

结构-阻尼复合材料研究进展

Process on the Research of Structure-damping Composites

倪楠楠¹, 温月芳¹, 贺德龙², 益小苏², 郭妙才², 许亚洪³

(1 浙江大学 化学工程与生物工程学院, 杭州 310013 ;

2 北京航空材料研究院, 北京 100095 ;

3 航天科工三院, 306 所, 北京 100074)

NI Nan-nan¹, WEN Yue-fang¹, HE De-long², YI Xiao-su²,

GUO Miao-cai², XU Ya-hong³

(1 College of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou,

310013, China; 2 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095,

China; 3 306 Institute, the Third Academy of China Aerospace

Science & Industry Corp, Beijing 100074, China)

摘要: 航空航天飞行器的高速、轻质和多功能化的发展, 精密电子仪器设备的应用及舒适性要求的提高, 对传统结构材料的减重和降噪提出了巨大的挑战。近年来, 随着纤维增强复合材料的在航空航天领域应用比重的迅速提升, 开发兼具高力学性能和高振动阻尼性能的新型结构-阻尼多功能材料也成为研究的热点问题之一。本文在介绍结构-阻尼复合材料阻尼机理的基础上, 综述了国内外关于结构阻尼复合材料主要研究内容及研究成果, 并讨论了其今后的发展趋势, 包括开发新的多功能阻尼插层材料、引入新的阻尼耗能机制、开发多层次结构模型和对阻尼性能和力学性能的多尺度模拟等。

关键词: 结构-阻尼; 功能化插层; 复合材料; 结构阻尼; 阻尼预测

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2015.06.015

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2015)06-0090-12

Abstract: A huge challenge was presented on mass reduction and noise reduction of the traditional structural material with development of aerospace vehicles toward high-speed, light mass and multi-function, application of the precise electronic equipment and improvement of comfort requirements. In recent years, with the rapid increase of fiber-reinforced composite materials in the application proportion in aerospace, development of the new structure-damping multifunctional materials with both high mechanical properties and high vibration damping performance has become one of the hot topics of research. The damping mechanism of structure-damping composites was described firstly, further the major domestic and international research results of structural damping composites were reviewed, and then its future development trends were discussed, including the development of new multi-purpose damping intercalation materials, the introduction of new damping mechanisms, the development of multi-level structure model and multi-scale simulation of mechanical properties and damping properties.

Key words: structure-damping; functional intercalation; composite; structural damping; damping prediction

近年来随着航空航天装备向高速化、轻质化、自动化及多功能方向发展, 振动和噪声对精密电子仪器和设备稳定工作的恶性影响不断加剧, 高噪声振动在降低导航和控制电子系统的精度和可靠性的同时, 也大幅降低了结构件的疲劳寿命和服役时间^[1-3], 对航空航天装备的安全性和舒适性提出巨大的挑战。发展兼具高力学性能和高阻尼性能的新型结构-阻尼材料, 对

于结构进行减振降噪处理以改善其力学环境, 延长结构承受循环载荷和冲击的服役时间等非常重要, 也是近年来复合材料领域研究的热点之一。

传统的减振方法主要有解耦、隔振和结构的刚化^[4]。解耦需要在不同结构频率之间调配, 不适于模态密集的大型复杂结构; 隔振的缺点是容易在低频振动区引入一共振放大峰且结构稳定性较差; 而

刚化方法是通过提高结构刚度来增大结构件的固有频率从而解除其与激励的耦合作用,往往以增加附加质量作为代价,不符合飞行器轻质化的发展要求。阻尼材料是一种能吸收振动机械能、声能并能将它们转化为热能、电能、磁能或其他形式能量而消耗掉的一种功能材料,向结构中添加高损耗因子的阻尼材料是抑制振动和噪声最有效的技术手段之一^[5-14]。目前添加阻尼材料的途径可以分为两大类^[15],一是在结构外添加阻尼层,它又分为自由阻尼处理和约束阻尼处理。自由阻尼处理是在结构表面应变较大处粘贴高阻尼附加层,约束阻尼处理则是在附加阻尼层外再添加高刚度的约束层以增大阻尼层的剪切形变,达到消耗振动能量的目的,这两种方法都属被动阻尼处理,其显著特点是对结构的模态频率和振型影响较小,适合结构的事后修改,主要用于梁、板和薄壳结构的弯曲振动减振^[4]。该方法的缺点是施工容易受到结构尺寸、空间和质量等诸多条件的限制,另外,阻尼层在使用中容易出现分层剥离现象^[16];另一种途径是将阻尼材料加入复合材料结构中并与其共固化成型,它能改变结构的固有阻尼和共振频率。该方法的优点:首先是一次性固化成型能降低工艺成本且不增加多余的质量(不需要附加约束层)。其次,共固化阻尼处理的阻尼效果更好,因为阻尼材料位于结构内部,结构应变能更大,耗能效果更好^[17]。再次,共固化阻尼处理是在结构设计的开始阶段考虑,可根据结构的动力学环境和复合材料的阻尼影响因子进行多样性设计^[18],其影响因子主要包括阻尼材料的阻尼因子,弹性模量,阻尼层的厚度,分布位置,数量,基体的模量和损耗因子等^[19]。该方法虽能明显提高复合结构的阻尼性能,但是也存在增加制品厚度和力学强度和刚度下降等问题。目前添加的阻尼材料主要是黏弹性高分子材料,其阻尼性能明显受到温度和频率的影响,较低的玻璃化转变温度和储能模量以及与基体材料较差的界面性能又进一步限制了其在中高温结构材料中的应用。因此开发新型的插层阻尼材料^[20, 21],引入新的阻尼耗能机制^[22-26],设计高阻尼高刚度的结构模型^[27, 28],设计插层材料和基体材料的界面结合性能^[29],进一步发展完善并验证复合材料的阻尼机理和阻尼预测模型^[30-37]等对于开发高性能结构阻尼复合材料非常重要,也成为近年来该领域的主要研究方向。不断拓宽结构阻尼材料的应用领域^[38-40],研制兼具高阻尼和力学性能的结构阻尼一体化材料无论是为民用还是军工高技术领域均具有重要的战略意义。

1 结构-阻尼复合材料的阻尼机理

阻尼作用的本质是将机械振动的能量转变成可以损耗的能量,从而实现减振。根据引起能量耗散的机理不同分为四类^[41]:内摩擦生热;界面摩擦生热;能量的传输;能量的其他转换。阻尼材料可分为黏弹性阻尼材料、金属类阻尼材料、智能型阻尼材料和结构-阻尼复合材料等。不同的阻尼材料其阻尼机理虽各有不同,但只是上述四类阻尼机理的不同组合和表现形式。

黏弹性阻尼材料比较成熟并且已得到广泛应用,其阻尼机理明确,即在玻璃化转变区内高分子链段通过内摩擦产生能量耗散。其损耗因子受温度、频率、预压缩量和应变幅值等因素的影响。阻尼因子在 0.2~5.0 之间,使用温度在-55~120℃ 之间。但是黏弹性阻尼材料的刚度、强度和抗蠕变性能差,不能单独作为结构材料使用^[42]。

金属类阻尼材料主要是借助位错、缺陷等产生位错迟滞、热迟滞、磁弹效应等现象耗散系统的部分能量。但目前阻尼合金的阻尼性能普遍较低,损耗因子仅为 0.001~0.150,与黏弹性材料相差 1~2 个数量级,不能满足高阻尼要求的场合使用。近年来发展起来的泡沫金属材料阻尼性能提高了 5~10 倍^[43, 44],高阻尼特性一方面来源于较高的孔隙率,另一方面来源于孔洞周围的高密度缺陷。

智能阻尼材料是将智能材料的自感知、自判断、自适应的特性应用于阻尼体系,包括压电阻尼材料、电流变流体(ER)和磁流变流体(MR),其最大特点是可根据结构的振动环境自动调整阻尼性能以实现理想的减振效果。压电材料的阻尼机理是应用压电效应将振动能转变成电能,然后通过导电通路再转化为焦耳热能耗散掉。电流变流体和磁流变流体具有相似的阻尼机理,主要通过材料在液-固态间转变耗散能量,损耗因子可在几毫秒内由 0 急剧增至 15~18。智能型阻尼材料一般具有较高的阻尼因子,但往往需要一些特殊的装置或容器,工艺复杂且成本较高。

结构-阻尼复合材料是兼具了黏弹性材料的高阻尼性和结构材料的高强度高刚度的新型结构-功能一体化材料。根据基体不同可分为金属基和聚合物基结构阻尼复合材料。金属基结构阻尼复合材料一般是向基体中添加第二相颗粒、纤维或者由不同的金属板和阻尼插层材料叠层固化形成层状复合材料。其阻尼来源于金属基体和添加相的固有阻尼、界面滑动和界面处的位错运动引起的能耗。聚合物基结构阻尼复合材料是用纤维增强高阻尼聚合物形成的复合材料或将高阻尼材料插入聚合物基复合材料层间制备插层复合材

料。由于纤维增强复合材料的阻尼是金属材料的几十到几百倍,同时又有良好的比刚度、比强度,因此越来越引起人们的关注。其阻尼机理主要有以下几点:

(1)基体和纤维增强材料的内摩擦引起的能量损耗。一般来讲,复合材料的阻尼主要来自于树脂基体。玻璃纤维,芳纶纤维作为增强相也具有较好的内摩擦阻尼性能。此外插层复合材料中如果插入黏弹性阻尼材料或热塑性纤维或薄膜材料也可通过分子链运动消耗更多的能量。

(2)界面摩擦生热。耗能包括宏观和微观两方面^[45]。宏观界面摩擦包括材料与其他材料或介质相对运动造成的摩擦耗能,工程中利用液体或气体的摩擦能够使振动能转变为热能,从而表现出阻尼作用。微观的界面摩擦包括材料内不同组分间的界面区由于存在高剪切应变而引起的能量损耗,譬如纤维与基体界面分层引起的摩擦阻尼,填充颗粒与基体或纤维间接触面的摩擦阻尼等。

(3)由材料破坏引起的阻尼。由于基体开裂和纤维或插层材料断裂、拔出的能量耗散引起的阻尼。

(4)黏塑性阻尼。在大振幅或高应力情形下,特别是热塑性复合材料,由于在纤维之间的局部区域内存在高应力和应变集中而表现出非线性的阻尼特性^[46]。

(5)能量的其他转换。插层复合材料如果包含智能阻尼材料,则存在机械能与电能的转换(压电阻尼材料),机械能和化学能的转换(可逆氢键耗能阻尼材料),机械能和磁能的转换(稀土永磁阻尼材料)等引起的阻尼损耗。

2 结构-阻尼复合材料

2.1 国外研究进展

1990 年 Barrett 首次对夹杂单一黏弹性层的复合材料层结构的阻尼性能进行研究,结果表明其结构损耗因子比传统的 CFRP 高 5~50 倍,并且具有一定的可设计性^[47]。Biggerstaff 制备了损耗因子 $\eta > 0.13$ (20~200Hz)的共固化阻尼复合材料并发现黏弹性材料在共固化过程中可能出现诸多问题:1)阻尼材料在固化过程中老化降解,造成复合材料分层;2)阻尼材料可能产生蠕变或者被挤压到复合材料外部等;3)共固化时,黏弹性阻尼材料的阻尼性能明显下降。研究其原因主要是阻尼材料与树脂基体的相互作用所致。如果固化前在阻尼材料和基体树脂间插入聚酰亚胺隔膜可有效阻止二者彼此之间的渗透,阻尼效果与先分别固化、再粘接的结果接近^[48]。为了改善结构阻尼复合材料的力学性能,Robinson 等提出了将黏弹阻尼层穿

孔后再共固化的改性方法,并从阻尼层孔径大小、孔间距和穿孔率三个方面出发,考察了穿孔固化对阻尼改性复合材料的阻尼性能和刚度的影响^[49]。Trego 等提出了借助应力耦合效应在结构长度方向的不同区段内设置不同的纤维取向角,通过位于这些区段内的黏弹性阻尼层内产生的高剪切应力来提高结构的阻尼效果,并且对取向角、与取向角对应的区域长度,复合材料的弹性模量等参数进行适当的选择,可在层间产生最大的剪切应力从而发挥阻尼层最大的潜能,这种方法称之为应力耦合阻尼技术^[14]。Mantena 等研究表明,聚乙烯纤维增强铺层和石墨纤维增强铺层经过混杂铺叠后可得到良好的阻尼性能和结构刚度。这是因为:聚乙烯纤维增强复合材料具有优良的阻尼特性和抗冲击性能,而石墨纤维增强复合材料则具有较大的刚度,但阻尼和抗冲击性相对较差,它们的混杂使用将提供良好的综合性能^[50]。James 研究了不同蜂窝材料作为插层时对结构阻尼材料性能的影响,结果表明,减少蜂窝的剪切模量可在不牺牲刚度的前提下进一步提高损耗因子^[51]。Ray 通过研究设计混合阻尼层结构(见图 1),系统研究了约束层的 PZT 片的纤维取向、通电电压、结构层的纤维取向、插层蜂窝的厚度等因素对结构阻尼复合材料阻尼性能和结构性能的影响。另外研究了不同模量和性能的蜂窝(HEREX 芯,泡沫填充铝蜂窝)和不同模量层合板对结构性能的影响^[20]。Toshio 研究了不同铺层设计的聚乙烯薄膜插层共固化复合材料制作的悬臂梁的阻尼性能,并与根部进行 PZT 片阻尼处理的悬臂梁进行对比。结果表明含 PZT 片的悬臂梁阻尼因子达到了 0.012,阻尼效果较好,另外还研究了将 PZT 粉体直接撒在预浸料上制备压电阻尼复合材料,结果使得振动模态损耗因子有了明显提高,尤其是一阶模态。与此同时,结构的模量和层间剪切强度没有受到明显的影响^[52]。

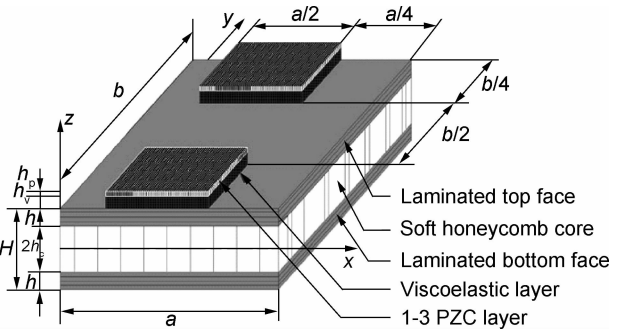


图 1 含 1-3 型压电复合材料为约束层的约束阻尼处理结构的共固化结构阻尼材料示意图^[20]
Fig. 1 Schematic representation of co-cured structural damping materials integrating constrained damping treatment structure with 1-3 piezoelectric composite as constraining layer^[20]

2.2 国内研究进展

国内方面,Liao 等分析了中性面内插入聚乙烯-丙烯酸单向碳/环氧及其对称角铺设碳/环氧层板的阻尼性能,结果表明结构阻尼因子有显著的增加,并受到外层复合材料刚度的影响^[7]。张少辉等基于有限元的模态应变能法研究了共固化复合材料结构的阻尼因子;同时考虑了黏弹性阻尼材料的频率依赖性和复合材料本身对振动能量的损耗,提出了该类结构有限元模型,并进行了验证。研究结果表明:纤维增强复合材料本身的阻尼因素对结构阻尼因子的影响与铺层结构和模态有关;在保证结构刚度前提下,在邻近阻尼层的位置增加一定数目柔性层(90°)可提高结构阻尼;将黏阻尼层离散分布于偏离结构厚度中心适当距离的位置,有利于结构阻尼的改善^[17,31]。潘利剑等基于模态叠加法和模态应变能法,导出任意简谐激励下黏弹阻

尼结构阻尼因子的计算方法,并用于分析共固化复合材料简谐激励下阻尼因子,该分析结果与 DMA 实测结果基本吻合^[16]。他们还研究了实验温度对 0.3mm 丁腈橡胶膜和 T700 碳纤维增强环氧树脂基共固化复合材料单向板阻尼性能的影响。结果表明:玻璃态和高弹态的共固化复合材料阻尼因子较小,且随温度变化不大;而当温度处于阻尼层黏流态区时,共固化复合材料阻尼因子迅速增加到最大值后再减小,最大阻尼因子约为未插入黏弹阻尼层复合材料的 13 倍;但研究还发现共固化过程中阻尼层阻尼因子减小,共固化复合材料的弯曲模量下降 65% 以上,采用统一目标函数法对黏弹性阻尼膜上打孔的尺寸和位置进行优化以获得阻尼性能和结构性能的最优搭配,结构示意图见图 2,优化后的结构阻尼复合材料弯曲模量比空白样品下降 41.5%,阻尼因子达到 0.04,具体数据见表 1^[53]。

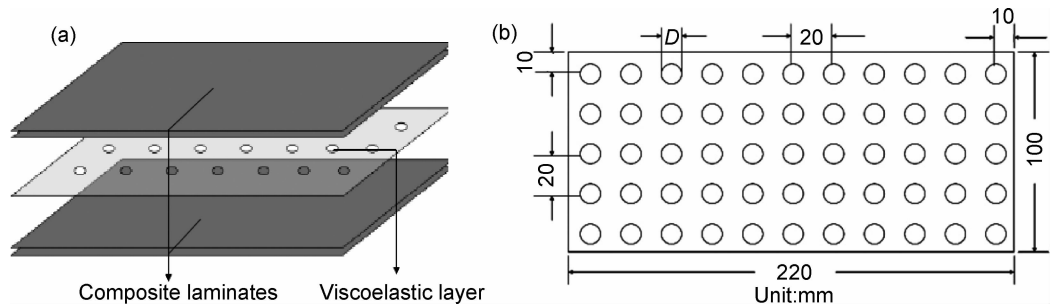


图 2 穿孔黏弹阻尼层共固化复合材料示意图(a)及穿孔阻尼层结构示意图(b)^[53]
Fig. 2 The schematic diagram of co-cured composites with interleaved perforated viscoelastic layer(a) and the schematic diagram of perforated damping layer(b)^[53]

表 1 共固化复合材料多目标优化设计结果^[53]
Table 1 Multi-objective optimization results of co-cured composites^[53]

Perforation pitch/mm	Optimal perforation area ratio/%	Damping	Flexural modulus/GPa
12.5	1.98	0.0402	67.71
20	3.35	0.0411	66.39
25	4.15	0.0436	59.82
Fiber-reinforced composite	—	0.0132	115.67

吕丽等制备了具有不同结构和界面结合强度的玻璃纤维维-铅(GF-Pb)网增强橡胶复合材料,结果表明 GF-Pb 网增强结构可以同时提高橡胶的动态力学性能和阻尼性能,其中 GF-Pb 网 z 向增强方式的性能改善效果明显,当 GF-Pb 网体积分数为 4% 时其动刚度和损耗因子的提高率可分别达到 49% 和 25%^[54]。余启勇等采用 3M 公司的阻尼材料 ISD112、高强玻璃纤维布和环氧树脂制备了共固化复合材料,在 0~500Hz 范围内材料的阻尼因子 ≥ 0.03 ,抗弯强度接近

550MPa,弯曲模量 20GPa。采用航天材料及工艺研究所生产的厚度 0.15mm 的新型丁腈橡胶阻尼材料,制备了穿孔阻尼层共固化复合材料,研究结果表明,复合材料阻尼性能和静态力学性能与阻尼胶膜穿孔面积比直接相关,在 8% 以内时,阻尼效果明显,但结构强度和刚度仍有明显下降;阻尼层穿孔面积比在 12%~30% 之间变化时,有一定的阻尼效果,结构力学性能明显上升,阻尼层穿孔面积比大于 30% 时,复合材料的损耗因子略有提高,静力学性能与未加阻尼层的复合材料相当^[55]。杨加明等分析了复合材料夹杂双层黏弹性阻尼材料的弯曲性能,用 Ritz 法研究各应力分量的应变能并计算分析了复合材料层的应变能以及复合结构的损耗因子。结果表明,复合材料中性面内应变能占主要地位,黏弹性层中的 XZ 方向和 YZ 方向的切应力应变能较大^[56]。此外还以该类材料结构的损耗因子最大化为优化目标,用改进遗传算法对其阻尼性能进行优化设计,结果表明多变量优化设计结果优于单变量优化设计,优化后结构的损耗因子明显增

大^[57]。杨雪建立了有限元模型从理论上研究由三层黏弹性高分子阻尼材料和钢板组成复合结构的阻尼性能,并用实验进行了验证^[58]。范永忠等制备了纤维增强环氧树脂基复合材料,研究了纤维的混杂方式对复合材料玻璃化转变温度和阻尼性能的影响。结果表明经 GF/CF 混杂后,复合材料的阻尼性能符合混杂定律,阻尼因子介于 GF 复合材料与 CF 复合材料之间^[59]。吴医博等发明了一种内嵌阻尼层的泡沫夹芯复合材料,通过在泡沫上添加沟槽解决了真空成型工艺问题,振动测试结果表明该阻尼板具有较好的刚度和阻尼性能^[60]。郭万涛发明了一种以玻璃纤维增强柔性环氧树脂为阻尼层,玻璃纤维增强普通环氧树脂为结构层的结构阻尼一体化材料,弯曲强度达到 391MPa,弯曲模量为 17GPa,阻尼因子为 0.05^[61]。梁森等发明了一种以丁腈橡胶和氯化丁腈橡胶部分硫化后制成薄膜为阻尼层,碳纤维增强环氧树脂为结构层复合而成的共固化复合材料,相对阻尼系数从空白样品的 0.0046 提高到了 0.015^[62]。益小苏教授等设计了一种以植物纤维织物或无纺布或高分子薄膜或泡沫等为阻尼材料,碳纤维或玻璃纤维等为增强材料的叠层混杂材料,该材料具有吸声,降噪,减振,隔热等性能,同时具有一定的比强度和比刚度,通过材料混杂的方法兼顾结构和阻尼性能^[63]。

航天材料及工艺研究所从 20 世纪 90 年代开始开展了树脂基阻尼复合材料研究工作,制备的阻尼/结构一体化复合材料和传统的纤维复合材料相比,在相同厚度条件下,材料的阻尼因子增大近一个数量级,且各向同性层合板弯曲强度、弯曲模量和层剪强度等均有较高的保持率^[4]。

3 结构-阻尼复合材料研究领域的关键问题

结构阻尼复合材料研究的基本思路就是将阻尼材料与结构材料“复合化”,由阻尼组分提供阻尼性能,结构组分保证结构强度,以达到静态力学性能与动态力学性能的平衡,实现高强度高刚度与高阻尼的有机结合。目前结构阻尼复合材料的研究主要集中于:

(1)以金属为基体,通过金属材料与高阻尼材料叠层固化而成的夹层复合材料或者添加高阻尼第二相制备的阻尼合金材料。

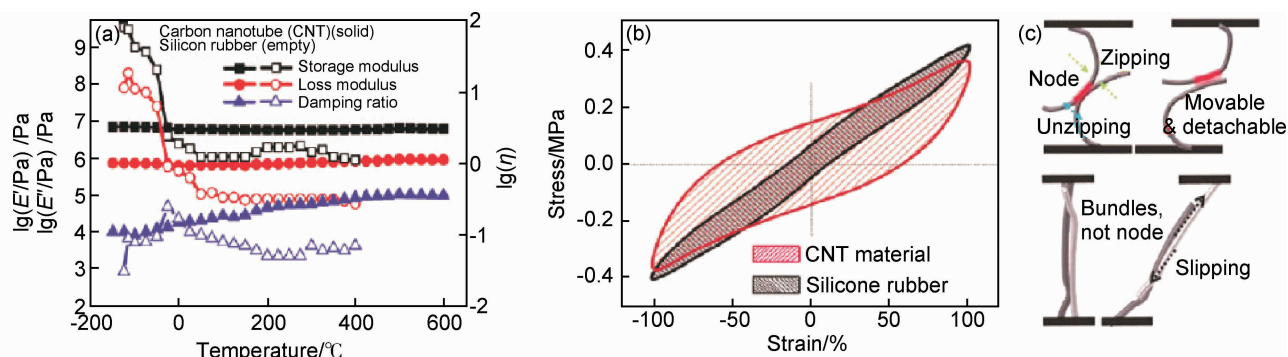
(2)以力学性能和阻尼性能较高、质量较轻的聚合物为基体,通过引入阻尼性能较高或经过高阻尼处理的纤维材料强化基体或插入其他高阻尼材料到复合材料层间共固化而成的插层聚合物基复合材料。

结构阻尼材料研究领域近年来不断有新的研究成

果出现,研究方向也在不断细化。

3.1 开发新型的共固化阻尼材料

传统的黏弹性阻尼材料的阻尼性能随环境温度、振动频率等外部因素变化较大,采用共混合共聚的多相体系,虽然扩大了阻尼温度区域,但是阻尼效果仍不理想。对于互穿聚合物网络(IPN),由于其交联网络之间的相互贯穿,产生强迫互容和协同效应,故有利于制备宽温度和宽频区域的阻尼材料^[64-66]。但黏弹性材料的模量较低,插入黏弹性材料引起体系强度和模量的下降明显,近年来有人开始研究将多孔的蜂窝类材料如杜邦公司生产的 Nomex 蜂窝, Kevlar 蜂窝等加入到复合材料,能够在提高结构阻尼的同时保持结构的刚度^[20]。此外还有人研究了将纳米硅棒,纳米硅线,纳米硅弹簧等填料加入环氧树脂内制备结构阻尼材料,结果发现加入纳米硅弹簧可提高损耗因子 150%,同时不引起结构刚度明显的下降^[67]。另外,还有人研究了将中空植物纤维黄麻^[68],松木,青木^[69],泡沫铝^[39]作为插层制备结构阻尼复合材料。值得注意的是,最近 Science 杂志报道了化学沉积法制备的碳纳米管网络状材料具有比硅橡胶更宽的高阻尼温度区间,如图 3(a)所示,在 -140~600℃ 的宽温区内,碳纳米管材料都具有较高的储能模量,损耗模量和损耗因子,图 3(b)表明在周期应变中碳纳米管具有比硅橡胶更大的应力应变迟滞曲线面积,也就具有更高的能量损耗,其耗能机理如图 3(c)所示,主要借助碳纳米管间的滑移,节点的搭接和断开来消耗能量^[70]。Shan 等和 Pathak 等研究了碳纳米管泡沫的黏弹性效果,发现碳纳米管越短,单位体积数量越多,则能耗越大^[71, 72]。Hehr 等和 Chun 等通过纺丝制备了碳纳米管绳,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^[73, 74]。Zeng 等制备了碳纳米管阵列/碳纤维/环氧树脂复合材料并考察其动态黏弹性能,结果表明定向碳纳米管阵列同时增加了复合材料的储能模量,损耗模量与损耗因子,通过增加复合材料内的界面,并与碳纤维形成协调增强作用,使得复合材料兼具更高的弯曲模量和阻尼性能^[75]。一般认为碳纳米管/树脂基复合材料的阻尼主要来源于碳纳米管内和碳纳米管与树脂间的界面摩擦^[76, 77]。石墨烯具有二维片层结构,其在外力作用下易于产生形变,通过片层间大面积接触和相对滑移变形能够产生能量耗散^[78]。Su 等研究了氧化石墨烯纸的黏弹性能发现石墨烯纸在较高的温度下具有更为优异的阻尼特性因为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^[79]。但石墨烯复合材料的黏弹阻尼性

图 3 碳纳米管黏弹性行为及其机制^[70]

(a) 储能模量、损耗模量、损耗因子的温度谱; (b) 应力-应变回滞曲线; (c) 黏弹性作用机理

Fig. 3 Viscoelastic behavior and mechanism of carbon nanotube^[70]

(a) temperature spectrum of storage modulus, loss modulus and loss factor; (b) stress-strain hysteresis curve; (c) mechanism of viscoelastic effect

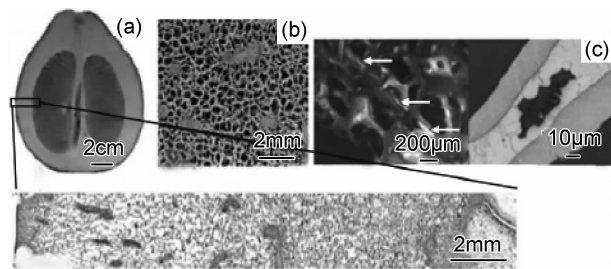
能的研究目前较少, Koratkar 研究发现石墨烯的加入可以有效提高复合材料的储能模量, 但并未显著改善其损耗模量和阻尼性能, 这与石墨烯在树脂中的分散性和相容性有关^[80]。

3.2 引入新的阻尼耗能机制

目前研究最多的是利用压电效应将无机压电陶瓷(如锆钛酸铅 PZT, 铌镁-锆钛酸铅 PMN)的颗粒, 纤维或有机压电材料(聚偏二氟乙烯 PVDF)加入材料内部制备具有被动压电效应的阻尼材料^[80-82]或将压电陶瓷片加到材料表面制备具有主动压电效应的阻尼结构件^[83]。此外, 有人研究发现向极性聚合物中添加位阻酚类小分子(AO-80, DZ)可形成可逆的氢键, 在受到外力作用时, 这种可逆的氢键通过断裂和形成的循环可消耗大量的能量, 损耗因子提高一倍以上, 储能模量也有较大提高, 但超过一定温度后下降速度加大^[84, 85]。另外研究较多的新的阻尼耗能机制还有电致流体和磁致流体转变阻尼^[22, 86, 87]。

3.3 设计高阻尼高刚度的结构模型

为实现结构与阻尼性能的一体化, 需要对复合材料结构进行整体设计。近年来, 研究人员通过模仿自然界生物材料的结构来获得更高效的阻尼材料, 其中空间梯度渐变的组成和结构受到了关注。组成和微结构的连续变化可以使界面应力最小化, 并且减小了各个点的应力集中现象, 从而增强了材料的力学强度和能量耗散能力^[88]。自然界中柚子是具有很好阻尼性能的代表, 图 4(a)是柚子的径向截面图, 放大后如图 4(b)所示, 梯度多孔多级结构使得柚子皮具有很好的能量耗散能力^[89]。Sebastian 等通过熔模铸造工艺制备出了类似柚子皮的多级结构的长纤维增强金属泡沫材料, 如图 4(c)所示, 这种 $\text{Bi}_7\text{Sn}_{43}$ 合金具有很好的阻尼和抗冲击性能^[90]。苏杭制备了玻璃空心微珠/Al

图 4 柚子皮的径向截面图(a)、柚子皮的扫描电镜照片: 海绵状结构(b)及具有仿柚子皮多级结构的长纤维增强金属泡沫, 白色箭头为纤维束(c)^[89, 90]Fig. 4 The section of pomelo peel in radial direction (a), SEM image of the pomelo peels showing the foam-like structure (b) and long fiber reinforced metal foams inspired by the hierarchical structure s of pomelo peel white arrows; fiber bundle (c)^[89, 90]

多孔材料并研究其压缩及阻尼性能^[91]。此外金明江等综合了仿贝壳叠层复合材料的软硬相交叠强韧机理、传统叠层阻尼复合材料阻尼机理和 ARALL 板叠层止裂机理设计并制备了纤维/树脂/铝合金叠层复合材料和泡沫铝/树脂/铝合金叠层复合材料, 示意图见图 5。研究表明, 这种含纤维的三相杂化材料损耗因子达 0.031, 拉伸强度 507MPa, 拉伸模量 32.7GPa, 弯曲强度 348.1MPa, 含泡沫铝的杂化材料损耗因子为 0.056, 拉伸强度 54MPa, 拉伸模量 25.6GPa。通过调节插层纤维含量可调整体系的模量和阻尼^[92, 93]。王翔等通过将阻尼改性的柔性环氧树脂和纤维增强柔性环氧树脂作为插层与结构环氧树脂混合铺层制备兼具高强度高模量及高阻尼性能的结构阻尼复合材料^[94]。MOREIRA 等通过模仿 GLARE 板制备不同插层材料和铺层顺序的层合板, 评价了其阻尼和力学性能与插层材料和铺层顺序的关系^[26]。LAKES 绘制了常用材料的刚度-损耗因子图, 见图 6, 指出材料的刚度和损耗因子是相互制约的 2 个变量,

结构刚度高的材料如金属一般损耗因子较低,位于图的左上角,损耗因子好的材料如橡胶材料则一般模量较低,位于图的右下角。结构阻尼材料追求的目标是兼具高的刚度和损耗因子即图的右上角位置,而其最有效的制备办法是选择较高刚度的阻尼材料与结构材料复合而非阻尼因子很大但刚度很差的材料。他设计用 W-InSn 合金粒子为阻尼相制备结构阻尼材料,其中 InSn 合金为壳提高阻尼性能,W 粒子为核保证阻尼相的结构刚度,这种核壳结构的示意图见图 7,此外 W 可以用无机陶瓷 SiC 取代以降低成本^[26]。Elasser 等研究了以 IPN 为核的核壳结构,其中核为聚丁二烯-苯乙烯和丙烯酸酯共聚物组成,为抗冲击和阻尼部分,壳则是玻璃态的聚苯乙烯-丙烯腈共聚物,研究发现这种核壳结构的乳胶粒子的阻尼因子大于 1^[95]。此外日本桥石公司开发设计了 MNCS 阻尼材料(Micro Network Controlled Structure),这种材料有热塑性弹性体(TPE)和油类组成,具有高分子凝胶的特性,与人的肌肉类似,热稳定性好且具有形状记忆功能和非常优异的防振和抗冲击性能。通过调控 TPE 和油类的种类和比例,可以形成不同模量和不同损耗因子的材料,为结构阻尼材料的设计提供了新的思路^[96]。

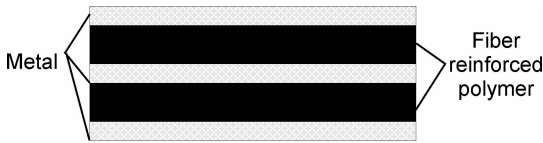


图 5 纤维/树脂/铝合金叠层复合材料示意图^[92]
Fig. 5 Schematic representation of fiber/resin/Al alloy laminated composite^[92]

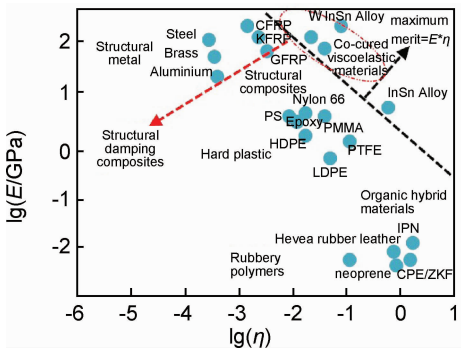


图 6 不同材料的刚度-损耗因子图^[26]
Fig. 6 Stiffness-loss factor of different materials^[26]

3.4 设计插层材料和基体材料的界面结合性能

在复合材料的设计中,主要存在的问题是界面设计问题。弱结合界面能通过界面滑移摩擦机制对阻尼做出贡献,但与此同时,界面滑移必将导致复合材料在

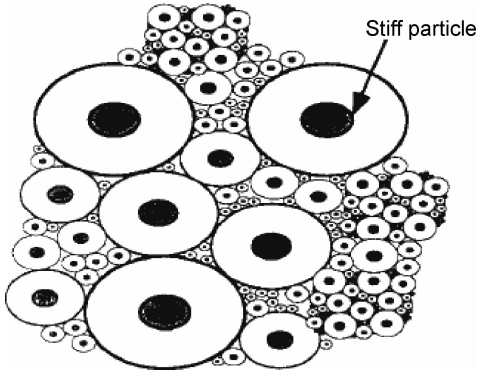


图 7 W-InSn 合金粒子填充金属基体示意图^[26]
Fig. 7 Schematic representation of metal matrix filled with W-InSn alloy particles^[26]

刚度和强度上的巨大损失。金明江等的研究表明,金属-树脂界面依然是金属基叠层材料的弱界面,其结合强度影响复合材料的整体性能^[93]。李明俊等分别采用压敏胶和环氧树脂作为黏结剂,制备兼顾高强度、高刚度和高阻尼的结构阻尼复合材料,考察了两种黏结层材料和不同黏结层厚度对 7 层各相异性交替层合阻尼结构内耗温频特性的影响^[97]。另外,因为纤维和基体弹性模量的不匹配,纤维/基体界面中存在较大的剪切应力,所以在该剪应变区域中加入高阻尼材料也是增加复合材料阻尼的一种有效途径,具体就是在纤维表面覆盖一层高阻尼材料^[98]。基体树脂与纤维的层间可能存在的间隙及基体树脂在断裂后出现的缝隙对材料的结构力学强度有很大的影响,有人通过超声处理将预先铺设于层间的热塑性的 PEEA 纤维融化后填充到可能存在的上述缝隙中可提高结构的力学性能和断裂韧性,同时基于热塑性聚合物自身的阻尼贡献能提高结构的损耗因子^[99]。

3.5 发展完善并验证结构阻尼复合材料的阻尼预测模型

基于弹性-黏弹性对应原理,模态应变能法和有限元法,研究人员建立了各种阻尼预测模型,大致可分为微观模型和宏观模型两大类。

微观模型考虑纤维、基体和界面等各组分,以及它们间的相互作用对阻尼的影响,包括纤维含量、纤维和基体的弹性模量和阻尼性能、增强纤维长径比、纤维取向、界面条件和中间相的影响等^[16]。宏观模型以单个铺层、层合板以及整个结构为研究对象,考察结构总体的阻尼特性。自 1973 年 Adams 和 Bacon 创立了基于单向纤维增强薄板阻尼性能预测的 Adams-Bacon 准则后,宏观力学模型不断被修正完善,依次出现了 Ni-Adams 模型^[100],Saravanos 模型^[101],Rikards 基于一阶剪切变形并考虑了横向剪切变形而建立的阻尼预测

模型^[102], Berthelot 采用里兹法建立的阻尼预报模型等^[103]。近年来,随着新型阻尼材料和阻尼机制的引入,又出现了关于压电阻尼复合材料和电致流变阻尼复合材料的阻尼预测模型^[22,24]。随着结构阻尼复合材料对结构性能和阻尼性能的兼顾要求的提出,又出现了基于离散层法和遗传算法的多目标优化分析和基于模态应变能法、模态叠加法及统一目标函数法的优化分析来平衡结构阻尼复合材料的结构性能和阻尼性能,并可根据材料的使用环境寻找最佳组合^[49, 104]。

3.6 不断拓宽结构阻尼材料的应用领域

复合材料的可设计性赋予结构阻尼复合材料开发和应用的灵活性,人们可以通过调整复合材料的成分配比和结构组成来满足不同场合的需要。例如:用高模量的阻尼材料可以提高结构阻尼复合材料的模量;增加复合材料中纤维的体积分数可满足更高的强度需要;提高插层的阻尼性能或用量可满足更高的阻尼要求。结构阻尼复合材料将在航空航天、机械、电子、轨道交通等工业中发挥巨大的作用。目前已经有类似产品研制成功并投入使用,譬如卫星支架,仪器设备支架,阻尼杆件,大型风机叶片,潜艇推进舵叶片,直升机悬翼桨叶片,机器人手臂,车厢壁板,汽车保险杠,隔声板等部件。随着结构阻尼复合材料的制备技术和性能指标的不断优化,制造成本的不断下降,其应用领域和开发应用速度必将得到不断地拓宽和提高。

4 结束语

随着对材料轻量化和结构功能一体化需求的不断增加,兼具优异力学性能和减振降噪能力且结构可灵活设计的结构阻尼复合材料已广泛应用于航空航天、汽车、轮船、桥梁建筑以及体育休闲等各个领域。虽然目前国内外关于结构阻尼复合材料的研究开发已经取得很多成果,但仍面临着很多问题和挑战,如何通过结构设计和新材料、新阻尼耗能机制的应用实现结构性能和阻尼性能的同步提高,如何对插层材料或合金组分进行物理或化学改性以提高其耐湿热性,耐疲劳性,耐辐射性,耐老化性,满足结构阻尼材料在航空航天领域苛刻的使用环境。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参数之间的对应关系并能通过模拟和计算确定具体结构所需的阻尼材料参数,如何实现结构阻尼复合材料的制备工艺稳定性和制造成本最小化的统一等都是今后结构阻尼复合材料研究面临的挑战。

参考文献

[1] CHANDRA R, SINGH S P, GUPTA K. Damping studies in fiber-

reinforced composites-a review[J]. Composite Structures, 1999, 46(1): 41-51.

[2] 任勇生, 刘立厚. 纤维增强复合材料结构阻尼研究进展[J]. 力学与实践, 2004, 26(1): 9-16.

REN Y S, LIU L H. Advances in damping analysis and design of fiber reinforced composite material structures[J]. Mechanics in Engineering, 2004, 26(1): 9-16.

[3] 张少辉, 陈花玲. 国外纤维增强树脂基复合材料阻尼研究综述[J]. 航空材料学报, 2002, 22(1): 58-62.

ZHANG S H, CHEN H L. Development of research on damping of fiber reinforced composite-a review[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2002, 22(1): 58-62.

[4] 赵云峰, 游少雄. 结构/阻尼一体化复合材料技术及其应用研究进展[J]. 材料工程, 2012, (11): 86-91.

ZHAO Y F, YOU S X. Review on the structure/damping co-cured composite materials and their applications[J]. Journal of Materials Engineering, 2012, (11): 86-91.

[5] ZHANG S H, CHEN H L. A study on the damping characteristics of laminated composite with integral viscoelastic layers[J]. Composite Structures, 2006, 74(1): 63-69.

[6] SUZUKI K, KAGEYAMA K, KIMPARA I, et al. Vibration and damping prediction of laminates with constrained viscoelastic layers- numerical analysis by a multilayer higher order deformable finite element and experimental observations[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2003, 10(1): 43-75.

[7] LIAO F S, SU A C, HSU T C. Vibration damping of interleaved carbon fiber epoxy composite beams[J]. Journal of Composite Materials, 1994, 28(18): 1840-1854.

[8] WANG H J, CHEN L W. Vibration and damping analysis of a three layered composite annular plate with a viscoelastic mid-layer[J]. Composite Structures, 2002, 58(4): 563-570.

[9] BRONOWICKI A J, GTIRSEL Y. Dual stage passive vibration isolation for optical interferometer missions [A]. Interferometry in Space[C]. Waikoloa: Proceedings of the SPIE, 2003. 753-763.

[10] 王敬丰, 魏文文, 潘复生, 等. 金属阻尼材料研究的新进展及发展方向[J]. 材料导报, 2009, 23(13): 15-19.

WANG J F, WEI W W, PAN F S. New development and prospect of research on metallic damping materials[J]. Materials Review, 2009, 23(13): 15-19.

[11] 任怀宇. 黏弹阻尼减振在导弹隔冲击结构中的应用[J]. 宇航学报, 2007, 28(6): 1494-1499.

REN H Y. The application of viscoelastic damping vibration suppression for shock-isolation structure of multistage missile[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(6): 1494-1499.

[12] 潘利剑. 粘弹阻尼层共固化复合材料的性能研究与优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

PAN Li-jian. Study of performance and optimum design of co-cured composite laminates with embedded viscoelastic layer [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.

[13] 李明俊, 刘桂武, 徐泳文, 等. 黏接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 M J, LIU G W, XU Y W, et al. Influences of bonding layer

- on the internal friction characteristics of isotropic laminated damped structures [J]. *Acta Materiae Composite Sinica*, 2005, 22(4): 96—99.
- [14] TREGO A, EASTMAN P. Flexural damping predictions of mechanical elements designed using stress coupled, co-cured damped fiber reinforced composites [J]. *Journal of Advanced Materials*, 1999, 31(1): 7—17.
- [15] BIGGERSTAFF J M, KOSMATKA J B. Damping performance of co-cured graphite/epoxy composite laminates with embedded damping materials[J]. *Journal of Composites Materials*, 1999, 33(15): 1457—1469.
- [16] 潘利剑,张博明,戴福洪. 简谐激励下共固化复合材料黏弹阻尼结构的损耗因子研究[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(2): 57—60.
PAN L J, ZHANG B M, DAI F H. Loss factor of viscoelastic damping composite material under harmonic excitation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(2): 57—60.
- [17] 张少辉, 陈花玲. 共固化复合材料黏弹阻尼结构的损耗因子研究[J]. *航空材料学报*, 2005, 25(1): 53—57.
ZHANG S H, CHEN H L. Damping analysis of co-cured composites interleaved viscoelastic layers[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2005, 25(1): 53—57.
- [18] NAPOLITANO K L, GRIPPE W, KOSMATKA J B, et al. A comparison of two co-cured damped composite torsion shafts[J]. *Composite Structures*, 1998, 43(2): 115—125.
- [19] JASROBIN S G, RAMIN S, EBRAHIM E. Vibration analysis and design optimization of sandwich beams with constrained viscoelastic core layer[J]. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 15(2): 203—228.
- [20] RAY M C, KUMAR R S. Active constrained layer damping of smart laminated composite sandwich plates using 1—3 piezoelectric composites[J]. *International Journal of Mechanical Materials Design*, 2012, (8): 197—218.
- [21] DING X B, ZHANG H P. Effects of small molecular additives on the damping performance of CPE/ZKF/EBP three-component hybrids[J]. *Journal of Materials and Science*, 2009, 44(10): 2683—2687.
- [22] YE H J Y. Vibration and damping analysis of orthotropic cylindrical shells with electro-rheological core layer[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2011, 15(4): 293—303.
- [23] LIU Q X, DING X B, ZHANG H P, et al. Preparation of high-performance damping materials based on carboxylated nitrile rubber: combination of organic hybridization and fiber reinforcement[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 114(5): 2655—2661.
- [24] SHAN P H, RAY M C. Active control of laminated composite truncated conical shells using vertically and obliquely reinforced 1-3 piezoelectric composites[J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2012, (32): 1—12.
- [25] 王娟娟, 冯拉俊, 晁小练, 等. CNT/PZT/RTV 复合材料的相结构及阻尼吸声性能[J]. *材料科学与工程学报*, 2014, 32(2): 200—206.
WANG J J, FENG L J, CHAO X L. Phase structure, damping and absorption performances; CNT/PZT/RTV[J]. *Journal of Material Science and Engineering*, 2014, 32(2): 200—206.
- [26] 魏迪永. 高阻尼永磁磁性橡胶的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
WEI D Y. Permanent magnetic rubber with high damping capacity[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [27] LAKES R S. High damping composite materials: effect of structural hierarchy[J]. *Journal of Composite Materials*, 2002, 36(3): 287—296.
- [28] MOREIRA R A S. Multilayer damping treatments: modeling and experimental assessment[J]. *Journal of Sandwich Structure and Materials*, 2009, (12): 181—198.
- [29] ZHAO J, HO K C, SHAMSUDDIN S R, et al. A comparative study of fiber/matrix interface in glass fibre reinforced polyvinylidene fluoride composites[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*, 2012, 413: 58—64.
- [30] ARMANDO P P, ANDRES A G, JOAQUIN M et al. Methodology for damping measurement of engineering materials: application to a structure under bending and torsion loading[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2014, (7): 1—11.
- [31] REBILLAT M, BOUTILLON X. Measurement of relevant elastic and damping material properties in sandwich thick plates[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, 330(25): 6098—6121.
- [32] DIMITRIS I C, DIMITRIS S V, DIMITRIS A S. Prediction of material coupling effect on structural damping of composite beams and blades [J]. *Composite Structures*, 2012, 94(5): 1646—1655.
- [33] 张少辉, 陈花玲, 梁天锡. 纤维增强树脂基复合材料阻尼特性的数值模拟[J]. *航空材料学报*, 2004, 24(3): 10—14.
ZHANG S H, CHEN H L, LIANG T X. Numerical simulation on the damping characteristic of fiber reinforced composite [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2004, 24(3): 10—14.
- [34] ARAUJO A L, MOTASOARES C M, MOTASOARES C A. Finite element model for hybrid active-passive damping analysis of anisotropic laminated sandwich structures [J]. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2010, 12(4): 397—418.
- [35] ARAUJO A L, MARTINS P, MOTA SOARES C M, et al. Damping optimization of viscoelastic laminated sandwich composite structures[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2009, 39(6): 569—579.
- [36] 潘利剑, 张博明, 戴福洪. 黏弹阻尼层共固化复合材料不同温度下的阻尼性能[J]. *复合材料学报*, 2008, 25(1): 168—172.
PAN L J, ZHANG B M, DAI F H. Damping properties of co-cured composites with interleaved viscoelastic damping layers at different temperatures [J]. *Acta Materiae Composite Sinica*, 2008, 25(1): 168—172.
- [37] PAN Li-jian, ZHANG Bo-ming. A new method for the determination of damping in co-cured composite laminates with embedded viscoelastic layer [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 319(3—5): 822—831.
- [38] 张少辉, 柴洪友, 马海全, 等. 黏弹阻尼技术在航天器上的应用与展望[J]. *航天器工程*, 2011, 20(1): 120—128
ZHANG S H, CHAI H Y, MA H Q, et al. Progress and prospect on viscoelastic damping technology for spacecraft application

- [J]. Space Craft Engineering, 2011, 20(1): 120—128.
- [39] 陈健, 冯淑红, 柳征勇. 航天器系统级减振/隔振应用研究及其进展[J]. 强度与环境, 2013, 40(5): 37—42.
CHEN J, FENG S H, LIU Z Y. Development of application for planet system-level vibration reduction [J]. Structure and Environment Engineering, 2013, 40(5): 37—42.
- [40] 孙大刚, 李占龙, 韩斌慧, 等. 基于共固化阻尼层结构的风力机叶片抑颤分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(19): 93—100.
SUN D G, LI Z L, HAN B H. et al. Flutter-suppressing analysis of wind turbine blades on co-curing damping layer structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(19): 93—100.
- [41] 盛美萍, 王敏庆, 孙进才. 噪声与振动控制技术基础[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
SHENG M P, WANG M Q, SUN J C. Fundamental Technology of Control of Sound and Vibration [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [42] WANG Xiang, LIU Han-xing, OUYANG Shi-xi. Damping properties of flexible epoxy resin[J]. Journal of Wu Han University of Technology, 2008, 23(3): 411—414.
- [43] 王志远, 杨留栓. 泡沫金属基高阻尼复合材料的研究进展[J]. 材料开发与应用, 2004, 19(3): 38—40.
WANG Z Y, YANG L S. Progress of high damping foam metal matrix composite[J]. Development and Application of Materials, 2004, 19(3): 38—40.
- [44] 方前锋, 朱震刚, 葛庭燧. 高阻尼材料的阻尼机理及性能评估[J]. 物理, 2000, 29(9): 541—545.
FANG Q F, ZHU Z G, GE T S. Characterization and mechanism of high damping materials[J]. Physics, 2000, 29(9): 541—545.
- [45] 张忠明, 刘宏昭, 王锦程, 等. 材料阻尼及阻尼材料的研究进展[J]. 功能材料, 2001, 32(3): 227—23.
ZHANG Z M, LIU H Z, WANG J C. Damping of materials and progress in the damping materials[J]. Journal of Functional Materials, 2001, 32(3): 227—23.
- [46] 吕丽, 白书欣, 张虹, 等. 纤维增强聚合物阻尼预测模型的研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(12): 35—38.
LU L, BAI S X, ZHANG H et al. The review of analytical model for predicting the damping of fiber-reinforced polymer composite [J]. Materials Review, 2005, 19(12): 35—38.
- [47] BARRETT D J. Damped composite structures [J]. Composite Structure, 1991, 18(3): 283—294.
- [48] BIGGERSTAFF J M, KOSMATKA J B. Shear measurements of viscoelastic damping materials embedded in composite plates [A]. Smart Structures and Materials 1999: Passive Damping and Isolation [C]. Newport Beach: Proceedings of the SPIE, 1999. 82—93.
- [49] ROBINSON M J, KOSMATKA J E. Embedding viscoelastic damping materials in low-cost VARTM composite structures [A]. Smart Structures and Materials 2005: Damping and Isolation [C]. Bellingham: Proceedings of the SPIE, 2005. 349—360.
- [50] MANTENA P R, GIBSON R F. Dynamic mechanical properties of hybrid polyethylene/graphite composites[J]. Advanced Materials: Looking Ahead to the 21st Century, 1990. 370—382.
- [51] SARGIANIS J, SUHR J. Core material effect on wave number and vibrational damping characteristics in carbon fiber sandwich composites[J]. Composites Science and Technology, 2012, 72(13): 1493—1499.
- [52] TOSHIO T. Smart CFRP materials for application in low-vibration structures[A]. The International Conference on Composite Interfaces[C]. Tokyo: Interface 21, 2012. 1—4.
- [53] PAN Li-jian, ZHANG Bo-ming, DAI Fu-hong. Multi-objective optimization of co-cured composite laminates with embedded viscoelastic damping layer [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2009, 25(5): 708—712.
- [54] 吕丽, 白书欣, 张虹, 等. 玻璃纤维芯-铅网增强橡胶复合材料动态性能[J]. 复合材料学报, 2006, 23(6): 37—48.
LU L, BAI S X, ZHANG H et al. Dynamic properties of glass-fiber-cored lead-net reinforced rubber composite[J]. Acta Materialiae Composite Sinica, 2006, 23(6): 37—48.
- [55] 余启勇, 马玉瑗, 郭万涛, 等. 结构阻尼复合材料及其研究进展[J]. 材料工程, 2007, (1): 253—261.
YU Q Y, MA Y P, GUO W T. Structural damping composite and its research progress[J]. Journal of Material Engineering, 2007, (1): 253—261.
- [56] 杨加明, 张义长, 吴丽娟. 多层黏弹性复合材料结构阻尼性能优化设计[J]. 航空学报, 2011, 32(2): 265—269.
YANG J M, ZHANG Y C, WU L J. Damping optimization of composite structures with multi-interleaved viscoelastic layers [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(2): 265—269.
- [57] 杨加明, 钟小丹, 赵艳影. 复合材料夹杂双层黏弹性材料的应变能和阻尼性能分析[J]. 工程力学, 2010, (3): 133—138.
YANG J M, ZHONG X D, ZHAO Y Y. Strain energy and damping analysis of composite laminates with two interleaved viscoelastic layers[J]. Engineering Mechanics, 2010, (3): 133—138.
- [58] 杨雪, 王源升, 朱金华, 等. 多层阻尼复合结构阻尼性能[J]. 复合材料学报, 2005, 6(3): 175—181.
YANG X, WANG Y S, ZHU J H. Damping properties of the composite structures with multilayered damping materials[J]. Acta Materialiae Composite Sinica, 2005, 6(3): 175—181.
- [59] 范永忠, 孙康, 吴人洁. 环氧树脂混杂复合材料的阻尼性能研究[J]. 功能材料, 2000, 31(增刊 1): 94—98.
FAN Y Z, SUN K, WU R J. Investigation on the damping properties of hybrid fibers reinforced epoxy resin composite materials [J]. Functional Materials, 2000, 31(Suppl 1): 94—98.
- [60] 吴医博, 郭万涛, 冀冰. 一种适用于内嵌阻尼层夹芯复合材料真空辅助成型方法[P]. 中国专利: ZL 201110040105.6, 2011-02-18.
WU Y B, GUO W T, JI B. A vacuum assisted resin transfer molding suitable for Sandwich composites inserted with damping layer[P]. Chinese patent, ZL 201110040105.6, 2011-02-18.
- [61] 郭万涛, 冀冰, 吴医博. 一种结构性高阻尼纤维增强复合材料[P]. 中国专利: ZL 200910172342.0, 2009-09-22.
GUO W T, JI B, WU Y B. A structural fiber reinforced compos-

- ites with high damping properties [P]. Chinese Patent, ZL 200910172342.0, 2009-09-22.
- [62] 梁森, 米鹏. 嵌入式共固化复合层合材料结构的制作工艺[P]. 中国专利: ZL 20101017721278.8 2010-05-10.
- LIANG S, MI P. The making craft of embedded co-cured composites with laminated structure[P]. Chinese Patent, ZL20101017721278.8, 2010-05-10.
- [63] 益小苏, 刘燕峰, 马宏毅, 等. 一种植物纤维叠层混杂功能性复合材料层合板的制备方法[P]. 中国专利: ZL 201210054309.X, 2012-03-02.
- YI X S, LIU Y F, MA H Y. A kind of preparation methods of plant fiber laminated hybrid functional laminated composites[P]. Chinese Patent: ZL 201210054309.X, 2012-03-02.
- [64] 韩俐伟. 三元互穿聚合物网络材料阻尼性能研究[J]. 化工新型材料, 2004, 32(8): 22-24.
- HAN L W. Study on damping nature of ternary IPN[J]. New Chemical Materials, 2004, 32(8): 22-24.
- [65] 秦川丽, 蔡俊, 唐冬雁, 等. PU/VER IPN 材料阻尼性能的研究[J]. 材料工程, 2003, (7): 36-40.
- QIN C L, CAI J, TANG D Y, et al. Study on damping properties of PU/VER IPN [J]. Journal of Materials Engineering, 2003, (7): 36-40.
- [66] 王珍, 陈祥宝, 王景鹤. 氢化丁腈橡胶/聚甲基丙烯酸酯互穿聚合物网络研究[J]. 材料工程, 2009, (12): 1-5.
- WANG Z, CHEN X B, WANG J H. Interpenetrating polymer networks based on hydrogenated nitrile rubber and polymethacrylate[J]. Journal of Materials Engineering, 2009, (12): 1-5.
- [67] SUHR J, KORATKAR N A, YE D X, et al. Damping properties of epoxy films with nanoscale fillers[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2006, 17(3): 255-260.
- [68] 王国杰, 孙宇, 曹春平, 等. 黄麻纤维增强聚氨酯复合材料的拉伸性能研究[J]. 塑料工业, 2012 (8): 21-25.
- WANG G J, SUN Y, CAO C P, et al. Research on tensile performance of Jute fiber reinforced composites[J]. China Plastics Industry, 2012, (8): 21-25.
- [69] JAMES J S, KIM H I, ANDRES E, et al. Sound and vibration damping characteristics in natural material based sandwich composites[J]. Composite Structures, 2013, 96: 538-544.
- [70] XU M, FUTABA D N, YAMADA T, et al. Carbon nanotubes with temperature-invariant viscoelasticity from -196 to 1000°C [J]. Science, 2010, 330(6009): 1364-1368.
- [71] SHAN C, ZHAO W, LU X L, et al. Three-dimensional nitrogen-doped multiwall carbon nanotube sponges with tunable properties[J]. Nano Letters, 2013, 13(11): 5514-5520.
- [72] PATHAK S, LIM E J, ABADI P, et al. Higher recovery and better energy dissipation at faster stain rates in carbon nanotube bundles an in-situ study[J]. ACS Nano, 2012, (3): 2189-2197.
- [73] HEHR A, SCHULZ M, SHANOV V, et al. Passive damping of carbon nanotube thread[J]. Journal of Intelligent Material Systems Structures, 2013, 25: 713-719.
- [74] CHUN K, KIM S, SHI M, et al. Hybrid carbon nanotube yarn artificial muscle inspired by spider dragline silk[J]. Nature Communications, 2014, (5), 3322.
- [75] ZENG Y, CI L J, BRENT J C, et al. Design and reinforcement vertically aligned carbon nanotube-based sandwich composites [J]. ACS Nano, 2010, (4): 6798-6804.
- [76] LIN R M, LU C. Modeling of interfacial friction damping of carbon nanotube-based nano-composites [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(8): 2996-3012.
- [77] FALVO M R, TAYLOR R M, HELSER A, et al. Nanometre-scale rolling and sliding of carbon nanotubes[J]. Nature, 1999, 397: 236-238.
- [78] 曾尤, 王函. 纳米炭/环氧树脂复合材料黏弹阻尼性能[J]. 科学通报, 2014, 59(33): 3232-3239.
- ZENG Y, WANG H. Viscoelastic damping of nano-carbon/epoxy composites[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(33): 3232-3239.
- [79] SU Y, WEI H, GAO R, et al. Exceptional negative thermal expansion and viscoelastic properties of graphene oxide paper[J]. Carbon, 2012, 50(8): 2804-2809.
- [80] KORATKAR N. Graphene in composite materials: synthesis, characterization and applications [M]. Lancaster: DEStech Press, 2013.
- [81] 石敏先, 黄志雄, 杨国瑞. PANI-PMN/环氧树脂复合材料的制备[J]. 合成树脂及塑料, 2009, 26(2): 31.
- SHI M X, HUANG Z X, YANG G R. Preparation of PANI-PMN/epoxy resin composites [J]. China Synthetic Resin and Plastic, 2009, 26(2): 31.
- [82] 程细才. P V D F 复合材料的性能及其制备[J]. 中国陶瓷, 2013, 49(8): 1-5.
- CHENG X C. Properties and preparation of PVDF composite material[J]. China Ceramics, 2013, 49(8): 1-5.
- [83] 吴燕杰, 刘军, 孟献丰, 等. PZT 压电陶瓷纤维的制备及性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(1): 580-583.
- WU Y J, LIU J, MENG X F, et al. Fabrication and performance of PZT piezoceramic fibers[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(1): 580-583.
- [84] 郭艳宏, 赵小平, 陈蓉蓉, 等. 有机小分子 DZ 改性 HTPB 型聚氨酯阻尼材料[J]. 材料导报, 2009, 23(增刊1): 5-10.
- GUO Y H, ZHAO X P, CHEN R R. Study on modification by DZ on polyether type polyurethane damping material[J]. Materials Review, 2009, 23(Suppl 1): 5-10.
- [85] 刘昕晖, 陈塑寰. 聚苯胺体系电流变流体的阻尼机理及阻尼模型研究[J]. 固体力学学报, 2001, (1): 12-25.
- LIU X H, CHEN S H. Research for the damping and damping model polyaniline electro-rheological fluid[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2001, (1): 12-25.
- [86] 丁新波, 张慧萍, 晏雄. 杂化材料中有机小分子形态对阻尼性能影响[J]. 材料工程, 2008, (4): 23-27.
- DING X B, ZHANG H P, YAN X. Effect of the state of organic small molecule in hybrid materials on damping properties[J]. Journal of Materials Engineering, 2008, (4): 23-27.
- [87] DUENAS T A, CARMAN G P. Large magnetostrictive response of Terfenol-D resin composites [J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(9): 4696-4701.

- [88] SURESH S. Graded materials for resistance to contact deformation and damage[J]. *Science*, 2001, 292(5526): 2447—2451.
- [89] 沈衡, 朱唐, 梁飞跃, 等. 从低维到高维的仿生材料制备及其应用进展[J]. *中国材料进展*, 2014, 33(4): 201—211.
SHEN H, ZHU T, LIANG F Y, et al. Progress in the preparation and application of bio-inspired materials from low to high dimensional structure[J]. *Material China*, 2014, 33(4): 201—211.
- [90] THIELEN M, SPECK T, SEIDEL R. Viscoelasticity and compaction behavior of the foam-like pomelo peel [J]. *Journal of Materials Science*, 2013, 48(9): 3469—3478.
- [91] 苏航. 玻璃空心微珠/Al 多孔材料压缩及阻尼性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
SU H. Compression and damping properties of glass cenosphere/AL syntactic foams[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [92] 金明江, 赵玉涛, 程晓农, 等. 玻璃纤维/PC 树脂/LY12 铝合金叠层复合材料界面处理及其性能[J]. *机械工程材料*, 2006, 30(5): 51—55.
JIN M J, ZHAO Y T, CHEGN X N. Interfacial-treatment and properties of fiber glass/PC resin/LY12 Al alloy laminated composites[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2006, 30(5): 51—55.
- [93] 金明江, 赵玉涛, 戴起勋, 等. 泡沫铝/PC 树脂/铝合金叠层复合材料的制备与性能研究[J]. *材料科学与工程学报*, 2005, 23(4): 585—588.
JIN M J, ZHAO Y T, DAI Q X, et al. Study on fabrication and properties of Al foams/PC resin/Al alloy laminated composites [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2005, 23(4): 585—588.
- [94] 王翔, 刘韩星, 欧阳世翥, 等. 环氧树脂弹性体的制备及性能研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2008, 27(3): 56—58.
WANG X, LIU H X, OUYANG S X. Research on preparation and characterizing of epoxy elastomer[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2008, 27(3): 56—58.
- [95] ELASSER M S, DIMONIE V L, SPERLING L H. Morphology design and characterization of IPN-containing structured latex particles for damping applications[J]. *Colloids and Surface A: Physiochemical and Engineering Aspects*, 1999, 153(1—3): 241—253.
- [96] 李法华. 功能性橡胶材料及制品[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 41—46.
LI F H. Functional Rubber Materials and Product[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. 41—46.
- [97] 李明俊, 徐泳文, 万诗贵. 各向异性层合阻尼结构理论及其阻尼特性分析[J]. *南昌航空工业学院学报*, 2001, 15(3): 1—4.
LI M J, XU Y W, WAN S G. A structural theory and its damping analysis of laminated isotropic damped plates[J]. *Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology*, 2001, 15(3): 1—4.
- [98] FINEGAN I C, GIBSON R D 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.
- [99] HARGOU K, PINGKARAWAT K, MOURITZ A P, et al. Ultrasonic activation of mendable polymer for self-healing carbon-epoxy laminates[J]. *Composites: Part B*, 2013, 45(1): 1031—1039.
- [100] NI R G, ADAMS R D. The damping and dynamic modulus of symmetric laminated composite beams theoretical and experimental results[J]. *Journal of Composite Materials*, 1984, 18(2): 104—121.
- [101] SARAVANOS D A, CHAMISE C. Computational simulation of damping in composite structures[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1991, 10(3): 256—278.
- [102] RIKARDS R, CHATE A, KORJAKIN A. Vibration and damping analysis of laminated composite plates by the finite element method[J]. *Engineering Computations*, 1995, 12(1): 61—74.
- [103] BERTHELOT J M. Damping analysis of laminated beams and plates using the ritz method[J]. *Composite Structures*, 2006, 74(2): 186—201.
- [104] 林松, 徐超, 吴斌. 嵌入多层黏弹性胶膜复合材料阻尼工字梁的多目标设计优化[J]. *计算机辅助工程*, 2010, 19(4): 44—49.
LIN S, XU C, WU B. Multi-objective design optimization on composite damping I-shaped beam with co-cured embedded viscoelastic layers[J]. *Computer Aided Engineering*, 2010, 19(4): 44—49.

基金项目: 国家自然科学基金 (2011CB605605); 国家 863 计划 (2015AA03A201)

收稿日期: 2014-11-19; **修订日期:** 2015-03-23

通讯作者: 温月芳 (1967—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为碳纤维及碳纤维复合材料, 联系地址: 浙江省杭州市浙大路 38 号浙江大学 13 楼 409(310013), E-mail: wenyf@vip163.com