

纤维含量对麻纤维复合材料力学 和振动阻尼性能的影响

何莉萍^{1†}, 皮超雄¹, 陈大川², 谭博欢¹, 张邦基¹, 袁剑民³, 李伟³

(1.湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082;

2.湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 3.湖南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:振动阻尼和力学性能是节能环保麻纤维增强复合材料推广应用于高铁、汽车等运载工具车身时需要考虑的重要和关键技术指标。为此, 本文对洋麻纤维增强聚丙烯复合材料进行了拉伸力学性能试验和悬臂梁模态试验, 得到了复合材料的拉伸性能和振动阻尼特性参数(固有频率和阻尼比), 并探讨了纤维含量对复合材料力学性能和悬臂梁固有频率以及阻尼比的影响。结果表明:随着纤维含量的增加, 复合材料的断裂伸长率逐渐降低, 弹性模量和拉伸强度均呈增加趋势。同时, 复合材料的悬臂梁固有频率随着纤维含量的增加而增加。然而, 复合材料悬臂梁的阻尼比呈现先增加后降低的趋势, 当纤维质量分数为10%时, 阻尼比达到最大值为0.093, 与纯聚丙烯相比, 提高了20.8%。复合材料悬臂梁二阶阻尼比均高于一阶阻尼比, 表明振动幅值影响麻纤维增强树脂基复合材料的阻尼性能。

关键词:麻纤维; 复合材料; 纤维含量; 固有频率; 阻尼比; 力学性能

中图分类号: TB53

文献标志码: A

Effect of Fiber Content on Mechanical Properties and Vibration Damping Characteristics of Bast Fiber Reinforced Composites

HE Liping^{1†}, PI Chaoxiong¹, CHEN Dachuan², TAN Bohuan¹,
ZHANG Bangji¹, YUAN Jianmin³, LI Wei³

(1.State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China;

2.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3.College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Damping and mechanical properties of bast fiber reinforced composites are important and key issues for their applications in manufacturing vehicle body components of automobile and high-speed train. Therefore, this work experimentally studied the kenaf fiber reinforced polypropylene composites. Investigation on the effect of fiber weight percentage on vibration characteristics and mechanical properties was carried out through mechanical tests and modal analysis. The results indicated that the tensile strain decreased with the increase in fiber content. The tensile modulus and tensile strength showed a rising trend with fiber content increase. Natural frequencies of the com-

* 收稿日期:2018-05-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51073051), National Natural Science Foundation of China(51073051)

作者简介:何莉萍(1967—),女,四川成都人,湖南大学教授,博士

† 通讯联系人, E-mail:lphe@hnu.edu.cn

posites improved with fiber content increase in both the 1st and 2nd vibration modes. The damping ratio initially increased with the increase of fiber content before 10%, and then decreased after 10%. The highest composite damping ratio was of 0.093 obtained at 10% fiber content, which increased by 20.8% compared with the pure polypropylene. The damping ratio of the 2nd mode was higher than that of the 1st mode for each kenaf/pp composite. This suggests that damping properties of the kenaf/pp composites are related to vibration amplitude.

Key words: bast fiber; composites; fiber content; natural frequency; damping ratio; mechanical properties

麻纤维是一种可再生材料,与传统材料相比具有价格低廉、环境友好、可降解等独特的优势,并且其比强度、比刚度都较传统金属材料高,符合轻量化的要求,因此麻纤维增强复合材料在汽车制造领域具有广阔的应用前景^[1]。力学性能是复合材料的基础性能,近年来国内外学者对麻纤维增强树脂基复合材料的拉伸力学性能进行了大量研究^[2-6]。力学性能是复合材料的重要性能,同时复合材料结构的振动特性对汽车的减振降噪也具有较大的影响,然而关于生物质麻纤维复合材料结构工程应用方面的研究,尤其是复合材料结构振动特性方面的研究较少。在进行复合材料汽车零部件设计时需要着重考虑零部件结构的共振幅值,当复合材料结构激励频率接近其固有频率时会发生共振,导致振动幅值迅速增大,从而降低整车舒适性。结构共振幅值主要是由其各阶模态阻尼决定的,动态力学分析和实验模态分析都可以用来测试复合材料的阻尼性能, Duc 等^[7]采用动态力学分析仪测试了亚麻纤维复合材料的损耗因子,表征了亚麻纤维复合材料的阻尼性能,但这种方法未能给出复合材料结构的各阶固有频率和阻尼比,而实验模态分析是得到固有频率和阻尼比的一种可行方法,实验模态分析有自由振动和强迫振动两种方法。自由振动是结构受外力作用后,在自身内力作用下的振动。强迫振动是结构受周期性外力持续作用下引发的振动。王欢等^[8]采用自由振动实验模态分析方法研究了碳纤维复合材料 T 型梁的固有频率和阻尼比,结果表明:复合材料梁自由振动的阻尼比随碳纤维含量的增加而降低。Kumard 等^[9]采用自由振动模态试验方法研究了纤维含量对剑麻/香蕉纤维复合材料悬臂梁的自由振动特性,发现提高纤维含量能够提高复合材料悬臂梁的固有频率和阻尼比。

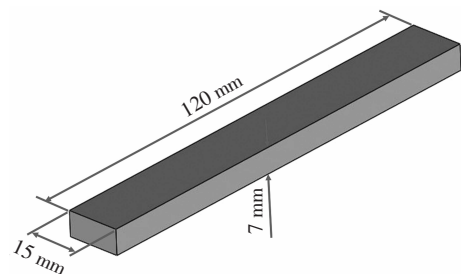
目前,国内外对麻纤维增强树脂基复合材料做了大量的研究,但大多数的研究工作只是关注纤维

的表面改性以及复合材料的力学性能,而对复合材料结构振动特性的研究相对贫乏^[10-12]。因此本研究制备了洋麻/聚丙烯复合材料,采用模态实验技术探讨了纤维含量对洋麻增强聚丙烯复合材料悬臂梁的固有频率和阻尼比的影响这一问题,同时研究了不同纤维含量对复合材料拉伸力学性能的影响,从而能够为麻纤维增强树脂基复合材料的工程应用提供有效的指导。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

麻纤维增强树脂基复合材料,麻纤维采用洋麻纤维,树脂基体采用聚丙烯。洋麻纤维为优级,来源于中国农业科学院麻类研究所(长沙),密度为 1.45 g/cm^3 、比强度为 $640 \text{ MPa} \cdot \text{cm}^3/\text{g}$ 、比模量为 $36.5 \sim 41.4 \text{ GPa} \cdot \text{cm}^3/\text{g}$ 。氢氧化钠由天津市福晨化学试剂厂生产。聚丙烯为 F401,由甘肃兰港石化有限公司生产。将洋麻纤维用氢氧化钠溶液改性处理后与聚丙烯共混,采用注塑成型工艺制备洋麻/PP 复合材料(双螺杆塑料挤出机,TE-35,中国江苏(南京)科亚公司;注塑机,HD-1100,杭州华达塑料机械有限公司)。考虑到当洋麻纤维质量分数大于 30% 质量分数时为复合材料注塑成型的流动性较差,我们制备了 10%、20% 和 30% 的纤维复合材料试件,其中悬臂梁试件如图 1(a)所示,拉伸实验样条如图 1(b)所示。



(a) 悬臂梁试件

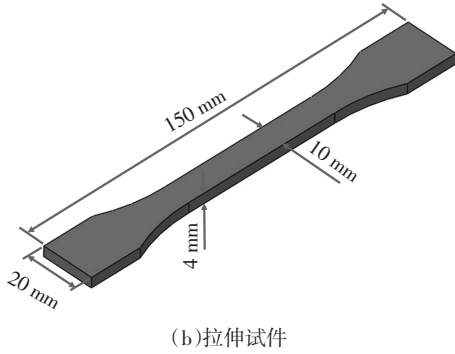


图1 实验试件尺寸图

Fig.1 Size of experimental specimen

1.2 实验方法

1.2.1 拉伸力学性能表征

拉伸试验参照 ASTM D638(塑料拉伸性能试验方法),通过英斯特朗万能试验机(Instron5985)测试了洋麻纤维增强聚丙烯复合材料的拉伸模量、强度和断裂伸长率.拉伸速率为 10 mm/min,试验温度为室温,每种试样测试 5 次,结果取 5 次测试平均值.采用扫描电子显微镜(JSM-5610)观察复合材料拉伸断口表面形貌.

1.2.2 实验模态理论

复合材料悬臂梁的固有频率和阻尼比采用试验模态理论得出,悬臂梁结构是一个多自由度振动系统,动力微分方程如下:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f(t) \tag{1}$$

式中: M 、 C 、 K 分别为悬臂梁系统质量、阻尼和刚度矩阵; \ddot{x} 、 \dot{x} 、 x 分别为悬臂梁加速度、速度和位移向量; $f(t)$ 为激励向量; t 为时间.

将物理坐标转换到模态坐标下可使方程(1)解耦,得到:

$$\begin{cases} K_r + \omega^2 M_r + j\omega C_r = f_r \\ K_r = \phi^T K \phi \\ C_r = \phi^T C \phi \\ M_r = \phi^T M \phi \\ \phi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \dots \ \phi_N] \\ Q = [q_1(\omega) \ q_1(\omega) \ \dots \ q_N(\omega)]^T \end{cases} \tag{2}$$

式中: K_r 、 C_r 、 M_r 为悬臂梁系统模态刚度、模态阻尼和模态质量矩阵; ϕ 为各阶模态向量组成的模态矩阵; Q 为悬臂梁系统模态坐标; N 为线性定常系统的自由度数目; f_r 为激励列向量.

悬臂梁在力锤激励作用下的位移可用(3)式计算:

$$x = \sum_{r=1}^N X_r q_r \tag{3}$$

式中: q_r 为物理坐标系转换到模态坐标系中的坐标; X_r 为第 r 阶模态振型.

由(1)(2)(3)式可以得到悬臂梁激励作用下的频响函数:

$$H = \sum_{r=1}^N \frac{\phi_r^T \phi_r}{K_r - \omega^2 M_r + j\omega C_r} \tag{4}$$

在悬臂梁的一点激励,在其它点获取响应,可以得到频率响应函数的一系列:

$$\begin{pmatrix} H_{1j} \\ H_{2j} \\ \vdots \\ H_{nj} \end{pmatrix} = \sum_{r=1}^N \frac{\phi_{jr}}{K_r - \omega^2 M_r + j\omega C_r} \begin{pmatrix} \phi_{1r} \\ \phi_{2r} \\ \vdots \\ \phi_{nr} \end{pmatrix} \tag{5}$$

频响函数通过傅里叶逆变换可得到系统的脉冲响应,从而识别系统的模态参数(固有频率、阻尼比和振型)^[13].

1.2.3 模态分析

模态是结构的固有特性,每一个模态具有特定的固有频率和阻尼比.模态分析常见的两种方法是锤击法(自由振动)和激振器法(强迫振动),本实验通过锤击法测试复合材料悬臂梁的模态性能,实验装置如图 2 所示.使用模态力锤(美国 PCB 公司 086C03)在试件上产生一个脉冲激励信号,通过安装在试件上的加速度传感器(美国 PCB 公司 356A16)采集悬臂梁试件的响应信号.激振点和加速度传感器的位置如图 3 所示.将加速度传感器采集的信号和力锤的信号通过信号采集系统(美国国家仪器公司 CompactDAQ)输入计算机.通过快速傅里叶变换(FFT)得到系统的频率响应函数,进行模态参数提取,获得悬臂梁的固有频率,阻尼比和振型等模态参数.本实验对不同洋麻纤维含量的复合材料悬臂梁进行模态分析,结果取 5 次实验平均值.

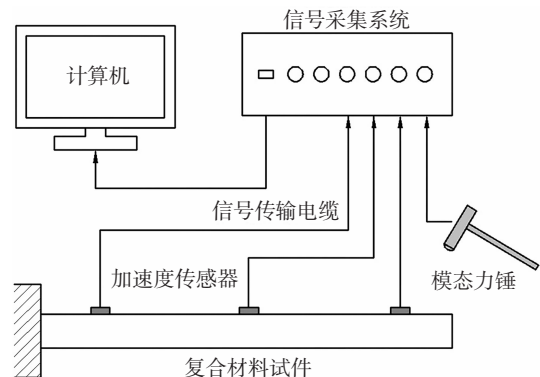


图2 模态实验测试装置示意图

Fig.2 Set-up of modal experimental tests

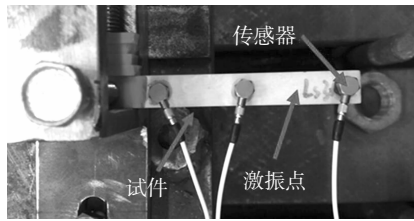


图 3 悬臂梁传感器布置
Fig.3 Sensor distribution of cantilever

2 结果与分析

2.1 复合材料拉伸力学性能

图 4 所示为纯聚丙烯和不同纤维含量复合材料的拉伸应力应变曲线.由图可知,随着纤维含量的增加,复合材料失效时的应变逐渐减小.图 5 为复合材料的断裂伸长率,可以看出,纤维增强复合材料的断裂伸长率均明显低于纯聚丙烯基体材料,随着纤维含量的增加,复合材料的断裂伸长率呈下降趋势.这是因为洋麻纤维是刚性材料,聚丙烯是弹性材料,随着纤维含量的增加,聚丙烯基体含量减少,导致刚性材料增加,弹性材料减少,复合材料的断裂伸长率逐渐变小.

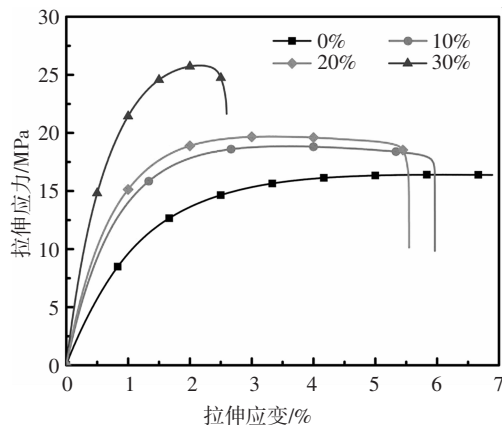


图 4 拉伸试验应力应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves obtained from tensile tests

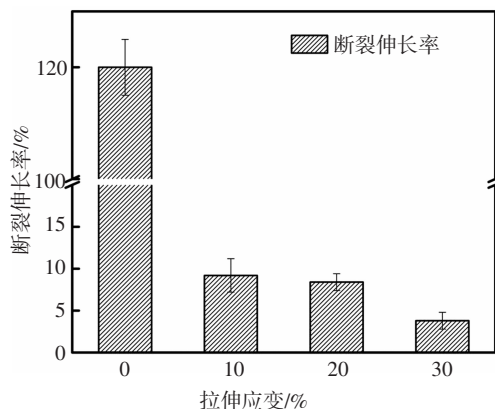


图 5 不同纤维质量分数复合材料断裂伸长率

Fig.5 Elongation at break of composites with different fiber mass fraction

弹性模量是反映材料抵抗弹性变形能力的指标,模量越大,材料的刚度越大,从而使材料发生一定弹性变形所需的应力越大.图 6 为纤维含量对复合材料拉伸力学性能的影响,由图 6(a)可知:10%、20%和 30%洋麻纤维质量分数复合材料的拉伸弹性模量分别为 1.45 GPa、1.69 GPa 和 1.98 GPa,可以看出:复合材料拉伸弹性模量随着纤维含量的提高而增加,复合材料的弹性模量明显高于纯聚丙烯材料 (1.1 GPa),30%纤维质量分数含量复合材料的弹性模量比纯聚丙烯材料提高了 80%.这是因为洋麻纤维较聚丙烯具有更高的弹性模量,随着纤维含量的提高,聚丙烯基体含量减少,复合材料呈现更高的弹性模量.

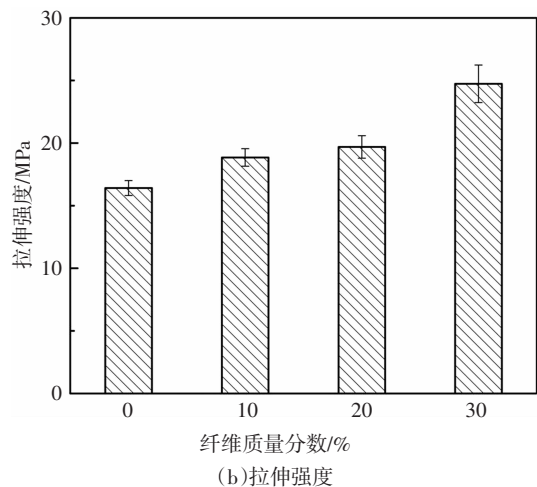
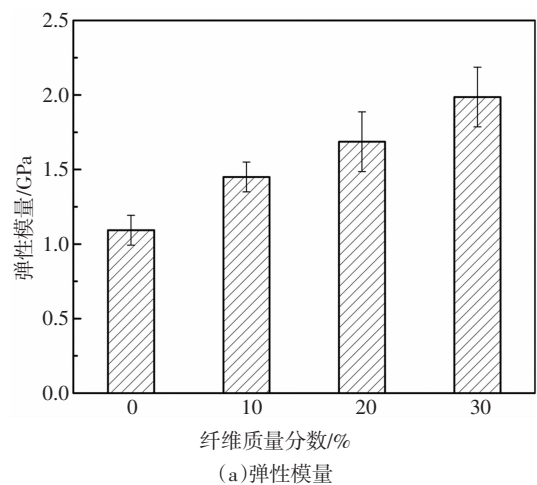


图 6 不同纤维质量分数复合材料的拉伸力学性能
Fig.6 Mechanical properties of composites with different fiber mass fraction

图 6(b)所示为不同洋麻纤维含量的复合材料的拉伸强度.可以看出,复合材料拉伸强度随纤维含量的增加而增加.纤维质量分数为 30%的复合材料的拉伸强度达到 24.73 MPa,相比于纯聚丙烯材料提高了 50.8%.纤维质量分数为 10%和 20%的复合

材料的拉伸强度分别为 18.85 MPa、19.70 MPa 均高于纯聚丙烯材料 (16.4 MPa), 复合材料性能的提升是由于改性洋麻纤维的加入, 图 7 所示为 NaOH 改性处理后洋麻纤维表面形貌. 改性处理提高了洋麻纤维与聚丙烯基体的相容性, 有助于将应力从基体更好地传递到纤维上. 另外由图 6(b) 可以看出 30% 纤维质量分数的复合材料的拉伸强度提高显著. 图 8(c) 所示为 30% 纤维质量分数的复合材料断口表面形貌, 纤维含量较高时, 注塑成型后纤维在基体中连续分布, 基体承受的应力能够相对较好地传递到纤维上, 从而提高复合材料的拉伸强度. 图 8(a) 和 (b) 所示分别为 10% 和 20% 纤维质量分数的复合材料断口表面形貌, 纤维在基体中的分布相对孤立, 因此增强效应有限.

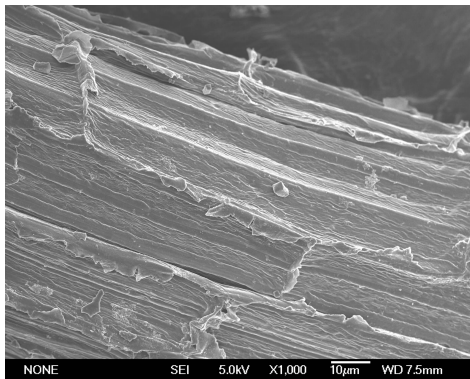
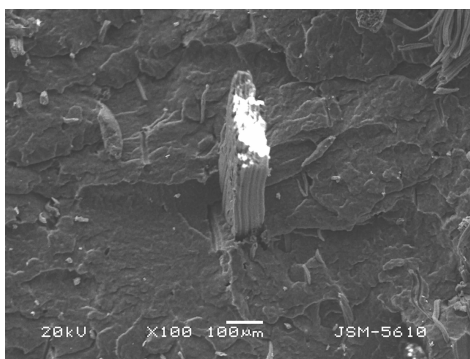
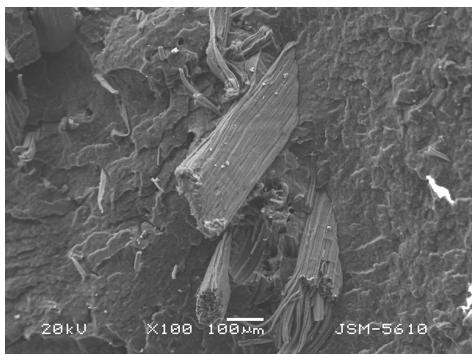


图 7 碱处理洋麻纤维扫描电镜图

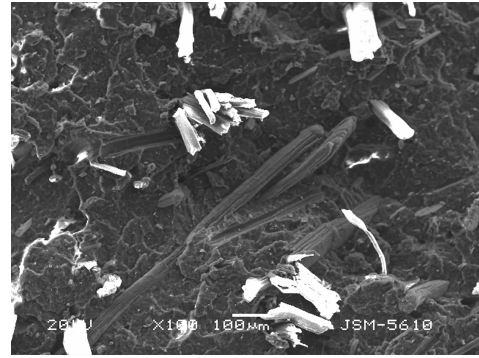
Fig.7 SEM of alkali treatment kenaf fiber



(a) 纤维质量分数为 10%



(b) 纤维质量分数为 20%



(c) 纤维质量分数为 30%

图 8 不同纤维质量分数复合材料扫描电镜图

Fig.8 SEM of composites with different fiber mass fraction

2.2 固有频率

结构振动的固有频率与初始条件无关, 而仅与其固有特性有关(如质量、形状、材质等). 当外界激励频率与固有频率相等时会出现共振, 此时振动幅值将急剧增加, 从而影响结构正常工作甚至产生破坏. 因此在进行汽车零部件设计时, 固有频率是一个必须考虑的重要参数.

复合材料悬臂梁固有频率越高, 其在脉冲载荷作用下抵抗变形的能力越强. 图 9 所示为不同纤维

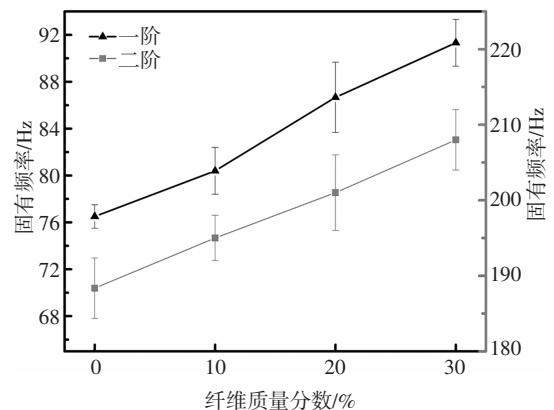


图 9 不同纤维质量分数复合材料的悬臂梁模态固有频率

Fig.9 Natural frequencies of composite cantilever with different fiber mass fraction

质量分数的洋麻纤维增强聚丙烯复合材料悬臂梁的一阶和二阶固有频率. 从图中可以看出, 一阶和二阶固有频率均随着复合材料纤维质量分数的增加而增加, 纤维质量分数为 10%、20% 和 30% 的复合材料悬臂梁的一阶固有频率分别为 80.4 Hz、86.7 Hz 和 91.3 Hz, 比纯聚丙烯悬臂梁 (76.5 Hz) 分别提高了 5.1%、13.3% 和 19.4%. 根据梁的振动理论可知, 悬臂梁的固有频率服从以下关系^[9]:

$$f = \frac{k_1^2}{2\pi} \frac{h}{l^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho}} \quad (6)$$

式中: f 为固有频率; K_1 为常数; h 为平行于梁振动方向的高度; l 为悬臂梁长度; ρ 为材料密度; E 为悬臂梁的弹性模量.复合材料的弹性模量如图 6(a)所示,随着纤维含量的增加,弹性模量随之增加.根据公式(6),悬臂梁的固有频率正比于复合材料弹性模量的平方根,因此随着复合材料弹性模量的增加,悬臂梁固有频率也相应增加.

纤维质量分数为 10%、20%和 30%的复合材料的悬臂梁二阶固有频率分别为 195 Hz、201 Hz 和 208 Hz,较纯聚丙烯(188 Hz)分别提高了 3.5%、6.7%和 10.4%.因此纤维含量对复合材料悬臂梁固有频率有较大影响.提高复合材料中纤维的含量可以明显提高复合材料悬臂梁的固有频率,从而提高复合材料结构件抵抗脉冲载荷变形的能力,并且使其能在更高激励频率环境下工作而不易发生共振.

2.3 阻尼比

阻尼反映了材料将机械能转换成热能的能力,阻尼越大,能量经过材料的损耗率越大,同时阻尼较大的材料能显著降低系统在共振时的振幅峰值.提高洋麻纤维增强聚丙烯复合材料的阻尼可以提高其减振性能.

图 10 所示为洋麻纤维增强聚丙烯复合材料悬臂梁一阶和二阶阻尼比随纤维质量分数增加的变化趋势.从图中可以看出,纤维质量分数为 10%时,复合材料悬臂梁一阶阻尼比达到最大值 0.093,相比于纯聚丙烯材料提高了 20.8%.这是因为麻纤维的内在多孔属性有利于能量的损耗^[14],提高了复合材料将机械能转化为热能的能力,所以提高了复合材料的阻尼性能.这表明麻纤维增强树脂基复合材料在减振降噪方面具有良好的应用前景.当纤维质量分数大于 10%时,阻尼比随着纤维含量的增大而减小.纤维质量分数为 20%和 30%的复合材料悬臂梁

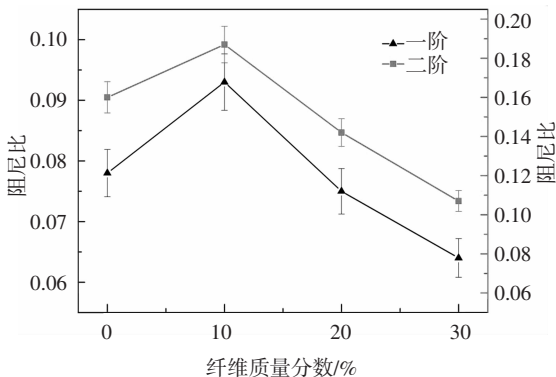


图 10 不同纤维质量分数复合材料悬臂梁阻尼比
Fig.10 Damping ratio of composite cantilever with different fiber mass fraction

一阶阻尼比与纯聚丙烯材料相比分别减少了 2.6%和 16.9%.当复合材料纤维质量分数大于 10%时,虽然麻纤维的多孔结构有利于提高复合材料的阻尼,但是复合材料内纤维缠绕密度增大,从而使聚丙烯基体的连续性下降,导致阻尼性能下降^[15-16].另外聚合物基体是黏弹性物质,高的基体含量将带来高的复合材料阻尼性能,随着纤维含量增加,基体含量的下降也是导致复合材料阻尼下降的一个原因.

复合材料悬臂梁二阶阻尼比随纤维含量增加的变化趋势与一阶相同,但值得注意的是复合材料悬臂梁二阶阻尼比均高于一阶阻尼比,这可能是由于悬臂梁二阶模态振型相比于一阶模态振型,在中部附近具有较大的振动幅值.图 11 所示为复合材料悬臂梁的模态振型图.这种现象可以通过另一种阻尼机制来解释:纤维与基体界面内未结合的部分以及纤维与基体脱胶部分的滑移产生的摩擦会带来额外的能量损耗,从而提高阻尼^[17].相比于悬臂梁一阶模态,这种阻尼机制在二阶模态更加显著,尤其是当悬臂梁中部附近有较大振幅时,上述滑移产生的摩擦会更加明显.但是这种阻尼机制产生的阻尼会随着纤维与基体界面黏合强度以及纤维取向的变化而变化.总的来说,悬臂梁一阶阻尼比主要取决于复合材料本身的阻尼特性,而二阶阻尼比除了受到材料阻尼性能的影响外,还受悬臂梁结构响应的影响.

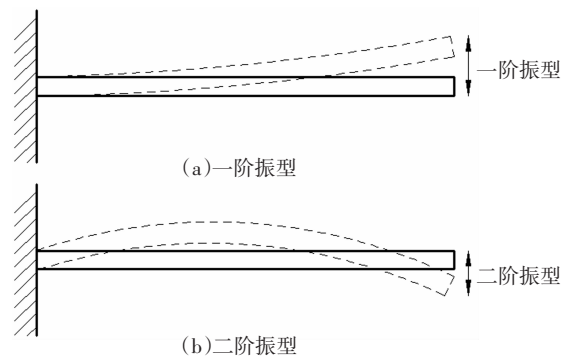


图 11 模态振型图
Fig.11 Modal vibration modes

3 结论

- 1)麻纤维复合材料的拉伸弹性模量和强度随麻纤维含量的增大而增大,断裂伸长率随纤维含量的增大而减小.
- 2)麻纤维复合材料的固有频率随麻纤维含量的增大而增大,提高纤维含量可以有效地提高复合

材料的固有频率。

3)纤维质量分数为10%的复合材料阻尼性能比聚丙烯提高了20.8%,纤维质量分数大于10%时,随纤维含量增大复合材料的阻尼性能下降,在实际工程应用时可据此设计出具有良好阻尼性能的麻纤维复合材料。

4)麻纤维复合材料悬臂梁的二阶阻尼比均高于一阶阻尼比,其阻尼比需要考虑悬臂梁的结构响应,麻纤维复合材料的阻尼性能受其振动幅值的影响。

参考文献

- [1] 鲁博,张林文,曾竟成,等.天然纤维复合材料[M].北京:化学工业出版社,2005:34—50.
LU B,ZHANG L W,ZENG J C,*et al.* Natural fiber reinforced composites [M]. Beijing: Chemical Industry Press,2005:34—50. (In Chinese)
- [2] 李伟,黄虹云,吴永庆.VARTM制备麻纤维增强环氧树脂复合材料研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(12):15—20.
LI W,HUANG H Y,WU Y Q. Preparation of jute fibers reinforced epoxy resin composites by VARTM [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2015,42(12):15—20.(In Chinese)
- [3] KRISHNA K V,KANNY K.The effect of treatment on kenaf fiber using green approach and their reinforced epoxy composites [J]. Composite Part B,2016,104(11):111—117.
- [4] SABA N,PARIDAH M T,JAWAID M. Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite:A review[J].Construction and Building Materials,2015,76(4):87—96.
- [5] 李岩,罗叶.天然纤维增强复合材料力学性能及其应用[J].固体力学学报,2010,31(6):613—630.
LI Y,LUO Y. Mechanical properties and application of natural fiber reinforced composites [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics,2010,31(6):613—630.(In Chinese)
- [6] MARQUES M A,MELO R,ARAÚJO R,*et al.* Improvement of mechanical properties of natural fiber-polypropylene composites using successive alkaline treatments[J].Journal of Applied Polymer Science,2015,132(12):41710—41722.
- [7] DUC F,BOURBAN P E,PLUMMER C,*et al.* Damping of thermoset and thermoplastic flax fiber composites [J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing,2014,64(11):115—123.
- [8] 王欢,李嘉禄,樊威.纤维体积分数对三维编织复合材料T型梁模态性能的影响[J].材料工程,2015,43(9):80—86.
WANG H,LI J L,FAN W. Effect of fiber volume fraction on modal properties of three-dimension braided composite T-beams [J]. Journal of Materials Engineering,2015,43(9):80—86.(In Chinese)
- [9] KUMAR K S,SIVA I,JEYARA P,*et al.* Synergy of fiber length and content on free vibration and damping behavior of natural fiber reinforced polyester composite beams [J]. Materials and Design,2014,56(7):379—386.
- [10] ETAATI A,PATHER S,FANG Z P,*et al.* The study of fiber/matrix bond strength in short hemp polypropylene composites from dynamic mechanical analysis [J]. Composites Part B:Engineering,2014,62(2):19—28.
- [11] TREVISIO A,VAN GENECHTEN B,MUNDO D,*et al.* Damping in composite materials:Properties and models[J]. Composites Part B:Engineering,2015,78(12):144—152.
- [12] ORNAGHI H L,POLETTI M,ORNAGHI F,*et al.* Dynamic mechanical properties and the dynamic fragility concept applied to vegetal fiber on vegetal composite materials [J]. Journal of Composite Materials,2016,50(18):2469—2475.
- [13] 李德葆,陆秋海.实验模态分析及其应用[M].北京:科学出版社,2001:61—87.
LI D B,LU Q H. Experimental modal analysis and its application [M].Beijing:Science Press,2001:61—87.(In Chinese)
- [14] EL-SHEKEIL Y A,SAPUAN S M,JAWAID M,*et al.* Influence of fiber content on mechanical morphological and thermal properties of kenaf fiber reinforced poly (vinyl chloride)/thermoplastic polyurethane poly-blend composites[J]. Material and Design,2014,58(9):130—135.
- [15] ETAATI A,MEHDIZADEH S A,WANG H,*et al.* Vibration damping characteristics of short hemp fiber thermoplastic composites [J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites,2014,33(4):330—341.
- [16] ZHOU X O,JANG S,YAN X,*et al.* Damping acoustic properties of reclaimed rubber/seven-hole hollow polyester fibers composite materials [J]. Journal of Composite Materials,2014,48(12):3719—3726.
- [17] KHAN S U,LI C Y,SIDDIQUI N A,*et al.* Vibration damping characteristics of carbon fiber-reinforced composites containing multi-wall carbon nanotubes [J]. Composites Science and Technology,2011,71(12):1486—1494.