

文章编号: 1000-3851(2007)05-0066-06

# 不同边界条件和应变振幅对各向异性层合阻尼结构内耗的影响

李明俊<sup>\*1,2</sup>, 黎鹏平<sup>2</sup>, 徐泳文<sup>2</sup>, 曹义华<sup>1</sup>, 叶皓<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083; 2. 南昌航空工业学院 环境材料室, 南昌 330063)

**摘要:** 制备了由纤维增强树脂复合材料层与黏弹性材料层交替层合的7层各向异性层合阻尼结构, 借助动态热机械分析仪(DMA Q800)首次考察了不同的结构应变振幅和不同的边界条件对该结构内耗温度频率特性的影响, 为新型减振降噪阻尼结构的理论分析与应用提供相应的实验研究依据。结果表明: 在不同的边界条件和常温(25℃)下, 各向异性层合阻尼结构的内耗都随着结构应变振幅的增加而减少, 且结构内耗峰所对应的温度随应变振幅的增加而向低温方向移动; 当结构应变振幅相同时, 单悬臂梁模式下的结构内耗最高, 双悬臂梁模式次之, 三点弯曲模式下最低。

**关键词:** 边界条件; 应变振幅; 层合阻尼结构; 内耗; 各向异性

中图分类号: TB332 文献标识码: A

Influence of different boundary conditions and strain amplitudes on the structural internal friction of anisotropic laminated damped structures

LI Mngjun<sup>\*1,2</sup>, LI Pengping<sup>2</sup>, XU Yongwen<sup>2</sup>, CAO Yihua<sup>1</sup>, YE Hao<sup>2</sup>

(1. School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Division of Eco materials, Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** The seven layer laminated structures which are alternatively laminated by fiber reinforced composite layers and viscoelastic damping layers were prepared for providing experimental evidence for new type damping structural theory analysis and its application of vibration and noise control, and the influence of different strain amplitudes and boundary conditions on the temperature and frequency characteristics of the structural internal friction were investigated with a dynamic mechanical analyzer (DMA Q800) for the first time. The experimental results show that the structural internal friction decreases with the increasing of structural strain amplitudes under different boundary conditions at 25℃, and the temperature corresponding to the structural internal frictions peak moves towards the low-temperature with increasing the strain amplitudes. The internal frictions are maximum and second-maximum values under the single cantilever model and the double cantilever model, respectively, and the internal friction is the lowest under the 3-point bending model with the same structural strain amplitudes.

**Keywords:** boundary conditions; strain amplitude; laminated damped structures; internal friction; anisotropy

在航空、航天、机械、环境等许多工程领域普遍存在着结构振动的问题, 因此振动与噪声的阻尼控制在结构设计中已成为重要需求。对结构进行阻尼处理是工程上用来控制结构振动的一种有效方法。由于黏弹性材料模量过低, 一般不能单独直接作为工程中的结构材料, 而各向异性复合材料具有比强度和比刚度高、抗疲劳性能和抗震性能好、结构的

可设计性等优点, 获得了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。因此作者在层合阻尼结构中引入各向异性设计, 在层面上设计纤维增强约束层形成面内的各向异性, 使层合阻尼结构的动态力学状态发生很大的变化, 从而提高阻尼结构耗能的潜力<sup>[4-6]</sup>。对于只含有一个中心阻尼层、约束层为各向同性或各向异性的层合阻尼结构的情况, 目前国内外已有相关的理论和实验报

道<sup>[7-9]</sup>。对于交替层合各向异性阻尼薄板结构的动态性能除了与层合顺序、阻尼层材料和厚度、黏结层材料和厚度、约束层材料和厚度等结构本身参数有关外<sup>[10-13]</sup>, 还与不同的边界条件和不同的结构应变振幅等工程参数相关。对于同一结构, 边界条件、应变振幅和测试方法的不同其结构内耗和结构刚度有很大差异<sup>[14-17]</sup>, 但是边界条件和结构应变振幅对各向异性交替层合阻尼结构动态性能的影响, 目前国内外还没有相关的文献报道。本文中主要考察各向异性交替层合阻尼结构试件在相同的边界条件下不同的应变振幅、以及相同的应变振幅下不同的边界条件对结构内耗特性的影响规律。

## 1 实验方法

### 1.1 实验方案

在选定交替层合各向异性阻尼结构的总层数为7层的基础上, 考虑阻尼层厚度(材料为ZN-8)和约束层纤维铺设角度(约束层为厚0.125 mm单层)的影响, 对各约束层纤维铺设角度和各阻尼层厚度进行正交试验, 具体的试验设计方案和正交试验数据结果可参考文献[10], 根据正交试验结果, 重新制作结构阻尼性能和刚度性能均较优的层合结构, 选定结构的具体参数如下: 0° 0.5°/45° 0.3°/90° 0.5°/0°, 主要考察该结构在相同的边界条件下不同的应变振幅、以及相同的应变振幅下不同的边界条件对结构内耗特性的影响规律。

### 1.2 层合阻尼结构试件的制备

先将厚度为0.125 mm的环氧树脂基炭纤维预浸料(山东天泰新材料股份有限公司产)裁剪成尺寸为200 mm×300 mm的大试样。再将试样两面刮涂二甲苯稀释过的T54/T60型改性环氧树脂(组分体积比为16:1)搁置一段时间, 放置在自制的真空压制装置中压制约1 h左右成型取出, 干燥一段时间后打磨, 用脱脂纱布蘸丙酮清洗干净, 晾干。并将该大试样剪成不同角度、长宽为60 mm×12 mm的小试样。另将不同厚度的阻尼层材料(ZN-8)剪成60 mm×12 mm的小试样。然后用压敏胶(阻尼层材料和压敏胶均为北京材料工艺研究所产)作胶黏剂, 按试验方案制备层合试件。最后将层合试件置于真空压制装置中, 一次或多次压制成型。干燥一段时间, 待试验。

### 1.3 实验方法及参数的表征

复合材料动态力学试验的方法很多, 按照振动

模式可分为4大类: 自由衰减法、强迫共振法、强迫非共振法和声波传播法<sup>[18]</sup>。本试验是在美国TA公司生产的动态热机械分析仪(DMA Q800)上进行, 试验过程中使用强迫非共振方法、弯曲形变模式, 试样的弯曲模式为双悬臂梁弯曲(Double cantilever)、单悬臂梁弯曲(Single cantilever)和三点弯曲(3-point bending), 其梁跨距分别为35 mm、17.5 mm和15 mm。试件的结构内耗用相位角的正切tan 来表征。在进行结构内耗的频率特性试验时, 测试温度为25℃, 频率为1~180 Hz, 在所测频率范围采取50点扫描方式; 在进行结构内耗的温度特性试验时, 频率f=125 Hz, 测试温度范围为-30~50℃, 升温速率为3℃/min。本试验采用动态热机械分析仪(DMA Q800)自带的试验控制模式, 试验中控制应变振幅分别为:  $2 \times 10^{-4}$ 、 $5 \times 10^{-4}$  和  $10 \times 10^{-4}$ 。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 不同结构应变振幅对结构内耗特性的影响规律

结构应变振幅是动载荷下结构变形的特征量, 结构应变振幅的变化反应了动载荷的变化。

#### 2.1.1 三点弯曲模式下不同结构应变振幅对结构内耗温频特性的影响规律

图1(a)、1(b)分别为三点弯曲模式下不同的结构应变振幅对结构内耗的频率特性和温度特性的影响。在常温下(25℃)各频率点在所测试的应变振幅范围内, 结构内耗随着应变振幅的增加而降低。在所测试的温度范围内, 随着应变振幅的变化, 结构内耗的温度特性有很大的不同。在约-30~20℃区间, 结构内耗随着应变振幅的增加而增大; 在20~50℃区间, 结构内耗随着应变振幅的增加而降低, 并且随着应变振幅的增加, 结构内耗的最大值也增大且向低温方向移动。

#### 2.1.2 双悬臂梁模式下不同结构应变振幅对结构内耗温频特性的影响规律

图2(a)、2(b)分别为双悬臂梁弯曲模式下不同的结构应变振幅对结构内耗的频率特性和温度特性的影响。在常温下(25℃)各频率点在所测试的应变振幅范围内结构内耗均随着应变振幅的增加而降低。在所测试的温度范围内, 结构内耗随温度的升高先增加到某一最大值然后再逐渐地降低; 随着应变振幅的变化结构内耗在不同的温度区间也有一定的差异, 在约-30~15℃区间, 高应变振幅时结构

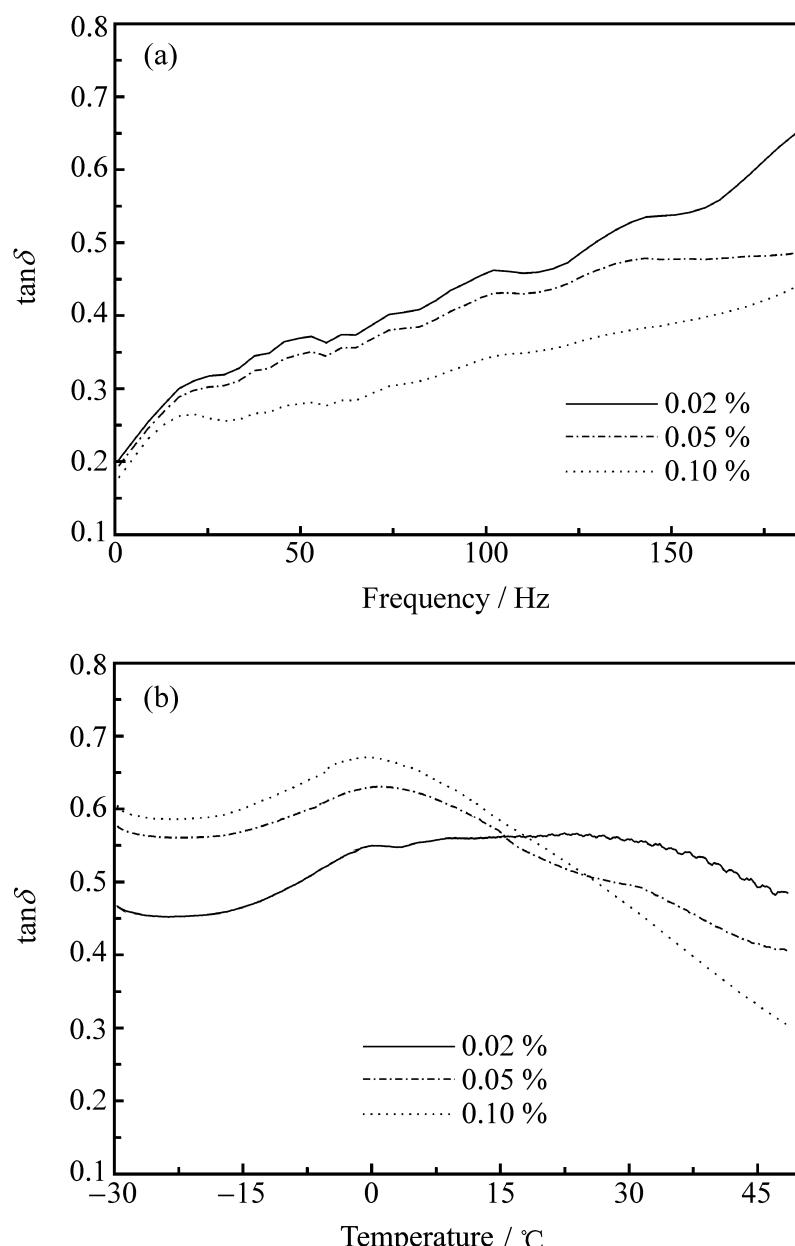


图1 三点弯曲模式下结构应变振幅对结构  
(0% 0.5% / 45% 0.3% / 90% 0.5% / 0%) 内耗温频特性的影响  
Fig.1 Influence of different strain amplitudes on the  
temperature and frequency characteristic of structural  
internal friction for the structure (0% 0.5% / 45% 0.3% / 90% 0.5% / 0%)  
under the 3-point bending model

内耗值最高，而在15~50℃区间，高应变振幅其结构内耗值反而最低。随着应变振幅的增大，结构内耗的最大值逐渐增大且向低温方向移动。

### 2.1.3 单悬臂梁模式下不同结构应变振幅对结构内耗温频特性的影响规律

图3(a)、3(b) 分别为单悬臂梁弯曲模式下不同的结构应变振幅对结构内耗的频率特性和温度特性的影响。在常温下(25℃)，在所测各频率点，在测试的应变振幅范围内，结构内耗都随着应变振幅的增加而降低。在不同的温度区间结构应变振幅的变化对结构内耗的影响差异较大，不具备明显的单调变化影响规律，结构内耗的最大值向低温方向移动。

综上可知在不同的边界条件下，常温下(25℃)各向异性层合阻尼结构内耗的频率特性都随着结构应变振幅的增大而逐渐地减少，且结构的内耗峰所

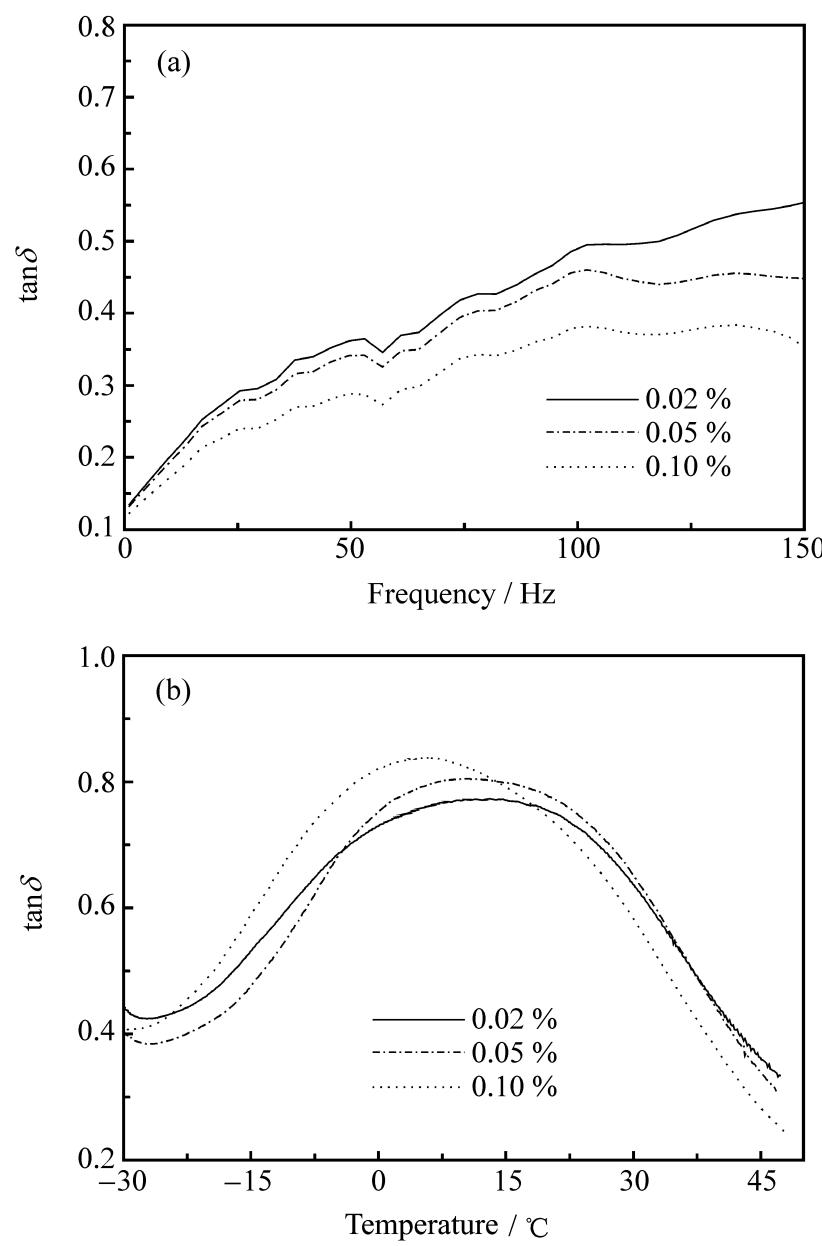


图2 双悬臂梁模式下结构应变振幅对结构  
(0% 0.5% / 45% 0.3% / 90% 0.5% / 0%) 内耗温频特性的影响  
Fig.2 Influence of different strain amplitudes on the  
temperature and frequency characteristic of structural  
internal friction for the structure (0% 0.5% / 45% 0.3% / 90% 0.5% / 0%)  
under the double cantilever model

对应的温度随应变振幅的增大而向低温方向移动。以往研究表明<sup>[2]</sup>，频率和动态应变振幅对阻尼材料特性影响的等效关系与频率和温度影响的等效关系相似。对于非线性阻尼材料其高的动态应变振幅对阻尼材料特性的影响与低频的影响是等效的，反之低的动态应变振幅值的影响与高频影响等效。可以认为对于各向异性层合阻尼结构，上述等效关系在不同的温度区间不都成立。

## 2.2 不同的边界条件对结构内耗特性的影响规律

边界条件反映的是结构件应用的具体连接情况，影响到其动载荷下的结构应力状态。

### 2.2.1 不同的边界条件对结构内耗频率特性的影响

图4(a)、4(b)、4(c) 分别为结构应变振幅为 $2 \times 10^{-4}$ 、 $5 \times 10^{-4}$  和  $10 \times 10^{-4}$  时，不同的边界条件对各向异性层合阻尼结构内耗频率特性的影响。当结构应变振幅相同时，结构内耗值都随着频率的增

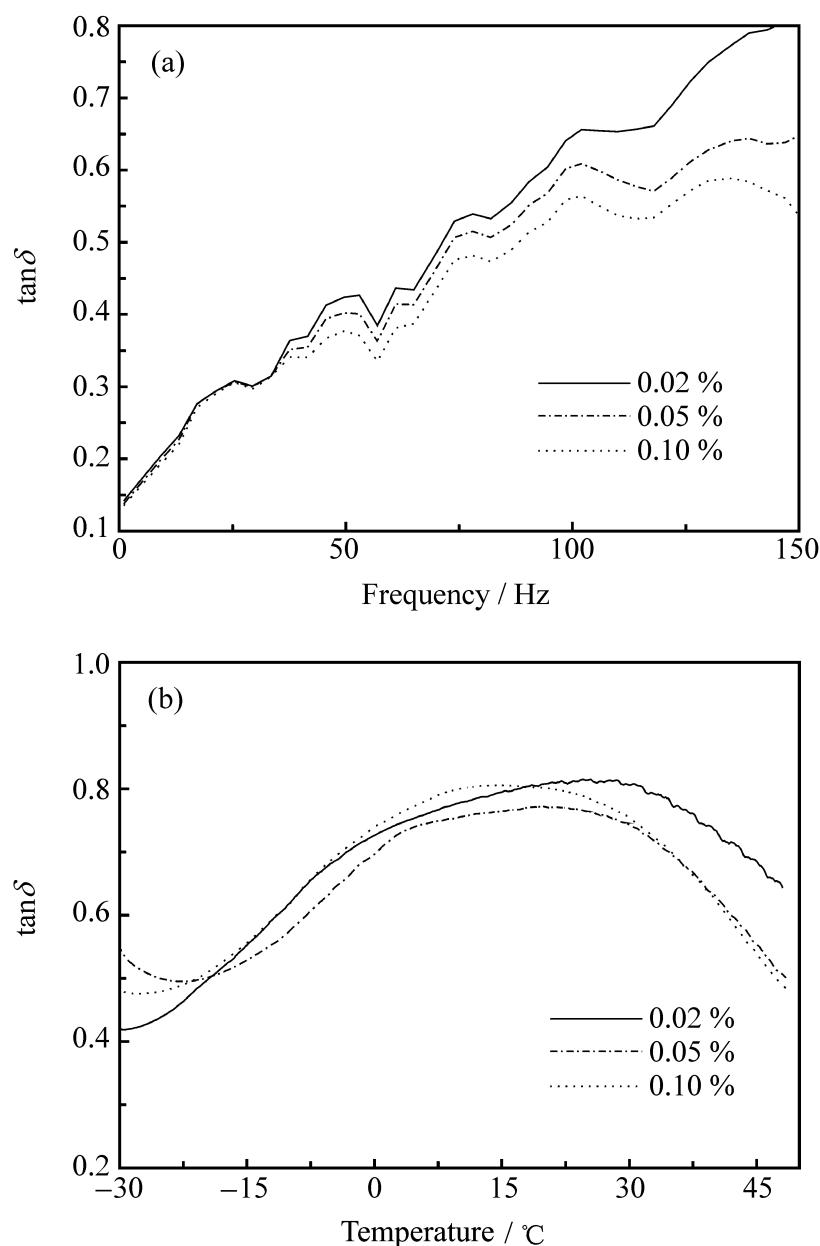


图3 单悬臂梁模式下结构应变振幅对结构  
(0% 0.5/45% 0.3/90% 0.5/0%) 内耗温频特性的影响  
Fig. 3 Influence of different strain amplitudes on the  
temperature and frequency characteristic of structural internal  
friction for the structure (0% 0.5/45% 0.3/90% 0.5/0%)  
under the single cantilever model

加而呈增大趋势，并且单悬臂梁模式下的结构内耗最高，双悬臂梁模式次之。当应变振幅为  $2 \times 10^{-4}$  时，双悬臂梁弯曲模式和三点弯曲模式的结构内耗在测试的频率范围内相差很小；但随着应变振幅的增大，结构内耗值的差异也逐渐增大。

#### 2.2.2 不同的边界条件对结构内耗温度特性的影响

由于交替层合各向异性约束阻尼结构的阻尼性能受铺层层合顺序、约束层的厚度及约束层纤维铺设角度、阻尼层材料和厚度等结构本身的因素影响，此处主要考察在其它影响因素相同的情况下，不同的边界条件对结构内耗峰值和结构内耗峰所对应的温度变化的影响。对结构内耗进行温度扫描试验时，采用  $\tan\delta$  的最大值以及  $\tan\delta$  大于某一值的温度范围来表征。不同的弯曲模式和结构应变振幅对结构内耗温度特性的影响如表1。

从表1可以看出，当应变振幅为  $2 \times 10^{-4}$  时单

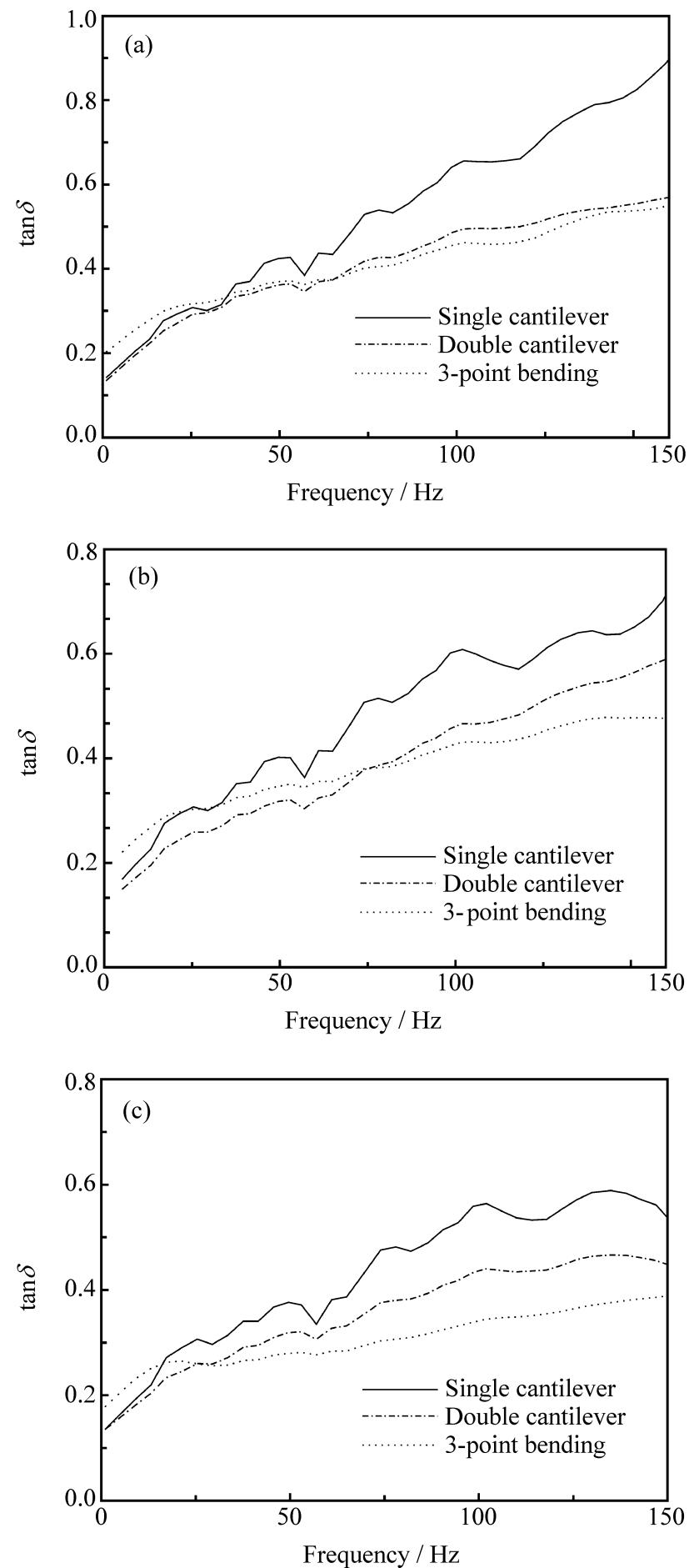


图4 3种结构应变振幅下不同的边界条件对结构  
(0% 0.5/45% 0.3/90% 0.5/0%) 内耗频率特性的影响  
Fig. 4 Influence of different boundary conditions on the  
frequency characteristic of structural internal friction for  
the structure (0% 0.5/45% 0.3/90% 0.5/0%) under  
the different strain amplitudes models

悬臂梁弯曲模式的结构内耗峰值最大，温度范围最宽；应变振幅为  $5 \times 10^{-4}$  和  $10 \times 10^{-4}$  时双悬臂梁弯曲模式的结构内耗峰值最大，但是单悬臂梁弯曲模式的温度范围最宽。边界条件的不同，使其对内耗峰的位置也有一定的影响。单悬臂梁弯曲模式下的

表1 不同的弯曲模式对层合阻尼结构(0%0.5/45%0.3/90%0.5/0)内耗峰的影响

Table 1 Influence of different bending models on internal friction peak of laminated damped structures (0%0.5/45%0.3/90%0.5/0)

Strain amplitude / %	3-point bending			Double cantilever			Single cantilever		
	0.02	0.05	0.10	0.02	0.05	0.10	0.02	0.05	0.10
$\tan_{max}$	0.5669	0.6306	0.6698	0.7733	0.8045	0.8376	0.8148	0.7721	0.8057
Temperature of $\tan_{max}/$	22.50	0.77	-1.77	13.10	10.50	5.86	24.50	19.80	14.80
$T(\tan > 0.55)/$	29	47	49	48	45	48	65	57	60

结构内耗峰所对应的温度最高, 双悬臂梁模式下次之, 三点弯曲模式下最低, 且三者内耗峰值温度相差较大。

### 3 结 论

(1) 对于交替层合各向异性阻尼结构, 应变振幅的变化对结构内耗值有很大的影响。在不同的边界条件下, 常温下(25)所有频率点上各向异性层合阻尼结构的内耗都随着结构应变振幅的增加而减少, 且结构内耗峰所对应的温度随应变振幅的增加而向低温方向移动。

(2) 边界条件对结构内耗的频率特性有一定的影响。当结构应变振幅相同时, 结构内耗值都随着频率的增加而增大, 并且单悬臂梁模式下的结构内耗最高, 双悬臂梁模式下次之, 三点弯曲模式下最低。

(3) 边界条件对结构内耗峰对应温度的位置也有一定的影响。单悬臂梁弯曲模式下的结构内耗峰所对应的温度最高, 双悬臂梁模式下次之, 三点弯曲模式下最低, 且三者相差较大。

### 参考文献:

- [1] 戴德沛. 阻尼技术的工程应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1991: 304-345.  
Dai Depei. Engineering application of damping technique [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991: 304-345.
- [2] 孙庆鸿, 张启军, 姚慧珠, 等. 振动与噪声的阻尼控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992: 102-132.  
Sun Qinghong, Zhang Qijun, Yao Huizhu, et al. Damping control of vibration and noise [M]. Beijing: China Machine Press, 1992: 102-132.
- [3] 张志民. 复合材料结构力学 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993: 35-50.  
Zhang Zhimin. Structural mechanics for composites material [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1993: 35-50.
- [4] Cao Y H, Li MJ. Studies on damping characteristics and parameter optimization of anisotropic laminated structure [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2002, 74(4): 332-337.
- [5] 李明俊, 苏媛, 孙向春, 等. 层合阻尼结构各向异性设计之阻尼特性分析 [J]. 复合材料学报, 2002, 19(3): 94-97.  
Li Mngjun, Su Yuan, Sun Xiangchun, et al. Anisotropic design and its damping analysis of laminated damped structure [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2002, 19(3): 94-97.
- [6] 李明俊, 刘桂武, 徐泳文, 等. 粘结层对各向异性层合阻尼结构内耗特性的影响 [J]. 复合材料学报, 2005, 22(4): 96-99.  
Li Mngjun, Liu Guiwu, Xu Yongwen, et al. Influences of bonding layer on the internal friction characteristics of anisotropic laminated damped structures [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(4): 96-99.
- [7] Kovas B. Vibration analysis of a damped arch using an iterative laminate model [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 254(2): 367-378.
- [8] Ganapathi M, Patel B P. Flexural loss factor of sandwich and laminated composite beams using linear and nonlinear dynamic analysis [J]. Composites Part B, 1999, 30(4): 245-256.
- [9] 张少辉, 陈花玲. 共固化复合材料粘弹性阻尼结构的损耗因子研究 [J]. 航空材料学报, 2005, 25(1): 53-57.  
Zhang Shaohui, Chen Hualing. Damping analysis of co-cured composites with internal viscoelastic layers [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2005, 25(1): 53-57.
- [10] 李明俊, 刘桂武, 徐泳文, 等. 不同阻尼层材料对交替层合各向异性阻尼结构动态性能的影响 [J]. 机械工程材料, 2005, 29(11): 4-7.  
Li Mngjun, Liu Guiwu, Xu Yongwen, et al. Influence of different damping layers on dynamic characteristics of alternately laminated anisotropic damped structures [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2005, 29(11): 4-7.
- [11] 李明俊, 刘桂武, 徐泳文, 等. 交替层合阻尼结构主控各向异性层参数对结构阻尼的影响 [J]. 复合材料学报, 2006, 23(1): 180-184.  
Li Mngjun, Liu Guiwu, Xu Yongwen, et al. Parameter effects of the main controlled anisotropic layer on structural damping of alternately laminated damped structures [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(1): 180-184.

- [12] 李明俊, 叶皓, 徐泳文, 等. 各向异性参数对层合阻尼薄板损耗因子的影响分析 [J]. 机械工程材料, 2005, 29(2) : 10~13.  
Li Mingjun, Ye Hao, Xu Yongwen, et al. Analysis on the effects of anisotropic parameters on the loss factor of laminated damping plates [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2005, 29(2) : 10~13.
- [13] 刘桂武, 李明俊, 徐泳文, 等. 层合顺序对各向异性层合阻尼结构动态性能的影响 [J]. 南昌航空工业学院学报, 2004, 18(4) : 41~44.  
Liu Guiwu, Li Mingjun, Xu Yongwen, et al. Influence of laminated orders on dynamic characteristics of anisotropic damped structures [J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology, 2004, 18(4) : 41~44.
- [14] Alzahrani A O, Ayman A. Effect of the particle size on the viscoelastic properties of filled polyethylene [J]. Polymer, 2006, 47(7) : 2357~2368.
- [15] Sharai M H, Lawandy A M, Hassan H H. The physical properties of pressure sensitive rubber composites [J]. Polymer Degradation and Stability, 2006, 91(7) : 1417~1423.
- [16] Sta A D, Ragni L. Experimental tests and analytical model of high damping rubber dissipating devices [J]. Engineering Structures, 2006, 28(13) : 1874~1884.
- [17] 龚元明, 孙志杰, 贺成红, 等. 不同预载/动载下纤维增强环氧树脂复合材料动态粘弹性 [J]. 复合材料学报, 2006, 23(1) : 26~30.  
Gong Yuanning, Sun Zhijie, He Chenghong, et al. Dynamic viscoelasticity of fiber reinforced composites under different preload/dynamic load [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(1) : 26~30.
- [18] 过梅丽. 高聚物与复合材料的动态力学热分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002 : 21~76.  
Guo Meili. Dynamic mechanical thermal analysis of polymer and composites [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002 : 21~76.