

引用格式:王婷婷,高军鹏,张宝艳,等. 纤维增强聚合物阻尼复合材料研究进展[J]. 材料工程,2024,52(11):1-11.
WANG Tingting, GAO Junpeng, ZHANG Baoyan, et al. Research progress in fiber reinforced polymer damping composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(11): 1-11.

纤维增强聚合物阻尼复合材料研究进展

Research progress in fiber reinforced polymer damping composites

王婷婷,高军鹏,张宝艳*,马兆丹,王伟翰,许 虎
(中国航空制造技术研究院复合材料技术中心,北京 101300)
WANG Tingting, GAO Junpeng, ZHANG Baoyan*,
MA Zhaodan, WANG Weihuan, XU Hu
(AVIC Manufacturing Technology Institute Composite
Technology Center, Beijing 101300, China)

摘要:纤维增强聚合物复合材料在航空航天、汽车舰船、轨道交通等领域广泛应用。随着航空航天领域轻量化和高速化的进展以及精密仪器设备自动化技术的不断发展,振动问题日益凸显,需要开发兼具高力学性能和高振动阻尼性能的新型结构-阻尼复合材料。本文以近十年纤维增强聚合物阻尼复合材料研究为基础,阐述了材料的阻尼机理,综述了聚合物基体、增强纤维、界面等因素对纤维增强聚合物复合材料阻尼性能的影响,为进一步开发具有所需阻尼性能的纤维增强聚合物复合材料提供了参考。最后讨论了纤维增强聚合物阻尼复合材料目前存在的问题及值得关注的发展方向,如新材料新方法新机制的开发、复合材料阻尼性能与力学/工艺性能的协同优化、组分-材料-结构的阻尼性能对应关系等。

关键词:阻尼;聚合物复合材料;纤维;界面;减振

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000109

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2024)11-0001-11

Abstract: Fiber reinforced polymer composites are widely used in aerospace, automotive, shipbuilding, rail transportation, and other fields. With the development of lightweight high-speed aerospace and precision instrument automation, vibration problems are increasingly prominent, and it is necessary to develop new structural-damping composites with high mechanical properties and high vibration damping performance. Based on the research of fiber reinforced polymer damping composites in the past decade, the damping mechanism of the material was described, and the influence of polymer matrix, reinforced fiber, interface and other factors on the damping performance of fiber reinforced polymer composites was summarized, providing a reference for further developing fiber reinforced polymer composites with the required damping performance. Finally, the existing problems and development directions of fiber reinforced polymer damping composites are discussed, such as the development of new materials, new methods, new mechanisms, the co-optimization of damping properties of composite materials and mechanical/technological properties, and the corresponding relationship between the damping properties of components, materials and structures.

Key words: damping; polymer composites; fiber; interface; vibration reduction

纤维增强聚合物复合材料因其和比强度比模量高、可一体化成型、可设计等优点,广泛应用于航空航天、汽车舰船、轨道交通等领域^[1-2]。随着航空航天领域轻量化和高速化的进展,以及精密仪器设备自动化

技术的不断发展,振动、噪声及其引发的失效等问题日益凸显^[3]。振动会对设备的精度及运行的稳定造成影响,对于航空航天飞行器,会产生相应的动响应/载荷、结构疲劳和动力学稳定性风险。噪声会影响环境

舒适性,甚至危害人体健康,随着声探测技术的发展,噪声还会引发突出的隐蔽性问题^[4]。因此,减振降噪已经成为亟待解决的关键性问题。

向结构中添加阻尼材料是减振降噪最有效的手段之一^[5]。根据添加阻尼材料的方式不同,可以分为两种技术:附加阻尼减振技术和结构与阻尼一体化技术^[6]。其中,附加阻尼减振方法对结构的模态频率和振型影响较小,适用于事后修改结构。然而,该方法受到构件尺寸、安装空间以及增加质量等因素的限制^[7],并且容易发生分层剥落问题^[8]。相比之下,结构与阻尼一体化复合材料既具有较高的刚度和强度,又具有较高的结构阻尼、承重和减振作用^[9],它可以与原有结构材料共固化,在不过多改变设计布置和增加技术风险的情况下实现功能一体化,并且有明显减重优势。通过合理的结构设计,还可对材料综合性能进行调节。基于飞行器减重设计等要求,实现高强度-高阻尼的结构-功能一体化设计也成为研究的热点问题之一^[10]。

1 阻尼基本概念

1.1 阻尼定义

阻尼是指在动力学系统中,机械能逐渐消耗的现象。阻尼基本定义如式(1)所示。

$$Q^{-1} = \frac{\Delta W}{2\pi W} \quad (1)$$

式中: ΔW 是振动一周时单位体积所消耗的能量; W 是振动一周时单位体积所储存的最大弹性能量; Q 为振动品质因子。当阻尼增大时,结构对振动能量的散失能力也相应增强^[11]。

1.2 阻尼表征

相位角正切值($\tan\delta$)又称损耗因子(η),为损耗模量(E'')与储能模量(E')的比值,表征应变与应力的相位角之差 δ 的正切值, δ 越大时,应变滞后于应力就越明显, $\tan\delta$ 的值就越大,阻尼性能越好^[12]。 $\tan\delta$ 表征方法为动态热机械分析(DMA)。DMA测试方法简单快捷、可靠性高,是目前最常用的阻尼性能表征方法之一。

吸声系数(α)是入射声能(E_i)和反射声能(E_r)之差与入射声能的比值,其值越大,吸声能越高,材料的阻尼性能越好。

品质因子倒数(Q^{-1})、对数衰减率(ϕ)、比阻尼能力(ψ)、吸声系数(α)、阻尼比(ξ)等均来源于对材料振动的表征,分别表征了材料振动时共振峰的尖锐程度、振幅的衰减程度、振动一周单位体积消耗的能量

与储存的最大弹性能量的比值、阻尼系数与临界阻尼系数之比等,其数值越大,材料的阻尼性能越好。

1.3 纤维增强聚合物复合材料阻尼机理

对于纤维增强聚合物复合材料的阻尼机理,一般认为有以下几种^[6,13]:(1)聚合物基体和纤维材料的固有黏弹性;(2)界面引起的阻尼;(3)由材料破坏引起的阻尼;(4)黏弹性阻尼;(5)热弹性阻尼。其中(1)和(2)为主要机理,多数研究工作都集中于此。纤维增强聚合物复合材料的损耗因子比金属材料损耗因子高1~2个数量级,但大多数情况下仍无法达到工程应用需求,需对复合材料的阻尼性能进行提升。本文主要从聚合物基体、增强纤维和界面三个方面综述复合材料阻尼增强方法及研究进展。

2 复合材料阻尼增强方法及研究进展

2.1 聚合物基体

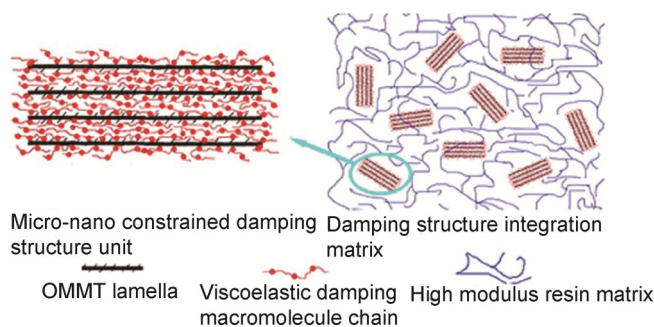
纤维增强聚合物复合材料阻尼的主要贡献者是基体固有的黏弹性阻尼,由大分子链网络发生变形后的松弛和恢复引起^[14]。基体在动载荷作用下同时承受拉伸应力和剪切应力,相关动力学性能主要受基体阻尼控制^[15]。

用于提升聚合物基体阻尼性能的方法主要有:聚合物共混、共聚、互穿网络聚合物(IPN)、有机小分子杂化改性、填料改性等。将两种以上的聚合物以共聚、共混或互穿网络的方式复合,可抑制聚合物分子链运动,拓宽其玻璃化转变区间,从而拓宽其阻尼温域和频率范围,提高复合材料阻尼性能。IPN是一类重要的复合材料改性方法^[16],由于其特殊性能受到了广泛的关注。有机小分子杂化改性主要依靠杂化体系中存在大量的氢键,一定温度下会不断重复断键-成键-断键的过程,进而消耗能量,改善材料体系阻尼性能。

2.1.1 分子结构改性

Mao等^[17]以羧基封端丁二烯丙烯腈共聚物和环氧封端丁二烯丙烯腈共聚物液体橡胶夹层有机蒙脱石为材料,制备了具有高能量衰减能力的微纳米约束阻尼结构单元(M-NCDSU),并与环氧树脂共混,获得了球形橡胶相均匀分散在环氧树脂基体中的两相形貌,如图1所示。结果显示随M-NCDSUs的加入,抗拉强度略有下降,而动态力学分析测得的阻尼性能显著提高,表现出优异的综合性能。

Shi等^[18]讨论了使用部分填充的聚氨酯/聚脲(PU/PUA)微胶囊和E51环氧树脂(EP)制成的复合材料的阻尼性能。制备了7种类型的微胶囊,区别在

图 1 微纳米约束阻尼结构集成材料示意图^[17]Fig. 1 Schematic illustration of micro-nano constrained damping structure integration material^[17]

于其芯材具有不同玻璃化转变温度 T_g , 进而确定了调节 $\tan\delta$ 和 T_g 更有效的微胶囊浓度。系列复合材料达到最高 $\tan\delta$ 为 0.82。通过控制芯材 T_g , 将复合材料在低温区域的 $\tan\delta$ 由 0.12 提高到 0.29, $\tan\delta > 0.3$ 的温度范围为 77.1~114.8 °C。余晨曦等^[19]使用聚硅氧烷改性 PU 预聚体与 E-44 EP 制备出一系列 IPN, 研究表明, 当 PU 和 EP 质量比为 9:1 时, IPN 的 T_g 由纯 PU 的 -68 °C 升高至 -45 °C, 阻尼温域向高温方向偏移。Zhang 等^[20]等采用一步真空辅助填充工艺, 制备了 PU/EP IPN 填充的石墨烯气凝胶, 结果表明, 复合材料室温 $\tan\delta$ 提高至 0.281, $\tan\delta > 0.3$ 的温度范围扩大到 25.5~81.2 °C, 同时抗弯强度、弯曲模量和邵氏 D 硬度均有提高。

IPN 在长期的能量吸收和耗散过程中会逐渐出现疲劳微裂纹和断裂。因此, IPN 从损坏中恢复的能力是必要的, 这可以大大延长其使用寿命。Li 等^[21]以 PU 和交联 EP 为基础, 设计并制备了几种新型自修复互穿聚合物网络。含有动态二硫键的 IPN 表现出良好的阻尼和自修复性能, IPN-80/20 的损耗因子在 -0.8~65.5 °C 之间超过 0.3, 涵盖了室温下的工作温度范围。此外, PU/EP IPN 还具有优异的形状记忆性能、自修复能力和热稳定性。

Babkina 等^[22]提出了几种基于两种具有不同预聚物成分的初始 PU 设计阻尼 PU 材料的方法, 采用 DMA 研究了产物黏弹性, 并评估了阻尼能力。研究结果发现, 产物的损耗因子与有效阻尼温度范围 ($\eta \geq 0.3$) 均取决于复合材料的设计, PU 材料采用混合基和双层复合等设计方式的优点是易于控制温度区域的有效阻尼, 所提出的 PU 材料设计为开发高性能阻尼材料提供了一种新方法。

2.1.2 填料改性

除分子结构改性外, 纳米粒子与聚合物之间的相互作用和摩擦也可以改善聚合物复合材料的阻尼性

能^[23-24], 填料对聚合物基体的阻尼改性主要体现在填料与基体间、填料之间的摩擦耗能, 以及填料本身的能量耗散^[25]。

在复合材料阻尼减振领域, 目前常用的改性填料主要有: 氧化铝、橡胶微粒、石墨烯、碳纳米管等。将不同填料改性复合材料阻尼性能研究汇总如下表 1^[26-35]所示。

Gong 等^[28]将二维多层氧化石墨烯(GO)添加到碳纤维增强树脂复合材料(CFRP)中, 当应变为 0.23%、频率为 1 Hz 时, CFRP 的阻尼损耗因子(0.0345)增加了 113%。Erkliğ 等^[29]将石墨烯纳米片(GNPs)添加到 EP 中, 结果表明 0.5% (质量分数, 下同)的 GNPs 使不同铺层碳纤维/玻璃纤维环氧复合材料的阻尼比分别提高了约 42.1%, 51.6%, 16.7% 和 17.2%。

填料添加量是影响复合材料阻尼性能的重要因素。Subramani 等^[30]采用不同质量分数(0%, 0.5%, 1%, 1.5% 和 2.0%)的多壁碳纳米管(MWCNTs)制备复合材料壳体, 结果表明, 随 MWCNT 质量分数的增加, 复合材料壳体结构的固有频率先增大后减小, 在 1% 时达到最大值, 这主要与 MWCNT 的团聚有关, 在 MWCNT 添加较少时, MWCNT 增强环氧树脂与纤维之间的黏结效果较好, 使复合材料壳结构具有更好的载荷传递性能, 提高了结构的刚度和固有频率。而复合材料的阻尼比随 MWCNT 质量分数的增加持续增加, 主要是由于 MWCNTs 含量的增加贡献了更大的界面摩擦。

值得注意的是, 填料的加入并不一定对复合材料阻尼性能有积极影响, Ürer 等^[32]将石墨、碳化硅和碳化硼微粒分别以 5%, 10% 和 15% 的比例添加到环氧树脂中, 结果表明, 只有 15% 碳化硼增强环氧复合材料的第一固有频率略有增加。与纯环氧树脂相比, 添加 10% 石墨和 5% 碳化硼的环氧树脂复合材料的阻尼比增加, 但其他复合材料样品的阻尼比下降。

此外, 对石墨烯、碳纳米管等无机纳米粒子进行表面改性, 使其与复合材料基体形成更加强烈的键接, 是提高复合材料阻尼性能的又一有效途径。Chen 等^[33]制备的聚多巴胺功能化石墨烯纳米片与热塑性聚氨酯纳米复合材料的损耗因子从 0.32 提升至 0.38, 阻尼温域也向高温方向移动 12~15 °C。Wang 等^[34]制备了一系列不同尺寸的羧基多壁碳纳米管(C-MWCNT)增强的环氧树脂纳米复合材料, 结果表明, C-MWCNT 的大长径比和高比表面积同步改善了力学性能和阻尼性能, 但降低了 T_g 。团聚对纳米复合材料的同步增强有负面影响, 但降低了对 T_g 的负面影响, 证明具有适当技术参数的 C-MWCNTs 在适当的

表 1 不同填料改性复合材料阻尼性能
Table 1 Damping performance of composites modified with different fillers

Filler	Composites	Damping characterization method	Key finding	Reference
Nano- Al_2O_3	Carbon fiber/glass fiber reinforced epoxy resin composite	Free vibration test	The addition of nano- Al_2O_3 can improve the bending modulus and damping ratio, while reducing the natural frequency	[26]
Rubber crumb	Glass fiber reinforced epoxy resin composite	Free vibration test	The addition of rubber crumb significantly improves the damping characteristics of the material	[27]
Two-dimensional multilayer graphene oxide (GO)	Carbon fiber reinforced epoxy resin composite	DMA	Deposition of GO on the carbon fiber surface can enhance the damping performance of carbon fiber reinforced epoxy resin composite	[28]
Graphene nanosheets(GNPs)	Carbon fiber/glass fiber reinforced epoxy resin composite	Experimental modal analysis	The addition of GNPs can improve the damping ratio of the composite and reduce the natural frequency and loss modulus	[29]
Multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs)	Glass fiber reinforced epoxy resin composite	Free vibration test	The addition of MWCNTs can increase their natural frequency and damping coefficient	[30]
Micron sized aluminum trihydrate, multi-walled carbon nanotubes, and graphene nano platelets	Glass fiber reinforced epoxy resin composite	DMA	The temperature range of the glass region is extended, and the peak damping coefficient is increased	[31]
Graphite, silicon carbide and boron carbide microparticles	Epoxy resin nanocomposites	Free vibration test	The greatest reduction in natural frequency was observed at 5% of each filler	[32]
Polydopamine functionalized graphene nanoplatelet (PDA-GNP)	Thermoplastic polyurethane (TPU) nanocomposites	DMA	The loss factor of the composite material increases, and the damping temperature range moves towards high temperature	[33]
Carboxylic multi-walled carbon nanotubes (C-MWCNTs)	Epoxy resin nanocomposites	DMA	The mechanical properties and damping properties of epoxy resin can be improved at the same time, but T_g will be reduced to a certain extent	[34]
Graphene nanoplates(GNP) or amino-functionalized graphene nanoplates (NGNP)	Polyurethane/poly (butyl methacrylate) (PU/PBMA)	DMA	Both the maximum damping peak and the damping temperature range increase with the addition of NGNP	[35]

分散条件下可以同时提高环氧树脂的力学性能和阻尼性能,但 T_g 会在一定程度上减小。

2.2 增强纤维

碳纤维因其高强高模和低密度等特点,在航空航天等领域广泛用于结构材料,但其阻尼性能不足。与碳纤维相比,一些高性能有机纤维更具延展性与黏弹性,可用于增强阻尼行为。目前基于纤维的复合材料阻尼增强方法主要有两种:(1)采用阻尼性能更好的纤维;(2)调整纤维铺层参数与结构等。

2.2.1 高阻尼纤维

阻尼性能较好的纤维主要可分为两类,一类为合成有机纤维,如芳纶纤维、尼龙纤维、超高分子量聚乙烯纤维、聚酯纤维、聚芳酯纤维等,另一类为植物纤维,如大麻、亚麻、苕麻、黄麻、棕榈纤维、香蕉纤维等,两类纤维性能如表 2^[36-37]所示。

合成有机纤维的阻尼性能主要来源于其本身具有的黏弹性。值得注意的是,聚芳酯纤维(商品名 Vectran)分子结构单元由酯基与芳环连接而成,具有优异的减振特性与较好的稳定性,不容易发生松弛现象,抗蠕变性能极佳,可以在恶劣的环境下长时间工作,其力学性能与芳纶纤维相当,而阻尼性能优于碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维等常用纤维^[38]。

Morio 等^[39]评估了分别由高强度型聚芳酯纤维、普通型聚芳酯纤维和芳纶纤维制成的纤维增强聚合物基复合材料(FRP)的减振行为,重点研究了循环加载下应力-应变曲线的滞回曲线,以及由滞回曲线得到的耗散能和应变能的变化。研究表明,在高循环荷载下,高强度型聚芳酯 FRP 的阻尼比高于其他 FRP。

植物纤维在成分和微观结构方面与传统纤维不

表 2 合成有机纤维与植物纤维性能^[36-37]

Table 2 Properties of synthetic organic fibers and cellulose fibers ^[36-37]				
Fiber	Density/ (g·cm ⁻³)	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa	Elongation/ %
Vectran	1.40	3400	70	4
PET	1.38	1100	14	15
Nylon	1.14	1000	10	20
Aramid	1.44	3000	65	4
UHMWPE	0.95	3400	110	4
Jute	1.23	187-773	20-55	1.5-3.1
Linen	1.38	343-1035	50-70	1.2-3
Sisal	1.20	507-855	9-22	1.9-3
Ramie	1.44	400-938	61.4-128	2-4
Hemp	1.35	580-1110	30-60	1.6-4.5
Coir	1.20	175	6	15-25
Kenaf	1.20	295-930	22-60	2.7-6.9
Banana	1.50	529-914	27-32	5-6
Curaua	0.20	1250-3000	30-80	4.5-6
Pineapple	1.50	170-1627	60-82	1-3
Abaca	1.50	430-813	31.1-33.6	2.9
Bamboo	0.6-1.1	140-441	11-36	1.3-8
Nettle	1.51	650	38	1.7
Flax	1.5	300-800	30-60	2-4
Palm	0.7-1.5	150-500	3.24	17-25

同,具体表现在其独特的细胞壁层和复杂的横截面积。除复杂的形态外,植物纤维还具有聚合物成分和分层组织,这种结构赋予植物纤维黏弹性,此外,纤维束内纤维界面处的摩擦和纤维的内摩擦也是阻尼的潜在来源。以亚麻纤维为例,如图 2^[40]所示,亚麻纤维具有多边形截面,并排列成同心细胞壁层,中间有一个小通道,称为管腔。外细胞壁称为初级细胞壁,厚度约为 200 nm,该结构可确保纤维在长度方向的连续性,由果胶、结晶不良的纤维素和木葡聚糖组成。大

部分纤维细胞壁由次级壁组成,分为三个不同的层: S1(厚度为 0.5~2 μm)、S2(厚度为 5~10 μm)和 S3(厚度为 0.5~1 μm)。主层 S2 约占总截面的 80%,由高度结晶的纤维素原纤维组成,螺旋缠绕在无定形半纤维素和果胶的基质中。纤维素原纤维与纤维轴线的角度约为 9°,称为微纤维角(MFA),次级细胞壁原纤维的结晶含量约为 65%。上述复杂的形态结构与材料组成,使得亚麻等植物纤维具备优良的阻尼性能。

Rizal 等^[41]比较了使用黄麻和玻璃纤维增强聚酯生产的复合材料的静态和动态行为。采用脉冲激励法(IET)测定了复合材料在动态响应下的动弹性模量、剪切模量和阻尼性能。结果表明两种复合材料的动态剪切模量和阻尼性能具有相似的有效性水平,但黄麻纤维复合材料的扭转阻尼性能更具优势。Hadiji 等^[42]采用自由弯曲振动分析测试方法,对无纺亚麻、大麻、洋麻和玻璃纤维增强聚丙烯(PP)复合材料的阻尼性能进行了评估,确定了其固有频率及损耗因子。结果表明,天然纤维增强的 PP 无纺复合材料均具有比玻璃纤维增强 PP 复合材料更高的损耗因子。Rueppel 等^[43]研究了连续碳纤维和亚麻纤维 FRP 的阻尼行为。使用对数递减测量、动态力学分析和振动束测量,使用不同的方法比较数据。结果表明,在低频和低应变下,亚麻纤维 FRP 的阻尼大约是碳纤维 FRP 的 2~3 倍。Liu 等^[44]综述了植物纤维复合材料的阻尼行为研究进展,经统计,植物纤维复合材料的损耗因子值在 0.7%~14%,而合成纤维复合材料的损耗因子值在 0.24%~2.5%,且植物纤维复合材料的阻尼范围也更广,证明相对于合成纤维,植物纤维的阻尼性能更具优势。

此外,新型阻尼纤维的合成亦值得关注,Li 等^[45]通过干湿纺丝技术制备了丙烯酸酯/聚氯乙烯(ACM/PVC)中空纤维,如图 3^[45]所示。研究结果表明,随着 PVC 含量的增加,玻璃化转变温度的峰值位置不仅向

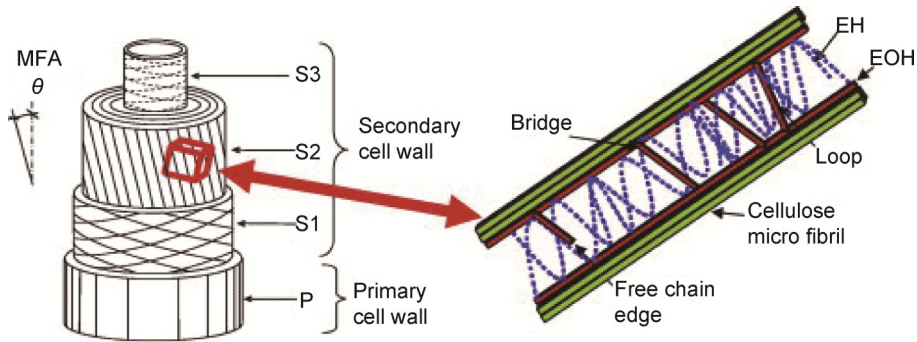


图 2 亚麻纤维示意图^[40]
Fig. 2 Schematic representation of a flax fibre^[40]

较高温度移动,而且其 $\tan\delta > 0.3$ 的温度范围为 $40\sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$,认为 ACM/PVC 混合物是一种很有前途的阻尼材料。在此基础上,Li 等^[46]调整工艺参数制备了不同中空内径、纤维壁厚、壁孔率和壁孔结构的中空纤维,研究发现纤维内气囊的尺寸、壁孔结构、壁孔隙率和气囊壁厚是影响其阻尼性能的关键参数,并验证了其阻尼的机理和效果。

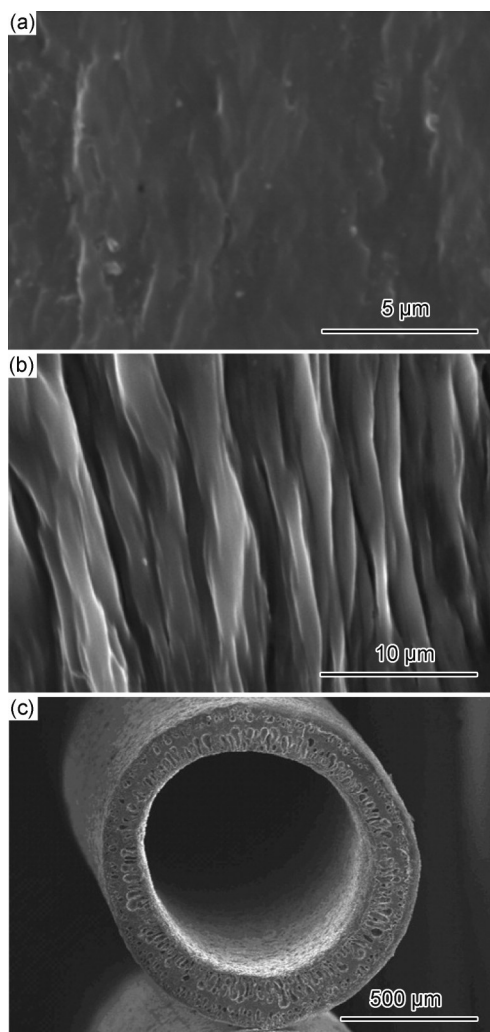


图3 ACM/PVC 复合中空纤维阻尼材料的 SEM 照片^[45]

(a)外表面;(b)内表面;(c)横截面

Fig. 3 SEM images of ACM/PVC composite hollow fiber damping materials^[45]

(a)outer surface;(b)inner surface;(c)cross section

Hufenus 等^[47]展示了在中试工厂规模的稳定熔融纺丝工艺中连续生产液体填充聚合物纤维,不同的聚合物和液体可以在广泛的芯鞘尺寸上成功组合。与相同尺寸的普通聚合物长丝相比,连续液芯纤维(LCF)表现出显著增强的阻尼性能,这种新型纤维代表了一种新型阻尼元件,可以集成到纤维增强的轻质结构中,增强其阻尼性能。Bertocchi 等^[48]通过同轴静

电纺丝设计了由聚己内酯(PCL)聚合物鞘和聚乙二醇(PEG)流体作为芯材组成的多室“芯鞘”纤维。当芯材由 PEG 流体组成时,纤维的机械拉伸会导致不连续的机械阻尼或硬化行为,且机械阻尼的程度与芯材 PEG 的黏度相关。此外,其无纺纤维毡具有较好的能量消耗能力,可有效衰减声音,且声音衰减的程度取决于芯液的黏度。

2.2.2 纤维铺层参数与结构

高阻尼纤维复合材料阻尼性能优异,但其力学承载能力通常较低,众多研究者采用纤维混杂、调节纤维铺层参数与结构等方式,发挥不同纤维优势,以实现复合材料阻尼-结构功能一体化。

Bahrami 等^[49]将编织的亚麻和碳纤维与聚酰胺 11 基体结合成混合生物复合材料,研究了制造工艺及其冲击、拉伸和阻尼性能。结果证明,杂化显著改善了拉伸性能:与纯亚麻复合材料相比,模量提高 233%,强度提高 432%,破坏应变比纯碳纤维复合材料高 19%,阻尼系数比纯碳纤维复合材料高 20%。Erklig 等^[29]探讨了碳纤维混杂对玻璃纤维增强聚合物复合材料减振性能的影响。根据所获得的结果,碳纤维混杂不仅增加了固有频率,而且导致玻璃纤维增强复合材料的阻尼比降低。Dashatan 等^[50]研究了亚麻/环氧树脂复合材料及其碳纤维混合层合板的阻尼和黏弹性,研究结果表明:亚麻层的位置和数量对阻尼行为有贡献,而弯曲刚度主要受碳纤维层位置的控制,通过牺牲 8.1% 的弯曲刚度,可将阻尼比大幅提高 34%。Cai 等^[51]采用真空渗透热压系统制备了不同分层方式的 GO 和碳纤维杂化增强树脂基体复合材料。采用力锤法测试了不同分层方式试样的阻尼性能,实验结果表明,随着 Y 方向层数的增加,复合材料的阻尼性能逐渐增强。[XYXYXY] 铺层阻尼比为 1.187%,是 [XXXXXX] 铺层的 5.3 倍,分析原因为 X 方向层的刚度大,衰减速度较慢,Y 向层数的增加将导致复合材料阻尼性能的整体增加和改善。Rahman 等^[52]研究了纤维含量、纤维取向和频率对亚麻纤维增强 PP 复合材料动态行为的影响,结果表明,在所有参数中,纤维取向对阻尼的影响最大, 45° 和 60° 纤维取向可获得最大损耗因子。纤维含量对损耗因子无明显影响。亚麻纤维/PP 复合材料的损耗因子在 $4\%\sim 5.5\%$ 范围内,与玻璃纤维/环氧树脂复合材料相比,阻尼性能改善 281%~953%。Zhang 等^[53]综合分析了 E-玻璃纤维体积分数和铺设角度对复合材料层合板阻尼和强度的影响。研究表明,通过增大纤维铺设角度,减小玻璃纤维体积分数,可提高复合材料层合板阻尼性能,但其拉伸强度降低。此外采用真空非接触

式阻尼实验方法,证明了空气阻尼对复合材料层合板的阻尼影响非常明显。巩华帅等^[54]探讨了树脂种类、纤维铺层角度、纤维类型及其混合方式对复合材料阻尼性能的影响。结果表明,添加纤维会降低树脂的阻尼性能。不同方向纤维铺层的阻尼性能具有显著差异,但并不会影响频域和温域下变化趋势。增加玻璃纤维含量可以提高阻尼性能,并且在外层使用玻璃纤维比内层更有效。Ahmad等^[55]研究了9种不同编织结构亚麻机织物增强环氧复合材料的动态力学性能,结果表明其阻尼性能受到编织参数的影响,分析认为原因是结构的不均匀性导致其在高温下更易松弛,从而增加损耗模量和阻尼因数。Cai等^[56]建立了纤维增强复合材料的阻尼模型并通过实验验证了模型准确性,探讨了影响复合材料阻尼比和动态响应的因素,结果表明,随着纤维体积分数、层数和每层厚度的增加,复合材料层合板的阻尼比增大,受迫振动响应幅值减小。此外,0°层数越多,0°层离最外层越近,阻尼比越

大。Murčinková等^[57]研究了纤维材料、织物编织、纤维取向、温度、频率、粒径、短纤维体积和环氧树脂类型等8个影响因素对27种不同聚合物复合材料阻尼性能的影响,并获取了其规律:纤维取向的影响最大,纤维材料次之;纤维编织对 E' 的影响大于对 $\tan\delta$ 的影响;在-50~60℃温度范围内, $\tan\delta$ 约为 T_g 温度下的1/10;加载频率为1~10 Hz时, T_g 温度下的 $\tan\delta$ 在0%~22.2%范围内;粒径对颗粒复合材料阻尼的影响最大。

特别地,自动铺丝技术能够实现复杂曲率曲线的铺放,从而提高角度设计的灵活性,在此基础上,一些学者开展了基于曲率纤维铺放的变刚度阻尼复合材料研究。Qi等^[58]研究了变刚度复合材料层合板的阻尼优化设计,即纤维路径可以连续弯曲,不同区域的纤维角度不同,如图4所示。基于模态耗散能原理建立阻尼预测模型,并与模态实验结果进行对比验证。结果表明,优化后变刚度板的阻尼性能可提高50%~70%。

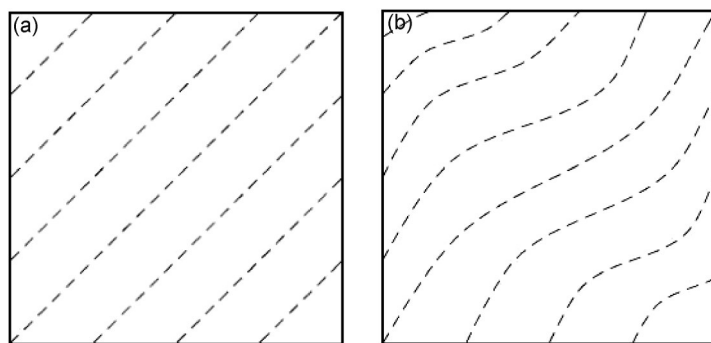


图4 恒定刚度板(a)和变刚度板(b)^[58]

Fig 4 Constant-stiffness plate (a) and variable-stiffness plate (b)^[58]

Wang等^[59]采用自动铺放方法制备了复合材料曲线层合板,并基于模态实验分析其阻尼性能,结果表明, $[\langle 30|45 \rangle]_8$ 复合层压板阻尼比最大,而 $[\langle 60|75 \rangle]_8$ 复合层压板阻尼比最小。且随着纤维角度的增大,复合材料层合板的加速度幅度逐渐减小,并在 $[\langle 30|45 \rangle]_8$ 处达到最小值。随着角度的增加,加速度幅度逐渐增加,当纤维角度为 $[\langle 60|75 \rangle]_8$ 时达到最大值。当纤维角度继续增加时,层压板振幅减小。Pereira等^[60-61]推导了动力学模型,用以估计每种振动模式的特定阻尼能力。基于该模型,分析了层压板每层中每个应变分量对特定阻尼能力的贡献,能够比较在各种模拟场景中为可变角度丝束和传统层压板获得的比阻尼能力和振动固有频率的值,并通过实验验证了部分数值结果,证实了通过纤维转向调节提高复合材料层压板阻尼水平策略的可行性。李亮等^[62]对变角度层合板的减振性能进行了研究分析,分析结果表明,纤维角度

的变化对于不同共振峰的减振效果规律存在明显差异,通过变换纤维变化角度,获取了最优减振性能,较传统直线板提高27.13%,减振性能更为优越。叶帆等^[63]利用模态实验对比分析了纤维曲线角度和铺层数量对层合板振动特性的影响。结果表明:层合板铺层数相同时,纤维曲线角度变化为 $\pm \langle 60|75 \rangle$ 时,可以使前三阶固有频率达到最佳状态;而当纤维曲线角度变化为 $\pm \langle 45|60 \rangle$ 时,则能够实现最大的阻尼比。纤维曲线角度变化相同时,前两阶固有频率随铺层数增加呈先增大后减小的趋势(铺层数量控制在8~16层之间)。

2.3 界面

界面区域在纤维和树脂粘接中起着至关重要的作用。通过改变界面的键合条件,可以实现复合材料的不同性能。已经发现,与强界面关系相比,不良的界面键合会吸收更多的能量。界面阻尼机理与界面脱粘和摩擦密切相关,在纤维增强聚合物复合材料

中,纤维的相对运动是纤维与基体黏结不良的结果,纤维脱粘提高了摩擦因数,从而提高了阻尼效率。为了制造高阻尼材料,需要高能量耗散和高剪切应变。

对于纤维与聚合物基体界面,可以根据二者模量差异进行匹配,增加界面相剪切变形,增加能量耗散,提高阻尼性能,也可对纤维表面进行改性处理,增强界面摩擦增加能耗。以提升复合材料阻尼性能为目标进行的纤维表面改性主要分为三种:(1)采用酸碱溶剂等对纤维表面进行化学处理,这种方法主要为了解决植物纤维与基体间的界面问题;(2)在碳纤维表面添加橡胶、聚多巴胺等有机涂层,增加能量耗散,通过双涂层改性设计等方法,还可实现阻尼性能与力学性能的同步提升;(3)采用功能化碳纳米管等对纤维表面进行处理,增加界面摩擦对能量的耗散。

Senthilkumar等^[64]研究了纤维处理方式对菠萝叶纤维增强聚酯复合材料的影响。NaOH处理纤维表面有助于改善纤维与基体的粘接,但会导致复合材料的阻尼特性较差。用KOH处理纤维制成的复合材料具有优异的阻尼特性,但纤维与基体的粘接较差。Gao等^[65]制备了有丁腈橡胶涂层的三维编织碳纤维增强新型结构阻尼复合材料,采用悬臂梁振动实验和动态力学分析对其阻尼性能进行实验研究,结果表明,丁腈橡胶涂层改性后复合材料阻尼损耗因子达到0.068,提高了120%;在室温及1 Hz的频率下,丁腈橡胶涂层改性后复合材料的损耗因子约为原始复合材料的5倍。同时,其冲击强度和横向剪切强度均有提高,弯曲强度和模量以及纵向剪切强度略有下降。Yan等^[66]在三维编织碳纤维(CF3D)表面涂覆聚偏二氟乙烯(PVDF)和聚多巴胺(PDA)双层,制备了一种新型、结构优异的阻尼复合材料(PVDF&PDA-CF3D/EP),其在低温和低应变下的阻尼系数比CF3D/EP提高了约160%,同时其抗弯强度、弯曲模量和冲击强度分别提高了22%,11.8%和18.1%,复合材料阻尼和力学性能协同增强。这种双涂层改性的思想也为其他结构阻尼复合材料的设计提供了创新的方法。Wang等^[67]采用硅烷化MWCNTs对玻璃纤维表面进行处理,并通过真空灌注工艺制备复合材料。与对照样品相比,所得复合材料的弯曲强度和层间剪切强度分别提高了约24%和22%,玻璃态的弯曲模量和储能模量分别提高了约36%和68%,层间剪切实验下的断裂功提高了约188%,表明复合材料的层间断裂韧性更好,吸能效果更好。且所得复合材料的玻璃化转变温度也有所提高。Ayyagari等^[68]通过相对无损的合成技术在碳纤维织物上生长了MWCNT。MWCNTs贴片生长成三种不同的拓扑结构:均匀、精

细图案和粗图案,并制备了混合CFRP。结果表明,与没有MWCNTs的参考复合材料相比,基于精细图案拓扑的混合复合材料在强度和模量方面都提高了约19%, $\tan\delta$ 提高了46%。这些改进归因于通过放置MWCNT增强的附着力和大界面面积,以及通过诱导互锁机制,允许三种成分在载荷传递、裂纹偏转和阻碍不同热机械载荷下不需要的黏弹性变形中相互作用。

3 结束语

目前国内外关于纤维增强聚合物复合材料阻尼性能研究已取得许多成果,可利用多种途径提升纤维增强聚合物复合材料阻尼性能,其中新型高阻尼纤维如聚芳酯纤维、空心纤维、液芯纤维,新型界面改性方法,新型阻尼耗散机制等方向的发展值得关注,但阻尼性能的提高往往伴随着力学性能的下降,如何实现复合材料阻尼性能与力学性能的同步提升,仍需进一步的研究。此外,目前的研究中很少涉及阻尼改性后复合材料体系工艺性能的相应变化,而优良的工艺性能是阻尼复合材料得到推广应用的必要前提。最后,纤维增强聚合物复合材料的阻尼性能具有各向异性,且会随着温度与频率的变化而变化,表现非常复杂,目前的测试方法和测试标准还需要进一步完善统一,建立不同阻尼性能表征参数之间对应关系,进而建立组分-复合材料-结构的阻尼性能对应关系。

参考文献

- [1] PARVEEZ B, KITTUR M I, BADRUDDIN I A, et al. Scientific advancements in composite materials for aircraft applications: a review[J]. *Polymers*, 2022, 14(22): 5007.
- [2] ZHANG J, LIN G, VAIDYA U, et al. Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications[J]. *Composites Part B*, 2023, 250: 110463.
- [3] SUJON M A S, ISLAM A, NADIMPALLI V K. Damping and sound absorption properties of polymer matrix composites: a review[J]. *Polymer Testing*, 2021, 104: 107388.
- [4] 李文智,曹瑶琴,何志平.基于材料及结构的直升机噪声抑制技术研究进展[J].*航空材料学报*, 2022, 42(2): 1-10.
LI W Z, CAO Y Q, HE Z P. Research progress of helicopter noise suppression technology based on materials/structures[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2022, 42(2): 1-10.
- [5] 倪楠楠,温月芳,贺德龙,等.结构-阻尼复合材料研究进展[J].*材料工程*, 2015, 43(6): 90-101.
NI N N, WEN Y F, HE D L, et al. Process on the research of structure-damping composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2015, 43(6): 90-101.
- [6] 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.
- [7] 王丽, 任昆, 丁新静. 聚合物基复合材料阻尼研究进展[J]. 纤维复合材料, 2015, 32(4): 24-27.
- WANG L, REN K, DING X J. Research progress on damping technology for polymer composites[J]. Fiber Composites, 2015, 32(4): 24-27.
- [8] CHORTIS D I, VARELIS D S, SARAVANOS D A. Prediction of material coupling effect on structural damping of composite beams and blades[J]. Composite Structures, 2012, 94(5): 1646-1655.
- [9] 倪楠楠, 卞凯, 夏璐, 等. 先进复合材料在无人机上的应用[J]. 航空材料学报, 2019, 39(5): 45-60.
- NI N N, BIAN K, XIA L, et al. Application of advanced composite materials for UAV [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(5): 45-60.
- [10] TANG X, YAN X. A review on the damping properties of fiber reinforced polymer composites[J]. Journal of Industrial Textiles, 2020, 49(6): 693-721.
- [11] GEETHAMMA V G, ASALETHA R, KALARIKKAL N, et al. Vibration and sound damping in polymers[J]. Resonance, 2014, 19: 821-833.
- [12] 刘涛. 纤维增强树脂基复合材料阻尼性能的研究进展[J]. 纤维复合材料, 2016, 33(2): 28-36.
- LIU T. The research progress of damping property of fiber reinforced resin matrix composite materials[J]. Fiber Composites, 2016, 33(2): 28-36.
- [13] CHANDRA R, SINGH S P, GUPTA K. Damping studies in fiber-reinforced composites-a review[J]. Composite Structures, 1999, 46(1): 41-51.
- [14] VIEILLE B, ALBOUY W, TALEB L. Viscoelastic viscoplastic model for aeronautical thermoplastic laminates at high temperature: validation on high stress gradient structures[J]. Composites Part B, 2016, 90: 278-286.
- [15] TREVISO A, VAN GENECHTEN B, MUNDO D, et al. Damping in composite materials: properties and models [J]. Composites Part B, 2015, 78: 144-152.
- [16] MORADI G, NASSIRI P, ERSHAD-LANGROUDI A, et al. Preparation of sound absorption material based on interpenetrating polymer network (PU/PMMA IPN)[J]. Health Scope, 2019, 8(2): 107295.
- [17] MAO D, ZOU H, LIANG M, et al. Mechanical and damping properties of epoxy/liquid rubber intercalating organic montmorillonite integration nanocomposites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(2): 39797.
- [18] SHI X, LIU C, LI K, et al. Effect of microcapsules partially filled with viscoelastic acrylate polymer on damping behaviours of epoxy resin [J]. New Journal of Chemistry, 2019, 43(25): 9824-9831.
- [19] 余晨曦, 赵晨, 陈政翰, 等. 线型聚硅氧烷改性聚醚型聚氨酯/环氧树脂互穿聚合物网络[J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(1): 125-129.
- YU C X, ZHAO C, CHEN Z H, et al. Linear polysiloxane modified polyether polyurethane/epoxy resin interpenetrating polymer networks[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2017, 33(1): 125-129.
- [20] ZHANG C, CHEN Y, LI H, et al. Facile fabrication of polyurethane/epoxy IPNs filled graphene aerogel with improved damping, thermal and mechanical properties [J]. RSC Advances, 2018, 8(48): 27390-27399.
- [21] LI X, NIU Y, AI T, et al. Preparation and performance study of polyurethane/epoxy resin interpenetrating networks with self-healing, shape memory, and high damping properties[J]. Macromolecular Chemistry and Physics, 2024, 225(1): 2300311.
- [22] BABKINA N, ANTONENKO O, KOSYANCHUK L, et al. Effect of polyurethane material design on damping ability [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2023, 34(11): 3426-3437.
- [23] KIM J M, KIM D H, KIM J, et al. Effect of graphene on the sound damping properties of flexible polyurethane foams [J]. Macromolecular Research, 2017, 25(2): 190-196.
- [24] KUMAR D, KUMAR N, JINDAL P. Effect of MWCNTs on damping behaviour of polyurethane based nano-composites [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 5636-5640.
- [25] 王挺挺. 碳纤维增强环氧基复合材料结构阻尼一体化研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- WANG T T. Study on integration design of structural damping of carbon fiber reinforced epoxy matrix composites[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [26] MOHAMMED A A K, HASSAN G I, KHDIR Y K. The dynamic behaviour of symmetrical laminated nano-composite containing equal numbers of glass and carbon fibre layers[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 69(5/6): 224-234.
- [27] THANGAPANDIAN N, SATTHIYARAJU M, GANESHKUMAR P, et al. Investigation of vibration, flexural, tribological and flame retardant properties on rubber crumb-reinforced polymer composites[J]. Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology, 2024, 40(3): 305-319.
- [28] GONG L, ZHANG F, PENG X, et al. Improving the damping properties of carbon fiber reinforced polymer composites by interfacial sliding of oriented multilayer graphene oxide[J]. Composites Science and Technology, 2022, 224: 109309.
- [29] ERKLIĞ A, YOUNUS B, DOĞAN N F, et al. Vibration damping properties of graphene nanoplatelets filled glass/carbon fiber hybrid composites [J]. International Polymer Processing, 2023, 38(2): 145-153.
- [30] SUBRAMANI M, RAMAMOORTHY M. Vibration analysis of multiwalled carbon nanotube-reinforced composite shell: an experimental study[J]. Polymers and Polymer Composites, 2020, 28(4): 223-232.
- [31] ARADHYA R, SUNDARA R J. Dynamic mechanical analysis for assessment of carbon fillers in glass fiber epoxy composites [J]. Polymer Composites, 2023, 44(10): 6691-6706.
- [32] ÜRER M, DEMİR A. Free vibration behaviour and some mechanical properties of micro particle reinforced epoxy composites

- [J]. *International Polymer Processing*, 2023, 38(5): 606-614.
- [33] CHEN K, TIAN Q, TIAN C, et al. Mechanical reinforcement in thermoplastic polyurethane nanocomposite incorporated with polydopamine functionalized graphene nanoplatelet [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56(41): 11827-11838.
- [34] WANG T, SONG B, QIAO K, et al. Effect of dimensions and agglomerations of carbon nanotubes on synchronous enhancement of mechanical and damping properties of epoxy nanocomposites [J]. *Nanomaterials*, 2018, 8(12): 996.
- [35] MA C, SHAN Y, WANG N, et al. High-damping polyurethane-based composites modified with amino-functionalized graphene [J]. *High Performance Polymers*, 2023, 35(8): 795-811.
- [36] LIMENEH D Y, YILMA K T. Article review on vectran-super fiber from thermotropic crystals of rigid-rod polymer [J]. *Journal of Engineering*, 2021, 2021(1): 6646148.
- [37] NETO J, QUEIROZ H, AGUIAR R, et al. A review of recent advances in hybrid natural fiber reinforced polymer composites [J]. *Journal of Renewable Materials*, 2022, 10(3): 561-589.
- [38] HOSHIRO H, ENDO R, SLOAN F E. Vectran®: super fiber from the thermotropic crystals of rigid-rod polymer [M] // *High-Performance and Specialty Fibers: Concepts, Technology and Modern Applications of Man-Made Fibers for the Future*. Japan The Society of Fiber Science and Techno, 2016: 171-190.
- [39] MORIO F, TETSUSEI K, YASUMASA N, et al. Evaluation of damping property of woven fabric composites based on polyarylate-fiber under cyclic loading [J]. *Journal of Textile Engineering*, 2023, 69(2): 17-24.
- [40] KERYVIN V, LAN M, BOURMAUD A, et al. Analysis of flax fibres viscoelastic behaviour at micro and nano scales [J]. *Composites Part A*, 2015, 68: 219-225.
- [41] RIZAL M, MUBARAK A Z, ALHAIDAR T R. A comparative study of the static and dynamic characteristics of jute and glass fiber-reinforced polyester composites [J]. *Experimental Techniques*, 2024, 48(2): 229-237.
- [42] HADIJI H, ASSARAR M, ZOUARI W, et al. Damping analysis of nonwoven natural fibre-reinforced polypropylene composites used in automotive interior parts [J]. *Polymer Testing*, 2020, 89: 106692.
- [43] RUEPPEL M, RION J, DRANSFELD C, et al. Damping of carbon fibre and flax fibre angle-ply composite laminates [J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 146: 1-9.
- [44] LIU T, BUTAUD P, PLACET V, et al. Damping behavior of plant fiber composites: a review [J]. *Composite Structures*, 2021, 275: 114392.
- [45] LI M, CHENG Y, XU Y, et al. New damping materials by fabrication of ACM/PVC alloy into hollow fibers [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 129(3): 1334-1339.
- [46] LI M, ZHOU G, XU Y, et al. Airbag damping of the hollow fiber composite with different porosity in the fiber wall [J]. *Fibers and Polymers*, 2019, 20: 450-458.
- [47] HUFENUS R, GOTTARDO L, LEAL A A, et al. Melt-spun polymer fibers with liquid core exhibit enhanced mechanical damping [J]. *Materials & Design*, 2016, 110: 685-692.
- [48] BERTOCCHI M J, VANG P, BALOW R B, et al. Enhanced mechanical damping in electrospun polymer fibers with liquid cores: applications to sound damping [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2019, 1(8): 2068-2076.
- [49] BAHRAMI M, BUTENEGRO J A, MEHDIKHANI M, et al. Tensile, impact, and the damping performance of woven flax-carbon hybrid polyamide biocomposites [J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(5): 3901-3917.
- [50] DASHATAN S H, SIT M, ZHANG Z, et al. Enhanced vibration damping and viscoelastic properties of flax/epoxy composites and their carbon fibre hybrid laminates [J]. *Composites Part A*, 2023, 175: 107819.
- [51] CAI F, JO S H, MA Y, et al. Effect of four groups of GO-CF/EP composites with ideal infiltration structure and different layering ways on damping properties [J]. *Polymers*, 2022, 14(12): 2358.
- [52] RAHMAN M Z, XU H. Damping under varying frequencies, mechanical properties, and failure modes of flax/polypropylene composites [J]. *Polymers*, 2023, 15(4): 1042.
- [53] ZHANG B, LI Z, WU H, et al. Research on damping performance and strength of the composite laminate [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 18281.
- [54] 巩华帅, 梅志远, 陈国涛, 等. 典型船用复合材料阻尼性能试验研究 [J]. *复合材料科学与工程*, 2023(6): 88-94.
- GONG H S, MEI Z Y, CHEN G T, et al. Experimental study on damping performance of typical marine composite materials [J]. *Composites Science and Engineering*, 2023(6): 88-94.
- [55] AHMAD F, YUVARAJ N, BAJPAI P K. Influence of reinforcement architecture on static and dynamic mechanical properties of flax/epoxy composites for structural applications [J]. *Composite Structures*, 2021, 255: 112955.
- [56] CAI B, YAO Z, ZHANG X, et al. Damping model of fiber reinforced composites and factors affecting damping and dynamic response [J]. *Applied Composite Materials*, 2021, 28(5): 1451-1476.
- [57] MURČINKOVÁ Z, POSTAWA P, WINCZEK J. Parameters influence on the dynamic properties of polymer-matrix composites reinforced by fibres, particles, and hybrids [J]. *Polymers*, 2022, 14(15): 3060.
- [58] QI W K, YIN X T, CHENG S. Research on damping properties optimization of variable-stiffness plate [J]. *Journal of Physics: Conference Series IOP Publishing*, 2016, 744(1): 012114.
- [59] WANG X F, WANG H Q, MA C, et al. Analysis of vibration reduction characteristics of composite fiber curved laminated panels [J]. *Composite Structures*, 2019, 227(1): 223-231.
- [60] PEREIRA D A, GUIMARÃES T A M, RESENDE H B, et al. Numerical and experimental analyses of modal frequency and damping in tow-steered CFRP laminates [J]. *Composite Structures*, 2020, 244(4): 112190.
- [61] PEREIRA D A, SALES T P, RADE D A. Multi-objective frequency and damping optimization of tow-steered composite laminates [J]. *Composite Structures*, 2021, 256: 112932.
- [62] 李亮, 王显峰, 赵聪, 等. 纤维角度对变角度层合板减振性能的影响 [J]. *复合材料学报*, 2021, 38(11): 3693-3703.

- LI L, WANG X F, ZHAO C, et al. Influence of fiber angle on vibration damping performance of variable angle laminates[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(11): 3693-3703.
- [63] 叶帆, 王显峰, 王东立, 等. 不同铺层数量下的纤维角度曲线变化复合材料层合板振动特性研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2023(1): 44-54.
- YE F, WANG X F, WANG D L, et al. Research on vibration characteristics of composite material laminated panel with fiber angle curve variation under different laying numbers[J]. *Composites Science and Engineering*, 2023(1): 44-54.
- [64] SENTHILKUMAR K, SABA N, CHANDRASEKAR M, et al. Compressive, dynamic and thermo-mechanical properties of cellulosic pineapple leaf fibre/polyester composites: influence of alkali treatment on adhesion[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2021, 106: 102823.
- [65] GAO F, SONG H, QIU X, et al. The preparation and properties of novel structural damping composites reinforced by nitrile rubber coated 3-D braided carbon fibers[J]. *Polymer Composites*, 2019, 40(Suppl 1): E599-E608.
- [66] YAN D, ZHANG H, LU S, et al. Synergistic modification effect of polyvinylidene fluoride and polydopamine on mechanical and damping properties of three-dimensional braided carbon fibers reinforced composites[J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(7): 5457-5471.
- [67] WANG Y, CHEN T, HAN W, et al. Enhanced interfacial and mechanical properties of glass fabric/epoxy composites *via* grafting silanized carbon nanotubes onto the fibers[J]. *Polymer Composites*, 2023, 44(9): 6027-6038.
- [68] AYYAGARI S, AL-HAIK M, REN Y, et al. Effect of nano-reinforcement topologies on the viscoelastic performance of carbon nanotube/carbon fiber hybrid composites[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(6): 1213.
-
- 基金项目:** 先进复合材料国防科技重点实验室基金(6142904230404)
- 收稿日期:** 2024-02-01; **修订日期:** 2024-07-05
- 通讯作者:** 张宝艳(1967—), 男, 研究员, 博士, 研究方向为先进树脂基复合材料, 联系地址: 北京市顺义区时骏街1号中国航空制造技术研究院复合材料技术中心(101300), E-mail: zhangbaoyan0916@126.com
- (本文责编: 解 宏)