

树脂基复合材料环形减振器设计及实验研究

Design and Experimental Research of Isolator Ring
Made of Resin-based Composite Material

姜洪源, 夏宇宏, 闫 辉

(哈尔滨工业大学 机械设计系, 哈尔滨 150001)

JIANG Hong-yuan, XIA Yu-hong, YAN Hui

(Department of Machine Design, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

摘要: 为了满足航空航天等特殊环境阻尼减振的需要, 利用树脂基复合材料质量轻、比强度和比模量高、力学性能具有可设计性等特点, 开发研制了树脂基复合材料环形减振器, 揭示了减振机理, 设计了减振器结构, 对影响减振器性能的主要几何参数和性能指标进行了动静态实验研究。获得了该减振器的弹性迟滞回线和最大振动应力幅值, 为实际应用提供了理论依据。研究结果表明: 该减振器具有良好的减振性能, 改变其纤维走向、减振环数量及主要几何参数, 可以使减振器具有不同性能, 以满足不同工况的需要。

关键词: 树脂基复合材料; 减振器; 结构设计; 实验研究

中图分类号: TH113 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2005)07-0028-04

Abstract: To meet the needs of decreasing vibration in aerospace environment, the advantages of composite material, such as lightweight, high density and modulus, designable mechanical characteristics, are used to develop isolation ring. The mechanism of isolation and the structure of isolator is researched, and several structural parameters and performance criterion of isolator are studied experimentally. The hysteresis loop and maximal dynamic stress are obtained, they provided the theoretical basis for practical application. Results showed that this kind of isolator has good isolation performance. The changes of the distribution of fibers, the numbers of rings and main geometric parameters can improve the damping characteristics of isolator and can meet the needs of different conditions.

Key words: resin-based composite material; isolator; structural design; experimental research

玻璃纤维环氧树脂基复合材料具有质量轻(其密度仅为纯金属密度的 0.2 倍)、比强度和比模量高、耐辐射及耐腐蚀性能好、相对成本低、使用寿命长等优点, 所以被广泛应用在航空航天及国民经济的各个领域^[1,2]。近十年来, 利用树脂基复合材料解决航空航天领域高低温、大温差、强辐射、超真空及腐蚀工况下的强度、刚度及长寿命等问题获得了很大的成功。利用树脂基复合材料来制造减振器, 解决航空航天和船舶工业等特殊工况下的阻尼减振问题, 在俄罗斯有成功的应用^[3~5]。

本工作以前期理论研究成果为基础, 以实际应用研究为目的, 开发研制了一种环形复合材料减振器。该复合材料减振器的弹性阻尼元件是由环氧树脂和玻璃纤维经过一定的工艺方法制备成的具有不同厚度和宽度的复合材料弹性环组成。其弹性元件的质量只是相应结构的金属减振的质量的 1/4。为了揭示复合材

料减振器的阻尼减振机理, 掌握影响减振器性能的主要因素, 本工作对该减振器进行了动静态实验研究。实验结果表明, 复合材料减振器中弹性环的宽度、厚度、直径、纤维成型角度及纤维含量等都直接影响减振器的弹性阻尼性能。而且当改变减振器中弹性环的结构及布置方式时, 可以很大程度地改变减振器的能量耗散系数和刚度。实验结果证实, 复合材料作为减振器的弹性元件具有良好的减振性能和较长的使用寿命, 是一种理想的减振材料, 特别适合于航空航天等特殊工况阻尼减振的需求。

1 复合材料减振环特点及制备方法

复合材料减振环与金属材料减振环相比的主要特点之一就是复合材料减振环的力学性能和阻尼减振性能具有可设计性, 前期研究结果表明, 改变增强纤维素的直径、纤维走向、纤维与基质粘接强度、固化方式等,

可以使减振环具有不同的承载能力、承载方向及阻尼减振性能。

复合材料减振环由纤维承受主要载荷, 通过基体和纤维固有的粘弹性及其界面相工作中的剪切应变所吸收的能量实现阻尼减振。因此, 基体的力学性能明显地影响纤维的工作方式和效率, 采用具有较高剪切强度和模量的基体, 不仅有利于使增强纤维之间的受力更加均匀, 而且正确确定纤维与基体的连接强度, 将有利于提高复合材料的韧性, 使扩展裂纹沿纤维方向发展, 以增强材料吸收能量及阻尼减振的能力^[6]。为了使复合材料减振环具有良好的阻尼减振性能及综合力学性能, 本工作在制备复合材料减振环时采用了如下制备方法:

(1) 原材料的选择及主要参数的确定

减振环增强材料采用 E 型玻璃纤维, 纤维直径 12μm。基体采用环氧树脂, 通过结构设计避免基体直接横向受载, 以保证纤维在允许的最大延伸率的情况下不产生裂纹。

(2) 确定最佳缠绕角

纤维缠绕角(纤维走向与减振环横截面之间的夹角)的大小直接影响纤维工作中的受力状态、承载能力及使用寿命, 根据该减振环的工作特点和要求, 以增强纤维承载能力最高和减振环使用寿命最长为目标函数, 经优化确定纤维最佳缠绕角 $\beta \leq 3^\circ$ 。

$$\beta = \arctg(S/\pi D)$$

其中: D ——缠绕纤维的心轴半径;
 S ——纤维缠绕一周时的轴向位移。

当环形元件受振动负载时由于相邻层的纤维交错排列, 因而可以阻止复合材料产生劈裂现象。

(3) 减振环的毛坯在增强纤维自动浸胶、烘干及缠绕的三轴联动自动缠绕机上进行, 毛坯放入恒温炉内, 在 160℃ 条件下保温 6~ 8h 后, 经自然冷却固化成型。后经专用机床的打磨抛光和切环, 便制成了所需的复合材料减振环。

2 样件及实验原理

复合材料减振环及减振器样件如图 1 所示。

实验目的: 验证复合材料是否适合于制备弹性减振元件; 得到最佳的缠绕倾角; 得到复合材料减振器的强度极限; 对复合材料减振器进行寿命实验, 验证该种减振器的使用寿命是否能够满足工程需求。

实验中分别采用了不同的缠绕倾角和几何参数的弹性环, 其主要参数如表 1 所示。

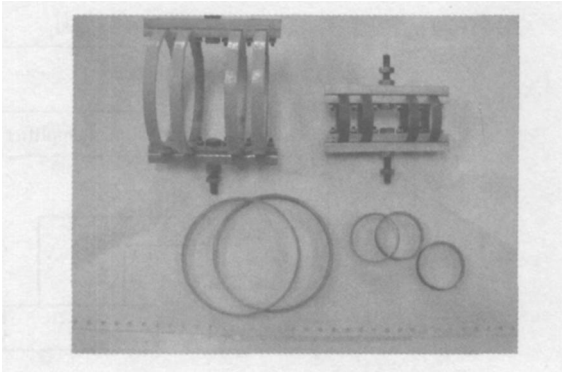


图 1 复合材料减振环及减振器
Fig. 1 Isolation ring and isolator made of composite material

表 1 复合材料减振环主要参数
Table 1 Isolator ring's main parameter

	1	2	3	4	5	6
Fibre	Fiberglass	Fiberglass	Fiberglass	Fiberglass	Fiberglass	Fiberglass
Resin	Epoxy	Epoxy	Epoxy	Epoxy	Epoxy	Epoxy
D/mm	108	108	108	50	48	48
h/mm	2	3	5	2.5	2	1.5
Volume fraction of fibre / %	20±2	70±2	70±2	64±2	47±2	47±2
β	$\leq 3^\circ$	$\leq 3^\circ$	$\leq 3^\circ$	1.32°	$\leq 9^\circ$	1.62°
b/mm	10	10	10	10	10	10

静态实验原理如图 2 所示。动态实验原理如图 3 所示。

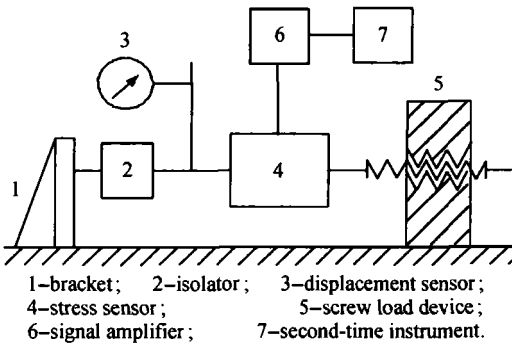


图 2 静态实验原理
Fig. 2 Static experiment element

3 实验及结果分析

3.1 减振器的传递系数及能量耗散系数

对减振器的研究表明: 当变形振幅的变化范围很大时, 其特性仍然是线性的, 即刚度 k 和能量耗散系数 Ψ 是线性的。静态实验的研究结果表明: 当直径为 108mm 的环形减振器的变形幅值 5 mm 时, 其刚度变

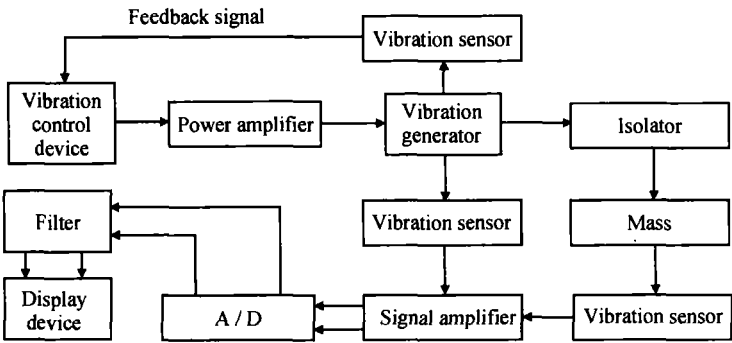


图 3 动态实验原理
Fig. 3 Dynamic experiment element

化 6%~7%，变形幅值 10mm 时，其刚度变化为 7%~12%；当直径为 48 mm 的环形减振器的变形幅值 5 mm 时，其刚度变化 16%。在实际工作中变形幅值要低很多，因此，可以把复合材料减振器看作是线性的系统，其迟滞回线近似为理想的弹性迟滞回线(图 4)。

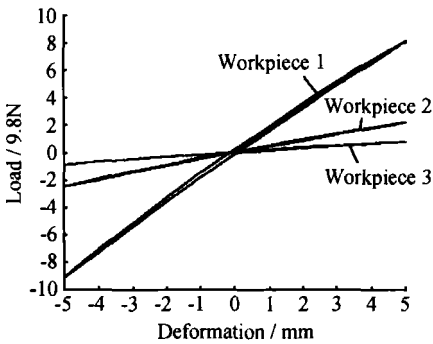


图 4 弹性迟滞回线
Fig. 4 Hysteresis loop

分析几组弹性迟滞回线可以看出，复合材料作为弹性元件，它适合于作减振环，其减振性能优良，但阻尼性能不大。而且随着复合材料弹性环的厚度的增加，能量耗散性能降低，刚度增大。

为了验证传递系数 $\eta = \frac{W_{out}}{W_{inp}} = \frac{\alpha_{out}}{\alpha_{inp}}$ (其中 W_{inp} , W_{out} , α_{inp} , α_{out} 分别为输入、输出的振动加速度和振动位移)受变形幅值的影响,对 1 号件和 2 号件进行了动态试验。实验负载的大小为 0.34kg,减振器由两个复合材料弹性环组成,实验结果如表 2,3 所示。由实验结果可以看出,传递系数 η 受变形幅值和输入振动加速度的影响很小。

同理,由 1 号件实验结果可知,根据传递系数的共振值计算出的能量耗散系数 $\Psi = \frac{2\pi}{\eta}$ 受频率的影响也很小(表 4)。

表 2 1 号件动态实验结果

Table 2 Dynamic experiment result of workpiece 1

f / Hz	$\alpha_{\text{inp}} / \text{mm}$	$\alpha_{\text{out}} / \text{mm}$	η
30	0.1	0.3	3.0
30	0.25	0.752	3.01
30	0.5	1.53	3.06
30	1.0	3.13	3.13

表 3 2 号件动态实验结果

Table 3 Dynamic experiment result of workpiece 2

f / Hz	$\alpha_{\text{inp}} / \text{mm}$	$\alpha_{\text{out}} / \text{mm}$	η
20	0.1	0.148	1.48
20	0.25	0.371	1.484
20	0.5	0.73	1.46

表 4 能量耗散系数与频率的关系

Table 4 Relationship between energy dissipation coefficient and frequency

Load/ kg	f / Hz	$\alpha_{\text{inp}} / \text{mm}$	$\alpha_{\text{out}} / \text{mm}$	Ψ
0.34	36.3	0.05	4.3	0.073
0.14	52.8	0.05	4.5	0.070

因此,在计算防振系统的振动时可以使用大量的以线性系统的振动方程 $m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F(t)$ 为基础的方程式和研究结果。

3.2 复合材料减振器强度和使用寿命

当外界负载大小不同,输入加速度(或振幅)不同时,相同的减振器具有不同的使用寿命。为了分析减振器的不同输入参数和使用寿命的关系,引入了振动应力 σ ,用于衡量具有不同的形状参数和性能参数减振器的强度大小:

$$\sigma = \frac{mW_{out}}{2nbh}$$

式中: m ——外部负载, kg;
 W_{out} ——输出加速度, m/s^2 ;
 n ——组成减振器的弹性环的数量;
 b ——弹性环沿轴向的宽度, mm;
 h ——弹性环沿径向的厚度, mm;

复合材料减振器的强度和使用寿命的确定是个重要问题。在表 5 列写了各种减振器的寿命实验结果。该实验时减振器在共振点的工作时间为 105min。

表 5 动态实验结果 1
Table 5 Dynamic experiment result 1

	3	4	5	6
Number of ring	4	4	4	4
m/kg	5	9.2	2	5
Diameter of isolator ring/mm	108	50	48	48
b/mm	10	10	10	10
h/mm	5	2.5	2	1.5
$W_{out}/(m \cdot s^{-2})$	242	74.7	95	68.4
a_{out}/mm	3.8	0.5	2	2.54
Deformation amplitude as to diameter/%	3.5	1.0	4.1	5.3
Vibration stress amplitude/ $(N \cdot mm^{-2})$	3.14	3.43	2.9	2.85
Resonance frequency initial value/Hz	40.9	62.7	36.6	26.1
Resonance frequency ultimate value/Hz	39.8	62.4	31.5	25.6
Energy dissipation coefficient initial value	0.25	0.232	0.19	0.140
Energy dissipation coefficient ultimate value	0.25	0.221	0.34	0.144

5 号件减振器的特性改变与制备减振器时制备工艺方法有关,其缠绕倾角太大,导致减振器内部沿轴向的纤维束长度短,致使弹性环的强度不足,导致材料分层、刚度减小、内摩擦和 Ψ 增大。这种工艺方法不适合用来制造减振器。一般情况复合材料弹性环作为减振元件,按仿形法加工时的缠绕倾角 $\beta \leq 3^\circ$ 。

在做减振器的加速度等效试验时,经常使用公式 $\frac{T_2}{T_1} \approx \frac{W_{out1}^2}{W_{out2}^2}$, 其中 T_1 和 T_2 是振动加速度 W_{out1} 和 W_{out2} 幅值分别对应的工作时间。根据该公式,由复合材料的弹性阻尼元件在加速度幅值约 $72 m/s^2$ 时,其稳定工作时间为 105 min,可以推算出在整个振动过程中元件的稳定情况。例如,当加速度幅值约 $3 m/s^2$ 下时,其稳定工作时间为 1000 h,完全可以满足工程实际的需求。

为了得到复合材料减振器的能量耗散系数调整的方法,以及最大振动应力幅值,还进行了如下的实验。将复合材料弹性环沿轴向切断,形成一个不封闭环,将不封闭环紧套在整环的外边,组成一个复合的弹性元件,这样环和环之间振动起来之后就会产生一定的相对运动,可以增加减振器的能量耗散性能。

减振器在大振动应力条件下工作时,会产生快速

磨损。出现了材料分层、减振器的刚度快速下降,能量耗散系数增加的现象,实验结果如表 6 所示。

表 6 动态实验结果 2
Table 6 Dynamic experiment result 2

Material	Piece 5		Piece 4		Piece 1	
Number of ring	Four closed ring		Four closed ring and four open ring		Two closed ring and two open ring	
m/kg	5		9.2		2.2	
Diameter/mm	48		50		108	
b/mm	10		10		10	
h/mm	1.5		2.5		2	
Work time/min	105	5	105	90	60	5
Output acceleration $W_{out}/(m \cdot s^{-2})$	68.4	105.0	74.7	100	112.8	132
Output amplitude /mm	2.54	3.9	0.5	0.65	7.1	8.3
Deformation amplitude as to diameter/%	5.3	8.1	1.0	1.3	6.6	7.7
Vibration stress / $(N \cdot mm^{-2})$	2.85	4.4	3.4	4.6	3.1	3.63
Resonance frequency initial value/Hz	26.1	25.6	62.7	62.4	20.2	19.9
Resonance frequency ultimate value/Hz	25.6	22.9	62.4	57.8	19.9	13.7
Energy dissipation coefficient initial value	0.140	0.14	0.232	0.221	0.224	0.25
Energy dissipation coefficient ultimate value	0.144	0.18	0.221	0.307	0.247	0.28

从表 5 和表 6 中可以得到,当采用不封闭环与整环紧套在一起的结构时,可以大大增加减振器的能量耗散性能,所以可以使用这种方法来调整减振器的能量耗散性能。

另外可以看出,当减振器的振动应力大于 $\sigma_{max} \approx 3.5 N/mm^2$ 时,短时间的工作也会导致刚度和能量耗散系数的很大改变,并且,相对的变形幅值对这种变化的影响很小。当减振器的振动应力减小,低于 σ_{max} 时,这个变化过程大大减慢,当振动应力增大时,会继续加快。

复合材料的减振器在其变形幅值很大时,其特性仍是线性的。使用不封闭环能使能量耗散系数在不改变减振器总结构的条件下改变几倍,当振动强度不超过振动应力的最大值时(研究材料的振动应力 $\sigma_{max} \approx 3.5 N/mm^2$),减振器能够长时间稳定工作。

4 结论

(1) 复合材料弹性环是一种很好的减振器元件,具有质量轻、刚度大、能量耗散性能可以调节等特点;随着环的厚度的增加,减振器的能量耗散性能降低,刚度增加。

(下转第 35 页)

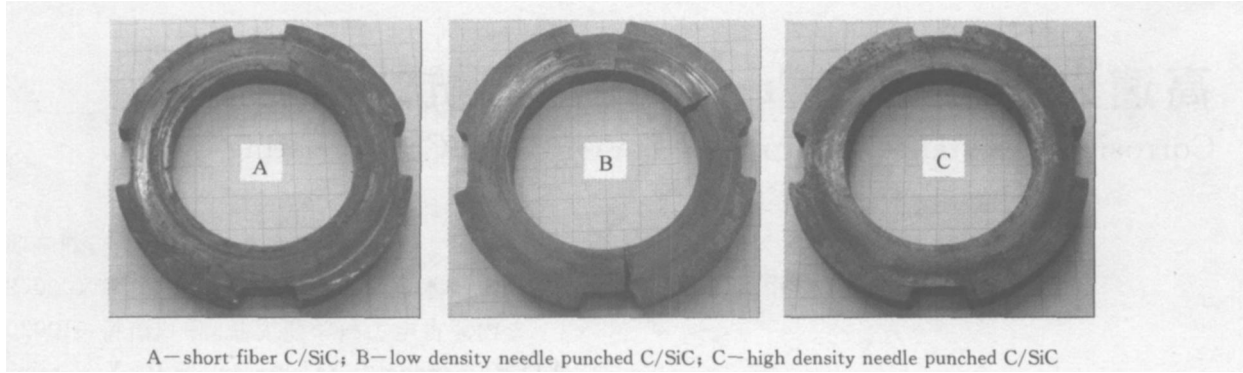


图 6 C/SiC 复合材料刹车后的表面形貌

Fig. 6 The surface morphology after braking of C/SiC composites

小, 刹车距离变短。

(3) 由于高密度针刺 C/SiC 的 SiC 含量最高、密度最大且引入了垂直于摩擦面的纤维束而热扩散系数最大, 并且复合材料的摩擦稳定性系数随着热扩散系数的增加而升高。

(4) 随着纤维含量的增加, 复合材料的韧性提高; 并且对于短切纤维 C/SiC, 摩擦实验后基本形成了连续光亮的摩擦面。

参考文献

[1] 路易斯 B 纽曼著. 摩擦材料最新进展[M]. 张元民, 汤希庆译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.

[2] 高列义. 多孔 C/C 预制体的制备和 C/SiC 材料的摩擦性能研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2004.

[3] KRENKEL W, HEIDENREICH B, RENZ G. C/G-SiC composites for advanced friction systems[J]. Adv Eng Mater, 2002, 4

(8): 427- 436.

[4] KRENKEL W. Cost effective processing of CMC composites by melt infiltration (LSI-process) [J]. Ceram Eng Sci Proc, 2001, 22: 443- 454.

[5] SUNDAR V, MARK P, TERENCE W, et al. C/SiC materials evaluation for aircraft applications[A]. Proceedings of the 4th Int Conference on HTCM C[C]. Munich, Germany: Wiley Annee, 2001. 802- 808.

[6] 马云柱, 熊翔, 黄伯云, 等. C/C 复合材料熔融渗硅研究[J]. 中南工业大学学报, 2002, 33(1): 49- 52.

基金项目: 教育部跨世纪人才培养计划基金(2002) 资助
收稿日期: 2005-04-24; 修订日期: 2005-04-20
作者简介: 张军战(1972-), 男, 博士研究生, 研究方向: 航空制动用 C/SiC 复合材料, 联系地址: 西北工业大学超高温复合材料国防科技重点实验室(710072)。

(上接第 31 页)

(2) 制备复合材料减振环时, 如果采用最经济和常用仿形加工的缠绕方法, 则纤维束的缠绕倾角 $\beta \leq 3^\circ$ 。

(3) 复合材料减振器在一定负载范围内, 属于线性减振器, 能量耗散系数小。

(4) 复合材料减振器的能量耗散性能可以通过改变弹性环的数量, 以及将不封闭环和封闭环有机的结合在一起来实现。

(5) 复合材料减振器的使用寿命完全可以满足工程实际的需求。

(6) 复合材料减振环的最大振动应力幅值为 $\sigma_{max} \approx 3.5 \text{ N/mm}^2$ 。

参考文献

[1] 王荣国, 武卫莉, 谷万里. 复合材料概论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999. 1- 25.

[2] 郭全贵, 宋进仁. B₄C/C 复合材料高温氧化过程中的结构变化模型的研究[J]. 碳素, 1998, (3): 7- 12.

[3] 张少辉, 陈花玲. 国外纤维增强树脂基复合材料阻尼研究综述 [J]. 航空材料学报, 2002, 22(1): 58- 62.

[4] CHANDRA R, SINGH S P, GUPTA K. Damping studies in fiber-reinforced composites - a review [J]. Composite Structures, 1999, 46: 41- 51.

[5] IOANA C, FINEGAN R F. Analytical modeling of damping at micromechanical level in polymer composites reinforced with coated fibers [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60: 1077- 1084.

[6] 郑修麟. 材料的力学性能[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1990. 159- 171.

收稿日期: 2004-06-07; 修订日期: 2004-12-11
作者简介: 姜洪源(1960-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向: 金属橡胶技术、新型带传动及特种阻尼技术研究, 联系地址: 哈尔滨工业大学 424 信箱(150001)。