

共固化缝合阻尼复合材料的动力学性能*

梁森¹, 闫盛宇^{1,2}, 陈新乐¹, 郑长升¹, 王玲¹

(1. 青岛理工大学机械与汽车工程学院 青岛, 266520)

(2. 德州石油钻井研究所技术开发部 德州, 253002)

摘要 为了研究共固化缝合阻尼复合材料(co-cured stitched damping composite, 简称CSDC)动力学性能, 建立了CSDC方形板的有限元模型, 用有限元数值模拟方法研究了CSDC的动力学性能, 通过试验与模拟数据的对比验证了模拟方法的有效性。在验证有限元模拟模型基础上, 得出结论: 随着针距或行距的增大CSDC方形板的1阶模态频率减小, 一阶损耗因子增大; 阻尼层厚度增加, CSDC方形板的1阶模态频率与模态损耗因子增大; CSDC方形板中的总阻尼层厚度相同, 增加结构中的阻尼层数目, 可以有效增大结构的模态损耗因子。该结果的实际意义在于可以通过改变共固化缝合阻尼复合材料结构的参数来避免共振现象, 为CSDC广泛应用奠定基础。

关键词 共固化缝合阻尼复合材料; 动力学性能; 数值模拟; 模态频率; 损耗因子

中图分类号 V414.8; TH123

引言

复合材料具有很高的比刚度、比强度以及优良的阻尼特性^[1-3]。一般情况下, 复合材料结构的阻尼特性比常见金属的高10~100倍, 但在航空、航天等高精领域应用中仍然偏低。复合材料力学性能可设计性为其阻尼性能进一步提高开辟了广阔的空间^[4-5]。嵌入式共固化复合材料阻尼结构(embedded and co-cured composite damping structure, 简称ECCDS)正是利用这一特性将3种不同性质的材料(如玻璃纤维、树脂和黏弹性阻尼材料)通过物理或化学的方法复合而成的一种多相固体^[6-8], ECCDS中加入的阻尼材料为未硫化的橡胶, 而现在其他的阻尼复合材料所加的橡胶为已硫化的橡胶, 已硫化阻尼材料在树脂固化时受到高温高压作用后易返原老化, 树脂与橡胶的层间结合性能较低。ECCDS中的树脂固化温度与橡胶的硫化温度相同, 在热压罐中固化完成之后, 层间形成互穿网络结构, 阻尼材料长在基体树脂上, 使其层间结合性能大大提高。

虽然ECCDS层间剪切强度与其他阻尼复合材料相比已经很强, 但是与单纯的树脂纤维复合材料相比依然较低^[9-10]。基于此, 提出了一种共固化缝合阻尼复合材料(co-cured stitched damping composite, 简称CSDC), 它是在ECCDS的基础上, 用编织纤维

线对复合材料间进行缝合后再进行共固化而成。缝合后的复合材料进行共固化时, 预浸料中的树脂会沿着缝线流动, 待固化完成后, 在复合材料板的法线方向上形成树脂和缝合材料的复合体, 有效增强复合材料的层间剪切强度。CSDC结构不仅提高了材料的阻尼性能, 增强了其层间剪切性能, 而且实现了复合材料的3维力学性能的可设计, 使复合材料有更广阔的应用前景。基于上述原因, 笔者对CSDC进行了ANSYS数值模拟, 并用板的模态试验验证了数值模拟方法的有效性, 进一步通过验证的数值模拟方法得出CSDC方形板的1阶模态频率和模态损耗因子随针距、行距、阻尼层厚度与阻尼层分布的变化曲线。

1 模态应变能的计算

Ungar等^[11]提出了用模态应变能法求解结构模态损耗因子, Zhang等^[10]国内外学者对其进行了完善。笔者在该文献基础上对模态应变能法做了进一步改进, 从能量的角度出发, 通过阻尼结构的能量变化量, 来衡量阻尼结构能量损失, 从而间接地通过能量差值获得模态损耗因子^[12]。这里应考虑黏弹性阻尼材料、玻璃纤维复合材料和缝合材料的模态应变能。因此, 整体结构的第 r 阶模态损耗因子为

* 山东省自然科学基金资助项目(ZR2019MEE088); 国家自然科学基金资助项目(52075280)

收稿日期: 2019-06-17; 修回日期: 2019-09-18

$$\eta^r = \frac{\eta_v \cdot U_v^r + \eta_c \cdot U_c^r + \eta_f \cdot U_f^r}{U_s^r} \quad (1)$$

其中： U_s^r 为整体结构的第 r 阶模态应变能； U_v^r 为黏弹性阻尼层的第 r 阶模态应变能； U_c^r 为玻璃纤维复合材料第 r 阶模态应变能； U_f^r 为缝线第 r 阶模态应变能； η^r 为整体结构第 r 阶模态损耗因子； η_v 为黏弹性阻尼材料的损耗因子； η_c 为玻璃纤维复合材料的损耗因子； η_f 为缝线材料的损耗因子。

2 数值模拟模型的建立

利用ANSYS15.0有限元分析软件对方形板进行有限元分析,采用SOLID185单元建立复合材料

模型^[6,13],各层之间通过共节点连接。因为方形板的模态频率与模态损耗因子与其尺寸有很大关系,为了方便试验验证模拟方法的正确性,CSDC方形板的尺寸定为250 mm×250 mm,CSDC方形板的厚度为2.1 mm,其中阻尼层厚度为0.1 mm。选用的玻璃纤维增强复合材料、黏弹性材料及缝合材料(Kevlar49)的参数分别如表1~3所示。其中,缝合材料分为缝线和底线,缝线与底线材料选择1500旦的Kevlar49纤维,Kevlar49纤维密度为1.44 g/cm³,可知1500旦纤维横截面积为0.12 mm²,由于缝线很细,故将缝合材料简化为各向同性材料,只输入Kevlar49纤维纵向的材料参数。建立好的有限元模型如图1,其边界条件为一边固支。

表1 玻璃纤维增强复合材料参数

Tab.1 Glass fiber reinforced composite material parameters

密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量 E_x, E_y, E_z / GPa	剪切模量 G_{yz}, G_{xz} / GPa	泊松比 $\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$	损耗因子 η_c /%	材料层 数/层	预浸料厚 度/mm	铺层角度/ (°)
1 957	27.2, 27.2, 3.5	1.33, 1.12	0.052, 0.038, 0.334	0.01	6	0.32	0

玻璃纤维增强复合材料的编号为1。

表2 黏弹性材料参数

Tab.2 Viscoelastic material parameters

密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量 E_x /MPa	泊松比 ν_{xy}	损耗因子 η_v /%
985	15.5	0.498	0.5

黏弹性材料的编号为2。

表3 Kevlar49参数

Tab.3 Kevlar49 parameters

密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量 E_x /GPa	泊松比 ν_{xy}	损耗因子 η_f /%
1 440	133	0.36	0.01

Kevlar49材料的编号为3。

度为0.1 mm不变,将针距分别设为10, 12和14 mm,其中ECCDS板作为对比。依次研究CSDC的1阶模态频率、2阶模态频率、3阶模态频率和模态阻尼变化,结果如表4所示。

表4 模态频率与模态阻尼随针距的变化

Tab.4 Natural frequency and modal damping change with stitch length

针 距	1阶模态 频率/Hz	2阶模态 频率/Hz	3阶模态 频率/Hz	模态阻 尼/%
10 mm	21.59	28.52	131.65	1.24
12 mm	21.38	28.26	130.31	1.26
14 mm	21.29	28.17	129.54	1.29
ECCDS (无缝合板)	20.48	27.29	123.19	1.68

3.2 试验与模拟方法正确性验证

首先按照预定材料配比,通过密炼机与开炼机制备阻尼材料,然后把阻尼材料用四氢呋喃溶解成阻尼胶浆。采用刷涂法在酚醛树脂玻璃纤维预浸料上均匀的刷涂一层0.1 mm厚的阻尼薄膜,晾干阻尼薄膜之后,采用改进的锁式缝合方法缝合铺设好的预成型体,最后把缝合后的预成型体放入热压罐中进行共固化,图2为共固化后的CSDC板。

把共固化好的CSDC板进行模态试验测试,模态试验仪器为B&K公司所生产的设备,主要为激励力锤(型号8206-002)、加速度传感器(型号4524-

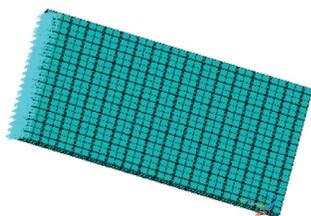


图1 数值模拟模型

Fig.1 Numerical simulation model

3 模拟结果与试验验证

3.1 模拟结果

保持CSDC板的缝线行距为10 mm,阻尼层厚



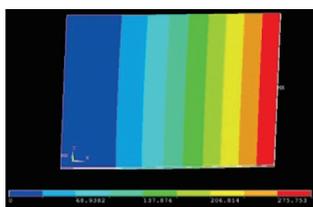
图2 共固化后的 CSDC 板
Fig.2 Co-cured CSDC plate

B004)和 PULSE(型号 3560B)。边界条件为一边固支,另外 3 边为自由的约束方式。测试方法采用单点激励多点响应的方法。图 3~5 为模拟模态阵型图与试验模态阵型图的对比。

通过模态试验得到 CSDC 板在行距为 10 mm,阻尼厚度为 0.1 mm 不变的情况下,改变针距为 10, 12, 14 mm,得到试验数据,表 5 为模拟数据相对于试验数据的误差。

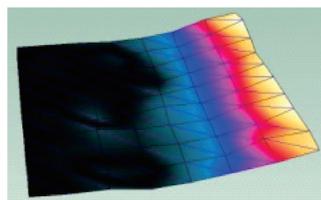
从图 3~5 可知:模态试验所得前 3 阶阵型图与 ANSYS 数值模拟所到的前 3 阶阵型图基本一致。从表 5 可以看出,对于不同针距的 CSDC 板,试验所得到的前 3 阶模态频率与 ANSYS 数值模拟所得出的数据基本符合,试验与模拟模态阻尼的变化趋势相同。通过试验与数值模拟的阵型图和数据对比,说明 ANSYS 数值模拟方法的有效性。

误差分析:从表 4~5 的数据对比可以看出,模拟所得的模态频率大于试验所得的模态频率,造成误差的主要原因为现实中的完全固支边界条件是几乎不存在的,试验中夹具并不能把试验试件一边完全固支,在力锤激励试件的过程中试件的固支边会有微小的滑移,导致试验所得的模态频率小于数值



(a) 1阶模拟模态阵型

(a) First-order simulation modal shape

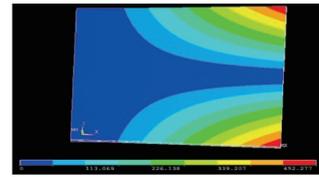


(b) 1阶试验模态阵型

(b) First-order experimental modal shape

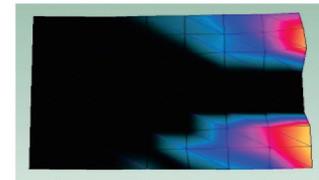
图3 1阶模拟模态阵型与试验模态阵型

Fig.3 First-order simulation modal shape and experimental modal shape



(a) 2阶模拟模态阵型

(a) Second-order simulation modal shape

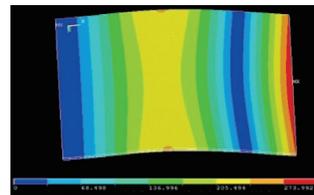


(b) 2阶试验模态阵型

(b) Second-order experimental modal shape

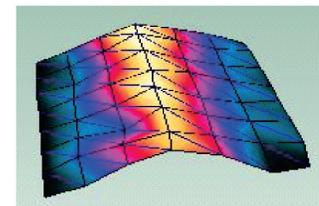
图4 2阶模拟模态阵型与2阶试验模态阵型

Fig.4 Second-order simulation modal shape and second-order experimental modal shape



(a) 3阶模拟模态阵型

(a) Third-order simulation modal shape



(b) 3阶试验模态阵型

(b) Third-order experimental modal shape

图5 3阶模拟模态阵型与3阶试验模态阵型

Fig.5 Third-order simulation modal shape and third-order experimental modal shape

模拟得到的模态频率。从表 4 与表 5 的数据对比可以看出,模拟所得的模态阻尼小于试验得到的模态阻尼,造成误差的主要原因与上述相同,在力锤激励试件的过程中试件的固支边会有微小的滑移,从而能量会损失,最终导致试验得到的模态阻尼大于模拟所得的模态阻尼。由于模态阻尼本身数值较小,导致相对误差值较大。

由表 4 与表 5 知:缝合后的复合材料其模态频率大于未缝合的复合材料,模态阻尼小于未缝合的复合材料。

表 5 试验与模拟数据相对误差

Tab.5 Experimental data and simulation relative error

针 距	1阶模态 频率/Hz	2阶模态 频率/Hz	3阶模态 频率/Hz	模态阻 尼/%
10 mm	21.15	27.78	128.25	1.33
相对误差/%	2.08	2.66	2.65	6.77
12 mm	20.49	27.35	126.32	1.37
相对误差/%	4.34	3.33	3.16	8.03
14 mm	20.44	27.21	123.36	1.39
相对误差/%	4.16	3.53	5.01	7.19
ECCDS	19.72	26.47	118.65	1.79
相对误差/%	3.85	3.10	3.87	6.15

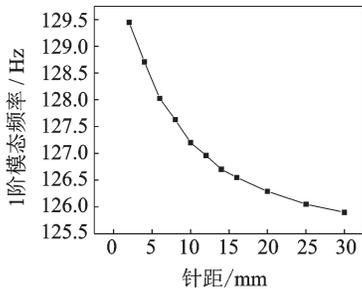
4 不同参数对 CSDC 板的动力学性能影响

4.1 缝线参数变化对结构的影响

4.1.1 针距对结构的影响

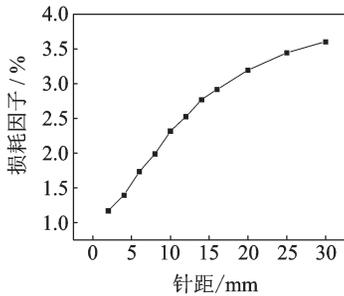
为了优化模型,减少模型划分网格的数量,提高计算机的运算速度,ANSYS 数值模拟 CSDC 板的尺寸都改为 100 mm×100 mm。保持缝线行距为 10 mm 不变,改变针距,依次研究 CSDC 的 1 阶模态频率和 1 阶模态损耗因子变化,结果如图 6 所示。

由图 6 可知:随着针距的增大,1 阶模态频率呈



(a) CSDC1阶模态频率随针距的变化曲线

(a) First-order modal frequency of CSDC vs stitch length



(b) CSDC模态损耗因子随针距的变化曲线

(b) Modal loss factor of CSDC vs stitch length

图6 CSDC1阶模态频率和模态损耗因子随针距的变化曲线

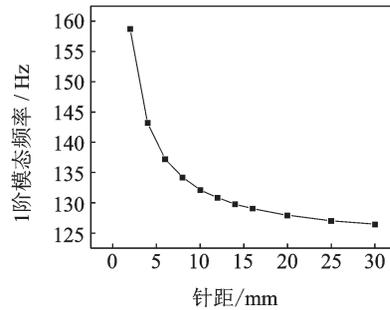
Fig.6 First-order modal frequency and modal loss factor of CSDC vs stitch length

下降趋势,但变化范围并不大,随着针距的增大,模态频率变小的速度越来越小,当针距大于 25 mm 后模态频率基本上保持不变。针距越疏,CSDC 方形板的刚度越小,其固有频率越小;模态损耗因子则呈上升趋势,针距过密,缝针穿过阻尼层,在阻尼层留下针孔,导致阻尼层的黏弹性材料相对面积减少和模态损耗因子降低。针距在 2~14 mm 之间时,模态损耗因子随着针距的增大几乎呈线性增加。当针距大于 25 mm 时,再改变针距对模态损耗因子的影响不大,当针距持续增大时,模态损耗因子不断接近 ECCDS 板的模态损耗因子。

4.1.2 行距对结构的影响

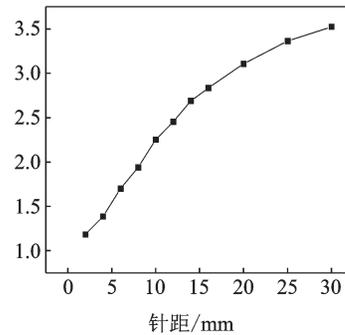
保持针距为 10 mm、阻尼层厚度 0.1 mm 不变,改变行距,依次研究 CSDC 的 1 阶模态频率和 1 阶模态损耗因子,结果如图 7 所示。

由图 7 可知,随着行距的增大,1 阶模态频率呈下降趋势,行距过密很大程度上增加了 CSDC 方形板 1 阶模态频率。随着行距的增大,模态损耗因子则呈上升趋势,行距过密,很大程度上减少了 CSDC 方形板阻尼材料的含量,从而导致了模态损耗因子



(a) CSDC1阶模态频率随行距的变化曲线

(a) First-order modal frequency of CSDC vs line spacing



(b) CSDC模态损耗因子随行距的变化曲线

(b) Modal loss factor of CSDC vs line spacing

图7 CSDC1阶模态频率和模态损耗因子随行距的变化曲线

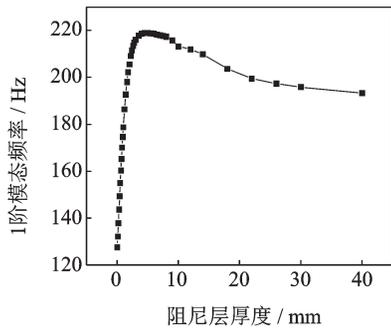
Fig.7 First-order modal frequency and modal loss factor of CSDC vs stitch length

的减小。当行距大于 25 mm 时,再改变行距对模态损耗因子的变化影响不大,当行距持续增大时,模态损耗因子不断接近 ECCDS 板的损耗因子。

4.2 阻尼层参数对结构的影响

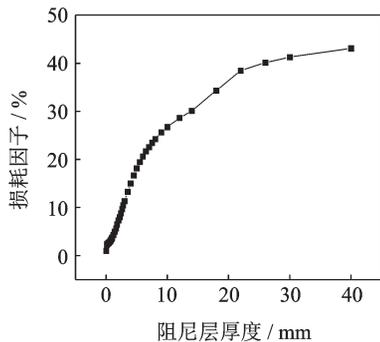
4.2.1 阻尼层厚度对结构的影响

在保证 CSDC 方形板中玻璃纤维复合材料厚度为 2 mm,针距与行距都为 10 mm 的情况下,改变阻尼层的厚度,计算方形板的 1 阶模态频率和模态损耗因子,结果如图 8 所示。



(a) CSDC 1 阶模态频率随阻尼层厚度的变化曲线

(a) First-order modal frequency of CSDC vs damping layer thickness



(b) CSDC 模态损耗因子随阻尼层厚度的变化曲线

(b) Modal loss factor of CSDC vs damping layer thickness

图 8 CSDC 1 阶模态频率和模态损耗因子随阻尼层厚度的变化曲线

Fig.8 First-order modal frequency and modal loss factor of CSDC vs damping layer thickness

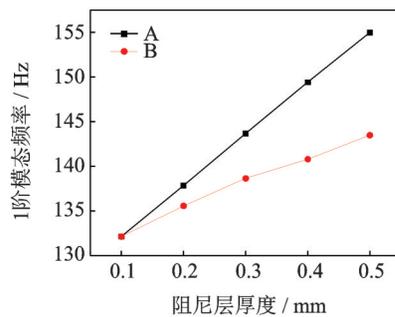
由图 8 可知:阻尼层厚度对 CSDC 方形板的 1 阶模态频率有很大影响,阻尼层在 0~2 mm 之间时,随着阻尼层的厚度增大,1 阶模态频率呈线性增加,在 2~4.7 mm 之间时,随着阻尼层厚度的增加,1 阶模态频率的增加趋势渐缓;在阻尼层厚度在 4.7~30 mm 之间时,随着阻尼层厚度的增加,1 阶固有频率缓慢减小;阻尼层厚度在 30 mm 之后的区域,随着阻尼层厚度的增加,1 阶模态频率趋于定值。阻尼层从无到有,即阻尼厚度从 0~0.05 mm,其模态损耗因子由

1% 增加到 1.97%,有着巨大的提升;阻尼层厚度在 0.1~4 mm 之间时,随着阻尼层厚度的增加,CSDC 方形板的模态损耗因子几乎呈线性增加;阻尼层厚度大于 4 mm 时,随着阻尼层厚度的增加,CSDC 方形板的模态损耗因子增加速度渐缓,最终趋于定值,其中定值的大小为黏弹性阻尼材料的损耗因子,值为 49.8%。所以在设计 CSDC 方形板的阻尼层厚度时,阻尼层的厚度一般在 0.1~1 mm 之间。

4.2.2 阻尼层分布对结构影响

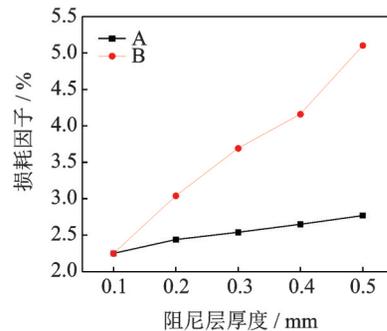
当 CSDC 方形板中所包含的阻尼层总厚度相同时,比较只含有一层较厚阻尼层的 CSDC 方形板和具有多层较薄阻尼层的 CSDC 方形板的 1 阶模态频率和模态损耗因子。“A”表示具有单层黏弹性材料的 CSDC 板,其阻尼层厚度分别为 0.1,0.2,0.3,0.4 和 0.5 mm。“B”表示具有多层黏弹性材料的 CSDC 板,每一阻尼层厚度均为 0.1 mm,每层均匀分布在 2 mm 的玻璃纤维复合材料中,其阻尼层数分别为 1,2,3,4 和 5 层。A 和 B 的 1 阶模态频率和损耗因子列于图 9 中。

由图 9 可知:单独看 B,随着黏弹性阻尼层的增



(a) CSDC 1 阶模态频率随阻尼层分布的变化曲线

(a) First-order modal frequency of CSDC vs damping layer distribution



(b) CSDC 模态损耗因子随阻尼层分布的变化曲线

(b) Modal loss factor of CSDC vs damping layer distribution

图 9 CSDC 1 阶模态频率和模态损耗因子随阻尼层分布的变化曲线

Fig.9 First-order modal frequency and modal loss factor of CSDC vs damping layer distribution

加,CSDC方形板的1阶模态频率和模态损耗因子在一定范围内都呈现出增大趋势。当A与B对比,阻尼层总厚度大于0.1 mm时,与A相比,B的1阶模态频率有少量的降低,模态损耗因子则有较大幅度的提高。这表明:保持CSDC板阻尼材料总厚度不变,平均分成多层分散在复合材料内,可以提高CSDC板模态损耗因子。其原因是:当阻尼层较薄而且分布均匀时,每一阻尼层都能充分地发生变形,吸收更多的能量,从而得到较大的模态损耗因子;当阻尼层均匀分布在复合材料中时,CSDC方形板的整体刚度将会减小,从而导致其模态频率减小。

5 结 论

1) 缝合后的复合材料其模态频率大于未缝合的复合材料,模态阻尼小于未缝合的复合材料。

2) 随着针距和行距的增大,CSDC方形板的1阶模态频率呈下降趋势,模态损耗因子则呈上升趋势。针距对CSDC方形板的模态频率影响较小,行距对CSDC方形板的模态频率影响较大,针距与行距对CSDC方形板的模态损耗因子影响较大。

3) 阻尼层在0~4.7 mm之间时,随着阻尼层的厚度增大,1阶模态频率增加。阻尼层厚度在4.7~30 mm之间时,随着阻尼层厚度的增加,1阶固有频率缓慢减小。阻尼层厚度在0~4 mm之间时,随着阻尼层厚度的增加,CSDC方形板的模态损耗因子呈线性增加。阻尼层厚度大于4 mm时,随着阻尼层厚度的增加,CSDC方形板的模态损耗因子增加速度渐缓,最终趋于定值。

4) 当CSDC方形板中的总阻尼层厚度相同时,把阻尼材料均匀分布在复合材料内,可以增大CSDC的模态损耗因子。

参 考 文 献

- [1] 漆文凯,程博.复合材料层合板阻尼预测分析与验证[J].振动、测试与诊断,2013,33(6):1049-1053.
QI Wenkai, CHENG Bo. Predictive analysis and verification of damping for composite laminates [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(6): 1049-1053. (in Chinese)
- [2] 梁森,梁磊,米鹏.嵌入式共固化复合材料阻尼结构的新进展[J].应用力学学报,2005,27(4):767-771.
LIANG Sen, LIANG Lei, MI Peng. New development of damping structure of embedded co-cured composites [J]. Journal of Applied mechanics, 2005, 27(4): 767-771. (in Chinese)
- [3] 杨轩,李彦斌,陈玉林,等.缝合式复合材料夹芯板的动态特性[J].振动、测试与诊断,2018,38(6):1246-1254.
YANG Xuan, LI Yanbin, CHEN Yulin, et al. Dynamic characteristics of stitched composite sandwich panel [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(6): 1246-1254. (in Chinese)
- [4] 路庆贺.嵌入式共固化阻尼复合材料加筋板动力学性能研究[D].青岛:青岛理工大学,2018.
- [5] GIBSON R F. A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures [J]. Composite Structures, 2010, 92: 2793-2810.
- [6] FRANCESCONI L, AYMERICH F. Numerical simulation of the effect of stitching on the delamination resistance of laminated composites subjected to low-velocity impact [J]. Composite Structures, 2017, 159: 110-120.
- [7] ZHAI Y C, LIANG S. Optimal lay-ups to maximize loss factor of cross-ply composite plate [J]. Composite Structures, 2017, 168: 597-607.
- [8] ZHAI Y C, CHAI M J, SU J M, et al. Dynamics properties of composite sandwich open circular cylindrical shells [J]. Composite Structures, 2018, 189: 148-159.
- [9] 徐帅,程军,杨继全,等.各向异性碳纤维复合材料的方向性涡流检测[J].振动、测试与诊断,2019,39(3):631-637.
XU Shuai, CHENG Jun, YANG Jiquan, et al. Eddy current testing of directionality in anisotropic carbon fiber reinforced polymer composite [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(3): 631-637. (in Chinese)
- [10] ZHANG S H, CHEN H L. A study on the damping characteristics of laminated composites with integral viscoelastic layers [J]. Composite Structures, 2006, 74(1): 63-69.
- [11] UNGAR E E, KERWIN Jr E M. Loss factors of viscoelastic systems in terms of strain energy [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1962; 34(2): 954-958.
- [12] FOTSING E R, MIRON F, EURY Y, et al. Bonding analysis of carbon/epoxy composites with viscoelastic acrylic adhesive [J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(5): 2087-2093.
- [13] HEß H, HIMMEL N. Structurally stitched NCF CFRP laminates. Part 2: Finite element unit cell based prediction of in-plane strength [J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(5): 569-585.



第一作者简介:梁森,男,1962年9月生,博士、高级工程师、教授、博士生导师。主要研究方向为功能结构复合材料、振动噪声分析与控制、机械结构拓扑优化及数字化制造。曾发表《Investigation on the square cell honeycomb structures under axial loading》(《Composite Structures》2006, Vol.72)等论文。

E-mail: liangsen888111@163.com