

文章编号: 1000-8055(2026)11-20250447-12

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20250447

# 基于多尺度模型的输氢管路梁式管接头 自密封性分析

刘 勇<sup>1</sup>, 张纪强<sup>1</sup>, 闫方超<sup>2</sup>

(1. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300;

2. 天津布尔科技有限公司, 天津 300392)

**摘 要:** 为评估梁式管接头作为航空输氢管路连接件的可行性, 开展输氢管路梁式管接头自密封性分析。建立了包含粗糙密封表面形貌特征的梁式管接头多尺度有限元模型, 基于该模型对不同工况环境下密封区域的实际接触面积和接触压力进行仿真计算, 研究了梁式管接头的自密封性随预紧力、密封介质温度和介质压力的变化规律。研究表明: 梁式管接头的自密封性主要体现在第一道密封上, 轴向预紧力和密封介质压力的增加能够强化自密封效果, 提升第一道密封的密封性能; 流体介质温度对自密封性的影响并不显著, 在所考察的温度范围内第一道密封和第二道密封的密封性能均无显著变化。研究结果说明了梁式管接头在宽温域环境下的密封性能稳定性和对高压环境环境的适应性。

**关 键 词:** 氢燃料; 输氢管路; 梁式管接头; 自密封性; 粗糙表面; 多尺度模型

中图分类号: V233.3+2

文献标志码: A

## Self-sealing analysis of beam seal fittings in hydrogen pipelines based on multi-scale contact model

Liu Yong<sup>1</sup>, Zhang Jiqiang<sup>1</sup>, Yan Fangchao<sup>2</sup>

(1. College of Aeronautical Engineering,

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Tianjin Bool Technology Company Limited, Tianjin 300392, China)

**Abstract:** To evaluate the feasibility of beam seal fittings as connectors for aviation hydrogen pipelines, an analysis of the self-sealing performance of beam seal fittings was conducted. A multi-scale finite element model of the beam seal fitting, incorporating the surface topography characteristics of rough sealing surfaces, was established. Based on this model, simulations were performed to calculate the real contact area and contact pressure in the sealing region under various working conditions. The law of the self-sealing performance of beam seal fittings varying with preload force, sealing medium temperature, and medium pressure was investigated. The results indicated that the self-sealing performance of beam seal fittings was primarily attributed to the sealing performance of the first seal. An increase in axial preload force and sealing medium pressure enhanced the self-sealing effect and improved the sealing performance

收稿日期: 2025-09-30

基金项目: 天津市自然科学基金联合基金(24JCYBJC00130);

天津市技术创新引导专项(基金)——企业科技特派员项目(23YDTPJC00380);

中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项(3122024033)

**作者简介:** 刘勇(1989—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为粗糙表面接触力学、连接结构动力学、航空发动机结构安全性与适航。

E-mail: liuyongyb@126.com

**引用格式:** 刘勇, 张纪强, 闫方超. 基于多尺度模型的输氢管路梁式管接头自密封性分析[J]. 航空动力学报, 2026, 41(11): 20250447. Liu Yong, Zhang Jiqiang, Yan Fangchao. Self-sealing analysis of beam seal fittings in hydrogen pipelines based on multi-scale contact model[J]. Journal of Aerospace Power, 2026, 41(11): 20250447.

of the first seal. In contrast, the temperature of the fluid medium had no significant impact on self-sealing performance, as the sealing performance of both the first and second seals remained largely unchanged within the investigated temperature range. The findings demonstrated the stability of the sealing performance of beam seal fittings across a wide temperature range and their adaptability to high-pressure environments.

**Keywords:** hydrogen fuel; hydrogen pipeline; beam seal fitting; self-sealing; rough surface; multi-scale model

在氢能源飞机中,氢燃料通过航空燃料管路系统从飞机上的储氢罐输送到氢能发动机。航空管路接头作为航空管路系统中的重要部件之一,往往是密封性能中最薄弱的环节<sup>[1]</sup>。应用在航空发动机中的氢燃料具有高压、宽温域的特点,由于氢燃料与传统航空煤油在化学和物理性质上的显著差异,现有的航空管路接头无法为航空氢燃料提供有效的密封。因此,有必要考虑航空氢燃料的工况特点,寻求能够实现氢能源飞机管路系统可靠连接和密封的新型管路连接件。

梁式管接头是一种用于航空管路连接的新型管接头,与传统航空管接头相比,梁式管接头具有自密封的特点<sup>[2]</sup>,即由于结构的特殊性,密封介质压力的升高引起的结构变形,会提升密封界面的接触压力,从而有助于提升梁式管接头的整体密封性能。因此,对于梁式管接头,自密封性是影响其整体密封性能的重要因素之一。自密封的特点使得梁式管接头尤其适合作为输氢管路这类高压宽温域工况特点的管路连接件。但是,根据公开发表的文献,目前对于将梁式管接头用于航空输氢管路的研究还较为匮乏。崔颖团队是近年来对梁式管接头结构进行了较为系统研究的团队,他们对梁式管接头的泄漏机理、密封性能以及参数敏感性、结构优化设计以及形状记忆合金在梁式管接头中的应用进行了深入研究<sup>[3-4]</sup>。Jeon 和 Kim<sup>[5]</sup>通过改变梁的倾斜角和厚度来探讨 U 型梁的几何形状对接触压力的影响。Parker 公司将阳接头的锥面角设计为  $8.5^\circ$ ,阴接头锥面角为双锥度,提高了梁式管接头的密封性能。刘勇等<sup>[6]</sup>通过有限元仿真技术建立了可以形成两道密封的梁式管接头模型,并对其进行稳健性优化设计。然而,上述关于梁式管接头的研究都是以传统航空煤油或液压油为密封介质进行的,最高压力不超过 28 MPa,导致梁式管接头自密封性和高压环境适应性的特点没有得到充分体现。氢燃料介质的压力最高可达 70 MPa,140 MPa 压力输氢环境下

的管接头也在研究中<sup>[7]</sup>,并且氢介质还具有宽温域的特点。然而,目前尚未见到有关高压宽温域环境下梁式管接头自密封性的产生机理及其变化规律的研究。因此,有必要对高压宽温域氢燃料介质条件下的梁式管接头的自密封性进行进一步的研究,以便为输氢管路梁式管接头的结构设计提供理论依据。

梁式管接头本质上是一种金属接触式静密封结构,接触式静密封的密封性能受到许多因素的影响,其中,在加工过程产生的表面形貌被认为是影响金属静密封结构密封性能的重要因素之一<sup>[8]</sup>。由于表面形貌的多尺度特性,通常很难对其进行精确表征。因此,早期的研究者大多不考虑表面形貌的影响,而是将粗糙的密封表面简化为光滑表面<sup>[9-10]</sup>,这必然会严重影响分析结果的准确性。因此,为了准确分析梁式管接头的自密封性,需要考虑接触表面的形貌特征。

粗糙表面接触力学理论是研究接触式静密封的理论基础。对于粗糙表面接触力学的研究,一种是基于统计参数描述密封表面形貌,建立基于赫兹接触理论的粗糙表面统计接触模型。1966 年提出的 G-W(Greenwood-Williamson)模型<sup>[11]</sup>是统计接触模型的典型代表,统计接触模型的优点在于其表达式简单明了,简化了粗糙表面间接触方程的推导,有利于对粗糙表面间的接触进行快速分析,但是统计学参数无法表征粗糙表面的多尺度特性,使得分析结果产生误差。另一种是基于分形参数的粗糙表面形貌描述方法,基于赫兹接触理论建立分形接触模型,这种方法的优点是不需要对粗糙表面做太多的假设,粗糙表面丰富的形态信息可以保留<sup>[12-15]</sup>。目前,基于分形理论的接触模型已经受到许多学者的关注,陈志利用分形理论建立了三维粗糙表面模型,并通过有限元方法模拟了机械密封在干摩擦过程中的接触行为,重点分析了真实接触面积、接触压力和温度分布等关键参数<sup>[16]</sup>。Liu 等考虑临界微凸体频率

指数的变化, 基于分形理论建立了粗糙表面接触力学模型, 分析了分形参数、接触压力与实际接触面积之间的关系<sup>[17]</sup>。然而, 并不是所有的机加工表面都具有分形特性, 其适用性存在一定的局限。所以本文运用叠加的三角函数构建粗糙表面, 使其更加接近实际表面<sup>[18]</sup>。

随着计算机科学的进步, 通过数值仿真研究管接头的密封性能成为大量学者的选择。Jiang 等<sup>[19]</sup>通过数值仿真对排水管路进行密封性能研究, 根据接触应力的分布, 定量评价管路的密封性能。Zhou 等<sup>[20]</sup>基于垫片的表面形貌, 建立了泄漏模型, 通过仿真试验分析载荷、内压等对其泄漏率的影响。闫洋洋等<sup>[21]</sup>通过建立多尺度模型, 通过仿真试验分析不同位移载荷下, 卡套式接头的密封性能, 并进行优化设计。以上工作很好地推动了仿真技术在接触式静密封研究中的应用, 所得结论有力推动了静密封技术的发展。但是, 在以上研究中, 有的没有考虑粗糙表面形貌的影响, 有的虽然考虑密封表面形貌, 但是没有建立从微观接触力学到宏观管接头密封性能的多尺度模型, 并且由于结构形式和工况环境方面的差异, 所得结论不足以支撑对高压宽温域环境下梁式管接头自密封性能的研究。

有鉴于此, 本文考虑密封表面的微观形貌, 建立梁式管接头的多尺度有限元模型。基于该模型, 对高压宽温域氢环境下梁式管接头的自密封性进行数值模拟研究, 阐明在预紧力、介质温度和压力等因素的影响下梁式管接头自密封性的演变规律, 所得结论能够为高压宽温域氢介质环境下针对梁式管接头自密封性的结构优化设计提供理论支撑。

## 1 梁式管接头模型建立

梁式管接头是由阴接头、阳接头与外套螺母组成。研究表明, 在阴接头上设计椭圆弧凹槽, 在外套螺母预紧力的作用下, 能够在接触面上形成两道有效密封, 从而提高密封性能<sup>[4]</sup>。梁式管接头的具体结构如图 1 所示, 在外套螺母拧紧过程中, 阳接头与阴接头接触面逐渐贴合, 从而形成有效密封区域<sup>[21]</sup>。由于椭圆弧凹槽的存在, 使得原本连续的密封界面构成隔离密封系统, 能够在接触面上形成两道密封, 分别为第一道密封与第二道密封。密封梁可以被等效为一个悬臂梁模型, 其中第二道密封为固定端, 第一道密封为悬

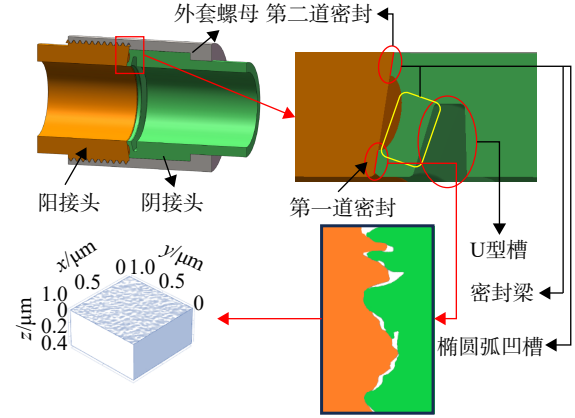


图 1 梁式管接头结构剖面图

Fig. 1 Sectional view of the beam seal fitting

臂端, 当轴向预紧力、介质温度、介质压力等发生变化时, 密封梁在第一道密封的悬臂端所受到的横向载荷发生改变而产生翘曲变形, 密封梁翘曲变形产生的横向恢复力作用于密封界面, 能够起到增加梁式管接头密封性能的作用, 此即为梁式管接头的自密封效应产生原理。

为了对梁式管接头的自密封性进行定量评估, 本文选取管径为 12 mm, 根据 SAE<sup>[22-23]</sup> 确定阳接头的结构参数, 图 2 所示为阳接头与阴接头的结构参数示意图。其中,  $a$ 、 $b$  分别为椭圆弧凹槽的长轴与短轴,  $c$  为第一道密封名义带宽, 阳接头厚度为  $d$ , 阴阳接头接触锥面与径向夹角为  $\alpha$ ,  $e$  为 U 形口轴向长度,  $h$  为密封梁截面宽度,  $p$  为阴接头壁厚,  $\theta$  为 U 形梁与径向的夹角,  $\delta$  为 U 形梁底部与阴接头外径的距离,  $\beta$  为倒角角度。具体结构参数如表 1 所示。

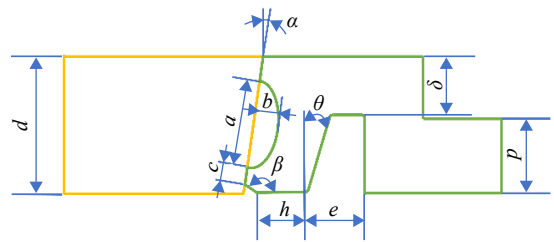


图 2 梁式管接头结构参数

Fig. 2 Structural parameters of beam seal fittings

### 1.1 多尺度有限元建模

多尺度有限元模型是一种考虑宏观结构尺寸和微观形貌的跨尺度分析方法<sup>[21]</sup>。通过建立多尺度有限元模型, 使得梁式管接头模型更加符合实际加工情况, 并且可以获取密封接触面粗糙表面的微变形。在金属静密封研究中, 密封界面的微

表 1 梁式管接头结构参数取值  
Table 1 Parameter values of the beam seal fitting

| 结构参数                               | 数值    |
|------------------------------------|-------|
| 阴接头椭圆弧凹槽的长半轴 $a/\text{mm}$         | 1.66  |
| 阴接头椭圆弧凹槽的短半轴 $b/\text{mm}$         | 0.30  |
| 第一道密封名义接触带宽 $c/\text{mm}$          | 0.49  |
| 阳接头壁厚 $d/\text{mm}$                | 2.70  |
| U 形口轴向长度 $e/\text{mm}$             | 1.04  |
| 密封梁截面宽度 $h/\text{mm}$              | 0.50  |
| 阴接头壁厚 $p/\text{mm}$                | 1.55  |
| 锥面角 $\alpha/(\circ)$               | 8.50  |
| 阴接头倒角角度 $\beta/(\circ)$            | 135.0 |
| U 型梁底部与阴接头外径的距离 $\delta/\text{mm}$ | 1.10  |
| U 形梁与径向的夹角 $\theta/(\circ)$        | 15.0  |

观形貌对管接头的接触状态及密封性能具有显著影响,所以准确、客观地描述金属密封界面是研究其密封性能的关键。

在微观上,可以认为所有固体接触表面都具有粗糙度,并且多数工程中的接触表面通常遵循高斯分布<sup>[24]</sup>。有研究表明,运用叠加的三角函数构建粗糙的表面更加接近实际表面,并且正弦形的微凸体在有限元接触模拟中表现出更好的适应性<sup>[18]</sup>。因此,本文选用叠加的三角函数构建粗糙表面,其数学表达式为:

$$f(x,y) =$$

$$\sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N g(m,n) \cos[2\pi(mx+ny) + \phi(m,n)]$$

式中  $f(x,y)$  表示粗糙表面轮廓的高度;  $x$  和  $y$  是空间坐标;  $m$  和  $n$  是空间频率;  $g(m,n)$  是遵循高斯分布的基本波的振幅;  $\phi(m,n)$  是均匀分布的相位角。图 3 为生成的遵循高斯分布的随机粗糙表面。根据图 3,  $g(m,n)$  是影响表面粗糙度的重要参数之一,  $g(m,n)$  越大,表面粗糙之间的过渡越平滑,粗糙度越小。

基于上述三角函数获取的表面形貌数据,利用 COMSOL 软件构建管接头接触表面形貌数据的三维粗糙表面,之后,基于获得的具有真实粗糙表面的几何模型和管接头接触区域的宏观尺寸,建立了梁式管接头多尺度模型,建模流程如图 4 所示。

在 ANSYS 有限元分析中,定义阳接头为目标几何体,阴接头为接触几何体,对阳接头施加固定约束,  $U_x=U_y=U_z=0$ , 其中  $U$  代表接头在三个自由度中均被固定;阴接头施加位移载荷,  $S_x=S_z=0, S_y=S_0$ , 其中  $S_0$  为常数;在管路内壁施加流体压力,  $p_y=p_z=0, p_x=p_0$ , 其中  $p_0$  为常数;最后对整体管路接头施加温度载荷,  $t=t_0$ , 其中  $t_0$  为常数。

阴、阳接头的材料均采用 304 奥氏体不锈钢,304 不锈钢拥有良好的抗氢脆性能,常用作作为储

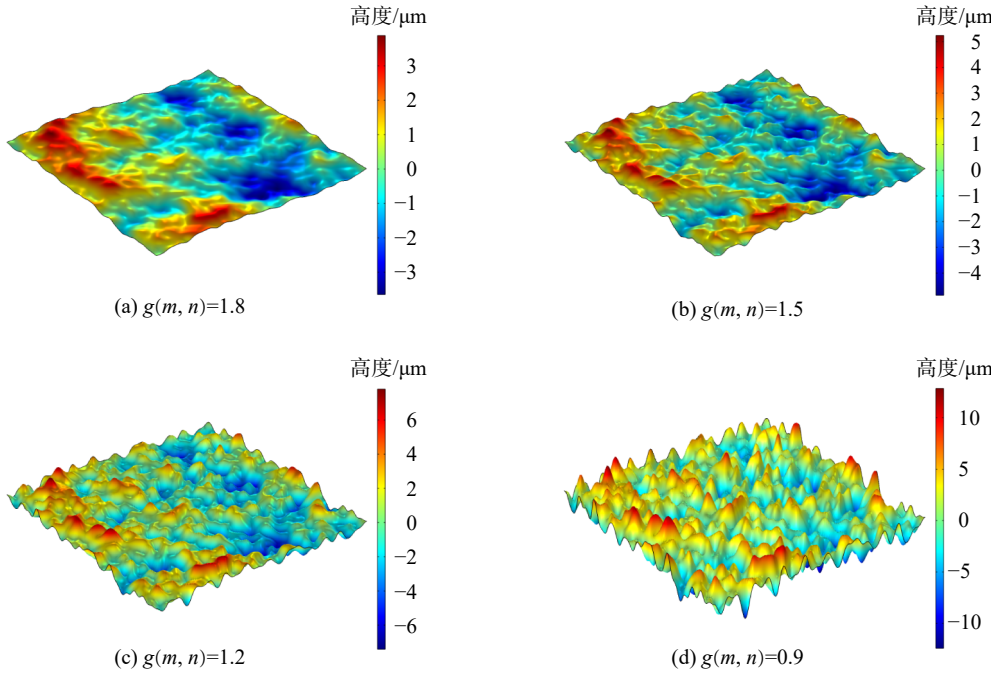


图 3 粗糙表面形貌

Fig. 3 Rough surface topography

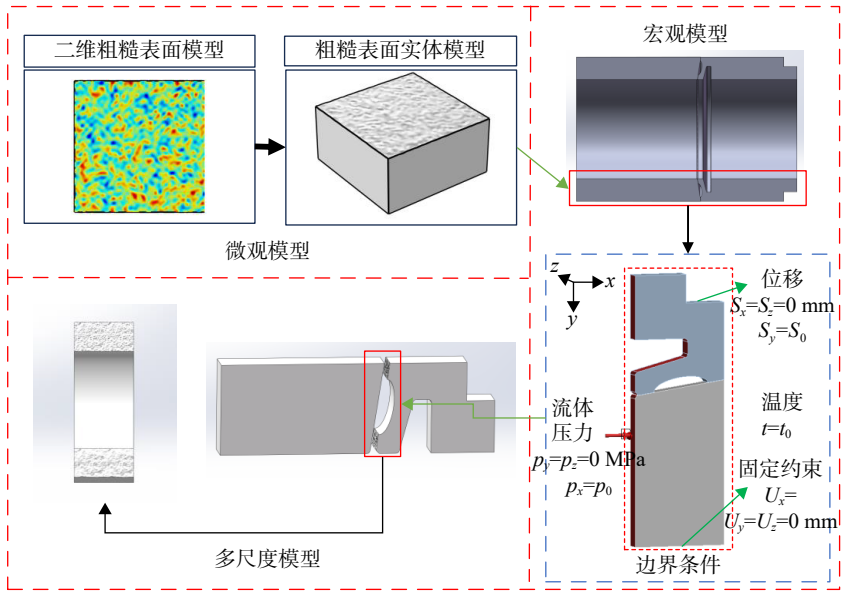


图 4 建模流程图

Fig. 4 Modeling flowchart

氢罐的材料<sup>[25]</sup>,其不同温度下的材料属性如表 2<sup>[26]</sup>所示。根据梁式管接头的实际受力情况,对阳接头施加固定载荷,在阴接头与外套螺母接触区域施加位移约束,同时建立第 2 个分析步,对管路内壁施加流体压力。在有限元计算过程中,通过对分布耦合约束参考点施加轴向位移载荷来模拟预紧力的作用,采用位移载荷是由于施加位移载荷相比施加力载荷使求解过程更易于收敛<sup>[4]</sup>。

表 2 材料参数

Table 2 Material parameters

| 温度/℃ | 密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 弹性模量/GPa | 泊松比   | 屈服强度/MPa |
|------|-------------------------|----------|-------|----------|
| -253 | 7.85                    | 826      | 0.247 | 527      |
| -196 | 7.85                    | 564      | 0.247 | 420      |
| -100 | 7.85                    | 448      | 0.247 | 345      |
| -20  | 7.85                    | 348      | 0.247 | 308      |
| 25   | 7.85                    | 199      | 0.247 | 263      |

梁式管接头多尺度模型采用弹塑性模型的准静态分析和计算,在仿真试验中管路经历塑性变形,因此需要考虑材料的屈服准则。阴接头两道密封表面与阳接头表面设置成接触摩擦对,接触表面之间的摩擦因数设置为 0.1;对多尺度模型进行网格划分,采用接触单元 CONTA174 和目标单元 TARGE170 完成接触模拟,CONTA174 是 8 节点的高阶四边形单元,更加适合具有粗糙表面模型的接触分析,其余部分选择 SOLID185 单元。

根据梁式管接头中心对称的结构特点,分析模型时选取梁式管接头模型中一部分,因为取用的是很小的一部分,所以将圆弧简化为直线。有限元模型如图 5 所示。

在分析接头的密封性能时,泄漏率是其密封性能的直接定量指标,但是泄漏率的准确获取是以密封界面泄漏微通道的提取和微通道内部密封介质的流动计算为前提,计算成本高。因此,本文选择密封界面的实际接触面积和接触压力的大小和分布情况作为密封性能评价指标。接头不仅要具有足够的实际密封面积,还要确保密

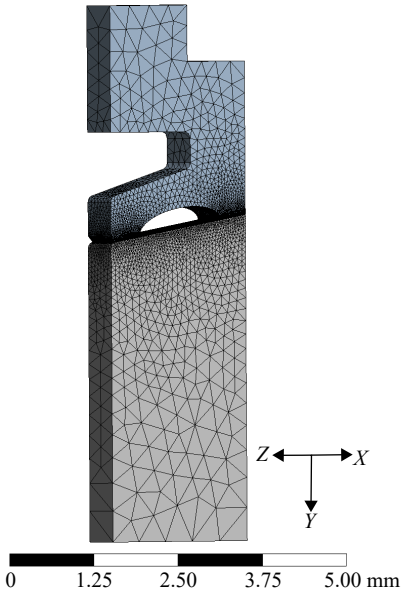


图 5 有限元模型

Fig. 5 Finite element model

封接触压力分布合理,这样才能使管路接头的粗糙表面在接触时能够实现良好的密封效果。在此,基于第一密封和第二密封的密封接触面积比 $\gamma$ (实际接触面积与名义接触面积的比值)和最大接触压力,进行模型网格无关性验证。结果如表3所示。当网格数量超过249 757时,接触压力与实际与名义接触面积比的计算结果趋于稳定。多尺度梁式管接头模型考虑了接触表面的形貌特征,能有效模拟密封界面的接触状态。

1.2 模型有效性验证

为验证有限元模型计算结果的正确性,设计并加工了阴、阳接头的结构模型;试验装置如图6所示,试验由液压缸、阳接头固定件、垫片、

| 表 3 网格无关性验证                            |         |       |            |
|----------------------------------------|---------|-------|------------|
| Table 3 Grid independence verification |         |       |            |
| 网格数量                                   | 接触面积比/% |       | 最大接触压力/MPa |
|                                        | 第一道密封   | 第二道密封 |            |
| 188 053                                | 15.4    | 60.7  | 495.62     |
| 249 757                                | 17.9    | 64.1  | 604.54     |
| 323 623                                | 18.3    | 64.7  | 606.00     |

压力传感器、阴接头与阳接头组成,通过液压缸模拟外套螺母对梁式管接头施加预紧力,通过压力传感器测量施加于梁式管接头的预紧力。为测量密封面上的接触状态与接触压力分布,将高精度的压敏测试胶片放置于阴阳接头配合面中。

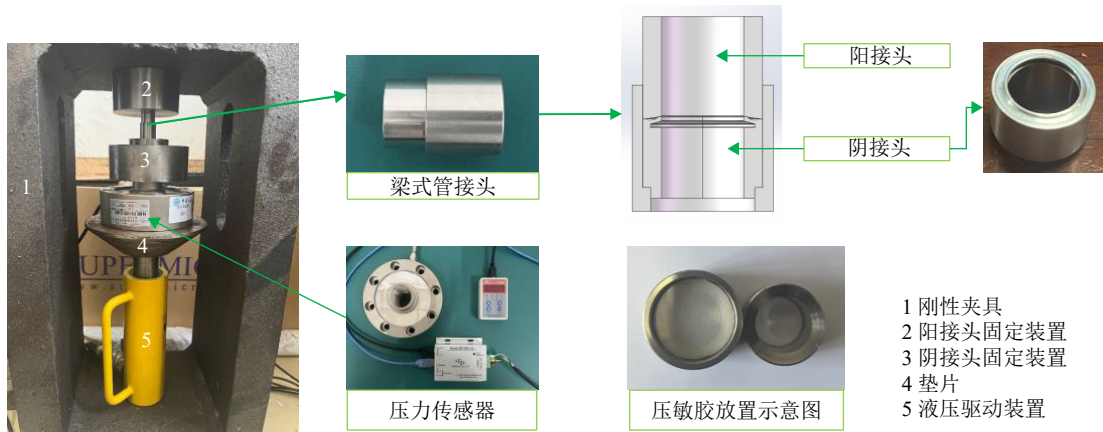


图 6 试验装置图  
Fig. 6 Test device diagram

通过激光共聚焦显微镜(Olympus 4100, 水平分辨率为120 nm, 垂直分辨率为1 nm)测量了阴接头结构件的真实表面形貌和微凸体高度,并计算其表面粗糙度 $R_a$ 。第一道密封表面粗糙度约为1.0,第二道密封表面粗糙度约为0.8;基于高斯分布构建与上述粗糙度相同的多尺度模型进行仿真计算。

试验中分别施加1 000~8 000 N预紧力( $F$ ),观察压敏胶片的颜色变化,颜色越深,接触压力越大,反之接触压力越小。试验结果如图7所示,红色环状代表其两道密封的接触区域。在预紧力较低时,图中第一道密封未能完全形成有效密封,这是由于装配偏差与误差产生的影响;随着预紧力的增大,压敏胶片上逐渐出现两道红色环状区域。

基于Matlab平台通过自编程序提取上述压敏胶片上的两道红色环状接触区域,获得不同预紧力下两道密封的接触区域大小,将其结果与试

验结果进行对比,如图8所示。图中可以看出有限元结果与试验结果趋势相似,在所考察的预紧力范围内,两道密封的仿真结果与试验结果最大误差为10%左右,数据吻合较好,验证了本文采用的多尺度模型的正确性。

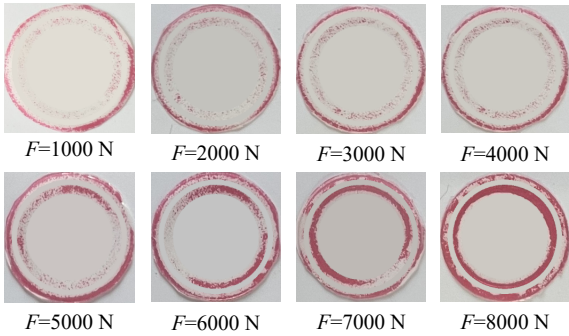


图 7 不同预紧力下压敏胶片显示结果  
Fig. 7 Results of pressure-sensitive films under different preload forces

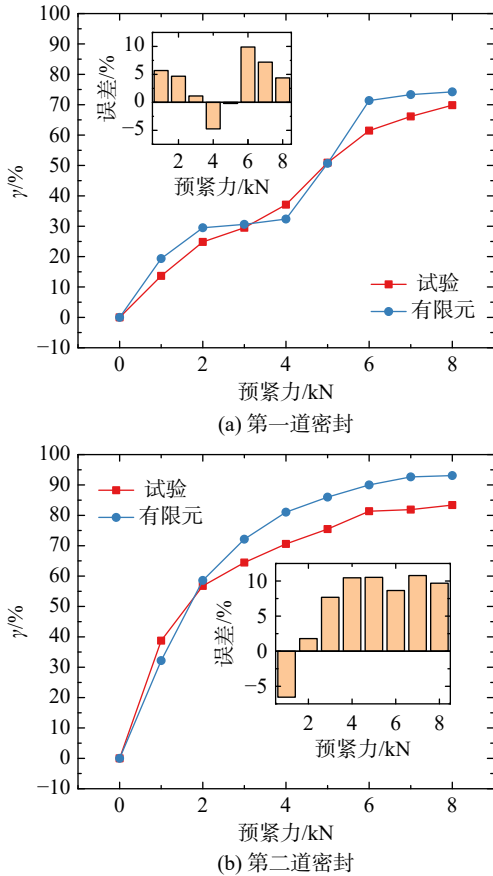


图 8 两道密封试验结果与有限元计算结果的对比

Fig. 8 Comparison of the results of the two sealing experiments with the results of the finite element calculations

## 2 梁式管接头自密封性影响因素分析

本节采用提出的多尺度有限元模型,考察预紧力、介质温度和介质压力这 3 个因素对梁式管接头自密封效应的影响。

### 2.1 预紧力对自密封性的影响

为分析轴向预紧力对梁式管接头的自密封性能的影响,轴向预紧力用位移载荷模拟,对工况环境为 25 ℃,流体压力为 0 MPa 下的梁式管接头进行有限元分析。图 9 为不同位移载荷( $S$ )下的密封界面接触压力云图,图 10 为不同位移载荷下密封界面接触面积比和平均接触压力的变化情况。从图 9 和图 10 中可以看出,随着位移载荷的增加,第一道密封和第二道密封的接触面积比与接触压力都在逐渐增加,这表明密封性能逐渐增强,说明在合理预紧力范围内,增加预紧力有利于提高梁式管接头的密封性能。

由图 9 可知,随着位移载荷的增加,第一道密封的接触区域在管路外壁侧集中,极端情况下可能引起第一道密封的管路内壁侧密封区域发生分离。由图 10 可知,无论是接触面积比 $\gamma$ 还是平均接触压力大小及变化速度,第二道密封都高于第一道密封,这是由于轴向预紧力增加的过程中,密封梁的自密封效应开始凸显,作为悬臂端的第

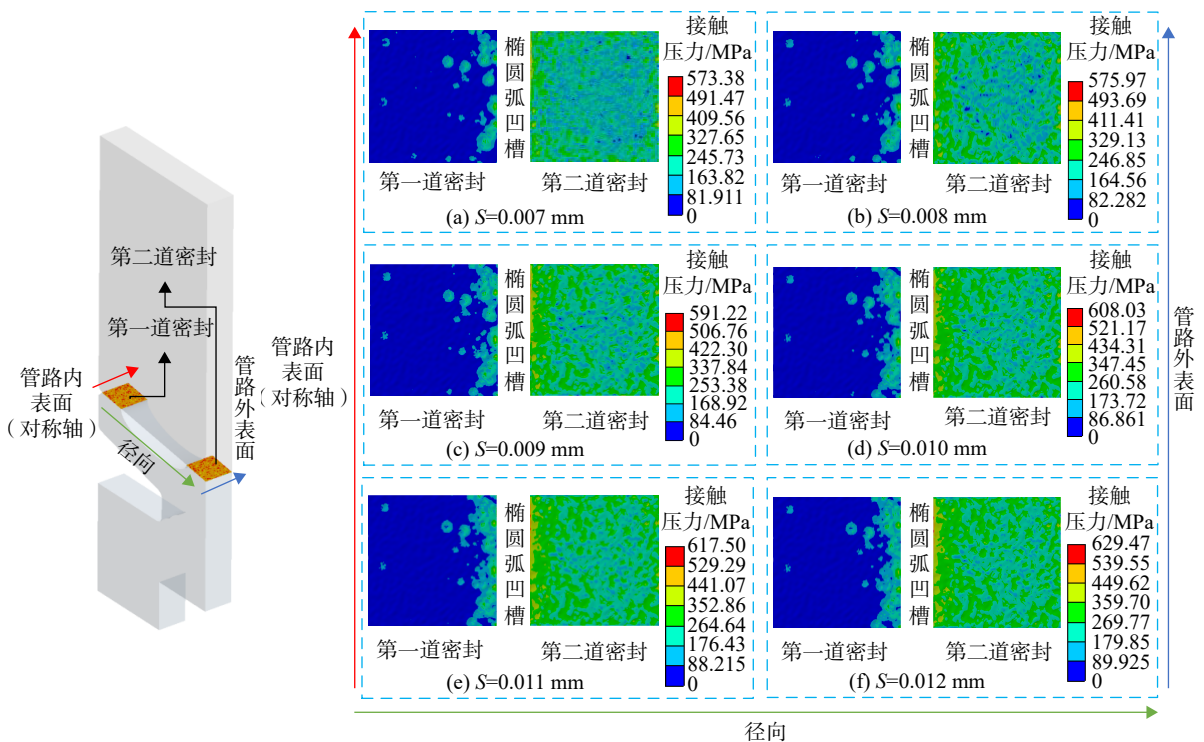


图 9 不同位移载荷下两道密封接触压力云图

Fig. 9 Contact pressure contour of the two seals under different displacement loads

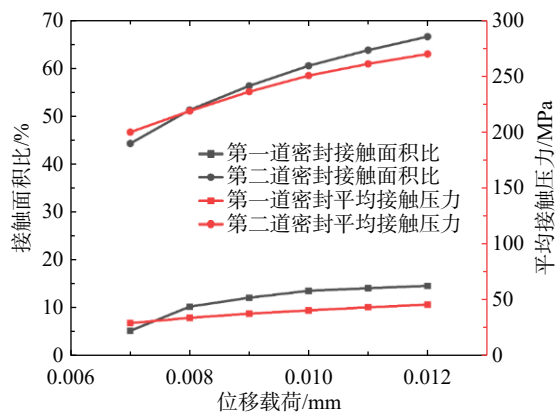


图 10 不同位移载荷下两道密封的接触面积比和平均接触压力

Fig. 10 Contact area ratio and average contact pressure of two seals under different displacement loads

一道密封因受到来自密封界面的横向接触合力作用而发生翘曲,导致第一道密封的管路内壁侧密封接触区域发生分离,接触压力降为零,也正是由于自密封效应导致的第一道密封在管路内壁侧的接触分离趋势,使得第一道密封的实际接触面

积、平均接触压力的大小和增加速度不如第二道密封。从密封的角度来看,第一道密封管路外壁侧的接触区域和接触压力都增加,这一变化能够在第一道密封的管路外壁侧有效抑制泄漏微通道的产生,有利于其密封性能的提高,即,自密封效应能够提高第一道密封的密封性能,进而提高梁式管接头的整体密封性能。

## 2.2 密封介质温度对自封性能的影响

为了探寻温度对梁式管接头自封性能的影响的规律,根据氢的物理性质,选择 25、-20、-100、-196 °C 以及 -253 °C 五种不同的温度( $t$ )情况进行分析。图 11 为位移载荷为 0.012 mm,介质压力为 70 MPa,不同温度下第一道密封与第二道密封的接触压力云图;图 12 为温度对第一道密封的接触面积比和平均接触压力的影响规律;图 13 为温度对第二道密封的接触面积比和平均接触压力的影响规律。由图 11~图 13 可知,随着温度的升高,第一密封的实际接触面积增加,而其平均接触压力降低;第二密封的实际接触面积略微增

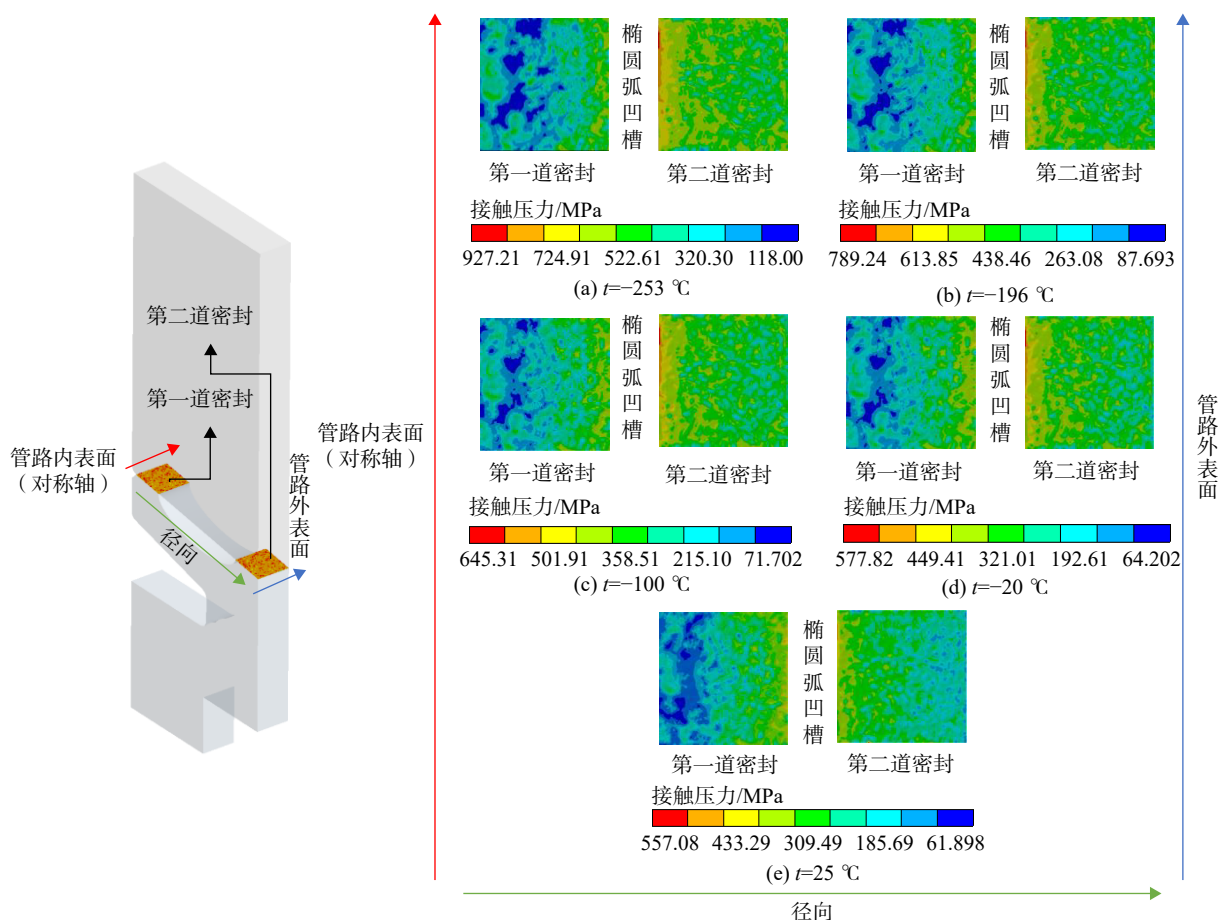
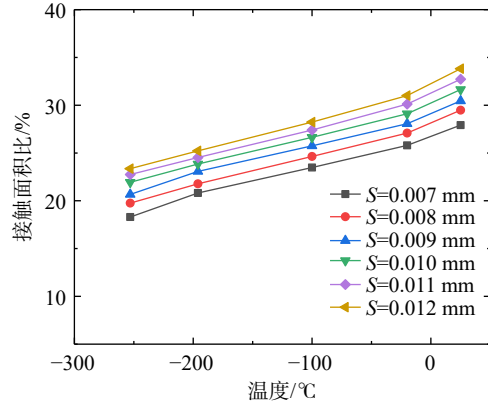
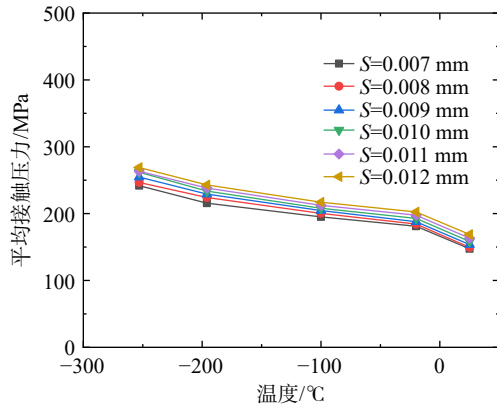


图 11 不同温度下两道密封接触压力云图

Fig. 11 Contact pressure contour of two seals under different temperatures



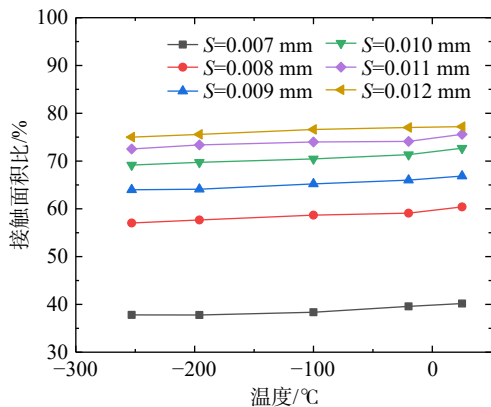
(a) 接触面积比



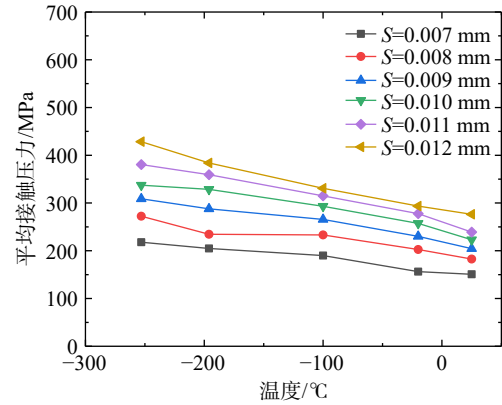
(b) 平均接触压力

图 12 第一道密封的接触面积比和平均接触压力  
(介质压力为 70 MPa)Fig. 12 Contact area ratio and average contact pressure of  
the first seal (medium pressure 70 MPa)

加, 平均接触压力降低。此外, 如图 11 所示, 第一道密封的接触区和高压区都位于椭圆弧槽附近, 接触压力沿径向向内逐渐减小, 类似地, 第二道密封的高压区域也出现在椭圆弧凹槽附近, 表现出径向向外的压力降低。这是由于随着密封介质温度升高, 材料的弹性模量降低(表 2), 在相同载荷条件下材料应变更大, 这导致密封表面的实际



(a) 接触面积比



(b) 平均接触压力

图 13 第二道密封的接触面积比和平均接触压力  
(介质压力为 70 MPa)Fig. 13 Contact area ratio and average contact pressure of  
the second seal (medium pressure 70 MPa)

接触面积增加、平均接触压力降低。总体而言, 在所考察的密封介质温度范围内, 并未见到密封性的明显效果, 第一道密封和第二道密封的密封性能没有较大变化, 梁式管接头的整体密封性能在宽温域条件下表现出较好的稳定性。

### 2.3 密封介质压力对自密封性能的影响

由于阴接头存在 U 形结构, 可能会导致流动损失, 于颖嘉<sup>[27]</sup>应用 ANSYS 对管路内部流场进行分析, 结果显示, 与主流压力相比较, 无论是顺流还是逆流, 流体的流动损失均可忽略不计, 因此本文将管路内部氢气压力以均布载荷的方式施加于梁式管接头内壁。考虑到氢所处的高压环境, 为了明确氢气压力对梁式管接头自密封性能的影响, 本文分别选择压力为 10、20、30、40、50、60 MPa 以及 70 MPa 这 7 种不同的密封介质压力  $p_{\text{seal}}$  进行梁式管接头密封性能分析。图 14 为位移载荷  $S=0.012$  mm、环境温度为  $-253$  °C 下, 不同密封介质压力下第一道密封和第二道密封的接触压力云图。图 15 为不同介质压力对第一道密封平均接触压力与接触面积比的影响规律。图 16 为不同介质压力对第二道密封平均接触压力与接触面积比的影响规律。

图 14 和图 15 表明, 介质压力对第一道密封的实际接触面积的大小和分布、接触压力的大小和分布都有显著影响, 随着介质压力的升高, 第一道密封接触区域的实际接触面积和平均接触压力都呈现增加的趋势; 在低介质压力时, 实际接触区域和高压力区主要集中在密封界面上靠近椭

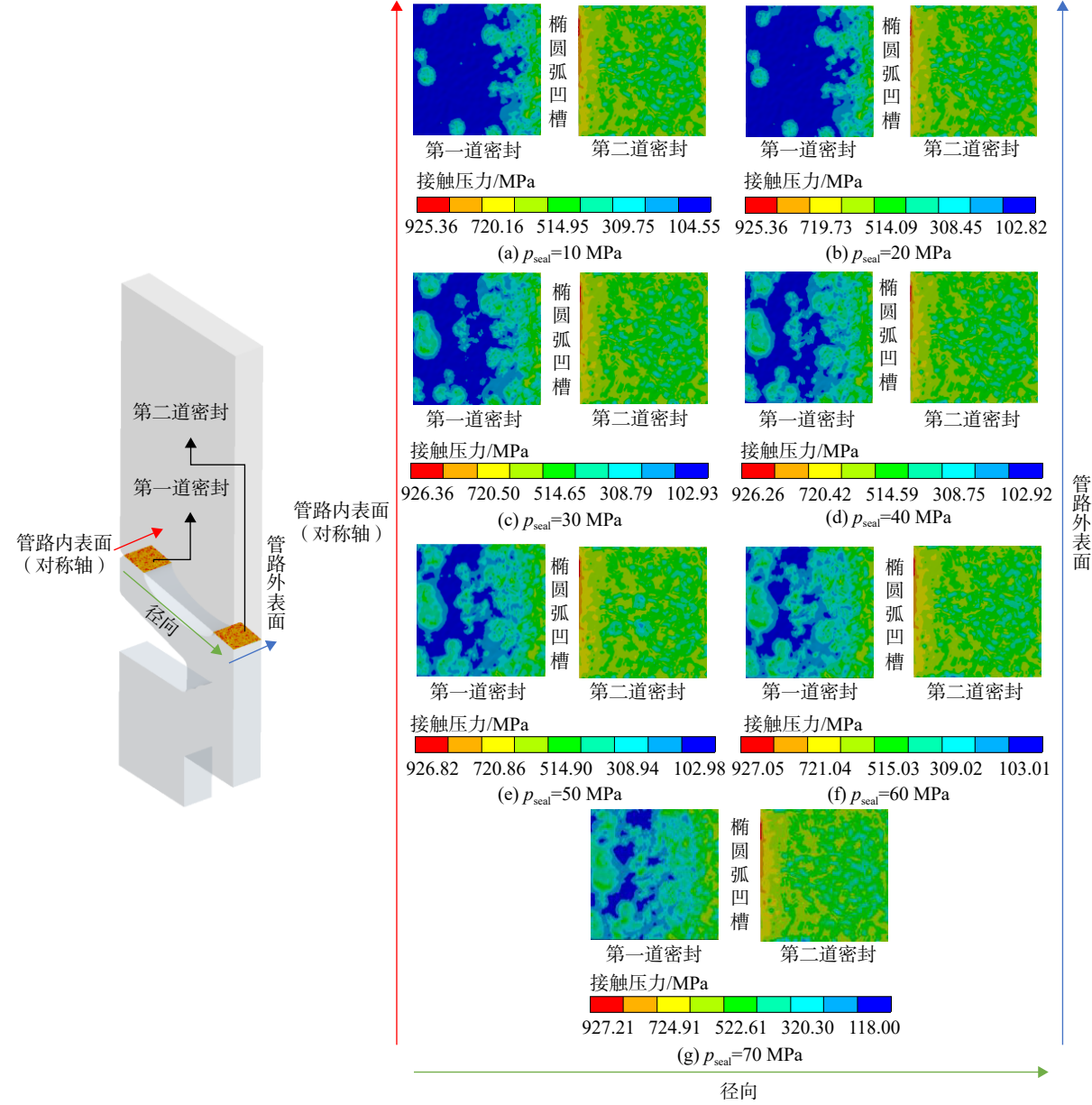


图 14 不同密封介质压力下密封接触压力云图

Fig. 14 Contact pressure contour of the two seals under different sealing medium pressures

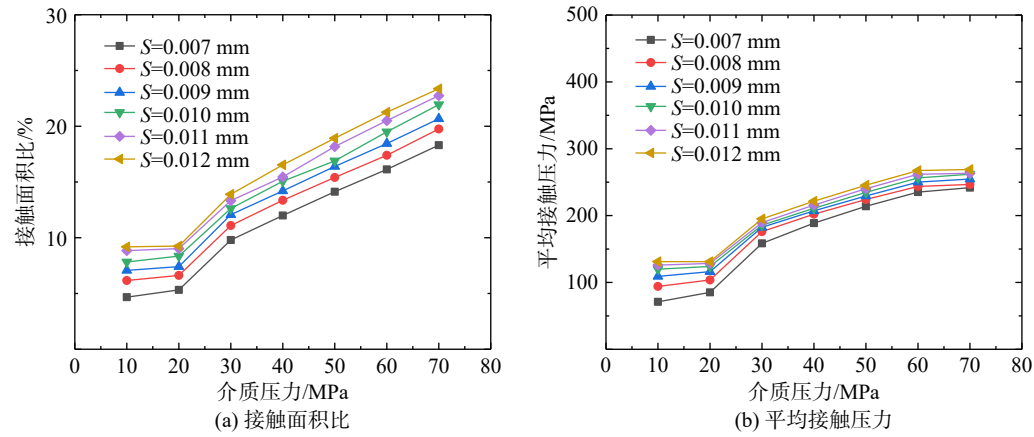


图 15 第一道密封的接触面积比和平均接触压力(介质温度为-253 ℃)

Fig. 15 Contact area ratio and average contact pressure of the first seal (medium temperature -253 ℃)

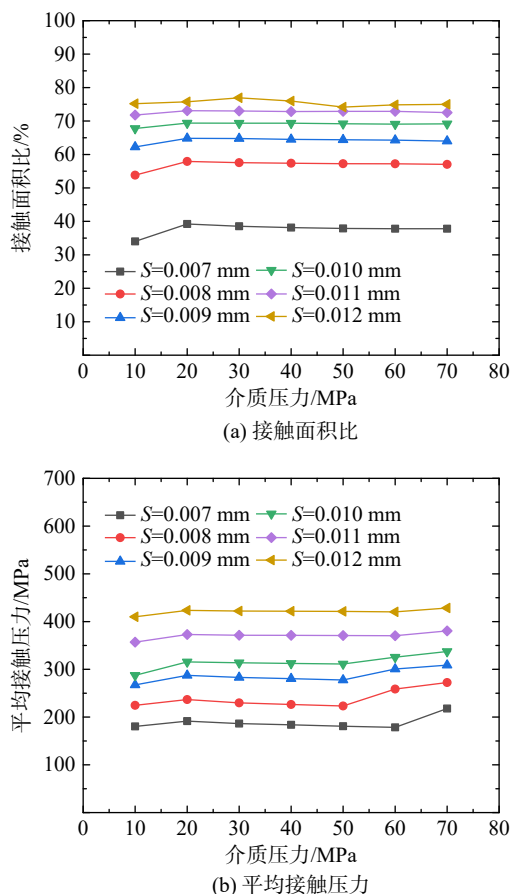


图 16 第二道密封的接触面积比和平均接触压力(介质温度为 $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 16 Contact area ratio and average contact pressure of the second seal (medium temperature  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

圆弧凹槽一侧的区域,随着密封介质压力的升高,实际接触区域朝远离椭圆弧凹槽的方向扩展(沿管接头径向),实际接触区域的分布逐渐均匀。图 14 和图 16 表明,介质压力对第二道密封的实际接触面积和接触压力并没有明显的影响,随着介质压力的增加,第二道密封的实际接触面积和平均接触压力变化都较为平缓。

介质压力会在梁式管接头的 U 形槽内产生与预紧力方向一致的轴向载荷,该附加轴向载荷直接作用在密封梁上,导致密封梁发生翘曲变形现象,管接头的自密封性发挥作用。密封梁的翘曲变形引起第一道密封和第二道密封的实际接触区域和高压力区出现在各自靠近椭圆弧凹槽一侧的位置,同时附加载荷也加强了第一道密封的接触压力,使得第一道密封的实际接触面积和接触压力增加,分布也更加均匀。综上,增加介质压力,梁式管接头的自密封性能得到了增强,从而提高了其整体密封性能。

### 3 结 论

本文建立了包含密封表面形貌的梁式管接头多尺度有限元模型,基于该模型,研究了输氢管路的高压宽温域工况特点对梁式管接头自密封特性的影响,得出以下结论:

1) 根据密封表面上的应力分布可知,接触应力呈现出不连续、不规则的随机分布特点,表明表面形貌对密封界面接触状态的影响不可忽视,相较于不考虑密封表面形貌特征的管接头模型,本文所提出的多尺度有限元模型能够更加有效地反映密封性能的变化规律。

2) 轴向预紧力的增加使密封梁的翘曲变形加剧,自密封效应凸显,导致第一道密封的实际接触区域和高应力区集中在密封界面的椭圆弧凹槽附近,第一道密封的密封性能得到提高,进而提高梁式管接头的整体密封性能。

3) 密封介质温度对梁式管接头的自密封效应无显著影响,梁式管接头的整体密封性能在宽温域条件下表现出较好的稳定性。

4) 随着密封介质压力的增加,梁式管接头的自密封效果显著增强,使得第一道密封的实际接触面积和平均接触压力显著增加,梁式管接头的整体密封性能得到大幅度提升,表明梁式管接头对于高压密封介质环境的良好适应性。

综上所述,梁式管接头的自密封性主要体现在第一道密封上,随着预紧力和介质压力的提高,密封梁产生的自密封性使得第一道密封的密封性能得到有效提升,而密封介质温度对自密封效应的影响并不明显,表明了梁式管接头在宽温域环境下的稳定性和高压环境下的适应性。下一步可考虑开展在实际输氢管路条件下针对梁式管接头密封性能的试验研究,进一步验证梁式管接头对于航空输氢管路的适用性。

### 参考文献:

- [1] Yan Yangyang, Chai Mengjiang. Sealing failure and fretting fatigue behavior of fittings induced by pipeline vibration[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 136: 105602.
- [2] 欧阳小平, 方旭, 朱莹, 等. 航空液压管接头综述[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(16): 2262-2271.  
Ouyang Xiaoping, Fang Xu, Zhu Ying, et al. Overview of aviation hydraulic fittings[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(16): 2262-2271. (in Chinese)
- [3] 崔颖, 王大伟, 于颖嘉, 等. 形状记忆合金梁式管接头密封性能数值研究[J]. *航空动力学报*, 2023, 38(3): 513-521.  
Cui Ying, Wang Dawei, Yu Yingjia, et al. Numerical study on

- sealing performance of shape memory alloy beam pipe joint[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2023, 38(3): 513-521. (in Chinese)
- [4] 崔颖, 于颖嘉, 王永亮, 等. 一种梁式管接头密封性能与结构参数敏感性分析[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(3): 147-155.  
Cui Ying, Yu Yingjia, Wang Yongliang, et al. Sealing performance and sensitivity analysis of structure parameters for a new beam seal[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(3): 147-155. (in Chinese)
- [5] Jeon J Y, Kim B T. A study on contact characteristics by the geometry variation of beam seal fitting of an aircraft fuel hose[J]. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 2013, 12(6): 101-108.
- [6] 刘勇, 任新江, 闫方超. 梁式管接头结构的稳健性优化设计[J]. *航空动力学报*, 2024, 39(10): 20220868.  
Liu Yong, Ren Xinjiang, Yan Fangchao. Structural robust optimization design of beam seal[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2024, 39(10): 20220868. (in Chinese)
- [7] 周池楼. 140 MPa 高压氢气环境材料力学性能测试装置研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.  
Zhou Chilou. Research on material mechanics properties testing equipment in 140 MPa high-pressure hydrogen environment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)
- [8] Kambhammettu S K S, Deshpande A P, Chebolu L R. A compressible porous media model to estimate fluid leak through a metal-elastomer interface[J]. *Transport in Porous Media*, 2021, 136(1): 191-215.
- [9] Huang De, Yan Xiang, Larsson R, et al. Numerical simulation of static seal contact mechanics including hydrostatic load at the contacting interface[J]. *Lubricants*, 2021, 9(1): 1.
- [10] Zhang Jie, Xie Jingxuan. Investigation of static and dynamic seal performances of a rubber O-ring[J]. *Journal of Tribology*, 2018, 140(4): 042202.
- [11] Greenwood J A, Williamson J B P. Contact of nominally flat surfaces[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1966, 295(1442): 300-319.
- [12] Zhu Hua, Ge Shirong, Huang Xiaolong, et al. Experimental study on the characterization of worn surface topography with characteristic roughness parameter[J]. *Wear*, 2003, 255(1/2/3/4/5/6): 309-314.
- [13] Zhao Zhifang, Han Hongzheng, Wang Pengfei, et al. An improved model for meshing characteristics analysis of spur gears considering fractal surface contact and friction[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 158: 104219.
- [14] Lan Guosheng, Sun Wan, Zhang Xueliang, et al. A three-dimensional fractal model of the normal contact characteristics of two contacting rough surfaces[J]. *AIP Advances*, 2021, 11(5): 055023.
- [15] Yuan Yuan, Xu Kuo, Zhao Ke. A fractal model of contact between rough surfaces for a complete loading-unloading process[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020, 234(14): 2923-2935.
- [16] 陈志, 蔡垚, 顾灿鸿. 基于分形理论的机械密封干摩擦时端面接触特性的研究[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(3): 188-196.  
Chen Zhi, Cai Yao, Gu Canhong. Study on contact characteristics of end-face in the mechanical seals under dry operating condition based on fractal theory[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(3): 188-196. (in Chinese)
- [17] Liu Yong, Guo Haodong, Chen Zhiying, et al. A fractal contact model for rough surfaces considering the variation of critical asperity levels[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 2022(1): 2985674.
- [18] Zhang S, Song H, Sandfeld S, et al. Discrete greenwood-williamson modeling of rough surface contact accounting for three-dimensional sinusoidal asperities and asperity interaction[J]. *Journal of Tribology*, 2019, 141(12): 121401.
- [19] Jiang Jinxi, Zhang Hong, Ji Beilei, et al. Numerical investigation on sealing performance of drainage pipeline inspection gauge crossing pipeline elbows[J]. *Energy Science & Engineering*, 2021, 9(10): 1858-1871.
- [20] Zhou Fan, Dong Xinliang, Jiang Wenchun, et al. Contact mechanical behavior and leakage prediction of metal lenticular gaskets in bolt flange joints of ultrahigh pressure pipelines[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2023, 206: 105038.
- [21] 闫洋洋, 庄保顺, 高培鑫, 等. 航空管路接头密封特性及流体温度影响[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(11): 2414-2422.  
Yan Yangyang, Zhuang Baoshun, Gao Peixin, et al. Sealing characteristics of aviation pipeline joints and influence of fluid temperature[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(11): 2414-2422. (in Chinese)
- [22] SAE. Fitting end, external thread, beam seal, design standard: AS4207[S]. [S.I.]: SAE International, 1992.
- [23] SAE. Fitting end assembly, internal thread, retained nut, beam seal, design standard: AS4209A[S]. [S.I.]: SAE International, 1995.
- [24] Siddappa P G, Tariq A. Contact area and thermal conductance estimation based on the actual surface roughness measurement[J]. *Tribology International*, 2020, 148: 106358.
- [25] Lee W J, Lee J Y, Oh S K, et al. Temperature dependency of hydrogen embrittlement resistance of austenitic Fe-24Mn-3Cr-0.5Cu-0.47C steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 889: 145838.
- [26] Zheng Chengsi, Yu Wangwei. Effect of low-temperature on mechanical behavior for an AISI 304 austenitic stainless steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 710: 359-365.
- [27] 于颖嘉. 梁式管接头密封泄漏机理与结构优化设计[D]. 辽宁 大连: 大连海事大学, 2022.  
Yu Yingjia. Leakage mechanism and structural optimization design of beam seal[D]. Dalian, Liaoning: Dalian Maritime University, 2022. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)