

压缩比对金属橡胶结构和压缩力学性能影响

高 笛¹, 马艳红^{1,2}, 洪 杰^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 加工了具有相同尺寸和质量多个金属橡胶, 而各金属橡胶对应不同高度的毛坯, 引入“压缩比”概念, 即毛坯高度和模压后金属橡胶成品高度之比, 分析压缩比对金属橡胶结构和力学特性的影响. 准静态试验结果表明: 压缩比会显著的影响金属橡胶的表观结构以及各向异性力学特性, 压缩比较大, 到达 5~6 时, 金属橡胶表观的螺旋丝呈现有序的竖立堆积状, 同时成型方向刚度偏小; 而压缩为 2 时, 成型方向刚度很大, 非成型方向刚度相比于其余压缩比试件明显偏小. 试验结果表明: 在金属橡胶的加工和设计过程中, 需要考虑压缩比对性能的影响.

关 键 词: 金属橡胶; 压缩比; 准静态试验; 表观结构; 各向异性

中图分类号: V250.3

文献标志码: A

Influence of compression ratio on microstructure and mechanical behavior of metal rubber

GAO Di¹, MA Yan-hong^{1,2}, HONG Jie^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: Metal rubber specimens of the same size and mass were manufactured separately with different roughcast heights, and the compression ratio was defined as the ratio of the roughcast height to the metal rubber height. So these different compression ratio specimens were analyzed and then subjected to compression loading in quasi-static regime. The results exhibited that the compression ratio significantly influenced the metal rubber apparent structure and the anisotropy properties along molding and non-molding directions. When the compression ratio was 5 to 6, there were more vertical stacking helix wires in the metal rubber specimens, with a relative small stiffness along the molding direction. When the compression ratio was about 2, the metal rubber specimens exhibited a much bigger stiffness along the molding direction, but an obvious smaller stiffness along the non-molding direction than other specimens. These results indicated that the compression ratio was an important impact factor for the metal rubber behavior and should be well considered during manufacturing and design process.

Key words: metal rubber; compression ratio; quasi-static testing; apparent structure; anisotropy

收稿日期: 2014-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(51105022, 51101008, 51211130115)

作者简介: 高笛(1988—), 男, 山东莱阳人, 硕士生, 研究方向为阻尼材料和振动抑制.

通讯作者: 马艳红(1975—), 女, 辽宁铁岭人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事航空发动机整机动力学、旋转机械振动控制、智能结构与新型阻尼材料等方面的研究.

金属橡胶是一种具有多孔组织的功能性结构阻尼材料,是由金属丝经过选丝、绕丝、拉伸、编织和模压过程制作而成^[1].具有高弹性、高阻尼、质量轻、环境适应性强、孔隙度可控和易于成型等优点,广泛应用于航空、航天、军事装备、民用工程机械、医学等众多领域.

对于金属橡胶的弹性阻尼机理研究,目前有各种力学模型来解释.郭宝亭等^[2]以弹簧理论为基础,提出了金属橡胶材料的力学模型,较好地将金属橡胶结构和力学性能联系在一起,李宇燕等^[3]提出了一种基于采用 BP(back propagation)神经网络的金属橡胶本构关系的预估方法,朱彬等^[4]提出了基于螺旋丝微元体的不同接触状态的金属橡胶模型,分析不同状态的接触状态和接触数目,解释非线性刚度和阻尼的机理.

对于金属橡胶材料的力学性能,已经有较为深入的试验研究^[5-6],以往对于金属橡胶材料的性能研究,多注重材料参数和成型工艺的影响,以及疲劳损伤等.材料参数包括丝材^[7-9],丝径、螺旋径等^[10];成型工艺参数包括相对密度^[8],编织工艺^[11],后续退火处理^[12-13],不同结构形式(如颗粒状金属橡胶^[14])等等.

目前金属橡胶的应用领域包括吸声降噪^[15],隔热防护^[16],过滤器,密封件,减压阀,以及人体仿生等应用^[17],而金属橡胶良好的环境适应性和阻尼减振性能,使其作为阻尼器,在航空航天领域的阻尼隔振领域有着广阔的应用^[18-21].

作为一种优良的阻尼材料,金属橡胶的力学性能研究往往忽略了加工过程毛坯尺寸的影响,而作为一种模压成型材料,毛坯的高度尺寸将直接关系到模压行程大小.更进一步,金属橡胶的成型与非成型方向的差异也是由于模压造成的,因此,毛坯高度也很有可能导致两方向性能异性的变化.针对以上研究背景,本次试验加工了相同尺寸的方体金属橡胶试件,分别对应不同毛坯高度,试验研究不同的压缩比(即毛坯高度和对应的模压后的成品高度之比)对金属橡胶结构和性能的影响.

1 试验和数据处理

1.1 试件

选用不锈钢螺旋丝材,加工的试件为方体形状,所有试件的长和宽均为 21 mm,高为 20 mm,控制毛坯高度尺寸分别为 40, 60, 80, 100, 120 mm,分别对应着压缩比为 2~6 的 5 种试件,每种压缩比下加工 3 个相同试件.所有的毛坯及试件

质量均为 14.54 g 左右,计算得到试件的相对密度为 0.21(相对密度即为金属橡胶密度与丝材密度之比),如图 1 所示.



图 1 金属橡胶试件与对应毛坯
Fig. 1 Metal rubber samples and its roughcast

1.2 试验方案

试验设备为微机控制电子万能试验机,配备 2.5 kN 力传感器和电子千分表测量试验力和变形,如图 2 所示.

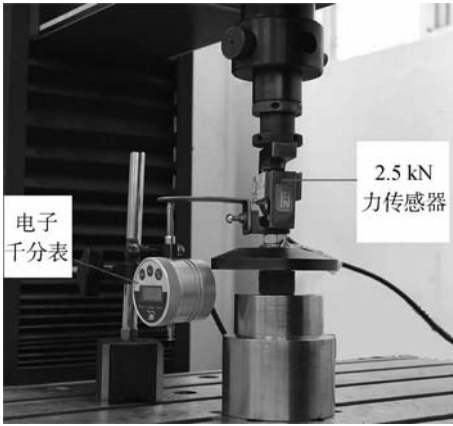


图 2 试验仪器设备
Fig. 2 Test instruments and equipment

采取准静态压缩试验,至一定变形后卸载.沿成型方向加载时,加载速度为 4 mm/min,最大变形为 4 mm(20%应变);非成型方向加载速度为 1.2 mm/min,最大变形为 1.2 mm(6%应变).

对试件进行 3~4 次加载处理后,再正式试验测量记录,正式试验的 3 次循环加载,性能基本稳定,如图 3 所示,3 次循环曲线基本重合,没有差别,因此将最后一次试验曲线作为此状态下的试验原始数据,进行后续处理,比如求应力-应变曲线,正切模量和耗散因子.

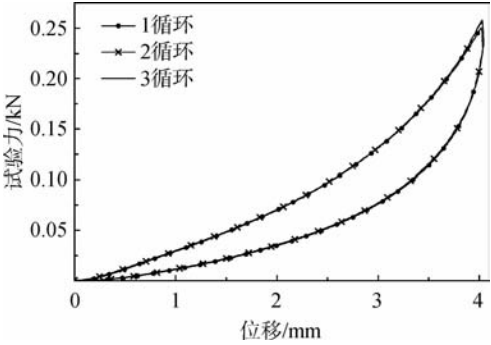


图3 压缩试验循环加载原始数据曲线
Fig. 3 Raw data curves of cyclic loading test compression

1.3 数据处理

将原始数据的试验力 ΔF 除以初始面积 A , 位移 Δz 除以高度 H , 即可得到应力-应变 ($\Delta\sigma$ - $\Delta\epsilon$) 曲线, 而应力-应变曲线上任一点的斜率即为该应变下对应的正切模量值 E_t , 如公式(1)所示.

$$E_t = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\Delta F/A}{\Delta z/H} \tag{1}$$

对于一般金属材料, 在比例极限内, 正切模量等同于弹性模量. 而正切模量一般用来描述非线性的弹性特性, 故选用正切模量描述金属橡胶材料大变形的弹性特性.

金属橡胶材料具有阻尼性能, 加载和卸载的循环曲线呈现出迟滞回线特性, 利用耗散因子来量化描述金属橡胶材料的阻尼大小.

如图4所示, 加载曲线和卸载曲线围成的迟滞回线能够直接反映金属橡胶在一个压缩循环内的能量耗散特性, 用耗散因子来表征, 定义为

$$\eta = \frac{\Delta W}{\pi U} \tag{2}$$

式中 ΔW 为一个压缩循环内耗散的能量, 即迟滞回线包围的面积, 见图4(a), 可以通过数值积分的方法计算求得; U 为结构的最大势能, 见图4(b)阴影部分.

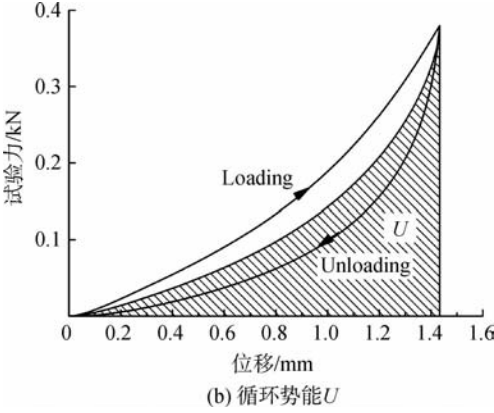
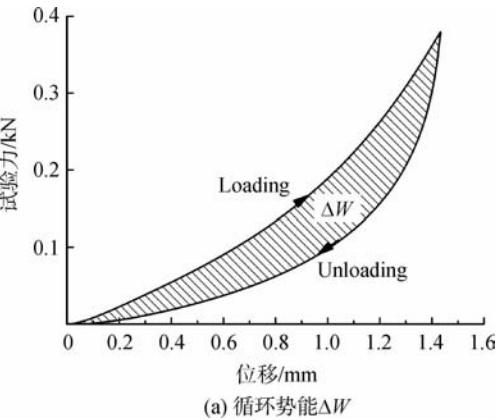


图4 金属橡胶材料迟滞回线
Fig. 4 Hysteresis loop for metal rubber material

通过上述试验方法和数据处理, 对不同压缩比试件进行准静态试验, 处理得到试件的应力-应变曲线和正切模量-应变曲线, 并可求出耗散因子.

2 结果与讨论

2.1 表观组织结构

对不同压缩比试件进行表观结构对比, 如图5, 为便于比较, 此处选用压缩比为2和6的试件对比. 可见, 大的压缩比, 试件在成型方向金属丝

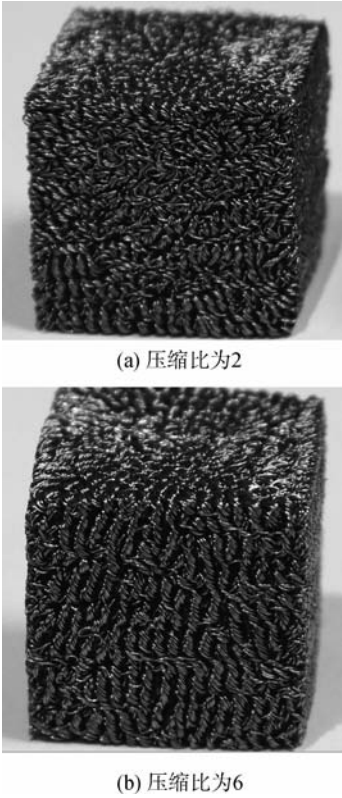


图5 两种压缩比试件细观结构
Fig. 5 Microstructure for two different compression ratios sample

螺旋丝取向变得有序,内部金属螺旋丝大多呈直立弹簧堆积状,图 5(b)所示;而小压缩比试件内部金属丝则大多是无序的咬合状态,如图 5(a)所示.可见大压缩行程,会导致金属螺旋丝趋于分层竖立状态取向.

2.2 压缩比对金属橡胶各向异性的影响

金属橡胶材料是横观各向同性材料,两个非成型方向性能一致,成型方向和非成型方向性能差异较大,成型方向刚度偏小,但是允许更大的变形,一般可达到 20%应变;非成型方向刚度明显偏大,但允许变形较小,一般小于 10%应变.上述两方向的这种刚度大小趋势越明显,各向异性越显著.下面分别研究不同压缩比下,成型方向与非成型方向的力学性能,分析压缩比对各向异性影响规律.

2.2.1 成型方向性能

不同压缩比试件沿成型方向试验加载,经过处理的结果如图 6 所示.压缩比越大,应力-应变曲线越低,正切模量越小,两者是一致的.压缩比增大至 5~6,性能曲线较为接近,即压缩比增大

至 5 以后,压缩比变化性能基本稳定;压缩比较小小时,其对正切模量的影响十分明显,在 5%应变,压缩比为 3 的正切模量约为 1.7 MPa,而压缩比为 2 的试件对应的正切模量为 2.63 MPa,两者相差 54.7%.

为保证性能稳定和较长的使用寿命,金属橡胶实际工况下的变形一般设计在应变范围 2%~10%应变内,可以取 5%应变正切模量值近似作为金属橡胶工况下的弹性模量值.表 1 为不同压缩比的构件在几个特定应变下的正切模量值比较.

表 1 不同压缩比试件正切模量均值
Table 1 Mean tangent modulus value for different compression ratios sample

压缩比	正切模量/MPa			
	5%应变	10%应变	15%应变	20%应变
2	2.625	3.610	6.443	17.020
3	1.693	2.195	3.670	8.852
4	1.353	1.615	2.589	5.738
5	1.278	1.435	2.233	4.563
6	1.160	1.352	2.082	4.302

可见,对于不同压缩比的金属橡胶在工况下会有较大的性能差异.

2.2.2 非成型方向性能

对上述压缩比为 2~6 的试件沿非成型方向加载试验,性能曲线结果见图 7.

沿着非成型方向加载,刚度随着变形的变化更为剧烈,6%应变对应的正切模量就达到 17 MPa 左右,远远大于同应变下的成型方向正切模量值.对于成型方向具有最大刚度的压缩比为 2 的试件,其非成型方向应力-应变曲线最低,正切模量在 4%应变范围内最小;压缩比为 3 的试件,

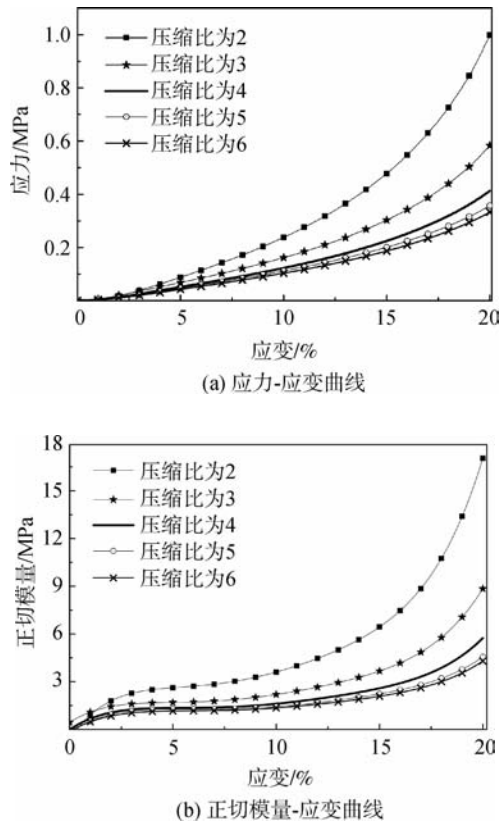
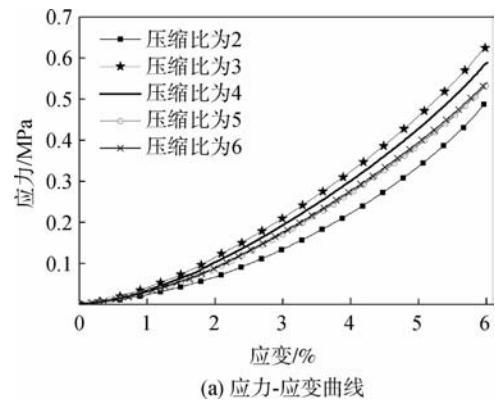


图 6 不同压缩比的试件的性能均值曲线
Fig. 6 Mean performance curves for different compression ratios sample



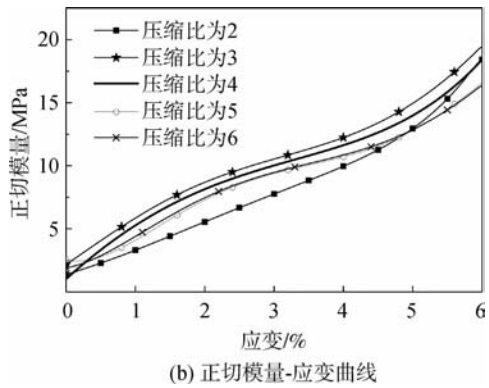


图 7 不同压缩比试件性能均值曲线(非成型方向)
Fig. 7 Mean performance curves for different compression ratios sample (along non-molding direction)

其非成型方向应力-应变曲线最高;压缩比为 3 之后,随着压缩比增大,应力-应变和正切模量-应变曲线降低,并趋于稳定.

2.2.3 压缩比与各向异性分析

以上结果表明,压缩比对金属橡胶成型和非成型方向性能有着截然不同的影响规律.随着压缩比增大,成型方向刚度和模量单调减小,而非成型方向则是先增大后减小.而两者也有一些共性:随着压缩比增大至 5~6,性能趋于稳定,即大压缩比下性能对压缩比变化不敏感;对于较小压缩比试件,比如压缩比为 2 和 3 的试件对比,性能对于压缩比的变化十分敏感.

对于压缩比为 2 的试件,与其余压缩比试件对比,成型方向具有最大的刚度和正切模量特性,而非成型方向一定应变范围内则正好相反,有着最小的刚度.由此可以看出,金属橡胶材料本来具有的两方向各向异性(即成型方向刚度偏低,非成型方向刚度偏大),在小的压缩影响下这种各向异性在减弱.设想对于一个压缩比为 1 的金属橡胶,即各方向同时约束成型,则是一个各向同性材料,并无成型与非成型差异;同时,对于所示的大压缩比试件,表观结构上已经呈现出螺旋丝的有序取向,呈现出明显的各向异性,可见,压缩比是金属橡胶各向异性的度量.

随着压缩比的增大,非成型方向上刚度先增大,在压缩比为 3 的时候达到最大,而后随着压缩比增大而降低并趋于稳定.这很可能是由于压缩比为 3 之后的金属橡胶,细观螺旋丝啮合不良好,导致成型与非成型方向均呈现较低刚度.

2.3 压缩比对阻尼的影响

对于不同压缩比试件,沿着成型方向加载,最

大加载至 20%应变后卸载,求得循环载荷的迟滞回线对应的阻尼耗散因子,结果表明,试件压缩比越小,相同受载变形下的耗散因子越小,结果见图 8.

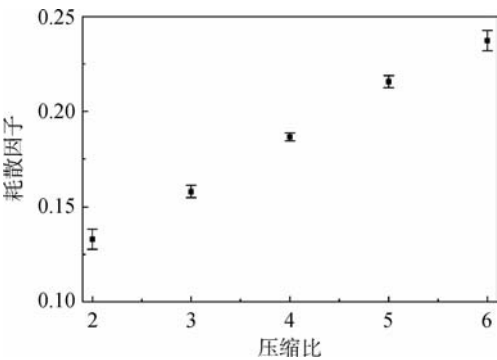


图 8 不同压缩比试件的耗散因子
Fig. 8 Loss factor for different compression ratios sample

可见,随着压缩比增大,金属橡胶材料耗散因子增大.因此,较大的压缩比的金属橡胶具有较好的阻尼性能.

3 结 论

金属橡胶材料是经过编织后的毛坯单向模压成型的,这一工艺过程带来成型与非成型两方向各向异性.毛坯压缩比是毛坯高度与模压完成后试件高度之比,表征模压过程压缩行程相对大小,会显著影响金属橡胶成型表观结构和两方向各向异性性能.

较小的压缩比下(压缩比为 2 左右),金属橡胶性能对压缩比的变化十分敏感,压缩比减小,成型方向刚度增大,非成型方向刚度减小,两方向各向异性减弱.

较大压缩比下(压缩比为 5 以上),金属橡胶性能对压缩比的变化不敏感,金属橡胶试件细观螺旋丝有序取向,呈竖立堆积状态,从表观结构已经体现出强的各向异性.而由于压缩比大,模压行程大,细观成型啮合不良好,成型与非成型刚度均偏低.

在金属橡胶的加工和设计中,需要考虑压缩比对性能的影响.比如,对于同批次的同规格金属橡胶,需要控制相同的压缩比,从而保证结构和性能的一致;在设计金属橡胶阻尼器时,可以根据刚度和阻尼需要,选择适当的压缩比,从而可以在不改变质量和尺寸的情况下,通过控制压缩比来调节金属橡胶的刚度和阻尼性能.

参考文献：

[1] 切戈达耶夫. 金属橡胶构件的设计[M]. 李中鄂, 译. 北京: 国防工业出版社, 2000.

[2] 郭宝亭, 朱梓根, 崔荣繁, 等. 金属橡胶材料的理论模型研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 314-319.

GUO Baoting, ZHU Zigen, CUI Rongfan, et al. Theoretical model of metal rubber[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3): 314-319. (in Chinese)

[3] 李宇燕, 黄协清, 李福林. 基于 BP 神经网络的金属橡胶本构关系的预估方法[J]. 航空动力学报, 2011, 26(5): 1128-1134.

LI Yuyan, HUANG Xieqing, LI Fulin. Prediction for constitutive relationship of metallic rubber based on BP neural net[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(5): 1128-1134. (in Chinese)

[4] 朱彬, 马艳红, 洪杰. 金属橡胶刚度阻尼模型理论分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(10): 1298-1302.

ZHU Bin, MA Yanhong, HONG Jie. Theoretical analysis on stiffness and damping characteristics of metal rubber[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(10): 1298-1302. (in Chinese)

[5] LIU Ping, HE Guo, WU Luhai. Uniaxial tensile stress-strain behavior of entangled steel wire material[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 509(1/2): 69-75.

[6] TAN Qingbiao, HE Guo. Stretching behaviors of entangled materials with spiral wire structure[J]. Materials and Design, 2013, 46(4): 61-65.

[7] TAN Qingbiao, LIU Ping, DU Chunlei, et al. Mechanical behaviors of quasi-ordered entangled aluminum alloy wire material[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 527(1/2): 38-44.

[8] ZHANG Dayi, Scarpa F, MA Yanhong, et al. Compression mechanics of nickel-based superalloy metal rubber[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 580(37): 305-312.

[9] ZHANG Dayi, Scarpa F, MA Yanhong, et al. Dynamic mechanical behavior of nickel-based superalloy metal rubber[J]. Materials and Design, 2014, 56(4): 69-77.

[10] 马艳红, 郭宝亭, 朱梓根. 金属橡胶材料静态特性的研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 326-331.

MA Yanhong, GUO Baoting, ZHU Zigen. Static characteristics of metal rubber[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3): 326-331. (in Chinese)

[11] 夏宇宏, 姜洪源, 敖洪瑞, 等. 簧丝走向对金属橡胶构件性能的影响分析[J]. 中国机械工程, 2002, 13(10): 880-883.

XIA Yuhong, JIANG Hongyuan, AO Hongrui, et al. Research on the effect of wire distribution on the characteristics of metal rubber element[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(10): 880-883. (in Chinese)

[12] LIU Ping, HE Guo, WU Luhai. Fabrication of sintered steel wire mesh and its compressive properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 489(1/2): 21-28.

[13] 刘宝龙, 马艳红, 张大义, 等. 金属橡胶力学特性的热处理工艺影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(2): 259-263.

LIU Baolong, MA Yanhong, ZHANG Dayi, et al. Experiment investigation on the effect of heat treatment on metal rubber mechanical properties[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(2): 259-263. (in Chinese)

[14] 洪杰, 朱彬, 马艳红, 等. 金属橡胶颗粒静态特性试验[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(2): 218-221.

HONG Jie, ZHU Bin, MA Yanhong, et al. Experiments on static characteristics of metal rubber particles[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(2): 218-221. (in Chinese)

[15] MA Yanhong, WANG Hong, LI Haoyu, et al. Study on metal rubber material's characteristics of damping and sound absorption [R]. ASME Paper 2008-GT-50961, 2008.

[16] Rannenber M, Beer H. Heat transfer by evaporation in capillary porous wire mesh structures[J]. Letters in Heat and Mass Transfer, 1980, 7(6): 425-436.

[17] HE Guo, LIU Ping, TAN Qingbiao. Porous titanium materials with entangled wire structure for load-bearing biomedical applications[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2012, 5(1): 16-31.

[18] 敖宏瑞, 姜洪源, 王树国, 等. 支承发动机管路的金属橡胶阻尼器隔振性能研究[J]. 机械设计, 2003, 20(2): 14-17.

AO Hongrui, JIANG Hongyuan, WANG Shuguo, et al. Research on vibration isolation function of metal and rubber damper for supporting engine pipe line[J]. Journal of Machine Design, 2003, 20(2): 14-17. (in Chinese)

[19] Andres L S, Chirathadam T A, Kim T H. Measurement of structural stiffness and damping coefficients in a metal mesh foil bearing[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 132(3): 032503. 1-032503. 7.

[20] Lee Y B, Kim C H, Kim T H, et al. Effects of mesh density on static load performance of metal mesh gas foil bearings [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, 134(1): 012502. 1-012502. 8.

[21] 马艳红, 王虹, 洪杰. 带金属橡胶油膜环的自适应挤压油膜阻尼器非协调响应研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(2): 390-395.

MA Yanhong, WANG Hong, HONG Jie. Investigation of non-synchronous response of adaptive squeeze film damper with metal rubber oil film ring[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(2): 390-395. (in Chinese)