

高压低温密封技术在氢减压阀中的创新性应用与性能优化研究

张意欢^{1,2}, 郭文军^{1,2}, 崔波^{1,2}, 胡发跃², 曾燃², 刘瑶^{2*}

¹中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆

²重庆凯瑞动力科技有限公司, 重庆

收稿日期: 2026年5月24日; 录用日期: 2026年6月17日; 发布日期: 2026年6月24日

摘要

氢减压阀在车载70 MPa储氢系统中承担降压、稳压与隔离功能, 其密封可靠性受高压氢渗透、低温弹性衰减及循环磨损的共同制约。针对传统O形圈密封在高压低温工况下易挤出、易磨损且压力补偿能力不足的问题, 本研究提出楔形效应-自润滑协同密封模型, 将锥形环自锁阀杆密封、球面-锥面双重密封及PTFE导向环保护结构组合应用于氢减压阀设计。主要材料选取316L不锈钢、6061铝合金、FKMLT橡胶和PEEK工程塑料, 通过耐久试验、气密性试验、氢气相容性试验及整车路试进行系统验证。结果表明: 在3 MPa~70 MPa结构筛选试验中, 本研究阀杆密封结构的泄漏率较传统结构降低90.0%~92.0%; 经100,000次耐久循环后, 常温氢检平均泄漏率由 2.29×10^{-7} Pa·m³/s降至 2.03×10^{-8} Pa·m³/s, 低温(-40°C)平均泄漏率由31 ppm降至0.33 ppm; FKMLT橡胶在70 MPa氢气浸泡试验后平均体积变化率为4.76%, 平均质量变化率为0.65%; 整车路试100,000 km后平均泄漏率为2.3 ppm。上述结果表明, 结构自增压补偿与材料低摩擦耐氢特性的协同设计显著提升了氢减压阀在高压低温工况下的密封可靠性, 为车载储氢系统密封方案的工程应用提供了参考。

关键词

高压低温密封, 氢减压阀, 楔形效应, 自润滑, 氢气相容性

Innovative Application and Performance Optimization of High-Pressure Low-Temperature Sealing Technology in Hydrogen Pressure Reducing Valves

Yihuan Zhang^{1,2}, Wenjun Guo^{1,2}, Bo Cui^{1,2}, Fayue Hu², Ran Zeng², Yao Liu^{2*}

*通讯作者。

文章引用: 张意欢, 郭文军, 崔波, 胡发跃, 曾燃, 刘瑶. 高压低温密封技术在氢减压阀中的创新性应用与性能优化研究[J]. 机械工程与技术, 2026, 15(3): 384-398. DOI: 10.12677/met.2026.153038

¹China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing²Chongqing CAERI Power Technology Co., Ltd., Chongqing

Received: May 24, 2026; accepted: June 17, 2026; published: June 24, 2026

Abstract

The hydrogen pressure-reducing valve in an onboard 70 MPa hydrogen storage system performs pressure reduction, pressure regulation, and isolation functions, and its sealing reliability is jointly constrained by high-pressure hydrogen permeation, low-temperature elastic degradation, and cyclic wear. To address the limitations of conventional O-ring seals under high-pressure and low-temperature conditions—including susceptibility to extrusion, accelerated wear, and insufficient pressure compensation—this study proposes a wedge-effect/self-lubricating cooperative sealing model. The model integrates a conical-ring self-locking stem seal, a spherical-conical dual seal, and a PTFE guide-ring protection structure into a unified hydrogen pressure-reducing valve design. The primary materials selected were 316L stainless steel, 6061 aluminum alloy, FKM LT rubber, and PEEK engineering plastic. Systematic validation was conducted through endurance testing, leak-tightness testing, hydrogen compatibility testing, and full-vehicle road trials. The results demonstrate that: (1) in structural screening tests across 3~70 MPa, the proposed stem seal reduced leakage rate by 90.0%~92.0% compared with conventional designs; (2) after 100,000 endurance cycles, the room-temperature helium-detection average leakage rate decreased from 2.29×10^{-7} Pa·m³/s to 2.03×10^{-8} Pa·m³/s, and the low-temperature (−40°C) average leakage rate fell from 31 ppm to 0.33 ppm; (3) FKM LT rubber exhibited an average volumetric change of 4.76% and an average mass change of 0.65% after immersion in 70 MPa hydrogen; and (4) the average leakage rate remained 2.3 ppm following 100,000 km of full-vehicle road trials. These findings confirm that the synergistic design combining structural self-pressurization compensation with low-friction, hydrogen-resistant material properties substantially enhances the sealing reliability of hydrogen pressure-reducing valves under high-pressure, low-temperature operating conditions, providing a practical engineering reference for sealing solutions in onboard hydrogen storage systems.

Keywords

High-Pressure Low-Temperature Sealing, Hydrogen Pressure Reducing Valve, Wedge Effect, Self-Lubrication, Hydrogen Compatibility

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

随着燃料电池汽车和高压储氢系统的发展，氢减压阀需要在 70 MPa 等级储氢压力、低温启动和频繁加注循环条件下保持稳定密封。氢气分子尺寸小，介质渗透性强，密封界面容易受到压力脉动、温度变化和材料溶胀的共同影响。车载储氢系统和氢系统安全标准对阀件密封、安全泄放和材料相容性提出了明确要求[1]-[3]。已有研究指出，70 MPa 高压氢气瓶阀的密封可靠性直接影响车载储氢系统的安全运行，橡胶密封件还可能出现氢渗透、鼓泡、开裂和力学性能劣化等问题[4] [5]。因此，本研究以氢减压阀阀座、阀杆和活塞密封为对象，从理论模型、结构设计、材料选型和试验验证四个层面开展研究，并重点回应

高压低温工况下传统密封结构对比不足和材料评价深度不足的问题。

2. 相关理论与技术背景

2.1. 氢减压阀的工作原理与设计要求

氢减压阀的主要作用是将高压氢气降低至下游燃料电池系统可使用的压力范围，并在入口压力、出口流量和环境温度变化时维持稳定流量输出和可靠隔离。阀芯与阀座之间的相对位置决定有效流通截面积，活塞和弹簧的力平衡决定阀口开度变化。由于氢气具有易渗透、易泄漏和宽温区服役等特点，阀体、阀座、阀杆和非金属密封件的设计应同时满足氢系统安全、阀件密封和车载储氢系统应用要求[1] [3] [6] [7]。减压器工作原理如图 1 所示。

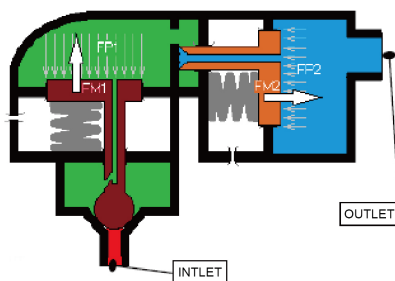


Figure 1. Working principle diagram of the pressure reducer

图 1. 减压器工作原理图

低压区活塞动态平衡： $FM_2 = FP_2$ 。

当出口端压力 P_2 降低时(由于燃料消耗)，弹簧力 FM_2 会大于 FP_2 ，低压区活塞往右移动，从而使得中压区开度增大。中压区的压力 P_1 能够满足下游流量需求以及使 P_2 恢复到初始压力值，平衡恢复，活塞停止移动并保持固定的位置(位置取决于流量需求的大小)。

如果流量需求减小， FP_2 会增大，这时 FM_2 小于 FP_2 ，活塞往左移动，从而使得中压区开度减小。结果 FP_2 恢复到初始压力值，活塞停留在新的位置上。以上描述的情形在实际工作过程中响应时间小于 0.01 秒，该结构具有机械式自我调节压力平衡的能力。高压区活塞的动态平衡与低压区工作原理相同。

2.2. 高压低温密封技术基础

高压低温密封失效通常由三类因素共同触发。第一，介质压力提高后，O 形圈受到的轴向推力和径向挤出趋势增大，矩形沟槽单点密封容易在间隙处产生剪切损伤。第二，低温会降低橡胶材料的链段活动能力，材料回弹能力下降后，密封界面对微小位移和表面粗糙峰的补偿能力减弱。第三，高压氢气可在非金属材料中发生溶解和扩散，快速降压后可能形成体积膨胀、鼓泡和裂纹等失效形式[4] [5]。因此，高压低温氢密封设计不能只依赖初始预紧量，而应同时提高介质压力自补偿能力、密封界面抗挤出能力和材料氢气相容性。

2.3. 技术路线与创新点

本研究采用“失效机理分析 - 结构协同设计 - 材料筛选 - 台架与装车验证”的技术路线。结构层面，本研究将球面 - 锥面双重密封、锥形环自锁密封和导向环减摩保护结合起来，使介质压力既参与密封接触压力建立，又减少 O 形圈挤出和偏磨。理论层面，本研究将楔形效应产生的自增压补偿与 PTFE 等材

料的自润滑减摩作用统一到同一密封模型中,用于解释泄漏率随结构改变而降低的原因。材料层面,本研究将FKMLT用于O形圈,将PEEK用于阀口密封件,并用氢气相容性试验、耐高压氢爆试验和路试数据验证材料适用性。与传统单点O形圈密封相比,本研究的创新点在于将冗余密封、压力自补偿和材料低摩擦特性进行系统耦合,而不是单独改变密封圈材料或沟槽尺寸。

3. 氢减压阀密封结构设计

3.1. 阀座密封性研究

本研究首先对阀座与阀杆密封结构进行对比设计。第一种结构为锥面与锥面配合,第二种结构为锥面与球面配合,如图2所示。锥面与锥面配合依赖较高的锥度尺寸一致性和形位精度,若密封接触面积不足,阀片与阀杆之间容易形成局部泄漏通道。锥面与球面配合利用球面在不同角度下均可与锥面形成环状线接触的特点,对锥面加工误差的适应能力更强。该结构可降低局部偏载引起的泄漏风险,并为后续双重密封设计提供几何基础。

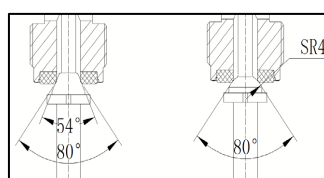


Figure 2. Schematic diagrams of conical and spherical sealing structures

图2. 锥面与球面密封结构示意图

进一步设计了双重密封结构,如图3所示,阀杆的球面密封面与阀座、阀芯形成双重密封结构。阀芯材质选用FKMLT/PEEK(根据实际情况确定二者的具体应用场景和优势互补方式),阀杆采用316L材质;密封面1由阀杆的球面密封面与阀芯构成,密封面2由阀座的金属锥面密封面和阀杆的球面密封面组成,阀杆硬度控制在(28~32)HRC,阀座材质硬度为(22~25)HRC,双重密封面角度设定在 50° ~ 55° ,金属密封面粗糙度Ra0.2。当非金属密封面1出现失效情况时,在复位弹簧和进气压力的共同作用下,阀杆将向上运动,与密封面2紧密配合,形成二次密封。

该双重密封结构的工程验证数据在第5章给出。

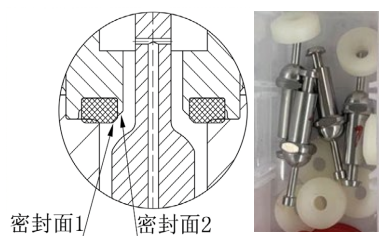


Figure 3. Schematic diagram and physical picture of the double-sealed structure

图3. 双重密封结构示意图与实物图

3.2. 阀杆密封性研究

3.2.1. 结构介绍

在阀杆密封设计上,阀体采用锥形环自锁密封结构,并在锥形环平面上配置一个O型密封圈,如图

4所示。当O型密封圈受氢气压力作用向密封沟槽低压侧滑移时,锥形环对其产生反作用力。当该反作用力与摩擦力的合力不小于氢气压力对O型密封圈产生的轴向分力时,滑移停止,自封效应启动,密封接触面上的接触压力随之增大。随着氢气压力的进一步升高,O型密封圈逐渐填充密封沟槽低压侧空间,并与锥形环高压侧紧密贴合。在此过程中,介质压力通过压力传递机制驱动O型密封圈产生径向变形,进而诱发锥形环的楔形自紧效应(Wedge Self-Energizing Effect),使密封接触压力显著增大,有效抑制了O型密封圈的挤出失效,确保阀杆在高压氢气工况下具有良好的密封性能。密封过程依次经历预紧、预压、自紧密封和吸气膨胀4个阶段,如图5所示。

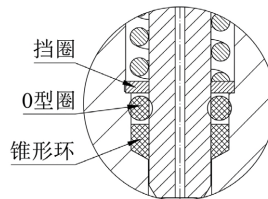


Figure 4. Schematic diagram of the self-locking sealing structure of the valve stem conical ring

图4. 阀杆锥形环自锁密封结构示意图

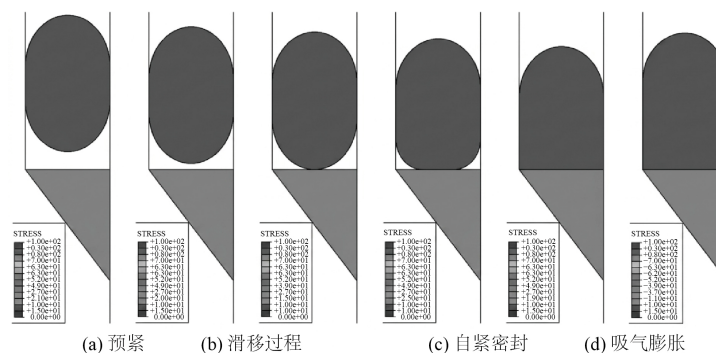


Figure 5. Schematic diagram of sealing process stages (① Pre-tightening stage; ② Pressure activation stage; ③ Self-locking stable stage)

图5. 密封过程阶段示意图(① 预紧阶段; ② 压力激活阶段; ③ 自锁稳定阶段)

3.2.2. 楔形效应 - 自润滑协同理论模型

传统挤压密封模型通常假定O形圈依靠初始压缩量形成稳定接触压力。该假定在常温中低压环境下具有一定适用性,但在高压氢和低温环境下存在局限。高压会放大O形圈挤出趋势,低温会削弱材料回弹能力,氢气渗透又会改变密封材料的尺寸和力学状态。因此,本研究提出“楔形效应-自润滑协同”密封模型,并将其用于解释锥形环自锁结构和PTFE导向结构的协同作用。

模型基本假设如下:

O形圈在工作压差作用下向无介质压力侧移动;

锥形环角度 θ 决定轴向力向径向接触力的转换比例;

密封界面需满足接触压力大于介质压力和表面微间隙补偿压力之和。

主要参数定义及公式推导如下:

设介质压力为 P ,介质作用在O形圈有效受压面积上的轴向力为 F_p ,锥形环对O形圈产生的法向反力为 N ,界面摩擦力为 F_f ,摩擦系数为 μ ,则各参数关系为:

$$F_P = PA_P \quad (1)$$

$$N = P \cdot A_P / (\sin\theta + \mu\cos\theta) \quad (2)$$

$$F_f = \mu N \quad (3)$$

$$P_C = P_0 + \eta P \quad (4)$$

其中, P_0 为装配预紧形成的初始接触压力, η 为与锥形环角度、接触面积比和摩擦系数有关的压力传递系数。当锥形环反力与摩擦力在轴向的合力不小于 F_P 时, O 形圈滑移停止, 自锁状态形成。

在自锁状态下, 密封接触压力由式(4)表示。该式表明, 本研究结构并非单纯依赖初始压缩量, 而是利用介质压力提高密封界面的补偿能力。自润滑作用主要来源于 PTFE 导向环和 PEEK 阀口密封材料的低摩擦特性: 摩擦系数 μ 降低后, 密封件在循环运动中的磨损和热量积累随之下降; 导向环还可以限制活塞或弹簧座的偏摆, 使 O 形圈处于较稳定的受力状态。由此, 楔形自锁结构负责提高接触压力, 自润滑结构负责降低磨损和偏磨风险, 两者共同降低长期循环中的泄漏风险。

与传统单一 O 形圈挤压密封相比, 本模型的优势在于把压力自补偿、抗挤出和减摩保护作为同一系统处理。传统结构主要依靠橡胶弹性回复维持密封; 本研究结构则通过锥形环将部分介质压力转换为径向密封接触压力, 并通过导向环减少偏磨。该差异能够解释表 1 中本研究阀杆密封结构在 3 MPa~70 MPa 压力下泄漏率显著降低的结果。

传统阀杆密封结构通常采用单 O 形圈矩形沟槽密封, O 形圈材质为普通橡胶, 硬度为(60~70) Shore A。密封沟槽按通用结构设计, 宽度为 3.3 mm, 深度为 1.4 mm; O 形圈外径为 8.6 mm, 内径为 5.0 mm, 截面直径为 1.8 mm。为提高对比的可追溯性, 表 2 列出了传统结构与本研究结构在构型、材料、关键尺寸和失效防控方面的差异。

为了更全面地评估本研究设计的阀杆密封结构与传统结构的性能差异, 进行了泄漏率测试试验, 具体数据如表 1 所示。

Table 1. Comparison of valve stem seal leakage rates before and after improvement

表 1. 改进前后阀杆密封泄漏率对比

氢气压力(MPa)	传统阀杆密封结构泄漏率 (Nml/min)	本研究阀杆密封结构泄漏率 (Nml/min)	降低率(%)
3	0.50	0.05	90.0
35	1.20	0.10	91.7
70	2.50	0.20	92.0

Table 2. Comparison plan between the conventional valve stem sealing structure and the proposed valve stem sealing structure

表 2. 传统阀杆密封结构与本研究阀杆密封结构的对比方案

对比项	传统阀杆密封结构	本研究阀杆密封结构
密封构型	单 O 形圈矩形沟槽密封	O 形圈 + 锥形环自锁密封, 并与球面 - 锥面双重密封配合
O 形圈材料	普通橡胶, 硬度(60~70) Shore A	FKM LT, 用于提高低温回弹和耐氢相容性
关键尺寸/参数	沟槽宽 3.3 mm, 深 1.4 mm; O 形圈外径 8.6 mm, 内径 5.0 mm, 截面直径 1.8 mm	金属双重密封面角度 50°~55°; 金属密封面粗糙度 Ra0.2; PTFE 导向间隙 0.01~0.03 mm
补偿机制	主要依赖初始压缩量和材料弹性回复	介质压力驱动楔形自紧, 同时利用导向环降低摩擦和偏磨
主要失效风险	高压下易挤出, 循环中易磨损, 低温下回弹不足	通过二次密封、抗挤出和导向减摩降低泄漏风险

由表 1 可知, 在 3、35 和 70 MPa 压力点下, 本研究结构相对传统结构的泄漏率分别降低 90.0%、91.7%和 92.0%, 平均降低 91.2%。该结果说明, 锥形环自锁和材料低摩擦保护能够明显提高阀杆密封性能。需要说明的是, 表 1 属于结构筛选试验, 原始记录主要覆盖压力和泄漏率, 温度、流量和样品数量未完整列出。为提高试验可比性, 本文在 5.1 节补充了耐久、温度、检测方法和装车路试等工况信息。

3.3. 活塞密封性研究

由于氢减压阀的输入、输出压力较高, 根据力平衡原理, 调压弹簧需提供较大的弹簧力以满足压力调节要求。但在弹簧力较大且安装空间有限的情况下, 弹簧尺寸必然减小, 导致弹簧刚度增大。大刚度弹簧在压缩过程中易出现受力不均和力的偏移, 进而引发弹簧座与上盖之间的偏磨现象, 这不仅会加速弹簧座 O 型圈的磨损, 甚至可能导致其破损, 最终致使弹簧座密封失效, 造成氢气泄漏。

为解决这一问题, 活塞采用了导向环加 O 型圈的密封结构型式。导向环选用具有自润滑功能的 PTFE 材质, 其与上盖的配合间隙控制在(0.01~0.03) mm 之间, 能够有效减少弹簧座的偏磨情况, 为 O 型圈提供良好的保护, 显著提高了活塞的密封性能和产品的整体使用寿命, 确保氢减压阀在长期运行过程中的稳定性和可靠性, 活塞密封结构如图 6 所示。

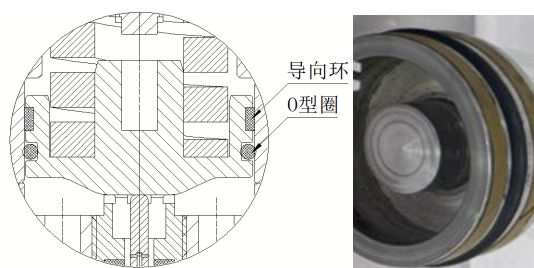


Figure 6. Schematic diagram and physical picture of the piston seal structure

图 6. 活塞密封结构示意图与实物图

4. 主要密封材料性能研究与选择

4.1. FKM LT

FKM LT 是一类低温型氟橡胶材料。其分子结构中的含氟基团有助于提高耐介质能力, 低玻璃化转变温度有助于维持低温回弹能力。对于氢减压阀 O 形圈而言, 材料筛选不仅需要关注拉伸强度和耐化学腐蚀性, 还需要关注快速降压后的体积变化、质量变化、表面裂纹和氢爆损伤[5] [8] [9]。因此, 本文将 FKM LT 与 HNBR、PTFE 和 EPDM 进行基础性能对比, 并结合耐高压氢爆试验和 70 MPa 氢气相容性试验进行验证。

氢爆试验选取 FKM LT 和 HNBR 两种具有代表性的材料进行耐高压氢爆试验, 试验工况如表 3 所示。三个工况均采用先升压 7 s、保压 1 s、减压 1 s 的循环过程。试验结果见图 7。

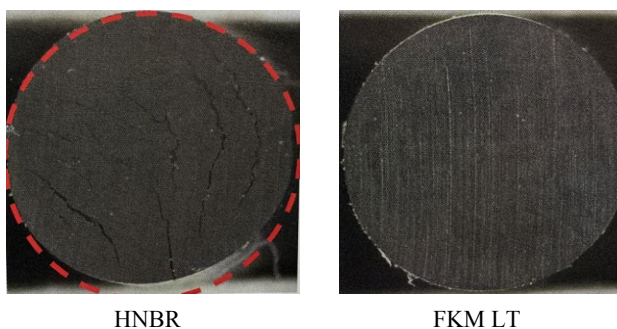
Table 3. Test conditions for high-pressure hydrogen decompression resistance

表 3. 耐高压氢爆试验工况

工况	介质	温度(°C)	压力(MPa)	循环次数	单次循环过程
1	氢气(99.9%以上)	120	90	11250	升压 7 s、保压 1 s、减压 1 s
2	氢气(99.9%以上)	15	70	1000	升压 7 s、保压 1 s、减压 1 s
3	氢气(99.9%以上)	-45	70	20	升压 7 s、保压 1 s、减压 1 s

Table 4. Performance comparison of commonly used O-ring sealing materials**表 4.** 常用 O 型圈密封材料的性能对比

材料	耐低温性能 (玻璃化转变温度, °C)	耐化学腐蚀性 (对氢气、酸、碱的耐受性)	机械性能 (拉伸强度, MPa)	适用性判断
FKMLT	-45	良好(无明显腐蚀)	10~20	适合作为低温氢环境 O 形圈材料
HNBR	-30	一般(对某些酸有轻微腐蚀)	15~25	低温和耐氢爆能力需进一步验证
PTFE	-200	优(化学惰性)	20~40	适合作为导向环或减摩材料
EPDM	-55	一般(对某些有机溶剂的耐受性较差)	10~20	需结合介质相容性和应用场景判断

**Figure 7.** High-pressure hydrogen explosion resistance test
图 7. 耐高压氢爆试验

由表 3、表 4 和表 5 可知, FKMLT 在低温性能、耐化学介质能力和抗高压氢快速降压损伤方面具有综合优势。与 HNBR 相比, FKMLT 在耐高压氢爆试验后截面保持较均匀的橡胶相, 未观察到明显裂纹; HNBR 截面出现裂痕和缺陷, 说明其在本研究高压氢循环工况下的密封可靠性不足。与 PTFE 相比, FKMLT 的弹性和压缩回弹能力更适合 O 形圈密封; PTFE 更适合作为导向环和减摩材料。

4.2. PEEK

PEEK (聚醚醚酮) 是一类高性能特种工程塑料, 具有较高强度、尺寸稳定性、耐磨性和自润滑特性。对于氢减压阀阀口密封件, PEEK 的作用不是提供橡胶式弹性补偿, 而是提供稳定的几何支撑、耐磨接触面和低摩擦配合界面。表 5 列出了本文选型时采用的 PEEK 机械性能参数。

Table 5. PEEK performance parameters table**表 5.** PEEK 性能参数表

项目	单位	性能参数
密度(结晶型)	g/cm ³	1.32
抗拉强度	MPa	97
拉伸模量	GPa	2.8
弯曲强度	MPa	142
弯曲模量	GPa	3.7
压缩强度	MPa	130
冲击强度(有缺口)	kJ/m ²	4.44

续表

断面伸长率	%	80
线膨胀系数(10~180℃)	$\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$	4.8
洛氏硬度	-	M98
热变形温度	$^{\circ}\text{C}$	160
玻璃化温度	$^{\circ}\text{C}$	143
熔点	$^{\circ}\text{C}$	334

从表 5 可见, PEEK 抗拉强度为 97 MPa, 压缩强度为 130 MPa, 玻璃化温度为 143 $^{\circ}\text{C}$, 熔点为 334 $^{\circ}\text{C}$ 。若仅按 70 MPa 介质压力进行初步选材比对, PEEK 压缩强度与介质压力的比值约为 1.86。该比值只能作为材料强度储备的初步参考, 不能替代阀口接触应力和蠕变寿命校核。实际设计中还需要结合阀口接触面积、密封面粗糙度、循环次数和温度条件进行综合判断。PEEK 的自润滑和耐磨特性能够降低阀芯与阀座之间的摩擦磨损, 因此适合作为阀口主要密封材料之一。

4.3. 材料选型

材料选型遵循“密封功能 - 失效风险 - 材料特性”相匹配的原则。FKM LT 用于 O 形圈, 重点承担低温回弹、压缩补偿和耐高压氢快速降压损伤功能; PEEK 用于阀口主要密封件, 重点承担几何稳定、耐磨和低摩擦接触功能; PTFE 用于导向环, 重点承担减摩和防偏磨功能。

在氢减压阀中, PEEK 材料主要应用于阀芯等关键部件。其卓越的耐腐蚀性使得 PEEK 能够在高压氢气环境中长时间使用而不被腐蚀, 保证了阀芯的尺寸精度和表面质量。

PEEK 材料的尺寸稳定性优异, 环境温度的变化对其零件尺寸的影响微乎其微。在氢减压阀的工作过程中, 温度会随着氢气的减压过程发生变化, PEEK 材料能够保持稳定的尺寸, 确保阀芯与阀座之间的配合精度, 从而保证密封性能。

此外, PEEK 材料的自润滑性和耐磨特性使其能够在无油环境中长时间稳定工作。在氢减压阀的频繁开关过程中, 阀芯与阀座之间会产生摩擦, PEEK 材料的自润滑性能能够减少摩擦阻力, 降低磨损, 延长零件的使用寿命。

综合考虑高压氢渗透、低温回弹、循环磨损和阀口尺寸稳定性, 本研究选择 FKMLT 作为 O 形圈主要材料, 选择 PEEK 作为阀口主要密封材料, 并采用 PTFE 作为导向环材料。该组合能够分别对应密封补偿、阀口承载和运动导向三个功能需求, 能够支撑第 2 章提出的楔形效应 - 自润滑协同密封模型。

5. 金属材料、非金属材料与氢气的相容性研究

5.1. 金属材料与氢气的相容性

在高压氢气环境中, 金属材料与氢气接触后, 氢气易在金属内部发生吸氢、溶解和扩散现象, 这将导致金属材料的力学性能显著劣化, 尤其是氢脆敏感度较高的金属, 甚至可能发生断裂, 严重威胁氢减压阀的安全运行。

通过对氢环境中常用的 6061 铝合金、4130 系列铬钼钢、316L 和 304 不锈钢等金属材料进行文献调研和对比分析, 6061 铝合金具有相对较低的氢脆敏感度, 常用于车载高压储氢气瓶内胆; 4130 系列铬钼钢和 304 不锈钢在高压氢环境下可能出现韧性下降和氢脆敏感度升高; 316L 不锈钢的氢脆敏感性较低, 适合用于加氢站和氢气储运管路等场景。根据 GB/T 29729-2013 对氢系统安全和材料适用性的要求, 本

研究选用 6061 系列铝合金和 316L 不锈钢作为氢减压阀主要金属材料[1] [3]。常用金属材料在氢环境中的性能特点如表 6 所示。

Table 6. Resistance to hydrogen embrittlement of common metallic materials

表 6. 常用金属材料的抗氢脆性能

材料类型	在氢环境中的性能特点
6061 系列铝合金	具有较低的氢脆敏感度，是一种在国际上被广泛认为具有良好氢气相容性的材料
4130 系列铬钼钢	在低压氢环境中具有较好的抗氢脆性能，但在高压情况下，其断面收缩率和韧性会下降，氢脆敏感度升高
316L 不锈钢	氢脆敏感性低，具有较好的抗氢脆性能
304 不锈钢	属于稳定性奥氏体不锈钢，工作在氢环境下会导致其断面收缩率下降，造成轻微氢脆

微观结构分析：通过扫描电镜(SEM)对 316L 不锈钢在氢气环境中处理前后的微观结构进行观察，发现处理后的微观结构没有明显的裂纹、孔洞等缺陷产生，表明氢气对 316L 不锈钢的微观结构影响较小，进一步证明了其良好的氢气相容性，如图 8 所示。

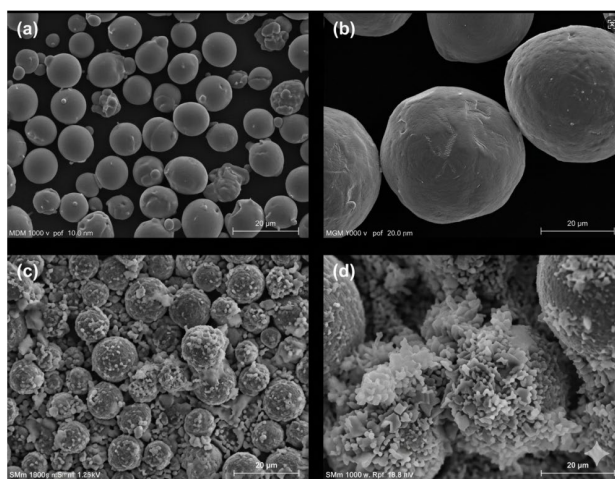


Figure 8. SEM micrographs of 316L stainless steel before and after hydrogen exposure. (a) Surface morphology before treatment ($\times 2000$); (b) Post-treatment surface morphology ($\times 2000$); (c) Pre-treatment cross-section morphology ($\times 5000$); (d) Post-treatment cross-section morphology ($\times 5000$)

图 8. 316L 不锈钢在氢气处理前后的 SEM 图像。(a) 处理前表面形貌($\times 2000$); (b) 处理后表面形貌($\times 2000$); (c) 处理前断面形貌($\times 5000$); (d) 处理后断面形貌($\times 5000$)

5.2. 非金属材料与氢气的相容性

在高压氢气环境中，非金属密封件的失效形式主要包括循环磨损、间隙挤出、氢气溶胀、鼓泡和裂纹扩展。聚合物材料通常不发生金属意义上的氢脆，但氢气在聚合物中的溶解、扩散和快速解吸仍会引起尺寸变化和力学性能衰减[5]。因此，非金属材料相容性评价应同时关注外观、体积变化率、质量变化率、硬度变化和微观形貌。

综合考虑密封件的工作环境以及各种密封材料与氢气的相容性特点，本研究选择 FKMLT、PEEK 作为氢减压阀的密封材料。这些材料在与氢气长期接触过程中，能够保持相对稳定的性能，有效抵抗氢气的侵蚀和劣化作用，确保密封件在高压氢气环境下的可靠密封性能和较长的使用寿命。

本研究按照 GB/T 42612-2023 附录 D 和 GB/T 42536-2023 附录 B 中的相关要求,对规格为 25.07 mm × 2.62 mm 的 FKM LT O 形圈进行 70 MPa 氢气相容性试验[8] [9]。体积变化率和质量变化率按式(1)和式(2)计算: $\Delta V = (V_1 - V_0)/V_0 \times 100\%$, $\Delta m = (m_1 - m_0)/m_0 \times 100\%$ 。式中, V_0 和 m_0 分别为试验前体积和质量, V_1 和 m_1 分别为试验后体积和质量。表 7 显示, 三件样品体积变化率分别为+6.87%、+3.99%和+3.43%, 平均值为+4.76%; 质量变化率分别为+0.93%、+0.46%和+0.55%, 平均值为+0.65%。样品未出现破损等异常现象, 说明 FKM LT 在本试验工况下与高压氢气具有较好的相容性, O 型圈样品照片见图 9。



Figure 9. Photos of O-ring samples
图 9. O 型圈样品照片

Table 7. Results of hydrogen compatibility test
表 7. 氢气相容性试验结果

项目	试验条件或结果
材料	FKM LT
阶段 1	15°C, 70 MPa, 浸泡 168 h
阶段 2	-50°C, 70 MPa, 浸泡 168 h
外观检查	无破损等异常现象
体积变化率(%)	+6.87/+3.99/+3.43, 平均+4.76
质量变化率(%)	+0.93/+0.46/+0.55, 平均+0.65

6. 性能测试与验证

基于上述密封结构优化设计与材料筛选结果,本章对新型高压低温密封技术进行试验验证。验证内容包括结构筛选泄漏率试验、100,000 次耐久后的气密性试验、70 MPa 氢气相容性试验和 100,000 km 装车路试。数据处理采用平均值、变化率和降低率进行评价。泄漏率降低率按式(3)计算: $R = (Q_0 - Q_1)/Q_0 \times 100\%$ 。式中, Q_0 为优化前泄漏率, Q_1 为优化后泄漏率。

6.1. 实验设计

试验设计遵循由部件到整车、由短期筛选到长期验证的顺序。首先通过 3 MPa~70 MPa 阀杆密封结构筛选试验判断结构改进方向;其次按 ISO 12619-3 相关要求完成 100,000 次耐久试验后进行气密性检测[10];再次按 GB/T 42612-2023 和 GB/T 42536-2023 要求进行 70 MPa 氢气相容性试验[8] [9];最后通过 100,000 km 装车路试评价工程应用稳定性。

各试验工况和记录参数见表 8。

Table 8. Test conditions and main recorded parameters
表 8. 试验工况与主要记录参数

试验类型	压力/温度条件	循环或时长	检测方法	主要记录参数
阀杆结构筛选试验	3、35、70 MPa; -40℃、15℃、120℃	40 h	泄漏率测试	压力、传统结构泄漏率、本研究结构泄漏率
耐久后气密性试验	常温、-40、120℃	100,000 次耐久后	常温真空氦检; 低温/高温手持氢气检漏仪	常温 Pa·m ³ /s, 低温/高温 ppm
氢气相容性试验	70 MPa; 120℃和-50℃	每阶段 168 h	GB/T 42612-2023、GB/T 42536-2023 相关方法	外观、体积变化率、质量变化率
装车路试	70 MPa 储氢系统; -45℃~45℃环境	100,000 km, 氢气加注≥100 次	车载监测和定期泄漏检测	平均泄漏率、硬度变化、平均温度、平均流量

实验设计流程为：结构筛选试验→耐久性测试→气密性测试→氢气相容性测试→装车路试→数据分析。被测减压阀样品见图 10。

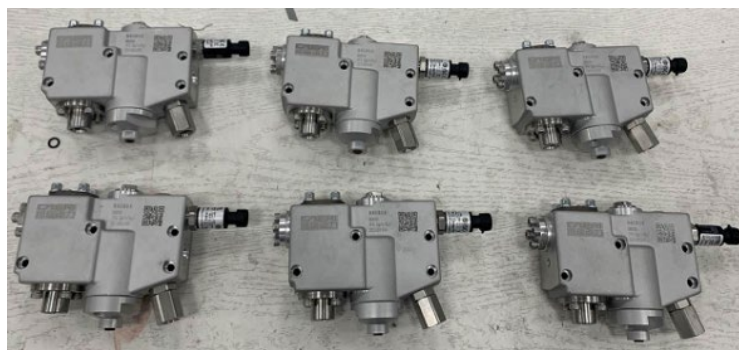


Figure 10. Sample of the pressure reducing valve under test
图 10. 被测减压阀样品

6.1.1. 气密性测试

在进行耐久试验后对减压阀进行气密性测试，评估氢减压阀在长期高压低温循环工况下的密封性能，验证其耐久性与可靠性。

测试方法按 ISO 12619-3 相关要求执行。样品完成 100,000 次耐久试验后进行气密性测试，常温工况采用真空氦检法，低温-40℃和高温 120℃工况采用手持氢气检漏仪，测试结果如表 9 所示[10]。

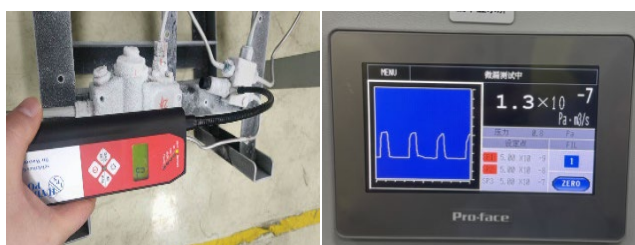
Table 9. Comparison of leakage rates before and after optimization of the pressure reducing valve
表 9. 减压阀优化前后泄漏率对比

产品编号	常温(真空氦检法) Pa·m ³ /s	常温(真空氦检法) Pa·m ³ /s	低温-40℃(手持氢气检漏仪) ppm	低温-40℃(手持氢气检漏仪) ppm	高温 120℃(手持氢气检漏仪) ppm	高温 120℃(手持氢气检漏仪) ppm
产品编号	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
001	3.09×10^{-7}	2.3×10^{-8}	23	0	9	0
002	2.47×10^{-7}	2.1×10^{-8}	41	1	18	0
003	1.30×10^{-7}	1.7×10^{-8}	29	0	3	0

Table 10. Statistical results of the airtightness test**表 10.** 气密性试验统计结果

工况	优化前平均值	优化后平均值	平均降低率
常温真空氦检	$2.29 \times 10^{-7} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$	$2.03 \times 10^{-8} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$	91.1%
低温-40℃	31 ppm	0.33 ppm	98.9%
高温 120℃	10 ppm	0 ppm	100.0%

表 9 和表 10 显示, 优化后样品在常温、低温和高温工况下均表现出更低泄漏率。常温氦检平均泄漏率降低 91.1%, 低温-40℃平均泄漏率降低 98.9%, 高温 120℃样品均未检出泄漏。该结果说明, 密封结构优化对低温和高温边界工况均具有改善作用。泄漏率测试过程见图 11。

**Figure 11.** Leak rate test**图 11.** 泄漏率测试

6.1.2. 装车路试验证

装车路试采用 70 MPa 储氢系统燃料电池汽车。路试里程为 100,000 km, 覆盖城市道路、高速公路和山区道路; 环境温度为-30℃至 45℃; 氢气加注次数不少于 100 次。路试过程中实时记录氢减压阀压力、温度和流量, 并定期检测阀体周围氢气浓度。路试结束后拆解样件, 观察 FKMLT、PEEK 等密封材料的外观和微观结构变化, 装车高寒验证如图 12 所示。

**Figure 12.** Vehicle installation verification—Cold climate test**图 12.** 装车验证——高寒试验**Table 11.** Leakage-rate records of the pressure reducing valve in the vehicle road test**表 11.** 减压阀装车路测泄漏率记录

里程(km)	平均泄漏率(ppm)	材料硬度变化(Shore A)	平均温度(℃)	平均氢气流量(g/s)
0	0	0	25	0
20,000	0.5	-1.2	38.3	3.12
50,000	1.1	-2.8	-28	2.97
100,000	2.3	-4.5	22	3.24

6.2. 数据分析

通过对表 1、表 7、表 9 和表 11 的实验数据进行综合分析,可以得到以下结果。第一,在阀杆结构筛选试验中,本研究结构在 3 MPa~70 MPa 压力点下的泄漏率平均降低 91.2%,说明锥形环自锁和导向减摩能够显著改善阀杆密封性能。第二,100,000 次耐久后的气密性试验显示,优化后样品在常温氦检、低温-40℃和高温 120℃三个工况下均优于优化前样品。第三,70 MPa 氢气相容性试验显示,FKMLTO 形圈未出现破损,平均体积变化率为 4.76%,平均质量变化率为 0.65%,均处于试验要求范围内。第四,装车路试 100,000 km 后平均泄漏率为 2.3 ppm,硬度变化为-4.5 Shore A,说明材料和结构在长期工程使用中保持了基本稳定。

6.3. 结果讨论

与传统单点 O 形圈密封结构相比,本研究结构的优势体现在三个方面。其一,球面-锥面配合提高了阀座密封对加工误差和角度偏差的适应能力。其二,锥形环自锁结构将部分介质压力转化为密封接触压力,降低了单纯依赖初始压缩量的风险。其三,PTFE 导向环和 PEEK 阀口密封件降低了运动副摩擦和偏磨风险。上述机理与表 1、表 9 和表 11 的泄漏率变化相一致。

需要注意的是,本文仍存在一定局限。表 1 中的结构筛选数据未完整记录温度、流量和样品数量;表 9 的气密性试验样本数量为 3 件;表 11 路试数据能够证明工程可行性,但仍需要更多车辆和更长里程进行统计验证。后续研究应补充有限元接触应力分析、不同温度-压力组合下的泄漏率矩阵、长期蠕变试验和更多样本的统计显著性分析,以进一步验证楔形效应-自润滑协同模型的适用范围。

7. 结论与展望

本研究围绕氢减压阀高压低温密封可靠性问题,提出了楔形效应-自润滑协同密封模型,并完成了阀座、阀杆和活塞密封结构优化。实验结果表明,本研究阀杆密封结构在 3 MPa~70 MPa 筛选试验中的泄漏率较传统结构降低 90.0%~92.0%;100,000 次耐久后,常温氦检平均泄漏率由 $2.29 \times 10^{-7} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 降至 $2.03 \times 10^{-8} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$,低温-40℃平均泄漏率由 31 ppm 降至 0.33 ppm;FKM LT 在 70 MPa 氢气相容性试验后的平均体积变化率为 4.76%,平均质量变化率为 0.65%;100,000 km 装车路试后平均泄漏率为 2.3 ppm。上述结果说明,球面-锥面双重密封、锥形环自锁密封、PTFE 导向减摩、FKMLTO 形圈和 PEEK 阀口密封件能够协同提高氢减压阀的密封可靠性。

后续研究应从四个方面进一步完善。第一,补充不同温度、压力、流量和循环频率组合下的泄漏率数据库。第二,开展锥形环角度、沟槽尺寸和 O 形圈压缩率的有限元接触分析,并与实测泄漏率进行关联。第三,扩大 FKM LT、PEEK 和 PTFE 材料的长期氢气相容性样本量,重点评价硬度、压缩永久变形、蠕变和微观裂纹演化。四,在更多车型和更长路试里程中验证减压阀密封性能,以支撑工程推广和标准化应用。

参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 氢系统安全的基本要求: GB/T 29729-2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [2] SAE International (2021) Fuel Systems in Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles: SAE J2579:2021. SAE International.
- [3] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 氢能汽车 车载高压储氢系统安全技术要求: GB/T 34532-2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [4] 周路云,李前,张伟鹏. 70 MPa 高压氢气瓶阀密封技术研究[J]. 阀门, 2024(2): 191-194.
- [5] 周池楼. 氢能装备橡胶密封技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2023.

- [6] International Organization for Standardization (2020) Gaseous Hydrogen-Fuelling Stations—Part 3: Valves: ISO 19880-3:2020. ISO.
- [7] International Organization for Standardization (2014) Road Vehicles-Compressed Gaseous Hydrogen (CGH₂) and Hydrogen/Natural Gas Blend Fuel System Components—Part 1: General Requirements and Definitions: ISO 12619-1:2014. ISO.
- [8] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 车用压缩氢气塑料内胆碳纤维全缠绕气瓶: GB/T 42612-2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [9] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 车用高压储氢气瓶组合阀门: GB/T 42536-2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [10] International Organization for Standardization (2014) Road Vehicles—Compressed Gaseous Hydrogen (CGH₂) and Hydrogen/Natural Gas Blend Fuel System Components—Part 4: Pressure Regulators: ISO 12619-4:2014. ISO.