

文章编号:1006-1355(2017)01-0172-06

# 高温老化后嵌入式共固化阻尼复合材料结构的 阻尼性能

段风海<sup>1</sup>, 梁 森<sup>1</sup>, 梁天锡<sup>2</sup>

(1. 青岛理工大学 机械工程学院, 山东 青岛 266033;

2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:**在综合研究双马来酞亚胺树脂基碳纤维预浸料(T700/QY260)和AFLAS氟橡胶的力学性能、阻尼性能和耐高温性能基础上,通过试验的方法提出一种能够耐260℃超高温度的黏弹性阻尼材料。利用四氢呋喃溶液将该黏弹性阻尼材料制成阻尼胶浆溶液,结合双面刷涂和热压罐工艺制备出嵌入式共固化阻尼复合材料试件,利用自由振动衰减实验方法对该试件分别做常温、230℃\*96 H、260℃\*96 H老化实验处理后相对阻尼系数的测定,得到不同温度老化处理后的嵌入式共固化阻尼复合材料的相对阻尼系数与阻尼材料厚度的关系,证明了所制备的嵌入式共固化阻尼复合材料具有优异耐超高温性能和稳定的阻尼性能。

**关键词:**振动与波;嵌入式共固化阻尼复合材料;超高温;老化处理;自由衰减实验;阻尼性能

中图分类号:TH703.62

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2017.01.037

## Damping Properties of Embedded Co-cured Composite Damping Structures after High Temperature Aging Treatment

DUAN Feng-hai<sup>1</sup>, LIANG Sen<sup>1</sup>, LIANG Tian-xi<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University,

Qingdao 266033, Shandong China;

2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan China)

**Abstract :** Based on the synthetic investigation of the mechanical properties, damping performance and high temperature resistant performance of AFLAS fluorine rubber, a new kind of viscoelastic damping material ingredient is presented, which can co-cure with carbon fiber/bismaleimides resin prepreg (T700/QY260) at 260℃ high temperature. The viscoelastic damping material is dissolved in tetrahydrofuran dissolvant to prepare the viscoelastic material solution. By using the double-sided brush coating process and autoclave process, the embedded high-temperature co-curing high damping composite specimens are manufactured. The free vibration attenuation experiments of these specimens are performed to measure the relative damping coefficients under the conditions of normal temperature and after 230℃\*96 h and 260℃\*96 h aging treatments. The relation between the damping coefficients and the damping material thickness after the aging treatment at different temperatures is obtained. The results verify that the embedded co-cured composite damping structure has excellent ultra-high temperature resistance property and the stable damping performance.

**Keywords :** vibration and wave; embedded co-cured composite damping structure; ultra high temperature; the aging process; free attenuation experiment; damping properties

嵌入式共固化阻尼复合材料结构(Embedded Co-cured Composite Damping Structure, ECCDS)以

收稿日期:2016-07-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375248);

中国工程物理研究院资助项目(B2-2015-0112)

作者简介:段风海(1992—),男,山东省德州市人,硕士生,主要研究方向为复合材料。

通信作者:梁森,男,陕西省咸阳市人,博士,高级工程师,教授,博士生导师,研究方向为结构和功能复合材料。  
E-mail: liangsen888111@163 .com

其良好的阻尼性能和综合力学性能,在航空航天等诸多领域受到越来越多的关注,随着超高速全天候飞行器以及精确制导运载器的发展,越发严酷的环境因素对其材料的高温耐受性以及阻尼减震性能提出更高的要求,这就使得嵌入式共固化阻尼复合材料结构中所嵌入的黏弹性阻尼材料具有极好的耐高温性能和阻尼性能<sup>[1-2]</sup>。目前,国内外对嵌入式共固化阻尼复合材料的研究主要集中在中、低温领域,对嵌入式共固化耐高温阻尼复合材料研究非常稀

少<sup>[3]</sup>,而耐高温的大阻尼复合材料又是空间飞行器和运载器必须解决的关键问题。本文在前人研究<sup>[4-6]</sup>的基础上,从黏弹性阻尼材料的组分入手,通过大量的实验对比,得出一种耐超高温黏弹性阻尼材料组分,通过双面混合刷涂和共固化工艺制备出ECCDS实验试件<sup>[7]</sup>,并对实验试件分别进行230℃和260℃高温老化处理,利用自由衰减的实验方法测试高温老化前后实验试件的阻尼性能,得出不同老化温度处理对ECCDS实验试件相对阻尼系数的影响关系,为耐高温大阻尼复合材料构件的设计和广泛应用奠定了基础。

## 1 制作工艺

### 1.1 黏弹性阻尼材料组分

嵌入式共固化阻尼复合材料与传统的复合材料相比,就是将阻尼材料作为一层嵌入在碳纤维树脂预浸料之间,通过阻尼材料与树脂材料的双键加成反应形成IPN互穿网络结构,保证了纤维层与阻尼层之间较大的层间结合力,同时使整个结构具有良好的阻尼性能<sup>[8]</sup>。文献[9-10]作者通过有限元模拟与力学实验比较得出当阻尼材料层位于整个结构的中间位置时,复合材料的阻尼性能最佳,如图1所示。

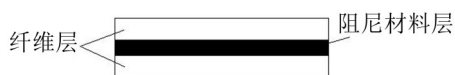


图1 嵌入式共固化阻尼复合材料结构

在评估嵌入式共固化阻尼复合材料的综合性能时,无论是其耐高温性能还是力学性能,阻尼材料都是整个结构中相对薄弱的环节,加之ECCDS的层间结合性能取决于树脂材料与阻尼材料的反应程度,所以阻尼材料对整个结构的力学性能、耐温性能和阻尼性能起着决定性的作用<sup>[11-13]</sup>。这就对阻尼材料提出了严苛的要求:

① 阻尼材料和树脂基碳纤维预浸料能够在基本相同的温度区间和时间区间内分别进行硫化反应和固化反应,从而保证阻尼材料和树脂材料完成共固化反应;

② 阻尼材料作为嵌入层,必须能够与树脂基预浸料中的树脂进行反应,并且反应生成的分子键具有较高的分子键能,从而保证整个结构具有较强的层间结合力;

③ 阻尼材料必须要有良好的耐高温性能和在高温下的优秀稳定的阻尼性能。

氟橡胶由于其材料本身的耐放射性、难燃性、耐候性以及耐热性和耐化学品稳定性而被应用在较苛

刻的环境中。氟橡胶的力学性能优异,经过改性的氟橡胶的拉伸强度能达到23 MPa左右。在耐温性能方面,氟橡胶能够承受-60℃~300℃的温度范围,是所有橡胶中耐高温性能最好的一种,并且与普通橡胶相比,氟橡胶具有更优的高温燃料油、液压油等各种油类的耐受性能。加之氟橡胶本身具有较高的阻尼损耗因子,阻尼损耗因子峰值达1.6左右,其DMA曲线如图2所示,故本文选用氟橡胶作为阻尼材料基体进行改性实验,氟橡胶牌号为日本旭硝子公司生产的四丙氟橡胶AFLAS100H。

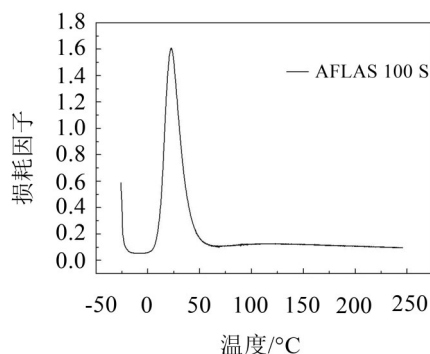


图2 AFLAS 100 S 氟橡胶的DMA曲线

在高温共固化的过程中,氟橡胶的活性硫化点可以与树脂基体中的双键发生双键加成反应,从而形成IPN互穿网络结构<sup>[14-15]</sup>。本文根据四丙氟橡胶和树脂材料的聚合特性进行阻尼材料组分的探索,通过设计正交实验,并进行大量的实验进一步验证、优化,最终确定了黏弹性阻尼材料的组分,如表1所示。

表1 黏弹性阻尼材料组分 份

组分	1#	2#
100 H	100	100
TAIC	5	5
无味DCP	1	1
N990CB	0	20
N330CB	30	10
CaSO <sub>4</sub>	5	5
S	0.1	0.1

### 1.2 试件的制备

依据所设计的组分制备出黏弹性阻尼材料,并按照1:4的比例将其溶解在四氢呋喃溶液中制成阻尼胶浆,并采用双面混合刷涂的工艺将阻尼胶浆均匀地刷涂在T700/QY260表面<sup>[16]</sup>,按照如图1所示设计工况涂有阻尼胶浆的树脂预浸料与没有阻尼胶浆的树脂预浸料进行铺层,依据图3所示的共固化工艺曲线进行共固化,将所制得的嵌入式共固化阻尼

复合材料,按照相关国家标准 GB/T3354-1999 裁制成标准实验试件,并进行编号,如表 2 所示。

1.3 高温老化处理

根据阻尼材料组分与阻尼层厚度的不同,将实

验试件分别编为 A、B、C 三组,将 A 组实验试件常温下放置,不做老化处理;对 B 组实验试件进行 230 ℃\*96 H 老化处理;对 C 组实验试件进行 260 ℃\*96 H 老化处理<sup>[17-18]</sup>,实验试件如图 4 所示。

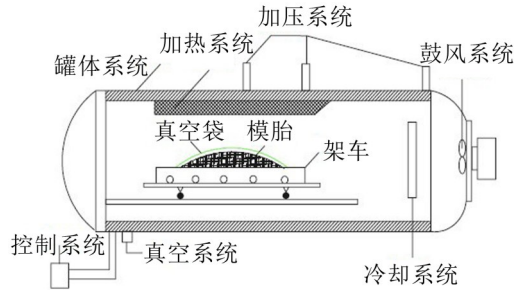


图 3 共固化工艺设备和共固化工艺曲线

表 2 试验试件规格及编号

试件编号	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6
阻尼层厚度/mm	0	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3
材料组分	—	1#	1#	1#	2#	2#	2#
试件规格/mm	300×25	300×25	300×25	300×25	300×25	300×25	300×25

续表 2

试件编号	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
阻尼层厚度/mm	0	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3
材料组分	—	1#	1#	1#	2#	2#	2#
试件规格/mm	300×25	300×25	300×25	300×25	300×25	300×25	300×25

续表 2

试件编号	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6
阻尼层厚度/mm	0	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3
材料组分	—	1#	1#	1#	2#	2#	2#
试件规格/mm	300×25	300×25	300×25	300×25	300×25	300×25	300×25

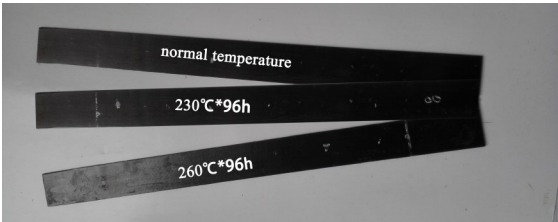


图 4 高温老化实验试件

在进行高温老化处理实验时注意:务必将试件放置 在高温鼓风干燥箱的旋转支架上,并开启旋转模式,保证试件受热均匀,并且在实验过程中要定时观察干燥箱内试件的情况,避免出现火灾等危险,高温老化实验设备为中国台湾高铁检测仪器有限公司生产的 GOTECH-GT-7017-E 高温鼓风干燥箱如图 5 所示。

2 自由衰减实验

为了探究嵌入式共固化阻尼复合材料的阻尼性



图 5 高温鼓风干燥箱

能受不同老化温度处理的影响,本文通过自由衰减实验对实试验试件的阻尼性能进行测试,并利用最小二乘法对实验数据进行处理<sup>[19-20]</sup>。

2.1 实验试件准备

本实验试件为复合材料板材,属于绝缘体,而实验所用的位移传感器为电涡流传感器,所以在实验



前需要对复合材料板材进行处理,处理方法是在试件端部粘贴一层0.1 mm锡箔,要求锡箔厚度薄,质量轻。这样既保证了电涡流传感器能够准确地感应到试件的振幅变化,又不会影响复合材料试件的振动衰减性能<sup>[21]</sup>。

## 2.2 实验测试过程

实验过程中,把实验试件夹装在试验台上,用力锤(丹麦B&K公司、型号:8206-002、灵敏度2.035 mv/N)给实验试件施加一定的单脉冲激励,使用位移传感器(上海欧多公司、型号:为OD9001801、灵敏度:1.25 mv/N)测试其振动幅值随时间变化的衰减参数,再通过数据采集PULSE(丹麦B&K公司、型号:3500-B-030、通道数:5通道)将实验信号传输到计算机的信号处理软件中,通过进一步的处理提取实验数据,最终利用最小二乘法计算出嵌入式共固化耐超高温阻尼复合材料的相对阻尼系数。具体实验方法为:

(1) 实验前,对实验试件按照老化试验前的实验编号进行分组,具体实验试件编号和尺寸规格如表2所示。

(2) 将实验试件夹装固定在试验台上,实验设备的连接与组装按照图6所示。



图6 自由衰减实验设备

(3) 进行实验,使用力锤对试件施加单脉冲激励,使试件振动,位移传感器感应试件的振幅衰减变化曲线,通过数据采集PULSE采集实验信号,并将实验信号传输到计算机数据处理系统,计算机数据处理系统记录并保存信号。

## 2.3 实验数据处理

本文实验所用的复合材料板材的处理方法为:未作处理、230℃\*96 H老化处理、260℃\*96 H老化处理。振动衰减试验对以上经过不同条件处理的实验件均进行测试,得到了实验试件的振动时域图,如图7所示。

经过傅里叶变换之后得到其频域信号,将频域信号加窗函数滤波,过滤掉高频固有频率,得到最终的频域图如图8所示。

目前,对于离散数据的拟合处理方法主要有直线拟合法和多项式拟合法,多项式拟合法是在部分

实验数据的基础上进行拟合,无法充分地利用有效的实验数据,精度较低。由于嵌入式共固化阻尼复合材料的相对阻尼系数较小,为了保证其数据处理的精度,本文提出使用最小二乘法对实验数据进行直线拟合。

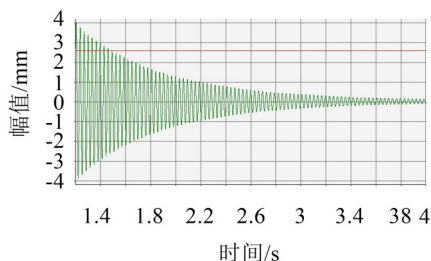


图7 自由衰减时域图

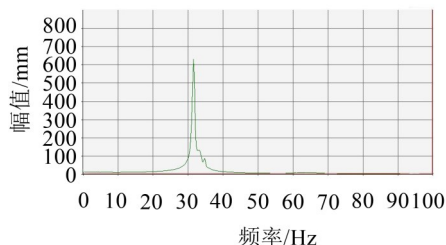


图8 自由衰减频域图

由振动力学可知:相对阻尼系数定义为实际的黏性阻尼系数与临界阻尼系数之比,用符号 $\zeta$ 表示。不同的振动系统有不同的振动行为,系统的振动行为由系统的固有频率 $\omega_n$ 和相对阻尼系数 $\zeta$ 所决定。

根据最小二乘法原理计算得到如表3所示的各试件的相对阻尼系数。并将表中数据分别绘制成图9、图10和图11。

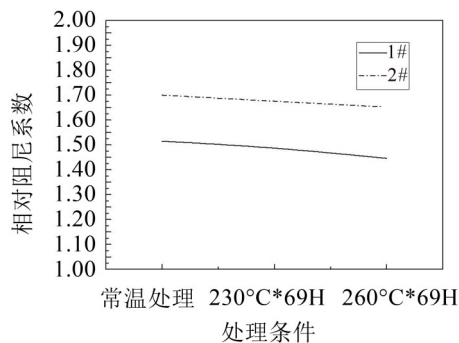


图9 老化处理对阻尼层厚度为0.1 mm的实试验件阻尼性能的影响

## 3 自由衰减实验结果分析

图9、图10、图11分别给出了室温处理、230℃\*96 H、260℃\*96 H高温老化处理对实验试件的相对阻尼系数和固有频率的影响,其实验试件的阻尼材料组分为1#、2#,阻尼层厚度分别为0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm。

表 3 不同处理条件下各试件相对阻尼系数

试件编号	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6
$\omega_d/\text{Hz}$	34.75	31.50	34.75	45.25	31.50	34.25	37.00
$\zeta/(\%)$	1.159	1.515	3.435	6.442	1.700	3.888	6.508

续表 3

试件编号	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
$\omega_d/\text{Hz}$	34.80	31.52	34.78	45.30	31.54	34.25	37.54
$\zeta/(\%)$	1.161	1.490	3.416	6.422	1.675	3.872	6.485

续表 3

试件编号	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6
$\omega_d/\text{Hz}$	34.81	31.54	34.79	45.32	31.56	34.26	37.58
$\zeta/(\%)$	1.162	1.446	3.385	6.386	1.652	3.817	6.439

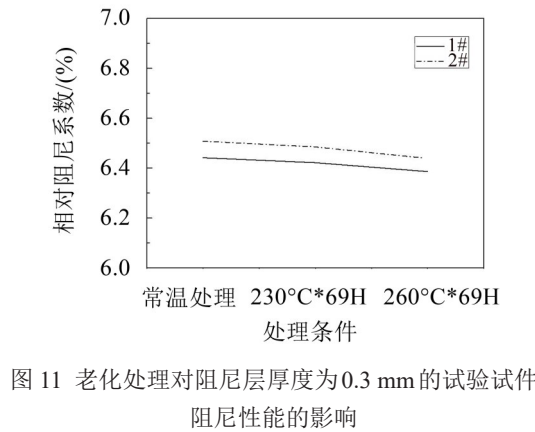
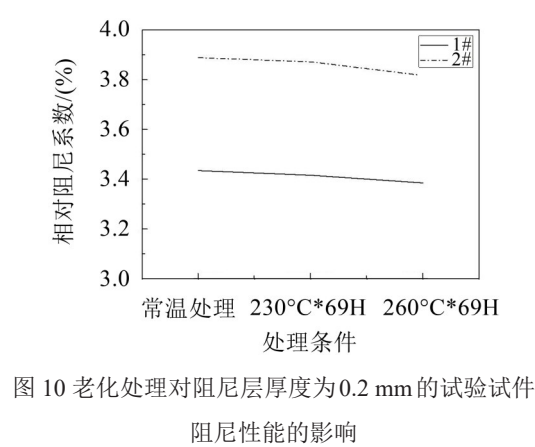


图9所示为老化处理对阻尼层厚度为0.1 mm的试验试件阻尼性能的影响,由图可知,本文所制备的嵌入式共固化阻尼复合材料在经过230℃和260℃高温老化处理之后,其阻尼性能保持稳定。其中,当阻尼材料厚度为0.1 mm时,经过230℃\*96 H和260℃\*96 H高温老化处理后,嵌入1#阻尼材料的ECCDS相对阻尼系数较室温下降1.650%和4.554%,嵌入2#阻尼材料的ECCDS相对阻尼系数较室温下下降1.471%和2.824%,两者阻尼性能均保持较高的稳定性,2#材料的阻尼性能稳定性优于1#阻尼材料。

由图10可以看出,当阻尼材料厚度为0.2 mm时,随着老化温度的升高,1#和2#嵌入式共固化阻尼复合材料试件的阻尼性能均略有下降,在经过230℃\*96 H和260℃\*96 H高温老化处理后,1#复合材料试件的相对阻尼系数分别下降0.553%和1.456%,2#复合材料试件的相对阻尼系数分别下降0.412%和1.826%,其阻尼性能保持稳定。

由图11可以看出,当阻尼层厚度为0.3 mm时,高温老化处理对试验试件的阻尼性能影响较小,在经过230℃\*96 H和260℃\*96 H高温老化处理后,1#试件相对阻尼系数下降了0.31%和0.869%,而2#试件的相对阻尼系数下降了0.353%和1.06%。

综合图9、10、11我们可以看出,当试件嵌入的阻尼层厚度较薄时,无论试件老化与否,随着阻尼层厚度的增加,其相对阻尼系数均增加,且当阻尼层厚度每增加0.1 mm,其相对阻尼系数增加明显,当整个试件中嵌入的阻尼层厚度达到一定厚度时,其相对阻尼系数维持在稳定的水平。这表明,阻尼材料的嵌入明显的提高了复合材料试件的阻尼性能。同时,随着阻尼层材料厚度的增加,高温老化处理对其阻尼性能的影响越来越小,对于经过260℃\*96 H处理的1#试件,当其阻尼层厚度为0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm时,其相对阻尼系数分别下降4.554%、1.456%、0.869%,对于2#复合材料试件,其相对阻尼系数分别下降2.824%、1.826%、1.06%,变化幅度均在5%以内,说明本文制备的嵌入式共固化阻尼复合材料经过高温处理后,仍具备优秀的阻尼性能稳定性。

4 结 语

本文在综合研究双马来酰亚胺树脂基碳纤维预浸料(T700/QY260)和AFLAS氟橡胶的力学性能、阻尼性能和耐高温性能基础上,通过实验的方法提

出一种能够耐 260 °C 超高温度的黏弹性阻尼材料。利用四氢呋喃溶液将该黏弹性阻尼材料制成阻尼胶浆溶液,结合双面刷涂和热压罐工艺制备出嵌入式共固化阻尼复合材料试件,利用自由振动衰减实验方法对该试件分别做常温、230 °C\*96 H、260 °C\*96 H 老化实验处理后相对阻尼系数的测定,得到了不同温度老化处理后的嵌入式共固化阻尼复合材料的相对阻尼系数与阻尼材料厚度的关系,主要结论为:

(1) 本文所制备的嵌入式共固化阻尼复合材料在经过不同温度的高温老化处理之后,相对阻尼系数略有下降,变化幅度均保持在 5 % 以内,说明其具有良好的阻尼稳定性。

(2) 嵌入式共固化阻尼复合材料中嵌入的阻尼层厚度较薄时,无论老化与否,其相对阻尼系数均随着阻尼层厚度的增加而增大。

(3) 高温老化对阻尼层厚度不同的试件的影响不同,随着阻尼层厚度的增加,ECCDS 结构的阻尼性能受老化温度的影响越来越小。

#### 参考文献:

- [1] 沈观林,胡更开. 复合材料力学[M]. 北京:清华大学出版社,2006:1-8.
- [2] IOANA C, FINEGAN, RONALD FETAL. Recent research on enhancement of damping in polymer composites[J]. *Composite Structures*, 1999, 44: 89-98.
- [3] 张乾,梁森,韦利明. 嵌入式共固化耐高温阻尼复合材料结构的模态分析试验研究[J]. *四川兵工学报*, 2015, 02: 76-79.
- [4] 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): 185-190.
- [5] LIJIAN PAN, BOMING ZHANG. A new method for the determination of damping in cocured composite laminates with embedded viscoelastic layer[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 319: 822-831.
- [6] NIGEL D BUTLER, S OLUTUNDE OYADIJI. Transmissibility characteristics of stiffened profiles for designed-in viscoelastic damping pockets in beams[J]. *Computers and Structures*, 2008, 86: 437-446.
- [7] 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[J]. *航空学报*, 2013, 34(8): 1972-1979.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 王辉. 嵌入式共固化穿孔阻尼薄膜复合材料结构动力学性能及其优化[D]. 青岛:青岛理工大学,2013.
- [11] BIGGERSTAFF J M, KOSMATKA J B. Directional damping material for integrally damped composite plates [J]. *SPIE Proceedings on Smart Structures and Materials*, 1999, 3672: 368-374.
- [12] ROBINSON M J, KOSMATKA J B. Improved damping in vartm composite structures using perforated viscoelastic layers[J]. *Journal of Composite Materials*, 2006, 40(23): 2157-2173.
- [13] 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.
- [14] HE S, RAO M D. Residual stresses and delamination problems induced by co-curing of damped composite laminates[J]. *Journal of Composite Materials*, 1994, 28(2): 112-129.
- [15] MICHAL RAK, MOHAMED ICHCHOUB, JAN HOLNICKI- SZULC. Identification of structural loss factor from spatially distributed measurements on beams with viscoelastic layer[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 310: 801-811.
- [16] 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: 1-10.
- [17] 黄超,韩道荣,万冰峰. T300/648 复合材料湿热老化机理研究[J]. *长沙航空职业技术学院学报*, 2015, 15(1): 58-64.
- [18] 李泳霖,王威,狄鹏. 舰用复合材料自然老化样本预测方法[J]. *四川兵工学报*, 2014(11): 130-132.
- [19] 冯艳丽,张楚旋,白玉龙,等. 高性能纤维复合材料在航空阻尼材料方面的应用[J]. *高科技纤维与应用*, 2013(4): 42-45.
- [20] 张群,李炜. CF/KF 混杂纤维复合材料阻尼性能研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2012(3): 27-30.
- [21] 梁森,李雪,王东山,等. 多层阻尼薄膜嵌入的共固化复合材料结构的动力学性能[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(5): 1453-1460.