引用格式：王亚杰，汲辰鑫，王涤非，等．弹性元件-陶瓷纤维基线密封件的弹性性能及气密性能[J]．材料工程，2026，54(3)：244-251.
WANG Yajie，JI Chenxin，WANG Difei，et al.Elastic property and airtightness of ceramic fiber baseline seals with elastic elements[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(3)：244-251.

弹性元件-陶瓷纤维基线密封件的弹性性能及气密性能

王亚杰[1]，汲辰鑫[1]，王涤非[1]，崔　伟[2]，刘海涛[2]，吕　军[3]，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 北京空天技术研究所，北京 100094；
3 大连理工大学 力学与航空航天学院，辽宁 大连 116024）

摘要：基线密封结构由于其优异的隔热性和稳定性，在飞行器热防护领域被广泛使用。但长时间高温、高载荷的服役环境易导致密封件发生永久变形，制约其重复使用。采用GH4169合金丝编织弹性元件，制备不同内部填充结构（填充纤维棉、单轴纤维丝、编织纤维束）的弹性元件-陶瓷纤维基线密封件，研究棉芯的填充结构、压缩循环次数和弹性元件的热处理对密封件弹性性能的影响。结果表明：随着压缩率的增加，三种填充结构密封件的回弹率均出现不同程度的下降，当压缩率增加至30%时，填充纤维棉结构的密封件回弹率最高，为95.93%；随着循环次数的增加，密封件的回弹率下降。对弹性元件进行标准热处理后，60%压缩率下的弹性元件峰值载荷由未热处理的451.25 N/m下降至196.25 N/m，密封件的回弹率从77.87%提升至87.78%。对密封件进行气密性能理论计算和实验分析发现，随着压差的增大，密封件的泄漏速率上升，泄漏速率的实验值大于理论值，密封件的气密性能受弹性性能和隔热棉芯的影响。

关键词：基线密封件；GH4169；弹性性能；气密性能
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000329　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000329
中图分类号：V257　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)03-0244-08

Elastic property and airtightness of ceramic fiber baseline seals with elastic elements

WANG Yajie[1]，JI Chenxin[1]，WANG Difei[1]，CUI Wei[2]，LIU Haitao[2]，LYU Jun[3]，LI Pengting[1*]
（1 School of Materials Science and Engineering，Dalian University of Technology，Dalian 116024，Liaoning，China；
2 Beijing Institute of Aerospace Technology，Beijing 100094，China；
3 School of Mechanics and Aeronautics，Dalian University of Technology，Dalian 116024，Liaoning，China）

Abstract：The baseline seal structure is widely used in the thermal protection of aircraft due to its excellent thermal insulation and stability. However，prolonged exposure to high temperatures and heavy loads in service can easily lead to permanent deformation of the seal，limiting its reusability. In this study，elastic elements woven from GH4169 alloy wires are used to fabricate ceramic fiber baseline seals with different internal filling structures，such as loose fiberfill，unidirectional fiber tow，and braided fiber bundles. The effects of the cotton core filling structure，compression cycles，and heat treatment of the elastic elements on the elastic property of the seals are investigated. The results show that as the compression level increases，the recovery ratios of the seals with the three filling structures decrease to varying degrees. When the compression level reaches 30%，the seal with the loose fiberfill structure exhibits the highest recovery ratio of 95.93%. As the number of compression cycles increases，the recovery ratio of the seal decreases. After standard heat treatment of the elastic elements，the peak load of the elastic elements at a 60% compression level decreases from 451.25 N/m (untreated) to 196.25 N/m，while the recovery ratio of the seals increases from 77.87% to 87.78%. Theoretical calculations and experimental analysis of the seal's tightness reveal that as the pressure difference increases，the leak rate of the seal rises. The experimental

values of the leak rate are higher than the theoretical values, and the tightness of the seal is influenced by its elastic property and the insulating cotton core.

Key words: baseline seal; GH4169; elastic property; airtightness

高速飞行器服役过程中，其表面气动热载荷严酷，飞行器表面温度≥400 ℃，舱门段部位再入过程中温度短时可达 600 ℃以上，这需要优异的热密封结构以防止热气流进入飞行器内部。舱门段部位是飞行器典型的活动缝隙部件，该类缝隙通常采用填隙密封和基线密封等手段进行密封处理[1-3]。基线密封结构由 NASA 在对 X-15 和 X-38 飞行器研发中提出，该结构由于其优异的隔热性和稳定性，在飞行器热防护领域内被广泛使用[4-8]。但长时间高温、高载荷的服役环境易导致密封件发生永久变形，制约基线密封件的重复使用[9-10]。弹性元件在密封件内部起回弹支撑的作用。镍基高温合金因具有优异的高温抗氧化能力、抗疲劳性能和抗蠕变性能而备受关注。国内外学者采用镍基高温合金编织弹性元件制备了基线密封件，并开展了诸多研究工作。Dunlap 等[11]研究发现，Inconel X-750 合金编织弹性元件制备的基线密封件在 650 ℃以上高温疲劳性能显著下降，回弹率从 93.00% 降低至 61.00%。韩硕[12]改进了弹性元件编织工艺（S 型弹簧＋Inconel X-750 固溶时效处理），优化了外隔热层预包覆法与纤维绳编织工艺，建立多参数压缩刚度模型，验证改良后的密封件经 5 次循环后背壁温≤180 ℃，满足高超声速动态密封需求。张恒瑞[13]研究了不同气氛下热处理（heat treatment，HT）对 GH141 合金编织弹性元件性能的影响，发现经 N_2 气氛热处理的样品在 30% 压缩率下回弹率达到 95.28%，相较于未热处理的样品提升 23.38%。上述研究主要聚焦于弹性元件对基线密封件弹性性能的影响，然而，关于基线密封件弹性性能与气密性能的关系鲜见报道。

GH4169 合金在 650 ℃内具备优异的力学性能[14-20]，因此本工作采用 GH4169 合金丝编织弹性元件，制备出具有不同填充结构的基线密封件，研究不同填充结构和循环次数对密封件弹性性能的影响，并结合气体泄漏速率模型和实验计算，分析密封件弹性性能对气密性能的影响。

1　实验材料与方法

1.1　基线密封件的制备

本工作中的弹性元件使用钩织机自制，所用材料为直径 0.16 mm 的 GH4169 镍基高温合金丝和 SS304 合金丝，弹簧管编织结构为 Strecker 结构，编织参数为 12 目，单股编织。采用高硅氧玻璃纤维编织外套和陶瓷纤维制备隔热棉芯，使用陶瓷纤维分别制备填充纤维棉、编织纤维束、单轴纤维丝三种不同填充结构的基线密封件（长 80 mm，外径 18 mm），其整体结构及制作流程如图 1 所示。

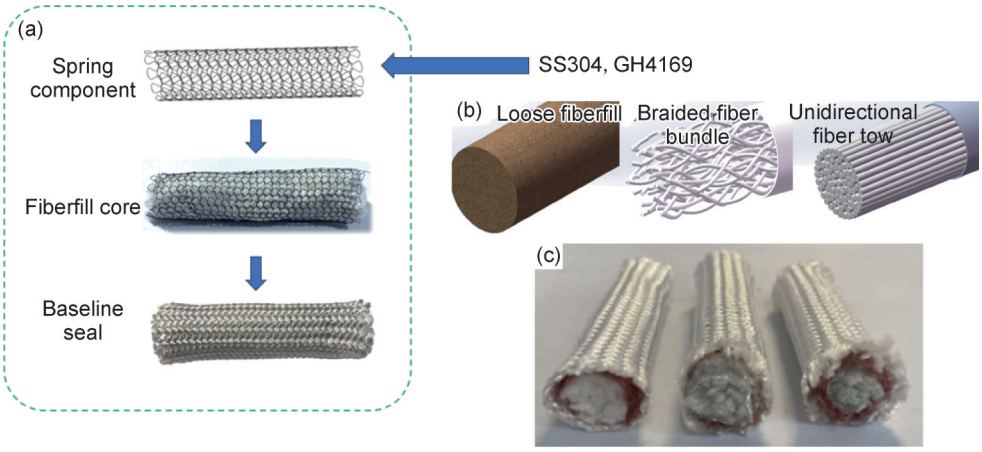


图 1　基线密封件制作流程及实物图

(a)基线密封件制作流程；(b)不同结构隔热棉芯；(c)基线密封件实物

Fig.1　Production flow chart and physical diagram of baseline seals

(a)production flow chart of baseline seals; (b)different structures of thermal insulation core; (c)physical drawings of baseline seals

1.2　弹性性能测试

密封件弹性性能测试通常以峰值载荷或位移量为自变量，峰值载荷的大小受密封件结构和材料等多方面影响，密封件在凹槽内受到的承压载荷较低，最

大变形量达到60%，因此使用压缩率p为自变量便于弹性性能分析。在此基础上本工作以压缩率-位移为自变量，压缩测试不同密封件的永久变形量并比较回弹率q。

在外加载荷的作用下，基线密封件会发生变形，此时垂直方向长度减小，横向加宽，载荷卸载后会发生回弹，恢复的变形量即为回弹量，未恢复的部分为永久变形量。采用回弹率表示基线密封件的弹性性能。

$$p=\frac{x_1}{D} \tag{1}$$

$$q=\frac{x_2}{x_1} \tag{2}$$

式中：x_1为压缩量；D为密封件的直径；x_2为回弹量。

采用Instron电子万能材料试验机对基线密封件进行压缩回弹测试，基线密封件受力位移图如图2所示，测试采用位移控制的方式，当下压到指定距离（不同的压缩率）后回到初始位置，图中a_1和a_2为下压至终止位置时基线密封件横向变化长度及压缩方向变化长度，b_1和b_2为压头卸载后基线密封件横向变化长度及压缩方向的变化长度。记录这段位移内压头受力随位移的变化曲线，设置压头下压距离为试样直径的10%～60%，压头的加载速度为 5 mm/min，初始接触载荷为 0.05 N。

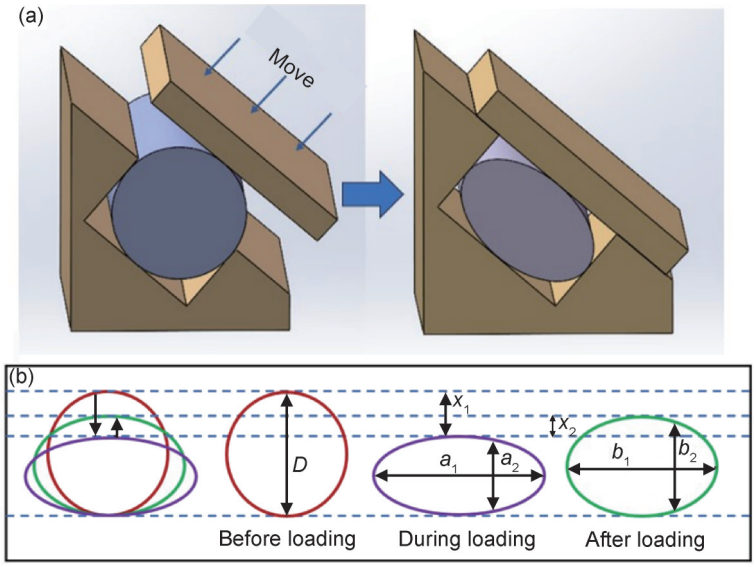


图2 基线密封件受力位移图 (a)三维位移图；(b)截面示意图

Fig.2 Force displacement diagrams of base seal (a)three-dimensional displacement diagram；(b)schematic diagram of cross-section

1.3 气密性能测试

气密性实验装置为自制工装，如图3(a)所示。在测试过程中，高压空气通过装置底部的入口进入腔体内部，并经由一个中空的模腔（充气室），空气穿过盖板与密封件的密封间隙后由装置顶部的出口流出，流量装置可测量穿透密封件的气体泄漏量，根据舱门段使用场景建立基线密封件的泄漏模型，如图3(b)所示，图中P_i为流经密封件前的压力，P_0为大气压。

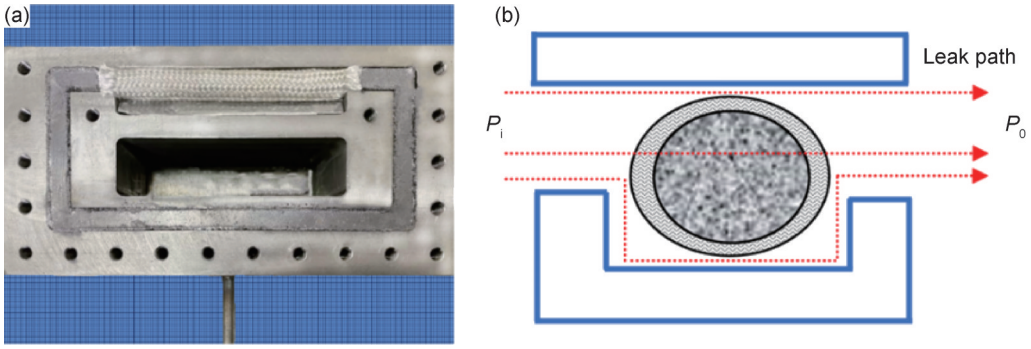


图3 气密性能检测工装(a)及泄漏通道示意图(b)

Fig.3 Airtightness test fixture(a) and diagram of leak path(b)

2　结果与分析

2.1　合金丝选材对弹性元件弹性性能的影响

对SS304和GH4169合金丝编织的弹性元件进行回弹测试，如图4所示。在40%压缩率以下，不同压缩率的SS304合金编织弹性元件的峰值载荷与GH4169合金的峰值载荷相近，且随压缩率增加呈上升趋势。当压缩率为40%时，SS304弹性元件的峰值载荷为276.8 N/m，GH4169弹性元件的峰值载荷为274.3 N/m，二者峰值载荷相差最小，约2.50 N/m；当压缩率增加至60%时，GH4169弹性元件的峰值载荷为451.25 N/m，SS304弹性元件的峰值载荷为372.50 N/m，二者峰值载荷相差最大，为78.75 N/m。SS304合金的弹性模量为193 MPa，GH4169合金的弹性模量为200 MPa，材料的弹性模量越大，其编织的弹性元件刚度越大，因此GH4169弹性元件的刚度大于SS304弹性元件。

对不同弹性元件进行压缩测试，测量弹性元件的永久变形程度。计算回弹率发现，SS304和GH4169弹性元件在40%以内的弹性性能优异，回弹率均为100.00%；50%压缩率后，SS304弹性元件的回弹率(95.73%)低于GH4169的(99.73%)；当压缩率为60%时，SS304弹性元件回弹率为85.25%，GH4169弹性元件回弹率为99.38%，原因是GH4169合金的屈服强度远高于SS304合金，制备的弹性元件不易发生塑性变形。因此，在60%的压缩率内，相比SS304合金，采用S型编织的GH4169合金丝编织的弹性元件具有更优异的弹性性能。

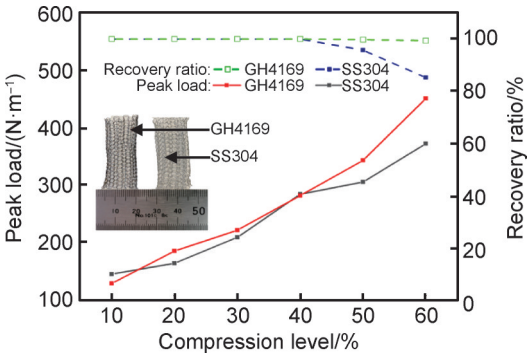


图4　不同弹性元件的弹性性能曲线

Fig.4　Curves of elastic properties of different elastic elements

2.2　填充结构对基线密封件弹性性能的影响

将填充编织棉、单轴纤维丝和编织纤维束结构的隔热棉芯填充至GH4169弹性元件，制作出多种结构的基线密封件，对其弹性性能进行评价。图5为不同填充结构密封件的弹性性能测试结果。由图5(a)可知，随着压缩率的增加，密封件受到的载荷增大，并且增幅不断变大。相比于单轴纤维丝和编织纤维束这两种结构，填充纤维棉的峰值载荷最小，具有易压缩的特点。在30%的压缩率下，三种结构的峰值载荷差别不大，分别为690.00、727.50、626.25 N/m。研究发现，30%压缩率内影响峰值载荷的主要因素是弹性元件的刚度。当压缩率为60%时，单轴纤维丝和编织纤维束峰值载荷分别为30400.00 N/m和35225.00 N/m，原因是单轴纤维丝和编织纤维束内部纤维结构更紧密不易压缩，因此当压缩率超过30%时，隔热棉芯填充结构是影响密封件峰值载荷的主要因素。

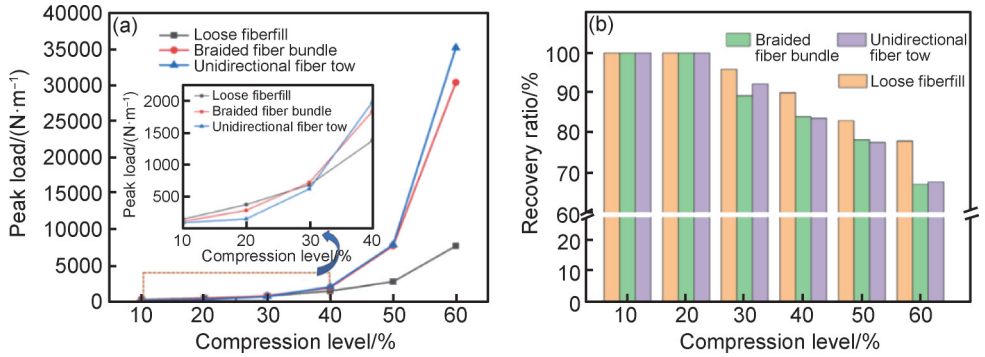


图5　不同填充结构密封件的弹性性能测试

(a)压缩率-峰值载荷；(b)压缩率-回弹率

Fig.5　Elastic property tests of seals with different filling structures

(a)compression level-peak load；(b)compression level-recovery ratio

图5(b)为不同填充结构密封件的压缩率与回弹率。当回弹率大于95%时认为是完全回弹[21]。研究发现，密封件回弹率随压缩率的增加而下降，并且填充纤维棉结构的回弹率略高于单轴纤维丝和编织纤维束结构。填充纤维棉在10%、20%、30%、40%、50%、60%压缩率下的回弹率分别为100.00%、

100.00%、95.93%、90.00%、83.00% 和 77.87%，在20%压缩率内均能完全回弹；单轴纤维丝和编织纤维束结构压缩变形所需的载荷较大，从20%压缩率开始密封件不能完全回弹，同时弹簧管发生部分永久变形，在30%、40%、50%、60%压缩率下回弹率分别为89.26%、84.03%、78.22%和67.04%；编织纤维束结构的密封件弹性与单轴纤维丝类似，通过回弹率的分析可知，填充纤维棉、单轴纤维丝和编织纤维束的最佳压缩率为30%、20%和20%，对应峰值载荷最大值分别为690.00、293.75 N/m和160.00 N/m，因此填充纤维棉结构制备的密封件压缩回弹性能更好。

相比于弹性元件，填入棉芯后的密封件压缩变形需要更高的峰值载荷，以填充纤维棉为例，密封件在10%、20%、30%、40%、50%、60%压缩率的峰值载荷分别为157.50、383.75、690.00、1378.75、2687.50 N/m和7656.25 N/m。从图4中可知，GH4169弹性元件在60%压缩率下峰值载荷仅有451.25 N/m，且回弹率高达99.67%。当峰值载荷过大时，弹性元件受到内部和外部的压力发生塑性变形。由图5(b)可知，在30%压缩率下填充纤维棉的密封件回弹率为95.93%，并且随着压缩率的增加，密封件所需的峰值载荷增大，弹性元件发生更多的塑性变形，密封件回弹率下降得更多。

2.3 循环次数对基线密封件弹性性能的影响

为了探究循环次数对密封件弹性性能的影响，选择回弹率较好的填充纤维棉结构制作的密封件进行多次压缩实验。图6为基线密封件室温下多次压缩循环测试图。当压缩率为10%时，如图6(a)所示，多次压缩下密封件的峰值载荷恒定，为156.87 N/m，密封件完全回弹并且不存在残余弹性势能；当压缩率为30%时，如图6(b)所示，此时密封件仍完全回弹，峰值载荷不变，观察曲线发现有部分残余弹性势能；当压缩率为50%时，如图6(c)所示，随着循环次数的增加，峰值载荷从2687.50 N/m降低至2555.63 N/m，密封件发生不完全回弹，并且残余弹性势能增大，同时压缩回弹曲线出现明显的锯齿状波动，密封件的回弹率也随着周期增加而降低。

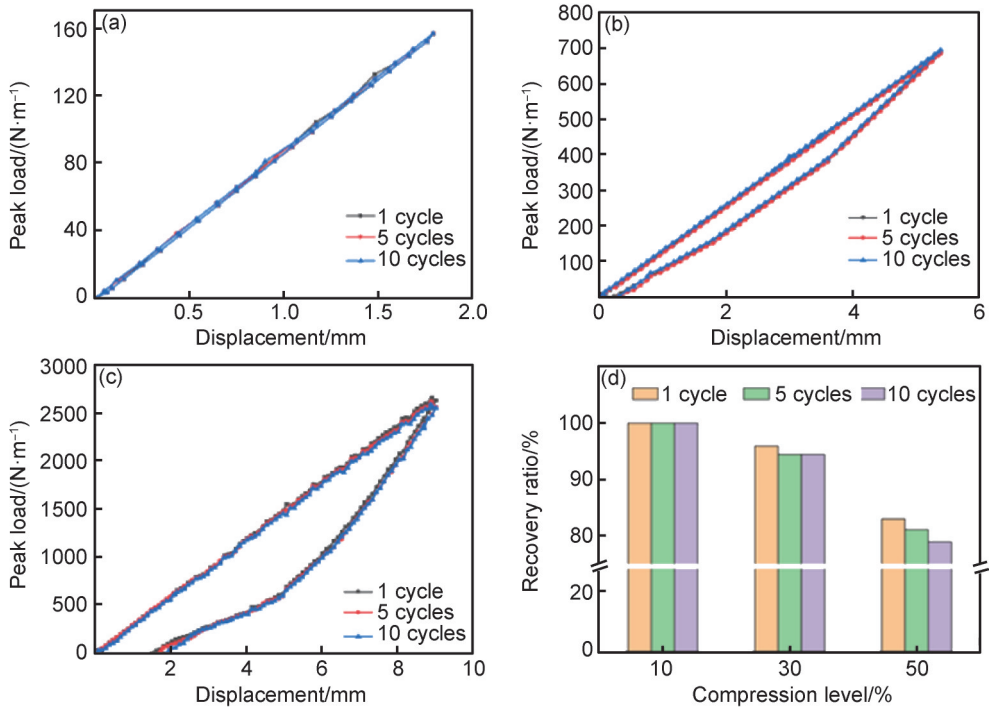


图6 不同循环次数下密封件的弹性性能

(a)10%压缩率；(b)30%压缩率；(c)50%压缩率；(d)回弹率对比

Fig.6 Elastic properties of seals with different cycles

(a)compression level of 10%; (b)compression level of 30%; (c)compression level of 50%; (d)comparison of recovery ratio

密封件多次压缩下存在大量残余弹性势能，且残余弹性势能越大，对应密封件的回弹率越低。通过对图6中压缩率为10%、30%、50%的曲线进行积分求和，得到单位长度的基线密封件10次压缩后的残余弹性势能分别为3.80、289.43 J和4770.73 J，对应回弹率分别为100.00%、94.44%和78.89%，因此降低密封件的残余弹性势能能够有效提高回弹率。

压缩循环次数影响密封件的回弹率，结果如图6(d)所示，在10%压缩率下，填充纤维棉结构密封件第1、5和10个循环周期回弹率均为100.00%；30%压缩

率下密封件的第 1、5 和 10 个循环周期的回弹率分别为 95.93%、94.44% 和 94.44%，50% 压缩率下密封件的第 1、5 和 10 个循环周期的回弹率分别为 83.00%、81.11% 和 78.89%。研究发现同一压缩率下，回弹率随着循环次数增加而降低，压缩率越大，回弹率下降的幅度越大。原因是多次压缩回弹后，一方面，隔热棉芯发生断裂，导致密封件峰值载荷降低；另一方面，弹性元件发生塑性变形，降低了密封件的弹性性能。

2.4　热处理对基线密封件弹性性能的影响

为进一步提高密封件的弹性性能，对弹性元件按照标准热处理工艺进行固溶＋时效处理，热处理后的弹性元件具有更高的屈服强度，能够有效改善密封件的弹性性能、压缩后应力松弛以及过大残余变形等问题[12,22-23]。对热处理前后的弹性元件以及使用填充纤维棉结构的基线密封件进行压缩回弹测试，结果如图 7 所示。

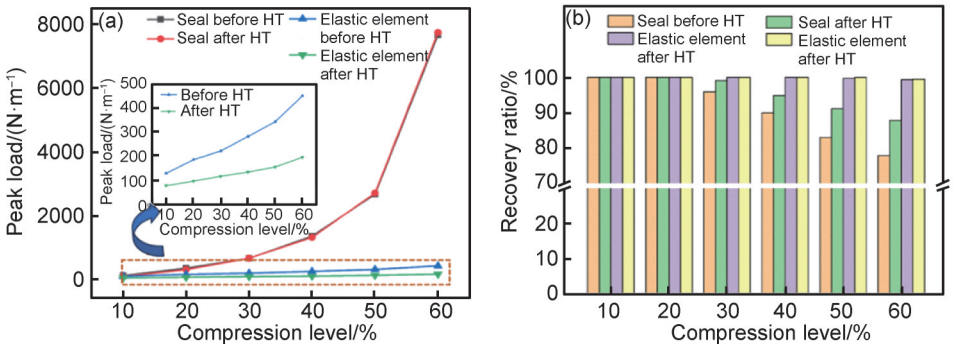


图 7　弹性元件及密封件的弹性性能测试

(a)压缩率-峰值载荷；(b)压缩率-回弹率

Fig.7　Elastic property tests of elastic elements and seals

(a)compression level-peak load；(b)compression level-recovery ratio

由图 7(a)可知，与热处理前的弹性元件相比，热处理后的弹性元件在任意压缩率下更容易压缩变形，60% 压缩率下的峰值载荷从 451.25 N/m 下降至 196.25 N/m。将热处理前后的弹性元件制备成基线密封件，热处理前的密封件在 10%、20%、30%、40%、50%、60% 压缩率下的峰值载荷分别为 150.00、383.75、690.00、1378.75、2687.50 N/m 和 7656.25 N/m，热处理后的密封件峰值载荷分别为 117.50、338.75、692.50、1342.50、2725.00 N/m 和 7733.75 N/m。使用热处理后弹性元件制备的密封件在 30% 压缩率内的峰值载荷略低于未热处理的密封件，当压缩率大于 30% 时，峰值载荷基本一致。原因是，在 30% 压缩率内，弹性元件作为主要提供回弹力的主体，因热处理的作用导致弹性元件回弹率略低于未弹性元件。而当压缩率大于 30% 时，内部填充纤维棉作为主要承受压力部分，是影响密封件峰值载荷的主要因素，两者回弹载荷趋于一致。

如图 7(b)所示，对比热处理前后弹性元件的弹性性能发现其回弹率均在 99.00% 以上，弹性性能优异。对比热处理前后的基线密封件发现，热处理后的密封件回弹率高于未热处理的，当压缩率为 60% 时，热处理前的密封件回弹率为 77.87%，热处理后的为 87.78%。因此热处理后的弹性元件具有更高的屈服强度，能够有效改善密封件的回弹性，降低压缩后的残余弹性势能。

2.5　压缩率对基线密封件气密性能的影响

基于多孔介质的假设，可以根据 Kozeny-Carman 方程建立密封泄漏速率与密封组件内外部压强之间的函数关系[24]。

$$\frac{M}{L}=\frac{\left(P_{\mathrm{i}}^{2}-P_{0}^{2}\right)}{R} \tag{3}$$

式中：$\frac{M}{L}$为单位长度密封件的泄漏速率，g/(m·s)；R为流阻。

流阻 R 分为内部流阻 R_{sl} 和表面流阻 R_{e}，表达式为：

$$R_{\mathrm{sl}}=C_{1}\cdot K\cdot\frac{tL}{A_{\mathrm{C}}}\cdot\frac{(1-\varepsilon)^{2}}{D_{\mathrm{p}}} \tag{4}$$

$$R_{\mathrm{e}}=C_{2}\cdot K\cdot\frac{t}{y_{0}^{3}} \tag{5}$$

$$K=\frac{\mu R_{\mathrm{g}}T}{M_{\mathrm{w}}} \tag{6}$$

式中：C_1 和 C_2 为流阻的比例系数；t 为多孔介质床层厚度，m；L 为密封条的长度，m；A_{C} 为密封流域横截面积，m²；ε 为多孔介质孔隙率，%；D_{p} 为密封组件颗粒直径，m；y_0 为密封组件与密封表面之间的缝隙，m；μ 为气体运动黏度系数，Pa·s；R_{g} 为气体常数；T 为气体绝

对温度，K；M_w为空气摩尔质量，kg/mol；K为与通入的气体μ、R_g、T和M_w等常数相关的量。

$$D_p = 1.5D_f\frac{L/D_f}{L/D_f+0.5} \tag{7}$$

式中：D_f为密封组件纤维直径，m。当L/D_f的比值非常大时，D_p可简化为：

$$D_p = 1.5D_f \tag{8}$$

由密封件的结构可知，外部编织套管为石英纤维（质量分数为99%的SiO_2），直径分布在9～10 μm，内部隔热棉芯为陶瓷纤维（质量分数为53%的SiO_2和47%的Al_2O_3），直径分布在4.5～6 μm，根据编织套管和隔热棉芯的质量分数确定平均纤维直径理论值为7.4 μm。通过排水法测试密封件整体的孔隙率为58.8%，弹性元件是由GH4169编织而成的金属框架，泄漏气体可完全通过金属编织弹簧管，其泄漏流阻忽略不计。

为了研究压缩率和气压差对密封件气密性能的影响，对填充纤维棉结构的基线密封件进行不同压缩率下的气密性能实验，如图8所示。结果表明，密封件随着压缩率的增加泄漏速率降低，并且在同一压缩率下，压差越大，密封件的泄漏速率越大。通过建立泄漏模型计算出基线密封件在不同压差下的泄漏速率，模型计算泄漏率与实验值泄漏规律一致，即气体泄漏速率随压差增大而增加，且增大斜率及趋势相同，其原因是密封件的孔隙率和密封流域横截面积减小，密封件宽度以及缝隙发生改变。

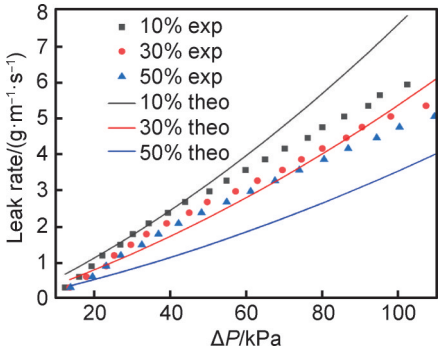


图8 不同压缩率下气密实验与理论数据对比

Fig.8 Comparison of airtightness test and theoretical data under different compression levels

与理论值相比，实验测得的密封件气体泄漏速率偏大，在10%、30%和50%压缩率下，对应相对误差最大值分别为22.3%、25.2%和68.9%。从密封件气密实验和多孔介质模型两方面进行研究分析，造成气体泄漏误差的原因为：(1)模型仅考虑表面和内部流阻，未考虑密封件两端与气密检测装置间的泄漏通道，流阻的实验值偏小，导致气体泄漏速率的实验值偏大；(2)压缩率为10%时，密封件回弹率为100%，未发生永久变形，而在30%和50%压缩率下，密封件的回弹率分别为98.78%和91.50%，说明50%压缩率发生的永久变形程度更大，导致y_0（取值为密封件直径的千分之一）理论值取值偏大，使泄漏模型中表面流阻理论值偏小，最终导致50%压缩率下的泄漏速率理论值与实验值误差较压缩率为10%和30%的误差值更大；(3)密封件在50%压缩率下所需压力非常大，易造成内部纤维棉断裂，因此密封件孔隙率的理论值偏小，流阻的理论值偏大，导致泄漏速率的理论值偏小，并且误差随着压缩率的增大而增加；(4)由于弹性元件不存在泄漏流阻，因此多孔介质床层厚度的理论值偏大，气体泄漏速率的理论值偏低，但丝径的宽度低于多孔介质床层厚度两个数量级，因此多孔介质床层厚度的取值对密封件气体泄漏速率的影响有限。

3 结论

(1)合金材料的弹性模量和屈服强度越高，弹性元件的刚度和弹性性能越好，GH4169编织的弹性元件相比于SS304具有更高的峰值载荷和回弹率；隔热棉填充结构影响密封件的弹性性能，填充纤维棉结构密封件的回弹率较高，原因是相同位移量下峰值载荷较低，弹性元件塑性变形程度低。

(2)对弹性元件进行标准热处理后，60%压缩率下的弹性元件回弹率均在99.00%以上，而峰值载荷由未热处理的451.25 N/m下降至196.25 N/m，密封件的回弹率由未处理的77.87%提高到87.78%。

(3)随着循环次数的增加，密封件峰值载荷和回弹率下降，填充纤维棉结构的密封件在30%压缩率内重复使用10个周期仍完全回弹，说明密封件的残余弹性势能越大，回弹率越低，峰值载荷下降。

(4)基线密封件的泄漏速率随着压缩率的增加而下降，随着压差的增大而升高，泄漏速率实验值和理论值误差受密封件弹性性能和隔热棉芯的影响。

参考文献

[1] MCBRIDE D U. Subsurface flow considerations in thermal protection design[C]// 20th Aerospace Sciences Meeting. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1982: 1-25.

[2] FINKBEINER J, DUNLAP P H, STEINETZ B. Investigations of shuttle main landing gear door environmental seals[C]// 40th IAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005: 1-5.

[3] 李凡,王树浩,陈江涛,等.飞行器典型热密封结构[J].宇航材料工艺,2013,43(1):20-25.
LI F, WANG S H, CHEN J T, et al. Typical high-temperature seal structure of reusable and hypersonic vehicles[J]. Aerospace Materials & Technology, 2013,43(1):20-25.

[4] DUNLAP P H, DEMANGE J J, STEINETZ B M. Performance evaluations of ceramic wafer seals[C]// 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Sacramento, California: AIAA, 2006.

[5] GLASS D E, DIRLING R B, CROOP H, et al. Materials development for hypersonic flight vehicles[R]. Hampton, Virginia: NASA Langley Research Center, 2006.

[6] STEINETZ B M, DELLACORTE C, MACHINCHICK M. High temperature dynamic engine seal technology development[R]. Cleveland, OH: Lewis Research Center,1992.

[7] NEWQUIST C W, VERZEMNIEKS J,KELLER P C,et al. Advanced high temperature structural seals[R]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration,2000.

[8] DUNLAP P H, STEINETZ B M, DEMANGE J J, et al. Investigations of control surface seals for reentry vehicles[C]// 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Indianapolis, Indiana: AIAA, 2002.

[9] 张宇玮,姜艳青,石刚,等.高温基线密封研究进展[J].宇航材料工艺,2011,41(2):21-25.
ZHANG Y W, JIANG Y Q, SHI G, et al. Advanced high temperature baseline seals[J]. Aerospace Materials & Technology, 2011,41(2):21-25.

[10] 王振峰,高扬,徐晓亮,等.航天器高温热密封设计方法及性能评价[J].宇航学报,2018,39(7):793-800.
WANG Z F, GAO Y, XU X L, et al. Design method and performance evaluation criteria of advanced spacecraft heat seal[J]. Journal of Astronautics, 2018,39(7):793-800.

[11] DUNLAP P H, STEINETZ B M, DEMANGE J J, et al. Toward an improved hypersonic engine seal[C]// 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Huntsville, Alabama: AIAA,2003.

[12] 韩硕.高温热密封结构设计及试验验证[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
HAN S. Structural design and experimental verification of high temperature seal[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

[13] 张恒瑞.编织弹簧-陶瓷纤维基线密封件的隔热性能优化[D].天津:天津大学,2022.
ZHANG H R. Thermal insulation optimization of the braided spring/ceramic fiber baseline seals[D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.

[14] 黄乾尧,李汉康. 高温合金[M].北京:机械工业出版社,2000.
HUANG Q Y, LI H K. Superalloy[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.

[15] 丁天胜,张显程,涂善东,等.热处理对GH4169合金组织及650 ℃下低周疲劳性能的影响[J].材料热处理学报,2016,37(4):69-75.
DING T S, ZHANG X C, TU S D, et al. Effect of heat treatment on microstructure and low cycle fatigue performance of GH4169 alloy at 650 ℃[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2016,37(4): 69-75.

[16] 刘永飞,刘宏亮,赵献益,等.固溶时效对Inconel 718合金组织和力学性能的影响[J].机械工程材料,2016,40(3):49-51.
LIU Y F, LIU H L, ZHAO X Y, et al. Influences of solid solution and aging processes on microstructure and mechanical properties of Inconel 718 alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering,2016, 40(3): 49-51.

[17] LI W, GUO Y B, BARKEY M E, et al. Effect tool wear during end milling on the surface integrity and fatigue life of Inconel 718[J]. Procedia CIRP, 2014, 14: 546-551.

[18] 顾钰熹.特种工程材料焊接[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,1998.
GU Y X. Welding of special engineering materials[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press,1998.

[19] 张荣,柳中强,黄嘉豪,等.热处理对激光选区熔化成形Inconel 718合金显微组织结构和力学性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2021,50(1):255-262.
ZHANG R, LIU Z Q, HUANG J H, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(1): 255-262.

[20] 干梦迪,种晓宇,冯晶.航空航天高温结构材料研究现状及展望[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2021,46(6):24-36.
GAN M D, CHONG X Y, FENG J. Research status and prospects of aerospace high-temperature structural materials[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021,46(6): 24-36.

[21] 薛云嘉.编织弹簧-陶瓷纤维热密封组件的制备及其性能的研究[D].天津:天津大学,2018.
XUE Y J. Preparation and properties of braided spring/ceramic fiber thermal barrier seals[D].Tianjin:Tianjin University,2018.

[22] 彭祖军.高温动密封结构设计与分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
PENG Z J. Structure design and analysis of high-temperature dynamic seal[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.

[23] 李校男.热密封结构弹性元件力学性能分析与设计[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
LI X N. Analysis and design of mechanical properties of elastic elements for thermal seal structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[24] 刘俊立,徐志高,张峰,等.编织热密封组件的高温密封性能[J].纺织学报,2021,42(10):84-91.
LIU J L, XU Z G, ZHANG F, et al. High-temperature sealing performance of braided heat-sealed components [J]. Journal of Textile Research, 2021, 42(10): 84-91.

基金项目:基础科研项目资助(2022204B003)
收稿日期:2024-05-07;**录用日期**:2024-05-29
通讯作者:李鹏廷(1986—),男,副教授,博士,研究方向为先进材料制备等,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:王　晶)