

金属橡胶夹芯柱壳结构高温阻尼减振特性

吴学谦, 吴瑞先, 熊贇玲子, 薛新

(福州大学 机械工程及自动化学院 金属橡胶与振动噪声研究所, 福建 福州 350116)

摘要: 针对金属夹芯柱壳结构在高温工况下的阻尼减振问题, 提出采用具有优异耐温性能和粘弹性阻尼特性的金属橡胶材料作为夹芯阻尼层, 研究内部结构参数和不同温度梯度对夹芯柱壳结构的动态力学特性影响规律。首先, 采用传统金属橡胶冲压成型制备工艺, 结合真空钎焊连接工艺, 实现了夹芯柱壳结构面/芯界面可靠的冶金结合, 可满足整体构件持续耐高温 500 °C 以上。其次, 分析了芯层密度、面芯厚度比、梯度温度等关键参数在不同激励条件下对金属橡胶夹芯柱壳结构高温阻尼减振特性的影响, 主要性能评价指标包括: 割线刚度、固有频率、振动加速度级及阻尼比等。通过与等质量的非夹芯柱壳结构试验对比表明: 金属橡胶夹芯柱壳结构的刚度与面板厚度、芯层密度正相关; 在 0~300 °C 范围阻尼效果随温度的上升而下降, 但在 300~500 °C 范围内呈增强趋势。

关键词: 金属橡胶; 夹芯柱壳; 钎焊; 割线刚度; 阻尼减振

中图分类号: TB331; O328

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)03-1036-09

金属橡胶夹芯结构兼顾耐高温与阻尼减振特性, 在航空热端部件的减振降噪领域具有重要的应用潜力。在多场耦合使役工况下, 金属橡胶夹芯柱壳结构多功能特性涉及振动力学、工程热物理学和制造工艺学等交叉学科, 尤其高温阻尼减振特性具有一定的非线性和多因素耦合等难题^[1]。探索不同夹芯结构参数和温度梯度对高温阻尼减振特性的影响规律, 具有重要的工程和科学意义^[2-4]。

近年来的夹芯柱壳制备工艺主要是集中于研究改变单一材料内部结构、多种材料复合、多材料+特殊结构复合等^[5-6]。夹芯结构有着轻质、减振、冲击吸能等优点^[7-8], 缺点在于超载超过承载极限后会发生屈曲破坏, 导致力学特性大大降低^[9-10]。金属橡胶为丝网勾连而成的弹性多孔材料, 与面板组成的刚-柔异构复合夹芯结构, 在受载时通过芯层弹性形变吸能, 允许更大形变并拥有更广的弹性区间, 减少塑性形变的发生与破坏。任德新等^[11]制备了带颗粒型金属橡胶夹层阻尼结构, 通过理论分析与试验验证的方式证明金属橡胶夹芯减振和吸能的可行性。彭富豪等^[12-13]与 Zhu 等^[14]通过金属橡胶嵌锁约束结构底板, 证明了金属橡胶影响底板的模态振型并显著增大了阻尼比。马艳红等^[15]通过将金属橡胶与弹性环填充于高速转子支承内, 实现了结构动刚度随激振频率上升而下降, 在

宽频区间拥有较好的阻尼减振效果。Xiao 等^[16]将金属橡胶包覆于管道与支吊架间, 验证了金属橡胶阻尼特性随成型密度增加而下降, 随包覆层数增加而上升。王珊珊等^[17-18]对比研究了胶粘、钎焊工艺对金属橡胶夹芯板动静力学特性影响, 分析了不同连接工艺的金属橡胶夹芯板结构压缩、剪切性能与耗能机制。Wang 等^[19]将梯形金属橡胶填充于波纹夹层结构, 随着金属橡胶上升使金属橡胶抗压刚度、抗压强度与吸能能力上升, 且拥有良好的变形回复能力。

在高温条件下, 夹芯结构的动力学特性涉及多尺度、多材料、应力集中和温度效应等问题^[20-21]。高温模态试验需考虑受热方式、激励方式、信号拾取方案等多个方面^[22-24]。传统测试方法难以采集到稳定的数据, 采用激振器、声激励、振动台等动态测试方法, 目前已基本规范化, 在高温条件下具有更广阔的应用前景。高温条件下振动信号可通过外接引伸杆至热源^[25-26]外采集, 除此以外还有非接触式高速摄像机、激光测振^[27]等方法。高温环境下试验对象的固有频率和振型受温度梯度、升温速率等影响, 阻尼特性受氧化、热应力、内耗等因素影响^[28]。

为实现夹芯柱壳结构高温条件下的减隔振特性, 本研究采用弹性多孔阻尼材料金属橡胶作为夹芯层制备金属橡胶夹芯柱壳。通过准静态试验测试夹芯柱壳

收稿日期: 2022-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(12272094); 军委科技委国防创新特区项目(XXX-033-01)

作者简介: 吴学谦, 男, 1995年生, 硕士生, 福州大学机械工程及自动化学院, 金属橡胶与振动噪声研究所, 福建 福州 350116, E-mail: 465402749@qq.com

结构参数的变化对径向刚度的影响, 通过正弦扫频试验方法测得夹芯柱壳结构高温下的动态特性, 获得了金属橡胶夹芯柱壳结构在 0~500 °C 内的固有频率与阻尼特性变化规律。

1 实验

本工作研究的金属橡胶夹芯柱壳结构由金属橡胶与金属面板组成。金属橡胶(图 1)阻尼夹芯层内部微结构为金属丝紧密排布, 金属丝排布规律变化可使金属橡胶的力学性能发生变化, 体现出较高的可设计性。金属橡胶制备工艺链如图 2 的所示, 将金属丝送入固定导轨, 经过导轨的金属丝会以固定半径卷曲形成螺旋卷。将制备获得的螺旋卷以固定螺距拉伸, 螺旋卷在拉伸过程中伴随着应变能的存储, 需通过两端放松的方式将应变能释放防止内应力过大使拉伸后的螺旋卷打结。将拉伸后的螺旋卷以一定角度往回转芯轴上反复缠绕制成金属橡胶毛坯。最后, 将绕制完成的金属橡胶毛坯送入模具中使用 THD32-300 四柱液压机冲压成型。本试验选用丝径为 0.3 mm 的中硬态金属丝, 材料为 GH4169, 材料力学性能参数如表 1 所示。经冲压成型制备的金属橡胶成品呈平板状, 尺寸为 400 mm×320 mm×5 mm。

金属橡胶夹芯柱壳面芯连接采用真空钎焊工艺, 钎焊连接可保证在 0~500 °C 内面芯连接的可靠性。将分瓣芯轴拼成圆形置于夹具底盘上方, 将卷圆后的内面板贴紧芯轴布置, 依次放上 BNi-2 箔带、金属橡胶芯层、BNi-2 箔带、外面板。将各层对齐后依次用 8 块圆弧压块通过螺栓与芯轴锁紧, 面板与芯层夹在圆弧压块与芯轴间的预留空间中。为保证弹性芯层与钎料、面板接触良好, 制备金属橡胶芯层时厚度预留 5% 的正公差。为克服金属橡胶自身的弹性与卷圆面板内应力, 保证面芯有效接触, 将金属橡胶芯层与面板用一定的预压力压紧, 并用钎焊工装紧固。为防止在高温钎焊过程中金属夹具的受热变形, 在分瓣芯轴内部

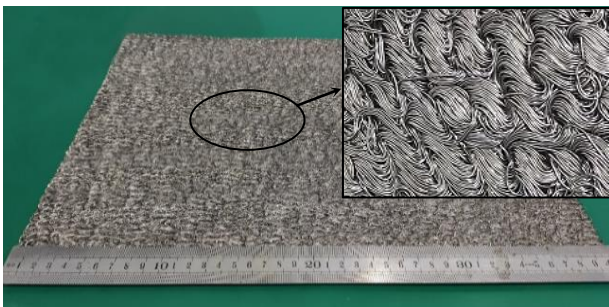


图 1 金属橡胶样件

Fig.1 Simple of cylindrical sandwich shell with metal-rubber

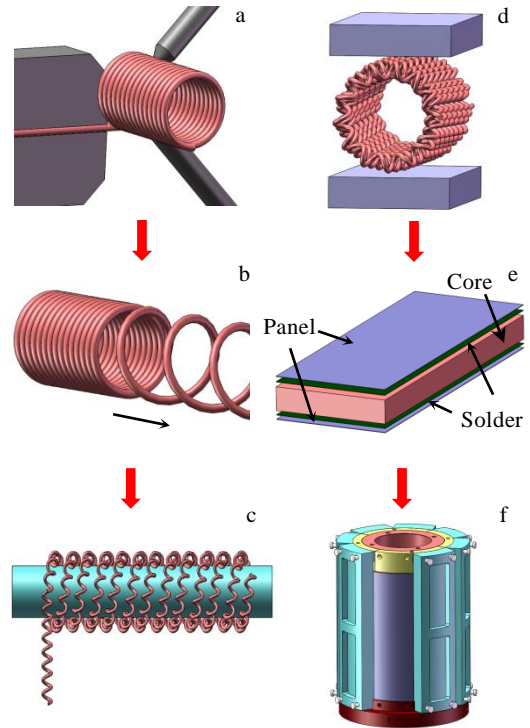


图 2 金属橡胶夹芯柱壳制备工艺链

Fig.2 Process chains of sandwich cylindrical shell with metal-rubber: (a) wire feeding, (b) stretching, (c) twining, (d) stamping, (e) overlay, and (f) clamping

表 1 GH4169 力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of GH4169 material^[24]

Material	Density/kg mm ⁻³	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio
GH4169	8.24×10 ⁻⁶	205.8	0.3

加套一个锥形芯轴用于内部支撑, 钎焊夹具结构如图 3 所示。

将待焊样件送入真空钎焊炉中, 炉内真空度抽至 2.0×10⁻³ Pa 以下开始加热。考虑钎焊工装厚度较大导致的内外温度不均匀以及钎料熔化过程中对真空度的影响等因素, 加热过程中升温速度控制为 5 °C/min 以保证零件在加热过程中温度均匀。面芯间焊料添加镍基焊料 BNi-2 箔带, BNi-2 固相线为 970 °C, 液相线为 1010 °C, 故在钎料固相线温度以下 950 °C 处时保温, 保证 BNi-2 钎料熔化时样件内部温度分布尽量均匀, 之后快速升温至 1100 °C 并保温 20 min 确保钎料熔化完全。最后, 炉冷降温至 500 °C 后自然冷却至室温, 获得的样件如图 4 所示, 几何尺寸如表 2 所示。

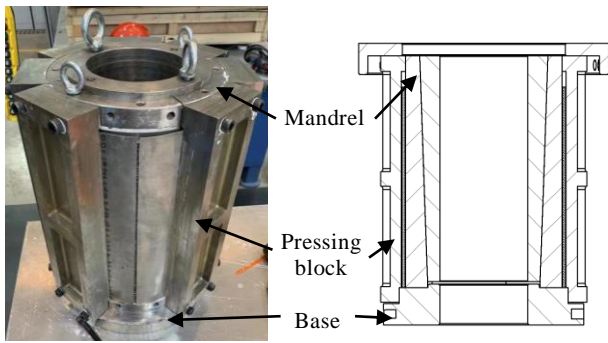


图 3 钎焊夹具图示

Fig.3 Figure of brazing fixture

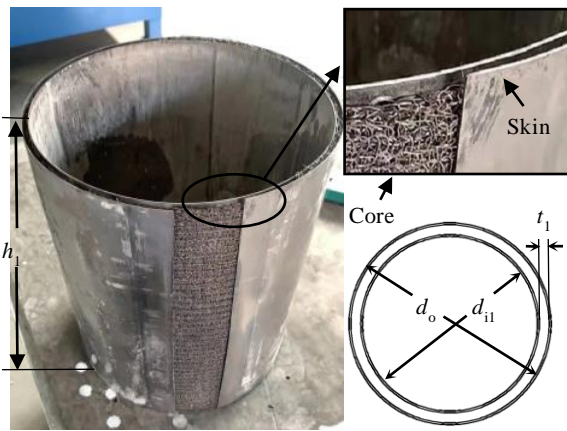


图 4 金属橡胶夹芯柱壳样品

Fig.4 Simple of cylindrical sandwich shell with metal-rubber

表 2 金属橡胶夹芯柱壳尺寸

Table 2 Size of cylindrical sandwich shell with metal-rubber

h_1/mm	d_1/mm	d_0/mm	t_1/mm
320	250	263.2	5

通过测试金属橡胶夹芯柱壳的频响曲线以评估金属橡胶夹芯柱壳结构的动态性能。对试验样品施加外部激励，并使用 DH5922N 模态分析设备采集激励力大小与表面加速度响应信号。

常见的测试方式有激振器扫频与力锤锤击法 2 种。激振器扫频测试系统主要由激振器、数据采集与信号发生器、功率放大器与模态分析系统组成。先由信号发生器生成扫频信号，并由功率放大器将功率放大输出驱动激振器产生正弦激励，力传感器布置于激振器与激振杆中间，目的是将激振杆所施加的力反馈回数据采集器。在试验样品表面布置加速度传感器采集加速度响应信号。力锤激励系统由力锤、数据采集

器与模态分析软件构成，使用力锤对试验样品施加猝发激励，根据加速度传感器反馈回的信号与力锤上的力信号可获得试验样品的频响曲线。高温试验使用石英灯阵加热，热电偶传感器用于实时检测加热情况。为保证在高温环境下对结构进行振动信号测量，通过在试验样品表面外接耐高温的轻质刚性陶瓷引伸杆将结构表面的振动信号传递至离热源较远处，再通过加速度传感器对信号进行拾取。根据上述试验原理，布置动态试验平台与工装见图 5。

2 结果与分析

2.1 结构参数对静力学特性的影响

金属橡胶夹芯柱壳在受载发生形变的同时，内外面板形变量的不同引发面板对夹芯层挤压与拉扯，金属橡胶作为弹性多孔阻尼材料，受载发生形变伴随着内部金属丝的摩擦、挤压引发阻尼耗能。为观察其在准静态加载条件下的阻尼特性，制备了小型金属橡胶夹芯柱壳并对小型金属橡胶夹芯柱壳进行准静态加卸载。

将金属橡胶夹芯柱壳样品横置于 WDW-T200 静态试验机测试平台，对试验样品进行准静态加卸载，压缩行程为 3 mm，力传感器量程 1000 N，加载速率为 1.0 mm/min。金属橡胶夹芯柱壳试验样品几何尺寸参数见表 3， h_2 为高， d_{12} 为内径， t_2 为芯层厚度， ρ 为密度， a 为面板厚度。编号 1~3 为改变金属橡胶夹芯柱壳芯层密度，编号 4~6 为改变夹芯柱壳结构面板与芯层厚度比。

图 6 和图 7 分别为不同芯层密度和不同面芯厚度比下金属橡胶夹芯柱壳的载荷-位移曲线。由图 6、图 7 可以看出改变夹芯柱壳芯层密度与面芯厚度比对金属橡胶夹芯柱壳的力学特性有明显影响。金属橡胶夹

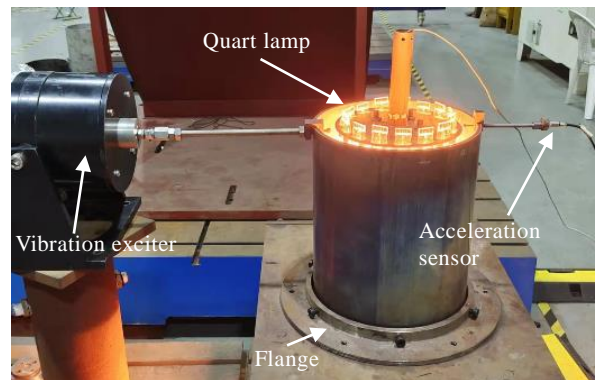


图 5 金属橡胶夹芯柱壳动态试验平台

Fig.5 Dynamic test tooling for cylindrical sandwich shell with metal-rubber

表 3 金属橡胶软夹芯柱壳几何尺寸

Table 3 Size of cylindrical sandwich shell with metal-rubber

No.	h_2/mm	d_{i2}/mm	t_2/mm	$\rho/g\ cm^{-3}$	$a:t_2$
1	60	50	5	1.0	2:50
2	60	50	5	1.5	2:50
3	60	50	5	2.0	2:50
4	60	50	5	1.5	1:50
5	60	50	5	1.5	2:50
6	60	50	5	1.5	3:50

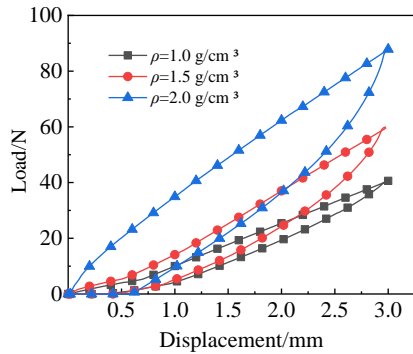


图 6 不同芯层密度下金属橡胶夹芯柱壳的载荷-位移曲线

Fig.6 Load-displacement curves of cylindrical sandwich shell with metal-rubber under different core densities

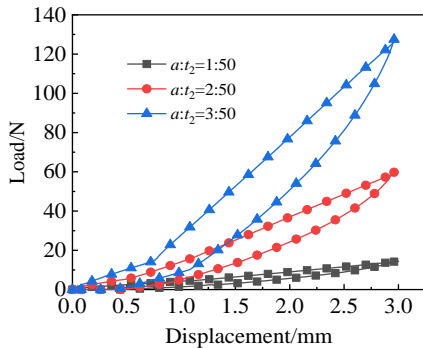


图 7 不同面芯厚度比下金属橡胶夹芯柱壳的载荷-位移曲线

Fig.7 Load-displacement curves of cylindrical sandwich shell with metal-rubber under different panel-core thickness ratios

芯柱壳的刚度主要由面板、芯层及焊点提供的刚度组成。夹芯柱壳的内外面板对整体起主要支承作用，面板厚度直接影响金属橡胶夹芯柱壳刚度；金属橡胶密度越大，内部的金属丝排布越紧密，自身的刚度也越大。因此，金属橡胶夹芯柱壳结构的刚度与面板厚度、芯层密度正相关。夹芯柱壳面芯间接触点由钎焊连接，在产生形变的过程中，夹芯柱壳结构面板与芯层间的滑移被焊点限制，金属丝与面板间的拉扯增大了夹芯

柱壳整体的刚度。由于金属橡胶夹芯柱壳结构力学特性含有非线性部分，对载荷-位移曲线取割线计算。

测得的金属橡胶夹芯柱壳的割线刚度如表 4 所示。由试验结果可以发现金属橡胶夹芯柱壳结构的载荷-位移曲线表现出明显的非线性，加载曲线在卸载曲线上方，表示同位移下加卸载所对应的载荷大小不同，荷载-位移曲线整体呈现环状。金属橡胶夹芯柱壳的载荷-位移曲线包裹的面积代表金属橡胶夹芯柱壳结构形变前后消耗的能量大小，表明该结构在加卸载过程中体现出了金属橡胶材料的阻尼特性。

以损耗因子评估夹芯柱壳的阻尼特性如表 4 所示，可以发现提高芯层密度增强了夹芯柱壳的阻尼耗能能力，这是由于金属橡胶的耗能机制为受载形变时内部勾连的微螺旋结构相互摩擦、挤压引发能量的消耗。当夹芯层密度上升时，金属橡胶内部的金属丝排布更紧凑，在形变的时候金属丝的摩擦更剧烈，导致更多的能量以内能的形式耗散；密度增大使得金属橡胶芯层与面板的触点更密集，接触面积更大，因此，面芯间的拉扯效果也越强。

当面板厚度增大时夹芯柱壳的损耗因子发生了小幅度的下降，这是由于夹芯柱壳在受载时，刚度越大受压夹芯柱壳形变就越小，对金属橡胶芯层的挤压相对减少，损耗因子下降。金属橡胶夹芯柱壳结构整体形变过程中内外面板形变是异步发生的。首先发生形变的是外面板，由于加载位移较小，假设内外面板仅发生弹性形变不吸收能量，内外面板形变的不同使金属橡胶受内外面板挤压。在夹芯柱壳整体发生形变的过程中，面芯接触处金属丝被焊点锁住，面板与芯层焊接连接部分变形同步发生，而芯层内部金属丝发生接触滑移^[17]，在增强整体结构刚度的同时也引发了耗能。

为探究金属橡胶夹芯柱壳结构在高温条件下的力学特性，选取编号为 2 的样件送入 GWX-1200 高温加

表 4 金属橡胶夹芯柱壳样件准静态力学性能

Table 4 Quasi static mechanical properties of cylindrical sandwich shell with metal-rubber samples

Number	Secant stiffness/ $N\ mm^{-1}$	Loss factor
1	13.53	0.0348
2	20.11	0.0454
3	29.32	0.0747
4	4.81	0.0552
5	20.11	0.0454
6	42.98	0.0437

热炉中进行准静态试验,保持其他条件不变。图 8 为测得的不同温度下金属橡胶夹芯柱壳荷载-位移曲线。

图 9 为计算获得的金属橡胶夹芯柱壳样件割线刚度与损耗因子的变化趋势,可以发现温度对试验样件有明显的影响。在 20~50 °C 区间内金属橡胶夹芯柱壳的割线刚度快速上升,而在 50~200 °C 内割线刚度变化趋势平缓,在 200~250 °C 内割线刚度发生快速的下降。这是由于芯层内部的部分金属丝间存在间隙,室温时金属丝随着加载量的上升而逐渐相互接触,起到提升夹芯柱壳刚度的效果;在高温条件下金属橡胶芯层受热膨胀,芯层内部孔隙缩小,更多数量的金属丝提前接触在一起导致夹芯柱壳刚度上升。在 50~200 °C 内刚度变化不明显,是由于金属丝间孔隙缩小速率减缓,在 200~250 °C 内割线刚度快速下降,主要是由于该温度条件下面板与金属丝弹性模量下降所致。

高温条件下损耗因子的变化趋势为先下降后上升。高温条件一方面会使金属丝的间隙减小,金属丝间接触面积增大提升了刚度,受载时能量多以弹性势

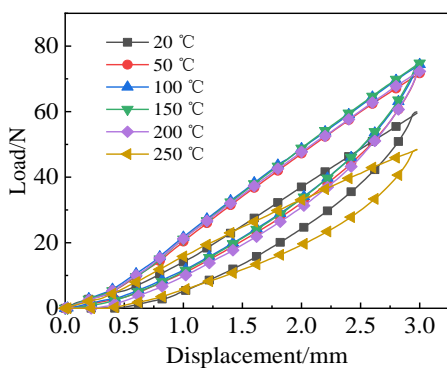


图 8 不同温度下金属橡胶夹芯柱壳的载荷-位移曲线

Fig.8 Load-displacement curves of cylindrical sandwich shell with metal-rubber at different temperatures

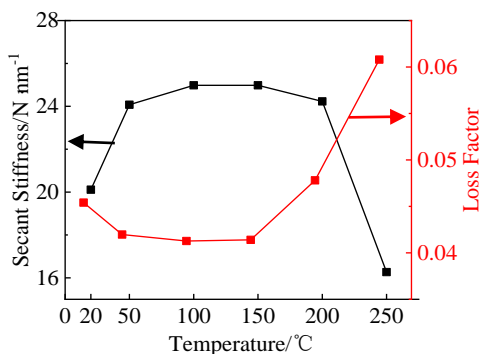


图 9 不同温度下金属橡胶夹芯柱壳的割线刚度与损耗因子

Fig.9 Secant stiffness and loss factor of cylindrical sandwich shell with metal-rubber at different temperatures

能的形式储存,使得损耗因子下降。随着温度继续上升,材料弹性模量开始下降,金属丝间摩擦现象增多,试验样件存储弹性势能的能力减弱而摩擦耗能上升,使得损耗因子上升。

2.2 夹芯柱壳结构动力学特性

以金属橡胶夹芯柱壳结构的固有频率、振型、阻尼比为目标进行了试验模态分析。对金属橡胶夹芯柱壳表面施加猝发激励,用加速度传感器拾取表面振动信号。此处用一个同高度、内径、质量、材料的实芯圆柱壳作为刚性等效对比,观察金属橡胶夹芯柱壳的振动衰减情况与阻尼特性。

图 10 为时域响应曲线。由图 10 可知,在受到相同的激励后,刚性等效件表面的响应信号呈纺锤形并按一定周期缓慢衰减,而金属橡胶夹芯柱壳的响应曲线呈漏斗形并且振幅衰减速度更快。此处金属橡胶夹芯柱壳表现出了明显的阻尼特性,这归功于金属橡胶夹芯柱壳结构独特的干摩擦耗能特性。金属橡胶夹芯柱壳在振动时夹芯层内部金属丝发生往复摩擦与循环挤压,体现出滞回吸能特性。金属橡胶夹芯柱壳结构在振动的过程中不断拉伸、压缩金属橡胶材料,使金属橡胶反复进行加卸载过程,从而将受到的动能通过内能的形式不断消耗;而刚性等效件由于其本身接近理想的无阻尼结构,受到激励后能量主要以弹性势能储存,耗能效率低,故表面振动衰减较慢。因此,在自由振动过程中金属橡胶夹芯柱壳的阻尼特性明显优于刚性等效件。

为进一步研究金属橡胶夹芯柱壳的阻尼特性,以单点激励多点拾振的方式,使用力锤对自由边界下的金属橡胶夹芯柱壳进行激振,测得模态振型如图 11 所示。由试验结果可知金属橡胶夹芯柱壳结构虽然结构复杂,但是也一定程度上表现出了柱壳结构的特性。金属橡胶夹芯柱壳内部的金属丝分布存在随机性,导致受迫振动时原本成对出现的振型发生变化。在图 11

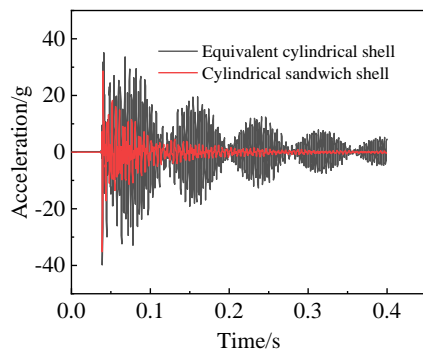


图 10 时域响应曲线

Fig.10 Time domain response curve

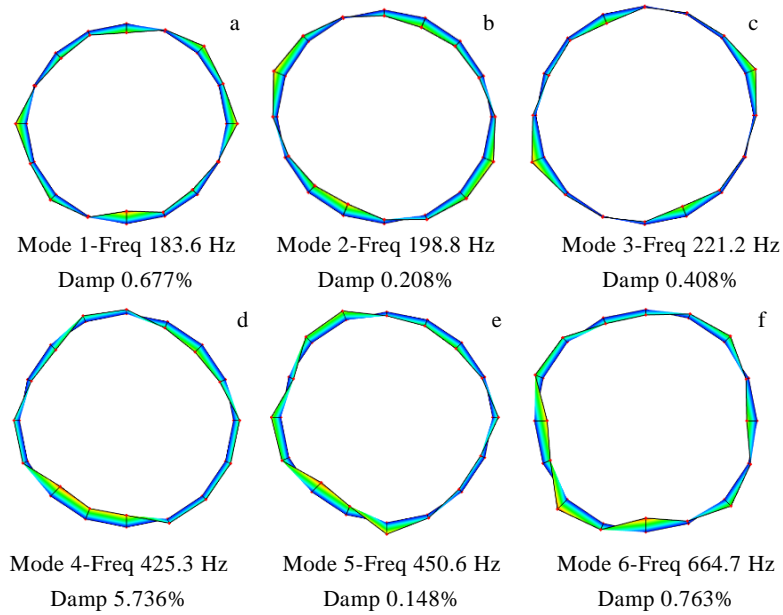


图 11 金属橡胶夹芯柱壳第 1~6 阶振型

Fig.11 Models of cylindrical sandwich shell with metal-rubber

中, 第 1、2、3 阶振型分布为两方椭圆鼓曲, 而第 4 阶振型表现为三方鼓曲, 第 5、6 阶模态振型分布为四方鼓曲。

2.3 温度梯度对夹芯柱壳结构力学特性的影响

在考虑热载荷的模态分析中, 由于温度场难以实现均匀分布, 试验样件表面存在一定温度梯度分布的现象。综合以上问题可知, 热模态数值分析存在一定局限性, 在考虑热载荷条件时, 可依靠热模态试验研究进行参考与验证。

热模态试验在试验模态分析的基础上额外考虑了热载荷影响。在试验过程中需要同时对激励力与响应信号进行采集, 传统的信号采集方法为在被测样件上布置传感器。常规的力传感器与位移传感器所能正常工作的温度不高, 部分特制耐高温传感器受限于成本过高, 因此, 通过陶瓷引伸杆将振动信号导出至远离热源处的方法进行数据采集。将拾取到的被测样件的输入和输出信号, 经信号处理获得频响函数, 并根据频响函数确定系统的固有频率、阻尼比、振动加速度级等特性。如图 5 所示将金属橡胶夹芯柱壳样件用特制法兰工装锁于激振平台, 边界条件为模拟一端固支一端自由, 夹芯柱壳向外开口端通过夹具与激振杆相连, 在夹芯柱壳表面布置有 IEPE 型加速度传感器用于拾取表面加速度响应。激振力 5 N, 测试频段为 0~2000 Hz。引入振动加速度级的指标评估金属橡胶夹芯柱壳受到激励时的振动情况。

图 12 为测得金属橡胶夹芯柱壳样件的一阶固有

频率与振动加速度级。可知, 金属橡胶夹芯柱壳的固有频率随温度的上升而逐渐下降。这是由于试验样件受热膨胀使得面板刚度下降。在高温条件下夹芯柱壳的振动加速度级变化较小, 可以得知金属橡胶夹芯柱壳结构在高温条件下依旧能发挥出相对稳定的振动特性。在 20 °C 环境下试验样件的固有频率为 185 Hz, 在 400 °C 环境下固有频率降至最低, 在该条件下固有频率为 161 Hz。在 20~500 °C 温度区间内, 该金属橡胶夹芯柱壳样件的固有频率最多下降了 12.97%。试验样件在高温条件下刚度下降以至于试验样件在受到激励时振动幅值更大, 同时夹芯层中的金属丝由于受热膨胀, 导致金属丝间间隙减少, 接触不断变得紧密, 摩擦

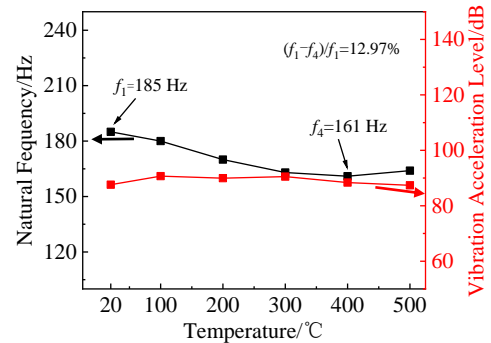


图 12 不同温度下金属橡胶夹芯柱壳固有频率与振动加速度级
Fig.12 Natural frequency and vibration acceleration level of cylindrical sandwich shell with metal-rubber at different temperatures

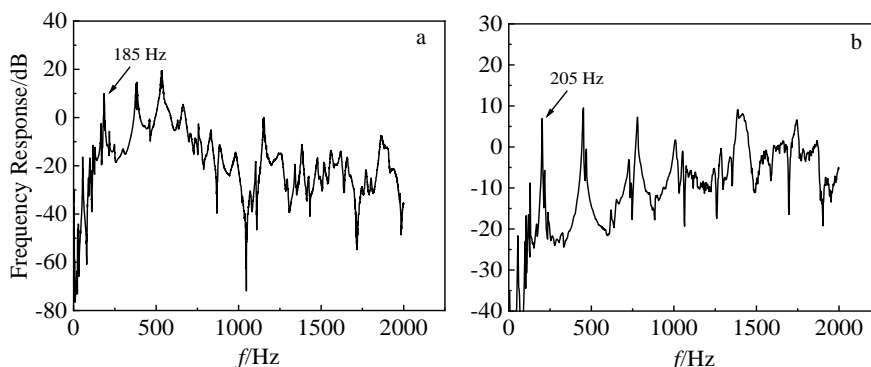


图 13 金属橡胶夹芯柱壳频响曲线

Fig.13 Frequency response curves of cylindrical sandwich shell with metal-rubber: (a) exciter excitation and (b) hammer excitation

面积增加，芯层的阻尼耗能效果逐渐增强。由试验结果可知在室温至 300 °C 的 4 组试验中材料弹性模量下降导致振动加速度上升，阻尼效果下降；在 400 与 500 °C 2 组试验中芯层中金属丝摩擦效果加剧导致阻尼耗能占据主导，振动量级下降。

2.4 外部激励条件对夹芯柱壳结构动态力学特性的影响

采用力锤与激振器 2 种方式对夹芯柱壳进行了试验模态分析，激励方式的不同一定程度上会影响测试结果。力锤激励的试验原理为使用力锤施加猝发激励，在时域上近似一个极窄的半正弦波，该半正弦波在频域上体现为一定频段内平稳的激励输入。根据加速度传感器反馈回的信号与力锤上的力信号可求得试验样件的频响曲线。但是力锤的使用有着一定的限制，最为关键的是力锤需要有效地将被测物体激励起来，此外还有着高频下能量衰减导致在高频频段内的响应失真的问题。

在 2.3 节中考虑到高温条件的影响，使用的是激振器激励的方式。激振器施加的激励为频率 ω 逐渐增加的正弦波，变化对应于频域上相应频率下的激励与响应，随着时域上正弦波频率 ω 不断增加，获得目标频段内的频响曲线。采用激振器激励的方式相比力锤激励缓解了激励能量衰减的问题，但是由于激振杆与被测样件的连接，引入了附加刚度与质量，导致测得固有频率发生偏移，使试验结果产生误差。

结合力锤与激振器激励方式特点的不同，在保证夹芯柱壳其他边界条件相同的情况下，测试并对比 2 种激振方式的频响曲线（图 13）。可以发现测试结果呈现出一定的差异。

如图 13 所示激振器激励测得的一阶固有频率为 185 Hz，而力锤激励测得的一阶固有频率为 205 Hz，偏差值为 9.76%。影响固有频率的因素主要由质量 m

与刚度 k 决定。激振器结果偏大的原因是受激振杆引入的附加质量与附加刚度的影响，即激振杆连接也成为夹芯柱壳边界条件的一部分，影响了测试结果。因此，在使用激振器测试金属橡胶夹芯柱壳结构力学特性时必须将激振杆附带的影响考虑进去。在恶劣条件下，人工难以操作力锤而需要激振器替代时，需注意实测的金属橡胶夹芯柱壳固有频率值比真实值略低。

2.5 阻尼减振机制分析

金属橡胶夹芯柱壳结构在准静态压缩与扫频试验中都体现出了一定的阻尼吸能特性。在准静态压缩试验中夹芯柱壳受到径向外压，包覆面发生形变对夹芯层挤压，夹芯柱壳从圆柱形转为椭圆柱形，引发芯层金属丝之间的挤压/摩擦吸能，同时金属丝受与面板相连接的焊点拉扯。随着位移的增加，夹芯层内部排列的金属丝微螺旋结构有拉伸解旋的趋势，由于径向上位移量的不同，金属丝层间的剪切引发金属丝对磨与拉伸引发吸能，在周长方向上金属橡胶也会因为两侧发生位移量的不同产生拉压。动态试验中体现的动态力学特性耗能方式与准静态条件下不同。由于位移量更小，振动频率更高，金属丝微螺旋结构的解旋现象锐减，金属橡胶沿径向剪切引发的摩擦现象增加。在 0~500 °C 条件下金属橡胶夹芯柱壳表现出固有频率下降，这是受温度上升刚度下降的影响；振动加速度级先上升后下降，一方面高温条件下刚度降低导致形变增加；另一方面金属丝的膨胀使得芯层内空隙减小，金属丝间摩擦加剧。

3 结 论

1) 金属橡胶夹芯柱壳结构的割线刚度随着面板厚度、芯层密度的增加而上升。高温条件下金属橡胶夹芯柱壳结构的刚度在 20~50 °C 内快速上升，在 50~200 °C 内变化平缓，在 200~250 °C 内快速下降。割

线刚度来源于内外面板和夹芯层刚度以及面芯间焊点的拉扯阻碍金属橡胶夹芯柱壳发生形变。

2) 通过试验模态分析的方法分析了金属橡胶夹芯柱壳结构的模态与 0~500 °C 的阻尼特性。根据频响曲线分析了试验样件的固有频率, 测得在该环境下该金属橡胶夹芯柱壳样件的固有频率最多下降 12.97%。

参考文献 References

- [1] Li Binchao(李斌潮), Lu Guanglin(路广霖), Han Shuai(韩帅) et al. *Noise and Vibration Control*(噪声与振动控制)[J], 2020, 40(3): 219
- [2] Arefi M, Bidgoli E M R, Dimitri R et al. *Applied Sciences*[J], 2019, 9(8): 1580
- [3] Wei X Y, Li D, Xiong J. *Composites Science and Technology*[J], 2019, 184: 107 878
- [4] Yan Hui(闫辉), Yan Xu(阎旭), Zhao Yalei(赵亚磊) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(4): 1140
- [5] Yan Leilei(闫雷雷). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(12): 4365
- [6] Karimipour I, Beni Y T. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*[J], 2022, 106: 106 105
- [7] Zhou Xiaosong(周晓松), Mei Zhiyuan(梅志远). *Journal of National University of Defense Technology*(国防科技大学学报)[J], 2020, 42(5): 74
- [8] Ao Qingbo(敖庆波), Wang Jianzhong(王建忠), Ma Jun(马军) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(11): 3861
- [9] Zhang Mi(张弥), Wang Xiaodong(王晓东), Su Yadong(苏亚东) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metal*(中国有色金属学报)[J], 2018, 28(3): 457
- [10] Li Fengkai(李丰恺), Deng Anzhong(邓安仲). *Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2017, 40(5): 103
- [11] Ren Dexin(任德新), Zhang Dayi(张大义), He Yifeng(何易峰) et al. *Journal of Propulsion Technology*(推进技术)[J], 2015, 36(1): 124
- [12] Peng Fuhao(彭富豪), Wu Yiwan(吴乙万), Bai Hongbai(白鸿柏) et al. *Computer Measurement & Control*(计算机测量与控制)[J], 2020, 28(4): 241
- [13] Peng F H, Wu Y W, Bai H B et al. *Shock and Vibration*[J], 2020, 2020: 9720167.1
- [14] Zhu Y, Wu Y W, Bai H B et al. *Shock and Vibration*[J], 2019, 2019: 7 297 392
- [15] Ma Yanhong(马艳红), Lu Hongwei(陆宏伟), Zhu Haixiong(朱海雄) et al. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*(航空学报)[J], 2013, 34(6): 1301
- [16] Xiao K, Bai H B, Xue X et al. *Shock and Vibration*[J], 2018, 2018: 3 974 381
- [17] Wang Shanshan(王珊珊), Wei Yuhan(魏雨函), Xue Xin(薛新) et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*(复合材料学报)[J], 2022, 39(3): 1323
- [18] Wang Shanshan(王珊珊), Xue Xin(薛新), Bai Hongbai(白鸿柏) et al. *Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2020, 43(3): 114
- [19] Wang Y J, Zhang Z J, Xue X M et al. *Thin-Walled Structures*[J], 2020, 154: 106 816
- [20] Xiao Kun(肖坤), Bai Hongbai(白鸿柏), Xue Xin(薛新) et al. *Journal of Vibration and Shock*(振动与冲击)[J], 2019, 38(23): 239
- [21] Yang J S, Ma L, Schmidt R et al. *Composite Structures*[J], 2016, 148: 85
- [22] Yu Kaiping(于开平), Bai Yunhe(白云鹤), Zhao Rui(赵锐) et al. *Mechanics in Engineering*(力学与实践)[J], 2018, 40(1): 1
- [23] Deng Cuizhen(邓翠贞), Peng Wenyi(彭文屹), Chen Lin(陈琳) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(12): 3773
- [24] Wang Xiao(王潇), Huang Shutao(黄树涛), Yu Xiaolin(于晓琳) et al. *Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2019, 42(4): 54
- [25] Wu Dafang(吴大方), Wang Yuewu(王岳武), Pu Ying(蒲颖) et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*(复合材料学报)[J], 2015, 32(2): 323
- [26] Wu D F, Wang Y W, Shang L et al. *Composites Part B Engineering*[J], 2016, 90: 424
- [27] Dai Jiangbo(代江波), Luo Xianqiang(罗现强), Fu Shunguo(符顺国) et al. *Journal of Aerospace Power*(航空动力学报)[J], 2021, 36(5): 907
- [28] Li Yufeng(李宇峰), He Lile(贺利乐), Zhang Xuan(张璇) et al. *Chinese Journal of Applied Mechanics*(应用力学学报)[J], 2017, 34(1): 43

Damping Characteristics of Cylindrical Sandwich Shell with Metal-Rubber Under High Temperature Condition

Wu Xueqian, Wu Ruixian, Xiong Yunlingzi, Xue Xin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Institute of Metal Rubber & Vibration Noise, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: In order to identify the damping and vibration-reduction characteristics of metallic cylindrical sandwich shell under high temperature condition, a metal-rubber material with excellent temperature resistance and viscoelastic damping characteristics was adopted as the sandwich core for damping layer. The effects of internal structural parameters and external excitation conditions on the dynamic mechanical characteristics of cylindrical sandwich shell with metal-rubber under different temperature gradients were studied. Firstly, the traditional metal-rubber stamping preparation process and vacuum brazing connection process were combined to realize the reliable metallurgical combination on the panel/core interface of sandwich cylindrical shell structural. The persistent temperature resistance of the prepared sample can be up to 500 °C. Secondly, the effects of key parameters such as the core density, the thickness ratio of panel and core and the gradient temperature on the high-temperature damping characteristics by different excitation conditions were analyzed. The main performance evaluation indexes include the secant stiffness, the natural frequency, the vibration acceleration level and the high temperature damping ratio. Comparing to the non-sandwich cylindrical shell with equal quality, the stiffness of cylindrical sandwich shell with metal-rubber is positively correlated with the panel thickness and the core density. The damping effect decreases in the temperature range of 0~300 °C, but increases in the temperature range of 300~500 °C.

Key words: metal-rubber; cylindrical sandwich shell; brazing; natural stiffness; damping and vibration reduction

Corresponding author: Xue Xin, Ph. D., Professor, School of Mechanical Engineering and Automation, Institute of Metal Rubber & Vibration Noise, Fuzhou University, Fuzhou 350116, P. R. China, E-mail: xin@fzu.edu.cn