

## 磁性微粉/聚乙烯复合材料的电磁特性\*

车仁超 李永清 陈朝辉 程海峰 杨孚标

(国防科技大学材料工程与应用化学系 长沙 410073)

**摘要** 研究了磁性微粉的物相组成及其与聚乙烯相复合制成的吸波材料在 8.2~12.4GHz 频段内的电磁特性。结果表明:复合材料中聚乙烯的加入量对电磁特性在上述频段内各频率范围影响程度不同;磁性微粉中聚碳硅烷量为 20% 时,反射衰减大于 6dB 对应的频带宽度为 2GHz。

**关键词** 磁性微粉, 电磁特性, 反射衰减

**分类号** TB333

## The Electromagnetic Property of Magnetic Fine Powder/ PE Composite

Che Renchao Li Yongqing Chen Zhaohui Cheng Haifeng Yang Fubiao

(Department of Materials Engineering and Applied Chemistry, Changsha, 410073)

**Abstract** The composition and electromagnetic property of the electromagnetic wave absorbent prepared from magnetic fine powder and PE were studied. The result shows: the added amount of PE has different influence on the whole frequency range. When the added amount of polycarbonyl is 20 percent, the reflection loss is more than 6dB, and the frequency width is 2 GHz respectively.

**Key words** Fine powder, electromagnetic property, reflection loss

隐身技术是减少飞行器对雷达、红外、光电等的目标特征,使回波信号尽可能地被减少或消除,从而阻碍各种探测手段对其实施探测的技术<sup>[1]</sup>。隐身材料的研究是隐身技术的一个重要方面,已经逐渐成为航空、航天、国防等领域的研究热点。雷达隐身材料必须对雷达波具有良好的介电损耗和磁损耗,使进入材料内部的电磁波被最大限度地吸收。雷达隐身材料又称吸波材料,其评价指标是它对于电磁波辐射的反射率。在吸波材料的组分中,磁性微粉是研究得比较成熟的,它的吸波机制主要是通过磁化矢量的转动和畴壁位移,形成磁滞损耗及磁性后效损耗<sup>[2-3]</sup>。本文通过非晶态磁性微粉中掺杂聚碳硅烷制备磁性微粉吸收剂,与热塑性树脂聚乙烯制成复合材料,并分析工艺条件对复合材料吸波性能的影响。

## 1 实验部分

按照化学共沉淀法的工艺路线制备磁性微粉原始粉料。用 0.5mol/L 浓度的硼氢化钠作还原剂,在 30 min 内与硫酸亚铁、硫酸钴混合溶液反应完毕。将沉淀物过滤、洗涤、干燥,制得原始粉料。将制得的原始粉料与不同比例的聚碳硅烷混合,以 1 ℃/min 的速度升温至 1000 ℃并保温 10 min,实现共裂解和高温反应,制得磁性微粉,样品编号如表 1 所示。

表 1 不同组成的磁性微粉

Tab. 1 Magnetic micropowder with different composition

样品编号	原始粉料含量(W. t%)	聚碳硅烷含量(W. t%)
1	50	50
2	60	40
3	70	30
4	80	20

\* 1999 年 1 月 2 日收稿

第一作者:车仁超,男,1973 年生,讲师

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 磁性微粉的物相组成

在 X-Ray 衍射仪上分别对原始粉料、掺混聚碳硅烷后制得的磁性微粉吸收剂进行物相组成分析, 结果如表 2 所示。

表 2 磁性微粉物相组成分析结果

Tab. 2 XRD analysis results of magnetic micropowder

样品编号	物相组成
原始粉料	非晶态物质, 主要成分为铁、钴
原始粉料+ 20% 聚碳硅烷	$\text{Fe}_3\text{Si}$ 、 $\text{Co}_3\text{C}$ 、 $\text{CoFe}$ 等
原始粉料+ 40% 聚碳硅烷	$\text{Fe}_3\text{Si}$ 、 $\text{Co}_3\text{C}$ 、 $\text{SiC}$ 等

原始粉料为无定形、非晶态结构。这是因为  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Co}^{2+}$  与硼氢化物发生如下反应



由于反应速率很高, 沉淀物来不及长大, 所以还原反应得到的产物是颗粒尺寸很小的非晶态粉体。掺混聚碳硅烷后, 在高温下共裂解, 生成了新相  $\text{Fe}_3\text{Si}$  和  $\text{Co}_3\text{C}$ 。这是由于在热处理过程中聚碳硅烷裂解为富碳的碳化硅等裂解产物。裂解产物分别与原始粉料中的  $\text{Co}$  和  $\text{Fe}$  发生反应生成  $\text{Fe}_3\text{Si}$ 、 $\text{Co}_3\text{C}$ 、 $\text{CoFe}$  等物相。

聚碳硅烷含量为 20% 时, 反应产物中有  $\text{CoFe}$  合金相存在; 聚碳硅烷含量越高, 磁性微粉中  $\text{Fe}_3\text{Si}$  和  $\text{Co}_3\text{C}$  量越多, 直至出现  $\text{SiC}$  相。因此, 按照本文的工艺路线进行处理, 可以完成原始粉料的晶化过程, 并得到不同物相组成的磁性微粉, 进而可以调节磁性微粉的电磁参数。

### 2.2 磁性微粉中聚碳硅烷含量对吸波特性的影响

采用空间样板移动法测试涂层板(1~4 号磁性微粉分别与质量比为 25% 的聚乙烯复合成, 厚 1.5mm) 在 8.2~12.4GHz 内的反射率与频率的关系曲线, 如图 1、图 2 所示。

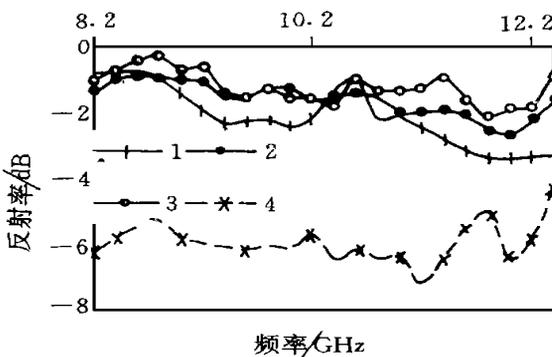


图 1 复合材料的反射率与频率关系

Fig. 1 The relationship between the reflectivity and frequency of the composite

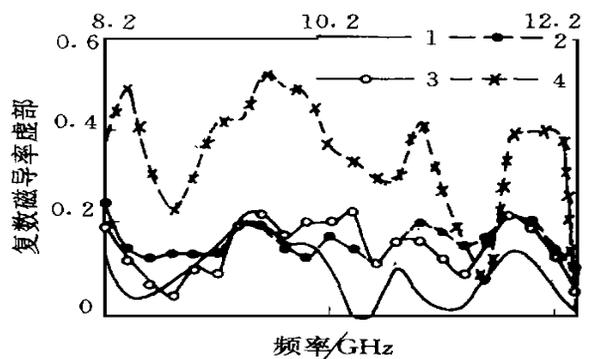


图 2 复合材料的磁导率虚部与频率关系

Fig. 2 The relationship between the imaginary part of permeability of the composite

由图可见, 1~4 号曲线在试验频带内变化趋势大体相似, 分别在 8.6~10.2GHz、10.4~10.8GHz 频带内出现缓降现象, 且吸收频带较宽, 可大于 2GHz。

1~4 号吸收剂的主要晶相组成为  $\text{Fe}_3\text{Si}$ 、 $\text{Co}_3\text{C}$ 、 $\text{CoFe}$  等。它们都可以起到吸收雷达波的作用。在本文的工艺条件下, 合理地调整微粉的物相组成、含量及其颗粒尺寸与形状, 可以影响吸收剂的饱和磁化强度、剩磁、磁晶各向异性常数等静态磁参数。这就可能保证吸收剂在微波频率下仍能保持较高的复数磁导率实部与虚部。

聚碳硅烷含量高于 20% 时, 反射率处于较低范围。三条曲线在频段内变化趋势大体相同, 对应的电阻率均为  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$  数量级。聚碳硅烷为 50% 时, 吸收剂中含较多的碳化硅, 介电损耗机制起主要作用,

反射衰减最大。聚碳硅烷掺混量为 20% 时,电阻率为  $10\Omega \cdot \text{cm}$  数量级,介电损耗机制仍起作用的前提下,磁损耗机制明显增强。为 4 号曲线趋势未变,但反射衰减大幅度提高,且出现高频震荡现象。

借鉴混合介质理论,得到复合材料的电磁参数是用以计算混合型媒介的等效介电常数和等效磁导率理论。对于单一基体中只含有一种增强组元的复合材料,混合媒质的复数磁导率和损耗角正切有如下估算公式:

$$\ln \mu_g = V_1 \ln \mu_1 + V_2 \ln \mu_2 \quad \ln(\text{tg} \delta) = V_1 \ln(\text{tg} \delta_1) + V_2 \ln(\text{tg} \delta_2)$$

在复合材料损耗介质中传播的电磁波,其传播常数  $\gamma_2 = (\alpha + i\beta)^2 = -\omega^2 \mu_r \epsilon$  依赖于复合材料中传输的衰减常数  $\alpha$  和相移常数  $\beta$ ,  $\alpha, \beta$  又决定于复磁导率  $\mu_r$  与复介电常数  $\epsilon$ 。结合图 1 与图 2 分析可知,4 号样品的  $\mu \sim f$  曲线的变化趋势及峰值特征与 1 ~ 3 号曲线大体相同。

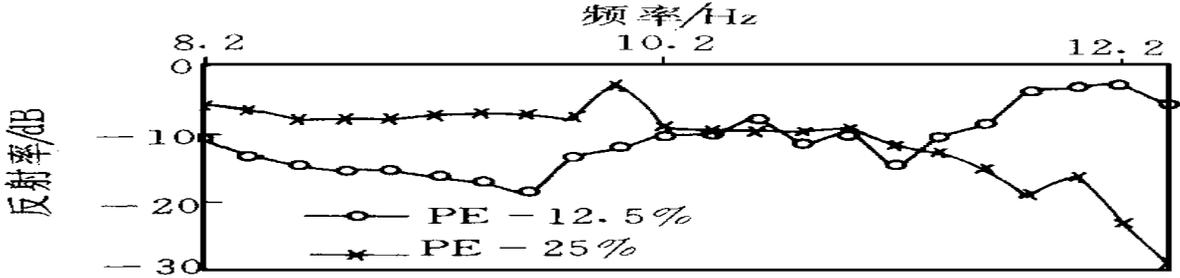


图 3 不同聚乙烯含量样品的反射率与频率关系曲线

Fig. 3 The relationship between reflectivity and frequency of the composite with different PE amount

### 2.3 聚乙烯含量对复合材料吸波特性的影响

对于用作吸波材料的复合材料,其基体材料的选择应尽量减少其对复合材料中填充的吸收剂效能的影响。由图 2 可见,聚乙烯的加入量对复合材料在全频段内各频率范围影响程度是不同的。在 8.2 ~ 10.2 GHz 范围内,聚乙烯含量较高的复合材料的反射衰减较小,这从另一个角度验证了复合材料中混合媒质电磁参数的估算理论。进入中频范围,两条曲线处于同一水平,聚乙烯含量对此频率处的反射率影响不明显。当频率超过 11.2GHz 时,聚乙烯含量对反射率的影响与低频相反。这说明在高频或超高频段,复合材料中的磁性微粉与聚乙烯的电磁特性对电磁波的衰减作用可能比低频时更为敏感。

### 3 结论

可以通过化学还原法及后续处理手段制备物相组成及电磁参数可调的磁性微粉吸收剂。聚碳硅烷的加入量大于 20% 时对复合材料的反射衰减影响不大,低于 20% 时可使反射衰减总体水平提高 4dB 以上;聚乙烯的加入量对复合材料在全频段内各频率范围影响程度不同。因此可以从吸收剂制备与基体选择等方面对复合材料的吸波特性的进行调节从而体现复合材料的可设计性。

### 参考文献

- 1 科夫涅里斯特,拉扎列娃,拉瓦耶夫等著.,微波吸收材料.北京:科学出版社,蔡德录、刘承均译 1985
- 2 车仁超,李永清.磁性微粉的化学还原法制备工艺及电磁特性.见:第三届功能材料年会(重庆),1998
- 3 姜卫东,陈曾平.雷达目标高分辨距离像的特征提取及方法.国防科技大学学报,1999,6:55-58