

## 装配偏差对飞机液压管路密封性能的影响

赵维涛<sup>1</sup>, 张兴浩<sup>1</sup>, 关勤<sup>2</sup>

(1. 沈阳航空航天大学航空宇航学院, 沈阳 110136; 2. 凌云科技集团有限责任公司, 武汉 430040)

**摘要:** 为了探究装配偏差对管路密封性能的影响, 根据扭拉关系建立有限元模型, 分析3种装配偏差(轴向、径向和角度)单独作用对管路连接件密封性能的影响, 并通过正交试验研究3种装配偏差耦合作用对管路连接件密封性能的影响。结果表明, 单一偏差时, 负轴向偏差、径向偏差和角度偏差均降低管路密封性能; 3种装配偏差耦合时, 密封性能下降, 负轴向偏差和角度偏差对管路密封性能影响显著, 径向偏差影响相对较小。因此, 实际工程中应严格控制负轴向偏差与角度偏差, 尽量减小正轴向偏差和径向偏差。

**关键词:** 飞机液压管路; 装配偏差; 密封性能; 正交试验; 有限元

中图分类号: V215.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1248.2025.06.002

## Influence of assembly deviations on the sealing performance of aircraft hydraulic pipelines

ZHAO Weitao<sup>1</sup>, ZHANG Xinghao<sup>1</sup>, GUAN Qin<sup>2</sup>

(1. College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 2. Lingyun Science and Technology Group Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

**Abstract:** To investigate the influence of assembly deviations on pipeline sealing performance, a finite element model was established based on the torque-tension relationship. The influence of three assembly deviations (axial, radial, and angular) acting individually on the sealing performance of pipeline connectors was analyzed, and the coupling influence of these three assembly deviations on the sealing performance of pipeline connectors was studied through orthogonal experiment. The results indicate that under single deviation conditions, negative axial deviation, radial deviation, and angular deviation all reduce pipeline sealing performance. When the three assembly deviations are coupled, the sealing performance decreases. Negative axial deviation and angular deviation have significant influences on pipeline sealing performance, while the influence of radial deviation is relatively small. Therefore, in practical engineering, negative axial deviation and angular deviation should be strictly controlled, and positive axial deviation and radial deviation should be minimized as much as possible.

**Key words:** aircraft hydraulic pipelines; assembly deviations; sealing performance; orthogonal experiment; finite element

收稿日期: 2025-01-01 修回日期: 2025-04-10 接受日期: 2025-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(项目编号: 12272240); 辽宁省教育厅面上项目(项目编号: JYTMS20230224)。

作者简介: 赵维涛(1977—), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士, 主要研究方向为结构强度与可靠性, E-mail: zhwt201@163.com。

飞机液压管路遍布于飞机的各个位置,通过在管道内部运输高压油液来保障飞机各元器件的正常使用和安全飞行,因此液压管路既是飞机的动力源,也是飞机的生命线<sup>[1]</sup>。管路系统由管接头、导管组件、支架和卡箍等组成,其中管接头是管路系统密封失效的频发区域,管路一旦发生泄漏,轻则影响介质的正常运送,重则会引起致命故障,因此开展管接头密封性能的研究具有重要的意义<sup>[2]</sup>。

寸文渊等<sup>[3]</sup>和 Yan 等<sup>[4]</sup>研究了振动工况对管路密封性能的影响规律,分析了管件振动的密封失效机理。陈迪等<sup>[5]</sup>通过对二维模型仿真分析,研究了结构参数对密封面的接触应力与密封性能的影响规律。Wenk 等<sup>[6]</sup>采用三维多尺度有限元接触模型来复现结构的实际密封状态,并考虑了弹性体的几何尺寸和表面粗糙度。Deng 等<sup>[7]</sup>研究了不同拧紧力矩下密封界面的微观磨损行为,并通过试验得出了不同液压和拧紧力矩下管接头密封性能的演化规律。丁建春等<sup>[8]</sup>建立了典型管接头拧紧力矩与密封带宽之间的关系,并与试验结果进行了对比。郑世伟等<sup>[9]</sup>研究了安装参数对无扩口导管连接件的密封性能的影响,给出了参考安装力矩。张旭等<sup>[10]</sup>建立了管道连接件模型,提出有效密封的判定条件,并通过静力学仿真分析了多种因素对管接头连接件密封性能的影响规律。杜双言等<sup>[11]</sup>研究了拧紧载荷下管路连接结构密封轴向预紧力形成机理及短期退化对密封性能的影响,并在研究中引入装配偏差的影响。王振兴等<sup>[12]</sup>研究了连接副密封面的接触力、接触面积和接触应力随拉力的变化规律,并定量分析了发动机钛合金管路连接副的密封性能。Stakenborg 等<sup>[13]</sup>利用有限元方法,研究了密封轴的接触问题及温度对接触特性的影响,得到了可靠的密封状态。Zhai 等<sup>[14]</sup>采用有限元法和设计试验,研究了装配偏差和重复装配对 35 MPa 航空管接头密封性能的影响。

实际工程中,装配偏差会影响扩口式管接头的密封性能。虽然已经有学者就装配偏差对扩口式管路连接件密封性能的影响进行了研究,但只考虑了单一装配偏差所造成的影响。在实际工程中,往往是多种偏差共同作用于管接头,进而导致密封性减弱。针对这一问题,本文以航空行业标准 HB 4-52-2002 中第 2 尺寸系列扩口管路连接件作为研究对象,运用有限元软件,通过设计正交试验讨论 3 种装配偏差耦合作用对管路密封性能的影响。

## 1 扩口管路连接件密封机理

### 1.1 连接件结构

扩口式管路连接件由外套螺母、平管嘴、直通管接头及扩口导管等 4 部分组成<sup>[15]</sup>。根据行业标准<sup>[16-18]</sup>,通过 CATIA 建立典型 74° 扩口管路连接件的三维模型,如图 1 所示。

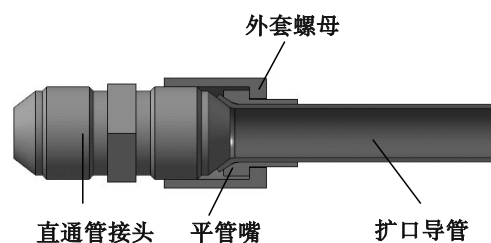


图1 管路连接件的三维模型

### 1.2 密封机理

扩口管路连接件处于正常工作状态时,通过外套螺母与直通管接头的螺纹连接,产生压紧力。压紧力使平管嘴压紧扩口导管的喇叭口锥面与对应的管接头锥面,进而产生密封效果。连接件之间共有 5 对接触面,如图 2 所示,分别为直通管接头与外套螺母之间的螺纹接触面  $A_1$ 、管接头与扩口导管之间的锥形接触面  $A_2$ 、导管与平管嘴之间的锥形接触面  $A_3$ 、平管嘴与螺母之间的圆柱接触面  $A_4$ 、扩口管和管套之间的圆柱接触面  $A_5$ 。装配过程中,螺纹接触面  $A_1$  提供轴向预紧力,使锥形接触面  $A_2$  上产生接触压力,进而实现密封效果。

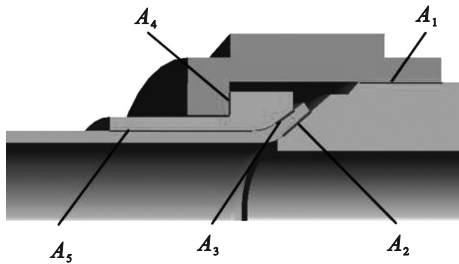


图2 接触面

## 2 装配偏差与密封性准则

### 2.1 装配偏差

导管装配偏差的具体要求<sup>[19]</sup>为:

1) 长度方向偏差(轴向偏差):每100 mm导管偏差不得超过0.3 mm,对每根导管的总长偏差应控制在0.8 mm以内。

2) 径向偏差:导管自由端须与接头或附件管嘴在同一直线上,其偏差按导管每100 mm(从最近的支撑件算起)不超过0.3 mm。

3) 角度偏差:导管自由端须与接头或附件管嘴平行,允许的偏差不得超过2°。

### 2.2 密封性准则

当连接件密封接触面上的接触应力超过扩口导管的屈服极限并形成完整的环形密封面时,则认为形成了有效密封<sup>[20-21]</sup>。

1) 密封面宽:扩口式管接头的密封面为锥形接触面,锥面某点应力大于材料屈服极限时,认为该点发生了塑性形变。当塑性形变区域形成完整的环状密封带时,认为接触面形成了有效密封。在受到装配偏差等因素影响时,环形密封带的宽度不均匀,此时取环形密封带最窄宽度作为密封面宽。丁建春等<sup>[8]</sup>研究表明,通径在12 mm及以下时,密封面宽取1 mm左右较为合理,通径在14~32 mm时,密封面宽取0.5 mm左右较为合理。

2) 有效密封面积:将密封面宽对应的环形密封接触区域称为有效密封区域,该区域的面积为有效密封面积。

3) 密封比压:密封比压为有效密封区域内

的总接触力与有效密封面积的比值,大小为有效密封区域内的平均接触应力。当密封接触对为两种不同硬度材料时,密封比压应保持在较软材料屈服强度的1~3倍<sup>[21]</sup>。

有效密封面积可通过密封面宽计算,二者是线性正相关的,因此选取密封面宽和密封比压作为密封性的评价指标。

## 3 扭拉关系

在拧紧过程中,只有相对滑动的接触面提供与拧紧力矩 $T$ 相平衡的摩擦力矩。根据机械设计手册<sup>[22]</sup>可知,对于螺栓连接,其拧紧力矩 $T$ 用于克服螺纹副的螺纹阻力矩 $T_t$ 及螺母与被连接件支承面间的端面摩擦力矩 $T_n$ ,拧紧力矩的计算公式为

$$T = T_t + T_n = F \tan(\phi + \rho_v) d_n / 2 + F \mu_n r_f \quad (1)$$

式中: $F$ 为轴向预紧力; $\phi$ 为螺纹升角; $\rho_v$ 为螺纹当量摩擦角; $d_n$ 为螺纹中径; $\mu_n$ 为螺母与被连接件的摩擦因数; $r_f$ 为螺母的当量摩擦半径。

$\phi$ 、 $\rho_v$ 和 $r_f$ 的计算公式分别为

$$\phi = \arctan(P/\pi d_n) \quad (2)$$

$$\rho_v = \arctan(\mu_v/\cos \beta) \quad (3)$$

$$r_f = \frac{2(R^3 - r^3)}{3(R^2 - r^2)} \quad (4)$$

式中: $P$ 为螺距; $\mu_v$ 为螺纹摩擦因数; $\beta$ 为螺纹半角; $r$ 和 $R$ 分别为螺母接触区域的内、外半径。

$T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 的计算公式<sup>[23]</sup>分别为

$$T_1 = F \tan(\phi + \rho_v) d_1 / 2 \quad (5)$$

$$T_2 = F \mu_2 r_{f2} / \cos \alpha_2 \quad (6)$$

$$T_3 = F \mu_3 r_{f3} / \cos \alpha_3 \quad (7)$$

$$T_4 = F \mu_4 r_{f4} \quad (8)$$

式中: $T_i$ 为接触面 $A_i$ ( $i=1, 2, 3, 4$ )的摩擦力矩; $d_1$ 为外套螺母与直通管接头之间螺旋副的螺纹中径; $\alpha_2$ 为管接头锥头处锥角的一半; $\alpha_3$ 为平管嘴内锥角的一半; $\mu_i$ ( $i=2, 3, 4$ )为接触面 $A_i$ ( $i=2, 3, 4$ )的摩擦因数; $r_{fi}$ ( $i=2, 3, 4$ )为接触面 $A_i$ ( $i=2, 3, 4$ )的等效半径。

根据熊影辉等<sup>[24]</sup>的研究,与拧紧力矩 $T$ 相

平衡的摩擦力矩为  $T_1$  和  $T_4$ , 则扩口管路连接件的扭拉关系公式为

$$T = T_1 + T_4 \quad (9)$$

将式(1)、(5)和(8)带入式(9)得

$$T = F \left[ \frac{d_1 (P \cos \beta + \mu_1 \pi d_1)}{2(\pi d_1 \cos \beta - P \mu_1)} + \mu_4 r_{f4} \right] \quad (10)$$

$$r_{f4} = \frac{2(R_4^3 - r_4^3)}{3(R_4^2 - r_4^2)} \quad (11)$$

式中:  $r_4$  和  $R_4$  分别为平管嘴和外套螺母接触环的内、外圈半径。

## 4 数值仿真

### 4.1 材料

导管、直通管接头、平管嘴和外套螺母的材料分别为 1Cr18Ni9Ti、2A12、1Cr17Ni2 和 45 钢, 其材料力学属性见文献[25]。

### 4.2 有限元模型

选取第2尺寸系列公称外径为 10 mm 的扩口管路连接件为研究对象, 扩口导管长度取 50 mm。由于导管结构及载荷的对称性, 取 1/2 进行计算。在有限元模型中, 将 5 对接触面均设为摩擦接触。 $A_1$  和  $A_2$  接触面为钢-铝接触, 摩擦因数为 0.17;  $A_3$ 、 $A_4$  和  $A_5$  接触面为钢-钢接触, 摩擦因数为 0.15<sup>[22]</sup>。在直通管接头端面施加固定约束, 在管内表面施加工作压力为 15.2 MPa。

对于公称外径为 10 mm 的扩口管路连接件, 所采用的螺旋副规格<sup>[15]</sup>为 M18×1, 其螺距  $P$  为 1 mm、螺纹中径  $d_1$  为 15.350 mm<sup>[22]</sup>、螺纹半角  $\beta$  为 30°、 $R_4$  为 7.4 mm<sup>[16]</sup>、 $r_4$  为 5.95 mm<sup>[17]</sup>。由式(10)可得,  $F$  为 0.3744  $T$ 。根据 HB 4-1-2002《扩口管路连接件通用规范》<sup>[26]</sup>, 当导管、接头和外套螺母中任何一种为铝制品时, 最小和最大拧紧力矩分别为 31.00 N·m 和 35.00 N·m。因此, 最小和最大轴向预紧力分别为 11 606.4 N 和 13 104 N。拧紧力矩  $T$  越小, 密封性越差, 因此, 取最小拧紧力矩  $T$  进行仿真, 即轴向预紧力  $F$  取 11 606.4 N, 通过在外套螺母螺纹端面施加均匀拉力模拟轴向预紧力的作用。

轴向、径向偏差通过在导管非扩口端面施加位移进行模拟, 角度偏差通过远程位移进行模拟, 其有限元模型如图 3 所示。图 3 中, 取使扩口导管锥面远离管接头锥面的轴向偏差为负值, 使扩口导管锥面靠近管接头锥面的轴向偏差为正值。图 3 中轴向偏差箭头所指方向为负值。

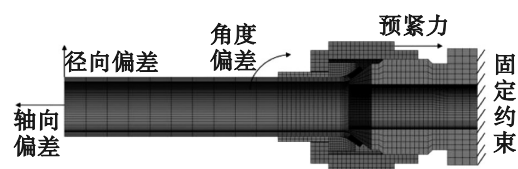


图3 有限元模型

## 4.3 仿真结果

### 4.3.1 接触面压力

有限元模型中导管长为 50 mm, 根据《飞机液压管路系统设计、安装要求》, 最大轴向偏差为 -0.15 mm, 最大径向偏差为 0.15 mm, 最大角度偏差为 2°。通过有限元仿真, 得到无装配偏差的接触面压力分布, 如图 4a 所示; 单独轴向偏差 (-0.15 mm)、单独径向偏差 (0.15 mm) 和单一角度偏差 (2°) 的接触面压力分布分别如图 4b、4c 和 4d 所示。从图 4a 可以看出, 无装配偏差时, 导管内侧形成一条均匀的密封环; 从图 4b 可以看出, 存在轴向偏差时, 密封面宽度和接触面压力均减小; 从图 4c 可以看出, 存在径向偏差时, 密封面宽度变化并不明显, 但所形成的密封环向径向偏差方向偏移, 由圆形密封带变成椭圆形密封带, 且接触面压力略微增加; 从图 4d 可以看出, 存在角度偏差时, 密封面不再是规则的环形密封带, 整个密封带出现了粗细不一的特征, 与旋转方向相反的一端密封面宽度出现了明显减小, 而与旋转方向相同的一端接触面压力出现了明显增大。

### 4.3.2 单一装配偏差对管路密封性的影响

1) 轴向偏差: 不同轴向偏差的密封面宽与密封比压随轴向偏差的变化曲线如图 5a 所示。从图 5a 可以看出, 随着负轴向偏差的增大, 密

封面宽度及密封比压均减小。负轴向偏差越大,代表导管越远离管接头,扩口导管直通管接头密封处接触面处于预分离状态,导管对平

管嘴的作用力抵消掉一部分外套螺母带来的轴向预紧力。

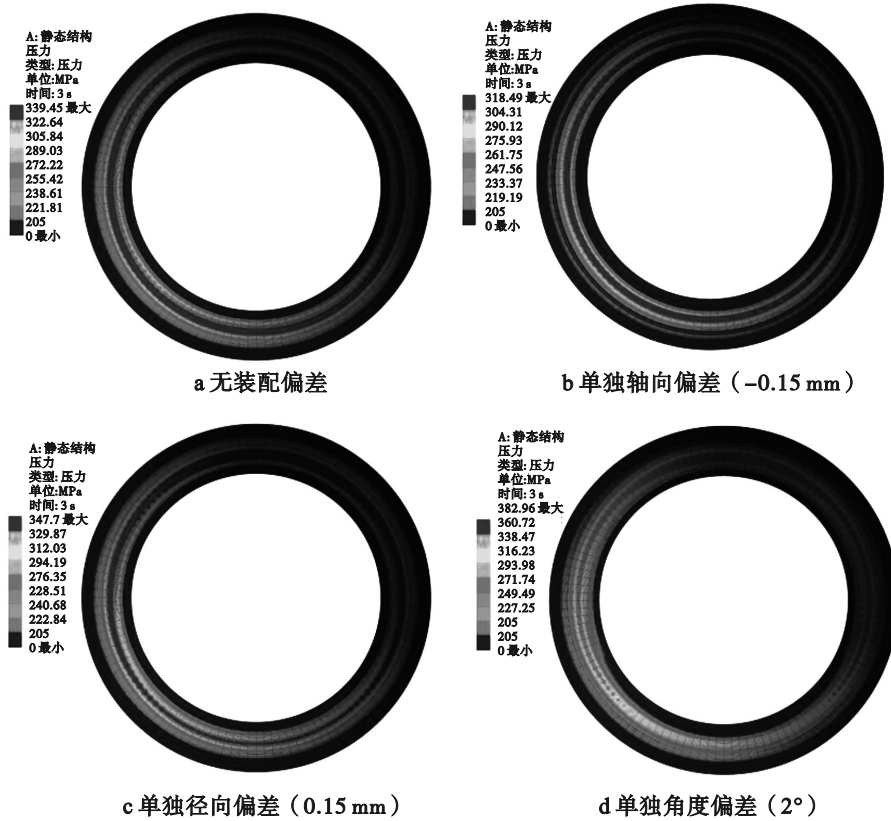


图 4 接触面的压力分布

2) 径向偏差: 径向偏差及角度偏差均具有对称性, 因此不考虑正负。不同径向偏差的密封面宽与密封比压随径向偏差的变化曲线如图 5b 所示。从图 5b 可以看出, 密封面宽随径向偏差增大而减小, 密封比压随径向偏差增大而增大。径向偏差使扩口导管向径向偏差方向被挤压, 导致密封环与径向偏差方向的密封宽度减小的同时, 增大了密封面的接触压力。

3) 角度偏差: 不同角度偏差下的密封面宽与密封比压随角度偏差变化曲线如图 5c 所示。从图 5c 可以看出, 密封面宽随角度偏差增大而减小, 密封比压随角度偏差增大而增大。角度偏差使接头锥面配合处出现夹角, 导致密封比压增大的同时密封面宽度减小。

3 种装配偏差取最大值的密封面宽和密封

比压与无偏差的计算结果如表 1 所示。结合表 1 和图 5 可以看出: 1) 随着负轴向、径向和角度偏差的增大, 密封面宽均减小。当偏差达到标准规定的最大值时, 对比无偏差的密封面宽, 负轴向、径向和角度偏差的密封面宽分别减小 41.56%、4.57% 和 26.17%, 负轴向偏差对密封面宽影响最显著。2) 随着径向偏差和角度偏差的增大, 密封比压增加; 随着负轴向偏差的增大, 密封比压减小。当偏差达到标准规定的最大值时, 相较于无偏差的密封比压, 负轴向偏差、径向偏差和角度偏差的密封比压分别增加 -2.05%、2.32% 和 6.22%, 角度偏差对密封比压影响最显著。

#### 4.3.3 耦合装配偏差对管路密封性的影响

采用  $L_9(3^4)$  正交表, 将影响密封性的 3 种

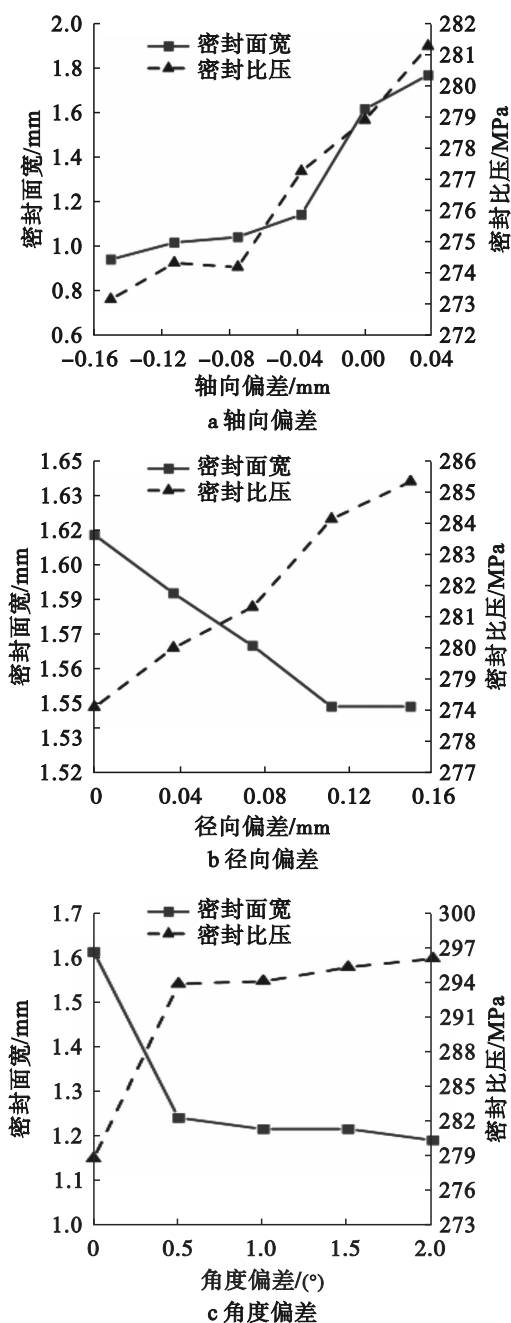


图 5 密封面宽与密封比压的偏差变化曲线

装配偏差以不同大小耦合作用进行正交试验。当轴向偏差为正值时,管接头锥面与扩口导管锥面处于一种预压紧状态,此时轴向偏差对管路密封的影响是积极的,因此只考虑使管路密封性下降的负轴向偏差。正交试验因素及水平如表 2 所示。

不同试验组密封面宽与密封比压变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知,各组密封面宽均

表 1 密封面宽和密封比压的对比

	密封面宽/mm	密封比压/MPa
无偏差	1.617 8	278.907 8
轴向偏差 (-0.15 mm)	0.945 4	273.191 1
径向偏差 (0.15 mm)	1.543 9	285.381 8
角度偏差(2°)	1.194 5	296.248 1

表 2 正交试验因素及水平

水 平	因 素	A	B	C
		轴向/mm	径向/mm	角度/(°)
1		0	0	0
2		-0.075	0.075	1
3		-0.15	0.15	2

小于基准组(第 1 组、无偏差),其中影响最大组为第 5 组,相比基准组密封面宽降低 37%。各组封压比既有大于基准组的又有小于基准组的,主要原因是装配偏差导致密封环上的压力分布不均。

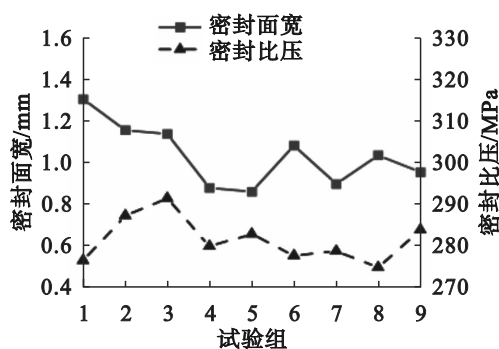


图 6 不同试验组密封面宽与密封比压变化曲线

正交试验与极差分析结果如表 3 所示,空白组作为对照组,用来衡量试验过程中随机误差的大小。 $R$ 为极差,极差越大,说明该因素对试验结果影响越显著。3种因素对密封面宽影响结果依次为  $A > C > B$ ,即最显著的是轴向偏差,其次是角度偏差,影响最小的是径向偏差。3种因素对密封比压的影响结果依次为  $C > A > B$ ,即最显著的是角度偏差,其次是轴向偏差,影响最小的是径向偏差。

表 3 正交试验与极差分析结果

试验编号		A	B	C	D	密封面宽/mm	密封比压/MPa
		轴向偏差	径向偏差	角度偏差	空白		
1		1	1	1	1	1.617 8	278.907 8
2		1	2	2	2	1.418 7	293.388 5
3		1	3	3	3	1.393 6	298.992 0
4		2	1	2	3	1.045 5	283.483 2
5		2	2	3	1	1.020 5	287.428 1
6		2	3	1	2	1.319 8	280.471 1
7		3	1	3	2	1.070 6	281.819 6
8		3	2	1	3	1.257 1	276.699 0
9		3	3	2	1	1.145 7	288.714 8
密封面宽	R	0.348 1	0.054 3	0.236 7	0.037 6		
密封比压	R	7.998 3	7.969 1	10.740 6	1.374 5		

正交试验方差分析的  $F$  值如表 4 所示。对比  $F$  值可知, 3 种装配偏差对密封面宽影响排序为  $A > C > B$ , 即轴向偏差影响最显著, 其次是角度偏差, 径向偏差影响最小。3 种装配偏差对密封比压影响排序为  $C > A > B$ , 即角度偏差影响最显著, 其次是轴向偏差, 径向偏差影响最小。方差分析结论与极差分析结论相同, 即 3 种装配偏差耦合作用时, 轴向偏差和角度偏差对管路密封性能影响显著, 径向偏差影响较小。

表 4 正交试验方差分析的  $F$  值

方差来源	密封面宽	密封比压
A	48.027 4	33.770 2
B	1.377 9	29.396 5
C	22.246 5	65.454 4
D(误差)	1	1

## 5 结论

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种接触, 根据扭拉关系建立有限元模型, 分析单一装配偏差及耦合偏差对管路连接件密封性能的影响规律, 得出的结论如下:

1) 单一装配偏差对管路密封性的影响: 随着负轴向、径向和角度偏差的增大, 密封面宽均减小, 负轴向偏差对密封面宽影响最显著; 随着径向偏差和角度偏差的增大密封比压增加; 随着负轴向偏差的增大密封比压减小, 角度偏差对密封比压的影响最显著。

2) 耦合装配偏差对管路密封性的影响: 装配偏差会导致管路连接件密封面宽减小, 密封性能下降。在 3 种装配偏差中, 轴向偏差与角度偏差对管路密封性影响显著。

3) 正轴向偏差会使得密封面宽和密封比压均增大, 对密封性的影响是积极的。但过大的正轴向偏差会使得密封面的接触压力过大, 可能导致密封组件破坏, 存在安全隐患。

综上, 在实际连接件装配过程中, 在标准规定的范围内, 应严格控制负轴向偏差与角度偏差, 尽量减小正轴向偏差和径向偏差。

### 参考文献 (References):

- [1] 郭昌蔚. 航空管路连接件使用可靠性分析及结构改进研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2021.
- [2] 郭雪杰. 扩口式管路接头密封性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [3] 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.
- [4] Yan Y Y, Chai M J. Sealing failure and fretting fatigue behavior of fittings induced by pipeline vibration [J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 136:105602.
- [5] 陈迪, 杨杰, 李伟刚, 等. 航空扩口导管连接仿真及结构参数研究[J]. *四川轻化工大学学报(自然科学版)*, 2021, 34(4):25-31.
- [6] Wenk J F, Stephens L S, Lattime S B, et al. A multi-scale finite element contact model using measured surface roughness for a radial lip seal [J]. *Tribology International*, 2016, 97:288-301.
- [7] Deng L C, Luo B, Zhang K F, et al. Failure law of hydraulic pipe joints sealing performance under vibration loads [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 166:108906.
- [8] 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.
- [9] 郑世伟, 丁晓, 梁红琴, 等. 无扩口导管拧紧力矩对其密封性能的影响[J]. *润滑与密封*, 2020, 45(5):30-35.
- [10] 张旭, 夏芝玮, 樊新田, 等. 飞机管路连接件装配偏差对密封性影响的仿真分析与试验验证[J]. *润滑与密封*, 2021, 46(8):99-107.
- [11] 杜双言, 张伟, 瞿品祥, 等. 角度误差下管路连接结构装配及其对密封的影响[J]. *润滑与密封*, 2023, 48(6):119-123.
- [12] 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.
- [13] Stakenberg M J L. On the sealing mechanism of radial lip seals [J]. *Tribology International*, 1988, 21(6):335-340.
- [14] Zhai J, Shan M, Li M, et al. Analysis of the influence of assembly deviation and repeated assembly on sealing performance of detachable aviation pipe joint [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2024, 209:105208.
- [15] 国防科学技术工业委员会. 扩口式直通管接头: HB 4-4-2002[S]. 北京:中国航空综合技术研究所, 2002.
- [16] 国防科学技术工业委员会. 平管嘴: HB 4-44-2002[S]. 北京:中国航空综合技术研究所, 2002.
- [17] 国防科学技术工业委员会. 扩口式外套螺母: HB 4-45-2002[S]. 北京:中国航空综合技术研究所, 2002.
- [18] 国防科学技术工业委员会. 导管扩口: HB 4-52-2002[S]. 北京:中国航空综合技术研究所, 2002.
- [19] 国防科学技术工业委员会. 飞机液压管路系统设计、安装要求: GJB 3054-97[S]. 北京:中国航空综合技术研究所, 1997.
- [20] 彭羽. 基于金属密封原理的管道螺纹密封性能研究[D]. 天津:天津商业大学, 2016.
- [21] 张杰毅. 服役环境下飞机液压管路密封及疲劳特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2021.
- [22] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2002.
- [23] Motosh N. Development of design charts for bolts preloaded up to the plastic range [J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1976, 98(3):849-851.
- [24] 熊影辉, 丁晓宇, 刘检华, 等. 扩口式管接头拧紧过程扭拉关系研究[J]. *润滑与密封*, 2017, 42(5):46-52.
- [25] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京:中国标准出版社, 2002.
- [26] 国防科学技术工业委员会. 扩口管路连接件通用规范: HB4-1-2002[S]. 北京:中国航空综合技术研究所, 2002.

(责任编辑:吴萍 英文审校:程蕾)