纳米炭/环氧树脂复合材料黏弹阻尼性能

曾尤*, 王函

中国科学院金属研究所, 沈阳材料科学国家(联合)实验室, 沈阳 110016

* 联系人, E-mail: yzeng@imr.ac.cn

2014-06-06 收稿, 2014-09-22 接受

国家高技术研究发展计划(2012AA030303)、中国科学院“百人计划”和国家自然科学基金委创新研究群体项目(51221264)资助

摘要 碳纳米管和石墨烯作为近年来兴起的新型纳米炭材料, 以其独特的一维/二维结构形态和卓越的物理性能已引起人们广泛关注. 将纳米炭材料与环氧树脂进行复合制得纳米炭/环氧树脂复合材料, 可以赋予材料更为优异的力学、电学、热学等综合性能. 纳米炭材料的加入可以在复合材料内部引入更多的界面, 造成显著的能量耗散, 从而使得纳米复合材料在具有轻质高强特性的同时, 兼具优异的黏弹阻尼性能, 对于延长材料使用寿命、提高材料减震降噪性能等方面具有极为重要的意义. 本文主要论述了纳米炭/环氧树脂复合材料的黏弹阻尼性能以及近期的相关研究进展, 重点阐述碳纳米管、石墨烯及其复合材料的阻尼作用机理, 介绍了纳米复合材料黏弹阻尼性能的测试方法, 指出纳米炭/环氧树脂阻尼复合材料领域存在的主要问题, 并对其应用前景进行了展望.

关键词

碳纳米管
石墨烯
环氧树脂
复合材料
黏弹性
阻尼

黏弹阻尼性是指材料兼具黏性和弹性的性质, 在外加载荷作用下, 一部分能量被储存(表现为弹性), 而另一部分能量由于内部摩擦以热能形式耗散掉(表现为黏性). 这种能量的转换和耗散也称为材料的阻尼作用. 材料的阻尼特性在机械振动、高速冲击、周期载荷作用下显得尤为重要, 其可以将多余的能量释放掉、从而延长材料的使用寿命^[1,2]. 随着科技的发展, 风机叶片、高速飞行器壳体、螺旋桨叶片等制造领域对高性能黏弹阻尼复合材料有着日益迫切的需求.

以碳纳米管和石墨烯为代表的新型纳米炭材料^[3-5], 以其优异的力学性能(弹性模量高达 1 TPa)、高的电热传导特性、以及独特的一维/二维结构已引起人们的极大兴趣, 其在力学增强、微纳器件、电子存储、光催化、传感器等领域具有广阔的应用前景^[6,7]. 将纳米炭材料与环氧树脂进行复合制得纳米炭/环氧树脂复合材料, 在显著提高力学强度的同时, 赋予材料导电、导热和电磁屏蔽等功能特性^[8-10]. 值得指出

的是, 纳米炭材料具有独特的一维/二维形态及纳米尺度, 可以在复合材料内部引入更多的界面, 使其在变形过程中产生更多的能量耗散, 显著提升材料的黏弹阻尼性能, 近年来已引起科学界与工程界的广泛关注^[11-16]. 本文聚焦于碳纳米管和石墨烯及其复合材料的阻尼性能研究进展, 重点阐述碳纳米管、石墨烯及复合材料的阻尼机制与作用机理.

1 纳米炭材料的黏弹阻尼性能

1.1 碳纳米管的黏弹阻尼性能

碳纳米管在变形过程中相互之间发生挤压、滑移, 由于摩擦作用产生能量耗散, 从而表现为具有显著的黏弹阻尼性能. 碳纳米管的黏弹阻尼性能受到多种因素的影响, 如碳纳米管之间的范德华力^[17]、碳纳米管长度^[18]、碳纳米管固有振动频率^[19]等. Buldum^[20]采用分子动力学方法研究碳纳米管的界面滑移状况, 结果表明变形过程中碳纳米管之间的相对滑移会造

引用格式: 曾尤, 王函. 纳米炭/环氧树脂复合材料黏弹阻尼性能. 科学通报, 2014, 59: 3232-3239

Zeng Y, Wang H. Viscoelastic damping of nanocarbon/epoxy composites (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 3232-3239, doi: 10.1360/N972014-00574

成位移与力的相对滞后,从而产生能量耗散.此外,Xu 等人^[21]通过化学气相沉积法制备出网络状结构的碳纳米管材料并研究其动态黏弹性能,研究发现这种碳纳米管相比于硅橡胶而言,在很宽的温度范围内(-140~600℃)仍具有优异的黏弹性能(图 1(a)).从图 1(b)中可以看到碳纳米管在周期应变过程中相比于硅橡胶产生更多的能量耗散(较大的应力应变回滞曲线面积).碳纳米管这种优异的黏弹性能归因于碳纳米管之间的滑移、节点的搭接/断开(图 1(c)),从而导致更高的能量耗散.Eom 等人^[18]、Shan 等人^[22]和 Pathak 等人^[23]研究了碳纳米管泡沫的黏弹性能,发现变形过程中碳纳米管之间的摩擦作用可以产生较高的能量耗散;碳纳米管长度越短、单位体积数量越多,能量耗散就越高.Zhang^[24]、Hehr 等人^[25]和 Chun

等人^[26]将碳纳米管阵列作为前驱体纺织成碳纳米管绳,研究发现碳纳米管之间的扭曲、缠结和滑移可以显著提高碳纳米管绳的阻尼性能,且能量耗散与拉伸应变变量成正比.

1.2 石墨烯的黏弹阻尼性能

石墨烯具有独特的二维片层结构,由于其极高的径厚比,石墨烯通常表现出柔软形态(在微观结构上可观察到明显的褶皱和蜷曲),其在外力作用下易于产生形变,而且石墨烯之间的大面积接触和相对滑移变形能够产生能量耗散.Agarwal 研究组^[27]通过纳米动态机械分析的手段考察了石墨烯片层在低频作用下的黏弹阻尼性能(图 2(a)).图 2(b)显示,石墨烯片层相比于硅/二氧化硅、高定向热解石墨

图 1 (网络版彩色)碳纳米管的黏弹行为及作用机制^[21]

(a) 储能模量、损耗模量、损耗因子随温度变化曲线; (b) 应力应变回滞曲线; (c) 黏弹作用机制

图 2 (网络版彩色)石墨烯的黏弹行为^[27]

(a) 纳米动态机械分析测试示意图; (b) 石墨烯片层、硅/二氧化硅以及高定向热解石墨损耗因子对频率的依赖性

(HOPG)表现出更为优异的黏弹阻尼性能,且 10 层石墨烯比 5 层石墨烯具有更高的损耗因子,其归因于石墨烯层数对试样变形的约束效应,从而导致更高的能量耗散. Zhang 研究组^[28]采用动态热机械分析的方法研究了氧化石墨烯纸的黏弹性能,研究表明氧化石墨烯纸在较高的温度下具有更为优异的阻尼特性,归结于高温条件下石墨烯片层间更容易发生相对滑移,从而产生更高的能量耗散.

2 纳米炭/环氧树脂复合材料的黏弹阻尼性能

2.1 碳纳米管/环氧树脂复合材料的黏弹阻尼性能

针对碳纳米管对环氧树脂复合材料的力学增强,已开展了丰富系统的相关研究工作,涉及碳纳米管表面改性、碳纳米管的取向及排列、碳纳米管与树脂基体之间的相互作用等. 通常认为碳纳米管/聚合物复合材料的黏弹阻尼性能来源于以下 3 个方面(图 3)^[29]: (1) 聚合物基体的固有阻尼特性; (2) 碳纳米管与聚合物基体间界面滑移造成的摩擦损耗; (3) 碳纳

米管之间相对滑动引起的摩擦损耗. Buldum^[20]通过分子动力学方法研究了碳纳米管在拉伸状态下界面的黏-滑(stick-slip)运动机制,发现在外力作用下碳纳米管与基体间发生脱黏滑动,产生界面摩擦,进而造成能量耗散. Falvo 等人^[30]借助原子力显微镜研究外力作用下碳纳米管在石墨表面的运动行为,表明黏附滞后是造成界面间黏-滑运动和能量耗散的主要原因.

Koratkar 研究组^[31]测试了碳纳米管/环氧树脂复合材料在不同频率下的振动响应,发现其具有优异的阻尼特性,主要归因于碳纳米管间相互滑移、摩擦所导致的能量耗散. 他们进而测试了碳纳米管/环氧树脂复合材料在周期载荷作用下的黏弹响应行为^[32],结果发现碳纳米管的加入在保持复合材料刚性不变的情况下,可以显著提高其损耗模量(图 4(a), (b)),这是由于碳纳米管与聚合物基体间发生界面滑移、碳纳米管之间相互摩擦,进而产生更多的能量耗散^[33]. Alva 和 Raja^[34]考察了碳纳米管长径比对复合材料阻尼性能的影响,研究表明添加高长径比的碳纳米管可获得更好的阻尼性能.

图 3 碳纳米管/聚合物复合材料组元间的摩擦作用示意图^[29]

图 4 (网络版彩色)碳纳米管/环氧树脂复合材料的(a)弹性模量和(b)损耗模量对频率的响应性^[32]

为进一步提高纳米复合材料的力学性能,碳纳米管与碳纤维进行混杂增强复合材料也引起广泛的关注.研究表明,混杂复合材料的强度和阻尼性能显著依赖于纤维的含量、类型、分布以及排列方式等. Zeng 等人^[35]制备了定向碳纳米管阵列/碳纤维/环氧树脂叠层复合材料,并考察其动态黏弹性能(图 5).研究表明,定向碳纳米管阵列不仅可以增加复合材料的储能模量,而且显著提高损耗模量与损耗因子.与此同时,这种叠层复合材料相比于碳纤维复合材料具有更低的纤维含量和密度,表现为更高的比刚度.这是由于定向碳纳米管阵列不仅有助于提高复合材料的层间剪切强度,而且在复合材料内部引入了更多的界面,加之其与碳纤维的协同增强作用,复合材料表现为更高的弯曲模量和优异的阻尼性能.

Kim 研究组^[36]采用悬臂梁法考察了碳纳米管/碳纤维/环氧树脂混杂复合材料的振动阻尼特性(图6).通过半功率带宽法对复合材料的时域波形曲线(图6(c), (d))进行拟合计算,得到复合材料的阻尼比.图6(e)结果显示,随着碳纳米管含量的增加,复合材料的阻尼比均有所增加,表明碳纳米管的加入可显著提高复合材料的振动阻尼性能.

2.2 石墨烯/环氧树脂复合材料的黏弹阻尼性能

石墨烯/环氧树脂复合材料的黏弹阻尼性能的研究目前鲜有报道. Koratkar 研究组^[37]研究发现石墨烯的加入可以有效提高复合材料的储能模量,但并未显著改善其损耗模量和阻尼性能(图 7),这主要归因于石墨烯与环氧树脂具有较强的相互作用.研究表明,石墨烯/环氧树脂复合材料的黏弹性强烈依赖于石墨烯在聚合物基体中的分散性、石墨烯与聚合物基体的相容性、以及两者的界面结合情况.因此,如何进一步通过界面设计、化学改性等方法,制备具有优异黏弹阻尼特性的石墨烯/环氧树脂复合材料仍需开展深入的研究.

3 纳米复合材料黏弹阻尼性能表征及测试方法

通过测试试样在不同频率和温度下对外界载荷的响应,可有效评价材料的黏弹阻尼性能.

基于测试过程中试样的不同振动模式,通常分为 2 种测试方法: (1) 强迫非共振法(正弦激励法),最常用的是动态热机械分析法; (2) 弯曲共振曲线法

图 5 (网络版彩色)碳纳米管/碳纤维/环氧树脂叠层复合材料的黏弹阻尼性能^[35]

(a) 储能模量; (b) 三点弯曲模式下材料变形机制; (c) 复合材料的损耗模量; (d) 损耗因子

图 6 (网络版彩色)碳纳米管/碳纤维/环氧树脂复合材料的阻尼性能^[36]

(a) 悬臂梁法测试装置示意图; (b) 纯环氧树脂; (c) 碳纳米管含量为 0.5%; (d) 1.0% (质量百分比) 复合材料的振动时域波形曲线; (e) 复合材料阻尼比随频率的变化曲线

图 7 (网络版彩色)石墨烯/环氧树脂复合材料的黏弹性能^[37]

纯环氧树脂的黏弹性(a); 石墨烯/环氧树脂复合材料的损耗因子(b); 储能模量(c)和损耗模量(d)

(也称悬臂梁法)。

3.1 动态热机械分析法

动态热机械分析(dynamic mechanical analysis,

DMA)是通过考察材料在交变应力(或交变应变)作用下的响应,进而分析材料所兼具的黏性与弹性性能^[38,39]。DMA 测试可以获得材料储能模量、损耗模量、损耗因子等相关信息。其中,储能模量反映了材

料形变过程中由于弹性变形而储存的能量(材料的弹性性质), 损耗模量反映了材料形变过程中热损耗的能量(黏性性质). 材料的损耗因子($\tan\delta$)又称为阻尼因子, 为损耗模量与储能模量的比值, 是材料阻尼能力的度量. 损耗因子越大、温度范围越宽, 表明材料的阻尼性能越好.

由于材料的阻尼性能来源于其对外界周期载荷的响应, 强烈依赖于温度的变化. 对于纳米炭/环氧树脂复合材料而言, 只有在玻璃化转变温度附近时, 才会表现为最高的损耗因子, 这是由于此时分子链段开始运动, 但还来不及完全响应外界载荷的变化, 分子链间的摩擦作用导致较高的能量耗散. 根据时-温等效原理, 降低测试温度与增加作用频率对于材料的黏弹响应行为是等效的^[39].

常用 DMA 分析仪的测试频率通常为 10^{-3} ~200 Hz, 测试温度为-150~600℃, 采用该方法考察材料在不同温域范围内的黏弹性能. 此外, 还有多种测试模式(如拉伸、压缩、弯曲、剪切等)可供选择, 可以对小尺寸试样进行测量, 具有测试精度高的显著优势.

3.2 悬臂梁法

悬臂梁法是通过弯曲共振检测技术以获取材料阻尼性能参数的通用方法^[36,40,41]. 测试系统由激励和检测 2 部分组成: (1) 在悬臂梁的固定端安装 1 个信号发生器, 产生 1 个正弦频率扫描波, 对试样施加激励力; (2) 在梁的自由端安装检测传感器, 用来检测试样的振动响应信号. 通过对试样振动响应信号的处理得到试样的固有频率, 利用半功率带宽等方法进行计算可得到材料的阻尼比^[42,43]. 阻尼比是评价材料阻尼大小的物理量, 反映的是振动过程中材料的能量耗散情况. 阻尼比越大、材料的阻尼性能越好. 相比于 DMA 测试方法, 悬臂梁法可在十分宽泛的频域范围内(10 ~ 10^4 Hz)考察材料的振动响应特性, 但对测试试样的形状尺寸要求较为严格. 由于测试便捷, 该方法广泛用于工程实践中测量材料的振动阻尼特性.

4 纳米炭/环氧树脂黏弹阻尼复合材料的应用前景

由于碳纳米管和石墨烯具有独特的一维/二维结构和高的比表面积, 其可以在显著提高复合材料力学性能(如层间剪切强度、冲击韧性、模量等)的同时,

引入更多的界面, 使得复合材料在变形过程中产生更多的能量耗散, 从而表现出优异的黏弹阻尼性能. 特别指出的是, 纳米炭材料在非常宽的温度范围内(-140~600℃)仍保持较高的黏弹阻尼特性^[21,23,25], 由此制得的纳米炭/环氧树脂复合材料也将在更宽的温域和频域范围内表现出优异的阻尼性能. 这种纳米炭/环氧树脂复合材料可作为高性能结构阻尼材料, 有望应用于诸多领域^[44,45]. 比如, 用于制造风力发电的叶片, 在具备轻质高强性能的同时, 利用复合材料优异的阻尼减震特性提高叶片的使用寿命; 也可用于制造船舶车辆壳体、风机壳罩、各类管道等, 利用其优异的阻尼性能可起到显著减震降噪的作用. 此外, 航天飞行器、先进武器制造装备等领域需要材料具有轻质高强、稳定性好等优异性能, 这种新型纳米炭/环氧树脂高性能复合材料有望在该领域得到应用.

5 存在的问题及展望

纳米炭/聚合物黏弹阻尼复合材料目前尚存在如下问题: (1) 纳米炭材料在基体中的分散性. 由于纳米材料颗粒尺寸小, 其在聚合物基体中容易发生团聚, 难以实现均匀分散, 很大程度上影响复合材料的综合性能; (2) 纳米炭/聚合物基复合材料的黏弹阻尼机理. 尤其是关于多尺度、多组元之间的协同相互作用尚缺乏深入研究, 制约了黏弹阻尼材料的结构设计以及工程应用; (3) 纳米炭材料与聚合物基体间的界面结合. 界面结合力过强会导致复合材料刚度增加, 但阻尼效果不显著; 结合力较弱引起界面滑移, 导致阻尼性能增强, 但复合材料强度会有所下降, 如何调控复合材料界面间的结合强度是获得高强高阻尼复合材料的关键; (4) 纳米炭/聚合物复合材料的质量控制. 由于纳米复合材料内部具有多种微/纳尺度的增强组元材料, 使得影响复合材料性能的因素多样复杂, 应进一步探索适用的成型工艺、完善评价方法、提高质量控制.

随着纳米技术的快速发展, 纳米炭的种类和形态逐渐丰富, 大面积定向碳纳米管阵列、石墨烯海绵、碳纳米管长绳、碳纳米管织物等制备技术不断完善, 尤其是低成本宏量制备技术的突破, 纳米炭在复合材料工业中的应用领域会越来越广泛. 通过结构设计、工艺优化获得具有特定网络结构、多功能特性、高强高阻尼性能的先进复合材料, 在航空航天、交通运输、工业建筑等诸多领域具有广阔的应用前景.

参考文献

- 1 Martinez-Agirre M, Elejabarrieta J. Dynamic characterization of high damping viscoelastic materials from vibration test data. *J Sound Vib*, 2011, 330: 3930–3943
- 2 Fan R, Meng G, Yang J, et al. Experimental study of the effect of viscoelastic damping materials on noise and vibration reduction within railway vehicles. *J Sound Vib*, 2009, 319: 58–76
- 3 Vilatela J J, Eder D. Nanocarbon composites and hybrids in sustainability: A review. *ChemSusChem*, 2012, 5: 456–478
- 4 Valenkov A M, Gofman I V, Nosov K S, et al. Polymeric composite systems modified with allotropic forms of carbon. *Russ J Appl Chem*, 2011, 84: 735–750
- 5 Roy N, Sengupta R, Bhowmick A K. Modifications of carbon for polymer composites and nanocomposites. *Prog Polym Sci*, 2012, 37: 781–819
- 6 Huang X, Qi X Y, Boey F, et al. Graphene-based composites. *Chem Soc Rev*, 2012, 41: 666–686
- 7 Sun X M, Sun H, Li H P, et al. Developing polymer composite materials: Carbon nanotubes or graphene. *Adv Mater*, 2013, 25: 5153–5176
- 8 Biggerstaff J M, Kosmatka J B. Damping performance of cocured graphite/epoxy composite laminates with embedded damping materials. *J Compos Mater*, 1999, 33: 1457–1469
- 9 Wang Z, Liang Z Y, Wang B, et al. Processing and property investigation of single-walled carbon nanotube (SWNT) buckypaper/epoxy resin matrix nanocomposites. *Compos Part A*, 2004, 35: 1225–1232
- 10 Kishi H, Kuwata M, Matsuda S, et al. Damping properties of thermoplastic-elastomer interleaved carbon fiber-reinforced epoxy composites. *Compos Sci Technol*, 2004, 64: 2517–2523
- 11 Suhr J, Koratkar N A. Energy dissipation in carbon nanotube composites: A review. *J Mater Sci*, 2008, 43: 4370–4382
- 12 Fereidoon A, Kordani N, Ahangari M G, et al. Damping augmentation of epoxy using carbon nanotubes. *Int J Polym Mater*, 2011, 60: 11–26
- 13 Montazeri A. The effect of functionalization on the viscoelastic behavior of multi-wall carbon nanotube/epoxy composites. *Mater Des*, 2013, 45: 510–517
- 14 Li X, McKenna G B. Considering viscoelastic micromechanics for the reinforcement of graphene polymer nanocomposites. *ACS Macro Lett*, 2012, 1: 388–391
- 15 Tehrani M, Safdari M, Boroujeni A Y, et al. Hybrid carbon fiber/carbon nanotube composites for structural damping applications. *Nanotechnology*, 2013, 24: 155704–1–11
- 16 Young R J, Kinloch I A, Gong L, et al. The mechanics of graphene nanocomposites: A review. *Compos Sci Technol*, 2012, 72: 1459–1476
- 17 Pathak S, Cambaz Z G, Kalidindi S R, et al. Viscoelasticity and high buckling stress of dense carbon nanotube brushes. *Carbon*, 2009, 47: 1969–1976
- 18 Eom K, Nam K, Jung H, et al. Controllable viscoelastic behavior of vertically aligned carbon nanotube arrays. *Carbon*, 2013, 65: 305–314
- 19 Chang W J, Lee H L. Vibration analysis of viscoelastic carbon nanotubes. *Micro Nano Lett*, 2012, 7: 1308–1312
- 20 Buldum A L J. Atomic scale sliding and rolling of carbon nanotubes. *Phys Rev Lett*, 1999, 83: 5050–5053
- 21 Xu M, Futaba D N, Yamada T, et al. Carbon nanotubes with temperature-invariant viscoelasticity from –196 to 1000°C. *Science*, 2010, 330: 1364–1368
- 22 Shan C, Zhao W, Lu X L, et al. Three-dimensional nitrogen-doped multiwall carbon nanotube sponges with tunable properties. *Nano Lett*, 2013, 13: 5514–5520
- 23 Pathak S, Lim E J, Abadi P, et al. Higher recovery and better energy dissipation at faster strain rates in carbon nanotube bundles an *in-situ* study. *ACS Nano*, 2012, 3: 2189–2197
- 24 Zhang M. Multifunctional carbon nanotube yarns by downsizing an ancient technology. *Science*, 2004, 306: 1358–1361
- 25 Hehr A, Schulz M, Shanov V, et al. Passive damping of carbon nanotube thread. *J Intell Mater Syst Struct*, 2013, 25: 713–719
- 26 Chun K, Kim S, Shi M, et al. Hybrid carbon nanotube yarn artificial muscle inspired by spider dragline silk. *Nat Commun*, 2014, 5: 3322
- 27 Lahiri D, Das S, Choi W, et al. Unfolding the damping behavior of multilayer graphene membrane in the low-frequency regime. *ACS Nano*, 2012, 6: 3992–4000
- 28 Su Y, Wei H, Gao R, et al. Exceptional negative thermal expansion and viscoelastic properties of graphene oxide paper. *Carbon*, 2012, 50: 2804–2809
- 29 Lin R M, Lu C. Modeling of interfacial friction damping of carbon nanotube-based nanocomposites. *Mech Syst Sig Proc*, 2010, 24: 2996–3012
- 30 Falvo M R, Taylor R M, Helser A, et al. Nanometre-scale rolling and sliding of carbon nanotubes. *Nature*, 1999, 397: 236–238
- 31 Koratkar N, Wei B, Ajayan P M. Carbon nanotube film for damping applications. *Adv Mater*, 2002, 14: 13–14

- 32 Suhr J, Koratkar N, Koblinski P, et al. Viscoelasticity in carbon nanotube composites. *Nat Mater*, 2005, 4: 134–137
- 33 Suhr J, Ajayan P M. Damping characterization of carbon nanotube thin films. *Smart Mater Struct*, 2004, 5386: 153–161
- 34 Alva A, Raja S. Damping characteristics of epoxy-reinforced composite with multiwall carbon nanotubes. *Mech Adv Mater Struct*, 2014, 21: 197–206
- 35 Zeng Y, Ci L J, Brent J C, et al. Design and reinforcement vertically aligned carbon nanotube-based sandwich composites. *ACS Nano*, 2010, 4: 6798–6804
- 36 Khan S U, Li C Y, Siddiqui N A, et al. Vibration damping characteristics of carbon fiber-reinforced composites containing multi-walled carbon nanotubes. *Compos Sci Technol*, 2011, 71: 1486–1494
- 37 Koratkar N. *Graphene in Composite Materials: Synthesis, Characterization and Applications*. Lancaster: DEStech Press, 2013
- 38 Bower D I. *An Introduction to Polymer Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002
- 39 Menard K P. *Dynamic Mechanical Analysis—A Practical Introduction*. 2nd ed. London: CRC Press, 1999
- 40 Rajoria H, Jalili N. Passive vibration damping enhancement using carbon nanotube-epoxy reinforced composites. *Compos Sci Technol*, 2005, 65: 2079–2093
- 41 De Borbon F, Ambrosini D, Curadelli O. Damping response of composites beams with carbon nanotubes. *Compos Part B*, 2014, 60: 106–110
- 42 Piersol A, Paez T. *Harris' Shock and Vibration Handbook*. 6th ed. New York: McGraw-Hill Inc, 2009
- 43 Jones D I G. *Handbook of Viscoelastic Vibration Damping*. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2001
- 44 Zhao Y. Properties and application of advanced viscoelastic damping materials. *Aerosp Mater Technol*, 2009, 39: 1–6
- 45 Ren H Y. The application of viscoelastic damping vibration suppression for shock-isolation structure of multistage missile. *J Astronaut*, 2007, 28: 1494–1499

Viscoelastic damping of nanocarbon/epoxy composites

ZENG You & WANG Han

Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Carbon nanotubes (CNTs) and graphene, as novel nanocarbon materials, have aroused great attention due to their unique microstructure and extraordinary physical properties. Nanocarbon/epoxy composites, combining nanocarbon materials and epoxy together, exhibit excellent mechanical, electrical, and thermal properties. The addition of nanocarbon materials can greatly introduce more interfaces into composites, consequently resulting in much energy dissipation under cyclic loads. These nanocarbon/epoxy composites show some advantages of light weight, high strength, and high viscoelastic damping, which is beneficial to prolong service life of materials and improve vibration-absorbing performance. In this paper, we reviewed recent advances in viscoelastic damping of nanocarbon/epoxy composites. Intrinsic viscoelasticity of nanocarbon materials such as CNTs and graphene was introduced. We also demonstrated the viscoelastic damping of the CNT and graphene filled epoxy composites. Moreover, related measuring methods for damping of composites were introduced as well. Some existing problems in the field of viscoelastic damping composite materials were further discussed.

carbon nanotubes, graphene, epoxy, composites, viscoelasticity, damping

doi: 10.1360/N972014-00574