

微量碳化硅纤维/环氧树脂复合吸波材料研究*

李家俊 郭伟凯 赵乃勤 王新南

(天津大学材料学院,天津 300072)

文 摘 研究微量碳化硅纤维/环氧树脂复合吸波材料不同排布的吸波性能。结果表明:碳化硅纤维吸波性能与纤维的排布间距和纤维含量密切相关;正交排布试样的吸波效果总体上优于平行排布试样;间距为4 mm、纤维含量为1 600根/束时的正交排布方式获得大于8 GHz、-10 dB以下的反射衰减。

关键词 吸波材料,碳化硅纤维,平行排布,正交排布

Microwave Absorbing Properties of Silicon Carbide Fiber/ Epoxy Composites

Li Jiajun Guo Weikai Zhao Naiqin Wang Xinnan

(School of Material Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract The microwave absorbing properties of SiC fiber composites with different fiber arrangement are studied. Experimental results show that the absorbing properties of SiC fiber composites are affected greatly by the arranged distance and content of SiC fibers. The absorbing performance of orthogonally arranged composites is better than the parallelly arranged composites. In this research, the composites obtained a reflection loss below -10 dB and over 8 GHz bandwidth when arranged distance and content of SiC fiber are 4 mm and 1 600 per bundle respectively.

Key words Absorbing material, Silicon carbide fiber, Parallelly arrangement, Orthogonally arrangement

1 前言

碳化硅纤维是继碳纤维之后开发的最重要的一种高性能增强纤维^[1]。它不仅具有优良的微波电磁特性,而且具有耐高温、抗氧化、耐化学腐蚀等特点,是国外发展很快的吸波材料之一。常规碳化硅纤维吸波材料纤维体积含量为40%左右^[2],作为电磁波吸收剂性能不理想,须对其进行改性处理,目的是控制电导率,可使其具有更优良的吸波性能。一般的改性处理方法包括提高碳化硅的纯度、纤维表面镀敷和进行有控制的掺杂等^[3~7],均可不同程度地改善吸波性能。

本文通过改变碳化硅纤维在基体中的排布方式,制备微量碳化硅纤维/环氧树脂复合吸波材料,

其中碳化硅纤维含量小于2%,并讨论纤维排布方式对结构吸波材料的吸波特性的影响,以求制备出一种较少的吸收剂而达到同样吸波性能的材料。

2 实验

2.1 原材料

S玻璃纤维布,由天津玻璃纤维总厂生产,在材料系统中起匹配阻抗作用,同时也兼具增强体的作用。

基体采用E-44(6101)型环氧树脂,无锡树脂厂生产(凤凰牌),介电常数为3.0~3.4,损耗角正切为0.01~0.03;在材料中封装电路屏,同时又起传递应力的作用。固化剂采用低分子量聚酰胺,天津延安化工厂生产,型号为203[#],介电常数为3.0~

收稿日期:2003-11-14;修回日期:2004-03-01

*天津市自然科学基金重点项目:013 616 911

李家俊,1957年出生,博士生导师,主要从事电磁复合功能材料的研究工作

宇航材料工艺 2004年 第5期

— 31 —

4.0,电阻率为 $10^{11} \sim 10^{12} \Omega \cdot m$ 。环氧树脂与低分子量聚酰胺以 2:1 混合。

碳化硅纤维由国防科技大学提供,表面较光滑,截面呈圆形;电阻率为 $10^{-1} \sim 10^1 \Omega \cdot m$ 。

2.2 试样制备

向环氧树脂中加入固化剂,搅拌均匀,脱泡,浇注到半溢式模具中,模具中预置碳化硅纤维屏平铺于模具中;在材料表面及模具底部各加一层玻璃布;然后将浇注好的模具上模、封好,在 60、10 MPa 条件下固化 2 h,得到所需的 180 mm \times 180 mm \times 4 mm 的正方板状试样。

2.3 吸波性能测试

根据 GB2038—94 标准,采用反射率弓形测试法,由北京航空材料研究院对试样进行反射衰减的测试。

3 结果与讨论

3.1 碳化硅纤维平行排布间距及其含量对吸波性能的影响

碳化硅纤维以一定间距均匀地平行排布于环氧树脂中,如图 1 所示,图 1 中的 θ 表示电磁波的电场方向与碳化硅纤维方向的夹角,当二者方向一致时吸波效果最佳,二者方向垂直时反射衰减几乎为零。本实验均采用 $\theta = 0$ 进行测试。图 2 为平行排布、不同间距的一组试样的反射衰减曲线。1[#]、2[#]、3[#] 试样中每束纤维含量相同(1 600 根/束),间距依次为 8 mm、6 mm、4 mm。从图 2 可以看出:(1)微量碳化硅纤维的平行排布对电磁波有一定的衰减作用;(2)平行排布碳化硅纤维在高频段(16 GHz \sim 17 GHz)出现尖锐的反射衰减吸收峰;(3)1[#]、3[#] 试样最大衰减均优于 2[#] 试样。

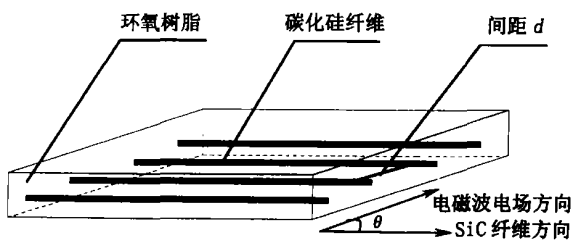


图 1 SiC 纤维平行排布吸波材料结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of absorbing materials of parallelly arranged SiC fiber

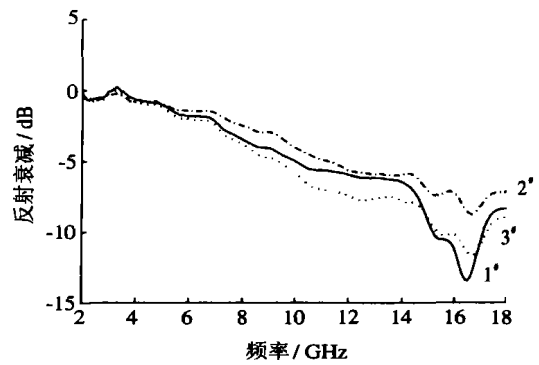


图 2 SiC 纤维排布间距对材料吸波性能的影响
Fig. 2 Effect of arranged distance of SiC fiber on absorbing properties

图 3 为间距相同(8 mm)、纤维含量不同的一组试样的反射衰减曲线,4[#]、1[#]、5[#] 试样中每束纤维的含量依次为 3 200 根/束、1 600 根/束、800 根/束。从图 3 可以看出,纤维含量为 1 600 根/束时吸波效果最好,纤维含量过多(3 200 根/束)或过少(800 根/束)吸波效果均减弱。可见,吸波剂含量并非越多越好,存在一个最佳值。

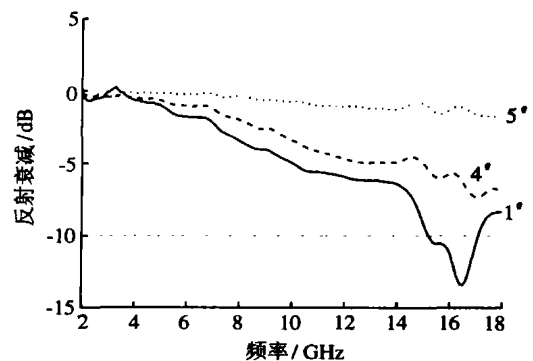


图 3 SiC 纤维含量对材料吸波性能的影响
Fig. 3 Effect of SiC fiber content on absorbing properties

3.2 碳化硅纤维正交排布间距及其含量对吸波性能的影响

碳化硅纤维以正交排布的方式分布于环氧树脂中,吸波性能各向同性,如图 4 所示。分别改变纤维间距和每束纤维的含量,制备一系列试样,并进行比较分析。

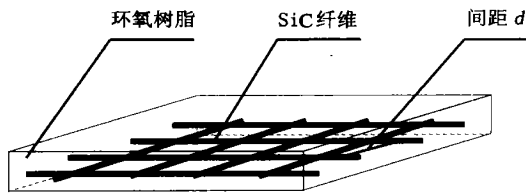


图4 SiC 纤维正交排布吸波材料结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of absorbing materials of orthogonally arranged SiC fiber

图5为碳化硅纤维正交排布,每束纤维含量相同(1 600根/束)间距分别为8 mm、6 mm、4 mm的一组试样的反射衰减曲线。从图5可以看出:(1)碳化硅纤维正交排布反射在高频段比较平缓,未出现较尖锐的吸收峰,反弹趋势很小;(2)间距为4 mm的8#试样的吸波效果最好,在10 GHz~18 GHz范围内反射衰减都在-10 dB左右波动,吸收频带较宽。间距由4 mm增大到6 mm时,反射衰减的程度减弱;当继续增大到8 mm时,吸波性能又有所回升。

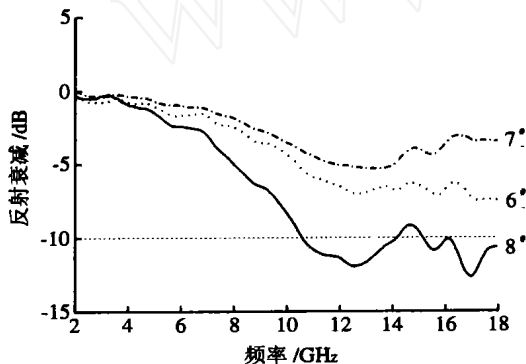


图5 SiC 纤维排布间距对材料吸波性能的影响

Fig. 5 Effect of arranged distance of SiC fiber on absorbing properties

图6反映了正交排布碳化硅纤维的吸波性能随纤维含量变化的趋势。9#、6#、10#试样的纤维间距相同(8 mm),每束纤维的含量依次递减,3 200根/束、1 600根/束、800根/束。从图6可以看出,吸波性能随纤维含量变化的趋势与平行排布的类似,1 600根/束的试样仍有最好的吸波效果。纤维含量增多或减少吸波性能均减弱。

宇航材料工艺 2004年 第5期

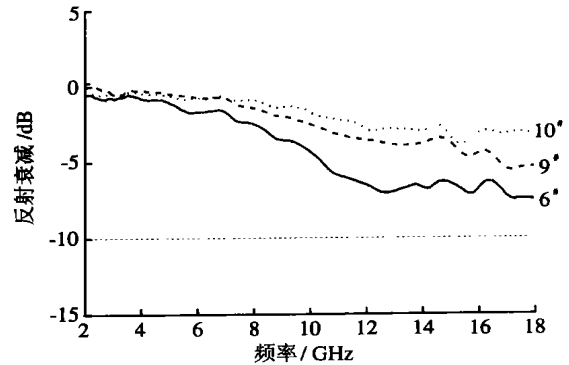


图6 SiC 纤维含量对材料吸波性能的影响

Fig. 6 Effect of SiC fiber content on absorbing properties

3.3 碳化硅纤维吸波机理分析

微量碳化硅纤维不同排布吸波机理比较复杂,本文从碳化硅纤维的半导体基本性质出发,其衰减电磁波机理与导体的衰减机理相似,对电磁波的损耗形式主要为电损耗,再者碳化硅纤维的不同排布方式造成相位抵消是消耗电磁波的重要原因。下面对其进行定性说明。

(1)从微观角度上考虑,半导体的能带由三部分组成。最上面的满带称为价带,最下面的空带称为导带,价带和导带之间有带隙,称为禁带。在绝对零度时,即使有强电场的存在,也不会产生电流。当外界条件发生变化,如温度升高或有电磁波入射时,半导体将吸收足够的能量,价带中会有少量电子被激发到导带中去,使空带底部有电子存在,在电场的作用下,这些电子将参与导电。同时,价带中由于少了一些电子,在价带顶部附近出现了空的量子状态,价带成为了部分占满的能带。价带的这种导电作用可等效为把这些空的量子状态看作是带正电荷的准粒子的导电作用,常称这些量子状态为空穴。所以,在半导体中电子和空穴的能带跃迁均消耗电磁波的能量^[8]。

(2)从宏观角度分析,半导体虽然电阻率大于导体,但仍具有导电性质。当电磁波入射到导电物体表面时,将在物体内部激发起漩涡状电流,称为涡流。如果导体的电阻很小,涡流将达到非常大的程度。当强大的涡流在导体内部流动时,会释放大量的焦耳热,因此涡流的产生会导致部分入射电磁波能量的消耗。根据电磁波理论,随着频率的增加,当电磁波在导体表面产生涡流时,在导体截面上的电

流分布将随频率的增加越来越向导线表面集中,这种现象被称作趋肤效应。趋肤效应的产生本质是衰减电磁波向导体内传播而引起的,趋肤效应越显著,产生的涡流损耗也越大,从而导致电磁波的消耗越多。因此,随着频率的提高,从总体上看,反射衰减的程度增加^[9]。

(3) 电磁波在碳化硅纤维之间传播时,除了产生电损耗之外,在每束纤维之间的部分电磁波经衍射而发生类似相位对消的现象,即当入射波和反射波为等幅,相差 180° 时,这两列波相互对消,从而减少了电磁波的反射,消耗部分电磁波的能量。这与接受天线接受电磁波的机理极为相似。对每一个试样而言,一束碳化硅纤维与另一束碳化硅纤维之间是等距的,相对于电磁波在微波频段内的波长,它必然只对应着一个频率,在这个频率下,电磁波的相位相消达到最大值,反射衰减程度最大,从而显示出一定的频率选择性。

碳化硅纤维间距对材料的吸波性能有很大的影响,其原因是多方面的,如上述的衍射效应。某一间距对应一个可以产生最大反射衰减的频率,相应的对应于不同的频率,能使相位相消产生最大值的间距 d 也有所不同。换言之,当碳化硅纤维的间距在不超过一个波长的范围内变化时,有且只有一个间距满足频率的要求,使电磁波在这个间距下产生最大的相位相消。此外,碳化硅纤维由于电磁波的入射而在内部产生电流,可将其等效为若干根通电导线,使得纤维之间存在相互作用,对电磁波的吸收产生一定程度的影响。

碳化硅纤维含量影响吸波性能的主要原因是纤维含量过少时,对电磁波的损耗程度自然较低;随着纤维含量的增加,电磁波的损耗增加;但含量过高时,纤维与电磁波的接触面积有较大的增加,这时反射起主导作用,吸波性能下降。所以损耗大并不一定是理想的吸波材料,因为要做到吸波,首先要求电磁波能够进入介质内部,即界面反射应尽可能小;其次,介质对在其内部传导的电磁波有损耗作用。从平行、正交两种排布方式的试样的反射衰减程度随

含量变化的趋势上分析,都是 1 600 根/束的吸波性能优于 800 根/束和 3 200 根/束的试样,进一步证明了吸波剂含量适当时,才能有较好的吸波效果。

从总体上看,正交排布的方式与平行排布相比有更大的发展潜力。正交排布形成了一个平面导电网络,整体电导率提高,电流强度增强,从而使电损耗增大,吸波性能提高;并且正交排布的有效频带比平行排布的宽,因此可充分利用这一排布方式制备宽频带吸波材料。

4 结论

(1) 微量碳化硅纤维的适当排布有一定的吸波性能;

(2) 正交排布试样的吸波效果总体上优于平行排布,平行排布试样的衰减吸收峰较尖锐,正交排布的吸收曲线较平缓;

(3) 无论平行或正交排布,每束纤维含量一定时,间距为 4 mm、8 mm 的试样均优于 6 mm 的,间距一定时,出现最佳吸波性能的纤维含量存在一个最佳值。

参考文献

- 1 吴人洁. 复合材料. 天津:天津大学出版社,2000:21
- 2 王军,王应德. 以碳化硅纤维为吸收剂的结构吸波材料设计. 1998;功能材料增刊:628~629
- 3 杨孚标,李永清,程海锋. SiC 纤维的 B₄C 涂层研究. 功能材料,2002;33(3):286~287
- 4 王军,陈革. 以异型碳化硅纤维为吸收剂的结构吸波材料设计. 材料工程,2000;(7):27~29
- 5 王军,宋永才. 含钛碳化硅纤维的制备及其微波吸收特性. 材料研究学报,1998;(8):419~422
- 6 王军,许云书. 含镍碳化硅纤维的制备及其电磁性能. 功能材料,2001;32(1):37~39
- 7 王亦菲,冯春祥. 电阻率可调的 Si—Ti—C—O 纤维的研制. 高技术通讯,1999;(5):45~48
- 8 刘恩科,朱秉升,罗晋生等. 半导体物理学. 北京:国防工业出版社,1994
- 9 郑敏,赵玉洁等. 微波吸收材料的理论、设计和测试. 电子材料,1994;(11):4

(编辑 吴坚)