

DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2023.08.024

文献引用: 寸文渊,王博雅,钱进,等.振动环境下飞机管路密封性能影响分析[J].润滑与密封,2023,48(8):181-187.

Cite as: CUN Wenyuan, WANG Boya, QIAN Jin, et al. Influence analysis of aircraft pipeline sealing performance under vibration environment [J]. Lubrication Engineering, 2023, 48(8): 181-187.

## 振动环境下飞机管路密封性能影响分析\*

寸文渊<sup>1</sup> 王博雅<sup>1</sup> 钱进<sup>2</sup> 张杰毅<sup>2</sup> 李栎森<sup>1</sup> 陈果<sup>3</sup>

(1. 成都飞机工业(集团)有限责任公司 四川成都 610092; 2. 南京航空航天大学民航学院 江苏南京 210016; 3. 南京航空航天大学通用航空与飞行学院 江苏溧阳 213300)

摘要: 为解决实际工况中飞机管路密封性能问题,根据扩口式液压管路连接件的结构特点,考虑连接件接触对的多重接触关系,建立飞机管路连接件多体接触有限元模型,提出保证扩口式管路连接件基本密封性能的密封闭环、有效密封面积以及有效密封比压3个主要密封准则。利用有限元软件 ANSYS /Workbench 分析振动工况对管路密封性能的影响规律,探讨管路密封性能的变化过程、振动载荷作用点与载荷幅值对管路密封性能的影响。结果表明:在振动工况作用下管路连接件外套螺母将逐渐产生松动,进而导致管路连接件的密封性能发生衰退;随着振动周期的增加,外套螺母的松动角度越来越大;当振幅相同时,载荷作用点离螺纹连接副越近,管路连接件密封性能衰退速度越快;当载荷作用点相同时,振幅越大,管路连接件密封性能衰退速度越快。为减少振动工况对管路密封性能的影响,应尽量使管路连接件远离振动激励源并降低振动载荷的幅值,实际工程应用中一般通过打保险丝来减缓管路连接件密封性能的衰退过程。

关键词: 管路连接件; 密封准则; 密封性能; 振动环境; 液压管路

中图分类号: TB42

## Influence Analysis of Aircraft Pipeline Sealing Performance under Vibration Environment

CUN Wenyuan<sup>1</sup> WANG Boya<sup>1</sup> QIAN Jin<sup>2</sup> ZHANG Jieyi<sup>2</sup> LI Lisen<sup>1</sup> CHEN Guo<sup>3</sup>

(1. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Company Ltd., Chengdu Sichuan 610092, China; 2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China; 3. College of General Aviation and Flight, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Liyang Jiangsu 213300, China)

**Abstract:** To solve the problem of sealing performance in aircraft pipeline under actual working conditions, a multi-body contact finite element model of aircraft pipeline connection was established based on the structural characteristics of the expanded hydraulic pipeline connector and considering the multiple contact relationships of the connector contact pairs. Three main sealing criteria were proposed to ensure the basic sealing performance of the expanded pipeline connector, including the sealing closed loop, effective sealing area, and effective sealing pressure ratio. Using finite element simulation software ANSYS/Workbench, the variation process of pipeline sealing performance under vibration working conditions and the influence of vibration load location and amplitude on pipeline sealing performance were analyzed. The results show that the outer nut of the pipeline connector will gradually become loose under vibration conditions, leading to the degradation of pipeline sealing performance. As the vibration period increases, the loosening angle of the outer nut increases. When the amplitude of vibration load is the same, the closer the vibration load location is to the threaded connection pair, the faster the sealing performance of the pipeline connection decreases. When the vibration load location is the same, the larger the amplitude of

\* 基金项目: 国家科技重大专项 (2017-IV-0008-0045); 国家自然科学基金项目 (51675263)

收稿日期: 2022-05-09; 修回日期: 2022-05-25

作者简介: 寸文渊 (1988—), 男, 研究员, 研究方向为管路可靠性。E-mail: dcunwenyuan@126.com。

vibration load ,the faster the degradation rate of the pipeline sealing performance.To reduce the impact of vibration on pipe-line sealing performance ,the pipeline connector should be kept away from vibration excitation sources as far as possible , and the amplitude of vibration load should be reduced.In practical engineering applications ,the deterioration process of pipeline connection sealing performance is generally mitigated by blowing fuses.

**Keywords:** piping connections; sealing criteria; sealing performance; vibration environment; hydraulic pipeline

管路系统之于飞机犹如人体的“血管”，将燃油、液压油、滑油以及空气等飞行所需流体介质输送给飞机各元部件，在飞机各种错综复杂且庞大的系统体系中起着无可替代的连接作用。飞机管路连接件由于自身结构紧凑而复杂，容易成为液压管路系统的薄弱环节。在振动工况较为严峻的液压附件舱和发动机舱，液压导管的渗漏与破裂问题尤为突出。由此可见，振动工况是造成液压管路系统故障频发的一个不可忽视的因素。

目前，国内外学者对振动环境下飞机管道密封性能进行了广泛的研究。冉光斌和张方晓<sup>[1]</sup>研究了锥角及锥角差大小对双锥型管路连接件密封性能的影响，并提出了有限元仿真与多目标优化相结合的管路连接件稳健设计方法。周鑫等人<sup>[2]</sup>围绕单锥面密封中的球头-锥面密封结构做了非线性接触分析、装配偏差影响分析、密封状态的力学分析以及泄漏率的定量分析。MURTAGIAN 等<sup>[3]</sup>研究了静态金属-金属密封的有效性，包括接触压力和接触长度、载荷历史和密封介质的使用；同时进行了锥面密封试验，并根据试验结果制定了密封性能标准。王小刚<sup>[4]</sup>结合 ANSYS 非线性分析与二阶响应面设计理论，对比分析了锥头锥孔及球头锥孔 2 种管路连接件的密封影响因素及密封性能。王振兴等<sup>[5]</sup>基于刚体假设分析了拉伸载荷作用下无扩口式管接头的密封机制，通过有限元软件 ANSYS 建立相应的多体接触弹性模型并进行了验证。何勃<sup>[6]</sup>针对管路连接件进行了载荷包络线有限元仿真及试验研究、密封性能敏感性分析及密封失效概率计算等多方面的研究。於为刚<sup>[7]</sup>提出了一种基于一类支持向量机的管路装配应力检测技术，并通过管路装配应力试验数据验证了该检测技术的可靠性。

对于外部环境影响下，特别是振动工况下管路连接件出现密封性能退化的原因还需要进一步探究，管路密封性能的变化过程、振动载荷作用点与载荷幅值对管路密封性能的影响，还需要通过仿真与试验进行系统研究。本文作者针对振动环境下飞机液压管路连接件的密封特性进行仿真研究，获取振动对管道密封性能的影响规律，对于有效减少管路系统的泄漏故障，提高管路系统的可靠性有着极其重要的理论研究意义与工程实用价值。

## 1 管路连接件有限元建模

### 1.1 三维实体模型

扩口式管路连接件作为飞机液压系统中应用最为广泛的管路连接件，根据实际工程应用中的结构尺寸建立扩口式管路连接件的三维实体模型是进行后续有限元分析的先决条件。文中选取第 1 尺寸系列  $d_0 = 10$  mm 的管路连接件进行研究分析，扩口导管的扩口角度为  $37^\circ$ ，对应的管接头与外套螺母连接螺旋副规格为 M18×1.5。管路连接件的各个零件都是航空标准件，在航空器的设计、制造以及服役维护中，可以在航空标准中查找各零件的所有信息。第 1 尺寸系列  $d_0 = 10$  mm 的管路连接件尺寸相关参考标准信息如表 1 所示。

根据表 1 中的信息，通过 CAD 软件 CATIA 建立管路连接件各零件的三维模型如图 1 所示。其中，扩口导管管长为 800 mm。

表 1 第 1 尺寸系列  $d_0 = 10$  mm 的管路连接件尺寸标准  
Table 1 Dimensional standards for pipe connections of the 1st dimensional series  $d_0 = 10$  mm

名称	标准
管接头	HB 4-4-2002
扩口管	HB 4-52-2002
平管嘴	HB 4-44-2002
外套螺母	HB 4-45-2002

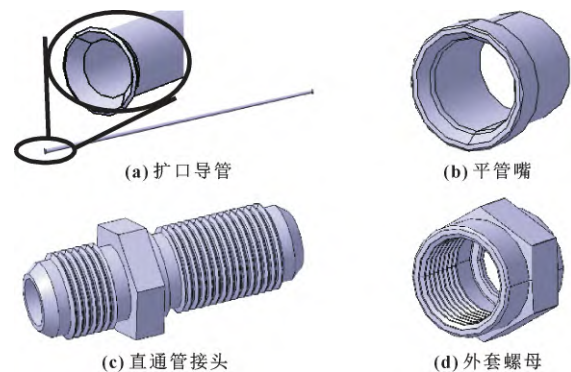


图 1 第 1 尺寸系列  $d_0 = 10$  mm 的管路连接件各零件三维模型  
Fig. 1 3D model of each part of the pipe connection of the 1st size series  $d_0 = 10$  mm: (a) flared catheter; (b) flat nozzle; (c) straight pipe joint; (d) outer nut

将各零件按相关标准规定进行装配, 装配完成后的管路连接件如图 2 所示。

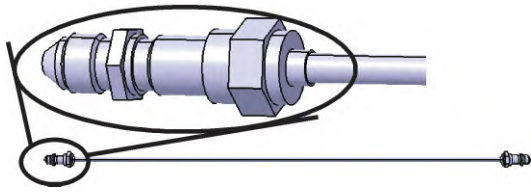


图 2 第 1 尺寸系列  $d_0 = 10$  mm 的管路连接件装配示意  
Fig. 2 Schematic of the assembly of the pipe connection of the 1st size series  $d_0 = 10$  mm

表 2 扩口式管路连接件各零件材料的力学性能参数

Table 2 Mechanical property parameters of each part material of flare type pipe connection

零件种类	零件材料	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E / \text{GPa}$	泊松比	屈服极限 $\sigma_s / \text{MPa}$	强度极限 $\sigma_b / \text{MPa}$
扩口导管	5A02	2 680	70	0.32	98	205.3
平管嘴	45 钢	7 810	200.1	0.269	355	696.6
外套螺母	2A12	2 800	71	0.3	314	610
直通管接头						

选取参与密封的直通管接头较长端进行扩口式管路连接件有限元建模, 符合真实螺旋副结构特征的管路连接件完整三维模型如图 3 所示, 图 3 (a) 为 CAD 模型, 图 3 (b) 为有限元模型。考虑到振动加载迭代求解的复杂性, 在保证计算求解精度的前提下对模型接触部位以及螺纹接触对进行合理网格细化, 其他对计算影响不大的部位划分较为稀疏的网格。网格无关性验证得出, 模型单元数为 178 610, 节点数为 408 209。

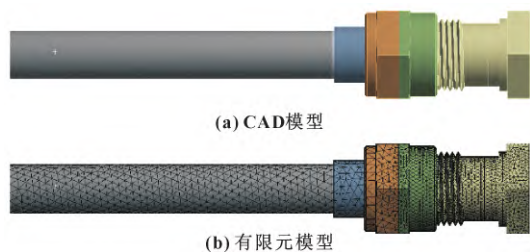


图 3 完整三维模型

Fig. 3 Complete 3D model: (a) CAD model; (b) finite element model

扩口式管路连接件各零件之间共有 5 对接触对, 分别是: ①扩口导管直管部分与平管嘴的圆柱形接触对; ②平管嘴与外套螺母的圆环形接触对; ③扩口导管扩口外锥面与平管嘴头部内锥面形成的接触对; ④

扩口式管路连接件各零件所用材料的静力力学性能参数如表 2 所示。扩口导管所用的材料是 5A02 铝合金, 平管嘴所用的材料是 45 钢, 外套螺母以及直通管接头所用的材料是 2A12 铝合金。

### 1.2 Workbench 有限元建模

对管路连接件导入有限元软件 Workbench 进行 5A02、45 钢以及 2A12 材料属性设置。由于密封对表面粗糙度属于表面形貌特征, 较难引入有限元计算, 故用摩擦因数代替<sup>[8]</sup>。振动工况对管路连接件应力应变场的影响是全局性的, 采用符合真实管路连接件结构特征的三维有限元模型进行分析。

扩口导管扩口部内锥面与管接头对应锥面形成的接触对; ⑤外套螺母与管接头之间的螺旋副接触对, 这一接触对由多组内外螺牙接触形成。在 3 种模型中, ①③可以合并为一个接触对, 按硬度大小原则设置硬度较大的平管嘴为 Target Body, 硬度较小的扩口导管为 Contact Body, ②④也按同样原则设置, 接触类型设为摩擦接触。在三维模型中, ⑤号接触对的设置方式与其他接触对相同。通过在直通管接头非接触端施加固定约束, 并在扩口导管与直通管接头内表面施加均布压力载荷模拟管路工作时流体介质的压迫作用; 同时在外套螺母螺纹端端面施加拉力载荷模拟轴向预紧力的预紧作用, 可以得到无装配偏差状态下扩口式管路连接件的工作状态, 如图 4 所示。HB 4-1-2002 《扩口管路连接件通用规范》<sup>[9]</sup> 中规定了导管、管接头和外套螺母中任何一种为铝制品时保证扩口式管路连接件密封性能所要求的最小及最大拧紧力矩, 摩擦因数取 0.2, 利用拧紧力矩与轴向预紧力转换关系式<sup>[10]</sup>得到拧紧力矩与轴向预紧力的值如表 3 所示。

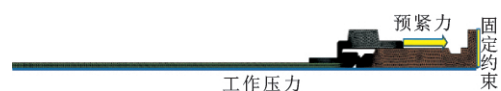


图 4 管路连接件正常工作状态模拟

Fig. 4 Simulation of normal working condition of piping connections

表 3 导管、接头和外套螺母中任何一种为铝制品时第 1 系列  $d_0 = 10 \text{ mm}$  的扩口式管路连接件拧紧力矩要求

Tabel 3 Tightening torque requirements for flared pipe connector of the 1st size series  $d_0 = 10 \text{ mm}$  when any one of the conduits, connectors, and outer nuts is an aluminum product

参数	最小拧紧力矩 $T_{\min}/(\text{N} \cdot \text{m})$	最大拧紧力矩 $T_{\max}/(\text{N} \cdot \text{m})$	最小轴向预紧力 $F_{\min}/\text{kN}$	最大轴向预紧力 $F_{\max}/\text{kN}$
数值	20.60	35.30	5.523	9.464

振动工况的加载分为两步, 第一步先对管接头自由端施加固定约束同时对外套螺母施加 Bolt Pretension, 模拟管路连接件的预紧状态; 第二步在扩口导管自由端施加径向振动载荷, 模拟振动工况。Bolt Pretension 在第一步中加载至目标预紧力值后通过 Lock 功能即可锁住, 方便后续振动载荷施加。振动工况的加载方式示意图如图 5 所示。



图 5 振动工况加载示意

Fig. 5 Vibration loading

## 2 管路连接件密封机制与准则

### 2.1 金属-金属密封机制

典型金属-金属密封形成过程如图 6 所示, 当 2 个硬度不同的金属材料表面发生接触时, 在逐渐增大的接触压力作用下, 硬度较低材料的表面会先发生塑性微变形, 填补 2 个接触面之间的缝隙, 来达到密封的效果。密封接触对表面越光滑, 即表面粗糙度越低, 接触对接触表面之间的微间隙越小, 那么达到规定密封性能所需的接触挤压力也越小, 装配时需要施加在扩口管路连接件上的拧紧力矩也越小。

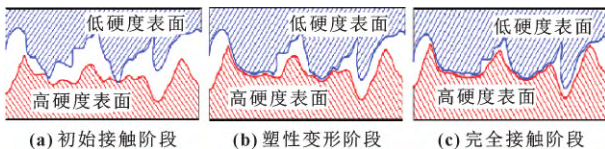


图 6 金属-金属密封的微观过程

Fig. 6 Microscopic processes in metal-to-metal sealing:

(a) initial contact stage; (b) plastic deformation stage; (c) full contact phase

### 2.2 密封准则

根据扩口式管路连接件的密封机制, 结合其结构特性和材料特性, 可以得到保证扩口式管路连接件基本密封性能的 3 个主要密封准则<sup>[11]</sup>:

(a) 密封闭环: 由于扩口式管路连接件密封接触面为一对锥面, 当发生塑性微变形的密封接触区域在密封接触面上形成一完整立体环形时, 可以认为此时塑性微变形填补了密封接触区域中沿周向各处的接触间隙, 阻断了可能的泄漏路径, 称这一立体环形接触区域为密封闭环。为了提高密封可靠性, 需要使密封闭环具有一定宽度, 这个宽度称为密封面宽。

(b) 有效密封面积: 将发生塑性微变形的密封接触区域称为有效密封区域, 该区域的面积大小称为有效密封面积。在实际生产制造过程中, 由于材料缺陷、加工工艺、表面处理及装配质量等因素影响, 扩口式管路连接件密封接触对表面不可避免地会存在一些微小的缺陷<sup>[12]</sup>, 进而导致密封闭环的宽度分布不均。此时, 在最小密封面宽相等的情况下, 有效密封面积越大, 则扩口式管路连接件的密封效果越好。

(c) 有效密封比压: 有效密封比压是有效密封面上的接触挤压力与有效密封面积的比值, 其为矢量, 方向垂直于有效密封区域, 有效密封比压的大小为有效密封区域的接触应力均值。

管路连接件密封准则的具体量化受材料和结构尺寸的影响颇大, 冉光斌和张方晓<sup>[1]</sup>通过理论与仿真分析给出了管径 3 mm 时保证双锥型管路连接件密封性能的密封准则: 最小密封面宽的值应大于 1.6~2.4 mm, 同时有效密封比压应大于较软材料屈服强度的 2 倍。对于密封面宽, 丁建春等<sup>[13]</sup>通过仿真与试验探究了某型球头-接管嘴式管接头在不同导管管径下需要的密封面宽: 管径在 12 mm 及以下时, 密封面宽取 1 mm 左右较为合理, 管径在 14~32 mm 时, 密封面宽取 0.5 mm 左右较为合理。

### 2.3 密封区域接触参量提取

在加载求解结束后, 便可以进行计算结果的后处理分析。保证扩口式管路连接件基本密封性能的 3 个主要密封准则为密封闭环、有效密封面积及有效密封比压, 在有限元分析中, 可以通过后处理分析提取密封区域内对应的 3 个量化指标: 密封面宽、有效密封面积及有效密封接触应力均值, 称这 3 个指标为密封接触参量。

密封接触参量提取流程如图 7 所示。在二维模型中, 因为接触为线接触, 所以提取的单元面积即为单元长度, 将单元长度累加即可得到密封面宽; 有效密

封面则需要提取单元径向坐标最小值及最大值并结合锥面面积公式积分求得; 有效密封比压为累积接触应力值与单元数量之比。在三维模型中, 密封面宽为单元数量与密封面环向单元数之比, 由于会出现密封面宽大小分布不均的情况, 所以取密封面宽最小值; 每个参与密封的单元的面积累加起来就是有效密封面积; 有效密封比压为累积接触应力值与单元数量之比。

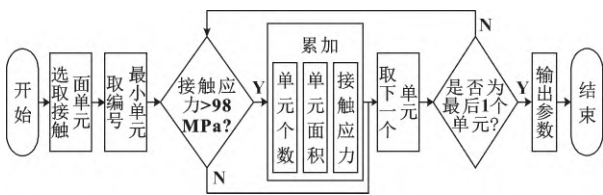


图7 密封面接触参数提取流程

Fig. 7 Flow of seal surface contact parameters extraction

### 3 振动工况对管路密封性能的影响分析

#### 3.1 振动工况下管路密封性能的变化过程

在飞机服役过程中, 由于液压管路系统的工作环境较为恶劣, 振动工况无法避免<sup>[14]</sup>。下文将首先通过仿真分析振动工况下管路密封性能的变化过程, 接着探究振动载荷作用点与振动载荷幅值对管路密封性能的影响规律。

分析振动工况对管路连接件密封性能的影响需要涉及螺纹接触面之间的配合状态, 不管是简化了螺纹连接副的模型<sup>[1]</sup>, 还是简化了螺纹升角的模型<sup>[5]</sup>, 都无法精准模拟振动工况下管路连接件螺纹连接副的松动过程, 因此, 文中采用符合真实管路连接件结构特征的三维有限元模型进行仿真分析, 如图8所示。



图8 带螺纹升角的管路连接件三维有限元模型

Fig. 8 Three-dimensional finite element model of piping connections with thread lift angle

选取扩口导管长度为 100 mm, 通过对导管自由端端面施加周期性径向位移载荷来模拟振动工况, 载荷幅值为 1 mm。由于有限元模型单元节点数量庞大, 求解需要庞大的计算机资源, 因此, 可以通过对一定振动周期内管路密封性能的变化过程进行分析来把握

振动工况对管路密封性能的影响规律。摩擦因数为 0.18, 拧紧力矩大小为 20.60 N·m 时 12 个振动周期内扩口式管路连接件轴向预紧力以及 3 种密封接触参量的变化规律如图 9 所示。

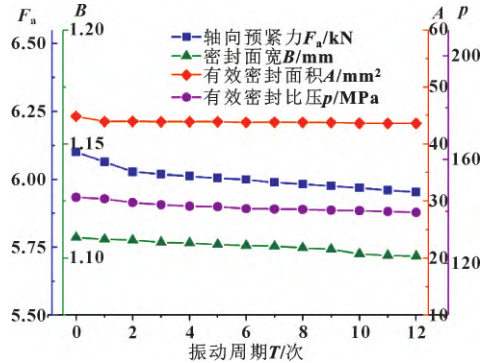


图9 12个振动周期内轴向预紧力及3种密封接触参量变化曲线

Fig. 9 Change curves of axial preload force and three seal contact parameters during 12 vibration cycles

从图9中可以看出, 随着振动载荷的持续作用, 轴向预紧力、密封面宽、有效密封面积及有效密封比压都在减小。其中, 轴向预紧力由原来的 6 099 N 衰减至 5 953 N, 衰减率为 2.4%; 密封面宽在 12 个振动周期之后仍然大于 1.1 mm, 可以认为, 在 12 个振动周期之后, 管路连接件依然保持着足够的密封可靠性。

在 Workbench 后处理中通过定义柱坐标系及 User Defined Result 可以提取外套螺母的角位移。提取所得的 12 个振动周期内外套螺母角位移变化曲线如图 10 所示。可以看出, 随着振动周期的增加, 外套螺母的松动角度越来越大, 在 12 个振动周期之后, 外套螺母的松动角度累积至 0.35°。

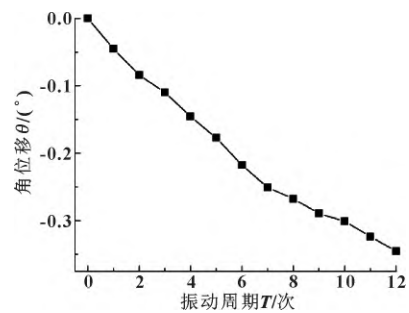


图10 12个振动周期内外套螺母角位移变化曲线

Fig. 10 Variation curve of angular displacement of jacket nut in 12 vibration cycles

通过以上分析可知,振动工况会使螺纹接触面逐渐发生滑移,导致外套螺母发生松动。由于扩口式管路连接件的结构特点,装配完成后整个管路连接件的预紧力由外套螺母与管接头之间的螺纹连接副提供,因此,外套螺母的松动将直接导致管路连接件的预紧力发生衰退,进而影响管路连接件的密封性能。振动工况下管路连接件密封性能的衰退过程虽然缓慢,但是下降趋势明显,因此,在满足计算机资源要求的情况下,计算到一定周期之后,可以观察到外套螺母完全松动,进而导致管路密封失效的现象。在实际工程应用中,一般通过打保险丝来减缓管路连接件密封性能的衰退过程。

### 3.2 振动载荷作用点与载荷幅值对管路密封性能的影响分析

在管路系统中,不同位置的振动激励源由于传递路径不同,会对同一管路连接件产生不同影响;同时,同一振动激励源所传递的振动载荷幅值不同,对管路连接件的影响也不同。文中设置振动载荷作用点分别为扩口导管中部和扩口导管尾端,振动载荷位移幅值分别为 1 和 0.5 mm,探究振动载荷作用点与振动载荷幅值对管路密封性能的影响规律。

选取轴向预紧力及外套螺母松动角度作为主要指标即可反映不同振动因素对管路密封性能的影响。摩擦因数为 0.18,拧紧力矩大小为 20.60 N·m 时,不同振动载荷作用点与载荷幅值下 12 个振动周期内扩口式管路连接件轴向预紧力和外套螺母松动角度变化规律,分别如图 11 和图 12 所示。

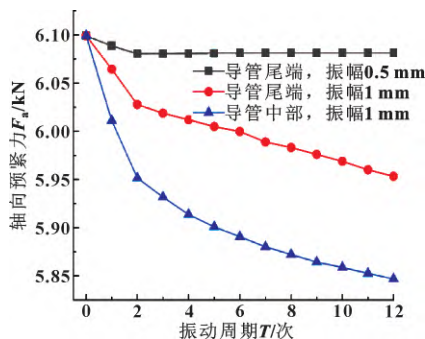


图 11 不同振动载荷作用点与振幅下轴向预紧力变化曲线  
Fig. 11 Variation curves of axial preload force at different vibration load points and amplitudes

从图 11、12 中可以看出,振幅相同时,载荷作用点离螺纹连接副越近,则轴向预紧力衰退速度与外套螺母松动速度越快,进而将导致管路连接件

密封性能衰退速度越快。这是因为当激励源距离螺纹连接副越远,其传递路径越长,振动衰减越大,对螺纹连接副的影响越轻。同时,当载荷作用点相同时,振幅越大,轴向预紧力衰退速度与外套螺母松动速度越快,进而将导致管路连接件密封性能衰退速度越快。这是因为振幅越大,激励源输出的能量越大,对螺纹连接副的影响也越大。总的来说,在实际应用中,为减少振动工况对管路密封性能的影响,应尽量使管路连接件远离振动激励源并降低振动载荷的幅值。

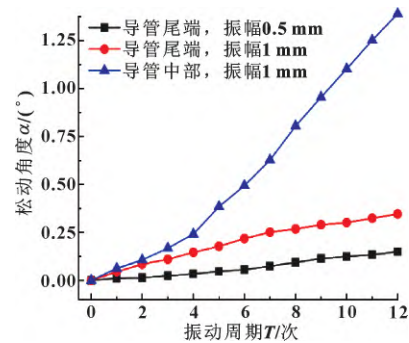


图 12 不同振动载荷作用点与振幅下外套螺母松动角度变化曲线

Fig. 12 Variation curves of loosening angle of jacket nut under different vibration load action point and amplitude

## 4 结论

(1) 通过建立带有螺旋副的管路连接件模型,使仿真结果与实际管路更加贴近,在工程应用中有重要参考价值。

(2) 振动工况会使螺纹接触面逐渐发生滑移,导致外套螺母发生松动。随着振动周期的增加,外套螺母的松动角度越来越大,在 12 个振动周期之后,轴向预紧力衰退率为 2.4%,外套螺母的松动角度累积至 0.35°。外套螺母的松动将直接导致管路连接件的预紧力发生衰退,进而影响管路连接件的密封性能,实际工程应用中一般通过打保险丝来减缓管路连接件密封性能的衰退过程。

(3) 不同位置的振动激励源由于传递路径不同,会对同一管路连接件产生不同影响,同时,同一振动激励源所传递的振动载荷幅值不同,对管路连接件的影响也不同。振幅相同时,载荷作用点离螺纹连接副越近,管路连接件密封性能衰退速度越快;同时,当载荷作用点相同时,振幅越大,管路连接件密封性能衰退速度越快。

## 参考文献

- [1] 冉光斌, 张方晓. 双锥形管接头密封管路联接结构的稳健设计[J]. 润滑与密封, 2008, 33(5): 88-90.  
RAN G B, ZHANG F X. Robust design method of the sealing pipeline joint structure with double-cone pipe union[J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(5): 88-90.
- [2] 周鑫, 庞贺伟, 刘宏阳. 球面密封结构密封状态的力学分析及验证[J]. 中国空间科学技术, 2007, 27(2): 42-46.  
ZHOU X, PANG H W, LIU H Y. Mechanical analysis and verifying test of sealing situation at orbicular seal joint[J]. Chinese Space Science and Technology, 2007, 27(2): 42-46.
- [3] MURTAGIAN G R, FANELLI V, VILLASANTE J A, et al. Sealability of stationary metal-to-metal seals[J]. Journal of Tribology, 2004, 126(3): 591-596.
- [4] 王小刚. 管路锥形密封结构的稳健设计[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2009.  
WANG X G. Robust design of pipeline cone sealing structure[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2009.
- [5] 王振兴, 邱明星, 王建军. 拉伸载荷下管路连接副的密封性分析[J]. 航空动力学报, 2011, 26(8): 1866-1870.  
WANG Z X, QIU M X, WANG J J. Sealing performance of pipeline connection under the tensile load[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(8): 1866-1870.
- [6] 何勃. 管路接头密封可靠性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.  
HE B. Sealing reliability study for pipe joint[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.
- [7] 於为刚. 装配应力对飞机管路密封性能的影响分析及其检测方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.  
YU W G. Analysis of influence of assembly stress on aircraft pipeline sealing performance and its detection method[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [8] 董云开, 刘莹, 温诗铸. 微观摩擦与表面形貌相关性的试验研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(6): 542-545.  
DONG Y K, LIU Y, WEN S Z. Experimental study on relation between micro friction and surface topography[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(6): 542-545.
- [9] 中国航空综合技术研究所. 扩口管路连接件通用规范: HB 4-1—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [10] 夏芝玮, 樊新田, 赵旭升, 等. 基于有限元计算代理的飞机液压系统管路密封性能评估[J]. 润滑与密封, 2021, 46(12): 147-156.  
XIA Z W, FAN X T, ZHAO X S, et al. Evaluation of pipeline sealing performance of aircraft hydraulic system based on finite element calculation agent[J]. Lubrication Engineering, 2021, 46(12): 147-156.
- [11] 顾伯勤, 李新华, 田争. 静密封设计技术[M]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [12] 耿志学. 金属对金属密封技术及其在管接头上的应用[J]. 液压气动与密封, 2012, 32(8): 29-30.  
GENG Z X. Metal to metal sealing technique with application to pipe connector[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2012, 32(8): 29-30.
- [13] 丁建春, 王细波, 杨燕, 等. 拧紧力矩对典型管接头密封带宽度影响研究[J]. 强度与环境, 2012, 39(2): 9-13.  
DING J C, WANG X B, YANG Y, et al. Research on the effect of tightening torque to the seal width of a typical pipe tie-in[J]. Structure & Environment Engineering, 2012, 39(2): 9-13.
- [14] 常学森, 白宏伟, 叶枫, 等. 承压输油液压管路振动实验研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(22): 39-43.  
CHANG X S, BAI H W, YE F, et al. Experimental study of hydraulic transmission pipeline vibration under pressure[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(22): 39-43.