文章编号:1674-2974(2024)08-0127-08 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024183

加长加宽的PEMFC电堆应力分布一致性仿真与优化

张智明[1†],黄刚强[1],任辉[1],陈志浩[1],章桐[1,2]
(1. 同济大学 汽车学院,上海 201804;
2. 清华大学 长三角研究院,浙江 嘉兴 314000)

摘 要:质子交换膜燃料电池可以通过扩大电堆的活性区域反应面积来获得更高的功率,但电堆反应面积扩大后,容易导致膜电极应力分布的不均匀性增加,从而引起燃料电池电化学性能的下降.为此,本研究设计了4种不同结构尺寸的燃料电池电堆,结合等效刚度模型法和有限元软件,分析了扩大反应面积的电堆结构对膜电极应力分布均匀性的影响,并进一步优化电堆内钢带的安装位置,以提升电堆内部接触压力分布均匀性.研究结果表明,膜电极接触压力分布的均匀性对反应区域宽度的变化较为敏感,当活性区域尺寸加宽,电堆内部活性区域的平均应力标准差增加了23.2%.而当活性区域加长,或同时加长和加宽时,相应增加一根捆扎钢带使电堆内部活性区域的平均应力标准差分别减小了8.6%和8.7%,表明适当增加捆扎钢带的数量可以提高电堆内部接触压力分布的均匀性.此外,钢带位置优化结果显示,电堆外侧钢带越靠近端板侧面时,电堆内部活性区域的应力分布越均匀.

关键词:质子交换膜燃料电池;钢带捆扎;电堆放大;膜电极;压力分布一致性
中图分类号:TM911.4 **文献标志码**:A

Simulation and Optimization of Stress Distribution Uniformity for Enlarged PEMFC Stacks

ZHANG Zhiming[1†], HUANG Gangqiang[1], REN Hui[1], CHEN Zhihao[1], ZHANG Tong[1,2]
(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314000, China)

Abstract: Proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) can achieve higher power by expanding the reaction area of the stack active area. However, for stacks with enlarged reaction areas, there is a tendency for increased non-uniformity in the distribution of membrane electrode assembly (MEA) stress, leading to a decline in the electrochemical performance of fuel cells. In this study, four different structural sizes of PEMFC stacks were designed. Using a combination of the equivalent stiffness model and finite element software, the impact of stack structures with expanded reaction areas on the uniformity of stress distribution of the MEA was analyzed. Furthermore, the installation position of steel belts within the stack was optimized to enhance the uniformity of internal contact pressure distribution. The research results indicate that the uniformity of MEA contact pressure

* **收稿日期**:2023-09-06
基金项目:上海市自然科学基金资助项目(22ZR1466800), Natural Science Foundation of Shanghai(22ZR1466800);上海市科技创新行动计划项目(20dz1205500),Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan(20dz1205500)
作者简介:张智明(1979—),男,辽宁辽阳人,同济大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail: zhangzm@tongji.edu.cn

distribution is particularly sensitive to changes in the reaction area width. When the size of the active area is widened, the standard deviation of the average stress within the stack's internal active region increases by 23.2%. Conversely, when the active area is lengthened, or both lengthened and widened simultaneously, adding a corresponding bundled steel belt reduces the standard deviation of the average stress within the stack's internal active area by 8.6% and 8.7%, respectively. This suggests that appropriately increasing the number of bundled steel belts can improve the uniformity of contact pressure distribution within the stack. Additionally, optimization results for belt positioning show that the more the outer steel belt is positioned closer to the end plate side, the more uniform the stress distribution within the stack's internal active region.

Key words: proton exchange membrane fuel cell (PEMFC); steel belt bundling; fuel cell stack enlargement; membrane electrode assembly (MEA); stress distribution uniformity

面向国家“碳达峰、碳中和”和“汽车强国”战略,交通运输领域的环境污染和能源枯竭问题越来越受到人们的重视.质子交换膜燃料电池具有转化效率高、无环境污染、工作温度低、启动快等优点,是一种具有广阔使用前景的车用动力源[1].但是,单电池的输出电压和功率较小,实际应用中将多片单电池串联组装在一起,在电堆两侧安装端板,利用螺栓或钢带等紧固件将各结构部件紧紧压在一起,构成堆栈结构.由紧固件产生的封装载荷使电堆各组件之间相互挤压,在电化学反应发生的膜电极上形成合适的接触压力,并与密封件一起形成良好的密封效果[2].

由于电堆端板不是理想的绝对刚性材料,在一定封装载荷的作用下,端板会发生弯曲变形,影响内部膜电极上压力分布的均匀性,从而对电堆的正常工作产生不良影响:受力过小容易导致局部接触电阻急剧上升,电流的传输受到阻碍,造成电化学性能中的欧姆损耗过大,同时还会带来电堆密封效果的下降;受力过大则导致部分气体扩散层被过度压缩,孔隙率减小,从而增大了气体传输阻抗,二者均会影响电堆整体的工作性能[3-4].Atyabi等[5]对不同封装力下的单根流道三维多相模型进行仿真.结果表明,均匀分布的压力会使得氧气在阴极侧分布均衡,催化剂表面均获得氧气,产生均匀的电流密度,从而防止局部热电点的产生,有利于提高燃料电池的工作寿命.与此类似,Huo等[6]的研究发现接触压力分布不均匀会直接影响电堆性能和耐久性.Peng等[7]的研究设计了一种能够检测电流密度分配的电路板,试验结果显示,局部接触压力和电流密度分布具有高度相关性.由此可见,电堆内部压力分布的均匀性对于燃料电池的电化学性能至关重要.

针对改善电堆内部膜电极压力分布均匀性已经有了很多的研究工作,尤其是在电堆的封装设计上.Wang等[8]和Alizadeh等[9]在端板内挖了一个空腔并注入液体,通过液压作用来改善电堆内部压力分布和电堆性能.Liu等[10]的研究中使用了气压机构施加均匀的气体压力作用来防止端板的大变形.显然两者都对提高电堆内部接触压力分布一致性有着良好的效果.但液压和气压构件同时也会增加电堆结构设计的复杂性,造成电堆质量和体积功率密度的降低.熊月娇[11]以螺栓封装的质子交换膜燃料电池堆为研究对象,通过对螺栓布局形式和螺栓载荷分布进行优化,提升了电堆内部接触压力的均匀性.魏铭瑛[12]以钢带封装的质子交换膜燃料电池堆为研究对象,通过对端板进行拓扑优化设计,实现了内部接触面变形均匀性的明显改善.Huang等[13]发现每一个电堆存在一个最佳的封装力,在一定范围内增加电堆的封装力可以增加电堆最大功率输出,但当封装力超过最优值时,电堆输出性能反而变差.Wen等[14]发现提高平均接触压力可以改善电堆膜电极接触压力分布的均匀性,降低接触欧姆电阻,但电堆最大功率并不随平均接触压力线性增加.Qiu等[15]使用大量有限元仿真试验作为数据库,并使用基于代理模型的神经网络对螺栓力的大小和位置进行了优化,内部膜电极处接触压力分布一致性有所提高,但该模型前期的数据准备会消耗较多的计算资源.

近年来,伴随着全功率燃料电池汽车的开发和应用,大功率的燃料电池电堆成为主流车企关注的

重点研究内容.由于电堆的模块化结构,目前增大燃料电池单堆功率的方式主要有两种:一种是增大单电池节数,另一种是增大膜电极的电化学反应活性面积.对于第一种方式,Zhou等[16]通过建立等效模型对20、40、60、80节单电池的电堆进行了有限元数值模拟,发现随着电堆单电池数目的增加,电堆内部压力分布的均匀性越来越好.但单电池的数目过多,给电堆组件的制造精度和电堆的组装设计带来巨大挑战,而且容易引起电堆的"塌腰"问题.对于第二种方式,王国庆[17]通过Fluent软件对三种不同面积大小的质子交换膜燃料电池进行流体仿真和电化学仿真分析,并通过试验验证了所设计的大面积质子交换膜燃料电池的可靠性.增大单电池电化学反应活性面积可以提高单堆功率,但同时会给电堆内部膜电极的压力分布一致性带来挑战.

综上,电堆内部接触压力分布一致性的研究多集中于对电堆端板结构以及封装力的优化.由于各双极板制造厂做的双极板尺寸和结构不一,针对膜电极压力分布一致性的优化策略也有很大的不同,因此本文面向车用大功率电堆需求,针对不同活性区域面积下的电堆采用有限元结构力学分析方法,进行电堆内部膜电极的应力应变分析,以寻求较为适宜的活性区域面积和相应的设计方法.本文主要研究内容:基于现有工程级燃料电池电堆膜电极的活性区域尺寸,将活性区域分别加长25%,加宽25%和同时加长和加宽25%,利用ANSYS Workbench对这4种活性区域尺寸的模型进行有限元仿真,并将仿真结果进行对比分析,同时匹配优化不同数量和位置的钢带捆扎电堆的仿真结果,并进行了对比分析.最后得出使得电堆内部膜电极受力分布均匀的电堆设计方法.

1　电堆等效刚度模型

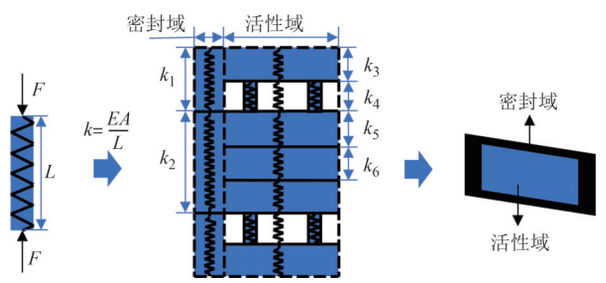
双极板流道数量多、流道壁厚度较薄,有限元模型中划分的网格数量会达到千万级别.另外,极板与膜电极间非线性接触关系增加了模型的计算复杂度.这些会导致工程级电堆仿真所涉及的计算资源巨大,计算时间长且不容易收敛.但燃料电池直流道双极板脊背和流场具有很好的周期性,因此针对双极板脊背流场周期性结构,本研究通过等效刚度力学模型实现燃料电池整堆建模.

对于一个简单的轴向结构,其轴向刚度k可以定义为:

$$k = \frac{EA}{L} \tag{1}$$

其中:k为弹性模量,L为轴向长度,A为截面积.

对于一个复杂结构,可以将其视为若干个弹性元件串联或并联而成,因此将单电池分为活性区域部分和密封区域部分,如图1所示.k_1~k_6分别代表双极板密封件的刚度、密封件的刚度、双极板主体的刚度、双极板流道肋的刚度、气体扩散层的刚度以及质子交换膜的刚度.



(a)结构轴向刚度　(b)单电池等效刚度　(c)简化后的单电池

图1　电堆等效刚度模型

Fig.1　Equivalent stiffness model of fuel cell stack

单电池可以视为由双极板主体、流道肋、气体扩散层、质子交换膜、双极板密封部分和密封件构成.其中双极板主体、流道肋、气体扩散层和质子交换膜处于单电池的中心位置,是发生电化学反应的部分,称为活性区域部分.在活性区域部分,双极板主体与若干流道肋串联,再与质子交换膜和气体扩散层串联.图1(c)外侧的部分称为密封区域部分,在密封区域部分,双极板密封部分与密封件串联.简化后的单电池模型如图1(c)所示.按这种方法将单电池分为两个部分进行等效,将两者分别简化为各向同性的材料,并计算其材料参数,作为仿真的材料输入参数.

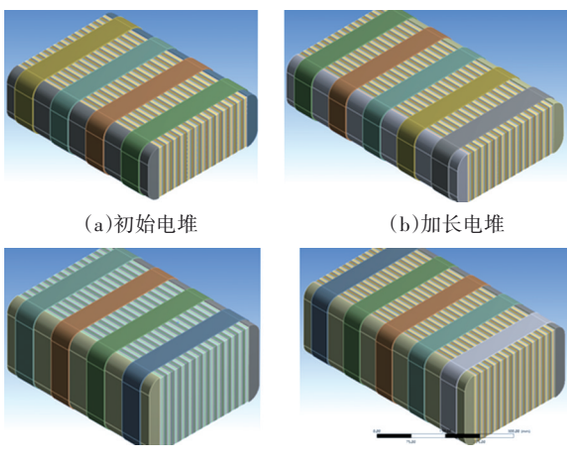
基于以上对电堆力学的等效,在CATIA中建立了四种活性区域尺寸的电堆的三维模型,电堆尺寸参数如表1所示.

表1　PEMFC电堆尺寸参数表[11~12,18]

Tab.1　PEMFC stack size parameter table[11~12,18]

电堆参数	数值			
	初始	加长	加宽	加长加宽
活性区域长度/mm	400	500	400	500
活性区域宽度/mm	75	75	100	100
电堆高度/mm	254	254	254	254
单电池数量	100	100	100	100
总封装力/kN	60	60	60	60
钢带宽度/mm	50	50	50	50
钢带数量	4	5	4	5

其中活性区域加长和加长加宽后的电堆均增加了1根钢带进行封装,活性区域加宽后的电堆保持原有的4根钢带进行封装,整体的三维模型如图2所示.



(a)初始电堆 (b)加长电堆

(c)加宽电堆 (d)加长加宽电堆

图2 基于等效刚度模型的电堆三维模型

Fig.2 The equivalent stiffness 3D model of the fuel cell stack

在ANSYS Workbench中分别对简化后的电堆进行结构力学分析.为了减少模型网格数量,节省计算时间,对模型施加对称约束,取四分之一模型进行分析.参照实验室前期同等尺寸规模电堆,此处电堆模型的总封装力设计为60 kN.封装力施加在钢带截面处,方向为垂直于钢带截面,每根钢带施加的初始封装力为15 kN,如图3所示.

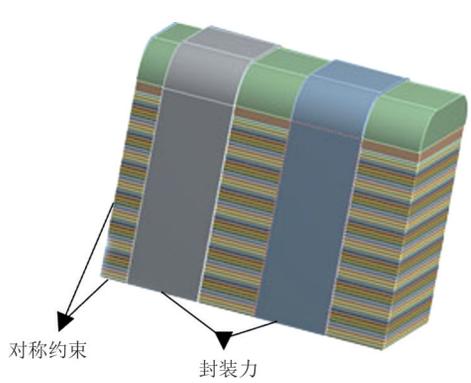


图3 仿真边界条件设置

Fig.3 Simulation boundary conditions setting

在钢带封装中,端板与钢带的接触面是封装力重要的传递路径,需要在端板和钢带之间建立良好的接触关系,故设置端板与钢带,以及内部组件之间为带有摩擦的面面接触,摩擦系数为0.1.同一片单电池的内部活性区域和外部密封区域之间为绑定约束,电堆组件的材料参数如表2所示,所有电堆组件的材料参数均假设为线弹性.

表2 电堆各组件材料参数[11-12,18]

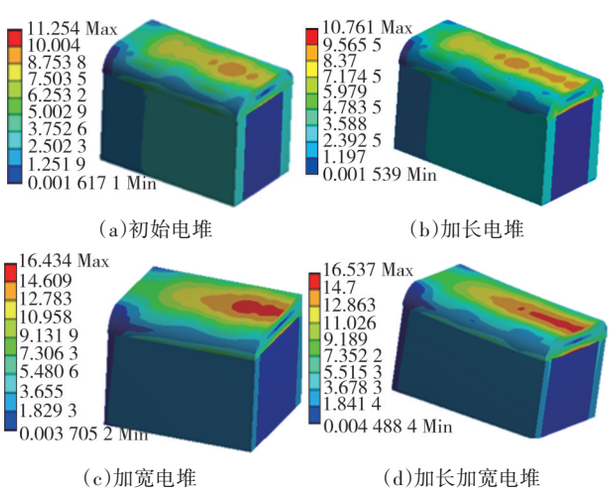
Tab.2 Material parameters of stack components[11-12,18]

组件	材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
质子交换膜	Nafion	0.32	0.40	500
气体扩散层	TGP-H-90	0.006	0.33	440
双极板	石墨	10	0.25	2 160
端板	6061铝合金	69	0.33	2 800
捆扎带	304钢	200.9	0.28	7 850
密封垫圈	橡胶	5.5	0.30	1 700

2 仿真结果与分析

2.1 整堆应力结果分析

施加封装力后四个电堆模型的应力分布云图如图4所示.



(a)初始电堆 (b)加长电堆

(c)加宽电堆 (d)加长加宽电堆

图4 整堆应力云图

Fig.4 Stress distribution of the whole fuel cell stack

从整堆应力云图中可以看出,相比于远离端板的单电池,靠近端板的单电池受压更不均匀,此外,由于外部密封区域和内部活性区域的弹性模量相差很大,外部密封区域的最大应力与内部活性区域的最大应力相差了近10倍,可见,加长加宽电堆设计方式明显降低了膜电极反应区的压力分布一致性.

2.2 电堆应力一致性评估

为了量化评估每个单电池的受力状态,采用平均应力μ_P和应力标准差σ_P,定义如下:

$$\mu_P = \frac{\sum_{i=1}^{N} P_i}{N} \tag{2}$$

$$\sigma_P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(P_i - \mu_P\right)^2}{N}} \tag{3}$$

其中,P_i为活性区域所划分网格上每个节点的接触应力;N为节点数;平均应力μ_P可以用来评估单电池整体所受应力;应力标准差σ_P可以用来评估单电池所受应力的均匀性.

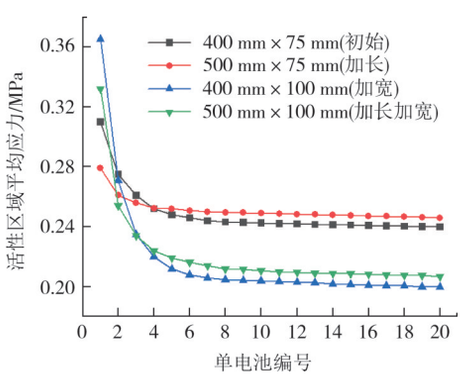
考虑到当数据在组与组之间平均值差异较大时,采用标准差去衡量其离散程度可能会不够准确,因此采用标准差作为衡量数据离散程度的主要指标,变异系数为次要指标.应力变异系数定义如下:

$$c_v = \frac{\sigma_P}{\mu_P} \tag{4}$$

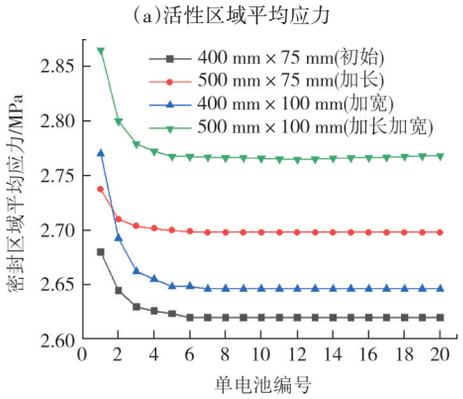
其中:c_v为应力变异系数;σ_P为应力标准差;μ_P为平均应力.根据上述定义可知变异系数是一个无量纲量,比起标准差,变异系数的优点在于考虑了数据的平均值的影响.

由于靠近端板的单电池单元表现出较大的变形和应力变化,而远离端板的单电池单元变化较小.因此采用靠近端板的前20节单电池上的应力状况来衡量整个电堆的应力一致性.

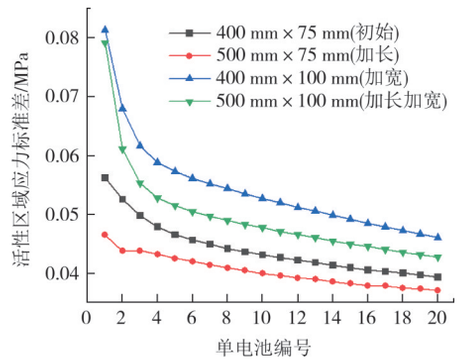
分别计算靠近端板的前20节单电池上活性区域和密封区域的平均应力、应力标准差、应力变异系数,结果如图5所示.



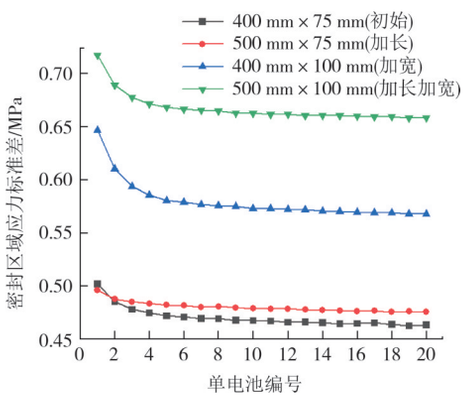
(a)活性区域平均应力



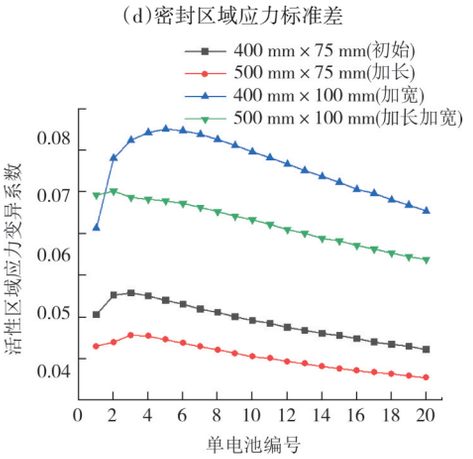
(b)密封区域平均应力



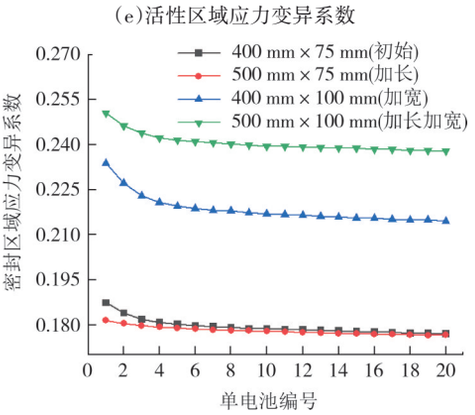
(c)活性区域应力标准差



(d)密封区域应力标准差



(e)活性区域应力变异系数



(f)密封区域应力变异系数

图5　PEMFC电堆4种尺寸下活性区域和密封区域的力学性能

Fig.5　Mechanical performance of reaction area and closed area for 4 structural sizes of PEMFC stacks

从图5中可以看出:密封区域和活性区域的应力标准差相差10倍左右,这是由于相同电堆中密封区域和活性区域平均应力相差约10倍.采用应力标准差对密封区域和活性区域应力分布一致性进行比较并不能有效衡量,为此引入了变异系数来消除平均应力差异对应力分布一致性的影响.

此外,加长电堆活性区域并增加一根钢带时,电堆活性区域应力标准差和应力变异系数均减小了一些,这说明加长电堆活性区域的同时增加一根钢带可使电堆活性区域应力一致性有一定程度的提高.电堆密封区域应力标准差和应力变异系数变化不大,这说明加长电堆活性区域降低了膜电极区域的应力一致性,但增加一根钢带带来了应力一致性的提升,两者存在一定的抵消作用并导致最终结果变化不大.

而加宽电堆活性区域钢带数不变时,电堆活性区域应力标准差和应力变异系数均增加了很多,这说明电堆活性区域加宽后活性区域的应力一致性变差;电堆密封区域应力标准差和应力变异系数增大了较多,这说明电堆加宽后密封区域的应力一致性变差,这种情况也会影响原始电堆的密封性,导致泄漏等严重事故.

对于既加长又加宽电堆活性区域并增加一根钢带,其活性区域和密封区域应力一致性相比于初始电堆均变得更差,但其与只加宽活性区域钢带数不变的情况相比,活性区域应力标准差和应力变异系数变得更小,密封区域应力标准差和应力变异系数变得更大,这说明既加长又加宽电堆活性区域并增加一根钢带相对于只加宽电堆活性区域钢带数不变,其活性区域应力一致性更好,密封区域应力一致性更差.

为了更具体地说明膜电极反应区域应力一致性的变化,分别计算靠近端板前20节单电池活性区域和密封区域的平均应力标准差,并将结果汇总,如表3所示.从表3的对比结果可以看出,加宽电堆活性区域尺寸且捆扎钢带数不变时,电堆内部活性区域平均应力标准差增大了约23.2%;加长和加长加宽电堆活性区域情况下,相应增加一根捆扎钢带时,电堆内部活性区域平均应力标准差分别减小了约8.6%和8.7%.

由以上分析可知,在设计电堆活性区域面积时,由于内部活性区域一致性相对于外部密封区域一致性更加重要,如果要加宽电堆,可以考虑同时适当加长电堆并增加捆扎钢带数,以使电堆内部活性区域一致性受到最小的影响.

表3 活性区域和密封区域平均应力标准差

Tab.3 Standard deviation of average stress in active area and sealing area

电堆	平均应力标准差/MPa	
	活性区域	密封区域
初始	0.044 25	0.471 2
加长	0.040 47	0.481 2
加宽	0.054 51	0.580 7
加长加宽	0.049 77	0.668 0

2.3 不同的钢带捆扎位置下电堆应力一致性分析与优化

不仅钢带数量对加长加宽的膜电极反应区域受力一致性具有重要影响,钢带在电堆上的受力位置同样具有影响.在此,为了更好表达钢带在电堆上的位置,定义L_1为电堆边缘的捆扎钢带到端板侧面的距离,L_2为相邻两根钢带之间的距离,如图6所示.设计4根等距分布的钢带,考虑到最外侧钢带不能与水气接头干涉,实际电堆最外侧钢带至多向内移动40 mm,同时在范围内进行钢带距离的线性增减.通过改变L_1和L_2的值来改变钢带的安装位置,分析钢带位置对电堆内部接触压力分布一致性的影响.

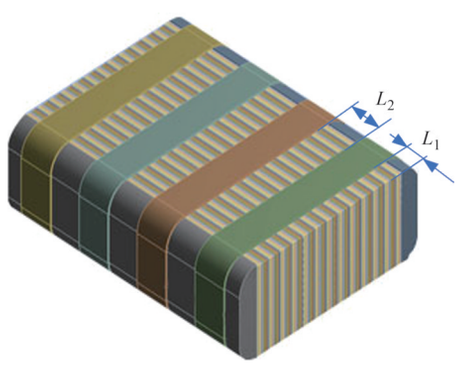
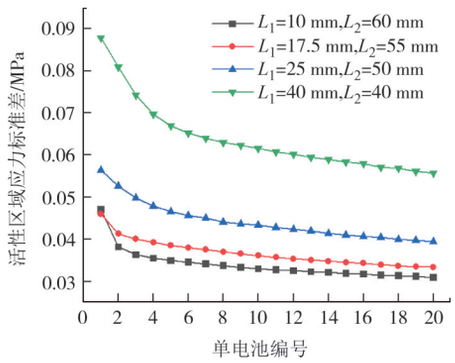


图6 钢带安装位置

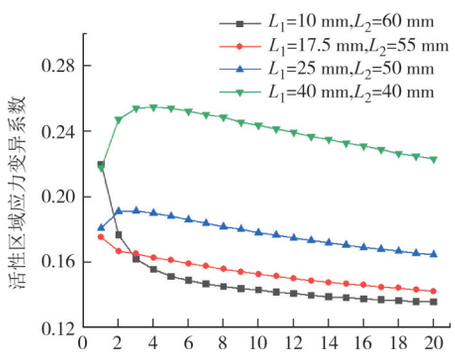
Fig.6 Clamping position of steel belts

取靠近端板的前20节单电池上活性区域和密封区域的应力标准差和应力变异系数进行对比分析,结果如图7所示.

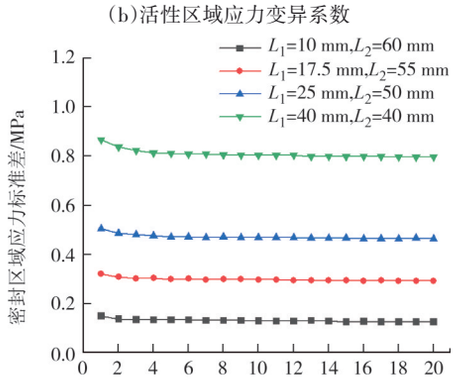
从图7可以看出,随着L_1的减小和L_2的增大,靠近端板的前20节单电池活性区域和密封区域上的应力标准差和应力变异系数呈现出减小的趋势,这说明L_1越小和L_2越大,即电堆外侧钢带越靠近端板侧面时,电堆内部活性区域应力一致性越好.考虑到



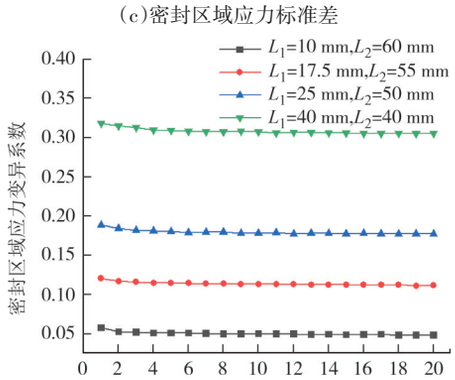
(a)活性区域应力标准差



(b)活性区域应力变异系数



(c)密封区域应力标准差



(d)密封区域应力变异系数

图 7　不同钢带安装位置

Fig.7　The different clamping position of the steel belts

钢带越靠近端板侧面,钢带之间的距离L_2越大,活性区域的封装力随着L_2的增大而相对分散,因此封装力的分布会更加均匀.

3　结 论

本文面向车用大功率电堆的实际需求,以钢带封装的燃料电池电堆为研究对象,利用等效刚度电堆模型进行了分析计算,设计了4种不同活性区域尺寸的电堆,利用ANSYS Workbench对电堆进行了静力学分析,得出以下主要结论.

1) 对于燃料电池电堆,相比于远离端板的单电池,靠近端板的单电池受力更不均匀.

2) 加长或加宽电堆会导致电堆内部受力一致性变差.其中,加宽电堆活性区域且捆扎钢带数不变时,最大平均应力标准差增大23.2%;对于加长和同时加长加宽电堆活性区域,增加一根捆扎钢带可降低电堆内部活性区域平均应力标准差,分别减小了8.6%和8.7%;因此增大电堆活性区域尺寸时,应同时加长活性区域并增加一定数量的捆扎钢带,有助于提升电堆内部活性区域应力一致性.

3) 钢带捆扎位置的优化可以提升电堆内部膜电极受力一致性.电堆外侧钢带越靠近端板侧面时,电堆内部活性区域应力一致性越好.由于钢带只是在限定端板尺寸范围内且均匀分布,在当前仿真分析中呈现此种结果,后续还需要进一步考虑非均匀分布的钢带所带来的影响.

本文通过探究不同尺寸活性区域以及钢带的匹配位置对于电堆内部接触压力分布的影响,对电堆的结构设计具有一定的指导作用,通过调整这些参数能够改善电堆内部接触压力分布一致性.

参考文献

[1] 衣宝廉. 燃料电池的原理、技术状态与展望[J]. 电池工业,2003,8(1):16-22.
YI B L. Fuel cell: fundamental, technology and prospect[J]. Battery Industry,2003,8(1):16-22.(in Chinese)

[2] SONG K, WANG Y M, DING Y H, et al. Assembly techniques for proton exchange membrane fuel cell stack: a literature review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 153: 111777.

[3] 张智明,史亮,郝韫,等. 钢带捆扎质子交换膜燃料电池端板拓扑优化[J]. 同济大学学报(自然科学版),2019,47(增刊1):74-78.
ZHANG Z M,SHI L,HAO Y, et al. Topology optimization of end plate of proton exchange membrane fuel cell bundled with steel strip[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2019,

47(Sup.1):74-78.(in Chinese)

[4] WU C W, ZHANG W, HAN X, et al. A systematic review for structure optimization and clamping load design of large proton exchange membrane fuel cell stack[J]. Journal of Power Sources, 2020,476:228724.

[5] ATYABI S A, AFSHARI E, WONGWISES S, et al. Effects of assembly pressure on PEM fuel cell performance by taking into accounts electrical and thermal contact resistances[J]. Energy, 2019,179:490-501.

[6] HUO W M, WU P, XIE B, et al. Elucidating non-uniform assembling effect in large-scale PEM fuel cell by coupling mechanics and performance models[J]. Energy Conversion and Management,2023,277:116668.

[7] PENG L F, SHAO H, QIU D K, et al. Investigation of the non-uniform distribution of current density in commercial-size proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2020,453:227836.

[8] 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.

[9] ALIZADEH E, GHADIMI M, BARZEGARI M M, et al. Development of contact pressure distribution of PEM fuel cell's MEA using novel clamping mechanism[J]. Energy, 2017, 131: 92-97.

[10] LIU J R, TAN J Z, YANG W Z, et al. Better electrochemical performance of PEMFC under a novel pneumatic clamping mechanism[J]. Energy, 2021, 229: 120796.

[11] 熊月娇.燃料电池端板结构及封装载荷优化设计[D].大连:大连理工大学, 2019: 29-61.
XIONG Y J. Optimization design of endplate structure and clamping loads of fuel cells [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019: 29-61. (in Chinese)

[12] 魏铭瑛.钢带封装燃料电池端板优化设计[D].大连:大连理工大学,2016: 27-40.
WEI M Y. Optimization design of the fuel cell end plate clamped with belts [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016: 27-40. (in Chinese)

[13] HUANG K J, CHEN C Y, HWANG S J, et al. Effects of compression distribution on PEMFC stacks using reformate as fuel [J]. Energy Procedia,2012,29:234-243.

[14] 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.

[15] QIU Y B, WU P, MIAO T W, et al. An intelligent approach for contact pressure optimization of PEM fuel cell gas diffusion layers [J]. Applied Sciences, 2020, 10(12): 4194.

[16] ZHOU Z H, QIU D K, ZHAI S, et al. Investigation of the assembly for high-power proton exchange membrane fuel cell stacks through an efficient equivalent model[J]. Applied Energy, 2020, 277: 115532.

[17] 王国庆.大面积质子交换膜燃料电池的设计与优化[D].太原:中北大学,2021: 13-36.
WANG G Q. Design and optimization of large area proton exchange membrane fuel cell[D]. Taiyuan: North University of China, 2021: 13-36. (in Chinese)

[18] 蒋化南.质子交换膜燃料电池堆端板优化设计及抗冲击性能研究[D].大连:大连理工大学,2014: 13-14.
JIANG H N. Optimization design and mechanical response to dynamic impact in proton exchange membrane fuel cells [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014: 13-14. (in Chinese)