

掺氢天然气管道法兰密封性能分析及预测模型

冯威¹ 贾文龙¹ 杨明² 吴瑕¹ 陈超¹

1. 西南石油大学石油与天然气工程学院 2. 国家管网集团西部管道有限责任公司

摘要: **目的** 分析掺氢天然气输运系统中多类型法兰密封失效机制。 **方法** 基于气体渗透动力学与材料失效理论, 自主构建多参数监测单元的法兰密封性能实验平台, 以突式法兰和凹凸式法兰作为研究对象, 通过正交实验设计方法设置掺氢比(0~10%, 体积分数)、运行压力(2~6 MPa)双变量参数, 完成 100 组实验; 在临氢实验的基础上完成 40 组振动泄漏实验。 **结果** 泄漏量与运行压力、掺氢比均呈显著正相关, 振动显著加剧了法兰的泄漏量, 且随着振动频率的提升, 泄漏量进一步加大。考虑掺氢比与运行压力的影响, 提出了基于 Sherwood 数的法兰密封性能的无量纲评价模型, 两种法兰密封性能评价模型决定系数分别为 0.97 和 0.99, 相对偏差均小于 2%, 精度满足工程应用需求。相比于突式法兰, 凹凸式法兰密封性能评价模型的压力指数、掺氢比指数及交互项系数分别降低 8.24%、17.30%、28.00%, 量化揭示了法兰结构差异对密封性能的影响。 **结论** 所建立的法兰泄漏预测模型在 0~10% 掺氢比下具有良好的预测能力, 为开展更高掺氢比的研究提供了关键的理论工具与安全评估基础。

关键词: 掺氢天然气; 法兰密封; 泄漏模型; Sherwood 数; 密封实验平台

DOI: 10.3969/j.issn.1007-3426.2026.01.008

引用格式: 冯威, 贾文龙, 杨明, 等. 掺氢天然气管道法兰密封性能分析及预测模型 [J]. 石油与天然气化工, 2026, 55(1): 56-61.

FENG Wei, JIA Wenlong, YANG Ming, et al. Analysis and predictive modeling of flange sealing performance in hydrogen-blended natural gas pipelines [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2026, 55(1): 56-61.

Analysis and predictive modeling of flange sealing performance in hydrogen-blended natural gas pipelines

FENG Wei¹, JIA Wenlong¹, YANG Ming², WU Xia¹, CHEN Chao¹

1. Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, China; 2. PipeChina West Pipeline Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, China

Abstract: **Objective** In order to analyze the failure mechanism of multiple types of flange sealing in hydrogen-blended natural gas transportation system. **Method** A test platform for flange sealing performance with a multi-parameter monitoring unit was independently constructed based on the theory of gas permeation dynamics and material failure theory. The protruding flange and concave-convex flange were taken as the research objects, and bivariate parameters of hydrogen blending ratio (0-10%) and operating pressure (2-6 MPa) were set up using the orthogonal experimental design method; 100 groups of experiments were completed accordingly. Additionally, 40 groups of vibration leakage experiments were conducted on the basis of the hydrogen-doped experiments. **Result** Experimental results indicated that leakage rates were significantly positively correlated with both operating pressure and hydrogen-blending ratio. Leakage was significantly exacerbated by vibration and was further increased with higher vibration frequencies. Considering the effects of hydrogen-blending ratio and operating pressure, a dimensionless evaluation model for flange sealing performance based on the Sherwood number was proposed. The coefficients of determination for the two flange sealing performance evaluation models were determined to be 0.97 and 0.99, respectively, with relative deviations less than 2%, meeting the accuracy requirements for engineering applications. Compared with the protruding flange, the pressure index, hydrogen-blending ratio index, and interaction term coefficients in the sealing performance evaluation model of the concave-convex flange were reduced by 8.24%, 17.30%, and 28.00% respectively, which quantitatively revealed the impact of flange structural differences on sealing performance. **Conclusion** Case studies demonstrate that the established flange leakage prediction model exhibits strong predictive capability within the 0-10% hydrogen-blending ratio range, providing a crucial theoretical tool and safety assessment foundation for conducting research at higher-blending ratios.

Keywords: hydrogen-blended natural gas; flange sealing; leakage model; Sherwood number; sealing test platform

氢气作为清洁高效的二次能源, 因其高能量密度与零碳排放特性成为能源转型关键力量^[1-2]。借

助现有天然气管道网络掺氢输送, 可实现基础设施高效利用与氢能广泛流通^[3-5]。管道法兰连接系统

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“X70/X80 钢掺氢天然气管道泄漏燃爆机制与灾害演化模型研究”(52474083); 四川省自然科学基金面上项目“高压输氢管道泄漏燃爆机制与灾害演化模型研究”(2024NSFSC0123)

作者简介: 冯威, 1999 年生, 主要从事掺氢天然气管道设备密封性能评价等方面的研究工作。E-mail: 1060028504@qq.com

通信作者: 贾文龙, 1986 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事油气管道输送等方面的研究工作。E-mail: jiawenlong@126.com

凭借便于拆装的结构与优异的密封性能,被广泛应用于石油化工行业^[6],是管道中最重主要的静密封连接结构,其密封性对保障掺氢天然气安全、高效、稳定输送具有重要意义。法兰密封原理是拧紧螺栓使密封垫片在上下法兰间被压缩,产生弹性复原力阻止介质泄漏^[7]。由于氢气分子量小、渗透性强^[8],在密封材料中的渗透系数远高于天然气,在金属连接部位的渗透速率可达天然气的4~5倍^[9]。同时,氢气的渗透会引发材料氢脆,其低黏度特性还易通过微观孔隙加剧泄漏风险。因此,泄漏成其最主要失效形式。此外,在实际运输中,泵、压缩机等设备的振动会导致法兰螺栓松动、密封垫片磨损等,严重威胁法兰的正常使用以及管道安全运行^[10-12]。

国内外学者围绕不同场景下的法兰密封展开研究,涵盖管道法兰密封、微观泄漏模型、测试标准规范、数值模拟及表面微结构优化等方向^[13-15]。在法兰静密封微观机理方面,泄漏率是评价密封性能的重要指标。基于微观渗透通道,研究者建立了多种不同应用场景的泄漏计算方法^[16]。刘炎等^[17]针对美国机械工程师学会(American society of mechanical engineers, ASME)规范中给出的预紧比压(y)和垫片系数(m)未与泄漏率关联的不足,开展了垫片在不同介质压力 and 不同加载下的密封性能试验,提出了一套更符合实际工程的参数 y 、 m 的试验方法。郭岩宝等^[18]利用 FLUENT 软件对微动磨损

产生的微泄漏路径单元内部的流体特性进行了数值模拟,探究了不同管道压力和泄漏模式下泄漏过程的变化规律。张政^[19]针对燃气站场中的螺栓-垫片-法兰连接系统,进行了泄漏失效的风险评估与敏感因素分析,揭示了不同微动参数对柔性石墨金属缠绕垫片密封界面的微动磨损规律与失效机理。在掺氢对法兰密封材料性能影响方面,有研究指出,法兰非金属材料,在与氢气接触时可能会发生吸氢膨胀和鼓泡现象^[20],这对法兰密封完好性构成严峻挑战。

针对纯天然气管道法兰,已有相对完善的技术标准和规范。但在掺氢天然气领域,相关标准尚不完善,现有研究多为理论与仿真,缺乏系统实验验证,尤其对振动影响的研究匮乏,导致对氢渗透机制和泄漏规律的认识不足。因此,有必要开展掺氢及振动工况下的实验研究,测试不同掺氢比、运行压力、振动频率下的密封性能变化,基于 Sherwood 数构建普适性泄漏模型,为工程选型优化提供依据。

1 实验装置与实验方案

掺氢天然气管道测量法兰密封性能的实验装置总体设计如图1所示。整个实验装置由气源系统(CH_4 、 H_2 、 N_2 、气瓶)、混合罐(储存掺氢天然气)、增压泵(控制实验运行压力)、加热器(恒温控制)、循环泵(形成稳定流场)、质量流量计(流量计量)、

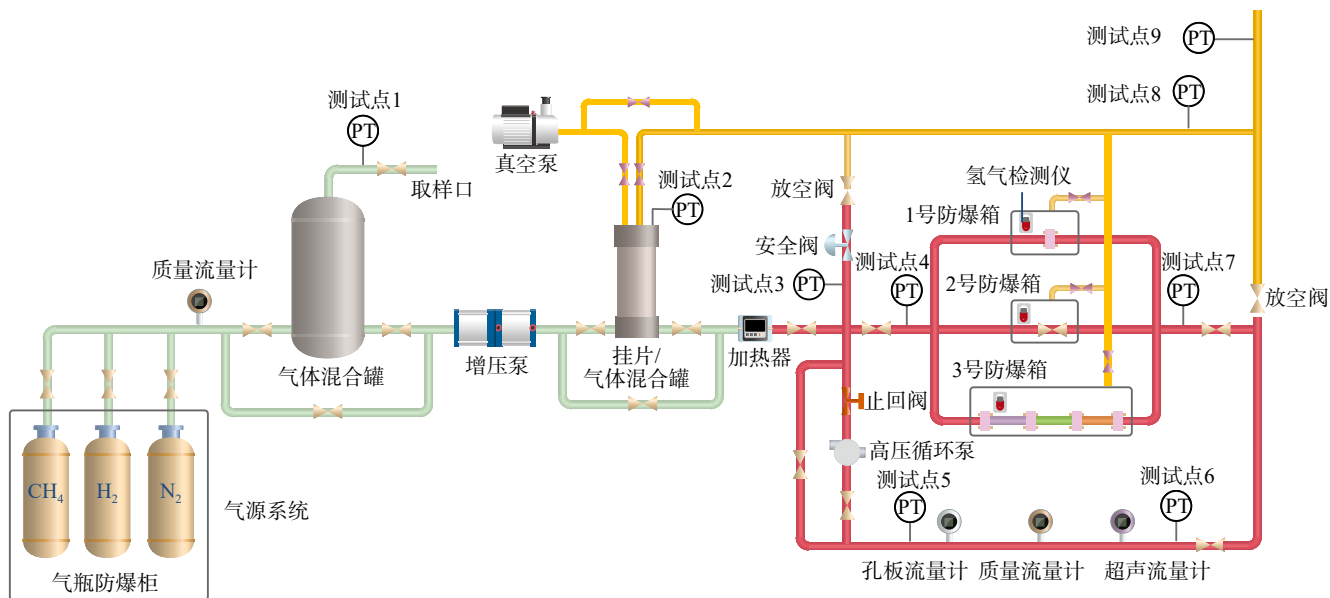


图1 掺氢天然气管道法兰密封性能实验装置总体设计示意图

气动振动器(模拟管道振动)和法兰密封性能测试模块(1号防爆箱)组成。

在对管道进行试压与净化后,根据预设掺氢比,采用质量流量计(OPTIMASS 6400,精度±0.2%)分别计量CH₄气瓶与H₂气瓶的输出流量,并将气体输送至混合罐,从而准确控制掺氢比。待气体充分混合后,抽取部分混合气样,使用气相色谱仪(Agilent 7890A)进行定量分析,以验证配比的准确性。实验过程中,通过监测各测试点的实时压力数据,由压缩机对系统运行压力进行闭环调节,确保压力稳定在目标值。利用加热器维持实验环境的恒温状态,同时借助循环压缩机驱动气体形成稳定流场,使混合气体均匀流经实验管路。该集成控制策略有效保障了气体泄漏实验的安全性与测量数据的可靠性。

根据掺氢天然气管道常见的压力等级,结合实际工程应用占比,实验选用了公称直径为DN20、材料为316L不锈钢、耐压为6.3MPa的突式和凹凸式两种定制法兰,搭配具有良好的抗腐蚀性能的石墨填充金属缠绕垫片。本研究以法兰类型、运行压力、掺氢比作为关键变量,旨在探究不同密封结构的法兰在高压临氢条件下密封性能的变化。

国内外一般将20%的掺氢比确立为中长期研究与示范的核心目标^[21-22],但目前针对不同掺氢比的实验研究较少。为保证结果的准确性,本研究选择5%和10%两种掺氢比进行实验,旨在揭示低掺氢比条件下法兰密封性能的变化规律,为后续开展20%高掺氢比的研究奠定基础。具体实验设定工况如表1所列,每种工况进行4组重复性实验,共计完成100组实验。

表1 基础密封性能实验工况

序号	法兰类型	运行压力/MPa	掺氢比	带压时间/h
1	突式法兰	2、3、4、5、6	5%、10%	8
2	凹凸式法兰	2、3、4、5、6	5%、10%	8

在基础密封性能实验的基础之上开展振动实验,研究振动对法兰密封性能的影响。具体工况设定如表2所列,共计完成40组实验。

管道系统布置多类型高精度传感器(压力测量精度±0.1%FS;温度±0.2℃;流量范围0~10m³/h,精

表2 振动条件下密封性能实验工况

序号	法兰类型	运行压力/MPa	掺氢比	振动频率/Hz	带压时间/h
1	突式法兰	2、3、4、5、6	5%、10%	30、50	8
2	凹凸式法兰	2、3、4、5、6	5%、10%	30、50	8

度±0.1%;氢气体积分数检测范围0~1000μL/L),并设有安全放空系统。基于专业软件平台集成高速多通道数据采集卡,构建自动化采集系统,可实时获取压力、流量、温度及氢气泄漏量等数据,并按实验工况分类存储,便于回溯分析。实验全程由专人监控,记录异常数据(如传感器跳变)并排查故障,同时结合高清摄像头和氢气检测仪保障安全。通过实时分析动态曲线(如泄漏量、压力变化),可在发现异常时调整参数或暂停实验,确保数据可靠性和实验安全。

2 结果与讨论

2.1 掺氢比与运行压力对法兰泄漏量的影响

为揭示掺氢天然气管道法兰的密封失效机制,本研究通过100组正交重复实验,系统测试了掺氢比与运行压力泄漏量的影响。

实验结果表明,法兰泄漏量与掺氢比、运行压力呈显著正相关。以突式法兰为例,当掺氢比为5%时,运行压力从2MPa升至6MPa,平均泄漏量从25.3μL/L增至71.7μL/L,增幅达2.8倍(图2);在6MPa工况下,掺氢比从5%增至10%,平均泄漏量从71.7μL/L增至95.7μL/L,增幅为33.5%(图2、图3)。凹凸式法兰表现出类似趋势,但平均泄漏量整体低于突式法兰。在10%掺氢比、6MPa工况下,突式法兰平均泄漏量(95.7μL/L)约为凹凸式(30.6μL/L)的3.13倍(图3)。两种法兰平均泄漏量呈现较大的差异,主要归因于其密封结构的不同:突式法兰采用平坦的密封设计,在高压和高掺氢比工况下,其固有的对中性差、易发生垫片偏移、密封压力不稳定的缺点,被氢气分子极小、黏度极低、高渗透性的特性放大,导致泄漏量增大;而凹凸式法兰采用嵌入结构,通过自对准效应和限制垫片位移,提供了更稳定的密封性能,降低了泄漏风险。

基于标准差分别绘制了5%与10%掺氢比下的误差棒图,如图2和图3所示。误差棒是附在图中

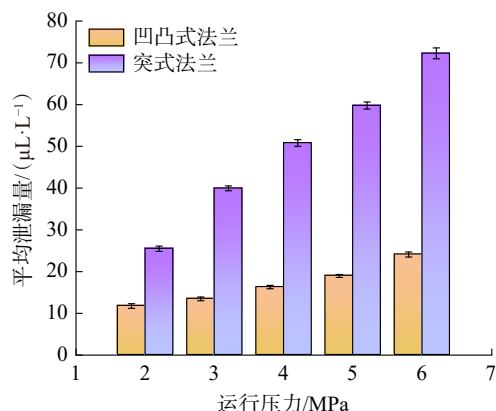


图2 5% 掺氢比下不同运行压力的法兰平均泄漏量及误差范围

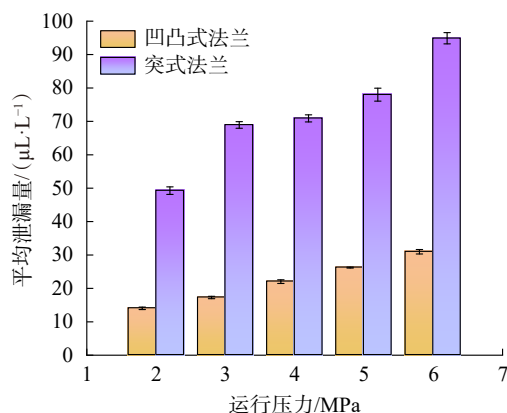


图3 10% 掺氢比下不同运行压力的法兰平均泄漏量及误差范围

数据点上的线段,其长度表示“平均值 ± 1 个标准差”的波动范围。结果显示,不同法兰结构在运行压力与掺氢比的影响下,密封性能稳定性差异显著。突式法兰平均泄漏量波动特征:在低掺氢比(5%)工况下,运行压力从2 MPa升至6 MPa,标准差从0.5 $\mu\text{L}/\text{L}$ 增至1.3 $\mu\text{L}/\text{L}$,误差棒长度随压力升高逐渐延长,表明高压下密封界面损伤的随机性增加,密封性能稳定性下降。凹凸式法兰平均泄漏量波动特征:在全压力范围内,标准差均小于突式法兰;在5% 掺氢比、2 MPa 工况下,标准差仅为0.3 $\mu\text{L}/\text{L}$,误差棒较短,反映了其密封界面稳定性优势;即便在高掺氢比(10%)、6 MPa 工况下,标准差也仅为0.7 $\mu\text{L}/\text{L}$,显著低于同工况下突式法兰的1.9 $\mu\text{L}/\text{L}$ 。通过对比两类法兰的平均泄漏量与标准差可知,凹凸式法兰展现出了更好的抗扰动能力。无论是压力攀升还是掺氢比增加,这种扰动对其密封性的影响都更小,表明其密封性能可靠性更高。

2.2 振动对法兰泄漏量的影响

为探究振动条件下掺氢天然气管道法兰密封平均泄漏量的演化规律,在已完成100组正交重复实验的基础上,设计了40组振动试验,以系统研究振动荷载对密封性能的影响。图4和图5所示的振动实验结果表明,振动工况增大了突式法兰与凹凸式法兰的泄漏量,且泄漏量随振动频率升高呈明显增长趋势。其原因在于,外部振动能量通过管道结构传递至螺栓-垫片-法兰组成的密封系统,诱发密封界面产生持续的微幅相对运动,导致原有紧密接触状态遭到破坏,密封比压发生衰减,界面间隙增大,从而造成泄漏通道扩展与泄漏量上升^[23-25]。

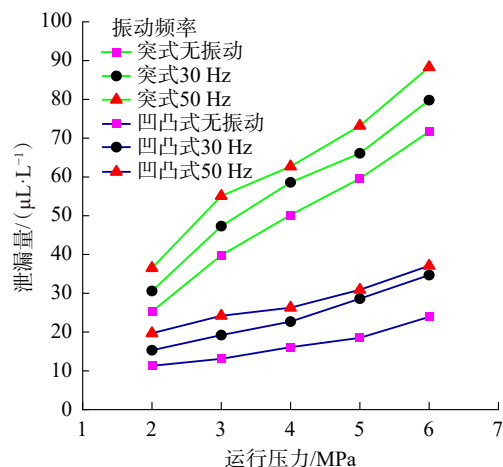


图4 5% 掺氢比下振动频率对法兰泄漏量的影响

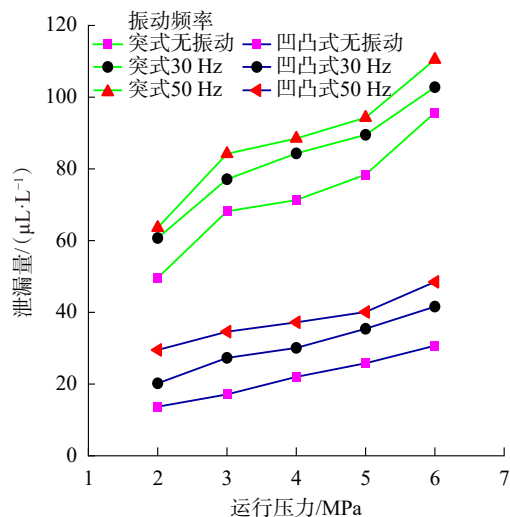


图5 10% 掺氢比下振动频率对法兰泄漏量的影响

3 法兰密封性能评价模型建构

在掺氢天然气输运系统中,法兰泄漏量受压力、

掺氢比等多变量协同影响，而实验数据则受工况局限性制约，难以直接应用于复杂工程实际。基于 Sherwood 数的无量纲分析能够消除量纲差异，建立普适性的密封性能预测评价模型，为法兰选型与工况优化提供理论支撑。

3.1 理论基础与参数定义

Sherwood 数在传质理论中是表征物质传递效率的重要参数^[26-27]，其物理意义为对流传质速率与扩散传质速率的比值，计算式如式(1)所示。

$$Sh = \frac{KL}{D_m} \tag{1}$$

式中： Sh 为 Sherwood 数； K 为传质系数，m/s； L 为特征长度，m； D_m 为扩散系数，m²/s。

将式(1)用于法兰泄漏分析，表征氢分子通过密封界面的传质效率，如式(2)所示。

$$Sh = \frac{Qd}{D_m A} \tag{2}$$

式中： Q 为法兰平均泄漏量(以体积流量计)，m³/s； d 为法兰直径，取值 0.02 m； D_m 为扩散系数，25 ℃ 时取 0.61×10⁻⁴ m²/s； A 为法兰泄漏通道面积，m²。

为消除量纲差异并实现跨工况对比，需对实验中的相关参数进行标准化处理。运行压力参数 p 的标准化形式定义为： $\bar{p}=p/p_0$ ， p_0 为标准大气压，取值 0.1 MPa；对于掺氢比的参数 H ，由于其本身以氢气体积分数表征，可直接作为无量纲使用，定义为 $\tilde{H}=H$ 。

3.2 无量纲泄漏模型构建

基于上述定义无量纲参数，对突式与凹凸式法兰的实验数据进行非线性回归拟合，得到差异化的无量纲模型，模型构建流程如图 6 所示。

3.2.1 突式法兰无量纲泄漏模型

对突式法兰在 5% 与 10% 掺氢比条件下的泄漏量数据进行非拟合，建立的模型表达式如式(3)所示。

$$Sh = 1.27 \times 10^7 (\bar{P})^{0.92} (\tilde{H})^{0.88} e^{3.2 \times 10^{-3} \bar{P} \tilde{H}} \tag{3}$$

式中： e 为自然常数。

其中，压力指数为 0.92，表明突式法兰泄漏量对压力变化高敏感度，掺氢比指数为 0.88，反映出氢渗透行为对泄漏的显著影响；交互项系数为 3.2×10⁻³，证实了压力与氢气之间存在协同强化效应，两者共同作用会进一步加剧泄漏。模型决定系

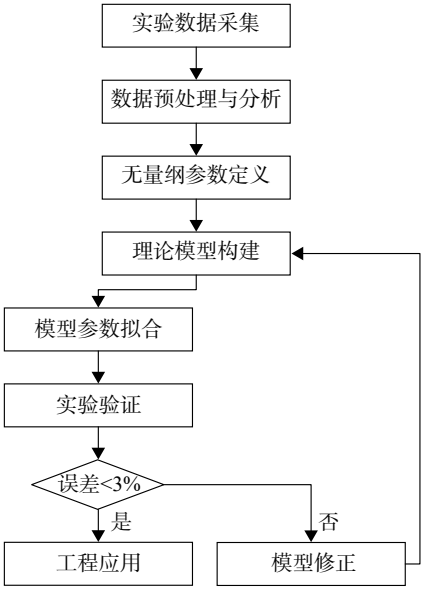


图 6 无量纲泄漏模型构建流程示意图

数为 $R^2=0.97$ ，表明模型能够较好地解释实验数据变异，拟合优度较高。

3.2.2 凹凸式法兰无量纲泄漏模型

对凹凸式法兰的实验数据进行拟合，建立的模型表达式如式(4)所示。

$$Sh = 6.82 \times 10^6 (\bar{p})^{0.85} (\tilde{H})^{0.75} e^{2.5 \times 10^{-3} \bar{p} \tilde{H}} \tag{4}$$

模型决定系数 $R^2=0.99$ ，拟合精度优于突式法兰模型。两种法兰泄漏模型的参数对比见表 3。凹凸式法兰泄漏模型的压力指数、掺氢比指数以及交互项系数均显著低于突式法兰。其低指数特性源于密封面嵌入结构：凹面能有效限制垫片变形，可降低压力波动导致的界面损伤；同时密封面接触面积增加 20%~30%，延长了氢气的渗透路径，且螺栓预紧力分布更为均匀，抑制了由于氢气分子尺寸小、扩散能力强而引起的局部泄漏加剧现象。

表 3 两种法兰泄漏模型参数对比

模型参数	突式法兰	凹凸式法兰	差异率
压力指数	0.92	0.85	-8.24%
掺氢比指数	0.88	0.75	-17.30%
交互项系数	3.2×10 ⁻³	2.5×10 ⁻³	-28.00%

基于建立的法兰泄漏量无量纲模型，选取 5%、10% 掺氢比、运行压力为 6 MPa 的工况对模型准确性进行验证，结果如表 4 所列。所有验证工况下的相对误差均小于 3%，表明模型预测精度满足工程应用需求。

表 4 6 MPa 条件下无量纲模型预测精度验证

法兰类型	掺氢比/%	实验Sh值	预测Sh值	相对误差/%
突式法兰	5	1.10×10^4	1.11×10^4	0.90
	10	1.44×10^4	1.43×10^4	0.70
凹凸式法兰	5	7.70×10^3	7.66×10^3	0.52
	10	9.91×10^3	9.82×10^3	0.92

4 法兰密封性能评价模型实验与实例分析

为验证法兰密封性能评价模型在实际应用中的准确性,利用自主搭建的实验平台开展 8 组实验进行验证。通过对比模型预测的泄漏量与实验室测量的泄漏量(以下简称实测泄漏量),来评价模型的预测能力,结果如表 5 所列。

表 5 模型预测泄漏量与实测泄漏量对比

法兰类型	掺氢比/%	运行压力/MPa	预测泄漏量/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	实测泄漏量/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	相对误差/%
突式法兰	5	7	110.60	113.55	2.60
	5	8	114.90	117.36	2.10
	10	7	156.11	160.82	2.93
	10	8	178.61	184.74	3.32
	5	7	31.55	33.15	4.83
凹凸式法兰	5	8	35.91	36.81	2.44
	10	7	58.30	60.41	3.49
	10	8	67.30	70.62	4.70

由表 5 可知,两种法兰的模型预测泄漏量与实测泄漏量的相对误差均小于 5%。该结果表明,模型对不同工况均表现出良好的适应性,能够满足工程应用精度要求,为法兰密封设计与安全评估提供了可靠的理论工具。

所建立的法兰泄漏预测模型在 0~10% 掺氢比下具有良好的预测能力,为开展更高掺氢比的研究提供了关键的理论工具与安全评估基础。后续研究工作将重点探究在 10%~20% 掺氢比区间各个因素对法兰密封性能的影响,以验证模型的适用性与边界,为未来更高掺氢比输运管道的安全设计与标准制定提供技术支撑。

5 结论

1) 通过对 100 组正交实验与 40 组振动试验的数据分析,明确了掺氢比和运行压力对法兰平均泄

漏量的影响规律,泄漏量与掺氢比、运行压力均呈显著正相关,振动会加剧法兰泄漏。

2) 不同法兰结构在运行压力与掺氢比的影响下密封性能稳定性差异显著,凹凸式法兰在各工况下的泄漏量与标准差均小于突式法兰,展现出了更好的抗工况扰动能力。

3) 基于传质理论定义 Sherwood 数,建立突式与凹凸式法兰的密封性能评价模型。模型的决定系数分别为 0.97 和 0.99。在 10% 掺氢比、6 MPa 工况下模型预测值与实验值的相对误差均小于 1%,满足工程应用精度要求。与突式法兰模型相比,凹凸式法兰密封性能评价模型的压力指数、掺氢比指数及交互项系数较突式法兰分别降低 8.24%、17.30%、28.00%,量化揭示了法兰结构差异对密封性能的影响。

4) 工程实例表明,计算模型预测泄漏量与实际泄漏量的相对误差均小于 5%。模型对不同工况均表现出良好适应性,满足工程应用精度要求,能够为掺氢天然气管道法兰连接的设计与安全评价提供理论和实验支撑。

参考文献

[1] 邓绍林,刘琦,许苏予,等. 中国氢能产业的地方实践及启示[J]. 石油与天然气化工, 2024, 53(5): 7-16.

[2] 吴瑕,谭旻倩,张沁蕊,等. 掺氢天然气管道本体及焊缝裂纹扩展研究进展[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(8): 3063-3073.

[3] 张雯琴,李长俊,贾文龙,等. 混氢天然气对流量计安装条件的适应性分析[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(6): 98-103.

[4] 李天娇,谢飞,张瑛,等. 天然气管道掺氢输送技术研究进展[J]. 油气储运, 2024, 43(12): 1337-1347.

[5] 尚娟,鲁仰辉,郑津洋,等. 掺氢天然气管道输送研究进展和挑战[J]. 化工进展, 2021, 40(10): 5499-5505.

[6] 王明伍. 高温法兰连接系统的紧密性及评价方法研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2015: 8-9.

[7] 田洋. 管法兰密封特殊性及泄漏概率研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017: 1-2.

[8] 李茜璐,唐柳怡. 混氢天然气在终端管网中应用的研究进展[J]. 油气储运, 2022, 41(4): 381-390.

[9] MELAINA M W, ANTONIA O, PENEV M. Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: a review of key issues[R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2013.

- 研究[J]. 油田化学, 2016, 33(4): 619-622.
- [21] 李继勇, 邵红云, 宋时权, 等. 压裂用胶囊破胶剂性能评价方法研究[J]. 石油与天然气化工, 2021, 50(6): 87-90.
- [22] MA Z, SONG Z Z, JIANG Q Z, et al. Novel method for microencapsulation of oxalic acid with ethyl cellulose shell for sustained-release performance[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 602: 125064.
- [23] 朱永杰, 赵亚睿, 窦姝凡, 等. 具有增强力学性能的助破胶微胶囊的制备与性能评价[J]. 油田化学, 2021, 38(3): 417-421.
- [24] ZHU J Y, HE J Y, ZHOU J, et al. Recent progress in microencapsulation technology and its applications in petroleum industry[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, 407: 125162.
- [25] 杨兆中, 彭擎东, 王振普, 等. 微胶囊固体酸酸化压裂技术应用及展望[J]. 特种油气藏, 2023, 30(3): 1-8.
- [26] 高定祥, 许强, 王若珂, 等. 微胶囊的制备及油田应用潜力展望[J]. 应用化工, 2020, 49(增刊 2): 251-257.
- [27] AHANGARAN F. Microencapsulation: Solvent evaporation[M]//SEFAT F, FARZI G, MOZAFARI M. Principles of Biomaterials Encapsulation: Volume One. Amsterdam: Elsevier, 2023: 377-392.
- [28] WANG S C, ZHANG Q, XIU J L, et al. Microcapsule preparation process research and current status of oilfield application[J]. Micro & Nano Letters, 2024, 19(5): e70000.
- [29] 刘高峰. 盐酸微胶囊的制备及性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- [30] 刘文丽, 焦纬洲, 刘有智, 等. W/O/W 型多重乳液的稳定性和应用研究进展[J]. 日用化学工业, 2012, 42(5): 366-370.
- [31] ZHU J Y, ZHOU J, YANG Z Z, et al. Preparation and performance evaluation of microencapsulated acid used for gel breaking of fracturing fluid in low-temperature reservoirs[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, 403: 124844.

收稿日期: 2024-12-13; 编辑: 冯学军

(上接第 61 页)

- [10] 朱建鲁, 张捷, 李玉星, 等. 纯氢/掺氢管道密封圈与密封垫性能研究进展[J]. 油气储运, 2024, 43(7): 730-739.
- [11] 赵茜, 邢云颖, 王修云, 等. 天然气管道掺氢输送相容性研究现状[J]. 材料导报, 2024, 38(12): 128-134.
- [12] 吴华, 徐莹莹, 徐凌, 等. 掺氢输送管道材料的适应性及评价方法[J]. 力学与实践, 2024, 46(4): 722-731.
- [13] SEMKE W H, BIBEL G D, JERATH S, et al. Efficient dynamic structural response modelling of bolted flange piping systems[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2006, 83(10): 767-776.
- [14] 史建成. 基于逾渗理论的静密封建模方法与泄漏机理研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015: 5-6.
- [15] 张赞, 邓建新, 岳鸿志, 等. 微织构对钢制导轨表面摩擦性能的影响[J]. 制造技术与机床, 2019(11): 17-23.
- [16] 虞雄兵. 管法兰连接系统密封性能分析与优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023: 11-15.
- [17] 刘炎, 陈学东, 范志超, 等. 基于泄漏率的法兰密封结构垫片参数试验研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(21): 168-176.
- [18] 郭岩宝, 张政, 王德国, 等. 考虑微动磨损的法兰垫片泄漏路径研究[J]. 石油科学通报, 2020, 5(3): 420-428.
- [19] 张政. 燃气站场法兰密封连接微动磨损特性及其紧密性评价研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2022: 62-70.
- [20] ONO H, FUJIWARA H, NISHIMURA S. Penetrated hydrogen content and volume inflation in unfilled NBR exposed to high-pressure hydrogen-What are the characteristics of unfilled-NBR dominating them?[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(39): 18392-18402.
- [21] 李敬法, 苏越, 张衡, 等. 掺氢天然气管道输送研究进展[J]. 天然气工业, 2021, 41(4): 137-152.
- [22] 张佩颖, 罗勤, 周理, 等. 国内天然气分析测试标准掺氢适应性探讨[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(3): 103-106.
- [23] 白明鹤. 螺栓法兰结构的动力学特性及密封性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022: 43-61.
- [24] 刘容, 顾伯勤, 陈晔. 附加载荷作用下螺栓法兰连接的强度和紧密性分析[J]. 化工机械, 2007, 34(5): 264-268.
- [25] 庄法坤, 谢国山, 邵珊珊, 等. 金属平垫片螺栓法兰接头泄漏预测的可行性研究[J]. 中国特种设备安全, 2015(增 1): 49-54.
- [26] 聂百胜, 崔泉, 常里, 等. 优化径向基函数的海底油气管道腐蚀速率预测模型研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(7): 2593-2602.
- [27] KOUTSOU C P, YIANTSIOS S G, KARABELAS A J. A numerical and experimental study of mass transfer in spacer-filled channels: Effects of spacer geometrical characteristics and Schmidt number[J]. *Journal of Membrane Science*, 2009, 326(1): 234-251.

收稿日期: 2025-08-07; 编辑: 张寅晖