

环氧树脂/碳纤维吸波涂层电磁特性的实验研究

王祖鹏 于名讯 潘士兵 朱洪立 丁文皓 姜兴三

(中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

摘要 对环氧树脂/碳纤维吸波涂层的电磁特性进行了研究, 包括对体系电磁参数及反射率的测量, 纤维长径比、体积含量对电磁参数及吸波性能的影响, 以及电磁参数与吸波性能的关联。结果表明, 在 8 ~18 GHz 频段内, 随碳纤维长度的增大其介电常数实部与虚部值均增大, 磁导率虚部值增大, 吸收效果逐渐增强; 随碳纤维体积分量的增加, 其介电常数实部与虚部值均显著提高, 吸收效果逐渐增强, 吸收峰向低频方向移动。

关键词 碳纤维 环氧树脂 吸波涂层 介电常数 磁导率 反射率

纤维吸波材料是一种新型的雷达吸波材料^[1], 基于形状的各向异性, 它具有质轻、频率宽等特点, 比传统吸波材料具有优异的吸波性能。它是一种在 高分子粘结剂基体中加入纤维吸收剂制成的混合物, 既可用于涂覆型吸波材料又可用于结构型吸波材料中的某一层。

吸波材料的吸波性能主要取决于材料的复介电常数 ϵ 、复磁导率 μ 、材料厚度及使用频率等因素^[2], 复介电常数可表示为 $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$, ϵ' 为介电常数实部, ϵ'' 为介电常数虚部; 复磁导率可表示为 $\mu = \mu' - i\mu''$, μ' 为磁导率实部, μ'' 为磁导率虚部。而材料的宏观电磁参数又取决于各组分的电磁参数及其含量。从电磁参数 ϵ 和 μ 出发研究吸波材料的电磁性能对准确预测材料的吸波性能、缩短设计周期具有极其重要的意义。

在填充纤维吸收剂的吸波材料中, 不同的纤维长径比(直径均一, 可用长度替代长径比)、纤维含量(短切纤维分散均匀时, 可用含量来反映纤维之间的距离)和材料厚度条件下, 纤维对吸波涂层电磁特性的影响效果不同。笔者以碳纤维为吸收剂, 环氧树脂(EP)为基体^[3], 制备了一系列的吸波涂层, 通过分析在特定频段的电磁参数及反射率, 研究吸波材料中填充碳纤维的长度、体积含量对材料的电磁性能及吸波效果产生的影响。

1 实验部分

1.1 原材料

EP: E20, 自制;

EP 固化剂: NX-2015, 市售;

二甲苯: 工业级, 市售;

碳纤维: 合格品, 山东天泰碳纤维有限公司;

润湿分散剂: 923S, 德谦(上海)化学有限公司;

消泡剂: 6800, 德谦(上海)化学有限公司。

1.2 主要设备、仪器

电子天平: JYT-1 型, 上海医用激光仪器厂;

定时电动搅拌机: JJ-1 型, 江苏金坛市大中仪器厂;

空气压缩机: V-Q 17/10 型, 烟台市金星空压机有限公司;

数控超声波清洗器: KQ-200KDE 型, 昆山市超声仪器有限公司;

喷枪: PQ-1A 型, 市售;

扫描电子显微镜(SEM): QUANTA200 型, 荷兰 FEI 公司;

三相异步电动机: Y90S-2 型, 烟台瑞力电动机有限公司。

1.3 试样制备

(1) 碳纤维吸波涂层试样的制备

吸波涂层以 EP 为基体, 纤维吸收剂为填料, 二甲苯为稀释剂。将纤维经稀释过的润湿分散剂浸泡, 再将其与 EP 基体按配比混合, 经转速为 800 r/min 的电动搅拌机分散约 1 h 后, 超声波分散 30 min, 再搅拌约 1 h, 使纤维吸收剂分散均匀, 通过控制稀释剂用量来调节溶液粘度。

将尺寸为 180 mm × 180 mm 的铝板用砂纸进行打磨, 并用丙酮擦净, 采用空气式喷枪, 将配好的溶液喷涂在铝板上。喷涂第一遍时, 约 3 ~4 个来回, 然后将其在室内放置约 10 ~15 min, 再将其放入烘箱中烘 15 ~20 min, 温度控制在 80 ℃ 左右, 待其表干后, 取出进行第二遍喷涂。

(2) 电磁参数测试试样的制备

由于电磁参数测试需要试样完全透波, 在制备试样时, 需要将涂层与金属板分离, 笔者将金属铝板

包裹上一层聚氨酯薄膜,喷涂前将薄膜表面涂上脱模剂,混料工艺和喷涂过程与吸波涂层的制备过程相同,待试样烘干后,揭下涂层,放入烘箱温度控制在 85°C 左右,放置约 30 min 后,取出压平。

1.4 性能测试及表征

形貌分析: 采用 SEM 对碳纤维微观形貌进行观察,通过改变放大倍数来观察纤维的分布状况及纤维直径的大小;

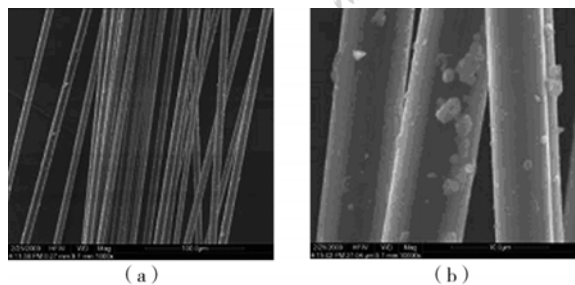
电磁参数测量: 吸波材料的电磁参数测量方法有同轴波导管法^[4]、空腔谐振器法^[5]和自由空间法^[6]等,笔者采用自由空间法进行测量;

反射率的测量: 采用 RAM 弓形反射率测试法,利用扫频在 AV1481 信号源和 AV4033A 频谱分析仪上参照 GJB 2038-1994 进行测试。采用尺寸为 $180\text{ mm} \times 180\text{ mm}$ 的正方形样板,衬板为光滑铝板,入射角为 2.5° ,测量范围为 8 ~18 GHz。

2 结果与讨论

2.1 碳纤维的形貌与分散特性

实验中为配合纤维长度变化对涂层电磁性能的研究,将碳纤维进行人工短切,考虑到喷涂工艺纤维长度不能大于 3 mm,否则无法喷涂,长度分别控制为 1、2、3 mm,估算长径比分别为 150、300、450。图 1 示出碳纤维的 SEM 照片。由图 1 可知,短碳纤维直径较为均匀,约为 $6\text{ }\mu\text{m}$ 。



a—放大 1000 倍; b—放大 10000 倍

图 1 碳纤维的 SEM 照片

2.2 碳纤维的长度对吸波涂层电磁特性的影响

(1) 对吸波涂层电磁参数的影响

图 2 示出碳纤维的长度对吸波涂层介电常数的影响。1#试样、2#试样、3#试样中碳纤维的长度分别为 1、2、3 mm,体积含量均为 0.15%,厚度为 1.5 mm (下同)。从图 2a 可知,在 8 ~18 GHz 频段,在相同厚度及含量的条件下,随碳纤维长度的增大,介电常数实部值逐渐提高。介电常数的实部也就是介电常数,代表介质储存电荷或储存能量能力的大小。在一定范围内提高短碳纤维的长度可以提高吸波涂

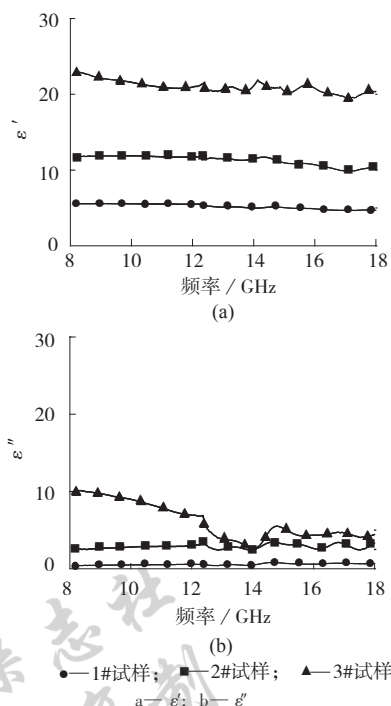


图 2 碳纤维的长度对吸波涂层介电常数的影响

层储存电磁能量的能力。从图 2b 可知,在相同厚度及含量的条件下,随碳纤维长度的增大,涂层介电常数虚部值依次增大,介电常数的虚部标志着电介质对能量损耗的大小,虚部越大意味着介质的损耗越大,也就是说在一定范围内提高吸波涂层中碳纤维的长度,可以增大吸波涂层损耗电磁能量的能力。

图 3 示出碳纤维的长度对吸波涂层磁导率的影响

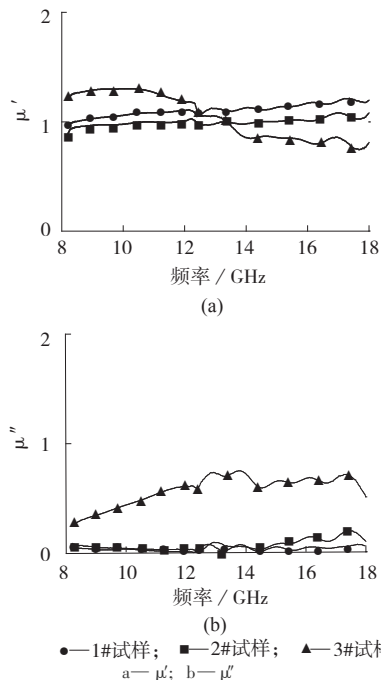


图 3 短碳纤维的长度对吸波涂层磁导率的影响

响。从图3可以看出,3个试样磁导率实部值均在1附近变化,且幅度不大,虚部值随长径比的增加有所提高。对于3#试样,其吸波涂层在8~18 GHz时,随频率的升高,磁导率虚部值逐渐增大,磁导率的虚部标志着介质对能量磁损耗的大小,虚部越大意味着介质的损耗越大,即在一定范围内提高吸波涂层中碳纤维的长度,可以增大吸波涂层损耗电磁能量的能力。

对于含碳纤维的吸波涂层,尽管组成材料的碳纤维和基体部分是非磁性材料,但在时变磁场作用下,当纤维间距达到一定值,并且外部的时变磁场足够强时,涂层材料仍然可能呈现很强的磁性。

(2) 对吸波涂层反射率的影响

图4示出碳纤维的长度对吸波涂层反射率的影响。

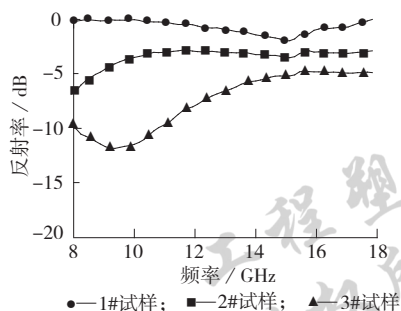


图4 短碳纤维的长度对吸波涂层反射率的影响

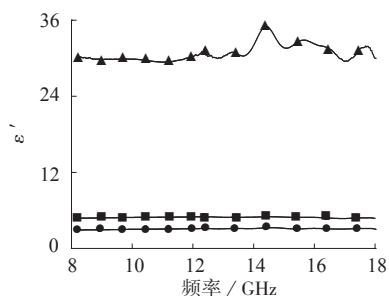
从图4可以看出,相同含量和厚度条件下,碳纤维的长度对吸波涂层试样反射率的影响较为显著。随碳纤维长度的增加,吸收效果逐渐增强,说明涂层材料中碳纤维长径比较大的涂层材料吸波性能较好。对于3#试样,由电磁参数的分析可以发现,其介电损耗与磁损耗并存,这也解释了产生较大吸收效果的原因。

2.3 碳纤维的体积含量对吸波涂层电磁特性的影响

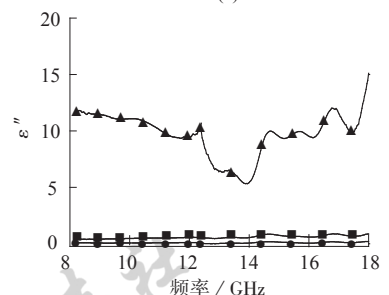
在制备碳纤维吸波涂层试样的过程中,要使得纤维吸收剂在涂层材料中均匀分布,碳纤维的长度不宜过长,纤维长度过长极易使喷枪堵塞,很难均匀喷涂成膜,对于碳纤维而言,长度为3 mm时,在较低浓度下通过实验验证可以喷涂,且喷涂极限浓度为0.2%。

(1) 对吸波涂层电磁参数的影响

图5、图6示出碳纤维的体积含量对吸波涂层电磁参数的影响。1#试样、2#试样、3#试样中碳纤维的体积含量分别为0.05%、0.1%和0.2%(下同)。



(a)

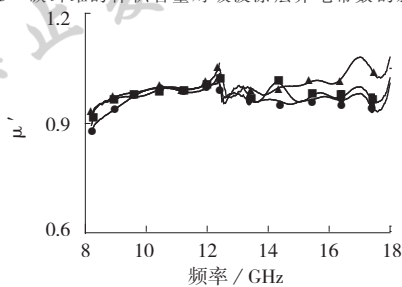


(b)

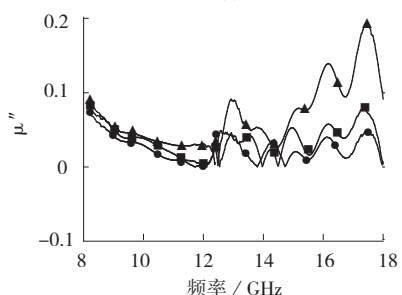
● 1#试样; ■ 2#试样; ▲ 3#试样

a— ϵ' ; b— ϵ''

图5 碳纤维的体积含量对吸波涂层介电常数的影响



(a)



(b)

● 1#试样; ■ 2#试样; ▲ 3#试样

a— μ' ; b— μ''

图6 碳纤维的体积含量对吸波涂层磁导率的影响

从图5可以看出,3个试样在8~18 GHz频段内,随填充碳纤维体积分量的增加吸波涂层试样的介电常数实部与虚部值均显著增大,即在一定条件下提高吸波涂层中碳纤维的体积含量能够有效地提高介质对电磁能量的储存及损耗能力。

从图6可以看出,碳纤维体积分量的变化对吸波涂层磁导率的影响不大,实部值在1附近变化,虚

部值在 0.1 附近波动,随体积含量的增加小幅增大,在 16 ~18 GHz 频段内变化较明显,这也表明碳纤维体积含量的增加可以提高材料对电磁波的磁损耗能力。因此,对于长度为 3 mm,厚度一定的碳纤维吸波涂层,碳纤维体积含量的增加对吸波涂层的磁损耗具有一定影响。

(2) 对吸波涂层反射率的影响

图 7 示出碳纤维的体积含量对吸波涂层反射率的影响。

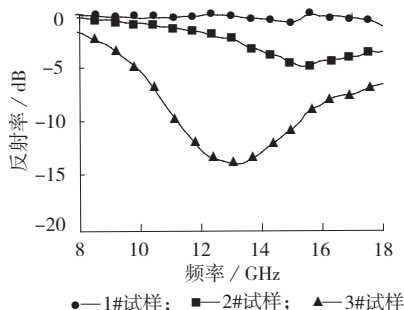


图 7 碳纤维的体积含量对吸波涂层反射率的影响

从图 7 可以看出,当碳纤维的体积含量小于 0.2% 时,随碳纤维含量的不断增加,吸收峰向低频方向移动,吸波涂层的吸收效果逐渐增强。当碳纤维体积含量达到 0.2% 时,峰值吸收为 14 dB,这也说明在浓度极低的情况下,碳纤维吸波涂层可以达到较好的吸波效果。由电磁参数的分析可知,随碳纤维体积含量的增加,介电常数的增大所引起的介电损耗,及由磁导率虚部值增大引起的磁损耗作用可以提高涂层的吸波效果。

3 结论

(1) 随碳纤维长度的增加(长径比增大)吸波涂

层的介电常数实部与虚部值均提高,实部值提高幅度较大;磁导率实部变化不大,虚部值有一定幅度的提高,吸收效果逐渐增强,结合电磁参数的分析也可以说明碳纤维吸波涂层主要以介电损耗为主,随碳纤维长度的增加介电损耗增加幅度较大,磁损耗有一定提高。

(2) 随碳纤维体积含量的增加,吸波涂层的介电常数实部与虚部值都有较大幅度的提高,但磁导率变化不大,实部与虚部值均在 1、0.1 附近波动,吸收效果逐渐增强,吸收峰向低频方向移动,当碳纤维体积含量为 0.2% 时,反射率峰值为 14 dB,这也说明在浓度极低的情况下,碳纤维吸波涂层可以达到较好的吸波效果,同时结合电磁参数的分析也可以说明,当碳纤维体积含量小于 0.2% 时,吸波性能主要受介电损耗影响,随碳纤维体积含量的增加其介电损耗逐渐增强,磁损耗有一定提高。

参考文献

- [1] 谢雄军,曹运红,王蕾.雷达吸波纤维复合材料研究现状及在航空航天器上的应用[J].飞航导弹,2003(10):56-60.
- [2] 邢丽英,刘俊能.短碳纤维电磁特性及其在吸波材料中应用研究[J].材料工程,1998(1):19-21.
- [3] 曹婷.碳纤维(碳毡)/环氧吸波复合材料的制备及性能研究[D].天津:天津大学,2002.
- [4] 张其邵,李恩,郭高凤.低损耗电介质复介电常数宽频带测试技术[C].//全国电子测量及仪器学术研讨会论文集,2002.
- [5] 何小瓦,李恩,张其动,等.介质材料复介电常数变温测量技术综述[J].宇航材料工艺,2005(1):20-23.
- [6] Kobayashi Y, Shimizu T. Millimeter wave measurements of temperature dependence of complex permeability of dielectric plates by a cavity resonance method[J]. IEEE MTT-S international, 1999, 4: 1885-1888.

STUDY ON ELECTROMANETIC PROPERTY OF CARBON FIBER/EPOXY ABSORBING COATING

Wang Zupeng, Yu Mingxun, Pan Shibing, Zhu Hongli, Ding Wenhao, Jiang Xingsan

(CNGC Institute 53, Jinan 250031, China)

ABSTRACT The electromagnetic(EM) properties of epoxy/carbon fiber was investigated, including measuring the EM parameters and reflectance of the composite, and the influence of the volume ratio and aspect ratio on EM parameters and absorbing properties. The result showed that the real part and imaginary part of permittivity, the imaginary part of permeability increased with the increasing of the length of carbon fiber, and the absorbing effect increased gradually in the 8-18 GHz frequency band. As the volume of carbon fiber increasing, the real part and imaginary part of permittivity increased observably, the absorbing effect increased gradually and the peak of absorption moved to low-frequency.

KEYWORDS carbon fiber, epoxy resin, absorbing coating, permittivity, permeability, reflectivity

巴斯夫新款低形变 PBT 产品

巴斯夫的产品研发部门日前开发了一款新的 PBT 产品,其抗形变性能优越。通常情况下,大型的塑料件由于在经过不同的环境后会发生收缩变形,但是 Ultradur

S4090GM11 是巴斯夫 PBT 产品中一款具有极低形变的产品,甚至能够基本达到无形变,从而使塑料产品保持平直。这款 Ultradur S4090GM11 产品由于添加了玻璃纤维和矿物质,因此该产品具有优良的抗形变性能。(工塑)