

# 高压氢气长输管线阀门密封结构设计与可靠性研究

鲁建明

方圆阀门集团有限公司 浙江 温州 325105

**【摘要】**：针对高压氢气长输管线阀门密封性能不足、易出现氢脆失效、泄漏风险较高等问题，结合高压氢气储运的特殊工况要求，开展密封结构设计与可靠性研究。通过分析高压氢气介质特性及长输管线阀门工作环境，优化密封结构类型与材料选型，制定针对性的可靠性试验方案，验证密封结构的密封性能与使用寿命。研究表明，优化后的密封结构可有效提升阀门密封可靠性，降低泄漏风险，满足高压氢气长输管线的安全运行需求，为高压氢气长输管线阀门的设计、制造与应用提供技术支撑。

**【关键词】**：高压氢气；长输管线；阀门；密封结构；可靠性

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.111

## 引言

随着氢能产业的快速发展，高压氢气长输管线作为氢能储运的核心载体，其安全稳定运行直接关系到氢能产业的规模化发展。阀门作为高压氢气长输管线中的关键控制部件，承担着介质切断、调节、导流等重要功能，其密封性能与可靠性是保障管线安全运行的核心环节。高压氢气具有分子体积小、渗透性强、易引发材料氢脆等特性，加之长输管线运行压力高、工况复杂，对阀门密封结构的设计提出了极高要求。

当前，高压氢气长输管线阀门密封结构存在密封性能不足、氢脆失效频发、使用寿命短等问题，易导致氢气泄漏，引发安全事故，限制了高压氢气长输管线的高效应用。因此，开展高压氢气长输管线阀门密封结构设计与可靠性研究，优化密封结构设计，提升密封可靠性，解决氢脆失效等关键技术难题，具有重要的工程应用价值和理论意义。

本文结合高压氢气介质特性与长输管线阀门工作要求，设计适配的密封结构，通过试验验证其可靠性，为高压氢气长输管线阀门的优化升级提供技术参考。

## 1 高压氢气长输管线阀门工作特性与密封要求

### 1.1 高压氢气长输管线阀门工作特性

高压氢气长输管线阀门的工作特性主要由介质特性和管线运行工况共同决定。高压氢气分子直径小、渗透性极强，能够轻易穿透常规密封材料的微小缝隙，导致密封失效；同时，氢气与金属材料接触时，易引发氢脆现象，导致材料强度下降、韧性变差，进而造成密封结构损坏。长输管线运行过程中，阀门需承受较高的工作压力，通常在 10-70MPa 范围内，部分特殊场景下压力可达更高水平，且压力波动频繁，进一步加剧了密封结构的磨损与老化。此外，高压氢气长输管线运行环境复杂，阀门需适应不同的温度变化，兼顾常温、低温等多种工况，温度变化会导致密封材料热胀冷缩，影响密封间隙的稳定性，增加泄漏风险。同时，管线介质中可能含有微量杂质，会对密封面造成冲刷与腐蚀，缩短密封结构的使用寿命，对阀门密封可靠性提出了更为严苛的要求。

### 1.2 高压氢气长输管线阀门密封要求

基于高压氢气长输管线阀门的工作特性，其密封结构需满足多方面核心要求。首先，密封性能需达到严格标准，在额定工作压力范围内，确保无可见泄漏，微泄漏量符合相关规范要求，有效阻断高压氢气的渗透与泄漏。其次，须具备良好的抗氢脆性能，密封结构材料需经过特殊处理，能够抵抗高压氢气引发的氢脆失效，保证密封结构的强度与韧性，避免因氢脆导致的密封损坏。再次，密封结构须具备良好的耐磨性与耐腐蚀性，能够承受介质冲刷与杂质侵蚀，适应频繁的启闭操作，延长密封结构的使用寿命。此外，密封结构须具备良好的温度适应性，在不同温度工况下，能够保持密封间隙的稳定性，避免因热胀冷缩导致密封失效。最后，密封结构设计需兼顾结构紧凑性与安装便捷性，适配高压氢气长输管线阀门的整体结构，便于后期维护与检修。

## 2 高压氢气长输管线阀门密封结构设计

### 2.1 密封结构类型选型

结合高压氢气长输管线阀门的密封要求，综合考虑密封性能、抗氢脆能力、使用寿命等因素，选型双阻断双排放密封结构作为核心密封形式，同时搭配 V 型弹簧预压结构，形成复合密封体系。双阻断双排放密封结构采用双重密封副设计，能够实现双重密封防护，有效阻断高压氢气的渗透，同时设置中腔泄压通道，防止氢气在中腔积聚引发氢脆，提升密封结构的安全性。V 型弹簧预压结构能够提供稳定的预紧力，补偿密封材料的磨损与热胀冷缩变形，确保密封间隙的稳定性，避免因压力波动或温度变化导致密封失效。该复合密封结构兼顾了密封可靠性与结构稳定性，能够适配高压氢气长输管线的复杂工况需求。

### 2.2 密封材料选型与处理

密封材料的性能直接决定密封结构的密封效果与可靠性，结合高压氢气的介质特性，密封材料须具备良好的密封性、抗氢脆性能、耐磨性与耐腐蚀性。密封副材料选用超细晶强化不锈钢，经过三重锻造工艺处理，晶粒度达到 ASTM 7 级以上，

可使材料抗拉强度提升 30%，有效增强材料的抗氢脆能力，避免氢脆失效。密封面采用钴-铬-钨硬质合金堆焊处理，堆焊层厚度不小于 2mm，提升密封面的耐磨性与耐腐蚀性，抵抗介质冲刷与杂质侵蚀。密封填料选用第三代 FFKM 镀陶瓷层材料，该材料具有全氟化骨架结构，能够有效阻断氢气渗透，同时添加二硫化钼纳米片，使高压摩擦系数低于 0.03，提升耐磨性。此外，对密封材料进行严格的热处理工艺，消除材料内部应力，进一步提升材料的抗氢脆性能与结构稳定性。

### 2.3 密封结构细节设计

在密封结构细节设计中，重点优化密封间隙与预紧力参数，确保密封结构的密封性能与稳定性。密封间隙根据密封材料的弹性模量、热膨胀系数以及工作压力、温度等工况参数进行精准设计，避免间隙过大导致泄漏，或间隙过小导致密封面磨损加剧。预紧力通过 V 型弹簧进行精准调节，根据额定工作压力设定合理的预紧力值，确保在压力波动时，密封副能够始终保持良好的贴合状态。同时，在密封面设计弧形过渡结构，减少介质冲刷对密封面的损伤，延长密封面的使用寿命。此外，在阀体与阀盖连接处采用内压自密封结构，根据相关规范要求设计，利用介质压力实现自动密封，提升连接处的密封可靠性，避免连接处泄漏。

## 3 高压氢气长输管线阀门密封结构可靠性试验

### 3.1 试验方案设计

为验证设计的密封结构的可靠性，制定针对性的试验方案，涵盖密封性能试验、抗氢脆试验、寿命试验三个核心试验项目，试验条件严格遵循相关标准要求，确保试验结果的准确性与可靠性。密封性能试验主要检测阀门在不同压力、温度工况下的泄漏情况，包括高压密封试验、低压密封试验、逸散性试验；抗氢脆试验主要检测密封结构在高压氢气环境下的抗氢脆能力，验证材料是否发生氢脆失效；寿命试验主要检测密封结构在频繁启闭操作下的使用寿命，验证密封结构的耐磨性与稳定性。试验过程中，实时记录试验数据，对试验结果进行分析，评估密封结构的可靠性。

### 3.2 试验设备与条件

试验设备选用符合相关标准要求的高压阀门试验台、氢脆试验装置、寿命试验装置。高压阀门试验台能够提供 0-100MPa 的可调压力，满足高压密封试验的压力要求；氢脆试验装置能够模拟高压氢气环境，控制试验温度、压力等参数，用于开展抗氢脆试验；寿命试验装置能够模拟阀门频繁启闭操作，记录启闭次数与密封性能变化。试验介质采用干燥、洁净的高压氢气，符合相关标准要求，避免介质中的杂质影响试验结果。试验温度范围覆盖 -40℃ 至 85℃，涵盖高压氢气长输管线的常见工况，确保试验结果的适用性。

### 3.3 试验结果与分析

密封性能试验结果显示，设计的密封结构在额定工作压力范围内，高压密封试验、低压密封试验、逸散性试验均无可见泄漏，微泄漏量符合相关规范要求，表明密封结构具备良好的密封性能。抗氢脆试验结果显示，经过规定时间的高压氢气环境浸泡后，密封材料未出现氢脆裂纹、强度下降等现象，密封结构完好，表明密封材料的抗氢脆处理有效，密封结构能够抵抗高压氢气引发的氢脆失效。寿命试验结果显示，密封结构在经过 102000 次启闭循环后，密封性能仍能满足要求，无明显磨损与泄漏，表明密封结构具备良好的耐磨性与稳定性，使用寿命能够满足高压氢气长输管线的运行需求。

表 1 高压氢气长输管线阀门密封性能试验结果

试验项目	高压密封试验	低压密封试验	逸散性试验	逸散性试验
试验压力 (MPa)	70	0.6	70	70
试验温度 (°C)	25	25	-40	85
保压时间 (min)	30	30	30	30
泄漏情况	无可见泄漏，微泄漏量达标	无可见泄漏	无可见泄漏	无可见泄漏
合格情况	合格	合格	合格	合格

如表 1 所示，不同试验项目、不同工况条件下，密封结构均未出现可见泄漏，微泄漏量符合相关规范要求，密封性能试验全部合格，表明设计的密封结构能够有效阻断高压氢气的渗透与泄漏，满足高压氢气长输管线阀门的密封要求。

表 2 高压氢气长输管线阀门密封结构寿命试验结果

启闭循环次数 (次)	密封面磨损情况	泄漏情况	密封性能评价
20000	无明显磨损	无泄漏	良好
50000	轻微磨损，无损伤	无泄漏	良好
80000	轻微磨损，密封面完好	无泄漏	良好
102000	轻微磨损，不影响密封	无泄漏	合格

如表 2 所示，随着启闭循环次数的增加，密封面仅出现轻

微磨损,未出现损伤、裂纹等缺陷,且始终无泄漏现象,密封性能保持良好。当启闭循环次数达到102000次时,密封性能仍能满足要求,表明设计的密封结构具备良好的耐磨性与稳定性,使用寿命能够适配高压氢气长输管线阀门的长期运行需求。

## 4 密封结构优化措施

### 4.1 材料优化

基于试验结果,对密封材料进行进一步优化,提升密封结构的可靠性。在密封副材料中添加微量合金元素,进一步提升材料的抗氢脆性能与耐磨性,减少氢脆失效与密封面磨损的概率。对密封填料进行表面改性处理,采用等离子喷涂技术在FFKM镀陶瓷层表面添加一层耐磨涂层,进一步降低摩擦系数,提升密封填料的耐磨性与使用寿命。同时,加强材料的质量检测,严格控制材料的化学成分与力学性能,确保材料符合设计要求,从源头提升密封结构的可靠性。

### 4.2 结构优化

针对试验过程中发现的细节问题,对密封结构进行优化调整。优化密封间隙的设计,根据不同工况下的温度、压力变化,动态调整密封间隙参数,确保密封间隙的稳定性,避免因温度波动导致密封失效。改进V型弹簧预压结构,优化弹簧的弹性系数与预紧力调节范围,使预紧力能够根据压力波动自动调整,确保密封副始终保持良好的贴合状态。同时,优化密封面的弧形过渡结构,增大过渡半径,进一步减少介质冲刷对密封面的损伤,延长密封面的使用寿命。

### 4.3 制造工艺优化

优化密封结构的制造工艺,提升制造精度,确保密封结构的装配质量。采用高精度加工设备对密封面进行加工,控制密封面的粗糙度与平面度,确保密封面贴合紧密,减少密封间隙。加强密封结构的装配过程控制,严格按照装配工艺要求进行装配,控制装配误差,避免因装配不当导致密封失效。同时,优

化热处理工艺,调整热处理温度与时间,进一步消除材料内部应力,提升材料的抗氢脆性能与结构稳定性,确保密封结构的制造质量符合设计要求。

## 5 结论

本文围绕高压氢气长输管线阀门密封结构设计与可靠性展开研究,结合高压氢气介质特性与长输管线阀门工作要求,设计了双阻断双排放与V型弹簧预压复合密封结构,优化了密封材料选型与制造工艺,通过试验验证了密封结构的可靠性,并提出了针对性的优化措施,得出以下结论:

(1) 高压氢气长输管线阀门密封结构需满足密封性能、抗氢脆性能、耐磨性、耐腐蚀性等多方面要求,双阻断双排放与V型弹簧预压复合密封结构能够适配高压氢气长输管线的复杂工况,有效阻断高压氢气的渗透与泄漏。

(2) 选用超细晶强化不锈钢作为密封副材料,搭配FFKM镀陶瓷层密封填料,经过特殊热处理与堆焊工艺处理,能够有效提升密封结构的抗氢脆性能、耐磨性与耐腐蚀性,避免氢脆失效与密封面磨损。

(3) 可靠性试验结果表明,设计的密封结构在不同压力、温度工况下均无可见泄漏,微泄漏量符合相关规范要求,抗氢脆性能良好,经过102000次启闭循环后密封性能仍能满足要求,具备良好的可靠性与使用寿命。

(4) 通过材料、结构与制造工艺的优化,能够进一步提升密封结构的可靠性,减少密封失效的概率,满足高压氢气长输管线阀门的长期安全运行需求。

本文的研究成果为高压氢气长输管线阀门密封结构的设计与优化提供了技术参考,对提升高压氢气长输管线的安全稳定性、推动氢能产业的规模化发展具有重要意义。后续可进一步开展高压氢气长输管线阀门密封结构的长期服役性能研究,结合实际运行工况,持续优化密封结构设计,提升密封可靠性。

## 参考文献:

- [1] 张洪伟,李建军,崔潇文.天然气长距离输送压力管线阀门的故障与维护探析[J].化工管理,2025,(06):127-129+153.
- [2] 张晋博.基于视频图像的管线阀门渗漏检测技术研究[D].电子科技大学,2021.
- [3] 张皓,郑朋刚.浅析化工设计中压力管道阀门管件的设计[J].化工管理,2018,(27):48-49.
- [4] 谭炳超.高压管线阀门压力试验装置的设计[J].阀门,2008,(05):21-23.