

新型轻量化燃料电池电堆端板的设计与研究

文/王治颖 金大鹏 唐亚洲
中车工业研究院（青岛）有限公司

摘要：为掌握高功率密度、高可靠性、适用于批量化生产的燃料电池电堆端板关键前瞻技术，应用非金属材料与金属材料结合的设计思路，从材料及结构两个方面开展新型轻量化端板方案设计。首次采用PPS+GF40新型材料，利用有限元仿真软件ANSYS Workbench对新型端板结构进行力学学校核。仿真及样机测试结果均表明，新型轻量化端板满足电堆的机械性能要求，且优化后方案简化了绝缘板结构，端板较之前减重可达60%以上。除此之外，端板新增添导流板结构，合理分布形状及角度，从而提升电堆整体性能。由原来流量偏差量的43.6%提升至4.8%。

关键词：燃料电池电堆；力学学校核；PPS+GF40；端板减重；导流板

端板作为燃料电池电堆中重要的部件^[1]，应具备足够的机械强度和刚度，保证电堆紧固可靠和内部接触压力均匀分布，除此之外，还应具有质量轻、体积小和易于加工等特点^[2]。目前燃料电池电堆端板多采用金属材料^[3]，例如铝合金、不锈钢等，但金属材料易产生腐蚀性问题，为保证电堆的电阻性能，需在电堆组装时加装绝缘板或隔板^[4]，电堆结构整体较为复杂，因此本文致力于研发一套新型轻量化燃料电池电堆端板方案，应用新型材料PPS+GF40，利用材料优良的电阻属性结合结构优化设计，在满足电堆紧固可靠的前提下，既保证燃料电池电堆绝缘要求，又减少电堆零部件数目，优化电堆结构方案，实现电堆轻量化的目的。

方案设计

1. 燃料电池电堆总体设计

本文方案为试验型样机，针对120 kW燃料电池

电堆端板进行优化研发设计，设计开发的样机主要包括前端板、后端板及支撑板等，如图1所示。前后端板及支撑板通过螺杆连接实现电堆紧固。为满足开发过程中零部件性能测试，设计堆芯模型（由三块单体和模拟电体模块组成），并按照燃料电池电堆的紧固安装要求，完成模拟电堆样机的安装。

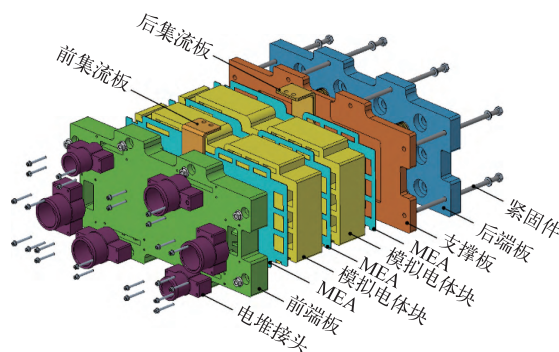


图1 试验样机电堆内部结构示意图

基金项目：中车集团重大科研计划项目（2020CKA005）

2. 前端板设计

前端板的主要作用是保证电堆紧密可靠，控制接触压力。前端板设计时，共设置8个螺栓孔位，为保证电堆整体受力均匀，32 kN力装配紧固后，前端板的最大形变量要求小于0.05 mm。

前端板采用新型材料PPS+GF40^[5]，其为一种聚苯硫醚（PPS）产品，应用非金属材料与金属材料结合生成，其含有40%的玻璃纤维增强材料。通过添加玻璃纤维强化后的聚苯硫醚，大幅提高了材料的机械性能，提升了冲击强度及拉伸强度。PPS+GF40材料物性参数具体见表1、表2。该材料具有密度低、重量轻、机械性能良好和优异的综合性能等优势，目前用途已十分广泛，多应用于汽车、电子电气、机械行业、石油化工、制药业、轻工业以及军工、航空航天等特殊领域^[6]，但在氢能领域应用较少。

表1 PPS+GF40材料机械性能参数具体数值

序号	物理性能	额定值 单位制	测试方法
1	密度（23℃）	1.66 g/cm ³	ISO1183
2	拉伸应力（23℃）	205 MPa	ISO527-2
3	拉伸应变（断裂，23℃）	2.0%	ISO527-2
4	弯曲模量（23℃）	14 500 MPa	ISO178
5	弯曲应力（23℃）	300 MPa	ISO178
6	弯切强度（23℃）	80.0 MPa	JIS K7214
7	摩擦系数3	0.24	-

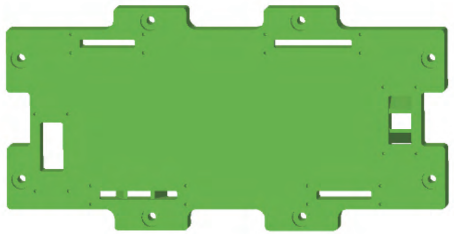
表2 PPS+GF40材料电气性能参数具体数值

序号	电气性能	额定值 单位制	测试方法
1	体积电阻率	$1.0 \times 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$	IEC 60093
2	介电强度	24 kV/mm	IEC 60243
3	介电常数4（23℃，1MHz）	3.60	IEC 60250
4	耗散因数5（23℃，1MHz）	2.0×10^{-3}	IEC 60250

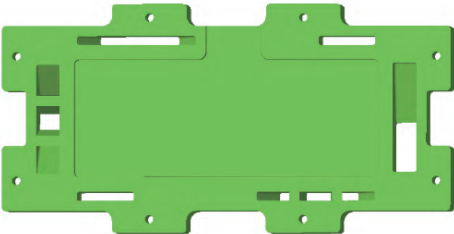
由于该材料具有良好的电绝缘性能^[7]，因此可以不再使用绝缘板来保证集流板和端板之间的电隔离，从而保障电堆的电气安全性能，简化了电堆的组合结构。如图2所示，前端板上挖取凹槽特征，使集流板与之嵌套安装。设计时，集流板厚度较前端板凹槽深度小，通过石墨纸或者碳纸填充在首片双极板与集流板之间，保证集流板与首片双极板贴合完好。

前端板流体入口增添设计导流结构，如图3所示。燃料电池内部反应物和生成物的流动均是在质子交换膜燃料电池流场中进行，流场设计的优劣直

接影响着电池性能的好坏，流场的分布形式决定着燃料电池不同流道的物料分配。流体经过端板进入公共腔室，公共腔室由双极板上的筋分为三部分。通过前端板增设导流板，合理设计导流形状和角度，使流体通过端板时更加均匀地进入公共腔室的三部分流道中，同时也使得进入每一片双极板的流体分配均匀性提升，从而提升电堆整体性能。



(a) 前端板（正面）



(b) 前端板（背面）

图2 前端板结构示意图

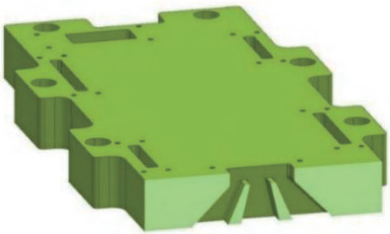


图3 前端板导流结构示意图

3. 后端板及支撑板设计

后端板与支撑板之间设置蝶形弹簧，用于抑制支撑板形变，前后端板及支撑板均通过螺杆连接实现电堆紧固。碟簧组使电堆后端板与支撑板之间形成软连接，一方面使得支撑板上的力更均匀地传递到电堆极板上；另一方面通过碟簧特性，在一定程度上能够解决由于装堆和使用过程中电堆高度不一致的问题，保证同批次电堆在整个寿命周期内电堆高度不变化。

碟簧组数量设置为12组；电堆目标紧固力为

32 kN, 每组碟簧受力2 667 N; 根据参考文献及相关标准^[8], 选取规格为 $\phi 28 \times \phi 10.2 \times 1.25 \times 2.25$ -C1; 组合型式为对合+叠合, 叠合数目为2, 碟簧对合数目为4, 每组碟簧数量为8片。碟簧分布示意如图4所示。

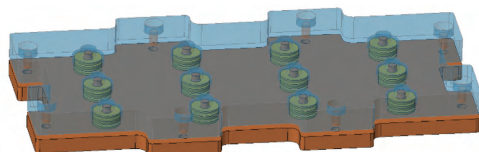


图4 碟簧分布示意图

本文中, 后端板上设置12个圆形碟簧定位孔放置碟簧, 使螺栓紧固力传递更均匀, 如图5所示。其中定位孔为圆形孔和长圆孔, 长圆孔释放公差, 避免过定位。由于后端板增设定位孔, 导致其变形量及机械强度稍弱, 因此材料暂使用6061铝合金材质, 表面经过硬质氧化处理, 提高绝缘性能和防腐性能。支撑板作为实现后端板增设碟簧的配合部件, 支撑板与前端板一致使用新型材料PPS+GF40, 不再增设绝缘板结构, 支撑板直接与集流板嵌套安装。支撑板上设置12个圆形凸台碟簧定位导柱, 起到对碟簧组的定位作用, 如图6所示。

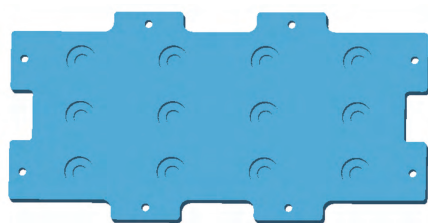


图5 后端板结构示意图

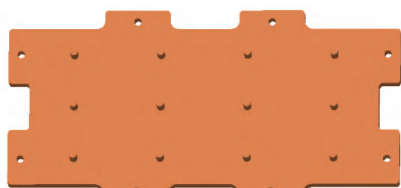


图6 支撑板结构示意图

有限元仿真结果分析

1. 前端板仿真

前端板强度仿真简化后的端板三维模型如图7

所示, 为了更好地提升仿真效率, 因此仿真只考虑前端板受到螺栓预紧力产生弯曲而引起的变形和应力, 保留完整的螺栓结构, 简化电堆部件, 中间用堆芯等效材料替代, 后端板采用与真实后端板厚度相同的简易后端板替代。

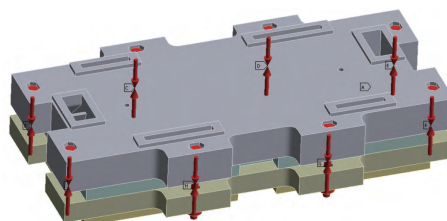


图7 前端板仿真边界载荷示意图

前端板结构采用PPS+GF40新材料, 后端板采用铝合金6061材料, 中间绝缘板采用堆芯等效材料。接触非线性分析采用增强型拉格朗日算法。边界条件依照实际前端板受力情况施加, 8根M8螺栓一共施加32 kN螺栓预紧力, 每个螺栓各施加4 000 N的螺栓预紧力。后端板底部为压装台凸台, 底面施加固定约束。

仿真结果如图8、图9所示, 前端板最大变形量为0.047 mm, 位于端板左下部靠近边缘处, 满足变形量小于0.05 mm的端板要求; 最大应力值为31.381 MPa, 位于右上角螺栓受力处, 前端板材质为PPS+GF40, 屈服强度为125 MPa, 因此前端板最大应力的安全裕度较大, 结构安全。



图8 前端板应变云图

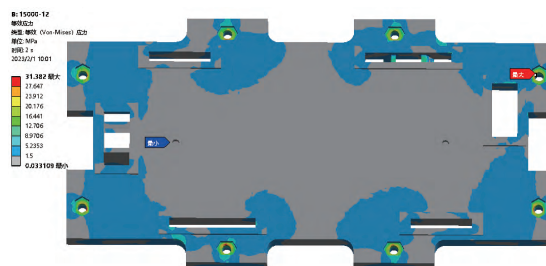


图9 前端板应力云图

2. 后端板及支撑板仿真

后端板仿真简化后的三维模型如图10所示。从后往前依次为集流板、支撑板、碟簧和后端板。支撑板结构采用PPS+GF40材料，后端板采用铝合金6061材料，碟簧采用非线性材料设置方法。后端板采用每个螺栓向下施加4 000 N力的方式模拟螺栓预紧，集流板底部固定约束。由于蝶形弹簧受压会产生较大应变，此处打开大变形开关，令【Large Deflection=On】，使分析考虑大变形、大旋转和大应变引起的单元形状和方向的改变，计算结果更加准确。

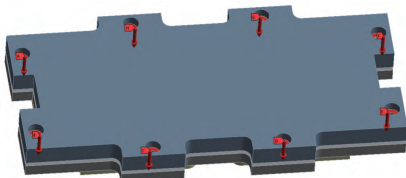


图10 后端板及支撑板仿真边界载荷示意图

仿真结果如图11~图15所示，结果显示后端板的最大变形量为0.43 mm（后端板变形量2.07 mm，碟簧变形量1.64 mm），支撑板的最大变形量为0.005 4 mm。后端板在4 000 N预紧力作用下的最大应力为62.17 MPa，支撑板最大应力为3.70 MPa。后端板为铝合金6061材料，屈服强度为259 MPa，支撑板为PPS+GF40，屈服强度为125 MPa。因此后端板及支撑板最大应力的安全裕度均较大，结构安全。

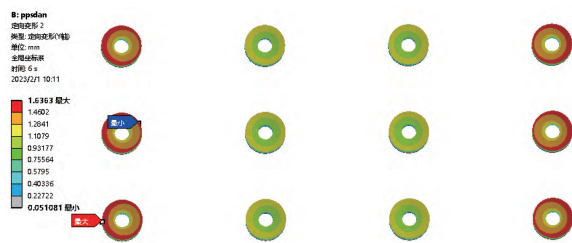


图11 碟簧应变云图

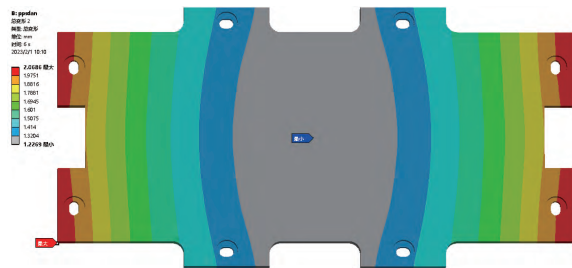


图12 后端板应变云图

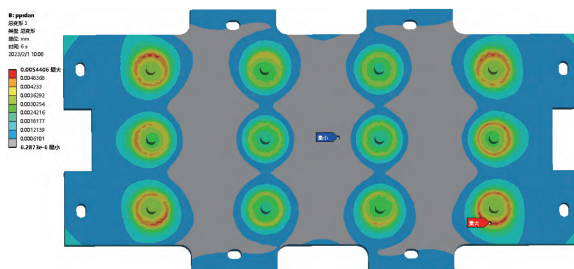


图13 支撑板应变云图

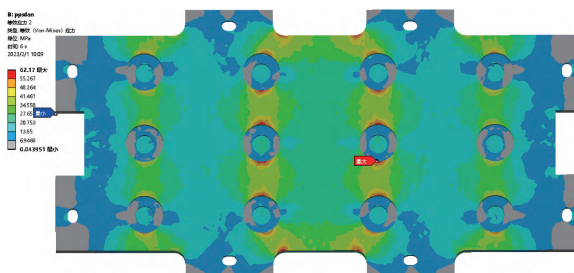


图14 后端板应力云图

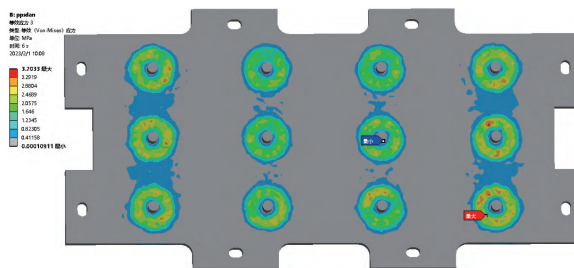


图15 支撑板应力云图

样机结果分析

通过以上结构设计及有限元分析进行样机试制。样机如图16、图17所示，经过测量，由于采用新型材料并简化绝缘板结构，样机前端板重量由原始的17.5 kg减轻至5 kg，重量减轻达60%以上；样机后端板及支撑板总量由原始的7.86 kg减轻至1.9 kg，重量减轻达65%以上。



图16 前端板样件产品图

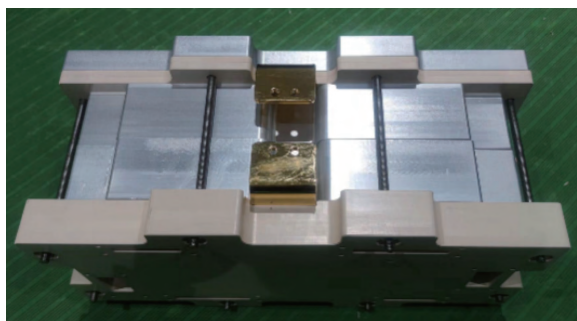


图17 新型电堆样机产品图

试验电堆样机并进行了相应的气密性试验，测试结果显示，气路外漏及水路外漏的泄漏率均小于0.24 kPa/min/cell，电堆内漏的泄漏率小于0.5mL/min/cell，气密性测试均满足电堆的测试要求。由试验结果可得，端板的变形量及机械结构均满足电堆整体要求，达到了预期目标。新型端板方案的设计在重量方面进行了较大的优化，简化了电堆整体结构。除此之外，前端板流体入口处设计导流结构优化端板流体腔室形状，进一步保证电堆氢气、空气的流量分布均一性。测试结果具体参数见表3，测试数据对比如图18所示，结果表明，端板导流效果也得到大幅提升，由原来流量最大偏差量的43.6%提升至4.8%。

表3 腔室通道流量测试数据具体参数

序号	右通道	中间通道	左通道	最大偏差量(%)
无导流结构	0.036 58	0.063 03	0.035 54	43.6
有导流结构	0.045 8	0.046 61	0.044 39	4.8

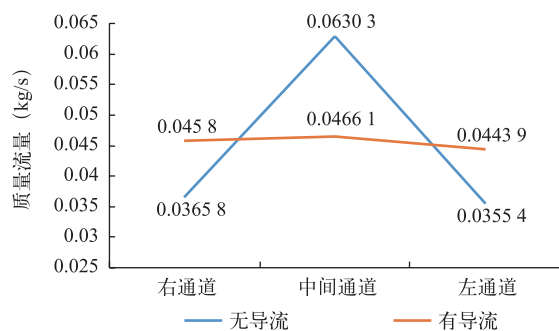


图18 腔室通道流量测试数据对比图

结束语

本文以120 kW燃料电池电堆端板等组件的技

术要求为输入，运用力学仿真技术、轻量化材料应用技术等，开展燃料电池电堆端板优化技术研究工作，设计开发合适的燃料电池电堆端板组件等，并进行相应的仿真校核和电堆试验样机测试工作。仿真结果及样机测试结果均表明设计的新型端板方案满足设计要求，达到了结构简化、电堆轻量化的目的，为后续电堆批量化试制提供了一定的参考依据。EA

参考文献

- [1] SHARAF O Z, ORHAN M F. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 32(APR.): 810-853.
- [2] 郭宝圣. 车载制氢式燃料电池电动汽车混合动力系统设计与研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [3] 张智明, 商亚鹏, 张娟楠, 等. 钢带捆扎燃料电池电堆端板尺寸和形状优化[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2017(4): 7.
- [4] LEE S, JANG Y H, SHIN H Y, et al. Reliable sealing design of metal-based solid oxide fuel cell stacks for transportation applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(57): 30280-30292.
- [5] DAN M, ISAINCU A, MARAVINA L. Experimental testing of two short-fiber reinforced composites: PPA-GF33 and PPS-GF40[J]. Material Design & Processing Communications, 2021(3).
- [6] 陈世锋, 汤晓云, 姚达斌, 等. PPS复合材料在空空导弹导引部件承力结构件上的应用研究[J]. 航空兵器, 2020, 27(2): 6.
- [7] 杨杰, 闫文学. 军工新材料——聚苯硫醚(PPS)介绍[J]. 兵器材料科学与工程, 2006(8).
- [8] 李宪才, 潘牧. 基于准零刚度理论的应力补偿碟簧设计[J]. 武汉理工大学学报, 2020(3): 42.