

# 用于热密封组件的编织弹簧弹性性能分析

薛云嘉, 贾 韬, 王锐桐, 邢海民, 刘家臣

(天津大学, 天津 300350)

**摘 要:** 针对耐高温动态热密封组件中的常用元件弹性支架编织弹簧, 研究了其压缩率、装配方式、热暴露温度等参数对其弹性性能的影响, 并讨论了编织弹簧高温弹性失效的原因。研究表明, 合金的氧化是编织弹簧高温回弹率降低的主要原因, 在温度低于 800 °C、压缩率小于 50% 的服役条件下, 编织弹簧的回弹率不小于 95%, 在航天热密封领域有广阔的应用前景。

**关键词:** 高超声速飞行器; 动态热密封组件; 编织弹簧; 弹性性能

**中图分类号:** TG113.25+2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2020)02-0494-06

自从高超声速飞行器的概念提出至今, 已发展出许多具有独特技术特点的飞行器<sup>[1,2]</sup>。近年来, 临近空间高超声速飞行器以其广阔的发展前景、重大的经济军事价值备受各国关注<sup>[3,4]</sup>。美国早在 20 世纪中期便开始了相关的探索<sup>[5]</sup>, 具有深厚的研究和技术基础。高超声速飞行器飞行速度超过 5 倍音速, 表面经受非常显著的气动加热, 表面温度最高可达 2000 °C<sup>[6,7]</sup>。飞行器表面不是全封闭的, 存在着许多缝隙, 如飞行器的控制和起落架舱门等位置, 高温气流一旦从活动缝隙进入飞行器内部, 损坏内部不耐温的元器件, 将会导致灾难性的事故发生。因此。对于高超声速飞行器而言, 发展热密封技术, 阻止热气流进入飞行器内部对保障飞行器安全服役具有重要意义<sup>[8,9]</sup>。

根据密封件与周围环境的接触状态, 密封可以分为静密封和动密封两类。隔热材料是指用来阻隔热量传递的材料。根据隔热材料的应用, 这种材料应该具有较低的导热率。材料的结构决定材料的性质, 因此, 在结构上, 隔热材料应该具有较高的气孔率, 是一种轻质多孔材料<sup>[10,11]</sup>。21 世纪初, 美国格伦研究中心设计了一种耐高温柔性动密封组件的结构<sup>[12]</sup>, 如图 1 所示。在这种结构中, 以镍基高温合金编织弹簧为骨架, 内部填充隔热的无机纤维棉, 外部包裹耐温耐火的陶瓷纤维编织套管。与开放间隙条件相比, 在飞行器表面的活动间隙中安装这样的热密封组件可以使得密封位置的温度大幅度下降。这种密封件具有优良的高温弹性性能, 可以适应一定范围内缝隙大小的变化<sup>[13,14]</sup>。能够在 600 °C 以上高温, 承受较大复杂应力, 并具有

表面稳定性的高合金化铁基、镍基、或钴基奥氏体金属材料, 被称为高温合金<sup>[15]</sup>。高温合金在 700 °C 至 1100 °C 之间受到相变、氧化等显微组织变化的影响往往容易发生力学性能变化<sup>[16-18]</sup>。密封件的弹性性能是保障密封件与活动缝隙良好接触的关键。由超细高温合金丝构成的编织弹簧是组件的主要弹性来源<sup>[19,20]</sup>, 是维持密封结构与密封面的良好接触、防止热气流进入飞机内部的重要结构。但对于这种编织弹簧的弹性性能研究还缺乏系统性的报道。本实验针对这种热密封组件的未来应用需求, 系统地研究弹簧管的弹性性能, 为未来这种热密封组件的推广应用, 提供更加丰富的数据支持。

## 1 实 验

采用全自动合金弹簧编织机, 以直径为 0.12 mm

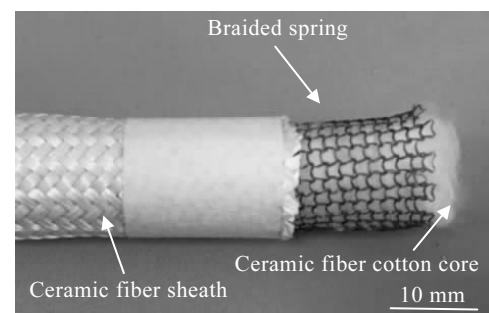


图 1 耐高温动态热密封组件实物图

Fig.1 Photograph of high temperature dynamic thermal barrier seals

收稿日期: 2019-02-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51772203)

作者简介: 薛云嘉, 女, 1993 年生, 硕士, 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350, 电话: 022-85356661, E-mail: xueyj@tju.edu.cn

的镍基高温合金丝为原料，以 12 针、2 股丝线制备均匀稳定的直径  $D=12.5\text{ mm}$  的编织弹簧。随后用无水乙醇反复超声清洗 2~4 次，洗去编织弹簧表面加工机油。在鼓风干燥箱中  $60\text{ }^\circ\text{C}$  保温 15 min 烘干表面无水乙醇后，对编织弹簧进行时效热处理。最后，将制备好的编织弹簧空管剪裁为长  $l=35\text{ mm}$  的样品以备后续的弹性性能测试。

采用万能试验机 (CSS-44001) 进行弹性性能测试。万能试验机选取 5 kN 量程，将 35 mm 长的编织弹簧样品放置于矩形样品槽 (如图 2a 所示) 中，以 3 mm/min 的加载和卸载的速度、控制位移的方法测试弹簧管室温下不同服役参数的压缩回弹性能。将测试样品放入如图 2a 所示矩形样品槽中，沿编织弹簧的径向加压，多次加压卸载循环，行程如图 2b 和 2c 所示，获得力-时间、力-位移、位移-时间的曲线。其中力-位移曲线如图 3a 所示，完全回弹、不完全回弹以及弹性失效的样品的测试曲线差别很大。力-位移曲线是测试编织弹簧弹性性能的重要测试数据。当负载小于 0.05 N 时，认为万能试验机的压头与待测样品脱离接触，弹簧管达到最大恢复量。当弹簧管的回弹率大于 95% 时认为是完全回弹，小于 5% 时认为完全不回弹，当回弹率介于 5%~95% 之间时，认为编织弹簧仍然具有弹性，但不完全回弹。

在分析时，需对数据进行归一化处理，将力-位移曲线转换成负载-应变的曲线。以不完全回弹曲线为例，如图 2b 和 2c 所示，当弹簧管发生变形时，垂直方向减小，横向加宽，卸载后会恢复一定的变形。如图 3b 所示，在图中可以获得峰值弹力  $F$ 、压缩量  $x$ 。

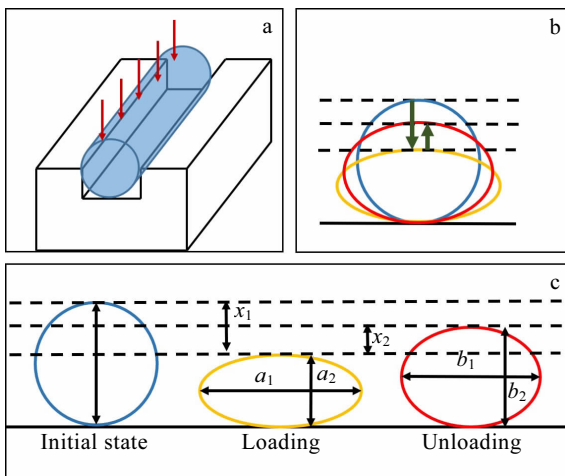


图 2 编织弹簧弹性性能测试示意图

Fig.2 Schematic diagram of braided spring elastic performance test: (a) test fixture and loading direction; (b, c) test procedure

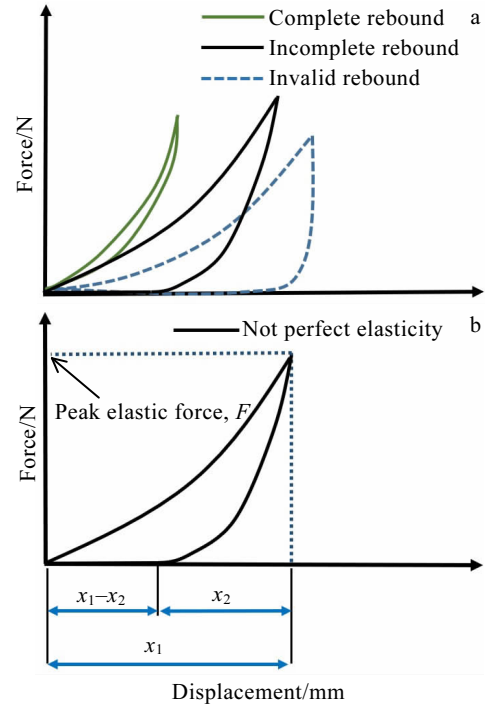


图 3 编织弹簧管弹性性能测试参数说明

Fig.3 Parameter definition of the braided spring elastic performance test

其中负载  $P$  (N/m)、以及应变  $s$  的计算方式如式 (1)、(2) 所示:

$$P = \frac{F}{l} \tag{1}$$

$$s = \frac{x}{D} \tag{2}$$

其中， $F$  为力 (N)， $l$  为样品长度 (m)， $x$  为位移 (m)， $D$  为弹簧管直径，是常量  $D=12.5\text{ mm}$ 。

在分析弹性性能时，如图 2c 和图 3b 所示， $D$  为弹簧管的直径 (mm)， $x_1$  为压缩量， $x_2$  为回弹量， $x_1-x_2$  为弹簧的永久变形量。压缩率  $p$  计算如式 (3) 所示，回弹率  $q$  计算如式 (4) 所示:

$$p = \frac{x_1}{D} \tag{3}$$

$$q = \frac{x_2}{x_1} \tag{4}$$

## 2 分析和讨论

### 2.1 压缩率对弹性性能的影响

#### 2.1.1 压缩率对回弹率的影响

图 4 是将弹簧管样品放置于深度为 2.5 mm、宽度为 18 mm 的矩形凹槽中分别压缩 10%、30%、50% 和

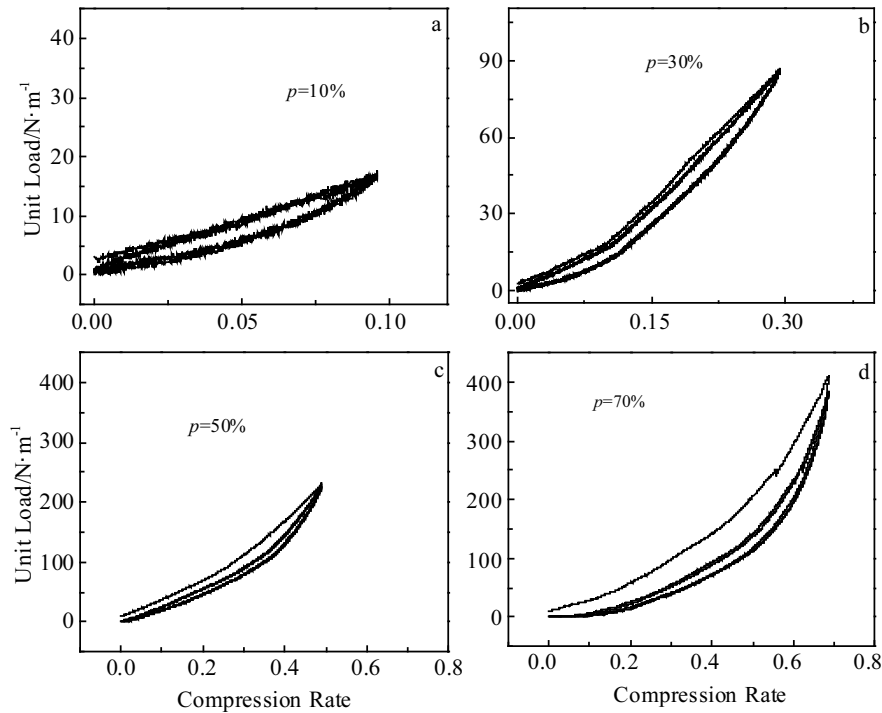


图 4 不同压缩率编织弹簧的压缩回弹曲线

Fig.4 Compression rebound curves of braided spring under different compression rates: (a) 10%, (b) 30%, (c) 50%, and (d) 70%

70%循环 3 次得到的压缩回弹的载荷-形变曲线。其中图 4a 和 4b 是编织弹簧压缩 10%、30%时压缩回弹曲线图。从图上可以看到，从第 2 周期开始压缩回弹曲线相互重叠，峰值弹力和回弹率都没有明显衰减，编织弹簧具有良好的弹性。通过对样品 10%~70%室温压缩回弹循环测试的曲线结果进行整理，如图 5 所示。弹簧管在室温下具有优良的弹性性能，当压缩率小于 50%时，回弹率可以达到 95%以上，当压缩率为 70%时，弹簧管开始发生部分永久变形，不能完全回弹。

回弹率会影响热密封组件与周围的接触强度，会存在密封隐患，因此，在设计密封件服役时，应尽量将形变率控制在完全回弹的范围内。

### 2.1.2 压缩率对峰值弹力的影响

足够的弹力是保证密封件与密封界面良好接触的的必要条件。图 6 是弹簧管室温下压缩率与峰值弹力的关系曲线。峰值弹力取自弹簧管压缩回弹曲线第 2 周期至第 5 周期循环时最大压缩率处的负载的平均值。可见，随着压缩率的增加，弹簧的弹力不断增加。当

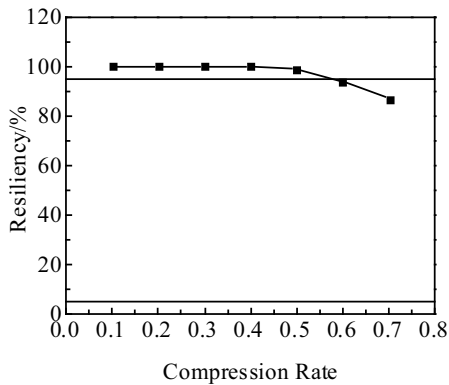


图 5 编织弹簧的压缩率与回弹率的关系图

Fig.5 Relationship between the compression rate and the resiliency of the braided spring

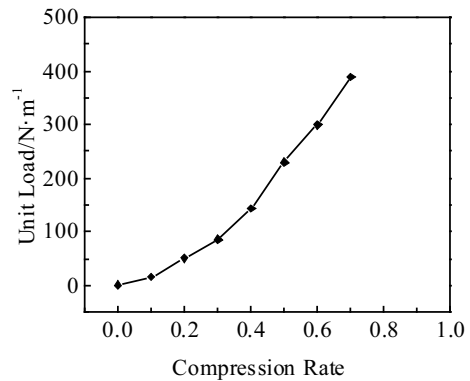


图 6 编织弹簧压缩率与弹力的关系曲线

Fig.6 Relationship between the compression rate and the peak elastic force of the braided spring

压缩率小于 10%时，负载小于 30 N/m。接触面的支撑力比较弱，会对密封产生消极影响。当压缩率大于 60%时，负载大于 300 N/m，但此时弹簧并不能完全回弹。

综上所述，编织弹簧在最大变形率处会取得峰值力，峰值力的大小随着压缩率的增加而增加，峰值力与位移的关系呈正相关。

### 2.2 装配槽的尺寸对弹性性能的影响

#### 2.2.1 弹簧管压缩变形尺寸变化分析

如图 7 所示，将弹簧管放在万能试验机的载物台上，调节万能试验机的程序控制参数，精确控制压缩率，通过量取短径值  $a_2$  的大小与表 1 计算结果对照验证压缩量是否符合要求，并测量弹簧管压缩时的长径值  $a_1$ ，反复 3 次取平均值，结果如表 1 所示，随着压缩率的不断增加，弹簧管的横向会不断变宽。

#### 2.2.2 装配槽尺寸对编织弹簧弹性性能的影响

设计如图 7 所示对照试验。图 7a 中编织弹簧所在凹槽横向宽度为 13 mm，弹簧管压缩变形时凹槽横向会对弹簧管产生约束，图 7b 中编织弹簧横向可以自由变形。2 个样品均压缩 30%。当弹簧管压缩 30%时，

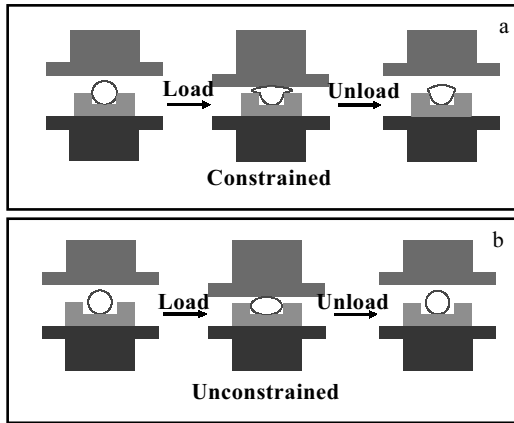


图 7 编织弹簧的截面形状变化示意图

Fig.7 Schematic diagram of the cross section shape change of braided spring during elastic performance test: (a) constrained fixture and (b) unconstrained fixture

表 1 弹簧管压缩变形时尺寸变化

Table 1 Dimensional change of braided spring under different compression rates

Compression rate	$a_1$ /mm	$a_2$ /mm
0.0	12.50	12.50
0.1	14.50	11.25
0.2	15.00	10.00
0.3	16.50	8.75
0.4	17.00	7.50

图 7a 编织弹簧由于径向受约束不能自由变形，压缩时多余的体积均从缝隙中挤出，弹簧管沿缝隙方向产生不可恢复的折痕。图 7b 中编织弹簧无约束压缩变形，其压缩回弹曲线如图 8 中的红色曲线所示。压缩率为 30%时峰值弹力为 85 N/m，可以完全回弹。受约束的编织弹簧管压缩 30%的压缩回弹曲线如图 8 黑色曲线所示，其峰值弹力为 401 N/m，大于 7b 中的峰值力。图 7a 中由于横向约束使得弹簧管产生的永久变形对于密封件的可重复使用有消极影响。

可见，在设计这种柔性密封条的装配结构时，不应按照密封条自然状态下的直径直接设计镶嵌式的装配槽，应充分考虑弹簧管压缩时的横向加宽，密封凹槽设计时为弹簧管的变形预留自由空间有利于获得更好的弹性性能。

### 2.3 保压时间对弹性性能的影响

将样品压缩 30%，万能试验机压头位移保持 3 h (10 800 s)，图 9 为编织弹簧在室温下压缩 3 h 的时间和单位负载的曲线图。如图 9 所示，在压缩过程中，弹簧管的弹力没有发生明显衰减变化，忽略每次实验清零产生的误差，可见，弹簧管长时间压缩仍然保持与循环实验一致的峰值弹力，保证密封件装配到相应服役部位后，在预压保持过程中不会发生弹力衰减而使得密封失效。

### 2.4 温度对编织弹簧弹性性能的影响

将编织弹簧剪成 35 mm 长样品，在 500、600、700、800、900、1000、1100、1200 °C 空气气氛下保温 30 min 进行耐高温实验，待样品冷却后对其进行表征和测试。编织弹簧合金丝表面在 500~700 °C 之间仍然保持表面结晶光滑，当合金丝的加热温度达到 800 °C 时，表面开始出现氧化，如图 10 所示，合金丝表面氧化颗粒

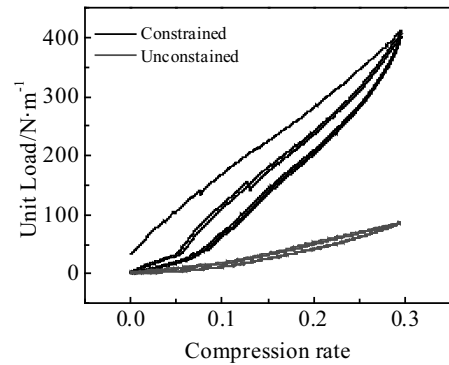


图 8 受约束和无约束的编织弹簧压缩 30%时压缩回弹曲线  
Fig.8 Compression rebound curves of braided spring under 30% compression rate with constrained fixture and unconstrained fixture

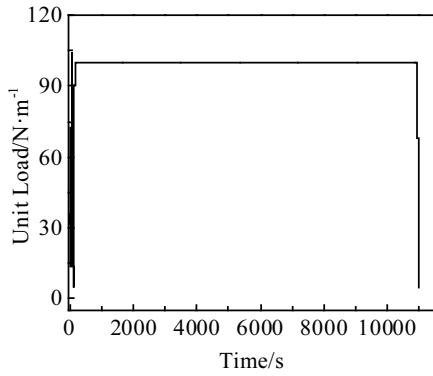


图 9 压缩 3 h 的负载-时间曲线图

Fig.9 Load-time curve of braided spring under compression for 3 h

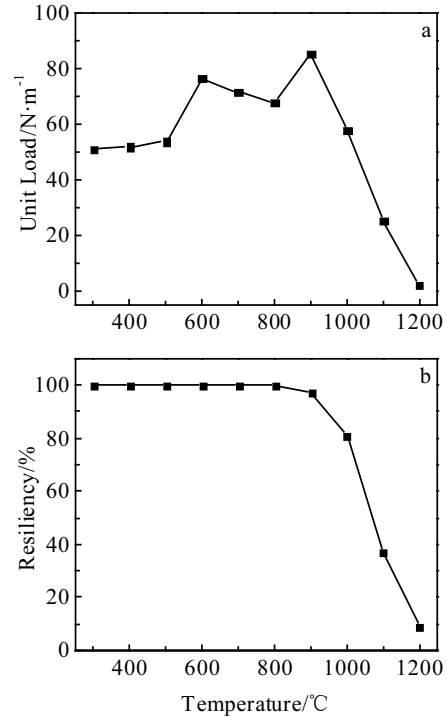


图 11 编织弹簧热暴露温度与压缩测试峰值弹力、回弹率的关系

Fig.11 Relationship between the heat exposure temperature and the peak elastic force (a), the resiliency (b) of the braided spring

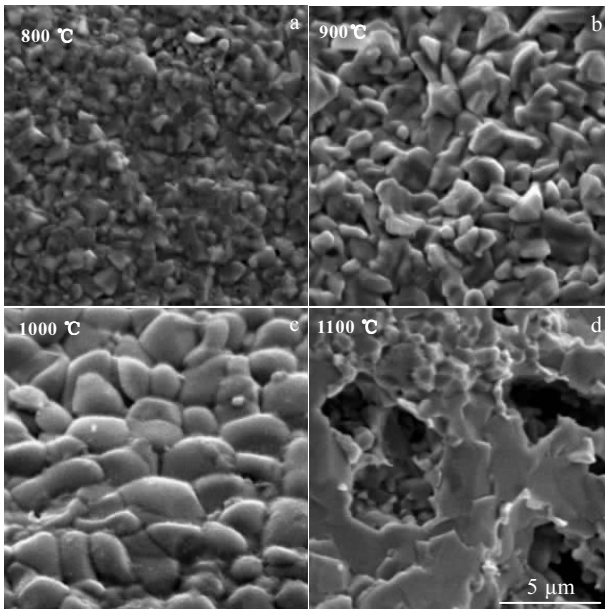


图 10 不同温度热暴露后样品显微形貌

Fig.10 Morphologies of samples after heat exposure at various temperatures: (a) 800 °C, (b) 900 °C, (c) 1000 °C, and (d) 1100 °C

逐渐形成致密的氧化物颗粒附着在合金丝表面。随着温度升高，合金丝表面的氧化物颗粒逐渐长大，1000 °C 时表面氧化物颗粒的平均直径为 3~5 μm。当温度达到 1100 °C 时，合金丝氧化严重，氧化层易开裂，失去保形变形能力。

对从 300 °C 至 1000 °C 之间历经空气气氛热暴露实验的编织弹簧进行室温下的压缩回弹测试，以 3 mm/min 的速度进行 20% 的压缩试验，循环 5 次，对不同温度的峰值弹力和回弹率进行整理，如图 11 所

示。图 11a 为不同温度下编织弹簧压缩 20% 时峰值弹力的折线图。随着温度升高，其峰值弹力整体趋势下降，超过 900 °C 后峰值弹力迅速衰减，在 1200 °C 受到压缩时几乎没有反作用弹力。值得注意的是，在 600~900 °C 之间，有一个反常的提升，这是由于合金丝表面有强化相析出对编织弹簧的整体强度有一个提高。图 11b 为不同温度下编织弹簧压缩 20% 时回弹率的折线图。取压缩回弹曲线的第 5 周期的回弹率，如图所示，当温度大于等于 900 °C 后，随着温度提高回弹率逐渐下降，当温度达到 1200 °C 时，几乎失去弹性。

可见，编织弹簧服役时在 800 °C 以下热暴露后可以保持完全弹性，当温度高于 900 °C 后开始出现弹性衰减。因此，整个组件的编织外套应具有一定的阻热能力，以保证到达编织弹簧的热气流温度低于 800 °C，从而使得整个热密封组件保持良好的弹性性能。编织弹簧作为耐高温动态热密封组件的一部分，并不能完全代表这种组件的弹性性能，编织外套、隔热棉芯等对其的影响还有待更加深入的工作进行进一步研究。

### 3 结 论

1) 耐高温动态热密封组件的弹性支架编织弹簧

在压缩率小于 50%, 温度低于 800 °C 下可以保持完全弹性。

2) 室温下编织弹簧随着压缩率增加峰值弹力逐渐增加, 压缩 30% 保持 3 h, 也不会发生弹力衰减。

3) 当服役温度高于 800 °C 时, 编织弹簧回弹率明显下降的主要原因是由于合金丝的氧化。

4) 编织弹簧压缩服役装配时凹槽设计应考虑密封件变形需要的自由空间, 有约束的压缩会产生不可恢复的变形。

#### 参考文献 References

- [1] Zhang Lijing(张丽静), Liu Dongsheng(刘东升), Yu Cungui(于存贵) *et al.* *Aero Weaponry*(航空兵器)[J], 2010(2): 13
- [2] Hu Jidong(胡继东), Zuo Xiaobiao(左小彪), Feng Zhihai(冯志海). *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*(航天返回与遥感)[J], 2011, 32(3): 88
- [3] Guo Pengfei(郭鹏飞), Yu Jiaqi(于加其), Zhao Liangyu(赵良玉). *Winged Missiles Journal*(飞航导弹)[J], 2012(11): 17
- [4] Huang Wei(黄伟), Xia Zhixun(夏智勋). *National Defense Science & Technology*(国防科技)[J], 2011(3): 17
- [5] Fan Xuqi(范绪箕). *Pneumatic Heating and Thermal Protection System*(气动加热与热防护系统)[M]. Beijing: Science Press, 2004: 36
- [6] Bolender M A, Doman D B. *Journal of Spacecraft & Rockets* [J], 2007, 44(2): 374
- [7] Tang Guiming(唐贵明). *Acta Aerodynamica Sinica*(空气动力学学报)[J], 1989, 7(1): 88
- [8] Chen Yufeng(陈玉峰), Hong Changqing(洪长青), Hu Chenglong(胡成龙) *et al.* *Advanced Ceramic*(现代技术陶瓷)[J], 2017, 38(5): 311
- [9] Xin Jianqiang(辛健强), Chen Jingmao(陈景茂), Dong Yongpeng(董永朋) *et al.* *Tactical Missile Technology*(战术导弹技术)[J], 2017(1): 47
- [10] Li Qingbin, Pan Zhihua. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*[J], 2011, 30(5): 1089
- [11] Yang Zhen(杨震), Qing Ning(卿宁). *New Chemical Materials*(新型化工材料)[J], 2011, 39(5): 21
- [12] Peng Xudong(彭旭东), Wang Yuming(王玉明), Huang Xing(黄兴) *et al.* *Hydraulics Pneumatics & Seals*(液压气动与密封)[J], 2009, 29(4): 4
- [13] Dunlap P H, Steinetz B M, Curry D M *et al.* *Journal of Spacecraft & Rockets*[J], 2003, 40(4): 570
- [14] Demange J, Bott R, Dunlap P. *17th International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference* [C], San Francisco: AIAA, 2011: 17 879
- [15] Zhou Yongjun(周永军), Wang Ruidan(王瑞丹). *Journal of Shenyang Aerospace University*(沈阳航空工业学院学报)[J], 2006, 23(1): 35
- [16] Zhao Shuangqun(赵双群), Dong Jianxin(董建新), Zhang Maicang(张麦仓) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(2): 208
- [17] Zhao Shuangqun(赵双群), Zhang Maicang(张麦仓), Dong Jianxin(董建新) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(12): 991
- [18] Shui Li(水丽). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(4): 1054
- [19] Taylor S, Dunlap P, Demange J *et al.* *40th Joint Propulsion Conference and Exhibit*[C]. Fort Lauderdale: AIAA, 2004: 14 679
- [20] Song Jieguang(宋杰光), Liu Yonghua(刘勇华), Chen Linyan(陈林燕) *et al.* *Material Review*(材料导报)[J], 2010, 24(15): 378

## Elastic Properties of Braided Spring Used in Thermal Barrier Seals

Xue Yunjia, Jia tao, Wang Ruitong, Xing Haimin, Liu Jiachen

(Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** The effects of the compression, assembly and heat exposure temperature on the elastic properties of the braided spring used as the elastic support of thermal barrier seals were investigated, and the reason for elastic failure of the braided spring at high temperature was also discussed. The results show that the oxidation of alloy is the main reason for reduced resiliency of braided spring at high temperature, and the resiliency of braided spring is more than 95% when the compression is less than 50% below 800 °C, indicating that the as-prepared braided spring may have broad application prospects in aerospace thermal barrier.

**Key words:** hypersonic aircraft; dynamic thermal barrier seals; braided spring; elastic properties

Corresponding author: Xue Yunjia, Master, School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, P. R. China, Tel: 0086-22-85356661, E-mail: xueyj@tju.edu.cn