

引用格式:孙贇娇,王涤非,李京达,等.U形金属密封件的弹性性能和气密性能[J].材料工程,2026,54(9):226-234.

SUN Yunjiao, WANG Difei, LI Jingda, et al. Elastic performance and air-tightness of U-shaped metal seals[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(9): 226-234.

U形金属密封件的弹性性能和气密性能

孙贇娇¹, 王涤非¹, 李京达², 汲辰鑫¹, 吕 军², 李鹏廷^{1*}

(1 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024;

2 大连理工大学 力学与航空航天学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:针对航空发动机的高温密封问题,以U形金属密封件为研究对象,分析了密封件壁厚、压缩率及压缩循环次数对其弹性性能的影响,确定了最佳参数组合。同时,设计并搭建了高温气密性能检测装置,进行了密封件气密性能实验研究,给出了泄漏率计算公式,并分析了气密性能影响因素及其与密封件弹性性能的关系。结果表明,密封件回弹率随壁厚、压缩率的增大或压缩循环次数的增加而减小;3种壁厚的密封件在650℃温度下,50次压缩后回弹率均保持在90%以上,当壁厚为0.5 mm时密封件具有最佳的弹性性能。密封件的泄漏率随温度、接触应力的增加而减小,随压差的增大而线性增大;在650℃温度下,0.5 mm壁厚的密封件比室温条件下的泄漏率平均下降约50%。密封件的气密性能受其弹性性能的影响,增大壁厚或压缩率会增加密封表面接触应力,进而降低泄漏率。

关键词:金属密封件;弹性性能;气密性能;泄漏率

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000127 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000127

中图分类号: V252 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2026)09-0226-09

Elastic performance and air-tightness of U-shaped metal seals

SUN Yunjiao¹, WANG Difei¹, LI Jingda², JI Chenxin¹, LYU Jun², LI Pengting^{1*}

(1 School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

2 School of Mechanics and Aeronautics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: This study addresses the high-temperature sealing challenges in aero-engines by analyzing the effects of wall thickness, compression ratio, and cyclic compression cycles on the elastic performance of U-shaped metal seals. The optimal parameter combination is determined through systematic investigation. Additionally, a dedicated high-temperature gas tightness testing apparatus is developed to evaluate airtight performance, with a derived leakage rate calculation formula providing quantitative analysis. The results demonstrate that the elastic recovery rate decreases with increased wall thickness, higher compression ratios, or greater numbers of compression cycles. At 650 °C, all three tested wall thicknesses maintain over 90% recovery rate after 50 compression cycles, with the 0.5 mm configuration showing superior elastic characteristics. Leakage rate exhibits negative correlation with temperature and contact stress, while displaying positive linear dependence on pressure differentials. Notably, the 0.5 mm seal achieves 50% lower leakage at 650 °C compared to room temperature. Enhanced wall thickness or compression ratio improves airtightness by elevating interfacial contact stress.

Key words: metal seal; elastic performance; air-tightness performance; leakage rate

随着航空发动机技术朝着高推重比、高涡轮前温度及高压比方向快速发展,其热端部件的工作环境日益严苛,这对发动机密封技术提出了更高的要求^[1-2]。目前,弹性金属密封技术作为一种新型高效密封解决

方案,逐渐成为航空发动机高温、高压工况下的重要研究方向^[3-4]。弹性金属密封件通过密封腔内压力作用及压缩变形产生的弹性补偿力,有效补偿初始装配间隙,从而实现可靠的密封效果。该密封形式具有截

面形状灵活可设计、轴向载荷低、回弹性能优异以及制造成本低等显著优势^[5-7]。

应用于航空发动机的弹性金属密封件不仅需要高温、高压等严苛工况下保持优异的气密性能,还需具备良好的弹性性能,以应对复杂的热-力耦合载荷作用下及重复使用过程中的性能退化问题^[8]。近年来,国内外学者围绕弹性金属密封件的弹性性能及气密性能开展了大量研究。在弹性金属密封件的弹性性能方面,研究主要集中在截面形状优化及回弹行为预测等方向^[9-11]。戚志程^[12]通过仿真分析方法研究了W形金属密封件回弹性能的影响因素,揭示了温度、压力等工况参数对金属密封件回弹性能的影响规律。吴新洲等^[13]利用有限元模型分析了壁厚等结构参数对金属C形环的回弹性能影响,发现回弹率会随壁厚的增大而减小。Kim等^[14]针对常规C形金属密封件进行了形状优化,发现优化后密封件的回弹率提高了33%。在弹性金属密封件的气密性能方面,研究多聚焦于泄漏率模型构建及界面形貌优化等^[15-17]。Li等^[18]建立了O形环的界面泄漏模型,预测了高压环境下O形环泄漏率随时间的变化。李莹^[19]建立了基于接触应力的泄漏率计算模型并对比分析了O形、C形及U形三种弹性金属密封件的泄漏率和其他密封性能参数,发现U形金属密封件具有最好的气密性能。弹性金属密封件的弹性性能尤其是高温下的压缩回弹性能对其密封

效果有重要影响,然而,现有文献针对弹性性能与气密性能的研究相对独立,同时关注U形金属密封件的弹性性能和气密性能的研究较少;另外,目前针对气密性能的研究主要集中于室温环境,针对650℃及以上高温工况的气密性检测方法仍需进一步完善。

本工作针对航空发动机的高温密封问题,以U形金属密封件为研究对象,分析了密封件壁厚、压缩率及压缩循环次数对其弹性性能的影响,确定了最佳参数组合。同时,设计并搭建了高温气密性能检测实验装置,针对弹性性能最佳的密封件进行了气密性能实验研究,给出了泄漏率计算公式,并分析了气密性能影响因素及与密封件弹性性能的关系,以期弹性金属密封件的优化设计及其在航空发动机领域的工程应用提供实验依据与理论参考。

1 实验材料与方法

1.1 U形金属密封件

实验采用的U形金属密封件实物图如图1所示。密封件截面形状为U形,并且设计了一条长边以便于密封件的安装。密封件所用的材料为GH4169镍基高温合金。GH4169合金高温综合性能优异,在650℃下仍具有较高的强度及较好的塑性,并且具有良好的加工和焊接性能^[20]。

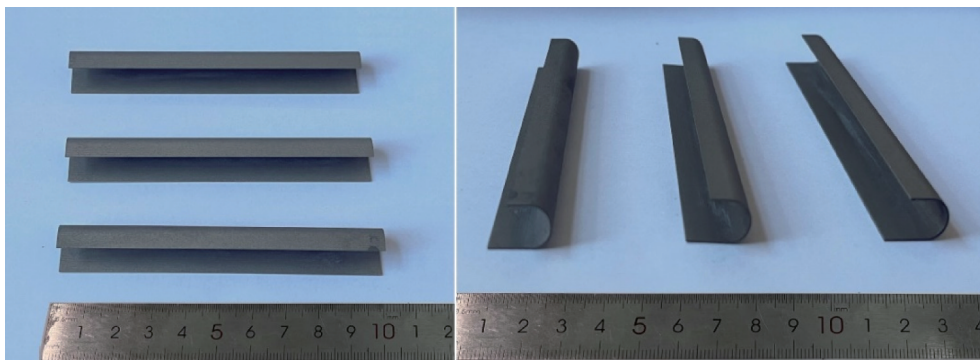


图1 U形金属密封件

Fig.1 U-shaped metallic sealing test specimens

实验采用的U形金属密封件结构示意图如图2所示。3种密封件的区别主要在于壁厚不同,其壁厚分别为0.4、0.5、0.6 mm。3种U形金属密封件的高度均为10 mm,长度均为98 mm,U形截面短边的长度为5 mm,长边的长度为10 mm,过渡圆半径为5 mm。

1.2 弹性性能测试

针对金属密封件弹性性能的测试主要是以壁厚及压缩率为自变量,探究其在不同壁厚及压缩率条件

下的压缩回弹性能表现。进一步测试3种不同壁厚密封件多次循环压缩后的弹性性能,以对比分析其重复使用性能。

U形金属密封件的压缩率 p ,是指施加轴向压缩载荷时,密封件的压缩量 x_1 与初始密封件高度 H 的比值,其计算公式如式(1)所示。金属密封件弹性性能评价指标主要为压缩回弹率 q ,即压缩过程中载荷卸载后恢复的变形量 x_2 与设定压缩量 x_1 的比值,其计算公式如式(2)所示。

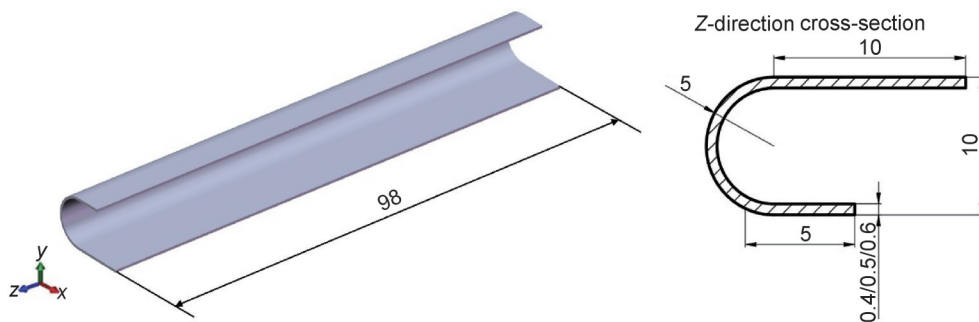


图2 U形金属密封件结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of U-shaped metal seals

$$p = \frac{x_1}{H} \times 100\% \quad (1)$$

$$q = \frac{x_2}{x_1} \times 100\% \quad (2)$$

采用 Instron 电子万能材料试验机对 U 形金属密封件进行压缩回弹性能测试,包括单次压缩实验和循环压缩实验。首先,对 3 种不同壁厚的 U 形金属密封件进行单次压缩回弹测试,实验温度为 650 ℃,设定下压距离序列为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mm,对应的压缩率分别为 2%、4%、6%、8%、10%。其次,针对 3 种不同壁厚的密封件进行循环压缩实验,实验温度为 650 ℃,设定下压距离为 0.3 mm,压缩率为 3%,压缩循环次数为 50 次。入口力均设置为 0.02 N,下压速度均为 0.01 mm/s,在每个压缩位移最大位置保持压力 30 s。设定采样频率为 50 Hz,确保能够准确记录压缩过程中的位移和力数据。

1.3 气密性能测试

U 形金属密封件气密性实验装置如图 3(a)所示。气密性实验装置主要包括供气系统、流量型气密性检测仪、气密性检测实验工装以及加热系统。供气系统包括储气罐、气源阀门以及分压阀,其作用是在实验过程中提供持续且稳定的气体;流量型气密性检测仪包括直压传感器、流量传感器以及数据采集及记录装置,其主要作用是采集和记录实验装置的压差和流量;气密性检测实验工装由工装主体以及压缩量调节装置组成,其主要作用是安装密封实验件,并提供密封环境;加热系统由马弗炉及测温热电偶组成,用来提供高温环境及进行温度检测。

气密性检测实验工装模型如图 3(b)所示,实物如图 3(c)所示。在进行气密性检测时,首先,将密封件放置在实验工装内,通过压缩量调节装置调整压缩量,将工装上盖板通过螺栓紧固连接在工装主体上,完成实验件安装。随后打开气源,通过通气管向实验工装充气,达到设定压力后稳压一段时间,测试过程中保持内部气压不变,若气体于密封件处发生泄漏,

则气源需要对工装气体进行补充,测试仪器通过流量计测试出补充气体的流量,即为泄漏量。为了探究 U 形金属密封件的气密性能,分别在室温及 650 ℃条件下对 0.5 mm 壁厚的密封件进行气密性能测试,密封件安装时设定下压距离为 0.3 mm,即压缩率为 3%。

2 结果与分析

2.1 弹性性能结果与分析

2.1.1 壁厚及压缩率对 U 形金属密封件弹性性能的影响

3 种不同壁厚的 U 形金属密封件进行单次压缩回弹测试后的线载荷及回弹率结果分别如图 4(a)和图 4(b)所示。在相同压缩率条件下,壁厚越大,密封件线载荷越大,回弹率越低。当压缩率为 2% 时,0.4、0.5 mm 壁厚的密封件回弹率均为 100%,实现了完全回弹,而壁厚为 0.6 mm 的密封件回弹率为 97.1%,未实现完全回弹;当压缩率为 4% 时,3 种壁厚密封件回弹率分别为 97.3%、95.0%、92.1%,均未实现完全回弹,但 0.4 mm 壁厚密封件的回弹率最高,0.6 mm 壁厚密封件的回弹率最低。这是由于壁厚增加导致 U 形金属密封件刚度提高,即抵抗弹性变形的能力增强,因而在相同压缩率下密封件的线载荷和结构应力水平更高。当应力超过材料的屈服强度时,会引发塑性变形,塑性变形占比增大,弹性变形占比相应减小,从而降低回弹率。在相同压缩率下,结构应力水平越高的密封件越容易达到材料的屈服强度,从而较早地发生塑性变形。

相同壁厚条件下,随着压缩率的增加,密封件所承受的线载荷增大,回弹率降低,并且壁厚越大,密封件回弹率随压缩率增加而下降的幅度增大。0.4、0.5 mm 壁厚的密封件在压缩率小于 6% 时回弹率可以保持在 90% 以上,0.6 mm 壁厚的密封件在压缩率小于 4% 时回弹率可以保持在 90% 以上。压缩率由

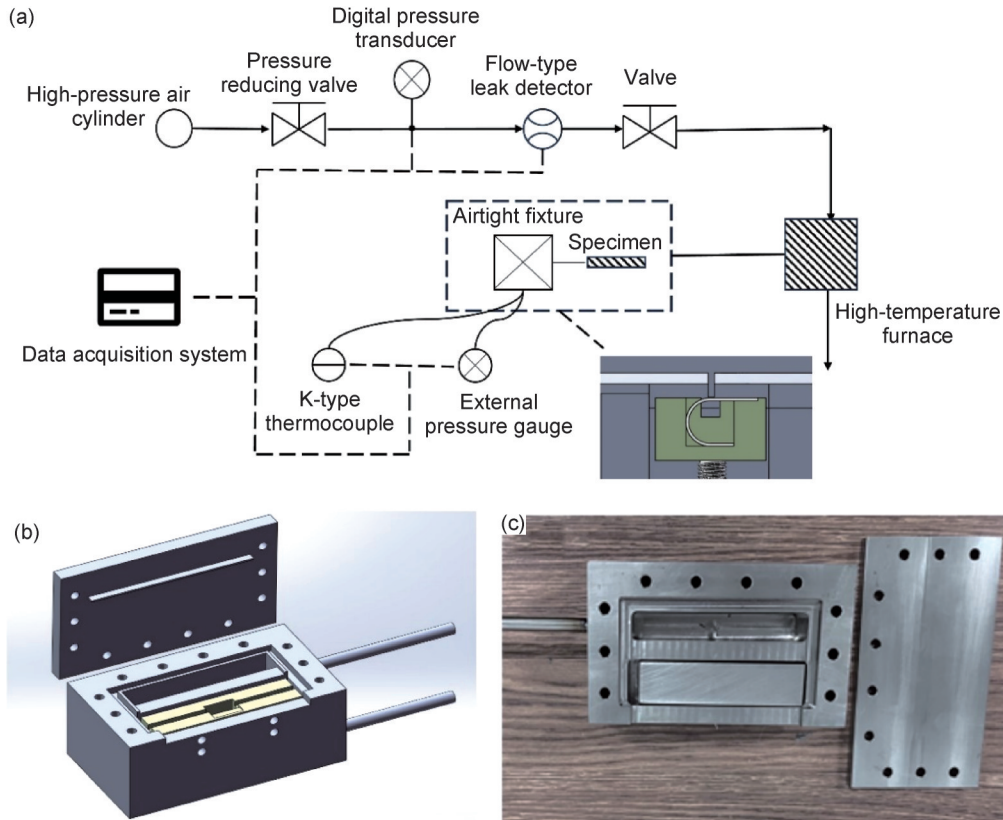


图3 气密性实验装置示意图

(a)测试系统;(b)实验工装模型;(c)实验工装实物

Fig.3 Schematic diagram of airtight test equipment

(a)test system;(b)test fixture model;(c)physical test fixture

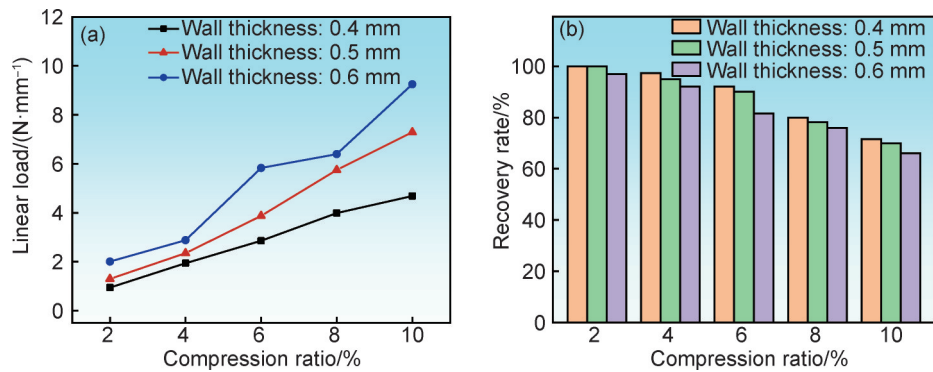


图4 不同壁厚及压缩率条件下密封件的弹性性能测试结果图

(a)压缩率-线载荷曲线;(b)压缩率-回弹率曲线

Fig.4 Elastic performance test results of seals with different wall thicknesses and compression ratios

(a)compression ratio-linear load curve;(b)compression ratio-recovery rate curve

2% 增大到 10% 时,0.4 mm 壁厚的密封件回弹率由 100% 下降至 71.6%;0.5 mm 壁厚的密封件回弹率由 100% 下降至 69.9%;0.6 mm 壁厚的密封件回弹率由 97.1% 下降至 66.2%。当压缩率较小时,密封件处于弹性变形阶段,此时压紧力与压缩率呈线性正相关,压缩率的增加导致密封件的弹性变形增大,其结构内部的应变能相应增加,进而导致其抵抗变形的能力增

强,体现在压紧力的升高^[21]。当压缩率较大时,结构应力超过材料的屈服强度,密封件开始发生塑性变形,塑性变形会引起晶格畸变和位错缠结,导致后续变形需克服更高抗力,此时压紧力仍然会随压缩率的增加而升高,但不再呈现线性关系^[22-23]。在弹性变形阶段,卸载后应变能完全释放,密封件可以恢复原始形状,回弹率接近 100%。在塑性变形阶段,随

压缩率增大,密封件不可逆变形程度增大,回弹率降低。

在密封件工作过程中,密封件回弹量应大于热载荷作用下的密封面变形分离量,在高温高压工况下,金属密封件回弹率应大于90%,以保证其与密封面的良好接触^[8,24]。此外,密封件压缩载荷不应过小,以保证密封面间足够的接触力^[21],进而保证密封可靠性,但若载荷过大,会增加结构破坏的风险。0.4 mm密封件的回弹率与0.5 mm密封件的回弹率水平及线载荷水平相当,而0.6 mm密封件的回弹率不及较薄壁厚的密封件回弹性能好,且其线载荷随压缩率增大而增加的幅度过大,有结构破坏的风险。综合考虑上述因素,U型密封件壁厚应设计为0.4~0.5 mm。另外,考虑到加工制造方面,壁厚越薄,制造难度越大,因而密封件壁厚应设计为0.5 mm,应用时推荐的安装压缩率范围为2%~6%。

2.1.2 循环次数对U形金属密封件弹性性能的影响

3种不同壁厚的U形金属密封件进行循环压缩回弹测试后的线载荷结果如图5(a)所示。随着循环次数的增加,密封件的线载荷呈现出先增加后降低的趋

势。这是由于在高温重复压缩初期,合金内部位错密度增加,发生加工硬化现象,表现为线载荷升高。随着循环次数增加,合金发生动态回复,高温环境下位错发生重排,导致位错密度下降,削弱了材料的应变硬化能力,线载荷增加逐渐缓慢^[25-26]。循环次数较大时,合金的动态回复导致线载荷降低的程度逐渐大于其加工硬化导致的线载荷升高的程度,密封件线载荷缓慢下降^[8]。

3种不同壁厚的U形金属密封件进行循环压缩回弹测试后的回弹率结果如图5(b)所示。随着循环次数的增加,回弹率呈现出逐渐降低的趋势。经历50次循环压缩之后,壁厚为0.4 mm的密封件回弹率由100%下降至97.4%,壁厚为0.5 mm的密封件回弹率由100%下降至96.6%,壁厚为0.6 mm的密封件回弹率由96.8%下降至92.8%。这是因为在多次循环压缩时,金属密封件在高温载荷作用下逐渐发生塑性变形,且累积塑性变形随循环次数的增加而增大。虽然回弹率会随循环次数的增加而减小,3种壁厚的密封件在50次压缩回弹后回弹率均保持在90%以上,具有较好的重复使用性能。

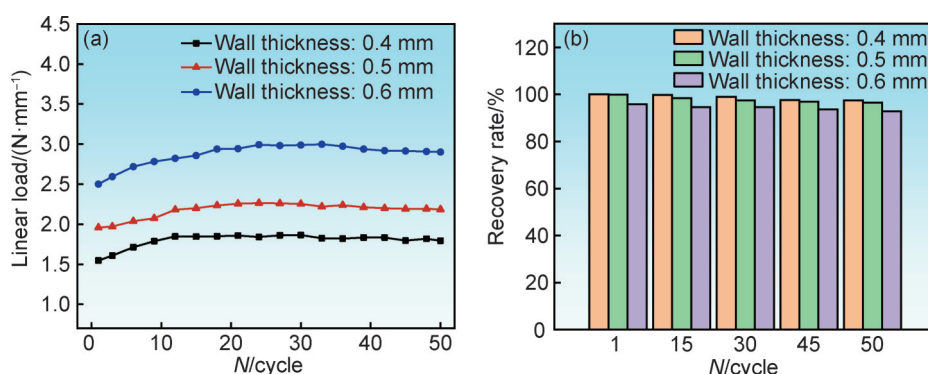


图5 不同循环次数条件下密封件的弹性性能测试结果

(a)循环次数-线载荷曲线;(b)循环次数-回弹率曲线

Fig.5 Elastic performance test results of seals with different cycles

(a)cycles-linear load curve;(b)cycles-recovery rate curve

2.2 气密性能结果与分析

2.2.1 气密性能实验结果及分析

壁厚为0.5 mm的密封件在不同温度下进行气密性能测试后的泄漏率结果如图6所示。压差为0.1 MPa时,室温下密封件泄漏率为 $9.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,高温下密封件泄漏率为 $4.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;压差为0.2 MPa时,室温下密封件泄漏率为 $16.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,高温下密封件泄漏率为 $8.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。压差相同时,高温下密封件的泄漏率低于室温下密封件的泄漏率,并且压差越大,不同温度下泄漏率数值相差越大。这是由于温度升高会导致高温合金材料弹性模量降低,

整体结构抵抗变形的能力减弱,流动于密封件内部的高压气流使其产生更大的隆起变形,从而导致密封件与密封表面接触更加紧密,压紧力增大,密封效果增强。

在650℃环境温度及3%压缩率下,压差小于0.2 MPa时,壁厚为0.5 mm的U形金属密封件的泄漏率均小于 $10.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,比室温条件下的泄漏率平均下降约50%,气密性能优异。这也说明虽然金属材料会在高温下发生性能变化,U形金属密封件良好的自紧作用,仍然可以使其在高温下保持良好的气密性能。

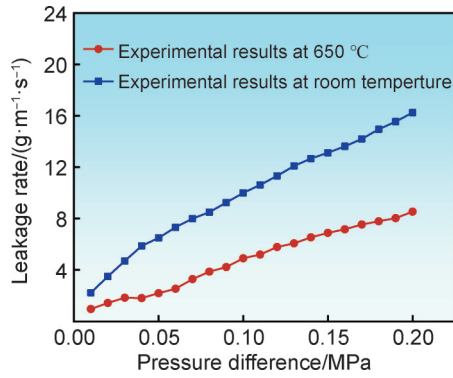


图6 不同温度下密封件泄漏率随压差的变化规律

Fig.6 Variation of seal leakage rate with pressure difference at different temperatures

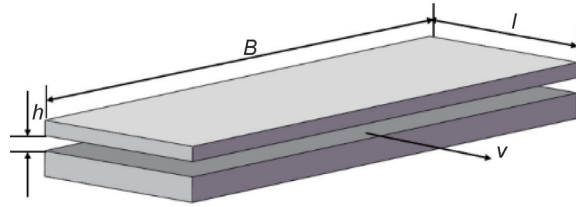


图7 平行平板模型示意图

Fig.7 Schematic diagram of the parallel-plate model

为了建立粗糙密封界面与理想密封界面之间的关系,引入流量因子 ϕ 对传统的平行平板模型计算公式进行修正,定义流量因子为实际粗糙界面泄漏率 M_s 与理想界面泄漏率 M_p 的比值,具体表达式为^[28]:

$$\phi = \frac{M_s}{M_p} \quad (4)$$

引入流量因子后,修正的泄漏率计算公式可以表达为:

$$M = \phi \frac{\rho B h^3 \Delta p}{12 \mu l} \quad (5)$$

依据Roth^[29]提出的接触力学模型,粗糙接触表面的密封间隙 h 表达为:

$$h = h_0 \exp\left(-\frac{S_G}{R_C}\right) \quad (6)$$

式中: h_0 为初始密封间隙高度,m; S_G 为密封面上的接触应力,MPa; R_C 为材料的密封系数。 h_0 满足统计学原则,即初始的密封间隙高度可以取为 3σ , σ 为密封面粗糙度, μm ,则:

$$h_0 = 3\sigma \quad (7)$$

弹性金属密封件使用的材料为镍基高温合金,根据文献中提出的密封系数计算方法^[27],当密封面接触应力 $S_G \leq 65 \text{ MPa}$ 时:

$$R_C = 20.74 S_G^{0.4248} \quad (8)$$

当密封面接触应力 $S_G > 65 \text{ MPa}$ 时:

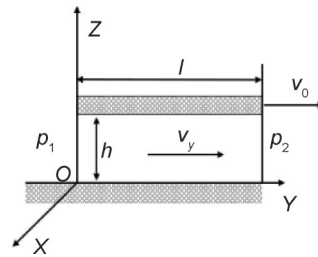
2.2.2 泄漏率计算公式及其验证

为进一步探究影响泄漏率的因素,预测不同工况条件下密封件的气密性能表现,基于平行平板模型建立了考虑粗糙界面的弹性金属密封件的泄漏率计算公式,图7为平行平板模型泄漏通道示意图。

依据传统的平行平板模型,泄漏率 M_p 计算公式为^[27]:

$$M_p = \frac{\rho B h^3 \Delta p}{12 \mu l} \quad (3)$$

式中: M_p 为平行平板模型质量泄漏率,g/s; ρ 为密封介质密度,g/m³; l 为密封间隙横向宽度,m; B 为密封间隙纵向深度,m; h 为密封间隙高度,m; μ 为介质的黏度系数,Pa·s; Δp 为密封件两端压差,Pa。



$$R_C = 148.8 - 0.0026(S_G - 145.2)^2 \quad (9)$$

流量因子 ϕ 是泄漏率计算的关键参数之一,其计算公式可表达为^[28]:

$$\phi = 1.023 \left(\frac{\sigma}{t} \right)^{-1.688} \quad (10)$$

式中: t 为粗糙表面自相关长度, μm ; σ/t 为无量纲粗糙度。

通过实验结果,可以验证泄漏率计算公式的正确性,计算结果及实验结果如图8所示。考虑粗糙界面的弹性金属密封件泄漏率计算结果与实验值相对误差小于11.6%,远小于将密封件表面看作光滑界面的泄漏率计算结果与实验值的误差,说明所给出的考虑粗糙界面的泄漏率计算公式能够更好地贴合实验结果,具有较好的适用性。另外,可以发现考虑粗糙界面的泄漏率计算数值略大于实验测得的泄漏率数值,这是由于在实际实验过程中,气体通过通气孔进入实验工装内部,压力会有一定损失,使得工装内部实际压力略小于设定压力。

2.2.3 接触应力对U形金属密封件泄漏率的影响

密封表面接触应力是影响密封件泄漏率的关键因素之一,依照式(5)对U形金属密封件泄漏率进行计算,并分析了接触应力对其泄漏率的影响规律,如图9(a)所示。在相同的压差环境下,随着接触应力的

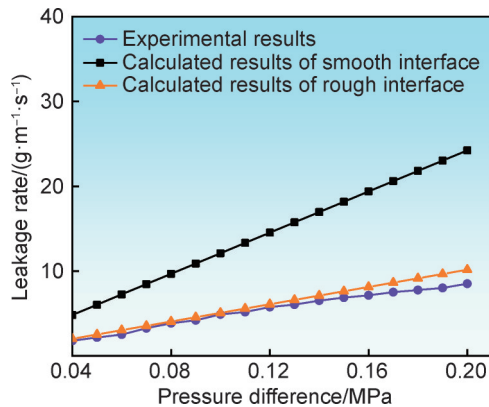


图8 泄漏率计算公式准确性验证

Fig.8 Validation of leakage rate calculation formula

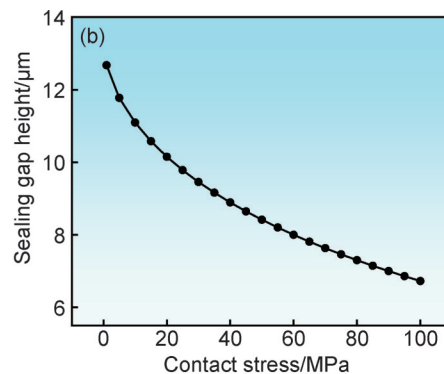
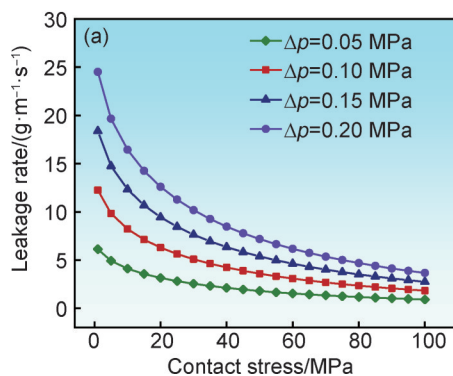


图9 密封件泄漏率及密封间隙高度随接触应力变化规律

(a)接触应力-泄漏率曲线;(b)接触应力-密封间隙高度曲线

Fig.9 Variation of sealing component leakage rate and sealing gap height with contact stress

(a)contact stress-leakage rate curve;(b)contact stress-sealing gap height curve

2.2.4 壁厚及压缩率对U形金属密封件泄漏率的影响

泄漏率随接触应力的变化而变化,壁厚及压缩率会影响接触应力大小,进而影响泄漏率。依照式(5)对密封件泄漏率进行计算,并分析了壁厚及压缩率对其泄漏率的影响规律,如图10所示。图10(a)所示为3

种不同壁厚的密封件在压缩率为3%时的泄漏率情况,压差为0.2 MPa时,0.4 mm壁厚密封件的泄漏率为 $14.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,壁厚为0.5 mm密封件的泄漏率为 $10.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,0.6 mm壁厚密封件的泄漏率为 $5.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图10(b)所示为0.5 mm壁厚的密封件在不同压缩率下的泄漏率情况,压差为0.2 MPa时,

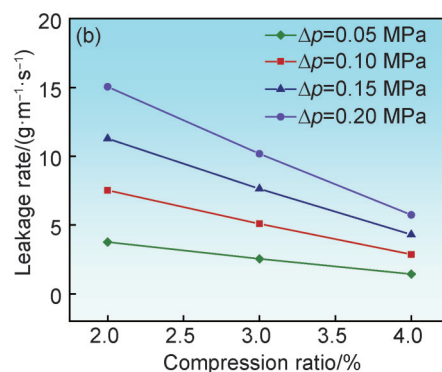
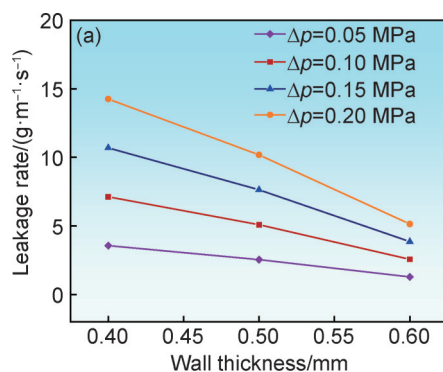


图10 密封件泄漏率随壁厚及压缩率变化规律

(a)壁厚-泄漏率曲线;(b)压缩率-泄漏率曲线

Fig.10 Variation of sealing leakage rate with wall thickness and compression ratio

(a)wall thickness-leakage rate curve;(b)compression ratio-leakage rate curve

2%压缩率下密封件的泄漏率为 $15.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 3%压缩率下密封件的泄漏率为 $10.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 4%压缩率下密封件泄漏率为 $5.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。壁厚增大或者压缩率增大,密封件泄漏率都减小,并且压差越大,密封件泄漏率减小的趋势越明显。这是由于气密性能受密封件弹性性能影响,增大壁厚或压缩率会增加密封件压紧力,进而增加密封表面接触应力^[21],因此,在大的压差条件下,增大密封件壁厚或增加密封件压缩率能够有效降低泄漏率。

2.2.5 压差对U形金属密封件泄漏率的影响

接触应力通过影响密封间隙高度来影响密封件的泄漏率,而压差直接影响密封件的泄漏率。依照式(5)对U形金属密封件泄漏率进行计算,分析了压差对其泄漏率的影响规律,如图11所示。密封件泄漏率随压差线性变化,压差增大,泄漏率增大,并且接触应力越小泄漏率随压差变化越明显。这是由于压力的增大会使进出口气体流动效应得到增强,泄漏率随之增加。

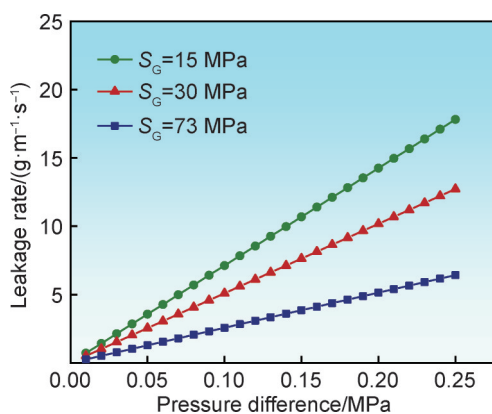


图11 密封件泄漏率随压差的变化规律

Fig.11 Variation of seal leakage rate with pressure difference

3 结论

(1)U形金属密封件的回弹率随壁厚及压缩率的增大而减小,线载荷随壁厚及压缩率的增大而增大;在650℃温度下,壁厚为0.5 mm的密封件具有最佳的线载荷及回弹率综合水平,弹性性能最优。

(2)U形金属密封件的回弹率随循环次数的增加而减小;在650℃温度及3%压缩率下,3种壁厚的密封件在50次压缩后回弹率均保持在90%以上,具有较好的重复使用性能。

(3)压差相同时,U形金属密封件的泄漏率随温度的增加而减小,并且压差越大,不同温度下泄漏率数

值相差越大;在650℃环境温度及3%压缩率下,壁厚为0.5 mm的密封件泄漏率比室温条件下的泄漏率平均下降约50%,气密性能优异。

(4)考虑粗糙界面的金属密封件泄漏率计算结果与实验值相对误差小于11.6%;基于该泄漏率计算公式分析表明,U形金属密封件的泄漏率随接触应力的增大而逐渐减小,随压差增大而线性增大;密封件的气密性能受其弹性性能的影响,增大壁厚或压缩率会增加密封表面接触应力,进而降低泄漏率。

参考文献

- [1] Jiang H T, Yu S R, Wang S S, et al. Research status and development trend of cylindrical gas film seals for aeroengines [J]. Processes, 2024, 12(1): 69.
- [2] 李伟平, 贾占举, 路茜, 等. 金属封严环泄漏率预测方法[J]. 航空动力学报, 2019, 34(2): 368-375.
Li W P, Jia Z J, Lu Q, et al. Method to predict leakage rate of metal seal ring [J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(2): 368-375.
- [3] 金冠男, 孙丹, 赵磊, 等. 弹性金属密封环力学特性与泄漏特性数值研究[J]. 润滑与密封, 2022, 47(7): 16-25.
Jin G N, Sun D, Zhao L, et al. Numerical investigation on mechanical and leakage characteristics of elastic metallic sealing ring [J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(7): 16-25.
- [4] Jia X H, Chen H M, Li X G, et al. A study on the sealing performance of metallic C-rings in reactor pressure vessel [J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 278: 64-70.
- [5] Kim G H, Lee Y S, Yang H L. A new design concept of metal O-ring seal for long-term performance [J]. Vacuum, 2016, 123: 54-61.
- [6] 彭旭东, 王玉明, 黄兴, 等. 密封技术的现状与发展趋势[J]. 液压气动与密封, 2009, 29(4): 4-11.
Peng X D, Wang Y M, Huang X, et al. State-of-the-art and future development of sealing technology [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2009, 29(4): 4-11.
- [7] 艾延廷, 来纯强, 郝燕平, 等. 航空发动机组合式弹性片金属密封环结构密封特性研究[J]. 推进技术, 2018, 39(2): 426-432.
Ai Y T, Lai C Q, Hao Y P, et al. Study on sealing characteristics of composited elastic metal sealing rings used in aeroengine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(2): 426-432.
- [8] 姜薇, 李晨, 霍世慧, 等. 金属U-E密封结构重复使用性能数值分析[J]. 火箭推进, 2024, 50(1): 105-112.
Jiang W, Li C, Huo S H, et al. Numerical analysis on reusable performance of metallic U-E rings [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(1): 105-112.
- [9] 姜露, 李辉, 张瀛, 等. 弹簧金属C形环密封特性分析及优化设计方法研究[J]. 核动力工程, 2021, 42(增刊2): 54-59.
Jiang L, Li H, Zhang Y, et al. Study on analysis and optimization design method of sealing characteristics of spring metal C-ring [J]. Nuclear Power Engineering, 2021, 42(S2): 54-59.
- [10] 张文昌, 励行根, 魏世军, 等. 金属O形环力学性能仿真分析与试验验证[J]. 润滑与密封, 2019, 44(8): 8-12.
Zhang W C, Li X G, Wei S J, et al. Simulation analysis and test

- validation of mechanical properties of metallic O-ring[J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(8): 8-12.
- [11] Qiao L N, Keller C, Zencker U, et al. Three-dimensional finite element analysis of O-ring metal seals considering varying material properties and different seal diameters[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2019, 176: 103953.
- [12] 戚志程. 航空发动机金属 W 形封严环密封性能分析及寿命预测[D]. 北京: 北京化工大学, 2024.
- Qi Z C. Sealing performance analysis and life prediction of metal W-shaped sealing ring for aero-engine[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2024.
- [13] 吴新洲, 徐义华, 杨蓓, 等. 基于响应面法的 C 型金属封严环优化设计及其蠕变疲劳寿命计算[J]. 失效分析与预防, 2022, 17(4): 220-228, 246.
- Wu X Z, Xu Y H, Yang B, et al. Optimization design based on response surface method and creep fatigue life calculation of C-type metal sealing ring[J]. Failure Analysis and Prevention, 2022, 17(4): 220-228, 246.
- [14] Kim G H, Her N I, Kim H T. A design study on metal C-ring seals[J]. Vacuum, 2022, 205: 111401.
- [15] 黄婵媛, 温帅方, 孙丹, 等. 组合式弹性金属密封泄漏特性数值与实验研究[J]. 航空动力学报, 2025, 40(5): 233-244.
- Huang C Y, Wen S F, Sun D, et al. Numerical and experimental study on leakage characteristics of combined elastic metal seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 40(5): 233-244.
- [16] Zhang D W, Yang G C, Lv S C, et al. Fretting behavior of static metal seal and testing apparatus for fretting friction with low/high temperature[J]. Tribology International, 2023, 187: 108676.
- [17] Ma Y, Yuan Z Y, Ni Y, et al. Performance prediction and multi-objective optimization of metal seals in roller cone bits[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208: 109316.
- [18] Li M, He L, Zheng D K, et al. Characterization of long-term evolution of leakage rates of O-ring seals in nuclear power plant under high-temperature and high-pressure conditions[J]. Nuclear Engineering and Design, 2024, 429: 113666.
- [19] 李莹. 自紧式金属 U 形密封环的泄漏和振动特性分析[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- Li Y. Study on leakage and vibration characteristics of self-reinforced metal U-shaped sealing ring[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.
- [20] 游小刚. 电子束精炼制备 Inconel 718 合金及其性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- You X G. Preparation of inconel 718 alloy by electron beam smelting and its properties[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [21] 黄发, 马健, 吴正洪. 航空发动机 U 形金属密封环的设计与优化[J]. 润滑与密封, 2020, 45(7): 128-135.
- Huang F, Ma J, Wu Z H. Design and optimization of metallic U-ring in aero-engine[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(7): 128-135.
- [22] 刘镇溪. 金属 O 形环螺栓法兰连接密封特性研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.
- Liu Z X. Research on sealing characteristics of metal O-ring of bolted flange joint[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023.
- [23] Shen M X, Peng X D, Xie L J, et al. Deformation characteristics and sealing performance of metallic O-rings for a reactor pressure vessel[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2016, 48(2): 533-544.
- [24] 张大伟, 雷征, 闫方琦, 等. 自紧式 V 形金属密封特性及悬臂结构影响[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(7): 1114-1119.
- Zhang D W, Lei Z, Yan F Q, et al. Sealing characteristics and influence of cantilever geometry on pressure-actuated V-shaped metal seal[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2023, 42(7): 1114-1119.
- [25] 魏洪亮, 杨晓光, 于慧臣. GH4169 合金高温力学行为本构建模及参数识别[J]. 材料工程, 2005(4): 42-45.
- Wei H L, Yang X G, Yu H C. Constitutive modeling and parameter identification of mechanical behavior for GH4169 alloy at high temperature[J]. Journal of Materials Engineering, 2005(4): 42-45.
- [26] 孙兴, 于秋颖, 兰博, 等. 镍基高温合金高温塑性变形的流动应力变化及微观组织特征[J]. 热加工工艺, 2021, 50(9): 54-60.
- Sun X, Yu Q Y, Lan B, et al. Flow stress variation and microstructure characteristics of Ni-based superalloys during high-temperature plastic deformation[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(9): 54-60.
- [27] 杨文健. 硬密封结构界面泄漏特性的数值分析及理论预测方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- Yang W J. Numerical analysis and theoretical prediction method of interface leakage characteristics in hard sealing structure[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [28] Xu G L, Li M, Yu X L, et al. Study on interfacial leakage characteristics of rubber sealing under temperature cycle conditions in PEM fuel cell[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2023, 31(6): 065011.
- [29] Roth A. The interface-contact vacuum sealing processes[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 1972, 9(1): 14-23.
- 基金项目:** 中央高校基本科研业务费(DUT24GF104)
- 收稿日期:** 2025-03-04; **录用日期:** 2025-04-14
- 通讯作者:** 李鹏廷(1986—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为载能束冶金及先进材料制备, 联系地址: 辽宁省大连市甘井子区大连理工大学新三束四号楼(116024), E-mail: ptli@dlut.edu.cn
- (本文责编: 张宝玲)