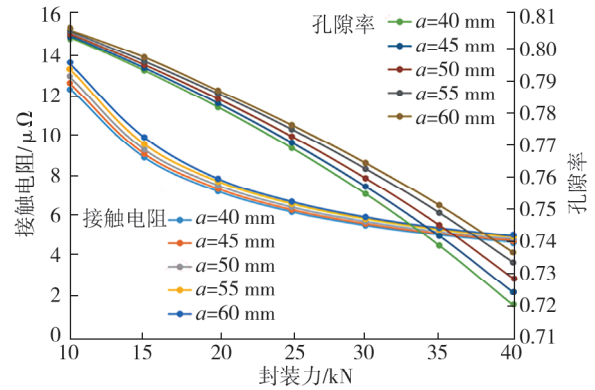


图 12 封装力与接触电阻和孔隙率之间的关系

表 5 不同钢带间距下的最优封装力结果

钢带间距/mm	接触电阻/ $\mu\Omega$	孔隙率	最优封装力/kN
40	5.35	0.747	32.8
45	5.24	0.746	34.4
50	5.12	0.745	35.6
55	5.03	0.744	36.7
60	4.96	0.743	38.5

以钢带间距为 40 mm 为例,提取不同封装力下的应力标准差和应变标准差,如图 13 所示。由图 13 可知:应力标准差和应变标准差存在唯一交点,此时封装力为 32~40 kN,该区域封装力在合理的区间,因此实际封装力应在该范围内。增大钢带间距,对应的最优封装力相应增加,不影响电池堆性能。

4 结论

1) 分别分析计算封装力与接触电阻、封装力与孔隙率之间的关系和相互影响,可以得到最优封装力。

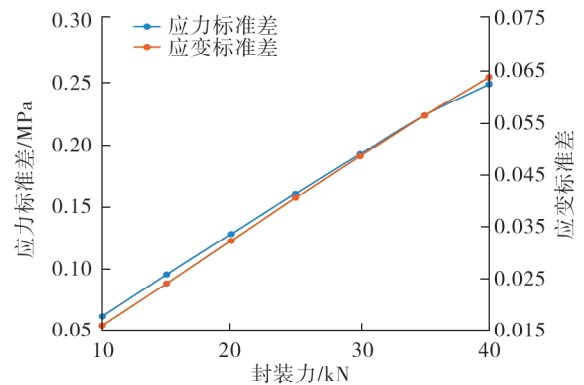


图 13 封装力与应力标准差和应变标准差之间的关系

2)钢带间距为40 mm时,最优封装力为32.8 kN,接触电阻降低至 $5.35\ \mu\Omega$,孔隙率提高至0.747,不影响电堆性能。

3)增大钢带间距后,最优封装力随之增加,使接触电阻和孔隙率在合适范围内,不影响电堆性能。

参考文献:

- [1] 杜益开,詹志刚,宛朝辉,等.单冷却流道冷却双膜电极的电堆结构研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2018,42(6):986-991.
- [2] 潘兴龙,孟繁雨,丁磊,等.质子交换膜燃料电池电堆封装设计综述[J].汽车文摘,2023(4):51-62.
- [3] 王坦帅,孙仁云,廖孟,等.质子交换膜燃料电池封装结构安全性研究[J].西华大学学报(自然科学版),2023,42(2):13-19.
- [4] 赵振东,刘国庆,吴金国,等.质子交换膜燃料电池电堆封装技术研究进展[J].南京工程学院学报(自然科学版),2022,20(4):53-60.
- [5] PARK Y H, CATON J A. Development of a PEM stack and performance analysis including the effects of water content in the membrane and cooling method[J]. Journal of Power Sources, 2008, 179(2): 584-591.
- [6] WANG X T, SONG Y, ZHANG B. Experimental study on clamping pressure distribution in PEM fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2008, 179(1): 305-309.
- [7] NITTA I, HIMANEN O, MIKKOLA M. Contact resistance between gas diffusion layer and catalyst layer of PEM fuel cell[J]. Electrochemistry Communications, 2008, 10(1): 47-51.
- [8] JANG J H, CHIU H C, YAN W M, et al. Effects of operating conditions on the performances of individual cell and stack of PEM fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2008, 180(1): 476-483.
- [9] 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): 475-485.
- [10] SU Z Y, LIU C T, CHANG H P, et al. A numerical investigation of the effects of compression force on PEM fuel cell performance[J]. Journal of Power Sources, 2008, 183(1): 182-192.
- [11] LEE S J, HSU C D, HUANG C H. Analyses of the fuel cell stack assembly pressure[J]. Journal of Power Sources, 2005, 145(2): 353-361.
- [12] KUSOGLU A, KARLSSON A M, SANTARE M H, et al. Mechanical response of fuel cell membranes subjected to a hygro-thermal cycle[J]. Journal of Power Sources, 2006, 161(2): 987-996.
- [13] KUSOGLU A, KARLSSON A M, SANTARE M H, et al. Mechanical behavior of fuel cell membranes under humidity cycles and effect of swelling anisotropy on the fatigue stresses[J]. Journal of Power Sources, 2007, 170(2): 345-358.
- [14] TANG Y L, KUSOGLU A, KARLSSON A M, et al. Mechanical properties of a reinforced composite polymer electrolyte membrane and its simulated performance in PEM fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2008, 175(2): 817-825.
- [15] BOGRACHEV D, GUEGUEN M, GRANDIDIER J C, et al. Stress and plastic deformation of MEA in fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2008, 180(1): 393-401.
- [16] LIU D A, PENG L F, LAI X M. Effect of dimensional error of metallic bipolar plate on the GDL pressure distribution in the PEM fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(2): 990-997.
- [17] ZHOU Y, LIN G, SHIH A J, et al. Multiphysics modeling of assembly pressure effects on proton exchange membrane fuel cell performance[J]. Journal of Fuel Cell Science and Technology, 2009, 6(4): 041005.
- [18] MIKKOLA M, TINGELÖF T, IHONEN J K. Modelling compression pressure distribution in fuel cell stacks[J]. Journal of Power Sources, 2009, 193(1): 269-275.
- [19] LIN P, ZHOU P, WU C W. A high efficient assembly technique for large PEMFC stacks: Part I:theory [J]. Journal of Power Sources, 2009, 194(1): 381-390.
- [20] LIN P, ZHOU P, WU C W. A high efficient assembly technique for large proton exchange membrane fuel cell stacks: Part II:applications[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(5): 1383-1392.
- [21] 柳海涛,颜华,柴建平,等.封装力的确定方法、确定装置与计算机可读存储介质:CN115392083A[P]. 2022-11-25.

(下转第63页)

propagation direction of sound waves and sound waves of different frequencies. The influence of the number of metamaterials on the noise sound pressure is verified through experiments. The simulation results show that the maze-type acoustic metamaterials change the propagation direction of sound waves, forming abnormal reflection to reduce the noise sound pressure; the thickness of the metamaterials is related to the frequency of sound waves, and the metamaterial structure can be designed for different frequency noises, which can achieve precise noise control. The experimental results show that when the sound wave frequency is 2 kHz, using maze-type acoustic metamaterials can reduce the root mean square of sound pressure level from 83.47 dB to 74.85 dB, and the noise is significantly reduced; as the number of metamaterials increases, root mean square of the sound pressure level continues to decrease, and the noise reduction effect is better, but too many metamaterials lead to an increase in the overall mass of the, it is recommended to choose a group (2 pieces) or two groups (4 pieces) when used in practice, and the noise reduction effect of metamaterials is better at time.

Keywords: acoustic metamaterial; noise control; abnormal reflection; root mean square of sound pressure level

(责任编辑:胡晓燕)

.....
(上接第 25 页)

The influence of steel strip spacing on the clamping load of a proton exchange membrane fuel cell stack

LIU Haitao^{1,2}, BAI Shuzhan^{1*}, WU Minghua², YANG Rongchang², XI Fuqiang²

1. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Shandong Guochuang Fuel Cell Technology Innovation Center Co., Ltd., Weifang 261000, China

Abstract: To improve the efficiency, stability, and service life of proton exchange membrane fuel cell stacks, a typical large-scale proton exchange membrane fuel cell stack is taken as the research object. An equivalent stiffness model is used to analyze the magnitude of the clamping load of the stack and its uniform distribution in the stack components. At the same time, the porosity and contact resistance values corresponding to different stack clamping load are calculated. The optimal clamping load values and selection criteria for fuel cell stacks under different steel strip spacing conditions are proposed. The results show that as the spacing between steel strips increases, the corresponding optimal clamping load shows an increasing trend. Taking the spacing between steel strips of 40 mm as an example, the corresponding clamping load of 32.8 kN is optimal, and the clamping load is judged to be within a reasonable range based on the stress standard deviation and strain standard deviation. At this point, the corresponding contact resistance is 5.35 $\mu\Omega$, and the porosity is 0.747.

Keywords: fuel cell; equivalent stiffness model; clamping load; porosity; contact resistance; steel strip spacing

(责任编辑:刘丽君)