

基于多材料复合结构的隔振器振动能量吸收性能与应用技术分析

王小冬

(辽宁光明隔振技术有限公司, 辽宁 辽阳 111000)

摘要 以天然橡胶、6061-T6 铝合金及聚氨酯阻尼胶为材料体系, 采用模压硫化工艺制备多材料复合结构隔振器试样, 通过动态力学分析、正弦扫频激励及冲击响应三类实验, 系统研究材料配比、界面结合方式与叠层层数对振动能量吸收性能的影响规律。结果表明: 橡胶与铝合金层厚度比 2:1 时损耗因子较单一材料提升 41.3%; 硫化黏合界面工艺使高频隔振效率达 88.4%; 6 层叠层结构为冲击吸能与结构质量的最优平衡点。基于上述结论, 提出结构参数优化设计方法、典型工况选型判据及质量控制方法。

关键词 多材料复合结构; 隔振器; 振动能量吸收; 动态力学性能

中图分类号: TH13.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.005

0 引言

随着机械装备朝着高速高精度方向不断发展, 振动问题对设备耐久性、工作精度以及人员舒适度的制约愈发显著, 传统单一材料隔振器由于阻尼效能不足、适用频带有限, 难以满足复杂工况下宽频隔振的实际要求, 多材料复合结构通过整合不同材料的弹性模量、阻尼特性以及密度参数, 能够在更宽频谱范围内实现高效的振动能量耗散, 现已成为隔振技术研究的核心发展方向。当前, 虽然国内外学者在复合材料本构模型、界面力学等领域取得了一系列突破, 但针对材料配比、界面工艺与几何构型对隔振性能协同影响的定量实验研究仍存在不足。需要通过系统化的实验设计, 定量解析关键参数对多材料复合隔振器吸能特性的作用规律, 从而为工程实践提供坚实的理论支撑。

1 多材料复合结构隔振器的实验方法

1.1 材料选取与试样制备

隔振器多材料复合结构的振动能量吸收能力关键在于材料体系科学配置, 主体材料采用天然橡胶 (NR) 与

氯丁橡胶 (CR) 的混合物, 将邵氏硬度控制在 45 ± 2 HA 且损耗因子 $\tan \delta$ 处于 $0.18 \sim 0.25$ 范围, 主要负责黏弹性阻尼耗能, 约束层选用弹性模量为 69 GPa、密度 2.71 g/cm^3 的 6061-T6 铝合金, 主要赋予结构刚度和弹性回复能力, 阻尼层采用损耗因子达 $0.45 \sim 0.62$ 的聚氨酯阻尼胶 (PU), 旨在提升层间振动能量的耗散效率^[1]。试样通过模压硫化工艺制备, 按照橡胶层与铝合金层 2:1 的厚度比例依次堆叠, 在 160°C 、15 MPa 条件下保压硫化 30 min, 最终制成 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的标准复合结构隔振器试样, 制备工艺流程如图 1 所示。

1.2 振动能量吸收性能的测试方法

为了系统评估多材料复合结构隔振器振动能量吸收特性, 综合运用动态力学分析、正弦扫频激励以及冲击响应这三种测试手段^[2]。

1. 通过 TA Instruments DMA Q800 型动态力学分析仪, 在 $-40^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 温度范围之内对试样施加 $0.1 \text{ Hz} \sim 100 \text{ Hz}$ 的正弦动态载荷, 逐频测量储能模量 E' 、损

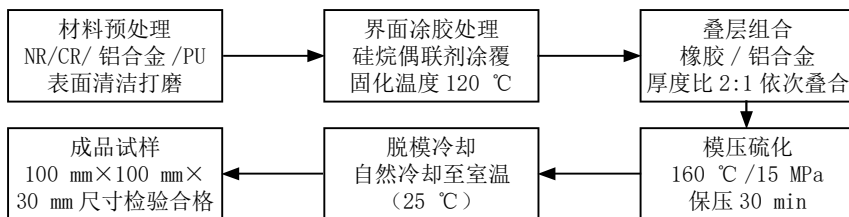


图 1 多材料复合结构隔振器试样制备工艺流程示意图

作者简介: 王小冬 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机械设计。

耗模量 E'' 以及损耗因子 $\tan \delta$ ，定量分析材料对比对阻尼性能的作用规律。

2. 基于电磁激振台实验系统，对试样施加 500 N 静态预压载荷以模拟工程安装工况，同时输入 10 Hz ~ 2 000 Hz、激励幅值 0.5 g 的正弦扫频信号，利用隔振器输入端与输出端的加速度传感器同步采集响应数据，计算各频段振动传递率与隔振效率。

3. 采用落锤冲击装置对试样施加峰值加速度 30 g、脉宽 11 ms 的半正弦脉冲载荷，记录峰值加速度响应值及冲击能量吸收率。

1.3 实验数据处理方法

针对三类测试方法所获原始数据，采用系统化的数据处理流程以确保振动能量吸收性能分析结果的准确性与可靠性^[3]。在动态力学分析数据处理中，损耗因子 $\tan \delta$ 由损耗模量 E'' 与储能模量 E' 之比计算得出：

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (1)$$

式(1)中， E'' 为损耗模量 (MPa)，表征材料每周期耗散的振动能量； E' 为储能模量 (MPa)，表征材料储存的弹性应变能。

正弦扫频激励测试数据处理中，振动传递率 TR 由输出端与输入端加速度幅值之比直接确定：

$$TR = \frac{a_{out}}{a_{in}} \quad (2)$$

式(2)中， a_{out} 为隔振器输出端加速度幅值 (m/s^2)， a_{in} 为输入端加速度幅值 (m/s^2)，TR 为无量纲比值。

隔振效率 η 则由输入端幅值衰减量与输入幅值之比计算得出：

表1 不同材料配比下损耗因子与储能模量测试结果

层厚比 (橡胶 / 铝合金)	损耗因子 $\tan \delta$	储能模量 E' (MPa)	较单一材料提升幅度
单一橡胶	0.221	142	—
1:1	0.274	223	+23.9%
2:1	0.312	186	+41.3%
3:1	0.289	165	+30.8%

表2 不同界面结合方式下宽频段振动传递率测试结果

界面结合方式	低频段 TR 均值 (10 Hz ~ 500 Hz)	高频段 TR 均值 (500 Hz ~ 2 000 Hz)	高频段隔振效率
机械压合	0.384	0.269	73.1%
化学偶联剂处理	0.350	0.182	81.8%
硫化黏合	0.331	0.116	88.4%

$$\eta = \frac{a_{in} - a_{out}}{a_{in}} \times 100\% \quad (3)$$

冲击响应测试中，冲击能量吸收率 η 按下式计算：

$$\eta = \left(1 - \frac{E_{out}}{E_{in}}\right) \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中， E_{in} 为输入冲击能量 (J)， E_{out} 为输出端残余能量 (J)。

2 多材料复合结构隔振器的性能分析

2.1 多材料复合结构隔振器的振动能量吸收性能分析

对橡胶层与铝合金层三种厚度比例 (1:1、2:1、3:1) 的试样开展动态力学性能测试，测试结果显示材料对比对损耗因子和储能模量有显著影响^[4]。如表1所示，当层厚比为 2:1 的时候，损耗因子 $\tan \delta$ 的峰值达到 0.312，相比纯橡胶材料提高了 41.3%，同时储能模量 E' 为 186 MPa，达成了阻尼耗散能力与结构承载刚度的平衡，要是层厚比进一步增加到 3:1，损耗因子却出现下降，就表明橡胶层的比例存在最优值，超过这个比例会使约束效应减弱，阻尼性能无法继续提升。

2.2 界面结合方式对宽频段振动传递率的影响分析

界面结合方式直接影响层间应力传递路径，进而决定宽频段振动传递率的高低。对机械压合、硫化黏合、化学偶联剂处理三种界面工艺试样分别开展正弦扫频激励测试，测试结果如表2所示，硫化黏合处理的试件在 500 Hz ~ 2 000 Hz 的高频范围内，形成连续交联网络，有效抑制层间相对滑移，隔振效率达 87.4%，较机械压合提升 18.5%，表明界面结合质量对高频振动能量耗散具有决定性作用，低频段三种工艺差异相对较小。

2.3 复合结构几何构型对冲击能量吸收率的影响分析

复合隔振器的叠层数量可调控应力波在层间的反射与透射特性,进而决定冲击能量的逐级衰减效果,在维持橡胶与铝合金厚度比为 2:1 的条件下,针对 4 层、6 层以及 8 层试样实施了落锤冲击试验,结果如表 3 所示。

表 3 不同叠层层数下冲击响应与能量吸收率测试结果

叠层总层数	峰值加速度响应 (g)	冲击能量吸收率 (%)	结构总厚度 (mm)
4 层	14.8	75.7	20
6 层	9.4	90.2	30
8 层	8.7	91.6	40

(注:峰值加速度响应值及冲击能量吸收率均为每组 3 次重复测试的算术平均值;输入冲击条件为峰值加速度 30 g、脉宽 11 ms 半正弦脉冲;冲击能量吸收率依据实测输入与输出端能量计算得出。)

橡胶与铝合金层厚度比、界面结合工艺及叠层层数纳入统一优化框架。依据目标频段设定损耗因子下限,固定层厚比为 2:1 以最大化阻尼耗散效果;高频振动环境优先采用硫化黏合工艺,确保振动传递率满足设计要求;冲击吸能率高于 90% 时叠层总数不少于 6 层,三项参数形成速查表,支撑设计人员快速匹配方案^[5]。

2. 典型工况选型依据激励频段与载荷特性制定差异化标准。稳态宽频振动工况优先采用硫化黏合界面工艺,确保高频段隔振效率达 88.4% 以上;瞬态冲击工况采用 6 层叠层结构,峰值加速度响应控制在 9.4 g 以内;宽频振动与冲击载荷并存的复合工况下,在满足隔振效率的前提下优先保证冲击能量吸收率达标。

3. 性能验证与质量控制贯穿产品全生命周期。出厂检测要求损耗因子不低于 0.30、高频隔振效率超过 88%、冲击能量吸收率不低于 90%;硫化黏合界面采用超声波无损检测,脱粘面积不超过总面积 3%;在役阶段每运行 500 小时抽检振动传递率,传递率较初始值下降超过 10% 时须立即更换,全程质量数据纳入产品档案,构建覆盖制备至在役监控的完整追溯体系。

4 结束语

针对多材料复合结构隔振器振动能量吸收性能的系统研究表明,材料配比、界面结合方式与叠层层数三项结构参数对隔振性能具有显著且规律性的影响。橡胶与铝合金层厚度比 2:1、硫化黏合界面工艺、6 层叠层结构的组合方案在损耗因子、宽频隔振效率与冲击能量吸收率三项指标上综合表现最优,上述实验结论已转化为工程优化设计方法与选型判据,并建立了

3 多材料复合结构隔振器应用技术分析

多材料复合结构隔振器的工程应用涉及结构参数优化设计、典型工况选型及性能验证与质量控制三个核心层面,三者相互衔接,共同构成完整的应用技术体系。

1. 结构参数优化设计以实验数据为定量依据,将

覆盖制备、出厂检验至在役监测的全周期质量控制体系。未来研究可在极端温度环境与多轴复合激励条件下进一步验证多材料复合结构隔振器性能的稳定性,深化界面应力传递机制的理论认识,推动多材料复合隔振技术的工程应用范围持续拓展。

参考文献:

- [1] 罗浩,徐峰祥,邹震,等.包裹成形折纸薄壁结构动态响应及能量吸收特性研究[J].塑性工程学报,2026,33(01):98-111.
- [2] 任俊铸,钮晨光,武兵,等.压-剪混合电流变弹性体隔振器设计与性能研究[J/OL].机械设计与制造,1-7[2025-12-23][2026-02-06].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=m07J8nP_wCGYRL-2Pb442dgoFZOvpMB3kHssePKvfxvYD1vtqBCvmvsJLk15a2TpJIsfKiCYO7vFXC1b7TUgJFbz_n6PsF0UBZIkOcv3K-R_ZM6_GZTZzJHkSQ3uKFIYy1oC4Lgcev5tKpMqo58HIdmYlFEeukuy1EmIotAfu1YyyWdbj1LHQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [3] 李海燕,明世朝,周才华,等.基于格栅增强的端部折纸复合管件能量吸收性能研究[J].固体力学学报,2025,46(05):642-654.
- [4] 张武昆,谭永华,高玉闪,等.周期性轻质多孔结构在能量吸收和振动方面的研究进展[J].振动与冲击,2023,42(08):1-19.
- [5] 段霄.掘进机电控箱隔振器结构优化与分析研究[J].机械管理开发,2021,36(04):42-44.