

CIP/GF/CF/EP 吸波复合材料的 制备及力学性能

Preparation and mechanical property of
CIP/GF/CF/EP absorbing composites

张雪霏¹, 周金堂^{1,2,3}, 姚正军^{1,2,3}, 蔡海硕¹, 魏 波¹

(1 南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 211106;

2 南京航空航天大学 面向苛刻环境的材料制备与防护
技术工业和信息化部重点实验室, 南京 211106;

3 江苏省先进金属材料高技术研究重点实验室, 南京 211189)

ZHANG Xue-fei¹, ZHOU Jin-tang^{1,2,3}, YAO Zheng-jun^{1,2,3},

CAI Hai-shuo¹, WEI Bo¹

(1 College of Materials Science and Technology, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2 Key Laboratory
of Materials Preparation and Protection for Harsh Environment, Ministry
of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics
and Astronautics, Nanjing 211106, China; 3 Jiangsu Key Laboratory
of Advanced Metallic Materials, Nanjing 211189, China)

摘要: 为制备兼具力学性能和电磁吸收性能的结构型吸波材料, 采用真空辅助成型工艺设计制备一种以羰基铁粉(CIP)为吸收剂, 玻璃纤维(GF)为透波层, 碳纤维(CF)为反射层, 环氧树脂(EP)为基体的吸波复合材料。研究了不同质量比 CIP/EP 对吸波复合材料力学性能和微波吸收性能的影响。通过 FTIR 和 DSC 分析可知 CIP 未与 EP 发生化学反应。SEM 结果表明 CIP 能够在 EP 树脂基体中均匀分散, 不趋向于纤维表面。力学测试分析结果显示: 当 CIP/EP 质量比达到 30% 时, CIP/GF/CF/EP 复合材料的力学性能最佳, 拉伸强度为 347.56MPa, 拉伸模量为 25.99GPa, 较纯 GF/CF/EP 复合材料提升了 4.3% 和 5.7%; 弯曲强度为 339.6MPa, 弯曲模量为 23.7GPa, 较纯 GF/CF/EP 复合材料提升了 18.2% 和 71.2%。矢量网络分析可知复合吸波板的吸波性能随 CIP 含量的增加而增加, 且吸波损耗反射峰值朝低频段移动。

关键词: 结构吸波材料; 力学性能; 吸波性能; 羰基铁粉; 真空辅助成型

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2018.000622

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2019)10-0141-07

Abstract: In order to prepare structural absorbing materials with mechanical properties and electromagnetic absorption properties, a kind of absorbing composites with carbonyl iron powders (CIP) as absorbent, glass fiber(GF) as the transmittance layer, carbon fiber(CF) as the reflective layer, and epoxy resin(EP) as matrix was designed and fabricated by vacuum assisted resin infusion process. The effect of different mass ratios of CIP/EP on the mechanical properties and microwave absorption properties of the composites was studied. The results of FTIR and DSC suggest that there is not a chemical reaction between CIP and EP. SEM shows that CIP can be dispersed uniformly in EP resin matrix and not toward the surface of the fibers. The results of mechanical tests indicate that the best mechanical properties of the CIP/GF/CF/EP composites are at a mass ratio of 3 : 10 of CIP to EP. The tensile strength and tensile modulus are 347.56MPa and 25.99GPa, 4.3% and 5.7% higher than that of GF/CF/EP composites. The flexural strength and the flexural modulus are 339.6MPa and 23.7GPa, 18.2% and 71.2% higher than that of GF/CF/EP composites. Vector network analysis proves that the absorbing performance of composites absorbing plate is increased and the peak of reflection absorbing loss is moved toward the low frequency band with the increase of CIP.

Key words: structural absorbing material; mechanical property; microwave absorption property; carbonyl iron powder; vacuum assisted resin infusion

近年来,吸波材料作为实现军事武器隐身、解决电磁辐射污染问题的关键材料日益受到人们的广泛关注^[1-4]。吸波材料分为涂覆型和结构型,传统涂覆型吸波材料因其涂层厚度大、结合性能差、密度大、热稳定性差等因素限制了其在航空航天工业中的应用^[5-6]。结构型吸波材料是兼具吸波和承载一体化的功能复合材料,是在高比强、低密度、可整体成型的先进复合材料的基础上发展而来。结构型吸波材料因其质轻高强、兼具吸波承载能力,已成为目前吸波材料研究的热点^[7-9]。

Liang等^[10]通过将介孔和纳米孔嵌入到SiC泡沫微孔骨架中,实现了显著的协同作用,赋予了SiC泡沫优异的吸波性能和力学性能。Choi等^[11]采用纳米导电颗粒分散至玻璃纤维/环氧树脂中,进行了数值模拟与实验验证,获得最佳吸波性能和力学性能的添加颗粒比例。Shan等^[12]系统研究了纳米铁/碳纤维/环氧树脂基吸波材料。研究发现,纳米铁粒子含量为30%时,吸波复合板在6.1GHz获得最佳反射损耗值-16.2dB,抗弯强度为77.78MPa。Liang等^[13]采用原位聚合物包覆-碳化方法,以SiC纳米线为核心材料,制备了结构良好的具有高吸收能力的壳层杂化材料,碳壳层厚度达12nm厚时,具有最佳吸收性能-50dB。望红玉^[14]研究了不同含量的碳类吸收剂对SiC/聚酰亚胺复合材料的吸波性能和力学性能,随碳类吸收剂的增加,复合材料的复介电常数随之增加,弯曲强度则降低。目前,国外的结构型吸波材料已得到较好的发展,并得到广泛应用。国内对于结构型吸波材料的研究更多地侧重于其吸波性能及机理,而对结构型吸波材料的力学性能研究较少,部分难以达到工程应用的要求且制造成本高。因此结构型吸波材料的高性能设计及低成本工艺是亟待解决的新问题。

羰基铁粉(CIP)具有高磁导率、强温度稳定性,低成本等特点,是目前常见的优异的微波吸收剂^[15]。碳纤维(CF)的优点是高弹性模量、低密度、高强度,但成本高且对电磁波反射。将其与高延伸率、低成本,对电磁波具有透波作用的玻璃纤维(GF)进行混合铺放一方面可以弥补单一纤维增强材料的不足,另一方面可以大幅降低成本^[16]。真空辅助成型工艺(VARI)则是一种低成本、强设计性的工艺方法,适用于大型制件以及形状复杂的制件的成型^[17]。

采用VARI工艺设计并制备以CIP为吸收剂,GF/CF为增强相,环氧树脂(EP)为基体的平板型吸

波复合材料,其中将以GF作为吸波层,CF作为反射层,形成两层结构,促使电磁波从GF面入射后部分被CIP吸收损耗,未被损耗的电磁波达到CF层时产生反射,进行二次吸收损耗(见图1)。本工作重点探究CIP含量对吸波复合板的吸波性能和力学性能的影响,分析羰基铁粉在环氧树脂和纤维中的分布情况及其对环氧树脂固化反应过程的影响,并对其作用机制进行分析。

1 实验材料与方法

1.1 实验原料

磷化羰基铁粉(CIP):平均粒径 $5\mu\text{m}$,陕西兴化集团有限公司;环氧树脂(EP):型号No.1-692-2,深圳市郎搏万先进材料有限公司。玻璃纤维网格布(GF):密度为 $120\text{g}/\text{m}^2$,希琳新材料公司。碳纤维斜纹布(CF):型号ST-HO3T-200,密度为 $200\text{g}/\text{m}^2$,无锡盛特碳纤维有限公司。

1.2 实验过程

采用VARI工艺技术制备CIP/GF/CF/EP吸波复合板的工艺流程如图1所示。

钢化玻璃作为平板模具,实验前需将模具清洗干净,粘贴密封胶条,并涂敷脱模剂。将事先裁剪的纤维按照9层玻璃纤维,3层碳纤维的顺序依次放置,尺寸均为 $330\text{mm}\times 330\text{mm}$ 。然后将脱模布、导流网和导流管放置于纤维上,并用胶带固定。导流管主要分布在模腔内部纤维的两端。模具的一端是树脂注入口,与盛放树脂溶液的容器相连,称为注胶管;另一端通过一个树脂收集器与真空泵相连,称为抽气管。所有材料放置完成后,使用真空袋和密封胶条进行密封。随后,使用真空泵抽真空,利用真空负压带走纤维增强体中的空气,使织物压实,并检查模腔内真空度。保持模腔内真空度维持在 -0.09MPa 下30min,使纤维进行预压实。

按质量比为10:3称取环氧树脂和固化剂,混合成为环氧树脂基体。以环氧树脂基体总量为100,分别称取质量分数为0%,10%,30%,50%的CIP。将称取的CIP与环氧树脂基体混合,机械搅拌30min,得到均匀的悬浮液。随后将混合液抽真空除泡30min。混合溶液脱泡后取出,与注胶管相连,利用真空负压将树脂溶液注入模腔内,浸润纤维。待树脂溶液完全渗透纤维后,关闭注胶管,但仍保持模腔内真空状态,以

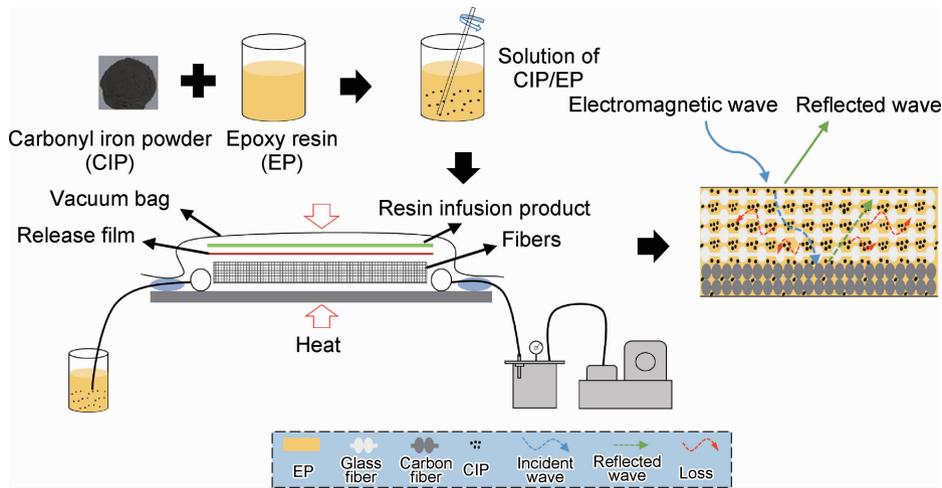


图 1 CIP/GF/CF/EP 吸波复合板 VARI 工艺流程及电磁吸收机理图

Fig. 1 Schematic of VARI process and microwave absorption mechanisms of CIP/GF/CF/EP composites

减少气泡的存在。将模具按照 35℃/2h, 60℃/6h 进行加热固化。固化完全后, 去除表面真空袋, 即得尺寸为 330mm×330mm 的 CIP/GF/CF/EP 吸波复合板。将 CIP/GF/CF/EP 吸波复合板进行水刀切割, 制备成力学性能测试所需尺寸。

1.3 性能测试及表征

采用 Vector 33 型傅里叶红外变换光谱仪 (FTIR) 测定 CIP/EP 浇铸体样品的红外光谱。采用 Q100 型差示扫描量热仪测定 CIP/EP 混合溶液的固化过程, N₂ 气氛, 升温速率为 10℃/min, 测试温度为 30~250℃。采用 S-4800 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察样品截面的微观形貌。CIP/GF/CF/EP 吸波复合板的拉伸性能和弯曲性能按照 GB/T 1447—2005 和 GB/T 1449—2005 采用 CMT5105 电子万能试验机进行测试。采用 N5244A 矢量网络分析仪在 2~18GHz 内采用自由空间法测试吸波复合板的吸波性能。

2 结果与分析

2.1 CIP/EP 复合材料的基团结构分析

图 2 为纯 CIP、纯 EP、30% CIP/EP、50% CIP/EP 的红外光谱图。

从图 2 中可以看出, 1078cm⁻¹ 处是磷酸根的伸缩振动吸收峰, 所采用的磷化 CIP 表面覆盖了一层磷酸膜。在 30% CIP/EP, 50% CIP/EP 中均未出现此峰, 因为 CIP 表面所覆盖的磷酸膜含量较少, CIP 与 EP 复合后易被环氧树脂的强吸收振动峰覆盖, 导致磷酸根的吸收峰难以出现。30% CIP/EP, 50% CIP/EP 的红外光谱均出现了环氧树脂特征峰: 2925cm⁻¹ 亚甲基的 C—H 的伸缩振动、1509cm⁻¹ 苯环骨架的伸缩振

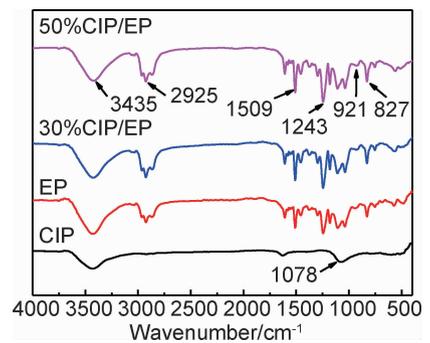


图 2 不同 CIP 含量的 CIP/EP 复合材料的 FTIR 曲线
Fig. 2 FTIR curves of CIP/EP composites with different mass ratios of CIP

动、1243cm⁻¹ 环氧键 C—O 特征峰、921cm⁻¹ 环氧基团特征峰^[18]。对比纯 EP 与 CIP/EP 复合材料的红外光谱可以看出, CIP 的加入并没有使环氧体系出现新的特征峰, 说明没有新的结合键生成, 即两者之间未发生化合反应。

2.2 CIP 含量对 EP 固化反应过程的影响

图 3 为不同 CIP 添加量的环氧树脂进行的 DSC

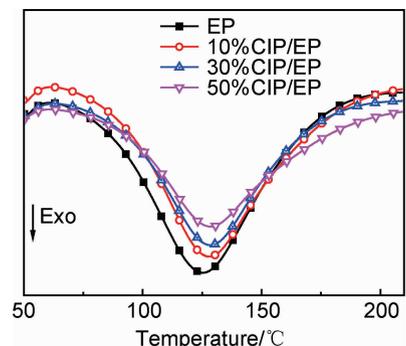


图 3 不同 CIP 含量的 CIP/EP 复合材料的 DSC 曲线
Fig. 3 DSC curves of CIP/EP composites with different mass ratios of CIP

测试图谱。树脂溶液按照 CIP/EP 质量比为 0%, 10%, 30%, 50% 进行配置。从图 3 中可以看出, 所有样品的固化放热峰均出现在 125℃ 左右, 为主要的固化放热阶段, 此时环氧树脂中的环氧基团与胺类固化剂发生化学反应, 环氧基团与氨基活泼氢反应开环聚合, 形成致密的网络交联结构。

羰基铁粉加入后, 环氧树脂体系的 DSC 曲线未出现新的固化放热峰, 表明 CIP 与环氧树脂和固化剂没有发生新的化学反应, 并未影响环氧树脂的固化交联过程^[19], 这一结果与红外光谱相对应。从图 3 可看出添加 CIP 的环氧树脂体系固化反应放热峰均朝高温移动, 50% CIP/EP 的固化放热峰为 128℃, 提升了 3℃, 且随 CIP 含量的增加, 固化反应放热峰整体峰形变宽, 说明 CIP 的加入降低了树脂体系的固化反应速率, 缓和了环氧树脂反应的剧烈程度, CIP 的加入一定程度上降低了环氧树脂的反应活性。CIP 颗粒在环氧树脂中常以单分散或团聚的形式存在, 由于其具有高比表面积与高表面能的特点, 表面活性大, 可以通过范德华力吸附环氧树脂小分子, 在其表面形成“界面层”^[20], 被包裹在团聚态 CIP 颗粒中的环氧小分子仅能通过吸附-脱附的交换过程与固化剂发生反应, 反应活性因此被降低。此外, 随着固化反应的进行, 交联密度的不断增加, CIP 颗粒存在于环氧树脂分子链段之间, 阻碍了分子链段之间的运动和排列。CIP 含量不断增加, 其阻碍作用则愈加的明显, 固化剂与环氧树脂难以充分接触, 使得环氧树脂固化反应速率降低。

2.3 CIP/GF/CF/EP 复合板材力学性能

图 4 分别给出了采用 VARI 工艺制备的不同 CIP 含量配比的 CIP/GF/CF/EP 吸波复合板的拉伸性能和弯曲性能。

图 4 可以看出, 随 CIP 含量的增加, 吸波复合板的拉伸强度与拉伸模量变化不大。CIP 含量为 30% 时力学性能最优, 拉伸强度为 347.56MPa, 拉伸模量为 25.99GPa, 较 GF/CF/EP 复合板提升 4.3% 和 5.7%。对比图 4 可知, CIP 对复合板材的弯曲性能影响要明显于拉伸性能。随 CIP 含量的增加, 弯曲强度和弯曲模量呈先升高后降低的趋势。CIP 含量为 30% 时, 弯曲强度最高 339.6MPa, 弯曲模量为 23.7GPa, 较纯 GF/CF/EP 复合板的 287MPa 和 13.84GPa 分别提升了 18.2% 和 71.2%。复合材料力学性能在 CIP 含量 30% 时最优。CIP 达到 30% 时, 在环氧树脂中分散良好, 能够形成良好的界面, 并且 CIP 颗粒在材料中充当物理交联点, 抑制分子链的运动, 从而增强力学性能。适当含量的 CIP 颗粒还可以起到裂纹“钉扎”的作用, CIP 颗粒聚集在纤维附近, 当材料

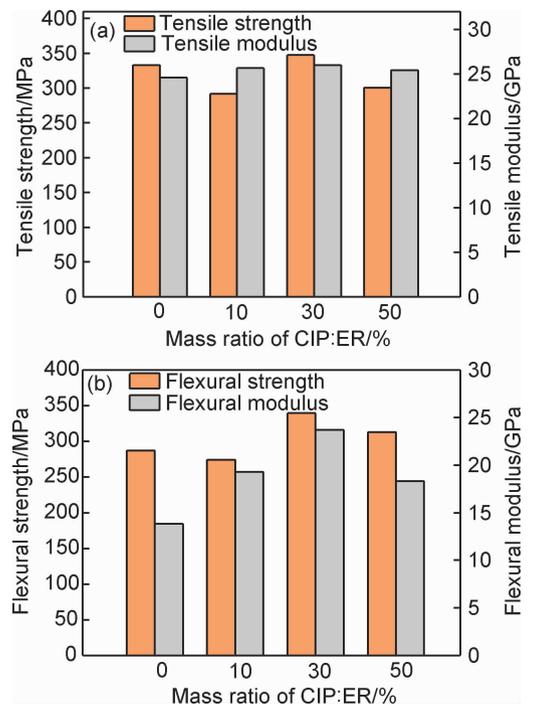


图 4 CIP 含量对 CIP/GF/CF/EP 复合板材的拉伸性能(a)和弯曲性能(b)的影响

Fig. 4 Effect of mass ratio of CIP on tensile(a) and flexural(b) properties of CIP/GF/CF/EP composites

承受外力载荷时, 基体开裂产生裂纹, 因 CIP 颗粒的存在会对裂纹的扩展产生阻碍或改变裂纹的扩展方向, 使得大裂纹演变成多个小裂纹, 吸收更多的外界能量, 同时阻止裂纹沿纤维/树脂基体的界面扩展, 因此能够承受较大的载荷, 使得复合材料力学性能的提高^[21-24]。CIP 含量较低时, 则无法起到裂纹钉扎的作用, 所以会有力学性能轻微降低的现象。CIP 过量之后, 则易产生颗粒团聚现象, 引起大量缺陷, 材料受外力产生的裂纹过多, 扩展过程中易合并产生大裂纹, 导致纤维与树脂之间界面结合力下降, 力学性能降低。

2.4 CIP 在 GF/CF/EP 复合材料中的分布

图 5 为 30% CIP 在 CIP/GF/CF/EP 复合材料中分散的 SEM 图像。图 5(a)能明显看到纤维和树脂基体结合性能较好, 纤维表面有部分环氧树脂基体黏结。CIP 颗粒则大部分分布在纤维之间的空隙之中, 不趋向于附着在纤维表面。从图 5(b)可以看出羰基铁粉颗粒被包裹在环氧树脂内部, 断口处的 CIP 仍与树脂基体具有很好的结合性, 并且未出现团聚。图 5(c)是对断口截面的 Si, Fe 元素进行面扫的元素分布图, 可以更加直观地看出 CIP 颗粒在树脂基体中分散均匀, 未出现大量的团聚现象, 并且在纤维上仅有少量的 CIP 颗粒附着, 进一步说明了 CIP 在树脂基体中具有良好的分散性。这一结果也与力学性能结果相一致,

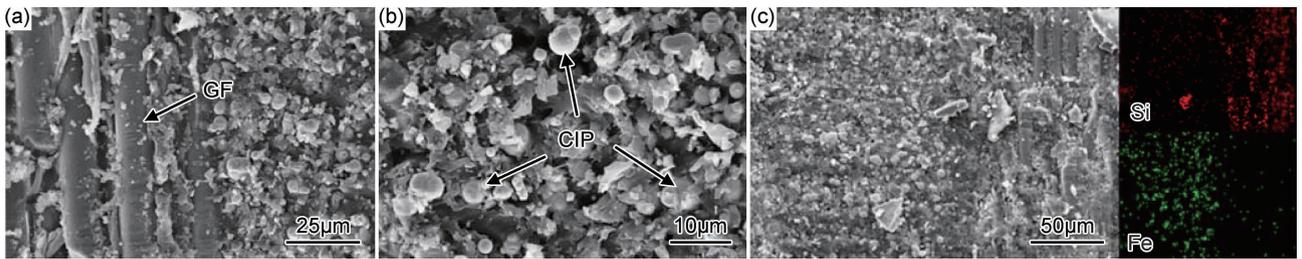


图 5 30% CIP 在 CIP/GF/CF/EP 复合材料中分散的 SEM 图像

(a) 复合材料断面表面形貌; (b) 图(a)中树脂区域放大形貌; (c) Si, Fe 元素分布

Fig. 5 SEM images of dispersion of 30% mass ratio CIP in the CIP/GF/CF/EP composites

(a) fracture surface morphology of composite; (b) enlargement of resin matrix areas in fig. (a); (c) Si, Fe element distribution

CIP 加入后纤维与树脂基体仍能紧密结合,且因其均匀分布在树脂基体中,延缓了裂纹沿纤维扩展,提升了吸波复合板整体力学性能^[25]。

2.5 CIP/GF/CF/EP 吸波复合板吸波性能

采用自由空间法对 CIP/EP 质量比为 0%, 10%, 30%, 50% 的复合吸波板进行了电磁波吸波性能测试,图 6 显示了 CIP/GF/CF/EP 吸波复合板在 2~18GHz 范围内的电磁波反射损耗,其厚度为 2mm,以 GF 面为电磁波入射面。

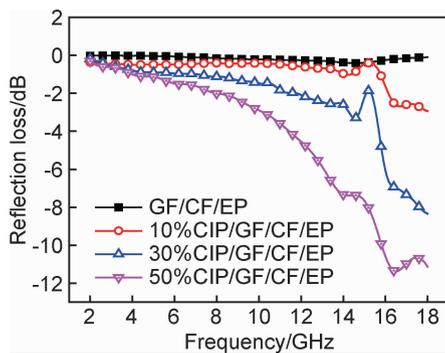


图 6 不同 CIP 含量的 CIP/GF/CF/EP 吸波复合板的反射损耗曲线

Fig. 6 Reflection loss curves of CIP/GF/CF/EP composites with different mass ratios of CIP

由图 6 可以看出,吸波复合板的吸波能力与 CIP 含量密切相关,随着 CIP 含量的增加,所有样品对高频吸收都呈现单调增加的趋势。未添加 CIP 颗粒的复合板材在 2~18GHz 内的反射损耗值在 0dB 附近浮动,无吸波损耗。10%, 30% 的样品分别在 18GHz 达到反射损耗最大值 -2.94, -8.34dB, 50% 的样品则在 16.5GHz 达到了最大值 -11.37dB, 可见所制备的吸波复合板具有一定吸波能力。复合板中玻纤和环氧树脂为透波材料,对电磁波无吸收性能;CIP 为主要的吸收材料,分布在环氧树脂基体中,形成吸波网络结构,吸收射入板材内部的电磁波;连续碳纤层因其优异

的导电性能构成了电磁波反射层,未被损耗的电磁波到达 CF 层后进行二次反射,提高损耗效率(如图 1 所示)。CIP 含量增加可促使基体内部吸波网络结构更加致密,提高复合板的阻抗匹配,整体板材吸波损耗能力增强。

从 50% CIP/GF/CF/EP 吸波复合板的曲线还可发现,反射损耗峰值逐渐朝低频移动。根据公式:

$$f_m = \frac{nc}{4t_m \sqrt{|\epsilon_r| |\mu_r|}} (n=1, 3, 5, 7, 9, \dots),$$

其中 f_m 为共振频率, t_m 为匹配厚度, c 为真空中光速, ϵ_r 和 μ_r 为复合板材的相对介电常数和相对磁导率,可以看出复合板材的共振频率主要由其电磁参数和材料厚度所决定^[26]。Bruggeman 方程表明, CIP 含量的增加可以提高复合板材的电磁参数。因此在相同厚度下,复合板材的吸收频率随吸收剂含量的增大而朝低频移动^[27-28]。

3 结论

(1) 复合材料中 CIP 未与环氧树脂发生反应生成新的化合键连接。CIP 的加入降低了环氧树脂的反应活性,提高了固化反应放热峰。

(2) 吸波复合板拉伸性能和弯曲性能均在 CIP : EP 质量比为 30% 时达到最大。CIP 含量为 30% 时,拉伸强度为 347.56MPa, 拉伸模量为 25.99GPa, CIP/GF/CF/EP 吸波复合板较 GF/CF/EP 复合板提升了 4.3% 和 5.7%; 弯曲强度为 339.6MPa, 弯曲模量为 23.7GPa, 较 GF/CF/EP 复合板提升了 18.2% 和 71.2%。

(3) CIP/GF/CF/EP 树脂吸波复合板的吸波性能随 CIP 含量的增加不断增加,峰值不断朝低频区移动。CIP/GF/CF/EP 树脂吸波复合板厚度为 2mm, 且 CIP : EP 质量比为 50% 时,在 16.5GHz 达到最大值 -11.37dB。

(4) CIP 含量为 50% 时,力学性能和吸波性能满

足一定工程应用,可以达到兼顾力学和吸波性能的要求。

参考文献

- [1] 赵灵智,胡社军,李伟善,等. 吸波材料的吸波原理及其研究进展[J]. 现代防御技术, 2007, 35(1): 27-31.
ZHAO L Z, HU S J, LI W S, et al. Absorbing mechanism and progress of wave-absorbing materials [J]. Modern Defence Technology, 2007, 35(1): 27-31.
- [2] 范夕萍,窦建芝,李静,等. 国外军用新型吸波材料专利技术研究进展[J]. 功能材料, 2012, 43(增刊2): 165-167.
FAN X P, DOU J Z, LI J, et al. Research progress of military novel absorbing materials patent technology abroad[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(Suppl 2): 165-167.
- [3] WANG H, WU L, JIAO J, et al. Covalent interaction enhanced electromagnetic wave absorption in SiC/Co hybrid nanowires[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(12): 6517-6525.
- [4] YU L, LAN X, WEI C, et al. MWCNT/NiO-Fe₃O₄ hybrid nanotubes for efficient electromagnetic wave absorption[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 748: 111-116.
- [5] 黎炎图,黄小忠,杜作娟,等. 结构吸波纤维及其复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(4): 76-79.
LI Y T, HUANG X Z, DU Z J, et al. Research progress of structural radar absorbing fiber and composite materials [J]. Materials Review, 2010, 24(4): 76-79.
- [6] 郭宇,贾晓敏,张源昆,等. 雷达吸波聚合物基体材料研究概况[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(8): 133-137.
GUO Y, JIA X M, ZHANG Y K, et al. Research situation of radar wave-absorbing polymer matrix material[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(8): 133-137.
- [7] WU J M, CHEN J, ZHAO Y Y, et al. Effect of electrophoretic condition on the electromagnetic interference shielding performance of reduced graphene oxide-carbon fiber/epoxy resin composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 105: 167-175.
- [8] 礼嵩明,蒋诗才,望咏林,等. “超材料”结构吸波复合材料技术研究[J]. 材料工程, 2017, 45(11):10-14.
LI C M, JIANG S C, WANG Y L, et al. Study on "Metamaterial" structural absorbing composite technology[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(11): 10-14.
- [9] 李俊燕,陈平. 结构型吸波复合材料的研究进展[J]. 纤维复合材料, 2012(2): 11-14.
LI J Y, CHEN P. Development in structural absorbing composites [J]. Fiber Composites, 2012(2): 11-14.
- [10] LIANG C, WANG Z, WU L, et al. Light and strong hierarchical porous SiC foam for efficient electromagnetic interference shielding and thermal insulation at elevated temperatures[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(35): 29950-29957.
- [11] CHOI I, LEE D, LEE D G. Radar absorbing composite structures dispersed with nano-conductive particles[J]. Composite Structures, 2015, 122: 23-30.
- [12] SHAH A, WANG Y, HUANG H, et al. Microwave absorption and flexural properties of Fe nanoparticle/carbon fiber/epoxy resin composite plates[J]. Composite Structures, 2015, 131: 1132-1141.
- [13] LIANG C, WANG Z. Controllable fabricating dielectric-dielectric SiC@C core-shell nanowires for high-performance electromagnetic wave attenuation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(46): 40690-40696.
- [14] 望红玉. 聚酰胺树脂基吸波复合材料的制备及性能研究[D]. 西安:西北工业大学, 2016.
WANG H Y. Research on preparation process and microwave absorbing properties of polyimide composite [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.
- [15] GAO Y, GAO X, LI J, et al. Microwave absorbing and mechanical properties of alternating multilayer carbonyl iron powder-poly(vinyl chloride) composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135: 45846.
- [16] 严文聪,曾金芳,王斌. 纤维混杂复合材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2011, 39(6): 30-33.
YAN W C, ZENG J F, WANG B. The progress in fibers hybrid composites[J]. New Chemical Materials, 2011, 39(6): 30-33.
- [17] XIA C, SHI S Q, CAI L. Vacuum-assisted resin infusion (VARI) and hot pressing for CaCO₃ nanoparticle treated kenaf fiber reinforced composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 78: 138-143.
- [18] 吕程. 增强环氧树脂改性及机理的红外光谱研究[D]. 重庆:重庆大学, 2008.
LU C. Study on the enhanced modification of epoxy infrared spectrum by used[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [19] SUN Y Y, ZHANG Z Q, MOON K S, et al. Glass transition and relaxation behavior of epoxy nanocomposites[J]. Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics, 2004, 42(21): 3849-3858.
- [20] 张代军,刘刚,张晖,等. 纳米粒子改性环氧树脂固化反应动力学研究[J]. 热固性树脂, 2010, 25(2): 5-10.
ZHANG D J, LIU G, ZHANG H, et al. Curing kinetics research of nano-particles modified epoxy resin [J]. Thermosetting Resin, 2010, 25(2): 5-10.
- [21] SURESHA B, SAINI M S. Influence of organo-modified montmorillonite nanolayers on static mechanical and dynamic mechanical behavior of carbon/epoxy composites[J]. Journal of Composite Materials, 2016, 50(25): 3589-3601.
- [22] ZENG Y, LIU H, MAI Y, et al. Improving interlaminar fracture toughness of carbon fibre/epoxy laminates by incorporation of nano-particles[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(1): 90-94.
- [23] 郑国栋,张清杰,邓火英,等. 不同官能化碳纳米管对MWCNTs-碳纤维/环氧树脂复合材料力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2015, 32(3): 640-648.
ZHENG G D, ZHANG Q J, DENG H Y, et al. Effect of different functionalized carbon nanotubes on mechanical properties of MWCNTs-carbon fiber/epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(3): 640-648.
- [24] NAYAK R K, MAHATO K K, RAY B C. Water absorption behavior, mechanical and thermal properties of nano TiO₂ enhanced glass fiber reinforced polymer composites[J]. Composites Part A, Applied Science & Manufacturing, 2016, 90: 736-

- 747.
- [25] LI W, DICHIARA A, ZHA J, et al. On improvement of mechanical and thermo-mechanical properties of glass fabric/epoxy composites by incorporating CNT- Al_2O_3 hybrids[J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 103: 36-43.
- [26] LIU P J, NG V M H, YAO Z J, et al. Facile synthesis and hierarchical assembly of flowerlike NiO structures with enhanced dielectric and microwave absorption properties[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(19): 16404-16416.
- [27] BERTHAULT A, ROUSSELLE D, ZERAH G. Magnetic properties of permalloy microparticles[J]. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, 1991, 112(1/3): 477-480.
- [28] 周远良, 赛义德, 张黎, 等. 树脂基 Fe 纳米粒子及碳纤维复合吸波平板的制备与性能[J]. *材料工程*, 2018, 46(3):41-47.

ZHOU Y L, SAI Y D, ZHANG L, et al. Preparation and performance of resin-based Fe nanoparticles/carbon fibers microwave absorbing composite plates[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(3): 41-47.

基金项目:国家自然科学基金(51672129);中央高校基本科研业务费专项资金(NS2017036);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfjj20170601)

收稿日期:2018-05-27;**修订日期:**2018-10-15

通讯作者:周金堂(1984—),副教授,博士,研究方向为结构功能一体化复合材料,联系地址:江苏省南京市江宁区南京航空航天大学材料与技术创新学院(211106),E-mail: imzjt@nuaa.edu.cn

(本文责编:杨 雪)