

基于安全防护的燃料电池汽车加氢口盖结构优化及智能启闭策略

陈 峰 王士英

海南海马汽车有限公司 海南 海口 570216

摘 要：本论文聚焦于燃料电池汽车加氢口盖，针对其在安全防护方面的关键需求，深入研究结构优化与智能启闭策略。通过对加氢口盖在车载工况高低温交叉循环、充放循环等复杂工况下的失效机制剖析，提出从材料选择、密封结构设计、智能控制等多维度的优化方案，旨在提升加氢口盖的安全性、耐久性与智能化水平，为燃料电池汽车的安全高效运行提供坚实保障。

关键词：燃料电池汽车；加氢口盖；结构优化；智能启闭；安全防护

1 引言

1.1 研究背景与意义

燃料电池汽车作为新能源领域的重要分支，凭借其零排放、高能量密度及高效能转换特性，已成为全球能源转型的核心方向。随着氢能产业政策的持续推进，车载储氢系统的安全性与可靠性成为制约商业化进程的关键瓶颈^[1]。加氢口盖作为燃料电池汽车与加氢设施的物理接口，其结构与启闭策略直接影响氢气存储、加注过程的安全风险控制。研究表明，加氢口盖失效是导致氢气泄漏事故的主要诱因之一，其失效形式涵盖机械疲劳、密封老化等多维度缺陷。因此，针对复杂工况下的加氢口盖失效机制开展系统性研究，对提升燃料电池汽车安全性具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 结构设计研究进展

当前加氢口盖的机械结构设计主要聚焦于密封性能与抗振能力的提升。传统机械锁止机构采用弹簧卡扣或螺纹连接，虽能实现基本密封功能，但在高频振动工况下易出现松动或疲劳断裂。新型设计引入多层复合密封结构^[2]，如静态 O 型圈与动态唇形密封的协同作用，可有效抵抗 -40°C 至 85°C 的高低温循环冲击。然而，此类设计对材料耐温性与加工精度要求严苛，实际应用中仍存在成本高、维护复杂等问题^[3]。

1.2.2 智能控制技术现状

智能启闭策略的研究主要集中于传感器集成与算法优化。现有系统通过触点开关、压力传感器等实时监测盖体状态，并基于模糊逻辑或神经网络算法实现启闭决策^[4-5]。例如，某研究通过 CAN 总线将加氢口盖状态与整车控制器（VCU）联动，当检测到车辆处于运行状态时

自动锁止盖体。但此类系统存在响应延迟、多源数据融合效率低等问题，尤其在极端环境下易出现误判。

1.2.3 安全防护技术瓶颈

现有安全防护措施主要包括多重密封、防爆设计及氢脆预防。例如，采用低氢脆电镀工艺可降低材料氢渗透风险，但长期充放循环仍可能导致镀层失效。此外，氢脆现象的微观检测技术（如声发射监测）尚未形成标准化流程，难以实现早期预警^[3]。

1.3 研究内容与方法

1.3.1 研究内容

本研究以加氢口盖为研究对象，围绕失效机制分析、结构优化设计、智能控制策略及安全防护技术展开：

- 结构优化设计：开发高强度轻量化材料体系，设计动态自适应密封结构与冗余锁止机构，提升耐温性能。
- 智能控制策略：构建基于多传感器融合的状态监测系统，设计模糊 PID 控制算法，实现启闭过程的精准化与自动化。

2 燃料电池汽车加氢口盖失效机制分析

2.1 高低温交叉循环影响

加氢过程中，若氢气未预冷，高压储氢瓶温度会迅速上升，甚至超其最高工作温度（如钢或复合材料瓶为 85°C ，铝合金瓶为 65°C ），影响性能或致损坏。因此，加氢前需将氢气预冷至 -40°C 左右，这使加氢口盖在运行中经历 -40°C 到 85°C 的高低温交叉循环。在此过程中，加氢口盖的物理和机械性能面临考验，若耐温度冲击性能不佳，密封等性能易受影响，进而引发氢气泄漏。

2.2 充放循环影响

加氢口盖的耐久性决定其使用寿命，充放循环引发的结构过早失效问题日益严重。加氢口盖的设计、制

造、材料、工艺及质量管理等环节均影响其使用寿命。长期充放循环可能导致结构疲劳,降低强度和密封性能,引发氢气泄漏。通过耐久性测试,可确定加氢口盖在规定条件下的使用寿命,预测结构薄弱环节,为改进设计和工艺提供依据。

3 基于安全防护的燃料电池汽车加氢口盖结构优化设计

3.1 密封结构优化

采用“静态密封+动态密封”的多层复合密封设计(参见图1加氢口密封结构示意图),形成梯度密封屏障。内层设置两道O型密封圈,通过过盈配合实现静态密封,耐受高压氢气的径向渗透;外层采用唇形密封结构,利用弹性唇边与密封面的动态贴合,抵御振动及温度变化引起的界面位移。密封槽设计为圆弧形过渡,避免应力集中导致的密封圈老化开裂。经有限元仿真验证,该结构在35MPa/70MPa压力等级下,泄漏率可控制在 $1 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$ 以下,满足ISO 19880-3:2021《氢能-车载储氢系统-第3部分:接口》的密封要求。

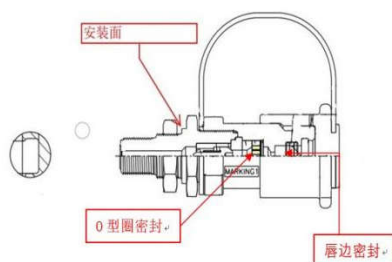


图1 加氢口示意图

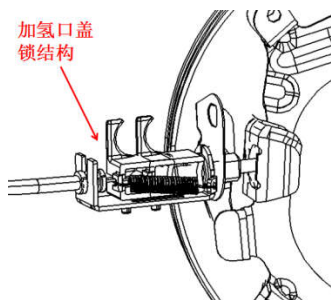


图2 加氢口盖锁结机构示意图

3.2 锁止机构优化

设计机电耦合式辅助锁止系统(参见图2),主锁采用机械卡扣实现初始锁止,辅助锁通过电磁驱动提供冗余锁止力。当车辆检测到碰撞信号或氢泄漏报警时,中央控制器触发辅助锁止装置,通过楔形块结构将锁合力提升至常规状态的2倍以上,防止意外开启。锁体材料选用经脱氢处理的高强度钢,表面采用低氢脆电镀工艺,结合密封润滑涂层,可承受10万次以上的启闭循环无失效。

4 燃料电池汽车加氢口盖智能启闭策略研究

4.1 智能决策算法与控制逻辑

建立基于模糊PID的智能决策模型,输入参数包括车辆运行状态(动力系统电压、车速、档位)、加氢口盖状态(位置、压力、温度)及外部环境参数(如碰撞信号、氢泄漏报警)。决策逻辑遵循分级控制原则:

- 安全准入判断:仅当车辆处于P档、电源OFF且无故障报警时,开放手动/自动开启权限,避免行驶中误操作。

- 动态锁止策略:当检测到振动加速度 $> 2g$ 或温度突变速率 $> 10^\circ\text{C}/\text{min}$ 时,自动触发临时锁止,防止振动或热应力导致的意外开启,锁止力计算公式为:

$$F_{\text{lock}} = F_0 + k_a \cdot \alpha + \frac{dT}{dt}$$

其中 F_0 为初始锁止力 k_a , k_T ,为振动/温度影响系数,通过台架试验标定。

- 异常响应机制:若密封面压力低于设计值80%或氢浓度传感器报警,中央控制器在200ms内发送紧急锁止指令,联动氢系统控制器切断气源。

4.3 机电耦合执行机构设计

采用低惯量伺服电机作为执行机构,配合蜗轮蜗杆减速装置,实现 $\pm 0.5\text{mm}$ 的位置控制精度。执行机构具备双重限位保护(参见图3-4):

- 软件限位:通过角度传感器反馈,设定 0° (完全关闭)和 90° (完全开启)的电子限位边界。

- 硬件限位:在盖体转轴处设置机械挡块,防止电机失控导致的超程损坏,经振动耐久性测试,可承受10万次启闭循环无失效。



图3 加氢口盖/锁结

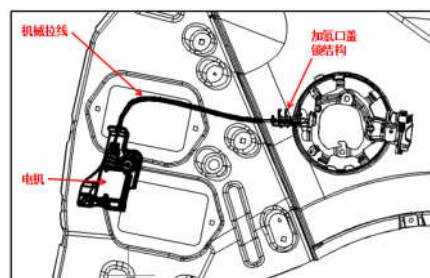


图4 电机执行机构

执行机构驱动电压采用12V直流供电,功率消耗

$\leq 5\text{W}$ ，具备过流保护和故障自诊断功能，诊断周期 $\leq 100\text{ms}$ 。

4.4 系统集成与协同控制

建立三级通信架构实现系统集成（参见图5）：

- 底层传感器层：通过硬线连接实现传感器信号的高速采集，确保状态数据的实时性。
- 中央控制层：搭载 32 位微处理器，运行实时操作系统（RTOS），实现智能算法的高效运算，响应时间 $\leq$

50ms。

• 整车协同层：通过 CAN/LIN 总线与整车控制器（VCU）、氢系统控制器（HMS）进行数据交互，例如接收 VCU 的档位信号、发送 HMS 的加氢允许信号。

协同控制策略遵循“数据共享、权限互锁”原则，例如加氢过程中 VCU 自动限制动力系统启动，防止高压氢气加注时的意外动力输出。

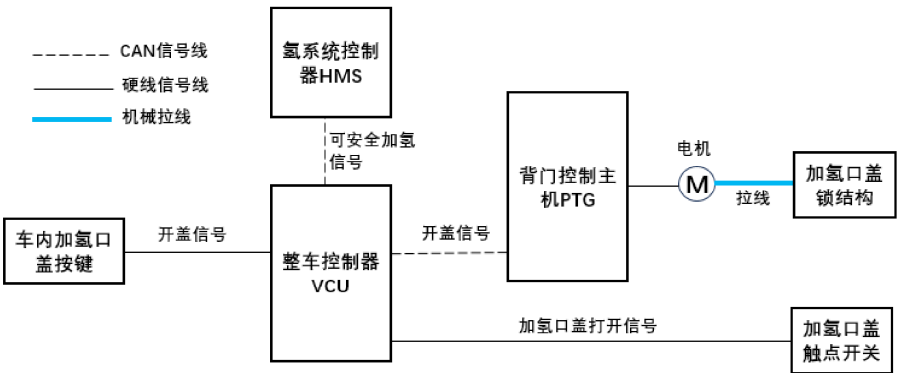


图5 智能启闭系统原理图

5 燃料电池汽车加氢口盖安全防护措施研究

5.1 结构强化防护

5.1.1 多重密封屏障设计

采用“静态密封 + 动态密封 + 冗余监测”的三级密封结构：内层布置两道 O 型密封圈（材质为 FFKM），通过过盈配合实现初始密封，泄漏率控制在 $1 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$ 以下；中层设计唇形动态密封，利用唇边与密封面的自适应贴合，补偿振动或温度变化引起的 0.5mm 以内位移偏差；外层集成氢浓度传感器，当泄漏浓度超过 1% LEL（爆炸下限）时，触发中央控制器紧急锁止指令。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本研究围绕燃料电池汽车加氢口盖的安全性与可靠性开展系统研究，通过失效机制分析、结构优化设计、智能策略开发及安全防护措施构建，形成以下核心结论：

6.1.1 智能启闭策略的创新性构建

开发了基于多传感器融合的智能控制体系，通过霍尔传感器（精度 $\pm 0.5^\circ$ ）、压力传感器（分辨率 $\pm 1\text{kPa}$ ）实时监测盖体状态，结合模糊 PID 算法实现工况自适应控制。当检测到振动加速度 $> 2\text{g}$ 或温度突变 $> 10^\circ\text{C}/\text{min}$ 时，系统可在 0.2s 内完成应急锁止，并与整车控制器（VCU）、氢系统控制器（HMS）形成三级安全互锁，显著提升复杂工况下的操作安全性。

6.1.2 安全防护体系的多维度覆盖

构建了结构层面集成冗余密封与抗冲击锁止机构；控制层面实现泄漏风险的实时监测与主动响应；制造层面通过氦质谱检漏（泄漏速率 $< 5 \times 10^{-9} \text{ mbar} \cdot \text{L/s}$ ）与扭矩精准控制，使加氢口盖的整体失效概率降低 70% 以上。

7.2 研究展望

尽管本研究在加氢口盖安全性能提升方面取得阶段性成果，但面向燃料电池汽车商业化运营的严苛需求，仍需在以下领域开展深入研究：

7.2.1 智能控制的深度优化

现有控制策略对多源数据（温度、压力）的融合分析仍停留在阈值判断层面，复杂工况下的故障诊断准确率有待提升。建议引入深度学习算法（如长短期记忆网络 LSTM）构建失效预测模型，实现从“事件响应”到“趋势预测”的技术升级，将泄漏预警准确率提升至 95% 以上。

参考文献

[1]王伟通.氢燃料电池汽车储氢系统安全性评估方法研究[J].汽车测试报告,2024,(14):89-91.
[2]常肖,谢木生,李玉鹏.氢燃料自卸车车载储氢系统研究与应用[J].汽车电器,2024,(12):1-5.
[3]吴为理,张雄,李东东,等.混合动力电动汽车机电耦合系统构型分析[J].汽车零部件,2016,(05):1-4.