

应用理论

粘弹性约束阻尼层结构的动力学性能研究

赵苗苗^{1,2,3}, 段宇星^{1,2,3}, 杨利^{1,2,3}, 侯峰^{1,2,3}

(1. 西安安思锐航空科技有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 中国飞机强度研究所, 陕西 西安 710065; 3. 航空声学与振动航空科技重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 研究粘弹性约束阻尼层结构(简称约束阻尼层结构)的动力学性能。结果表明: 丁基橡胶可以较好地应用于约束阻尼层结构的阻尼层材料; 约束阻尼层结构可以有效降低50~2 050 Hz范围内共振频率处的振动, 同时共振频率向低频移动; 随着阻尼层材料的损耗因子、储能模量和厚度的增大, 约束阻尼层结构的结构损耗因子增大, 振动衰减效果明显; 约束阻尼层结构的振动衰减的仿真结果与试验结果一致。本研究可为约束阻尼层结构的设计和优化提供参考。

关键词: 约束阻尼层结构; 粘弹性材料; 振动衰减; 损耗因子; 动力学性能

中图分类号: TQ330.1⁺7

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2023)07-0490-07

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2023.07.0490



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

在飞行过程中, 飞机的气动外形和飞行姿态会引发气动载荷, 从而使壁板产生振动, 导致相关配件出现疲劳裂纹, 严重时发生结构破坏。因此, 抑制壁板振动可以提高飞机飞行的可靠性与安全性^[1]。抑制振动的传统方法有主动和被动减振技术, 其中被动减振技术由于成本低、过程简单和工程适应性强而被广泛应用^[2]。

阻尼材料是近年发展起来的一种减振降噪材料, 合理使用阻尼材料可以提高各类机械产品及工程结构的抗振性与稳定性, 延长产品的工作寿命, 提高产品的质量, 也能有效地降低噪声与振动, 防止其对环境的影响^[3-5]。粘弹性约束阻尼层(简称约束阻尼层)结构材料由粘弹性材料和基体材料组成^[6-11], 是将粘弹性材料作为阻尼夹芯层材料与金属基体材料共同组合成复合结构材料。该材料经机械加工可制成各种结构部件, 这些部件具有质量小、阻尼高等特点; 还可加工成地板和壁板等阻尼板附着层, 实现降低结构的振动响应及

辐射, 从而达到降低噪声的目的。目前, 阻尼层的厚度、温度和频率等因素对约束阻尼层结构的动力学性能的影响已有一定研究^[12-16], 但是由于不同环境下约束阻尼层结构具有复杂性, 仍需要对其进行针对性的研究。

本工作以悬臂梁结构为基体结构, 采用有限元技术, 研究设计参数对约束阻尼层结构动力学性能的影响, 并通过仿真与试验验证了振动载荷对约束阻尼层结构振动特性的影响, 可为约束阻尼层结构的设计和优化提供参考。

1 约束阻尼层结构的动力学原理

1.1 设计理论

约束阻尼层结构如图1所示, H_1 , H_2 和 H_3 分别为基体层、阻尼层和约束层的厚度, H_{31} 为基体层中线到约束层中线的距离。

结构损耗因子是评价约束阻尼层结构的动力学性能的重要指标。不考虑约束层的能量耗损和

基金项目: 中国飞机强度研究所自筹基金项目(BYST-LXCT-22-055)

作者简介: 赵苗苗(1987—), 女, 陕西富平人, 西安安思锐航空科技有限公司高级工程师, 硕士, 主要从事高分子材料减振降噪的应用研究。

E-mail: sxzhaomiaomiao@126.com

引用本文: 赵苗苗, 段宇星, 杨利, 等. 粘弹性约束阻尼层结构的动力学性能研究[J]. 橡胶工业, 2023, 70(7): 490-496.

Citation: ZHAO Miaomiao, DUAN Yuxing, YANG Li, et al. Study on dynamic performance of viscoelastic constrained damping layer structures[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(7): 490-496.

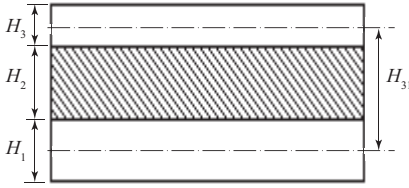


图1 约束阻尼层结构示意图

刚度作用,当约束阻尼层结构发生弯曲时,结构损耗因子(η)^[17]可以表示为

$$\eta = \frac{\beta XY}{1 + (2 + Y)X + (1 + Y)(1 + \beta^2)X^2} \quad (1)$$

式中, β , X 和 Y 分别为约束阻尼层结构的材料损耗因子、剪切参数和刚度参数,其计算式如下:

$$X = \frac{E'b}{p^2 H^2} \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_3} \right) \quad (2)$$

$$p^2 = \omega \sqrt{\frac{m}{b'}} \quad (3)$$

$$Y = \frac{H_{31}^2}{B_1 + B_3} \left(\frac{K_1 K_3}{K_1 + K_3} \right) \quad (4)$$

式中, E' 为粘弹性材料(即阻尼层材料)的储能模量, b 和 H 分别为约束阻尼层结构的宽度和总高度, p 和 ω 分别为约束阻尼层结构的阵型波数和弯曲振动频率(频率), m 为约束阻尼层结构的质量, b' 为约束阻尼层结构的弯曲刚度实部, K_1 和 B_1 分别为基体层材料的拉伸刚度和弯曲刚度, K_3 和 B_3 分别为约束层材料的拉伸刚度和弯曲刚度。

由上可知,约束阻尼层结构的结构损耗因子与 β , X , Y 有关,当 β 和 Y 一定后, X 的最优解(X_0)为

$$X_0 = \frac{1}{\sqrt{(1 + Y)(1 + \beta^2)}} \quad (5)$$

结构损耗因子的最大值($\eta_{\max}$)为

$$\eta_{\max} = \frac{\beta Y}{2 + Y + 2/X_0} \quad (6)$$

综上所述:当 $X < X_0$ 时,增大粘弹性材料的 E' 和减小 p^2 有利于 X 的增大,对结构损耗因子的增大有利;当 $X > X_0$ 时,减小粘弹性材料的 E' 和增大 p^2 有利于 X 的减小,对结构损耗因子的减小有利。因此,设计约束阻尼层结构时,应优先考虑粘弹性材料的 E' ,使它与约束阻尼层结构的使用频率及温度相适应。

将式(5)代入式(6)有

$$\eta_{\max} = \frac{\beta Y}{2 + Y + 2\sqrt{(1 + Y)(1 + \beta^2)}} \quad (7)$$

从式(7)可以看出,约束阻尼层结构的 β 一定时,结构损耗因子最大值随 Y 的增大而增大。

1.2 粘弹性材料的本构方程

粘弹性材料产生阻尼的根本原因是其具有粘弹性,在交变应力作用下可以产生滞后损失。分数阶导数模型可以较好地表征粘弹性材料的动力学行为,其中K-V模型为弹簧和粘壶体(Abel体)的并连体,如图2所示, E_1' 为弹簧的储能模量, σ 和 ε 分别为粘弹性材料的应力和应变, η_1 为粘弹性材料的粘性系数, α 为阶数(与粘弹性材料作用机理有关)。

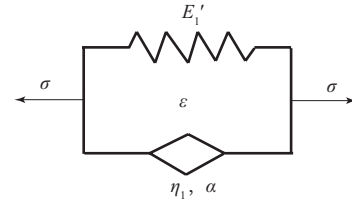


图2 分数阶导数K-V模型

Fig. 2 Fractional derivative K-V model

分数阶导数K-V模型的复模量见式(8),储能模量和损耗模量(E'')分别见式(9)和(10)^[18-21]。

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma(\omega)}{\varepsilon(\omega)} = E_1 + \eta_1(i\omega)^\alpha \quad (8)$$

$$E'(\omega) = E_1 + \eta_1 \omega^\alpha \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) \quad (9)$$

$$E''(\omega) = \eta_1 \omega^\alpha \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) \quad (10)$$

粘弹性材料的损耗因子($\tan\delta$)代表材料在交变应力作用下耗散振动能量的能力,其为 $E''(\omega)$ 与 $E'(\omega)$ 的比值:

$$\tan\delta(\omega) = \frac{\eta_1 \omega^\alpha \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)}{E_1 + \eta_1 \omega^\alpha \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right)} \quad (11)$$

1.3 材料参数的测试

本工作选择西北橡胶塑料研究设计院有限公司提供的丁基橡胶胶料作为阻尼层材料,采用热动态机械分析(DMA)仪对其进行温度扫描($-50 \sim 70^\circ\text{C}$)和频率扫描($0 \sim 200\text{ Hz}$),结果如图3所示。

从图3(a)可以看出:随着温度的升高,丁基橡胶阻尼层材料的储能模量降低;在温度为 $-50 \sim 70^\circ\text{C}$ 范围内,丁基橡胶阻尼层材料出现阻

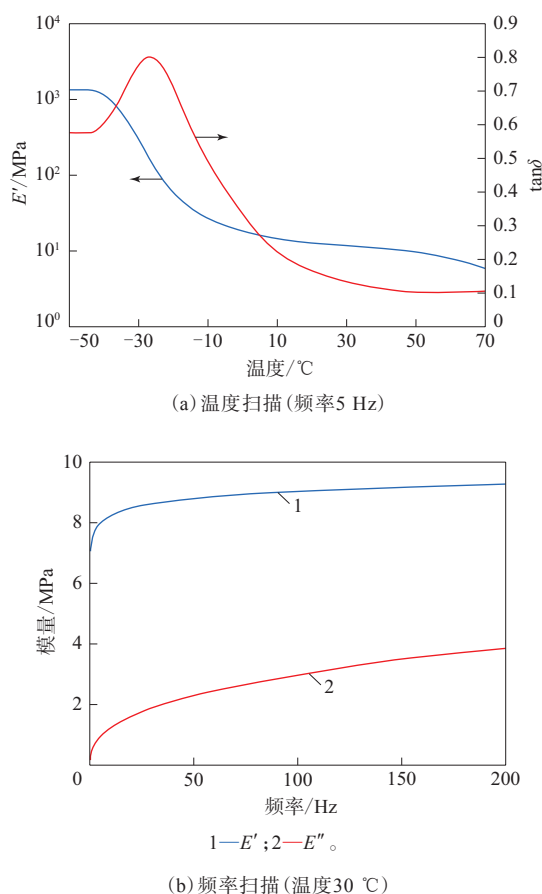


图3 丁基橡胶阻尼层材料的动态力学性能

Fig. 3 Dynamic mechanical properties of butyl rubber damping layer material

尼峰,其损耗因子在0.1~0.8之间,故丁基橡胶可较好地应用于减振降噪领域。

采用式(8)对扫描频率数据进行拟合以表征丁基橡胶阻尼层的储能模量与损耗模量,从图3(b)可以看出,分数阶导数K-V模型可以较好地表征丁基橡胶阻尼层的动态力学行为。

为便于分析,本研究无特别说明时设定约束阻尼层结构的固有频率为50~2 050 Hz,丁基橡胶阻尼层材料的储能模量和损耗因子为常量。

2 有限元分析

2.1 模态分析

悬臂梁结构可以较好地表征壁板结构。本工作采用Ansys软件进行有限元仿真,对无约束阻尼层的悬臂梁(简称单悬臂梁结构)和粘贴约束层/阻尼层的悬臂梁(即约束阻尼层结构)进行模态分析。

单悬臂梁材料为冷轧钢,其长度为195 mm(其中夹持根部和自由端长度分别为95和100 mm),宽度为30 mm,厚度为1.5 mm,质量为65.32 g。约束阻尼层结构的约束层和阻尼层均采用各项同性材料,其中约束层材料为铝合金,弹性模量为2.1 GPa,泊松比为0.3,密度为2.7 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$,厚度为1 mm;阻尼层材料为丁基橡胶胶料,弹性模量为2.4 MPa,泊松比为0.49,密度为1.2 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$,厚度为1 mm。

单悬臂梁结构与约束阻尼层结构的固有频率对比如图4所示。

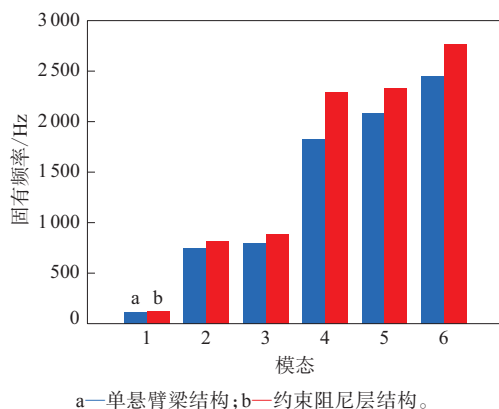


图4 单悬臂梁结构与约束阻尼层结构的固有频率对比

Fig. 4 Comparison of natural frequencies of single cantilever beam structure and constrained damping layer structure

从图4可以看出:固有频率小于1 000 Hz时,约束层/阻尼层对约束阻尼层结构的固有频率及阵型的影响较小;固有频率大于2 000 Hz时,约束层/阻尼层对约束阻尼层结构的固有频率及阵型的影响较大,其固有频率出现增大现象。

约束阻尼层结构的前6阶固有频率与阵型如图5所示。

2.2 谐响应分析

通过谐响应分析可以计算悬臂梁结构在频率为50~2 050 Hz时受0.009 8 N周期性激励力的稳态响应,单悬臂梁结构与约束阻尼层结构的振动响应速度对比如图6所示。

从图6可以看出,与单悬臂梁结构相比,约束阻尼层结构在一阶共振处的振动响应速度由0.78 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低至0.36 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,一阶频率由128 Hz降至117 Hz,说明约束阻尼层结构的各阶共振频率

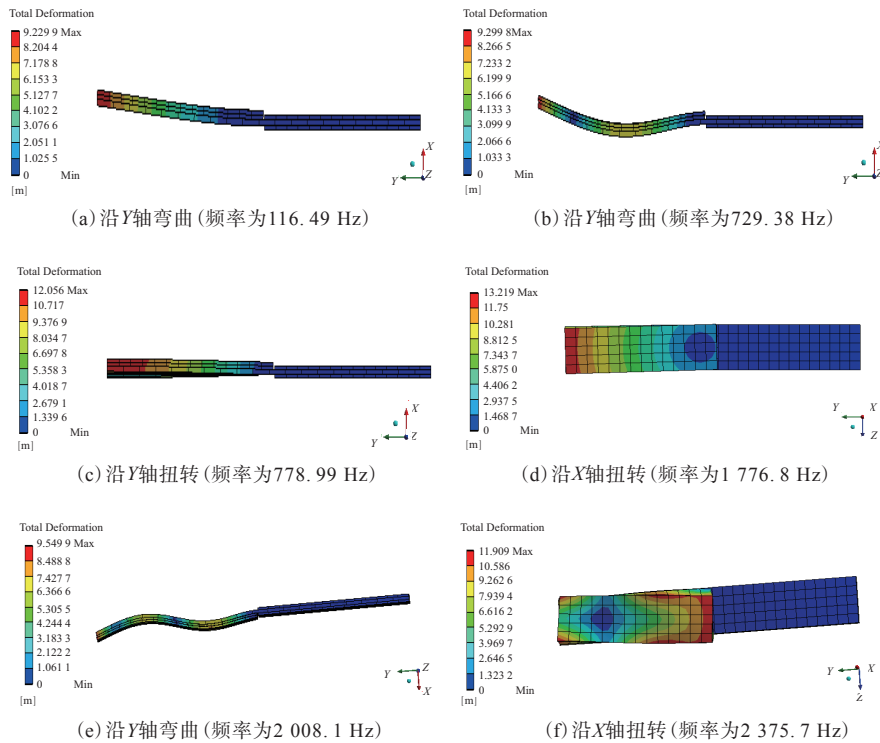
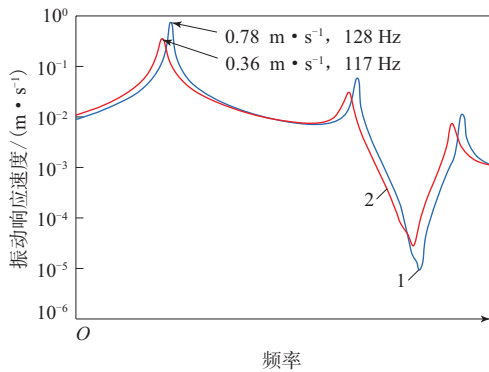


图5 约束阻尼层结构的前6阶固有频率与阵型

Fig. 5 First six order natural frequencies and formations of constrained damping layer structure



注同图4。

图6 单悬臂梁结构和约束阻尼层结构的
振动响应速度对比Fig. 6 Comparison of vibration response velocities of
single cantilever beam structure and constrained
damping layer structure

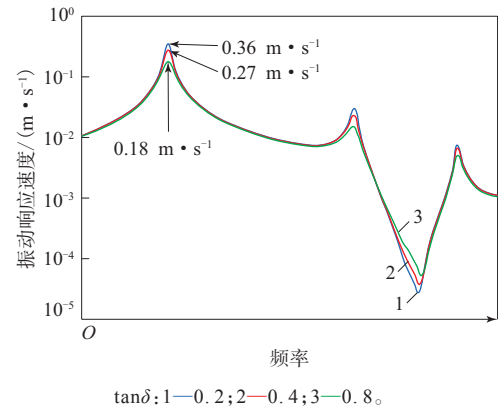
向低频移动,约束层/阻尼层可以明显衰减约束阻尼层结构共振处的振动。

2.3 阻尼层材料对约束阻尼层结构动力学性能的影响

2.3.1 阻尼层材料的损耗因子

设阻尼层材料的储能模量和厚度为定值,研究阻尼层材料的损耗因子对约束阻尼层结构动力

学性能的影响,结果如图7所示。



$\tan \delta$: 1—0.2; 2—0.4; 3—0.8。

图7 阻尼层材料的损耗因子对约束阻尼层结构
振动响应速度的影响Fig. 7 Influence of loss factors of damping layer material on
vibration response velocities of constrained damping
layer structure

从图7可以看出,随着阻尼层材料的损耗因子的增大,约束阻尼层结构在一阶共振处的振动响应速度由 $0.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $0.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,说明约束阻尼层结构的损耗因子随着阻尼层材料的损耗因子的增大而增大。

2.3.2 阻尼层材料的储能模量

设阻尼层材料的损耗因子和厚度为定值,阻尼层材料的储能模量对约束阻尼层结构动力学性能的影响如图8所示。

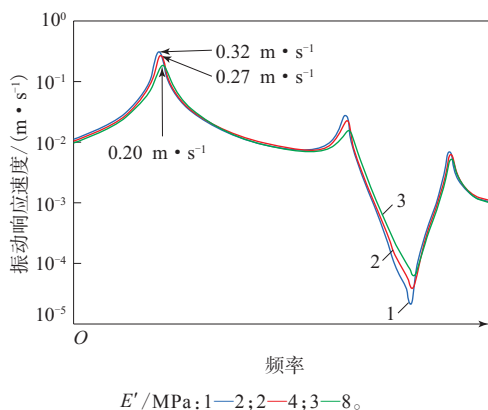


图8 阻尼层材料的储能模量对约束阻尼层结构振动响应速度的影响

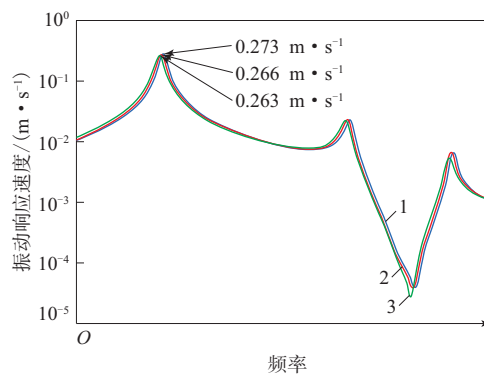
Fig. 8 Influence of storage modulus of damping layer material on vibration response velocities of constrained damping layer structure

从图8可以看出:随着阻尼层材料的储能模量的增大,约束阻尼层结构的共振频率向高频移动;约束阻尼层结构在一阶共振处的振动响应速度由 $0.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $0.20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,即约束阻尼层结构共振处的振动减小,结构损耗因子增大。

2.3.3 阻尼层材料的厚度

设阻尼层材料的损耗因子和储能模量为定值,阻尼层材料的厚度对约束阻尼层结构动力学性能的影响如图9所示。

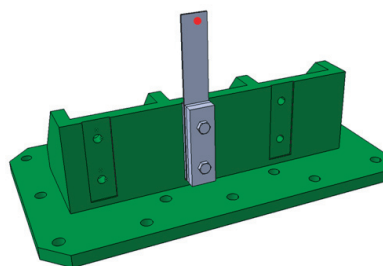
从图9可以看出,随着阻尼层材料的厚度的增大,约束阻尼层结构共振处的振动响应速度减小,即约束阻尼层结构的结构损耗因子增大,同时结构的共振频率向低频移动。



阻尼层材料的厚度/mm: 1—1; 2—1.5; 3—2。

图9 阻尼层材料的厚度对约束阻尼层结构振动响应速度的影响

Fig. 9 Influence of thicknesses of damping layer material on vibration response velocities of constrained damping layer structure



(a) 测点布置



(b) 安装示意

图10 动力学性能试验示意

Fig. 10 Diagram of dynamic performance test

$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $0.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;随着阻尼层厚度的增大,约束阻尼层结构的抑振效果越好,即试验结果与仿真结果一致。

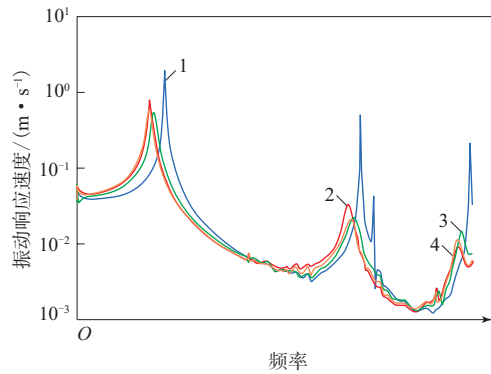
4 结论

本工作对约束阻尼层结构的设计理论及粘弹性材料的本构关系进行分析;通过Ansys有限元技

3 试验验证

设计约束阻尼层结构并进行动力学性能试验(见图10),采用振动台进行频率为 $50 \sim 2050 \text{ Hz}$ 的正弦频率扫描(激励力为 0.0098 N),考察阻尼层材料的厚度对约束阻尼层结构动力学性能的影响,结果见图11。

从图11可以看出:与单悬臂梁结构相比,约束阻尼层结构在一阶共振处的振动响应速度从 1.80



阻尼层材料的厚度/mm: 1—0; 2—1; 3—1.5; 4—2。

图11 阻尼层材料的厚度对约束阻尼层结构振动响应速度影响的试验结果

Fig. 11 Test results of influence of thicknesses of damping layer material on vibration response velocities of constrained damping layer structure

术对约束阻尼层结构进行了模态分析及谐响应分析,并对约束阻尼层结构中阻尼层材料的损耗因子、储能模量及厚度对约束阻尼层结构动力学的影响进行了分析,得出以下结论。

(1) 丁基橡胶可以较好地应用于约束阻尼层结构的阻尼层材料。

(2) 约束阻尼层结构可以有效降低50~2 050 Hz范围内共振频率处的振动,同时共振频率向低频移动。

(3) 随着阻尼层材料的损耗因子、储能模量和厚度的增大,约束阻尼层结构的结构损耗因子增大,振动衰减效果明显。

(4) 验证试验表明,随着阻尼层材料的厚度的增大,约束阻尼层结构的振动响应速度减小,即约束阻尼层结构的振动衰减的仿真结果与试验结果一致。

参考文献:

- [1] 朱广荣.某型歼击机XX升机身副油箱尾锥振动故障分析研究[J].应用力学学报,2001,18(z1):20-23.
ZHU G R. The structural vibration breakdown analysis research on the Fighter-XX centerline drop tank's tail cone[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2001, 18(z1): 20-23.
- [2] BIGGERSTAFF J M. Vibrational damping of composite materials[D]. San Diego, USA: University of California, 2006.
- [3] 陈鑫. 共混改性PVC阻尼材料的制备与性能研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2019.
CHEN X. Preparation and properties of PVC damping materials

modified by blending[D]. Hefei: Anhui University, 2019.

- [4] 李虹征. 非硫化丁基类橡胶阻尼材料的制备与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
LI H Z. Preparation and properties of non-vulcanized butyl rubber damping materials[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [5] 陈强, 王光辉, 李红伟, 等. 功能树脂分子结构对橡胶阻尼材料性能的影响[J]. 橡胶工业, 2022, 69(2): 97-102.
CHEN Q, WANG G H, LI H W, et al. Effect of molecular structure of functional resin on properties of damping rubber materials[J]. China Rubber Industry, 2022, 69(2): 97-102.
- [6] 房占鹏, 张孟珂, 李宏伟. 平稳随机激励下约束阻尼结构布局优化设计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(5): 87-91.
FANG Z P, ZHANG M K, LI H W. Layout optimization of constrained layer damping structure under stationary random excitation[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science Edition), 2020, 41(5): 87-91.
- [7] 袁月生, 吕平, 张志超, 等. 局部约束阻尼板的减振设计与优化[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(33): 28-33.
YUAN Y S, LYU P, ZHANG Z C, et al. Vibration reduction design and optimization of locally constrained damping plates[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(33): 28-33.
- [8] 曾昭阳, 范红伟, 焦映厚, 等. 基于三明治夹层约束阻尼结构的潜艇降噪[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(22): 8975-8982.
ZENG Z Y, FAN H W, JIAO Y H, et al. Submarine noise reduction based on the thick sandwich type thick shell with restrained damping layer[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(22): 8975-8982.
- [9] 艾振, 黄逸哲, 李壮, 等. 含弹性约束复合阻尼板的振动机理与特性[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(3): 443-449.
AI Z, HUANG Y Z, LI Z, et al. Vibration mechanism and characteristics of composite damping plates with elastic constraints[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(3): 443-449.
- [10] 郭君, 郝敏, 张凯, 等. 约束阻尼材料性能测试试验方案分析研究[C]. 第十七届船舶水下噪声学术讨论会. 衢州: 中国造船工程学会, 2019: 719-726.
- [11] 常冠军. 粘弹性阻尼材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [12] 李兴光, 厉明, 薛志鹏, 等. 飞机机翼结构动力学特性研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(11): 79-83.
LI X G, LI M, XUE Z P, et al. Research on dynamic characteristics of aircraft wing structure[J]. Computer Simulation, 2015, 32(11): 79-83.
- [13] 申智春. 约束阻尼梁的六阶模型分析[J]. 应用力学学报, 2013, 30(1): 125-129.
SHEN Z C. Analysis of the six order model of constrained damping beam[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013,

- 30(1):125-129.
- [14] 顾赛克,邓琼,刘悦.约束阻尼结构力学性能研究与参数优化[J].航空工程进展,2021,12(4):68-79.
GU S K, DENG Q, LIU Y. Study on mechanical properties and parameter optimization of constrained damping structures[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(4): 68-79.
- [15] 杜华军,于百胜,郑钢铁,等.蜂窝锥壳卫星适配器约束阻尼层振动抑制分析[J].应用力学学报,2003,20(3):5-9.
DU H J, YU B S, ZHENG G T, et al. Vibration suppression of a conical honeycomb satellite adapter subjected to constrained layer damping[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2003, 20(3): 5-9.
- [16] 王心清.结构设计[M].北京:宇航出版社,1994.
- [17] 徐卫秀,王江,邵英翠,等.卫星支架附加约束阻尼层减振设计与分析[J].导弹与航天运载技术,2015(5):91-95.
XU W X, WANG J, SHAO Y C, et al. Vibration damping design and analysis of additional constrained damping layer for satellite adapter[J]. Missiles and Space Vehicles, 2015(5): 91-95.
- [18] 徐业守,赵东,葛藤,等.黏弹性材料等效分数阶微观结构标准线性固体模型[J].力学学报,2017,49(5):1059-1069.
XU Y S, ZHAO D, GE T, et al. Equivalent fractional order micro-structure standard linear solid model for viscoelastic materials[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(5): 1059-1069.
- [19] 段宇星,赵苗苗,苏渤,等.超分子作用阻尼材料的动态力学模型修正[J].振动、测试与诊断,2020,40(3):465-469.
DUAN Y X, ZHAO M M, SU B, et al. Modification of dynamic mechanical model of supramolecular damping materials[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(3): 465-469.
- [20] 段宇星,赵云峰,赵苗苗,等. DOPO超分子作用阻尼硅材料的动态力学性能[J].高分子科学与工程,2020,36(5):136-146.
DUAN Y X, ZHAO Y F, ZHAO M M, et al. Dynamic mechanical properties of damping silastic in DOPO supermolecule interaction[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(5): 136-146.
- [21] LI Z L, QIN Y, SUN B, et al. A fractional approach to the time-temperature dependence of dynamic viscoelastic behavior[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(1): 139-147.

收稿日期:2023-02-06

Study on Dynamic Performance of Viscoelastic Constrained Damping Layer Structures

ZHAO Miaomiao^{1,2,3}, DUAN Yuxing^{1,2,3}, YANG Li^{1,2,3}, HOU Feng^{1,2,3}

(1. Xi'an ASRIC Aviation Technology Co., Ltd, Xi'an 710065, China; 2. Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China; 3. Aeronautical Key Laboratory of Aeronautical Acoustics and Vibration, Xi'an 710065, China)

Abstract: The dynamic performance of the viscoelastic constrained damping layer structure (abbreviated as constrained damping layer structure) was studied. The results showed that butyl rubber could be well applied as the damping layer material of constrained damping layer structure. The constrained damping layer structure could effectively reduce the vibration at the resonant frequency within the range of 50 ~ 2 050 Hz, while moving the resonant frequency towards the low frequency. As the loss factor, storage modulus and thickness of the damping layer material increased, the structural loss factor of the constrained damping layer structure increased, and the vibration attenuation effect of the structure was significant. Moreover, the simulation results of the vibration attenuation of the constrained damping layer structure were consistent with the experimental results. This study could provide a reference for the design and optimization of the constrained damping layer structure.

Key words: constrained damping layer structure; viscoelastic material; vibration attenuation; loss factor; dynamic performance