复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 33 卷 第 12 期 12 月 2016 年
Vol. 33 No. 12 December 2016

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20160324.003

温湿效应下嵌入式共固化复合材料阻尼性能

付小静[1]，梁森[1,*]，梁天锡[2]

（1. 青岛理工大学 机械工程学院，青岛 266033；2. 中国工程物理研究院，绵阳 621900）

摘　要： 将温湿环境实验与阻尼性能测试技术相结合，搭建了温湿环境中嵌入式共固化复合材料阻尼性能的实验测试平台，提出使用最小二乘技术求解相对阻尼系数的新方法，分别探讨了温度和湿热耦合参数对嵌入式共固化碳纤维/双马来酰亚胺复合材料阻尼系数的影响曲线。结果表明：嵌入式共固化复合材料的相对阻尼系数随温度的升高先增加再减小后增大；湿热耦合作用下相对阻尼系数随湿度和温度的提高而增大。为该新型复合材料阻尼结构的设计和全天候应用奠定了基础。

关键词： 嵌入式共固化阻尼复合材料；温度；湿热耦合；最小二乘法；阻尼系数

中图分类号： TB332　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-3851(2016)12-2781-08

嵌入式共固化复合材料阻尼结构（Embedded Co-cured Composite Damping Structure，ECCDS）是一种新型的大阻尼结构，目前国内外对 ECCDS 的研究主要集中在黏弹性阻尼薄膜的制作[1-3]、共固化工艺[4-8]以及在实验和数值模拟基础上对 ECCDS 及其动力学特性[9-13]、层间力学性能[14-18]、吸湿处理[19]的研究上，但这些探索都是在正常环境下进行，然而嵌入式共固化阻尼复合材料在空间飞行器、高速列车等高科技领域有广阔的应用前景[20-22]，它必须要承受高温、高湿等极端环境的考验，但目前温湿环境对 ECCDS 性能影响的研究才刚刚起步。

为此，本文将高低温湿热环境箱与阻尼测试架技术相结合，搭建了实验测试平台，并利用最小二乘技术分析实验数据，精确求出在温度和湿热耦合作用下 ECCDS 的阻尼系数，得到湿热环境对 ECCDS 的影响规律，为新型全天候复合材料阻尼结构的应用研究奠定了基础。

1　试件的制备

通过文献[17]知，与压片工艺相比，图 1 所示刷涂工艺制备的黏弹性材料薄膜不但能提高 ECCDS 性能，还增加了试件的层间剪切强度，具有良好的界面结合性能，因此，只研究刷涂工艺下的嵌入式共固化复合材料的湿热性能。

根据文献[17]用刷涂工艺制备连续阻尼结构试件，连续阻尼复合材料试件及编号如表 1 所示。

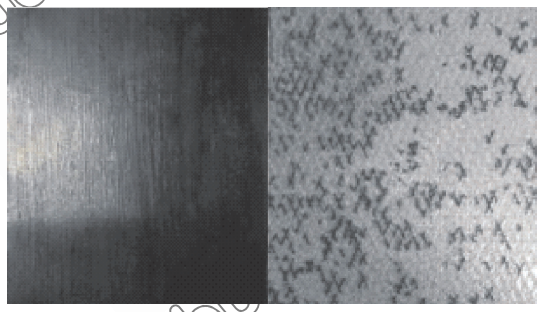

图 1　用刷涂工艺制作的带阻尼薄膜的预浸料

Fig. 1　Prepreg with damping membrane by brush coating process

表 1　连续阻尼复合材料试件及编号

Table 1　Specimens and number of continuous damping composite samples

Number	Thickness of damping layer/mm
B_1	0
B_2	0.05
B_3	0.10
B_4	0.20
B_5	0.30
B_6	0.40

收稿日期： 2015-12-03；　**录用日期：** 2016-03-19；　**网络出版时间：** 2016-03-24　16:46
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20160324.1646.008.html
基金项目： 国家自然科学基金(51375248)；中国工程物理研究院项目(B2-2015-0112)
通讯作者： 梁森，博士，教授，博士生导师，研究方向为复合材料力学。　E-mail：liangsen888111@163.com

引用格式： *付小静，梁森，梁天锡. 温湿效应下嵌入式共固化复合材料阻尼性能[J]. 复合材料学报，2016，33(12)：2781-2788.*
FU X J, LIANG S, LIANG T X, et al. Damping properties of embedded co-cured composites under the effect of heat and humidity [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(12): 2781-2788 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn

利用阻尼架固定试件，根据现有的阻尼测试架结构尺寸制作如图 2 所示长度为 300 mm、宽度为 25 mm 的未贴铁片的 ECCDS 试件。为确保实验结果的准确性，不同阻尼层厚度的试件在同一种环境下制作 4 件，且要保证试件尺寸的一致性。由于嵌入式共固化复合材料试件本身不具有导电导磁性，激振器和电容传感器不能直接和试件产生信息传递，采取在试件上贴出规格一致的薄铁片来实现，其粘贴方法为：将尺寸为 40 mm×25 mm 的铁片粘贴于试件的一端，并伸出 3 mm，将尺寸为 25 mm×25 mm 的铁片贴于距另一端 130 mm 处，贴过铁片的 ECCDS 试件如图 3 所示。

图 2　未贴铁片的 ECCDS 试件

Fig. 2　ECCDS specimens without iron slices

图 3　贴过铁片的 ECCDS 试件

Fig. 3　ECCDS specimens with iron slices

2　实验方法及过程

2.1　实验仪器

为研究不同温度和湿度下 ECCDS 的阻尼性能，采用了 B&K 公司的阻尼架来测试材料的阻尼系数。其中激振器、电容传感器、数据采集仪和功率放大器的型号分别为 M-0002、M-0004、3500-B-030 和 2718。首先用阻尼测试架将试件固定，把放大的激振信号通入激振器，利用电容传感器感知位移响应信息并导入数据采集仪。需要分别在不同温度和湿度下获得实验数据，所以采用了上海林频仪器公司的 LRHS-504B-LJS 高低温交变湿热实验箱，通过其温湿度控制系统来创造所需要的环境。可实现的温度范围为－40～150 ℃，湿度范围为 35%～90%RH(在温度 25～90 ℃时)。图 4 和图 5 分别为阻尼架与湿热实验箱相结合的实验平台及 ECCDS 试件阻尼测试实验现场。

图 4　阻尼架与湿热实验箱相结合的实验平台

Fig. 4　Experimental bracket combined damping frame, humid and heat chamber

图 5　ECCDS 试件阻尼测试实验现场

Fig. 5　Experimental site of damping test for ECCDS specimens

2.2　实验过程

首先在高低温交变湿热实验箱的中部放入特定隔振垫，将阻尼架和其下的木板置于该垫之上，让测试支架夹住试件无铁片的一端 55 mm 处，保持试件竖直安装，将激振器和传感器安装于测试架

http://fhclxb.buaa.edu.cn

上，调节两传感器的位置，使激励传感器中心线与试件中心保持平行，其中心偏移量在 1～2 mm 内(用塞尺量)，从而产生偏心磁距；检测传感器测量面要与试样表面平行，两面间距同样固定在 1～2 mm 内。激振器和电容传感器的导线穿过湿热箱的测试孔分别连接于实验箱外的功率放大器和数据采集仪。其中功率放大器连接数据采集仪的输出端，而电容传感器的信号经前置放大器后传输给数据采集仪，ECCDS 试件的阻尼性能测试系统如图 6 所示。开始测试时，将箱体门关紧，并用毛巾将测试孔堵住。

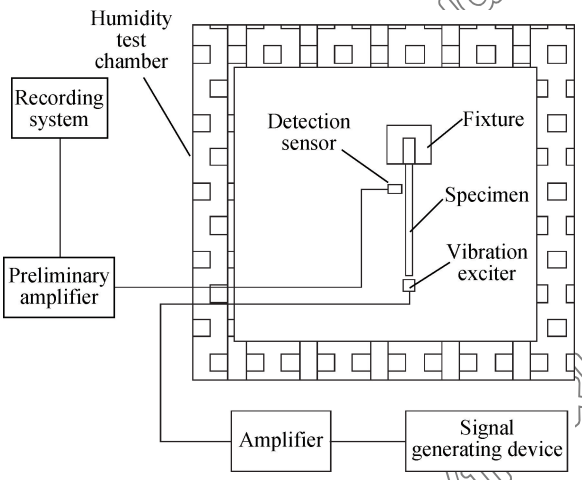

图 6　ECCDS 试件的阻尼性能测试系统

Fig. 6　Test system for damping properties of ECCDS specimens

2.3　最小二乘法求解阻尼系数

一般来讲，材料的阻尼系数相对较小，准确测量非常困难，经典的对数衰减法[23]、半功率带法[24]使用的测试数据点都很少，当采用的数据点有误差时，便直接影响测试结果的精度，为此，这里提出使用最小二乘技术，尽可能多地提取测量中的有用数据，以便获得精准的阻尼系数值。通过测试温度和湿热耦合下 ECCDS 试件的自由阻尼衰减曲线，从而获得精确的阻尼系数，具体求解原理为

在 $v(0)=v_0$，$\dot{v}(0)=\dot{v}_0$ 的欠阻尼状态下，系统响应为

$$v(t)=\mathrm{e}^{-\zeta\omega_{\mathrm{n}}t}A\sin(\omega_{\mathrm{d}}t+\varphi) \tag{1}$$

式中：A 为振幅，$A=\sqrt{v_0^2+\left(\dfrac{\dot{v}_0+\zeta\omega_{\mathrm{n}}v_0}{\omega_{\mathrm{d}}}\right)^2}$；$\varphi$ 为初相位，$\bar{\omega}=\mathrm{tg}^{-1}\dfrac{\omega_{\mathrm{d}}v_0}{\dot{v}_0+\zeta\omega_{\mathrm{n}}v_0}$；$\zeta$ 为相对阻尼系数；ω_{n} 为无阻尼自由振动时的固有频率，Hz；ω_{d} 为阻尼固有频率，Hz。

通过观察式(1)知：需要拟合的振动衰减及包络曲线如图 7 所示，其对应的方程为

$$U=A\mathrm{e}^{-\zeta\omega_{\mathrm{n}}t} \tag{2}$$

$$u=a\mathrm{e}^{-b(t-c)} \tag{3}$$

式中：U 为理想包络曲线方程，将其转化为具体拟合的方程式(3)；a、b、c 为待定常数。

对式(3)两边取自然对数有

$$\ln u=-bt+(bc+\ln a) \tag{4}$$

令

$$\begin{cases} z=\ln u \\ d=bc+\ln a \end{cases} \tag{5}$$

式(5)可简写为

$$z=-bt+d \tag{6}$$

在实际拟合点上，z_i+bt_i 必然不等于理想 d，设

$$\varphi=\sum_{i=1}^{m}(z_i+bt_i-d)^2 \tag{7}$$

式中：$i=1, 2\cdots, m$，m 为测量所提取峰值点数，寻求误差最小的 φ，令

$$\begin{cases} \dfrac{\partial\varphi}{\partial b}=0 \\ \dfrac{\partial\varphi}{\partial d}=0 \end{cases} \tag{8}$$

即

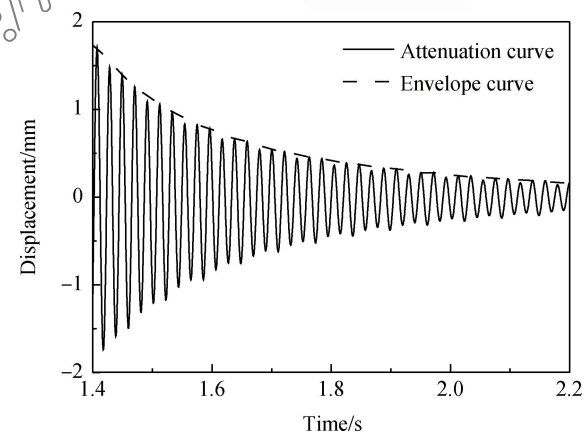

图 7　振动衰减及包络曲线

Fig. 7　Vibration attenuation and envelope curves

http://fhclxb.buaa.edu.cn

$$\begin{cases} d\sum_{i=1}^{m} t_i - b\sum_{i=1}^{m} t_i^2 = \sum_{i=1}^{m}(t_i z_i) \\ md - b\sum_{i=1}^{m} t_i = \sum_{i=1}^{m} z_i \end{cases} \tag{9}$$

解方程式(9)可得

$$\begin{cases} b = \left[\sum_{i=1}^{m}(t_i z_i) - \left(\sum_{i=1}^{m} t_i \cdot \sum_{i=1}^{m} z_i\right)/m\right] / \\ \qquad \left[\left(\sum_{i=1}^{m} t_i\right)^2/m - \sum_{i=1}^{m} t_i^2\right] \\ d = \left(\sum_{i=1}^{m} z_i\right)/m + b\left(\sum_{i=1}^{m} t_i\right)/m \end{cases} \tag{10}$$

而 $b = \zeta\omega_n$，因此

$$\zeta = \frac{b}{\omega_n} \tag{11}$$

根据式(11)可得到各试件的相对阻尼系数。

利用自编的最小二乘法程序处理的数据与传统的数据处理方式相比，取得的测试数据点个数不受限制，使每一个峰值点数据都发挥应有的作用，使得测量的精确度更高。

3　实验测试结果及讨论

3.1　温度和湿热耦合的实验结果及分析

图 8 为不同阻尼层厚度的 ECCDS 试件相对阻尼系数随温度的变化曲线。图 9 为在 35、55、85 ℃下不同阻尼层厚度 ECCDS 试件的相对阻尼系数随湿度变化的曲线。

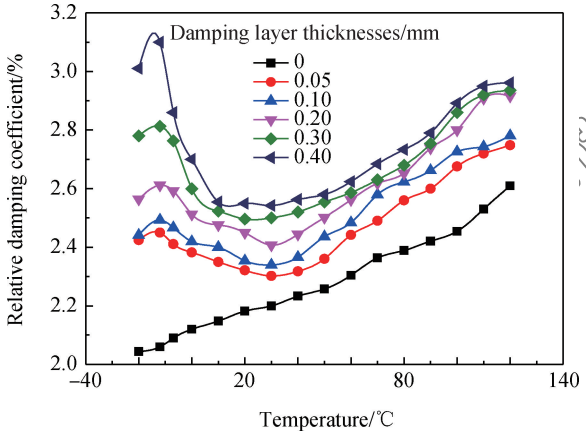

图 8　不同阻尼层厚度的 ECCDS 试件相对阻尼系数随温度的变化曲线

Fig. 8　Variation curves of relative damping coefficient for ECCDS specimens with different damping layer thicknesses vs temperature

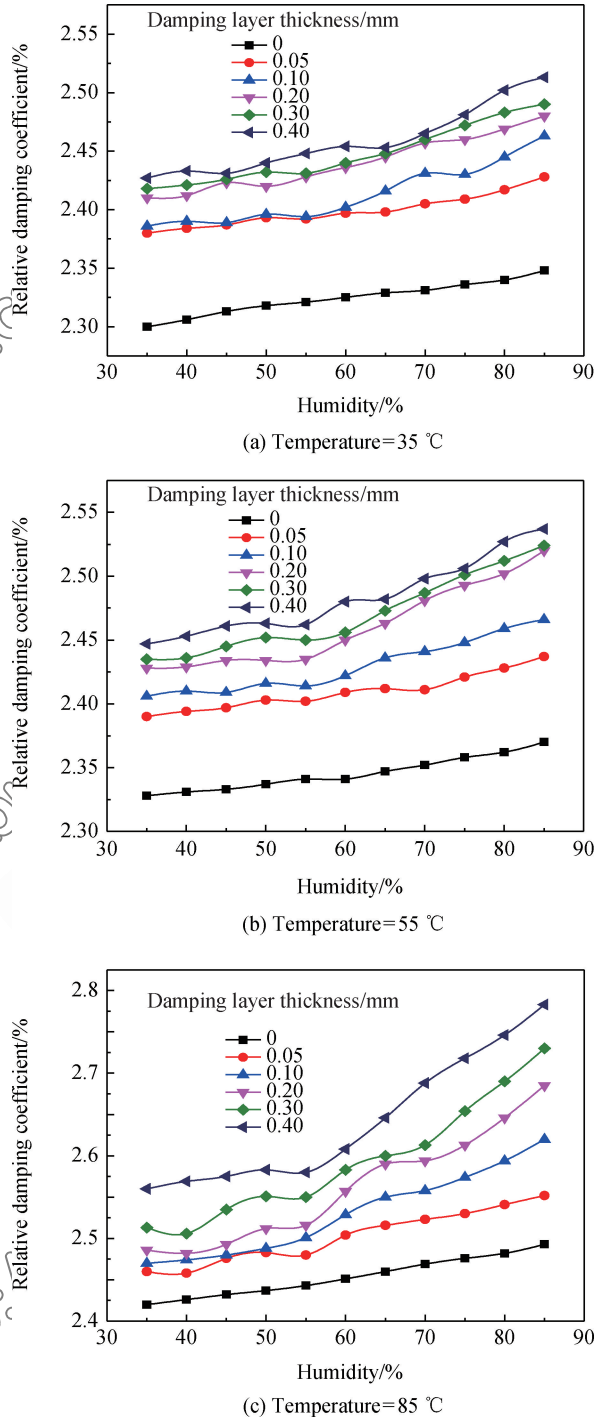

图 9　在 35、55、85 ℃下不同阻尼层厚度 ECCDS 试件的相对阻尼系数随湿度变化的曲线

Fig. 9　Variation curves of relative damping coefficient for ECCDS specimens with different damping layer thicknesses vs humidity at 35, 55 and 85 ℃

ECCDS 试件相对阻尼系数随温度变化曲线的拟合公式如表 2 所示。其中 y 代表相对阻尼系数，x 代表温度，公式适用范围为 -20 ℃$\leqslant x \leqslant 120$ ℃。

http://fhclxb.buaa.edu.cn

表 2　ECCDS 试件相对阻尼系数随温度变化曲线的拟合公式

Table 2　Fitting formula of variation curve of relative damping coefficient for ECCDS specimens vs temperature

Damping layer thickness/mm	Curve fitting formula	Adjusted. R-Square
0	$y = 0.003\,41x + 2.109\,06$	0.990 40
0.05	$y = -5.869\,97 \times 10^{-7}x^3 + 1.484\,5 \times 10^{-4}x^2 - 0.005\,97x + 2.375\,7$	0.982 47
0.10	$y = -8.972\,41 \times 10^{-7}x^3 + 1.901\,98 \times 10^{-4}x^2 - 0.007\,01x + 2.420\,27$	0.978 63
0.20	$y = -7.950\,62 \times 10^{-7}x^3 + 1.857\,48 \times 10^{-4}x^2 - 0.007\,91x + 2.524\,3$	0.981 43
0.30	$y = -8.627\,42 \times 10^{-7}x^3 + 2.115\,18 \times 10^{-4}x^2 - 0.010\,54x + 2.637\,09$	0.938 84
0.40	$y = -1.215\,81 \times 10^{-6}x^3 + 2.710\,41 \times 10^{-4}x^2 - 0.013\,46x + 2.717\,21$	0.940 51

图 9(a)中的曲线拟合公式如表 3 所示，其中 y 为相对阻尼系数，x' 为相对湿度，公式的适用范围为：温度 35 ℃，35%RH≤x'≤85%RH。

图 9(b)中的曲线拟合公式如表 4 所示，公式的适用范围为：温度 55 ℃，35%RH≤x'≤85%RH。

图 9(c)中的曲线拟合公式如表 5 所示，公式的适用范围为：温度 85 ℃，35%RH≤x'≤85%RH。

由图 8 可知：随着温度的升高，试件的相对阻尼系数先增加后减小再增加，即当温度在－20～－13 ℃变化时，相对阻尼系数随温度的升高而增加，并在－13 ℃时取得一个极大值；当温度在－13～30 ℃区间内，相对阻尼系数随温度的升高而下降，并在 30 ℃时取得一个极小值；当温度高于 30 ℃时，相对阻尼系数随温度的升高而增大。对比不同阻尼层厚度曲线知：在同一温度下，阻尼层厚度大的相对阻尼系数高。

由图 9 可知，当试件在湿热耦合的作用下，相对阻尼系数随温湿度提高呈增大趋势。当温度分别恒定在 35 ℃、55 ℃ 时，试件相对阻尼系数随湿度增加而缓慢增加；当温度恒定在 85 ℃时，试件的相对阻尼系数随湿度的增加开始增加比较缓慢，后来增加趋势变大。在 3 个给定温度下，随湿度的增

表 3　35 ℃下 ECCDS 试件相对阻尼系数随湿度变化曲线的拟合公式

Table 3　Fitting formula of variation curve of relative damping coefficient for ECCDS specimens vs temperature at 35 ℃

Damping layer thickness/mm	Curve fitting formula	Adjusted. R-Square
0	$y = 8.709\,09 \times 10^{-4}x' + 2.272\,02$	0.984 06
0.05	$y = 6.184\,93 \times 10^{-7}x'^3 - 9.911\,42 \times 10^{-5}x'^2 + 0.005\,79x' + 2.271\,87$	0.991 34
0.10	$y = 3.048\,95 \times 10^{-5}x'^2 - 0.002\,17x' + 2.425\,59$	0.974 14
0.20	$y = 1.277\,39 \times 10^{-5}x'^2 - 1.146\,85 \times 10^{-4}x' + 2.397\,7$	0.984 71
0.30	$y = 2.251\,75 \times 10^{-5}x'^2 - 0.001\,21x' + 2.433\,45$	0.988 95
0.40	$y = 6.542\,35 \times 10^{-7}x'^3 - 8.424\,24 \times 10^{-5}x'^2 + 0.004\,41x' + 2.347\,88$	0.978 85

表 4　55 ℃下 ECCDS 试件相对阻尼系数随湿度变化曲线的拟合公式

Table 4　Fitting formula of variation curve of relative damping coefficient for ECCDS specimens vs temperature at 55 ℃

Damping layer thickness/mm	Curve fitting formula	Adjusted. R-Square
0	$y = 8.090\,91 \times 10^{-4}x' + 2.296\,91$	0.965 03
0.05	$y = 1.020\,98 \times 10^{-5}x'^2 - 3.724\,48 \times 10^{-4}x' + 2.392\,49$	0.965 02
0.10	$y = -3.651\,9 \times 10^{-7}x'^3 + 8.554\,78 \times 10^{-5}x'^2 - 0.004\,91x' + 2.490\,51$	0.980 81
0.20	$y = -6.977\,47 \times 10^{-7}x'^3 + 1.632\,17 \times 10^{-4}x'^2 - 0.009\,83x' + 2.604\,28$	0.985 69
0.30	$y = 2.918\,41 \times 10^{-5}x'^2 - 0.001\,67x' + 2.457\,68$	0.982 95
0.40	$y = 2.848\,48 \times 10^{-5}x'^2 - 0.001\,65x' + 2.472\,77$	0.982 24

表 5　85 ℃下 ECCDS 试件相对阻尼系数随湿度变化曲线的拟合公式

Table 5　Fitting formula of variation curve of relative damping coefficient for ECCDS specimens vs temperature at 85 ℃

Damping layer thickness/mm	Curve fitting formula	Adjusted. R-Square
0	$y = 0.001\,46x' + 2.366\,05$	0.991 81
0.05	$y = 0.001\,95x' + 2.385\,38$	0.973 05
0.10	$y = -9.075\,37 \times 10^{-7}x'^3 + 1.950\,12 \times 10^{-4}x'^2 - 0.010\,1x' + 2.623$	0.987 81
0.20	$y = -8.951\,05 \times 10^{-7}x'^3 + 2.108\,62 \times 10^{-4}x'^2 - 0.011\,15x' + 2.652\,01$	0.976 86
0.30	$y = 1.028\,75 \times 10^{-6}x'^3 - 1.167\,37 \times 10^{-4}x'^2 + 0.006\,72x' + 2.371\,13$	0.986 90
0.40	$y = -1.331\,78 \times 10^{-6}x'^3 + 3.330\,54 \times 10^{-4}x'^2 - 0.020\,39x' + 2.930\,45$	0.984 64

http://fhclxb.buaa.edu.cn

加，无阻尼层试件的相对阻尼系数上升比较缓慢。在温度和湿度同时取定值时，阻尼层厚度越大，相对阻尼系数越大。

图 10 为不同温度下 ECCDS 试件相对阻尼系数随湿度变化的对比曲线。由该曲线知：相对阻尼系数受温度影响变化比较大，温度越高，相对阻尼系数增长趋势越大。

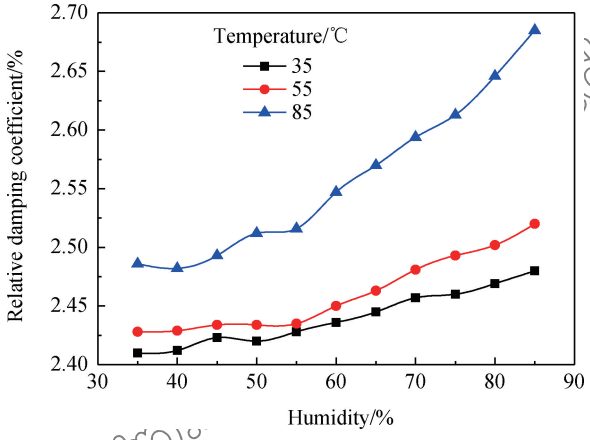

图 10　不同温度下 ECCDS 试件相对阻尼系数随湿度变化的对比曲线

Fig. 10　Comparison curves of relative damping coefficient for ECCDS specimens vs humidity under different temperatures

3.2　实验结果分析

文献[18]获得了 ECCDS 中黏弹性材料的阻尼损耗系数，如图 11 所示。可知：当温度从 −80 ℃变到 −12 ℃时，黏弹性材料的阻尼损耗因子随温度的增加而提高，在 −12 ℃左右时，阻尼损耗因子取得一个最大值；当温度由 −12 ℃变化到 60 ℃时，损耗因子随温度的升高而明显减小；当温度大于60 ℃ 时，损耗因子随温度升高而缓慢降低。

ECCDS 试件是由树脂基复合材料和黏弹性阻尼材料 2 部分构成，因此试件的性能与这 2 部分材料都有一定的关系。温度低于 30 ℃时，黏弹性材料的阻尼性能在试件中起决定性作用，整个试件的阻尼性能基本上按照黏弹性材料阻尼的性能而变化，由于试件的温度变化存在滞后现象，因此嵌入式共固化复合材料在 −13 ℃左右时出现一个极大值；当温度大于 30 ℃时，纯复合材料阻尼性能在试件中起决定性作用，导致试件的阻尼性能随着温度的升高而增加，所以才出现图 8 所示的曲线。

出现图 9 和图 10 实验结果的原因在于：实验是

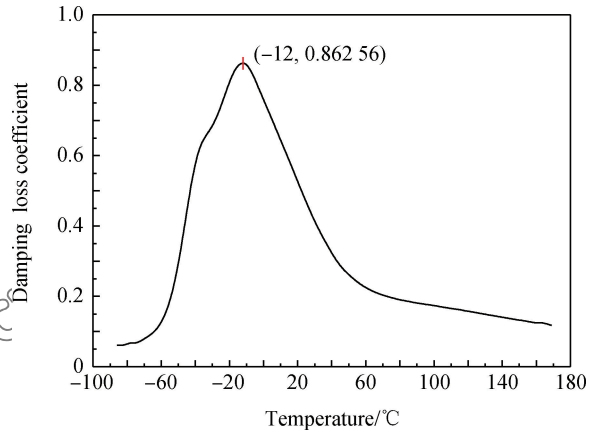

图 11　ECCDS 中黏弹性材料的阻尼损耗系数

Fig. 11　Damping loss coefficients of viscoelastic material in ECCDS

在高低温湿热实验箱内进行，结果要受到箱体内温、湿度因素的影响。当试件激励产生振动后，空气会产生摩擦阻尼，一般情况下，摩擦阻尼随空气的相对湿度增大而提高；当湿度保持恒定、温度升高时，纯复合材料试件的阻尼性能在试件中起决定性作用，导致整个试件的阻尼性能随温度的升高而提高。因此温、湿度同时增大时，箱体内水蒸气浓度越大，相对阻尼系数提高较快。

4　结　论

（1）温度对刷涂工艺制作的嵌入式共固化复合材料阻尼结构（ECCDS）试件相对阻尼系数产生较明显的影响，在实验温度范围内随着温度的升高 ECCDS 的相对阻尼系数呈先增大再减小后增大的变化趋势。

（2）同一温湿度下，相对阻尼系数随 ECCDS 的阻尼层厚度增大而增大。

（3）在湿热耦合作用下嵌入式共固化复合材料的阻尼系数随外界环境温度和湿度增大而提高。

（4）在湿热耦合作用下，温度提高，湿度越大，阻尼层越厚，相对阻尼系数增大的速度越大。结论为该新型 ECCDS 在全天候环境下的广泛应用提供依据。

参考文献：

[1]　MALY J R, JOHNSON C D. Co-cured viscoelastic composites[C]//Proceeding of SPIE-International Society. [S. l.]: [s. n.], 1996: 365-376.

[2]　OLCOTT D D, ROTZ C A, EASTMAN P F. Improved vibration damping in composite structures using ‘zig-zag’ fibers

http://fhclxb.buaa.edu.cn

and embedded viscoelastic damping layers[C]// Proceedings of the 1993 38th International SAMPE Symposium and Exhibition. Part 2 (of 2). Covina: The Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1993: 1357-1370.

[3] NAPOLITANO K L, KOSMATKAKA J B. Co-cured extension-twist coupled damped composite strut[J]. Journal of Composite Materials, 1998(32): 1914-1932.

[4] LIANG S, XIU Y Y, WANG H. A research on sound insulation characteristics and processing of the embedded and co-cured composite damping structures[J]. Journal of Composite Materials, 2013, 47(9): 1169-1177.

[5] 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，2010，27(4)：767-771.
LIANG S, LIANG L, MI P. New development of the embedded and co-cured composite damping structures[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(4): 767-771 (in Chinese).

[6] 李烜，梁森，吴宁晶，等. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构阻尼性能的实验研究[J]. 科学技术与工程. ，2010，10(6)：1510-1513.
LI X, LIANG S, WU N J, et al. Investigation on damping characteristics of the embedded co-cured composite damping structures[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(6): 1510-1513 (in Chinese).

[7] 李烜，梁森，吴宁晶，等. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构隔声性能实验研究[J]. 噪声与振动控制，2010，30(5)：91-94.
LI X, LIANG S, WU N J, et al. Experimental study on sound insulation characteristics of embedded co-cured composite damping structures[J]. Noise and Vibration Control, 2010, 10(5): 91-94 (in Chinese).

[8] 王辉，梁森，王常松. 嵌入式共固化穿孔阻尼层复合材料结构动力学性能研究[J]. 复合材料学报，2013，30(4)：23-28.
WANG H, LIANG S, WANG C S. Dynamic property analysis of the embedded co-cured perforated damping layer composite structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(4): 23-28 (in Chinese).

[9] OLCOTT D D, ROTZ C A, BARRETT D J. Improved damping in composite tubes through stress coupling and co-cured damping layers[C]// Proceeding of 23rd International SAMPE Technical Conference. Covina: The Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1991: 373-387.

[10] ROTZ C A, BARRETT D J. Co-cured damping layers in composite structures[C]// Proceeding of 23rd International SAMPE Technical Conference. Covina: The Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1991: 352-363.

[11] 梁森，王辉，修瑶瑶. 基于遗传算法的嵌入式共固化穿孔阻尼层复合材料结构优化[J]. 振动与冲击，2013，32(11)：51-55.
LIANG S, WANG H, XIU Y Y. Composite structural optimization for an embedded co-cured perforated damping layer based on genetic algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(11): 51-55 (in Chinese).

[12] LIANG S, LIANG K Y, LUO L, et al. Study on low-velocity impact of embedded and co-cured composite damping panels with numerical simulation method[J]. Composite Structures, 2014, 107(1): 1-10.

[13] HUANG C K. Study on co-cured composite panels with blade-shaped stiffeners[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2003, 34: 403-410.

[14] 梁森，王辉，张忠胜. 嵌入式高温共固化复合材料阻尼结构动力学性能实验研究[J]. 振动与冲击，2013，32(20)：102-107.
LIANG S, WANG H, ZHANG Z S. Investigation on the dynamics performance of the embedded high-temperature co-cured composite damping structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(20): 102-107 (in Chinese).

[15] 米鹏，梁森，张义霞. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构低速冲击性能的数值模拟[J]. 振动与冲击，2012，31(14)：98-101.
MI P, LIANG S, ZHANG Y X. Numerical simulation on performance of embedded and co-cured composite damping structure under low velocity impact[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(14): 98-101 (in Chinese).

[16] MI P, LIANG S. A research on loss factor of embedded and co-cured composite damping structure[J]. Advanced Material Research, 2012, 487(1): 593-597.

[17] 张忠胜，梁森. 嵌入式高温共固化复合材料阻尼结构层间结合性能[J]. 复合材料学报，2013，30(4)：185-191.
ZHANG Z S, LIANG S. Interlaminar bonding property of embedded high-temperature co-cured composite damping structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(4): 185-191 (in Chinese).

[18] 张忠胜，梁森. 嵌入式中温共固化复合材料阻尼结构制作工艺及层间结合性能[J]. 航空学报，2012，33(5)：43-48.
ZHANG Z S, LIANG S. Manufacturing process and interlaminar bonding property of embedded medium-temperature co-cured composite material damping structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(5): 43-48 (in Chinese).

[19] 雒磊，梁森，张乾，等. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构吸湿处理后的层间结合性能[J]. 复合材料学报，2015，32(2)：608-615.
LUO L, LIANG S, ZHANG Q, et al. Interlayer bonding properties of the embedded co-cured composite damping structures after moisture absorption treatment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 608-615 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn

[20] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报，2007，24(1)：1-12.
DU S Y. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2007，24(1)：1-12 (in Chinese).

[21] 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.
ZHANG S H，CHEN H L. Development of research on damping of fiber reinforced composite—A review[J]. Journal of Aeronautical Materials，2002，22(1)：58-62 (in Chinese).

[22] SOUTIS C. Fiber reinforced composites in aircraft construction[J]. Progress Aerospace Sciences，2005，41(2)：143-151.

[23] 陈乃立，庄表中. 衰减法在非线性系统中的应用探讨[J]. 振动与冲击，1984，1(1)：66-71.
CHEN N L，ZHUANG B Z. Application of attenuation method in nonlinear systems[J]. Journal of Vibration and Shock，1984，1(1)：66-71 (in Chinese).

[24] 陈奎孚，焦群英. 半功率点法估计阻尼比的误差分析[J]. 机械强度，2004，24(4)：510-514.
CHEN K F，JIAO Q Y. Half power point method to estimate error analysis of damping ratio[J]. Journal of Mechanical Strength，2004，24(4)：510-514 (in Chinese).

Damping properties of embedded co-cured composites under the effect of heat and humidity

FU Xiaojing[1]，LIANG Sen[1,*]，LIANG Tianxi[2]

(1. School of Mechanical Engineering，Qingdao Technological University，Qingdao 266033，China；
2. China Academy of Engineering Physics，Mianyang 621900，China)

Abstract：Combined temperature and humid environment experiment with damping property measurement technology，the experiment platform to test the damping properties of the embedded co-cured composite in heat and humidity environment was established. The new method using the least-square method was presented to analyze the relative damping coefficient. The effect curves of temperature，humidity and heat coupling parameters on damping coefficient of the embedded co-cured carbon fiber/bismaleimide composites were investigated respectively. The results show that the relative damping coefficient of the embedded co-cured composites is firstly enhancing and then decreasing lastly increasing with temperature increase. Under the effect of humidity and heat coupling environment，relative damping coefficient increases with humidity and temperature increase. The conclusion will lay a foundation for the design and application under all-weather environment of the new composite damping structure.

Keywords：embedded co-cured damping composite；temperature；humidity and heat coupling；least-square method；damping coefficient

http://fhclxb.buaa.edu.cn