

碳纤维桁架结构的阻尼减振

寇伟¹, 王汝冬²

(1. 中国人民解放军空军航空大学, 长春 130022 2. 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要 介绍了桁架结构减振的理论, 提出了碳纤维桁架结构阻尼减振的几种方法, 进行了仿真分析。对减振效果较好的方法进行了实物制造和振动试验, 证实了提出的阻尼减振方法有很好的效果。

关键词 桁架结构; 阻尼减振; 试验分析

中图分类号: TH703.62

文献标识码: A

文章编号: 1002-2333(2010)05-0018-02

Damping Control for Carbon Fiber Truss Structure

KOU Wei¹, WANG Ru-dong²

(1. Aviation University of Air force, Changchun 130022, China 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The theory of vibration control of truss structures is expounded; some methods of damping control for carbon fiber truss structure are put forward, simulated and analyzed. The better vibration control method is chosen to fabricate the truss structure, and make vibration experiment. It is confirmed that the selected method is effective to the carbon fiber truss structure.

Key words: truss structure; damping control; vibration experiment

1 引言

桁架结构由于其承载力强、重量轻、结构形式简单、组装简便、样式灵活多变, 在建筑、桥梁、机械、电力输送、航天等领域应用广泛。桁架结构在振动时, 特别是在共振频段内, 容易对桁架结构和其上支撑物产生不利影响。在共振频段和低频段内, 增大桁架结构的阻尼能够很好地降低振动的传递率, 进行桁架结构的减振^[1-2]。

2 桁架结构减振的分析

碳纤维桁架结构是一种复合材料结构, 复合材料的阻尼主要来自基体和纤维的固有粘弹性, 目前对于它的阻尼模型还是建立在线性粘弹性的基础上。复合材料的阻尼性能与力学性能类似, 也表现出正交各向异性^[3-4]。

当桁架结构受到振动激励 $F(t)$ 时, 结构的动力学方程可写为:

$$M\{\ddot{x}\} + C\{\dot{x}\} + K\{x\} = F(t) \quad (1)$$

空间桁架结构模型由杆单元、梁单元、集中质量单元组成, 可以通过结构力学、弹性力学等推导出桁架结构杆单元的质量矩阵 M_i 、阻尼矩阵 C_i 、刚度矩阵 K_i , 通过坐标系变换和矩阵组装就可以得到整个桁架结构的质量矩阵 M 、阻尼矩阵 C 、刚度矩阵 K , 这样就可以得到受振动激励下桁架结构的动力学方程, 并可通过迭代或有限元计算的方法求解。

3 碳纤维桁架结构减振的方案与仿真分析

某三角形碳纤维桁架结构由碳纤维杆和铝合金接头组成, 如图 1, 碳纤维杆件壁厚为 1mm, 碳纤维铺层为: $\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ$, 单层厚度 0.17mm。最大外形尺寸为 570mm×570mm×825mm, 顶端支撑质量为 2.41kg。

碳纤维桁架结构增加阻尼的方案为:

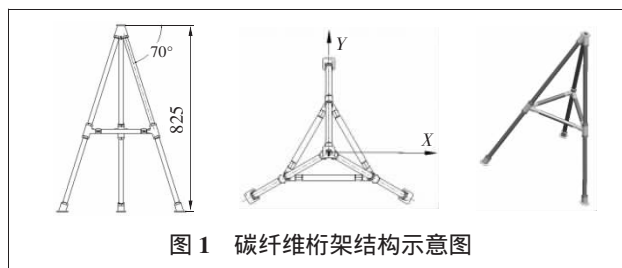


图 1 碳纤维桁架结构示意图

(1) 杆件外壁包裹丁基橡胶和碳布组成的约束阻尼层结构。阻尼的本质就是耗散振动的能量。桁架结构振动时, 阻尼层随杆件振动, 使粘弹性阻尼材料承受拉伸和压缩交变载荷, 进而耗散结构的振动能量而实现对振动的抑制^[5]。

(2) 杆件和接头连接处加垫阻尼材料(如 ZN-1 等)。

(3) 复合材料由基体和增强纤维两大部分组成。碳纤维桁架结构, 主要采用环氧树脂基的碳纤维复合材料, 在树脂基中添加高阻尼小分子, 使制造出的碳纤维杆件具有高的阻尼特性。

对以上几种增大碳纤维杆件的阻尼方案进行动力学仿真分析, 桁架结构材料特性如下: 铝合金接头, 弹性模量 $E=70\text{GPa}$, 泊松比 $\mu=0.33$, 密度 $\rho=2.7\times 10^3\text{kg/m}^3$, 结构阻尼系数 0.006; 碳纤维杆件材料, 0° 拉伸模量 $E=135\text{GPa}$, 90° 拉伸模量 $E=11\text{GPa}$, 层间剪切模量 $E=4.5\text{GPa}$, 泊松比 $\mu=0.25$, 密度 $\rho=1.59\times 10^3\text{kg/m}^3$, 结构阻尼系数 0.02。

采用 MSC.Patran 建立结构的有限元模型, 采用板壳、块体单元的结构模型。模型划分网格后, 节点总数 80102; 单元总数 70512。

表 1 碳纤维桁架结构振动输入条件

频率	5~10 Hz(正弦扫描)	10~500 Hz(正弦扫描)
振动幅值	0.248mm	0.1g
加载方向	X、Y、Z 三向(方向定义如图 1)	

条件如表 1 所示,测量桁架结构顶端集中质量点的响应。

对不同碳纤维桁架结构阻尼方案进行动力学分析,得仿真结果如表 2。

表 2 各减振方案下碳纤维桁架结构响应

激励	原始结构(0.02)		连接阻尼(0.38)		约束阻尼层(0.38)		杆件阻尼(0.1)	
	峰值频率/Hz	峰值响应/g	峰值频率/Hz	峰值响应/g	峰值频率/Hz	峰值响应/g	峰值频率/Hz	峰值响应/g
X 向	76.65	3.27	75.61	2.88	82.26	2.02	76.65	1.85
Y 向	76.68	3.31	76	2.92	82.81	2.03	76.68	1.85
Z 向	310.8	2.89	308.4	2.70	340.3	1.85	310.8	1.68

注:原始结构为碳纤维材料,阻尼 0.02;连接阻尼和约束阻尼层阻尼为丁基橡胶,阻尼 0.38;杆件阻尼为碳纤维材料树脂基中添加阻尼小分子,阻尼为 0.1。

由各减振方案下碳纤维桁架结构响应放大倍数可知,碳纤维桁架结构减振效果最好的方案为:采用约束阻尼层结构和添加阻尼小分子增大杆件阻尼。但是根据国内外文献研究表明^[6],对桁架结构采用约束阻尼层进行减振,很难确定合适的阻尼层厚度,如果使用不当,还会发生某些部位振动响应增大的情况。添加阻尼小分子增大杆件阻尼是提高桁架结构杆件自身阻尼的方法,机理和动力学分析上与采用约束阻尼层的方法完全不同,是一种较为可靠的阻尼减振方法。

4 碳纤维桁架结构减振的试验分析

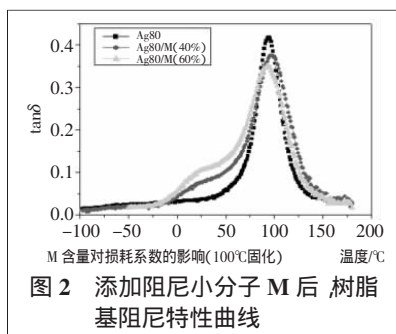


图 2 添加阻尼小分子 M 后,树脂基阻尼特性曲线

阻尼特性增大 2 倍多。所以添加阻尼小分子 M 后,制作的碳纤维材料具有高的阻尼特性。

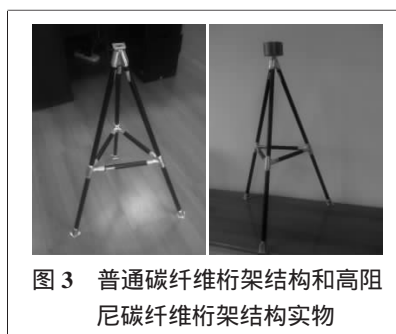


图 3 普通碳纤维桁架结构和高阻尼碳纤维桁架结构实物

在桁架结构底端接头与夹具连接处;第二个测点在桁架结构顶端支撑块上。

振动试验测得数据如表 4 所示,Y 向振动测试曲线如图 4。

表 4 普通碳纤维桁架结构和高阻尼碳纤维桁架结构振动试验数据

激励	普通碳纤维桁架		高阻尼碳纤维桁架		响应降低/%
	峰值频率/Hz	支撑块响应峰值/g	峰值频率/Hz	支撑块响应峰值/g	
X 向	73.47	3.46	70.78	3.2	7.5
Y 向	74.5	2.645	73.1	2.28	13.8
Z 向	259.24	6.0	245.12	5.0	16.7

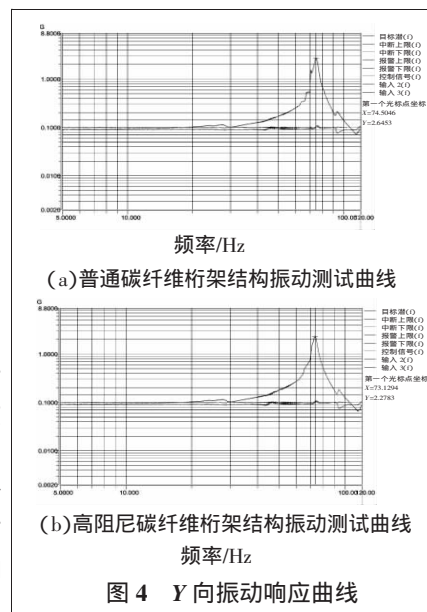


图 4 Y 向振动响应曲线

通过表 4 的振动试验数据对比可以看出,在碳纤维树脂基中加入高阻尼小分子组成的桁架结构,在各方向响应都有所下降,最高降低达 16%,是一种有效的碳纤维桁架结构减振方法。

5 结论

阻尼减振技术成本低,可靠性高,实现简单,有着广阔的应用空间和良好的前景,本文通过对碳纤维桁架结构的减振仿真分析和振动试验对比,证明了在碳纤维树脂基中加入高阻尼小分子可以有效地对碳纤维桁架结构进行减振,为以后的碳纤维桁架结构或其它材料的桁架结构的减振设计提供了方法和参考。

参考文献

- [1] 刘棣华. 粘弹性阻尼减振降噪技术 [M]. 北京: 宇航出版社, 1990: 1-20.
- [2] Housener G W, et al. Structural control: past, present and future [J]. J. of Engineering Mechanics, 1997, 123(9): 897-971.
- [3] 杨雪,王源升,等. 多层阻尼复合结构阻尼性能[J]. 复合材料学报, 2005, 22(3): 175.
- [4] Ray M C. Hybrid damping of smart, functionally graded plates using piezoelectric, fiber-reinforced composites [J]. IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control, 2006, 53(11): 2152-2165.
- [5] 陈前. 弹性-粘弹性复合结构模态理论 [J]. 固体力学学报, 1990, 11(1): 22-33.
- [6] Johnson C D. Design of Passive Damping System [J]. Special 50th Anniversary Design Issue, Transaction of ASME, 1995, 117: 171-176.

(编辑 立 明)

作者简介: 寇伟(1984-),女,硕士研究生,空军航空大学助教,主要从事人机工程学方面的学习和研究。

收稿日期: 2010-03-01