

文章编号: 1000-8055(2023)11-2666-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220225

金属橡胶减振器准静态加载力学性能

彭云强¹, 贾 东¹, 钟卫洲^{1,2}, 韦利明¹

(1. 中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 基于金属橡胶减振器实际服役场景, 设计了金属橡胶减振器横向和轴向准静态加载夹具, 获取了 5 种型号共 175 个金属减振器横向和轴向准静态力学性能数据。借助数据分析软件对试验数据进行高阶多项式拟合, 成功确定了 5 种金属橡胶减振器的横向和轴向载荷-位移曲线平均值和性能边界。结果表明: 减振器横向和轴向载荷-位移曲线分散性并不服从常见的高斯概率分布规律, 且难以同时兼顾, 轴向加载时 MR2 型减振器分散性最小, MR3 型减振器分散性最大, 而横向加载时 MR3 分散性最小, MR2 分散性最大。相关性能边界可为金属橡胶减振器的选型和安全性、可靠性评定提供重要支撑。基于 μ CT 三维断层扫描分析设备, 亦建立了金属减振器中金属丝组件的三维编织形貌, 并成功确定了不同高度区域金属丝体积。

关 键 词: 金属橡胶减振器; 准静态试验; 性能边界; 可靠性评定; 三维形貌

中图分类号: V231.9

文献标志码: A

Quasi-static mechanical property of metal rubber vibration absorber

PENG Yunqiang¹, JIA Dong¹, ZHONG Weizhou^{1,2}, WEI Liming¹

(1. Institute of Systems Engineering,

China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;

2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province,
Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Based on the actual service environment of metal rubber vibration absorber, the transverse and axial quasi-static loading fixtures of vibration absorbers were designed. The corresponding quasi-static mechanical properties of 175 metal shock absorbers, which can be divided into 5 kinds of types, were successfully obtained. Furthermore, the experimental data were fitted with high order polynomial on the basis of commercial software. The average values and performance boundaries of transverse and axial load-displacement curves for the 5 kinds of metal rubber vibration absorbers were successfully determined. The results showed that the dispersions of transverse and axial load-displacement curves of vibration absorbers did not obey the common law of Gaussian probability distribution, making difficult to be taken into account at the same time. The dispersion of MR2 was the minimum and MR3 was the maximum under axial loading, but the dispersion of MR3 was the minimum and MR2 the maximum under transverse loading. The corresponding performance boundaries can provide important support for the model selection and safety assessment of metal rubber vibration absorber. According to the three-dimensional

收稿日期: 2022-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(12172344)

作者简介: 彭云强(1990—), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事疲劳与断裂的理论、数值仿真与试验研究。

通信作者: 韦利明(1980—), 男, 副研究员, 博士生, 主要从事复合材料的宏-细-微观力学行为分析。E-mail: 401weilm@caep.cn

引用格式: 彭云强, 贾东, 钟卫洲, 等. 金属橡胶减振器准静态加载力学性能[J]. 航空动力学报, 2023, 38(11): 2666-2674. PENG Yunqiang, JIA Dong, ZHONG Weizhou, et al. Quasi-static mechanical property of metal rubber vibration absorber[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(11): 2666-2674.

computed tomography analytical device of μ CT, the three-dimensional morphology of metal wire component contained in the metal rubber vibration absorber was established. Furthermore, the volume of metal wire in different height regions were determined successfully.

Keywords: metal rubber vibration absorber; quasi-static experiment; performance boundary; safety assessment; three-dimensional morphology

金属橡胶减振器与传统橡胶减振器相比具有刚度可设计、耐高低温、不易老化等优点,已被广泛用于航空航天等领域替代传统橡胶减振结构。金属橡胶减振器的研究始于 20 世纪 50 年代,美国最早将金属橡胶减振器用于特殊需求的减振结构设计^[1-2],20 世纪 60 年代初,前苏联在截获的美国军机上发现了金属橡胶减振器结构之后,也开始了大量的金属橡胶减振器结构设计与应用研究。为防止金属橡胶减振器技术外泄,美苏两国都封锁了金属橡胶减振器相关研究资料。我国对金属橡胶减振器的研究始于 20 世纪 90 年代。1997 年,王新等^[3]公开发表了一种用于转子支撑系统的环形金属橡胶减振器,其可以用于高、低温等特殊环境下的结构减振,一经发表便受到了大家的关注。由于金属橡胶减振器制备过程包括选丝、绕丝、拉伸、编织毛坯、冷压成型和后处理 6 个步骤^[4-5],涉及到金属丝材质^[6-7]、丝径^[8]、截面形状^[9]、编织方式^[10]、成型压力^[11]等众多参量,每个参数的变化都会导致金属橡胶减振器性能的较大差异。马艳红等^[12]借助单一变量法研究了丝径、螺旋径、相对密度等因素对金属橡胶减振器性能的影响规律,并提出了金属橡胶减振器性能优化相关建议。郝慧荣等^[9]研究了非圆截面和圆截面金属橡胶的减振性能对比,结果表明,非圆截面金属丝之间的干摩擦明显增加,减振性能更优,但非圆截面金属橡胶的力学性能稳定性更难控制。Zhang 等^[13]借助工业 CT 对金属橡胶减振器的内部微观结构进行了断层扫描,可见金属丝之间主要存在分离、滑移和黏着 3 种典型接触状态^[14-15],而金属橡胶减振器的减振性能主要通过滑移状态来实现。由于金属橡胶减振器涉及的参数众多,想要通过理论建模方式来精确描述减振器的性能较为困难,因此,目前学者们主要采用试验方法来获取其力学性能。颜秉金^[16]对金属减振器开展了高温性能试验,成功获得了振幅、温度、相对密度等因素对减振器耗能的影响规律。Ma 等^[17]对不同高度、不同承载面积和不同承载面形状的金属橡胶减振器开展了静态压缩试验,结果表明,减振器的高

度会显著影响减振器的弹性模量和损耗因子,而承载面积和承载面形状对结果影响较小。Ertas 等^[18]和刘宝龙等^[19]分别在 $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温和 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温环境下开展了金属橡胶减振器静态压缩试验,结果表明金属减振器都显示出了良好的阻尼特性,具有优异的耐高低温性能。虽然学者们针对金属橡胶减振器已经开展了一定研究,也获得了一些规律性认识,但由于金属橡胶减振器变形过程非常复杂,性能分散性大,目前仍难以直接通过简单的理论或数值模拟方法获取稳定可靠的减振器力学性能。

本文拟对 5 种不同型号金属橡胶减振器开展横向和轴向准静态压缩试验,获取其载荷-位移加载曲线,随后借助商用数据分析软件进行多项式拟合,获得不同型号金属减振器的载荷-位移曲线平均值和性能边界;基于 μ CT 三维断层扫描分析设备,对金属橡胶减振器的三维微观形貌进行观测分析,加深对金属橡胶减振器的认识。

1 试验条件

1.1 金属橡胶减振器试验件

本次试验共采用了 5 种不同型号金属橡胶减振器,分别命名为 MR1~MR5,为获取金属减振器的性能分散性,共采用了约 180 个试件开展试验。图 1 展示的即为本次试验用金属减振器实物照片。减振器中部采用直径为 4 mm 的螺栓进行连接,MR1 型金属减振器安装板厚度为 6 mm,其余 4 种型号减振器安装板厚度均为 5 mm,MR1~MR3 的金属丝材质为 1Cr18Ni9Ti,MR4 和 MR5 的金属丝材质为 304 不锈钢,所有金属减振器中金属丝的直径均为 0.3 mm,由于金属减振器主要通过两端人工密绕的金属丝进行减振,因此,金属丝结构是整个减振器最为核心的部件。

1.2 试验夹具设计和加载条件

本次试验采用电液试验机进行加载,试验机最大加载能力为 1 kN,试验速度范围为 $0.000\ 5\sim 1\ 000\text{ mm/min}$,试验机载荷和位移的测试误差不超过示值的 $\pm 0.5\%$ 。由于金属减振器为非标结构



(a) 完整金属减振器



(b) 半个金属减振器

图 1 金属减振器实物照片

Fig. 1 Picture of true metal rubber vibration absorber

件,为使金属减振器受载情况与实际装配情况相似,且能与试验机良好连接,需设计专用的二次过渡连接夹具。由于金属减振器具有对称性,轴向试验时采用半个金属减振器进行加载,横向试验时仍采用整个金属减振器进行加载。图 2 和图 3 分别展示了轴向和横向试验加载夹具,采用 4 颗 M10 螺栓将横向和轴向下端试验夹具固定于电拉试验机,上端试验夹具采用 M12 螺纹与试验机相连,并借助反扣螺母将试验夹具固紧。轴向试验时,可通过试验机直接施加适当初始载荷作为预紧力;横向试验时,由于无法直接通过试验机施加预紧力,需通过优化试验夹具达到施加预紧力要求。因为金属隔振器初始设计时带有预紧力自锁功能,即当施加的紧固位移达到一定数值之后,便无法继续施加预紧力。为使横向试验夹具能够满足预紧力施加要求,将下端试验夹具与试验机紧固的螺纹孔改为图 3 所示的槽口通孔,此外,对于图中箭头指向的两个槽口进行了尺寸加宽,安装试样时,下夹具位置可以少量移动以使金属减振器达到预紧力自锁状态,随后再将下夹具固定于试验机上。采用位移控制进行加载,加载速度设为 0.5 mm/min,轴向和横向试验时最大加载载荷分别设为 600 N 和 500 N。

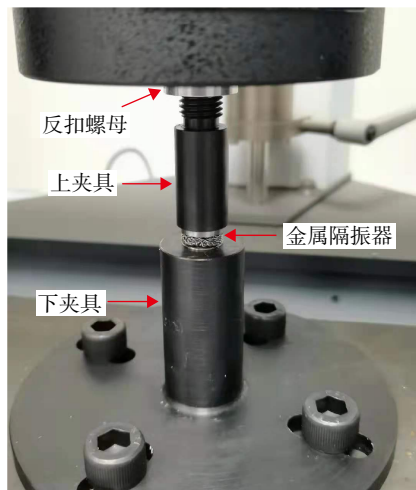


图 2 金属减振器轴向静态加载试验照片

Fig. 2 Picture of metal rubber vibration absorber with axial quasi-static loading

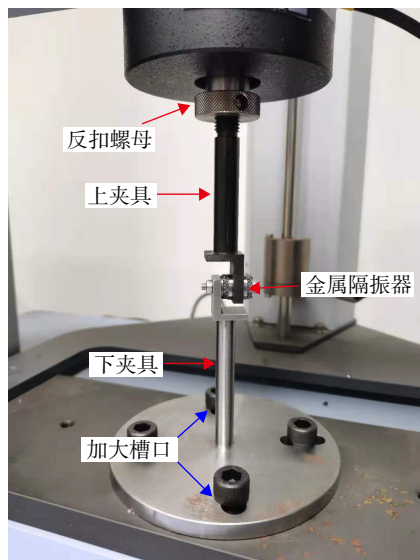


图 3 金属隔振器横向静态加载试验照片

Fig. 3 Picture of metal rubber vibration absorber with transverse quasi-static loading

2 试验结果与讨论

2.1 金属减振器轴向加载试验

借助图 2 所示加载夹具开展金属减振器轴向加载试验,由于金属减振器首次加载与后续加载获取载荷~位移($P-h$)曲线存在一定差异,对金属减振器开展多次加卸载试验,每次加载结束后卸载试验载荷,并静置 5 min 使金属减振器中的金属丝充分回弹。图 4 展示了 MR1 型金属减振器轴向静态压缩 1#试样 3 次加载获取 $P-h$ 曲线对比。从图中可知,第 2 次和第 3 次获取 $P-h$ 曲线几乎重合,其余试样也都有类似结论。因此,所有金

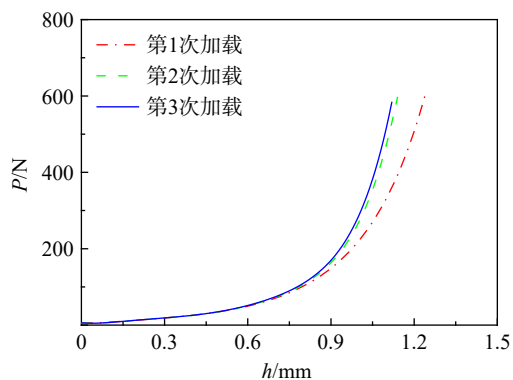
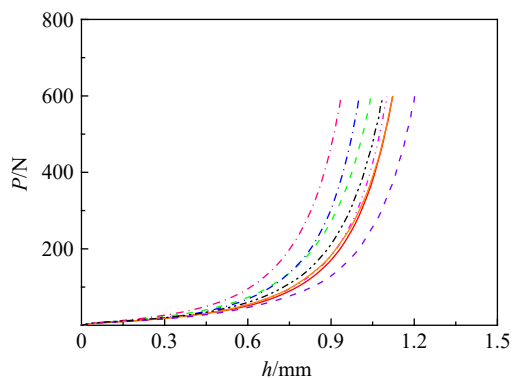
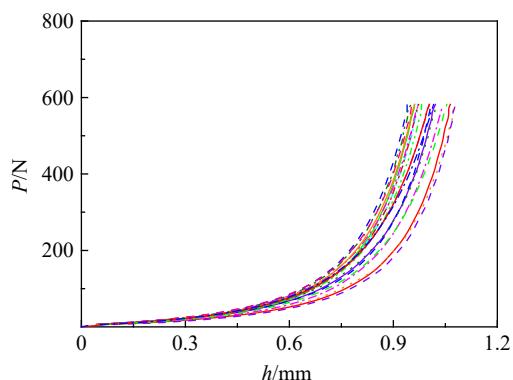
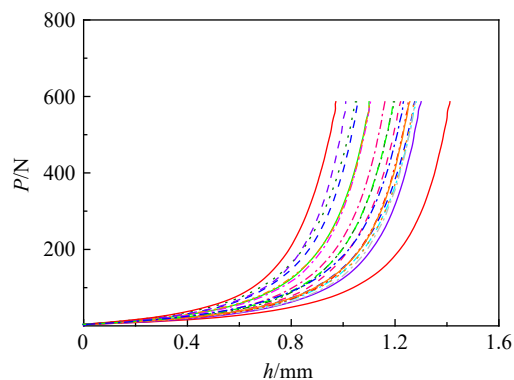
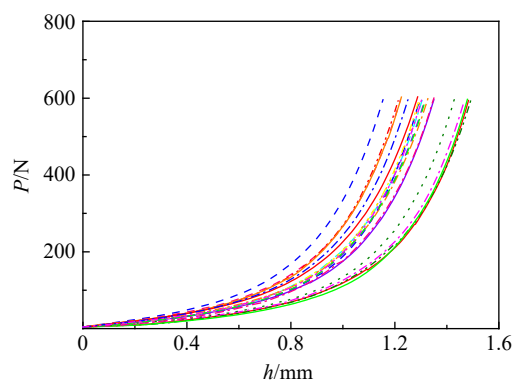
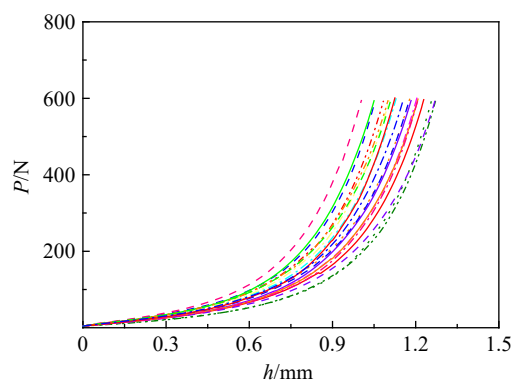


图 4 MR1 型 1# 试样 3 次加载曲线对比

Fig. 4 Comparisons of the three times loading curves of MR1-1# specimen

属减振器轴向静态压缩试样均进行 3 次加卸载试验, 取第 3 次加载获取 $P-h$ 曲线作为金属减振器的加载稳定结果。

图 5~图 9 展示了 5 种型号金属减振器准静态加载获取的加载稳定 $P-h$ 曲线分散带, 每条曲线代表一个试样轴向静态加载获取试验结果, 图 5~图 9 中的试样数分别为 8 个、20 个、20 个、

图 5 MR1 型减振器获取轴向加载稳定 $P-h$ 曲线Fig. 5 Stable $P-h$ curves of MR1 metal rubber vibration absorber with axial loading图 6 MR2 型减振器获取轴向加载稳定 $P-h$ 曲线Fig. 6 Stable $P-h$ curves of MR2 metal rubber vibration absorber with axial loading图 7 MR3 型减振器获取轴向加载稳定 $P-h$ 曲线Fig. 7 Stable $P-h$ curves of MR3 metal rubber vibration absorber with axial loading图 8 MR4 型减振器获取轴向加载稳定 $P-h$ 曲线Fig. 8 Stable $P-h$ curves of MR4 metal rubber vibration absorber with axial loading图 9 MR5 型减振器获取轴向加载稳定 $P-h$ 曲线Fig. 9 Stable $P-h$ curves of MR5 metal rubber vibration absorber with axial loading

21 个、20 个。从图中可以看出, 轴向加载时, 金属减振器初始变形比较容易, 呈现近似线弹性变形阶段, 随着加载的继续进行, 金属减振器的刚性急剧增加, 导致加载载荷也快速上升。各型号金属减振器获取的 $P-h$ 曲线均存在一定的分散性, 但其并不服从常见的高斯概率分布规律。为更好地描述各型金属减振器的力学性能分散性, 采用

商用软件对 P - h 曲线进行 12 次高阶多项式拟合, 通过数据处理可获得各型减振器的 P - h 曲线平均值(记为 P_{ave})性能边界, 如图 10 和图 11 所示。

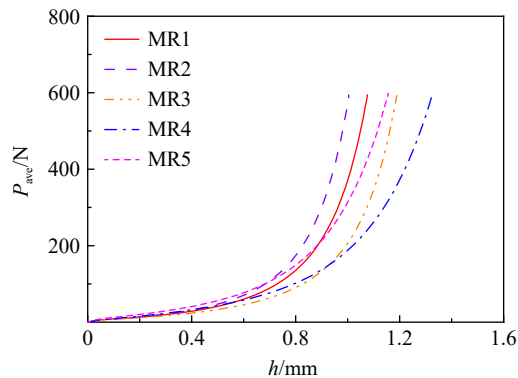


图 10 多型减振器获取轴向加载稳定 P - h 曲线平均值

Fig. 10 Average results of stable P - h curves for five kinds of metal rubber vibration absorbers with axial loading

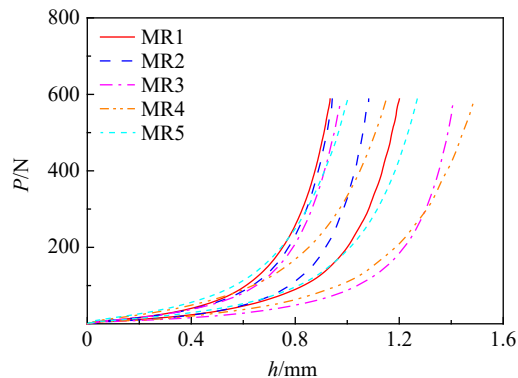


图 11 多型减振器获取轴向加载稳定 P - h 曲线边界

Fig. 11 Boundaries of stable P - h curves for five kinds of metal rubber vibration absorbers with axial loading

从图 10 和图 11 可以看出, MR2 型减振器弹性段轴向 P - h 曲线平均值最靠左, MR4 型减振器最靠右; 除 MR4 型减振器以外, 其余 4 种减振器左边界都较为接近, 但 5 种型号减振器右边界差异较大, MR2 型减振器轴向 P - h 曲线分散性最小, MR3 型减振器分散性最大。

2.2 金属减振器横向加载试验

借助图 3 所示夹具开展金属减振器横向加载试验, 试验前应先将试件装配至锁紧状态, 然后再固定加载夹具。与金属减振器轴向加载试验相同, 每个试件进行 3 次加卸载试验, 取第 3 次加载曲线作为试件真实的横向加载稳定 P - h 曲线。图 12~图 16 展示了 5 种型号金属减振器准静态加载获取的横向加载稳定 P - h 曲线分散带, 图中每条曲线代表一个试样横向静态加载获取的试验结果, 图 12 的试样数为 6 个, 图 13~图 16 的试样

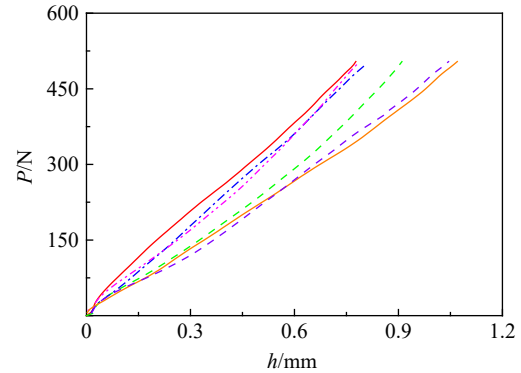


图 12 MR1 型减振器获取横向加载稳定 P - h 曲线

Fig. 12 Stable P - h curves of MR1 metal rubber vibration absorber with transverse loading

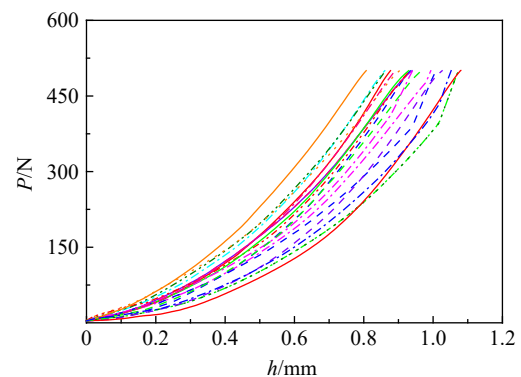


图 13 MR2 型减振器获取横向加载稳定 P - h 曲线

Fig. 13 Stable P - h curves of MR2 metal rubber vibration absorber with transverse loading

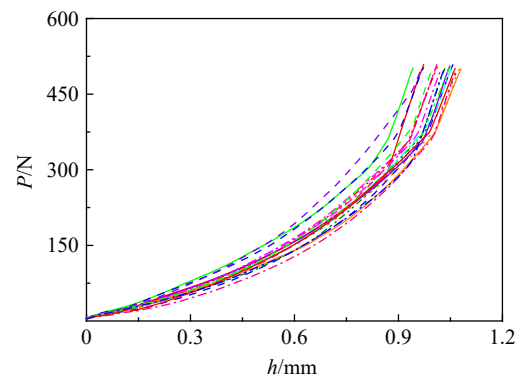


图 14 MR3 型减振器获取横向加载稳定 P - h 曲线

Fig. 14 Stable P - h curves of MR3 metal rubber vibration absorber with transverse loading

数为 20 个。从图中可以看到, 部分金属减振器 P - h 曲线在较大加载位移时呈直线快速上升, 且有明显的转折点, 说明该金属减振器中部的圆柱金属铁片在该转折点时与金属丝直接相连的金属铁片发生了硬接触, 导致了加载载荷的急剧上升; 同种型号减振器中只有部分试件产生了硬接触, 原因可能有两种: 其一可能是由于金属减振器中

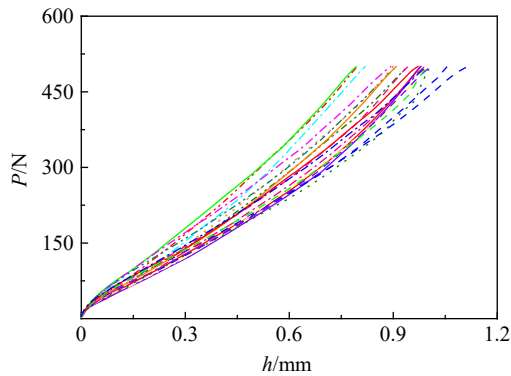
图 15 MR4 型减振器获取横向加载稳定 P - h 曲线

Fig. 15 Stable P - h curves of MR4 metal rubber vibration absorber with transverse loading

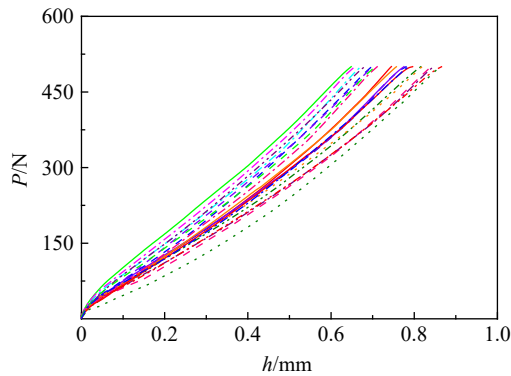
图 16 MR5 型减振器获取横向加载稳定 P - h 曲线

Fig. 16 Stable P - h curves of MR5 metal rubber vibration absorber with transverse loading

的金属丝制作过程复杂导致各个试件都不相同, 在第一次最大相同加载载荷下, 各金属减振器所产生的永久变形亦不相同, 因此其在第 3 次加载时达到硬接触时所需的加载位移略有不同; 其二可能是成品金属丝的直径本身就有一定误差。由于金属减振器获取横向加载 P - h 曲线同样存在一定的分散性, 且也与常见的高斯分布规律不同, 为描述各型金属减振器横向加载力学性能分散性, 仍采用商用数据分析软件对横向加载 P - h 曲线进行 12 次高阶多项式拟合, 通过数据处理可获得各型减振器的横向加载 P - h 曲线平均值和性能边界, 如图 17 和图 18 所示。

由于金属减振器设计时主要承受轴向载荷, 但在实际服役时也可能少量承受横向载荷, 在遇到横向载荷时, 金属减振器主要由中部金属铁片罩住的局部金属丝来承载, 且金属丝横向变形比轴向变形更加困难, 横向变形时金属丝会在垂直于挤压成型方向发生形状改变, 导致横向加载时载荷急剧上升, 故而无明显的软特性变形阶段。

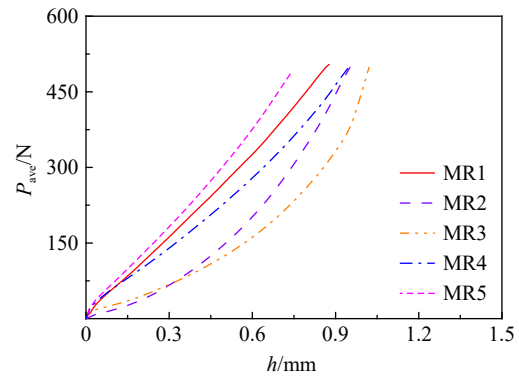
图 17 多型减振器获取横向加载稳定 P - h 曲线平均值

Fig. 17 Average results of stable P - h curves for five kinds of metal rubber vibration absorbers with transverse loading

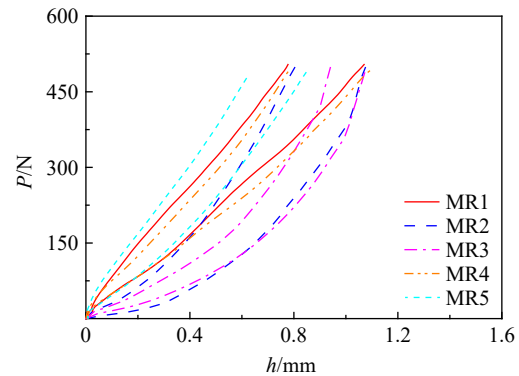
图 18 多型减振器获取横向加载稳定 P - h 曲线边界

Fig. 18 Boundaries of stable P - h curves for five kinds of metal rubber vibration absorbers with transverse loading

从图 17 和图 18 可知, MR1 和 MR5 两种型号金属减振器横向加载时 P - h 曲线呈近似线性关系, MR5 型减振器横向加载 P - h 曲线平均值最靠左, MR3 型减振器最靠右; MR3 和 MR5 两型减振器横向加载 P - h 曲线分散性较小, MR2 型减振器 P - h 曲线分散性最大。

2.3 金属减振器选型讨论

综合对比 5 种型号减振器轴向和横向加载 P - h 曲线可知, 减振器横向和轴向 P - h 曲线分散性难以同时兼顾, 比如轴向加载时 MR3 型分散性最大, 而横向加载时其分散性最小, 轴向加载时 MR2 型减振器分散性较小, 而横向加载时其分散性最大。减振器横向和轴向加载最大变形位移也无明显的规律, 轴向加载时, MR4 型减振器平均值曲线在最大加载载荷时加载位移最大, 而横向加载时其处于 5 种型号减振器 P - h 曲线的中间位置; MR2 型减振器平均值曲线在轴向最大加载载

荷时加载位移最小,而横向加载时其加载位移并不是最大;因此,从静强度角度选用金属减振器型号时,需综合分析实际减振结构对减振器横向和轴向变形最大位移要求,考虑到金属减振器横向和轴向加载时 $P-h$ 曲线都有一定的分散性,可通过减振器加载稳定时的曲线边界进行分析评估,从而获得偏于安全的减振器选型结果。

3 金属减振器三维断层扫描分析

借助三维断层扫描(μ CT)设备对金属减振器新鲜试验件开展微观分析,以MR1型减振器为例进行分析,图19和图20分别展示了MR1型1#和2#减振器新鲜试验件不同角度、不同剖面获取的金属丝三维扫描照片。从图中可以看出,金属减振器中的金属丝完整性较好,通过不断变换观

察角度,也未找到金属丝断裂部位,说明金属减振器中的金属丝在一体编织挤压成型过程中未发生金属丝断裂现象。通过三维重构图可以很清楚地看出,金属丝在挤压成型后变形各不相同,无明显规律,金属丝与金属丝之间的接触状态非常复杂,导致金属减振器性能存在较大分散性。对三维重构金属丝组件开展分析,在金属丝组件不同位置取相同高度范围内的金属丝计算其体积,对两个试样分别计算了距金属丝组件底部高度(H)在1~2 mm、2~3 mm、3~4 mm和4~5 mm之间的金属丝体积,结果见表1,由表可知,金属丝在不同高度区域内体积都存在较大差异,减振器中部金属丝更加密实,体积更高,2个试样在上述4个高度范围内最大体积偏差都达到了20%以上,说明金属丝组件不同部位的性能亦会有较大差距。

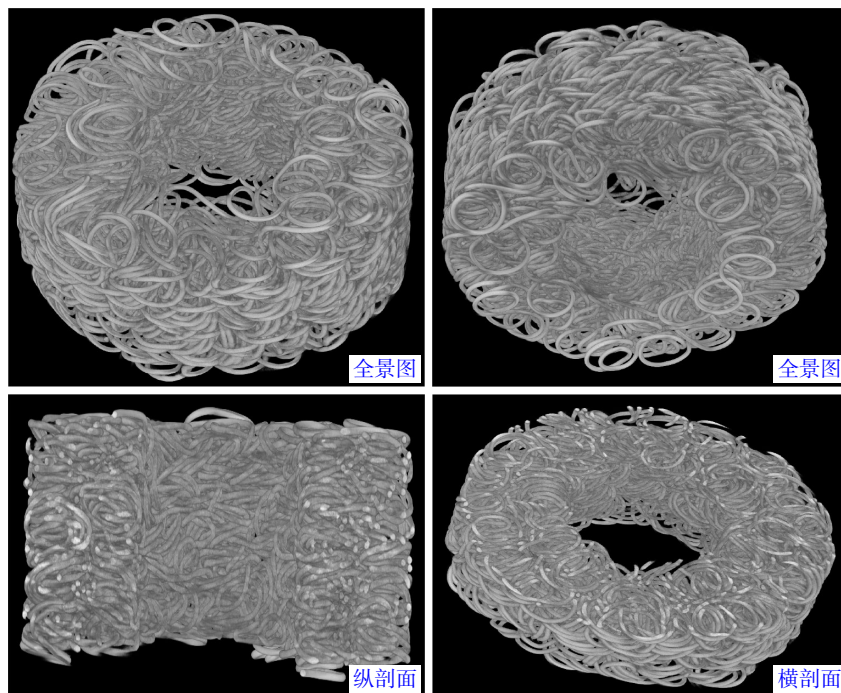
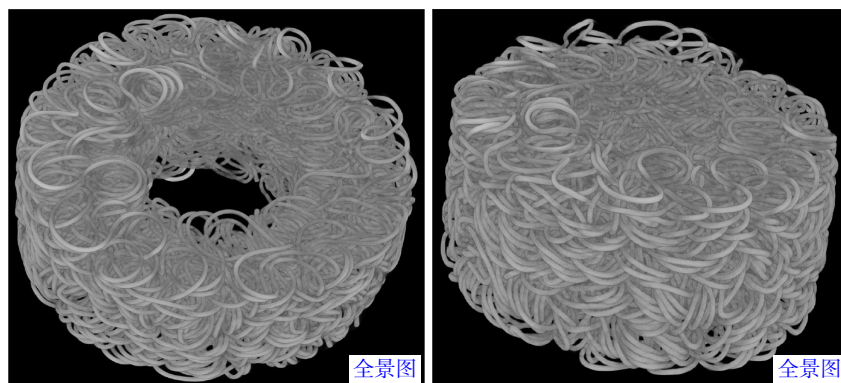


图19 MR1型1#减振器新鲜试验件三维扫描照片

Fig. 19 Three-dimensional scanning pictures of new specimen of MR1-1#



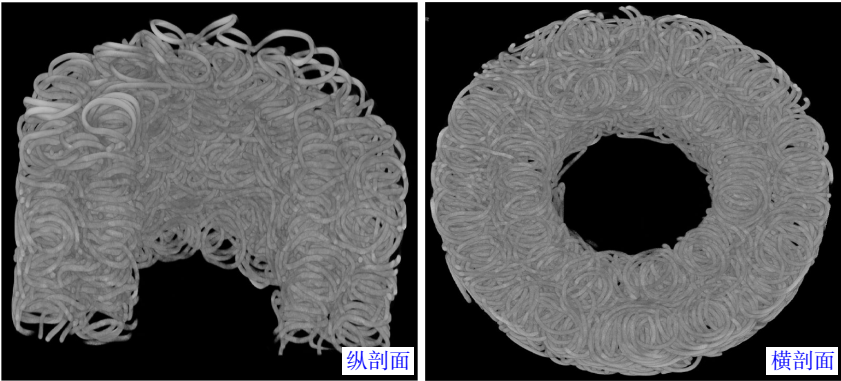


图 20 MR1 型 2#减振器新鲜试验件三维扫描照片

Fig. 20 Three-dimensional scanning pictures of new specimen of MR1-2#

表 1 金属减振器不同高度区域的金属丝体积

Table 1 Volume contents of metal wire for different height zones of metal rubber vibration absorbers

试样编号	体积/mm ³				平均体积/ mm ³	最大体积偏差 [($V_{\max}$ - $V_{\min}$)/ $V_{\min}$]/%
	$H=1\sim 2\text{ mm}$	$H=2\sim 3\text{ mm}$	$H=3\sim 4\text{ mm}$	$H=4\sim 5\text{ mm}$		
MR1-1#	30.43	32.64	30.56	26.98	30.15	20.98
MR1-2#	27.83	33.55	32.00	27.95	30.33	20.57

注: $V_{\max}$ 和 $V_{\min}$ 分别表示金属丝的最大体积和最小体积。

4 结 论

通过对 5 种型号金属橡胶减振器近 180 个试样开展横向和轴向准静态加载试验,并借助商用软件进行数据处理,成功获取了 5 种型号减振器的 P - h 曲线平均值和性能边界。研究表明,金属减振器横向和轴向 P - h 曲线分散性无法避免且难以同时兼顾,其性能分散性也不服从传统的高斯概率分布规律,不同型号减振器横向和轴向最大加载位移亦各不相同,无明显规律,可结合减振结构的实际服役需求对金属减振器开展选型和可靠性评估工作。基于 μ CT 设备获取的金属丝组件三维形貌重构图可知,金属减振器新鲜试验件中的金属丝完整性非常好,一体编织挤压成型过程中也未造成明显的金属丝断裂现象,另外,金属丝组件不同部位密实程度也有较大差异,亦会导致金属减振器性能的分散性。

参考文献:

[1] CREDE C E. Vibration isolator: US2610016[P]. 1952-09-09.

[2] YORK O H, WESTERGAARD R H. Elastic metal mesh tubular bellows: US2755079[P]. 1956-07-17.

[3] 王新, 朱梓根. 环形金属橡胶减振器[J]. 航空动力学报, 1997, 12(2): 143-145.

WANG Xin, ZHU Zigen. A ring-like metal rubber damper[J]. Journal of Aerospace Power, 1997, 12(2): 143-145. (in Chinese)

[4] 张大义, 夏颖, 张启成, 等. 金属橡胶力学性能研究进展与展望[J]. 航空动力学报, 2018, 33(6): 1432-1445.

ZHANG Dayi, XIA Ying, ZHANG Qicheng, et al. Researches on metal rubber mechanics properties in retrospect and prospect[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(6): 1432-1445. (in Chinese)

[5] 季正勇, 李春福, 宋开红, 等. 金属橡胶的应用研究及其进展[J]. 热加工工艺, 2011, 40(16): 96-99.

JI Zhengyong, LI Chunfu, SONG Kaihong, et al. Application research and development of metal-rubber[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(16): 96-99. (in Chinese)

[6] 陈艳秋, 朱梓根. 用于管路的薄金属橡胶减振器的性能研究[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 175-178.

CHEN Yanqiu, ZHU Zigen. Damping characteristics of thin metal rubber damper for aeroengine piping system[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2): 175-178. (in Chinese)

[7] ZHANG Dayi, SCARPA F, MA Yanhong, et al. Dynamic mechanical behavior of nickel-based superalloy metal rubber[J]. Materials & Design, 2014, 56: 69-77.

[8] 卢正人. 金属橡胶减振器刚度特性组合优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.

LU Zhengren. Research on combined stiffness characteristic of metal rubber damper[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005. (in Chinese)

[9] 郝慧荣, 白鸿柏, 张慧杰. 非圆截面丝金属橡胶与普通金属橡胶阻尼性能比较[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(2): 210-213.

HAO Huirong, BAI Hongbai, ZHANG Huijie. Comparison of damping capacities between non-circular section wire metal rubber and ordinary metal rubber[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2009, 28(2): 210-213. (in Chinese)

[10] 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.

- [11] 黄凯, 白鸿柏, 路纯红, 等. 金属橡胶冲压成形数值模拟分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(3): 681-687.
HUANG Kai, BAI Hongbai, LU Chunhong, et al. Numerical simulation of metal rubber press forming[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(3): 681-687. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] ZHANG Dayi, SCARPA F, MA Yanhong, et al. Compression mechanics of nickel-based superalloy metal rubber[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 580: 305-312.
- [14] ZHU Bin, MA Yanhong, ZHANG Dayi, et al. A constitutive model of metal rubber based on hysteresis property[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(7): 078101.
- [15] MA Yanhong, GAO Di, ZHANG Dayi, et al. Compressive and dissipative behavior of metal rubber under constraints[J]. *Physica Status Solidi (B)*, 2015, 252(7): 1675-1681.
- [16] 颜秉金. 高温环境下金属橡胶隔振器的性能分析及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
YAN Bingjin. Dynamic and static experimental study on metal rubber vibration isolator in high-temperature environment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [17] MA Yanhong, GAO Di, HONG Jie. Investigation on the effect of dimension on the compression mechanics of metal rubber[R]. ASME Paper GT2014-25373, 2014.
- [18] ERTAS B, AL-KHATEEB E, VANCE J. Cryogenic temperature effects on metal mesh dampers and liquid hydrogen turbopump rotordynamics[R]. AIAA 2002-4164, 2002.
- [19] 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)

(编辑: 陈 越)