复合材料阻尼特性研究现状与进展

孙　成，宋春生*，刘星宇，黄昱翔

（武汉理工大学机电工程学院，武汉　430070）

摘要：本综述旨在收集有关复合材料阻尼的现有文献。综合回顾实验与数值计算方面的研究工作，围绕复合材料阻尼特性问题，主要从实验表征、影响阻尼特性的参数、阻尼特性的数学模型和数值模型等几个方面的研究成果进行了较为详细的评述和讨论。虽然目前为止，纤维增强复合材料还没有被广泛开发，但它有潜力通过改变组分、几何结构和边界条件来调整阻尼。最后，基于复合材料阻尼特性研究的发展趋势和进一步研究可能面临的突出问题，对复合材料阻尼特性的发展方向进行了讨论与展望。

关键词：复合材料；阻尼特性；实验表征

中图分类号：TB332　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1003-0999(2019)06-0115-07

在过去的几十年里，纤维增强复合材料在航空航天、国防工业、汽车制造以及其他工程领域的使用不断增加，已经成为传统材料的可行替代品。自其首次出现和应用以来，大多数研究人员都专注于复合材料的静态特征化和非均匀性的建模，发表了关于该主题的大量文献。但是，将复合材料用于结构部件不仅需要考虑其静态特性，还需要综合考虑动态特性的影响。利用静态刚度准则可以预测固有频率，然而阻尼特性难以评估，难以设计和分析结构部件。纤维增强复合材料本身的阻尼性能要比传统金属材料高出 1 至 2 个数量级，使它在减振降噪方面发挥着重要作用。纤维增强复合材料最大的特点就是具有各向异性和非线性，这也导致阻尼特性分析的难度大大增加。从发现复合材料阻尼特性到今天的一个多世纪里，由于工程实际的需要，国内外研究者不断深入对复合材料阻尼特性的研究。本文主要回顾了复合材料阻尼的研究历程，介绍了复合材料阻尼特性的研究现状，并展望其发展趋势。

1　实验表征

在复合材料阻尼研究中，无论是为了进行验证还是为了探究材料特性，实验测量都是必不可少的。然而，复合材料因为其低质量和高刚度的特点，需要选取适当的实验方法来测量其阻尼特性。例如，蠕变或松弛试验可用于确定线性粘弹性模型的阻尼，但通常比较耗时，且需要严格的温度和载荷控制。最早，研究者在测量复合材料阻尼时，关注的外在条件是传统加速度传感器的质量效应和支撑、夹紧条件。Sola 等[1]由于夹紧条件和加速度传感器质量不完善，未能验证其模型；Talbot 等[2]也未将传感器的质量和边界条件考虑到模型中，使得预测值和实验值之间存在显著差异。Maheri[3]在方形板上研究了不同约束条件对模态阻尼的影响，并指出约束作用与阻尼的方式与刚度分布的变化有关。研究人员还发现，非对称的约束条件可能引起正应力和横向应力分量之间的振动耦合。Hwang 等[4,5]研究了耦合效应对阻尼的影响，从应变能的角度量化了耦合对阻尼的贡献，并找到了使阻尼效果最好的最佳铺层角。

Berthelot 等[6]首次指出，正交各向异性层压板的阻尼特性可以通过由沿材料方向和其定义的平面上的三个阻尼系数表征，并分析复合材料梁的振动和改变梁的长度得到损耗因子，通过频率相关的特性，进而确定这些系数。1972 年，Wright[7]将玻璃和碳纤维复合材料梁悬挂在其基本模式节点上，再现了自由状态，对梁进行阻尼试验。复合材料梁受正弦力的激发，采用光学非接触探针测量位移，记录梁的振荡衰减来测量阻尼。Adams 等[8]强调了使用自由振动条件时，需要避免外部阻尼干扰的重要性；此外，为了排除阻尼对振幅依赖的影响，在碳纤维复合材料梁的中点安装了一个线圈，以电磁方式激发碳纤维复合材料梁，使梁处于稳态条件；并测量了试件

收稿日期：2019-03-22

基金项目：国家自然科学基金（U1537103）；中央高校基本科研业务费专项资金资助（WUT：2018Ⅲ072GX）

作者简介：孙成（1994-），男，硕士，主要从事碳纤维复合材料方面的研究。

通讯作者：宋春生（1981-），男，博导，教授，主要从事隔振、碳纤维复合材料方面的研究，song_chsh@163.com。

的振型振幅,获得了存储的能量,计算了比阻尼容量(SDC)。由于线圈和试件之间的相对质量差较低,因此必须考虑质量效应的影响。随后,在另一篇论文里,Adams 等[9]讨论了空气阻尼的问题,对低阻尼材料(如碳纤维增强复合材料)进行真空实验。他们指出,空气阻尼可以成为梁位移的相关耗散源,还提出了预测值和测量值之间可能存在差异的来源。Guild 等[10]在 Adams 使用的仪器中发现,由于复合材料梁上线圈的夹紧压力可能导致裂纹,从而增加了阻尼能力,为了排除夹紧力对阻尼能力测量的影响,将线圈夹改得更硬,随后依据 Adams 等的方法,计算了 SDC,发现两种方法有相似趋势,但由于边界条件的不同,以及质量效应的不同,得到了不同的数值。Lin 等[11]分别测试了玻璃纤维和碳纤维板的阻尼性能,为了限制边界条件对阻尼的影响,将软橡胶泡沫支撑放置于板节点的预期位置,采用锤击法估测板的比阻尼容量,用非接触式传感器记录响应。Suarez 等[12]描述了用半功率带宽法测量粘性阻尼比的脉冲技术。该技术依靠电磁锤来确保更高的精确性,适用于现场试验,尤其是用于健康监测,它是对裂纹和分层处额外摩擦消散引起的损伤最敏感的参数之一。Crane 等[13]发明了一种类似的脉冲技术装置,强调了避免使用标准加速度计来减少来自不可忽略的加速计的质量、试件质量和电缆质量对阻尼的影响。夹紧系统通过导轨来增强,以避免偏心加载和可能不受控制的振动耦合。Maheri 等[14]使用了几种接触式和非接触式装置进行激励和传感,利用激光传感器来测量复合材料板的阻尼性能,通过比较得出结论:激光传感器提供了最精确的位移测量。Kyriazoglou 等[15]在混合仿真方法框架中提出了振动阻尼的概念。在振动阻尼梁中,梁在其基本模式下自由弯曲振动,实验在真空中进行,振动由两端连接的磁铁驱动,激励为正弦信号,用激光测振仪测量位移。根据位移的结果计算出比阻尼容量。上述所有方法均基于振动试验,但是根据 Stevenson[16]的说法,振动试验的结果不能用来区分材料阻尼和结构阻尼。

2 阻尼性能

与传统金属材料相比,复合材料具有更高的阻尼能力,主要是由聚合物基体的粘弹性贡献的。在刚度和强度方面,适当选择复合材料的本构参数,如纤维长径比、堆积顺序和组分性能,也可以调整材料的阻尼。然而,在研究复合材料结构时,大多数只考虑结构的尺寸、铺层角度等参数对结构阻尼性能的影响,没有同时考虑这些因素对力学性能的影响,会造成结构刚度和强度的损失。复合材料结构的强度和阻尼优化问题超出了本综述的范围,本文仅限于描述结构参数对复合材料耗散性能的影响。在过往的研究中,研究人员不仅仅对单一的复合材料阻尼性能进行了研究,对混合复合材料、夹层结构同样也展开了研究工作。夹层结构正成为许多领域减轻重量的替代解决方案。

2.1 短纤维和长纤维增强复合材料

2.1.1 组成材料

纤维增强复合材料阻尼性能的一个主要来源是树脂基体的粘弹性。通过增加基体的体积分数,阻尼将以牺牲刚度和强度为代价而提高。Ni 等[17]通过研究给出了碳纤维复合材料和玻璃纤维增强复合材料阻尼的趋势:随着基体体积分数(V_f)的增加,阻尼呈抛物线的形状增加,当 $V_f = 0.6$ 时达到恒定值。Hadi 等[18]证实了这一趋势。在热固性塑料中,Crane 等[13]发现环氧树脂具有更好的耗散特性,阻尼值的增加是由激励与基体的相互作用和整体阻尼特性引起的。Maheri 等[19]通过在复合材料板上的实验得出结论,当弯曲轴平行于纤维轴时,阻尼增加,基体与纤维之间的相互作用在载荷传递中起着至关重要的作用。为了确保不出现脱胶现象,纤维之间应该使用有助于阻尼的粘合剂进行处理。Nelson 等[20]通过研究短纤维复合材料发现,纤维与基体之间的粘合程度越差,滞后现象越明显。这与 Doebling[21]在存在损伤(如脱粘和分层)时对阻尼增加所得出的结论一致。康逢辉等[22]通过数值方法研究了复合材料基座胶接连接处的铺层厚度、杨氏模量对基座整体减振性能的影响,研究表明增加铺层厚度和减小杨氏模量都可以增加基座整体结构的阻尼,提高基座的减振性能。Vazquez 等[23]用单环氧树脂和双环氧树脂分别涂覆玻璃纤维,并根据涂层处理研究阻尼,得出增加涂层厚度可导致传递负载减少,阻尼也相应减小的结论。Finegan 等[24]考虑了 PVC 涂层铜纤维,并记录了随着 PVC 体积分数的增加,损耗因子增加,但牺牲了材料的刚度特性。Hwang 等[25]将界面相视为生产过程的结果,并将其用于短纤维和长纤维复合材料的微观力学建模。在比较不同纤

维材料时,Berthelot 等[26]发现,与玻璃纤维和碳纤维相比,Kevlar 纤维具有最高的阻尼性能;Crane 等[13]对玻璃纤维和碳纤维的阻尼性能进行了比较,发现玻璃纤维具有更好的阻尼性能。

2.1.2　方向和堆叠顺序

目前,研究人员对复合材料结构部件研究最多的方面是材料的铺层方向和叠层顺序,因为这两个因素是定义整体复合材料特性的基础。研究者在该领域的研究旨在找出确保最大阻尼时的铺层角和其在叠层中的位置。尽管最佳铺层角的数据不总是一致的,但研究者都力求寻找最大化剪切应力分量的结构。Adams 等[27]进行了里程碑式的研究,他们对单向铺层、角铺层、交叉铺层和一般铺层的情况进行了测试和建模。对于单向样品试件,在弯曲角度为 35°左右和扭转角度为 45°左右时,发现阻尼具有最大值。对于角铺层,当弯曲角和扭转角为 40°~50°时,阻尼出现了峰值;对于交叉铺层,最重要的因素是定义 0°和 90°铺层相对数量的交叉铺层比。Adams 等[28]和 Mahi 等[29]在随后的论文中证实了这些趋势。Wray 等[30]对短玻璃纤维增强塑料进行了类似的分析,找到了不同体积分数下的最佳铺层角度。Yim[31]提供了损耗因子随纤维取向的变化规律,并将 Ni 和 Adams 的理论结果与考虑泊松比相关损耗因子的模型进行了比较。他指出一旦找到了最佳铺层角度,就开始分析堆叠顺序。研究者大都认同将对剪切最敏感的层放置在层压板内最大剪切位置。此外,研究者还发现叠层顺序会影响层间应力的大小,这是因为由于不同方向层间界面的刚度失配,会产生面内和面外剪切应力。Maheri[3]在随后的一篇文献中对叠层效应进行了广泛的研究,他将重点放在方形对称板上,以分别排除长宽比和耦合效应带来的影响。他指出,对于纤维方向分布相对均匀而刚度没有急剧变化的层压板,阻尼也相对均匀地分布。

2.1.3　几何特性

复合材料的性能也取决于增强纤维的几何特性。短纤维增强复合材料的阻尼特性受纤维长度和形状的影响尤为突出。Gibson 等[32]发现长宽比决定了沿纤维的横向剪切应力分布,材料获得最大阻尼时的最佳纤维纵横比低于最大刚度时的纵横比。Sun 等[33]、Suarez 等[34]和 Subramanian 等[35]发现了类似的趋势,他们在纤维端部发现了由于端部结合强度弱和高应力集中而导致的最大能量耗散区。Tsai 等[36]针对纤维填充进行了研究,他们比较了方形、方形对角线和六边形填充结构,得出方形对角线填充结构在自由状态和悬臂结构中提供了最佳阻尼的结论。Chandra 等[37]回顾了采用不同的建模方法来评估纤维几何结构对阻尼特性的影响。Yim 等[38]根据梁长宽比,Crane 等[13]根据厚度分别研究了构件的几何结构对阻尼特性的影响。

2.1.4　温度和频率效应

温度和频率的改变同样也会影响复合材料的阻尼性能。为了获得玻璃化转变温度范围,Sefrani 等[39]分析了碳纤维复合材料的树脂混合物,在这个温度范围内,碳纤维复合材料的阻尼通常有一个峰值。研究表明,随着温度的升高,基体被软化,阻尼损耗因子增加,材料的阻尼性能得到提升,但刚度会有所损失。纤维增强复合材料的阻尼性能是否受频率的影响还存在争议。Hadi 等[18]发现,对于不同的铺层角和体积分数,阻尼能力在 0~1000 Hz 范围内与频率无关。

2.2　夹层型复合材料

夹层结构是通过在两层薄而坚硬的表皮之间铺上一层厚而轻的材料而获得的。常见的有使用经典的层压板或金属箔作为外皮,使用蜂窝或软聚合物作为核心。出于获得阻尼的目的,芯部最好使用柔软的粘弹性材料,而金属和层压板都可以用于蒙皮。粘弹性层在提高结构损耗因子中的作用已被许多学者所证实。Ungar、Kerwin、Mead 等是最早关注夹层结构阻尼振动问题的研究者。Mead 等[40]发现模态阻尼仅在虚部改变符号的特定频率下才是实数模态。这意味着通过改变边界条件就可以改变损耗因子与频率曲线。事实上在现在的阻尼特性的实验评估中,边界条件通常被认为是一个敏感参数,研究人员会着重考虑它们的影响。Berthelot 等[41]推导了具有粘弹性层试件的阻尼表达式,并给出了实验结果。实验结果表明,粘弹性层厚度的增加和试件长度的减小都会导致损耗因子增大,从而提高结构的阻尼性能。然而,粘弹性层的存在会导致结构的刚度和强度降低。Chung[42]提出在粘弹性层和复合材料层之间添加碳微丝,在保证结构满足刚度、强度的前提下,最大限度地提高了结构的阻尼性能。Gibson 等[43]通过研究发现损耗因子随芯层厚度的变化是线性的,与表皮材料无关。Ganapathi 等[44]在对复合材料梁结构阻尼性能进行研究时,发现了梁长宽比和芯

层厚度对阻尼的影响。在第一种情况下,存在损耗因子最大的长宽比;在第二种情况下,芯层厚度的增加会导致阻尼增加。但是由于阻尼和梁本身质量的原因,在梁的整个表面引入粘弹性层来增加其阻尼性能可能不是最优的选择。Fotsing 等[45]研究了具有层压板蒙皮和交错粘弹性层的蜂窝梁结构的阻尼性能。粘弹性层分布在梁的整个表面上,或者使用不同尺寸的贴片施加在梁的不同位置上。实验结果表明,贴片对振动的阻尼作用更为有效,最佳位置在梁节点附近,即最大剪应变点。

在复合材料的现实生产制备中,交错铺设粘弹性层的工艺很难实现,往往采用共固化技术。但是由于层压板基体和粘弹性层的热性能不同,制备的可行性仍然是一个待解决的问题。Biggerstaff[46]通过研究指出,在复合材料的共固化过程中,可能存在基体与阻尼层相互渗透的情况,导致阻尼性能降低。

3 阻尼模型

3.1 线性粘弹性模型

现在研究人员大都认同复合材料阻尼模型来源于粘弹性材料模型,因为复合材料的大部分耗散能来自树脂基体。使用线性粘弹性模型来表示材料的阻尼是一种最简单的方法,如 Kelvin-Voigt 模型、Maxwell 模型、Zener 模型。这类模型的主要优点是描述材料粘弹性行为所需的参数数量少,易于估计,并且在商用有限元软件中可用。然而,它们并不能代表能量耗散机制的物理基础。比如 Zener 模型是基于热弹性考虑的,当振动周期小于松弛时间时,不会发生热流,这种模型就不再适用了。

3.2 复模量和损耗因子

复模量法是指材料刚度由复数表示,实部(存储模量)表示弹性行为,虚部(损耗模量)表示耗散行为,实部与虚部的比值为材料的损耗因子。损耗因子最常用于滞回阻尼,它与材料循环加载获得的滞回振幅有关。如果激励状态低于比例极限,即应力疏导曲线的线性区域,滞后回路近似于椭圆;当超过比例区域时,环偏离椭圆形状。最早的模量表示阻尼的有效性研究可以追溯到 1962 年,Newmark[47]回顾了在强迫和自由振动情况下复杂刚度的表示方法。Hashin[48]基于弹性-粘弹性对应原理,研究了非均匀粘弹性材料的复数模量,讨论了材料的组成成分、树脂-纤维的相互作用及几何参数对纤维增强复合材料阻尼性能的影响。Crandall[49]讨论了复杂刚度的准确性和物理意义,讨论了选用恒定损耗因子时出现的非因果性问题。他指出,具有频率无关损耗因子的系统在施加脉冲前,其脉冲响应不会消失。Crane 等[50]使用复弹性模量法并结合经典层合理论,研究了复合材料的阻尼特性,同时还指出,损耗因子也受频率的影响。Barkanov 等[51]将频率纳入影响阻尼性能的因素,利用复模量法,预测了复合材料梁的阻尼性能,通过和实验结果的对比验证了该方法的准确性。

3.3 应变能法

Ungar 等[52]最早定义了确定复合材料中损耗因子的关系式,其中对损耗因子的贡献根据构成材料中存储的能量进行划分。之后 Adams 等[27]假设耗散的能量可以分解,并与主应力分量有关。根据沿每个主方向的耗散能与存储能之比,定义了比阻尼容量(SDC)。而 Ni 等[53]考虑了施加弯矩的情况。尽管比阻尼容量的表达式可以编写成一个通用的形式,但在这两种情况下,SDC 的最终表达式会有所差别,且仅计算了平面内的应力分量。Saravanos 等[54]给出了复合材料梁的轴上和轴外在施加载荷条件下所有六个应力分量的 SDC 表达式。Kaliske 等[55]将比阻尼容量(SDC)与 Aboudi[56]最初提出的单元法结合使用,以便根据比阻尼容量找到阻尼矩阵。他们基于应变能考虑,对于每个主应力分量计算 SDC 值。Johnson 等[57]首先提出了模态应变能法(MSE),从无阻尼结构的应变能开始计算模态损耗因子。Hwang 等[58]基于模态应变能法,不仅考虑了纤维方向角和长宽比对层合板阻尼性能的影响,而且考虑了层间应力的影响,建立了复合材料层合板的三维有限元模型,通过与试验结果对比,验证了该模型的有效性。高影[59]通过基于模态分析实验法和应变能的有限元法对单向碳纤维复合材料进行阻尼模拟,在有限元计算中分别考虑了铺层角度、材料尺寸等因素对阻尼损耗因子的影响。梁森等[60]运用 ANASY 有限元分析软件,基于模态应变能法对含有粘弹性层纤维复合材料夹层结构的模态阻尼特性进行了分析,并研究了模态参数随阻尼层厚度的变化关系。Santosa 等[61]提出了一种复合材料各向异性耗散行为均匀化损耗因子的方法,该方法考虑了粘弹性性质的时间依赖性。

4 结　论

本文综述了目前有关复合材料阻尼特性的文献,在研究阻尼特性时有几种阻尼模型可用,但选择正确的模型需要进一步的考虑:

(1)线性粘弹性模型、复模量、应变能方法易于处理实验数据,输入已有的参数可以很容易地从振动测试和拉伸实验中得出结果,然而它们只提供了对材料阻尼的估计,无法代表结构阻尼结果;

(2)选择容易定义参数且可以通过实验检验其有效性的模型是一个事半功倍的方法,例如需要对复合材料阻尼进行数值分析,那么应该优先考虑那些易于在有限元仿真软件中运行的模型。

此外,复合材料动态性能的实验表征还远未被标准化。除了材料本身具有复杂的阻尼机理外,传统实验方法也会引入不可忽略的阻尼源,如夹具处的摩擦、空气阻尼、测量装置的质量效应等都是阻尼测试实验中不可忽略的因素。近几年来,研究人员发现采用声学和光学方法的非接触探头可以提高结果的可靠性。

国内外学者对复合材料层合板的阻尼性能进行了很多研究,利用悬臂梁法、有限元分析法等可以得到整块板的阻尼特性,但是对于采用机械连接的层合板或是胶接连接的层合板的阻尼性能的研究还未见到报道。在实际工程应用和大型结构设计中,零部件之间的连接必然存在,因此研究采用胶接连接的结构件的阻尼特性,对于整体结构的减振降噪有着十分重要的现实意义,这一课题也亟待开展。

如何通过结构设计和纤维铺设情况实现结构力学性能和阻尼性能的同步提高,如何建立不同边界条件下和不同测试表征方法获得的材料阻尼的参数关系,如何将外界实验条件考虑进材料阻尼的预测中等都是今后复合材料阻尼性能研究所面临的挑战。

为了更好地理解能量耗散机制背后的物理意义,需要对上述主题进行进一步的研究。这只能通过实验来解决。因此,需要改进现有技术或寻找新方法来克服当前的缺点。最后,应将物理观测的现象转化为数学术语,以提高预测阻尼模型的能力。

参考文献

[1] Sola M, Jette M. Analytical and experimental study of embedded damping elements in composite[C]//16th International Congress on Sound and Vibration. Krakow: 2009.

[2] Talbot J P, Woodhouse J. The vibration damping of laminated plates [J]. Composites Part A (Applied Science and Manufacturing), 1997, 28(12): 0-1012.

[3] Maheri M R. The effect of layup and boundary conditions on the modal damping of FRP composite panels[J]. Journal of Composite Materials, 2011, 45(13): 1411-1422.

[4] Hwang S J, Gibson R F. The use of strain energy-based finite element techniques in the analysis of various aspects of damping of composite materials and structures[J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26(26): 2585-2605.

[5] Hwang S J, Gibson R F, Singh J. Decomposition of coupling effects on damping of laminated composites under flexural vibration[J]. Composites Science and Technology, 1992, 43(2): 159-169.

[6] Berthelot J M, Assarar M, Sefrani Y, et al. Damping analysis of composite materials and structures[J]. Composite Structures, 2008, 85(3): 189-204.

[7] Wright G C. The dynamic properties of glass and carbon fibrereinforced plastic beams[J]. Journal of Sound and Vibration, 1972, 21(2): 205-212.

[8] Adams R D, Bacon D G C. Measurement of the flexural damping capacity and dynamic Young's modulus of metals and reinforced plastics [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1973, 6(1): 27-41.

[9] Adams R D, Bacon D G C. The dynamic properties of unidirectional fibre reinforced composites in flexure and torsion[J]. Journal of Composite Materials, 1973, 7(1): 53-67.

[10] Guild F J, Adams R D. A new technique for the measurement of the specific damping capacity of beams in flexure[J]. Journal of Physics E Scientific Instruments, 1981, 14(3): 355-355.

[11] Lin D X, Ni R G, Adams R D. Prediction and measurement of the vibrational damping parameters of carbon and glass fibre-reinforced plastics plates[J]. Journal of Composite Materials, 1984, 18(2): 132-152.

[12] Suarez S A, Gibson R F, Deobald L R. Random and impulse techniques for measurement of damping in composite materials[J]. Experimental Techniques, 2010, 8(10): 19-24.

[13] Crane R M, Gillespie J W. Characterization of the vibration damping loss factor of glass and graphite fiber composites[J]. Composites Science and Technology, 1991, 40(4): 355-375.

[14] Maheri M R, Adams R D. Finite-element prediction of modal response of damped layered composite panels[J]. Composites Science and Technology, 1995, 55(1): 13-23.

[15] Kyriazoglou C, Guild F J. Finite element prediction of damping of composite GFRP and CFRP laminates-a hybrid formulation- vibration damping experiments and Rayleigh damping[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(3-4): 487-498.

[16] Stevenson J D. Structural damping values as a function of dynamic response stress and deformation levels[J]. Nuclear Engineering and Design, 1980, 60(2): 211-237.

[17] Ni R G, Adams R D. A rational method for obtaining the dynamic mechanical properties of laminae for predicting the stiffness and damping of laminated plates and beams[J]. Composites, 1984, 15(3): 193-199.

[18] HadiA S, Ashton J N. Measurement and theoretical modelling of the damping properties of a uni-directional glass/epoxy composite[J]. Composite Structures, 1996, 34(4): 381-385.

[19] Maheri M R, Adams R D. Modal vibration damping of anisotropic frp laminates using the rayleigh-ritz energy minimization scheme [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 259(1): 17-29.

[20] Nelson D J, Hancock J W. Interfacial slip and damping in fibre reinforced composites[J]. Journal of Materials Science, 1978, 13 (11): 2429-2440.

[21] Doebling S W. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: aliterature review[J]. Los Alamos National Laboratory Report LA-13070-MS, 1996, 30(11): 2043-2049.

[22] 康逢辉, 吴医博, 杨瑞瑞. 连接接头对复合材料基座减振性能影响研究[J]. 材料开发与应用, 2013, 28(5): 59-63.

[23] Vazquez A, Ambrustolo M, Moschiar S M, et al. Interphase modification in unidirectional glass-fiber epoxy composites[J]. Composites Science and Technology, 1998, 58(3-4): 549-558.

[24] Finegan I C, Gibson R F. Analytical modeling of damping at micromechanical level in polymer composites reinforced with coated fibers [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(7): 1077-1084.

[25] Hwang S J, Gibson R F. Prediction of fiber-matrix interphase effects on damping of composites using a micromechanical strain energy/finite element approach [J]. Composites Engineering, 1993, 3(10): 975-984.

[26] Berthelot J M, Sefrani Y. Damping analysis of unidirectional glass and Kevlar fibre composites[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(9): 1261-1278.

[27] Adams R D, Bacon D G C. Effect of fibre orientation and laminate geometry on the dynamic properties of CFRP[J]. Journal of Composite Materials, 1973, 7(4): 402-428.

[28] Adams R D, Maheri M R. Dynamic flexural properties of anisotropic fibrous composite beams[J]. Composites Science and Technology, 1994, 50(4): 497-514.

[29] Mahi A E, Assarar M, Sefrani Y, et al. Damping analysis of orthotropic composite materials and laminates[J]. Composites Part B (Engineering), 2008, 39(7-8): 1069-1076.

[30] Wray S, Ashton J N, EI-Sobky H. An investigation of the influence of anisotropy and frequency on damping in short glass fibre reinforced polypropylene[J]. Composite Structures, 1990, 15(1): 43-60.

[31] Yim J H. A damping analysis of composite laminates using the closed form expression for the basic damping of Poisson's ratio[J]. Composite Structures, 1999, 46(4): 405-411.

[32] Gibson R F, Chaturvedi S K, Sun C T. Complex moduli of aligned discontinuous fibre-reinforced polymer composites[J]. Journal of Materials Science, 1982, 17(12): 3499-3509.

[33] Sun C T, Chaturvedi S K, Gibson R F. Internal damping of short-fiber reinforced polymer matrix composites[J]. Computers & Structures, 1985, 20(1-3): 391-400.

[34] Suarez S A, Gibson R F, Sun C T, et al. The influence of fiber length and fiber orientation on damping and stiffness of polymer composite materials[J]. Experimental Mechanics, 1986, 26(2): 175-184.

[35] Subramanian C, Deshpande S B, Senthilvelan S. Effect of reinforced fiber length on the damping performance of thermoplastic composites [J]. Advanced Composite Materials, 2011, 20(4): 319-335.

[36] Tsai J L, Chi Y K. Effect of fiber array on damping behaviors of fiber composites[J]. Composites Part B (Engineering), 2008, 39 (7-8): 1196-1204.

[37] Chandra R, Singh S P, Gupta K. Micromechanical damping models for fiber-reinforced composites: a comparative study[J]. Composites Part A (Applied Science and Manufacturing), 2002, 33(6): 0-796.

[38] YimJ H, Jr J W G. Damping characteristics of 0° and 90° AS4/3501-6 unidirectional laminates including the transverse shear effect [J]. Composite Structures, 2000, 50(3): 217-225.

[39] Sefrani Y, Berthelot J M. Temperature effect on the damping properties of unidirectional glass fibre composites[J]. Composites Part B (Engineering), 2006, 37(4-5): 346-355.

[40] Mead D J, Markus S. The forced vibration of a three-layer, damped sandwich beam with arbitrary boundary conditions[J]. Journal of Sound and Vibration, 1969, 12(1): 271-282.

[41] Berthelot J M, Sefrani Y. Damping analysis of unidirectional glass fiber composites with interleaved, viscoelasticlayers: experimental investigation and discussion[J]. Journal of Composite Materials, 2006, 40(21): 1911-1932.

[42] Chung D D L. Structural composite materials tailored for damping [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2003, 355(1-2): 0-223.

[43] Gibson R F, Chen Y, Zhao H. Improvement of vibration damping capacity and fracture toughness in composite laminates by the use of polymeric interleaves[J]. Journal of Engineering Materials & Technology, 2001, 123(3): 309-314.

[44] Ganapathi M, Patel B P, Boisse P, et al. Flexural loss factors of sandwich and laminated composite beams using linear and nonlinear dynamic analysis[J]. Composites Part B Engineering, 1999, 30 (3): 245-256.

[45] Fotsing E R, Sola M, Ross A, et al. Lightweight damping of composite sandwich beams: Experimental analysis[J]. Journal of Composite Materials, 2013, 47(12): 1501-1511.

[46] Biggerstaff J M. Vibrational damping of composite materials[J]. Pro Quest Dissertations and Theses, 2006, 67(1): 075-243.

[47] Newmark S. Concept of complex stiffness applied to problems of oscillations with viscous and hysteretic damping[J]. Archive of Applied Mechanics, 1979, 48(5): 301-311.

[48] Hashin Z. Complex moduli of viscoelastic composites-Ⅰ. General theory and application to particulate composites[J]. International Journal of Solids and Structures, 1970, 6(5): 539-552.

[49] Crandall S H. The role of damping in vibration theory[J]. Journal of Sound and Vibration, 1970, 11(1): 3-0.

[50] Crane R M, Jr J W G. Analytical model for prediction of the damp-

ing loss factor of composite materials[J]. Polymer Composites, 1992, 13(3): 179-190.

[51] Barkanov E, Gassan J. Frequency response analysis of laminated composite beams[J]. Mechanics of Composite Materials, 1995, 30(5): 484-492.

[52] Ungar, Eric E. Loss factors of viscoelastic systems in terms of energy concepts[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1962, 34(5): 741-741.

[53] Ni R G, Adams R D. The damping and dynamic moduli of symmetric laminated composite beams-theoretical and experimental results [J]. Journal of Composite Materials, 1984, 18(2): 104-121.

[54] Saravanos D A, Chamis C C. Unified micromechanics of damping for unidirectional and off-axis fiber composites[J]. Journal of Composite Technology Research, 1990, 12(1): 31-40.

[55] Kaliske M, Rothert H. Damping characterization of unidirectional fibre reinforced polymer composites[J]. Composites Engineering, 1995, 5(5): 551-567.

[56] Aboudi J. A continuum theory for fiber-reinforced elastic-viscoplastic composites[J]. International Journal of Engineering Science, 1982, 20(5): 605-621.

[57] Johnson C D, Kienholz D A. Finite element prediction of damping in structures with constrained viscoelastic layers[J]. AIAA Journal, 1982, 20(9): 1284-1290.

[58] Hwang S J, Gibson R F. The effects of three-dimensional states of stress on damping of laminated composites[J]. Composite Science and Technology, 1991, 41(4): 379-393.

[59] 高影. 纤维增强树脂基复合材料及其结构的阻尼性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[60] 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动力学性能[J]. 复合材料学报, 2015, 32(5): 1453-1460.

[61] Santosa F, Symes W W. A model for a composite with anisotropic dissipation by homogenization[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(4): 381-392.

PROGRESS AND PROSPECTS OF DAMPING PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS

SUN Cheng, SONG Chun-sheng*, LIU Xing-yu, HUANG Yu-xiang

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The present review aims at gathering the available literature on damping in composite materials. Further, damping properties of composite materials were reviewed and discussed in detail based on existing experimental and simulation efforts on such flows by experimental characterization, parameters affecting damping properties, mathematical and numerical model in view of damping properties. Although fibre reinforced composite materials have not been sufficiently developed so far, they have the potential to tailor damping by acting on constituents, geometry and boundary conditions. Finally, based on the development tendency of investigation into damping properties of composite materials and important problems potentially encountered in such a research, specific development directions were debated and prospected.

Key words: composite materials; damping properties; experimental characterization