·燃料电池关键材料与系统性能优化技术专题·

弹性元件在质子交换膜燃料电池电堆中的应用现状与发展趋势

王茁[1,2] 孟令欣[1,2] 张韬[1,2] 普星彤[1,2] 韩建[1,2] 潘兴龙[1,2] 崔新然[1,2] 米新艳[1,2]

（1.一汽解放汽车有限公司商用车开发院，长春 130000；2.吉林省车用氢能动力重点实验室，长春 130000）

【欢迎引用】王茁，孟令欣，张韬，等．弹性元件在质子交换膜燃料电池电堆中的应用现状与发展趋势[J]．汽车文摘，2026(6)：18-22.

【Cite this paper】WANG Z, MENG L X, ZHANG T, et al. Current Applications and Development Trends of Elastic Components in Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stacks[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(6): 18-22.

【摘要】为明确弹性元件在燃料电池电堆中的核心功能与技术价值，系统梳理了主流弹性元件的类型、结构特征及适配场景，深入分析了其设计要点，并从材料、结构、功能及寿命等维度预测了技术演进趋势。研究表明，弹性元件的技术发展呈现以下特征：(1)材料复合化可协同提升力学性能与耐环境老化特性；(2)结构集成化有助于简化装配流程并增强界面接触稳定性；(3)智能感知化与寿命精准化为实现电堆状态监控与可靠性评估提供了新范式。

关键词：燃料电池；燃料电池电堆；弹性元件

中图分类号：TM911　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20260013

Current Applications and Development Trends of Elastic Components in Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stacks

Wang Zhuo[1,2], Meng Lingxin[1,2], Zhang Tao[1,2], Pu Xingtong[1,2], Han Jian[1,2], Pan Xinglong[1,2], Cui Xinran[1,2], Mi Xinyan[1,2]

（1.Commercial Vehicle Development Institute, FAW Jiefang Truck Co., Ltd., Changchun, 130000; 2. Jilin Province Key Laboratory of Automotive Hydrogen Power, Changchun, 130000）

【Abstract】 To clarify the core functions and technical value of elastic elements in fuel cell stacks, this study systematically reviews the types, structural characteristics, and applicable scenarios of mainstream elastic elements, provides an in-depth analysis of their design considerations, and forecasts technological evolution trends from the perspectives of materials, structures, functionality, and service life. The findings indicate that the technological development of elastic elements exhibits the following features: (1) Material hybridization can synergistically enhance mechanical performance and environmental aging resistance. (2) Structural integration contributes to simplifying assembly processes and improving interfacial contact stability. (3) Intelligent sensing and precise life prediction offer new paradigms for real-time stack condition monitoring and reliability assessment.

Key words: Fuel cells, Fuel cell stack, Elastic components

0　引言

在全球能源转型加速的背景下，氢能凭借其高效、清洁的特性，已成为中国、欧盟、美国、日本、韩国及德国等主要经济体重点发展的二次能源。我国“十五五”规划建议中，明确将氢能作为新的经济增长点，为氢能与燃料电池技术的深度融合及规模化发展提供了核心政策支撑。同时，《节能与新能源汽车技术路线图3.0》[1]对未来15年燃料电池相关的总成及核心零部件的指标、技术路径以及应用规模等也进行了展望。

燃料电池电堆作为燃料电池系统的核心部件，由数百个单电池堆叠而成，其内部结构复杂、工况严苛，需在温度循环、干湿交替、振动冲击等工况条件下保持稳定运行。弹性元件通过提供持续均匀的预紧力、补偿尺寸偏差与结构变形，成为保障电堆密封可靠性、降低接触电阻、提升运行稳定性的核心支撑部件。

当前，随着质子交换膜燃料电池电堆功率密度提升、寿命延长及工作温度的不断拓展，传统弹性元件

在材料耐久性、结构适配性、性能稳定性等方面面临诸多挑战。因此，本文研究弹性元件的应用现状与发展趋势，旨在为推动燃料电池电堆技术迭代与产业化落地提供参考。

1 弹性元件的功能

弹性元件在燃料电池电堆中承担着预紧保障、变形补偿、稳定密封、电阻控制等核心功能，其性能优劣和稳定性好坏直接影响电堆的功能表现。

1.1 预紧力保持与衰减补偿

电堆在压装过程中需施加一定的预紧力，以保证双极板、膜电极等部件的紧密贴合。弹性元件可有效平衡电堆实际运行过程中因温度变化导致的材料热胀冷缩、膜电极干湿膨胀收缩，以及高分子材料（密封件）、碳纸等蠕变或永久压缩变形带来的预紧力松弛[2]，从而保证寿命周期内的预紧力稳定性，避免因预紧力不足导致的功率损耗增加等问题或者过大预紧力造成的部件压溃等。

1.2 尺寸与变形补偿

电堆核心零部件如膜电极和双极板等存在尺寸偏差，在电堆组装过程中，特别是大功率电堆（堆叠长度可达1 m）部件尺寸累积公差、装配偏差以及整堆尺寸一致性控制难度更大。如果只通过刚性方式紧固电堆组件，极容易因部件尺寸的偏差导致各单电池受力不均。弹性元件通过自身弹性变形[3]，可适配上述尺寸偏差，同时吸收车辆行驶过程中的振动冲击，防止极板错位、膜电极机械损伤，保障电堆结构完整性。

1.3 稳定密封压力

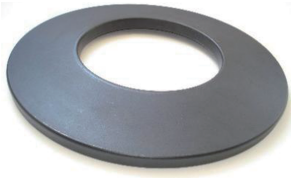
电堆密封性能直接关系到运行安全性，流体泄漏不仅会降低电堆工作效率，还可能引发安全隐患。弹性元件为密封件提供持续且均匀的压缩力，确保密封件始终处于有效压缩状态（压缩率15%~30%），即使在动态工况下也能维持稳定的密封压力，降低泄漏风险。

1.4 接触电阻控制

双极板与膜电极、集流板之间的接触电阻是电堆内阻的重要组成部分。弹性元件通过预紧保证各部件间的紧密贴合，增大有效接触面积，降低界面接触电阻，从而提升电堆功率密度与能量转换效率。

2 主流弹性元件类型、结构与应用场景

目前燃料电池电堆中应用的弹性元件主要包括碟形弹簧、螺旋弹簧、波形弹簧等（图1）。



（a）碟形弹簧



（b）螺旋弹簧



（c）波形弹簧

图1 弹性元件

各类元件由于结构、具体参数、工艺等不同，其具体适用场景上也各具特色，具体对比见表1。

表1 弹性元件差异

维度	碟形弹簧	波形弹簧	螺旋弹簧
结构形式	锥形薄片，轴向压缩回弹	多波峰阵列式，轴向弹性变形	圆柱或矩形螺旋状，轴向压缩回弹
载荷-变形特性	高刚度、大承载，单片载荷可达数吨；不同组合可灵活调整刚度曲线	低刚度、小承载，依赖波浪数提升行程，载荷过大会导致塑性变形	中等刚度，载荷与行程线性相关；大行程需增加圈数
空间效率	极高：轴向高度小，径向尺寸可控，叠层后能量密度高	较高：轴向高度极薄，但径向尺寸随载荷增大而显著增加	低：轴向行程大但径向占空间多，圈数多导致体积功率密度下降
预紧力控制精度	高：叠层数量可精准匹配刚度，预紧力偏差≤±3%	低：波浪冲压精度影响刚度，偏差>±10%	中等：线性刚度易控制，但受钢丝直径公差影响
装配复杂度	中等：需导向柱/定位槽防横向偏移；可预先成组或手动堆叠	低：结构轻薄，可直接嵌入端板凹槽，需配套导向结构	高：需设计弹簧座/导向套，防止径向弯曲；大载荷下易失稳
注意事项	局部应力易集中，与端板接触摩擦易产生碎屑，需优化接触结构	预留因温度变化、材料蠕变或永久压缩变形的补偿空间	大载荷下占用空间大，刚度一致性控制难度高，长期高温易蠕变

对国内外近20款燃料电池电堆弹性元件应用情况的统计分析(图2)表明,大多数质子交换膜燃料电池电堆采用碟形弹簧作为弹性元件,少数采用无弹性元件结构或螺旋弹簧。波形弹簧[4]、云朵弹簧[5]、膜片弹簧[6]等其他形式虽已见于专利文献,但多为企业研发储备技术,距大规模量产应用尚有一定距离。

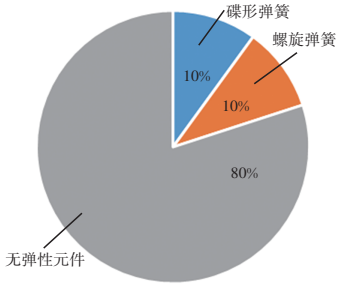


图2　质子交换膜燃料电池电堆中弹性元件应用统计

除了将弹性元件作为单独部件在电堆中集成应用外,也有企业研发了其他新型替代型式。如欧梯克公司研发的弹性拉带,集力补充与固定功能于一体,可提升电堆空间利用率并减轻电堆质量(图3)。



图3　弹性拉带

3　应用及设计要点

弹性元件的具体选型和设计,首先应符合国家或者行业标准,表2汇总了部分弹性元件相关的设计标准。

表2　弹性元件相关设计标准

标准号	名称	主要内容
GB/T 1972.1/2—2023	碟型弹簧 第1部分:计算 碟型弹簧 第2部分:技术条件	截面为矩形的单片碟形弹簧和组合碟形弹簧的计算准则、要求和技术条件
GB/T 1239.2—2009	冷卷圆柱螺旋弹簧技术条件 第2部分:压缩弹簧	冷卷圆截面圆柱螺旋压缩弹簧的技术要求、试验方法等
GB/T 36524—2018	冲模 矩形截面压缩弹簧 安装尺寸和颜色标识	矩形截面金属线材制造的压缩弹簧的技术要求
GB/T 2089—2009	普通圆柱螺旋压缩弹簧尺寸及参数(两端圈并紧磨平或制扁)	两端圈并紧磨平或制扁的圆柱螺旋压缩弹簧的尺寸及参数
JB/T 13296—2017	波形弹簧 技术条件	矩形截面波形弹簧的结构型式、技术要求、试验方法等

弹性元件与电堆的压装力、工作压力、工作温度、电堆片数、电堆单电池尺寸等密封相关,对电堆的质量、成本、体积以及耐久性等具有重要影响。

一般以垂直于电堆堆叠方向的极板投影面积为基准参考,端板尺寸作为弹性元件的布置空间参考。结合电堆压装力,电堆片数以及气体扩散层、密封件的特性,进行弹性元件的筛选并进一步确定弹性元件具体的组数[7]、摆放方式,根据需要调节的范围,最终确定弹性元件合适的组合方式及数量等,选用相关匹配设计方法[8-11]。

以下为某电堆开发中进行弹性元件选用的设计过程。其中,电堆双极板的初始设计尺寸边界为500 mm×180 mm,预期电堆片数约为600节,预期电堆装堆力约为5 t。

根据双极板尺寸,大致选定当采用单列分布时,碟形弹簧外径定为125 mm,当采用双列分布时,碟形弹簧外径定为63 mm。采用螺旋弹簧时,参照和碟形弹簧接近的尺寸规格。考虑到初始预紧力以及工作过程中的温度等变化,弹性元件可承受的最大负荷应较预期压装力预留15%的承载能力。

弹性元件方案对比如表3所示,方案1最大负荷不满足使用要求;方案2、方案4最大负荷虽能满足使用要求,但相较于方案3,其所需安装空间更大且质量更高。经综合分析,方案3在满足承载需求的同时,具有更小的安装空间占用与更轻的质量,故作为优选方案。

弹性元件的选型与布置直接影响压装力均匀性。通常情况下,弹性元件布置于端板外侧或盲端板与绝缘板之间,并在端板可布置区域内均匀分布,确保压装力均匀传递至整个堆叠面。对比分析表明,弹性元件的结构形式、刚度特性、变形量及叠组方式对电堆最终布置具有决定性影响。设计过程中,需在满足全生命周期调节范围的前提下,确保核心控制指标(如

表3　弹性元件方案对比

类型	碟形弹簧			螺旋弹簧
方案	方案1	方案2	方案3	方案4
弹簧规格	D125×d61×t3.5×H8	D125×d64×t5×H8.5	D63×d31×t2.5×H4.25	60×60重负荷
分组/组	3	3	10	10
单组数量/个	6(对合)	6(对合)	8(叠合)	1
最大承受载荷/kN	45	101	89	85
整体自由高度/mm	48	51	34	60
整体质量/kg	4.5	6.4	3.8	7.0

单电池面压0.5~2 MPa,面压均匀性偏差≤±5%),从而保障电堆性能目标的达成。

除了在设计端保证弹性元件的方案满足要求外,与弹性元件相关的其他设计细节以及因素同样影响其工作功能发挥。

在来样一致性方面,应强化入厂检验与材质监控:

(1)表面状态控制:严格控制表面防护状态。弹性元件因来样防护不足导致的表面生锈在实际工作(潮湿及温度变化)环境中的风险剧增。

(2)尺寸偏差管控:严格控制零件尺寸偏差。弹性元件厚度偏差将导致刚度变化,因组合型式不同导致的厚度偏差累计将导致各区域压缩量差异,影响电堆面压均匀性。

在结构设计方面,应优化力学传递路径与限位机制:

(1)导向结构配置:必须设计可靠的导向定位机构。例如碟形弹簧应优先采用内导向或外径定位结构,以限制其在压缩过程中的侧向位移,防止屈曲失稳。

(2)配合间隙设计:依据相关标准规范设计配合公差。需确保多个弹性元件在安装后的同轴度,避免因错位或偏心造成局部应力集中,进而导致端板划伤或元件疲劳断裂。

4　弹性元件的发展趋势和技术方向

结合燃料电池电堆大功率、长寿命、高集成度的发展需求,弹性元件也正朝着材料复合化、结构集成化、智能感知化、寿命精准化4大方向突破。

4.1　材料复合化与高性能化

材料是提升弹性元件性能的核心基础,未来将重点突破耐高温、耐腐蚀、轻量化的材料技术。

(1)高温合金优化:开发耐腐、高弹性模量的镍基/钴基合金,提升“三高”环境下的疲劳寿命,目标达到50 000 h以上,满足商用车长寿命需求。

(2)复合材料创新:研发弹性体与碳纤维、陶瓷颗粒的复合体系,兼顾高刚度与轻量化,助力车用电堆降重。

(3)表面改性升级:采用镀镍、达克罗涂层、激光熔覆等技术对弹性元件表面进行处理,降低摩擦因数,抑制局部应力集中与腐蚀失效。

4.2　结构集成化与小型化

为适配电堆高集成度需求,弹性元件将向“结构一体化、尺寸小型化”发展。

(1)一体化设计:推动弹性元件与端板、绝缘板等的集成设计,减少零部件数量的同时提升装配效率,降低装配偏差。

(2)小型化弹性单元:针对高功率密度电堆,开发超薄高刚度碟簧、弹性绑带、云朵弹簧等,实现小尺寸空间内的大变形补偿量。

(3)AI辅助设计及优化:基于有限元仿真技术,结合电化学、热力学、结构力学等多物理场耦合分析,通过AI赋能结构设计,加速弹性元件的结构形态、布置方式的优化和集成设计效率,进一步提升接触压力的均匀性。

4.3　智能感知与自适应控制

随着数字孪生、智能控制技术在电堆中的应用,弹性元件将具备“状态感知、动态自适应”能力。

(1)内置传感功能:在弹性元件中集成微型力传感器、应变传感器等,实时监测预紧力、变形量变化,数据传输至终端控制系统,实现闭环控制。

(2)数据驱动优化:结合电堆数字孪生模型,利用历史运行数据(温度、湿度、压力、阻抗、功率输出等)迭代优化弹性元件参数,精准补偿预紧力衰减。

(3)自适应弹性组件:采用形状记忆合金、压电材料等智能材料制备弹性元件,可根据温度变化、预紧力偏差自动调节自身刚度与变形量,适配极端工况(如-40 ℃低温启动、120 ℃高温运行)。

4.4　寿命精准化与成本控制

产业化落地需求推动弹性元件实现“寿命可预

测、成本可控制”。

（1）寿命精准预测：建立弹性元件疲劳寿命预测模型，结合加速老化测试与仿真分析，实现寿命精准预判，确保与电堆寿命完全匹配。

（2）成本控制：推广材料国产化替代、碟形弹簧预组装提减少装配工时实现降本，基于自动化、规模化等提升碟形弹簧、云朵弹簧、弹性拉杆等的生产一致性（合格率≥99%），降低生产成本。

5 展望

弹性元件作为燃料电池电堆的核心支撑部件，其性能直接制约电堆的功率密度、寿命与可靠性。当前，碟形弹簧、螺旋弹簧等主流产品已实现规模化应用，但在结构适配性、成本控制、精益化设计等方面仍需突破。随着材料复合化、结构集成化、智能感知化、寿命精准化技术的发展，弹性元件将逐步实现“高性能、小型化、智能化、低成本”，为大功率、长寿命燃料电池电堆的产业化落地提供核心支撑。

未来，弹性元件的发展将更加紧密结合数字孪生、智能材料等前沿技术，形成“感知-决策-自适应”的智能弹性系统。同时，现有行业标准的完善和适应行业新技术的标准规范的建立也将进一步推动其规范化发展，助力燃料电池产业高质量升级。

参 考 文 献

[1] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图3.0[M]. 北京: 机械工业出版社, 2025.

[2] 新源动力股份有限公司. 一种带弹簧的质子交换膜燃料电池堆型: CN201120474700.6[P]. 2012-07-11.

[3] 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.

[4] 潘必宇, 关栋, 王睿, 等. 用于燃料电池悬浮支撑装置的波形弹簧轴向力预估方法: CN 117150837B[P]. 2025-07-29.

[5] 毕宏占, 刘雪婷, 孙昕, 等. 一种燃料电池电堆补偿机构及其使用方法: CN 118073622A[P]. 2024-05-24.

[6] 朱涛, 池滨, 鲁林鹏等. 一种具有膜片弹簧组件的燃料电池盲端端板: CN 222168449U[P]. 2024-12-13.

[7] ZHANG Z M, REN H, HU S, et al. Arrangement of Belleville Springs on Endplates Combined with Optimal Cross-Sectional Shape in PEMFC Stack Using Equivalent Beam Modeling and FEA[J]. Sustainability, 2022, 14(23): 142315928.

[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): 81-85.

[9] 段伟康, 龚正伟, 陈雪松, 等. 燃料电池电堆弹性元件及其选型方法和燃料电池电堆: CN 119852463B [P]. 2025-11-21.

[10] 张旭, 李玉平, 申德, 等. 燃料电池电堆用弹簧及其设计选型方法及燃料电池电堆：CN 115203836A [P]. 2022-10-1.

[11] 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): 55-66.

（责任编辑 **明慧**）