

文章编号: 1006-9941(2004)05-0273-04

# 三维空间中的膨胀石墨对毫米波 衰减性能实验研究

关华<sup>1,2</sup>, 潘功配<sup>1</sup>, 王广<sup>2</sup>, 周遵宁<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094;

2. 齐齐哈尔建华工业有限责任公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

**摘要:** 在分析可膨胀石墨膨胀机理基础上, 实验研究了三维空间中的膨胀石墨对3 mm、8 mm波的衰减性能。结果显示, 膨胀石墨能够较好地衰减3 mm和8 mm波辐射, 其衰减性能随着可膨胀石墨粒度减小而降低。当可膨胀石墨作为毫米波干扰新型材料或发烟剂主体成分时, 只有选用合适粒度才会获得较好的衰减效果。

**关键词:** 光学; 膨胀石墨; 发烟剂; 毫米波; 衰减

**中图分类号:** TQ567.5; O613.71

**文献标识码:** A

## 1 引言

随着毫米波雷达技术的发展, 国外34 GHz的8 mm和94 GHz的3 mm雷达技术已成熟, 并应用于制导导弹。相应的毫米波无源干扰又面临新的挑战。传统的微波干扰材料箔条等在用于毫米波干扰时遇到了诸如切割加工工艺复杂、精度差, 包装和空中散开难度大等一系列问题<sup>[1]</sup>。因此, 必须寻找新型毫米波干扰材料。

由可膨胀石墨高温膨化工艺而制得的蠕虫状膨胀石墨具有高的电导率、较大的表面积, 从而赋予它较好的电磁屏蔽性能。另外, 由于其尺寸较大, 密度较小, 因此沉降速度慢, 空中悬浮时间长。所以, 军事上试图利用可膨胀石墨制造发烟剂生成烟幕来干扰毫米波雷达探测<sup>[2,3]</sup>。作为一种新型的毫米波干扰材料, 人们对膨胀石墨的毫米波衰减性能研究很不充分。膨胀石墨在三维空间中的衰减性能静态测试在干扰材料研究中十分重要。而在以往的研究中将石墨的三维衰减性能都简化为二维平面问题, 并且只对8 mm的衰减性能进行了研究<sup>[4,5]</sup>。

本研究在分析可膨胀石墨膨胀机理基础上, 设计了

三维空间分布的膨胀石墨测试样板, 对比测试了相同质量的可膨胀石墨, 在不同粒度下, 膨化生成的膨胀石墨对3 mm、8 mm波衰减性能, 为毫米波干扰材料研究及其使用提供必要数据。

## 2 可膨胀石墨的膨胀机理

可膨胀石墨是由天然鳞片石墨经插层、水洗、干燥后得到的产品, 具有石墨的基本结构。石墨是独特的六角网状平面层状结构, 层内相邻C原子间采用 $sp^2$ 杂化轨道, 彼此之间以 $\sigma$ 键连接在一起。层面碳原子间是极强的大 $\pi$ 键, C—C键长为0.142 nm, 层间距为0.335 nm, 以微弱的范德华力结合<sup>[6]</sup>。结合力较弱的鳞片石墨层间容易滑动, 通过外力作用, 在石墨层间插入特定的物质形成石墨层间化合物(graphite intercalation compounds, GICs), 经水洗干燥得到可膨胀石墨。在高温作用下, 层间化合物瞬间分解, 产生一种沿石墨层间 $c$ 轴方向的推力, 这种推力远大于石墨粒子的层间结合力, 在其作用下石墨层被推开从而使石墨粒子沿 $c$ 轴方向高倍膨胀, 而与层面平行的 $a$ 轴变化不大, 形成蠕虫状膨胀石墨。膨胀石墨长度可达数毫米, 体积可增大80~500倍, 堆积密度 $0.002\sim 0.004\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ <sup>[7,8]</sup>。

## 3 实验部分

### 3.1 膨胀石墨及测试样板制备

称取0.060 g(精确至0.001 g)可膨胀石墨(规格JF150-50-7, 膨胀容积 $335\text{ ml}\cdot\text{g}^{-1}$ ), 置于已在 $900\sim$

收稿日期: 2004-02-16; 修回日期: 2004-04-22

基金项目: 国防科研基金(404040502)资助项目

作者简介: 关华(1965-), 女, 高级工程师, 博士研究生, 从事无源干扰及光电对抗应用技术研究。

e-mail: wggh\_wmy@yahoo.com.cn

1 000℃的高温炉中灼烧 5 min 的石英烧杯中,立即放回高温炉内,不再膨胀时,立即取出,得到膨胀石墨<sup>[9]</sup>。

测试样板由框体、透明胶带组成,胶带平整地粘结在框体的四框上,框体材料采用对毫米波透明的聚苯乙烯泡沫板,框内尺寸为 9 cm × 9 cm。

使膨胀石墨从一定高度自由下落并均匀地分散在透明胶带上,于是膨胀石墨被随机地粘结在不同方向并呈现三维空间的分布状态。

### 3.2 实验装置

毫米波衰减性能测试装置主要由 3 mm(8 mm)波噪声发生器、接收器、测试样板以及数据采集与处理系统等组成。测试样板放在发生器和接收器之间。毫米波衰减测试原理如图 1 所示。

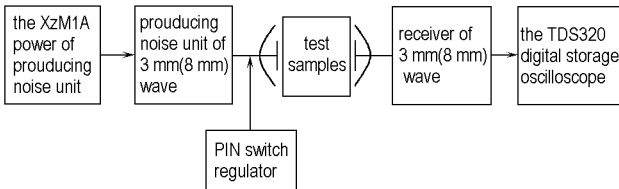


图 1 毫米波衰减测试原理图

Fig. 1 Principle of millimeter wave attenuation test

### 3.3 测试方法

测试时,首先测未放膨胀石墨的测试样板 3 mm(8 mm)波信号电压值  $V_0$ ,然后更换为含有膨胀石墨样板,再测量通过其 3 mm(8 mm)波信号电压值  $V_1$ ,根据(1)式求出毫米波通过被测试样的透过率  $T$ :

$$T = \frac{V_1}{V_0} \quad (1)$$

根据(2)式,计算被测膨胀石墨对毫米波的衰减  $A$ :

$$A = -20\log T \quad (2)$$

## 4 结果与讨论

### 4.1 膨胀石墨物理特性与可膨胀石墨粒度的关系

可膨胀石墨高温膨化后其体积、质量以及蠕虫长度与插层化合物的种类、膨化温度和材料粒度等因素有密切关系。在其它因素相同的情况下(可膨胀石墨质量 0.060 g),膨胀石墨物理特性与可膨胀石墨粒度的关系如表 1 所示。

从表 1 中可以看出,膨胀石墨的体积、质量及蠕虫长度随着可膨胀石墨粒度减小而减小,这主要与石墨层间化合物的插入量直接相关。石墨粒度越大,插入层间的物质质量越大,导致膨胀率越大,使蠕虫长度越长、体积越大;而相应的粒子数减少造成总插入量变小,膨化后得到物质质量反而越大。

表 1 膨胀石墨物理特性与可膨胀石墨粒度的关系

Table 1 The relationship between physical properties of expanded graphite and particle size of expansible graphite

number	particle size/ $\mu\text{m}$	volume of expanded graphite/ml	weight of expanded graphite/g	average length of expanded graphite/mm
1	900 ~ 450	200	0.033	8
2	450 ~ 300	180	0.028	4
3	300 ~ 200	170	0.022	2
4	200 ~ 150	130	0.020	1

### 4.2 膨胀石墨对毫米波衰减性能与可膨胀石墨粒度的关系

将 4.1 中得到的膨胀石墨制成测试样板,测试其毫米波衰减性能,结果见表 2。其中,粒度 450 ~ 300  $\mu\text{m}$  的可膨胀石墨样板对 3 mm、8 mm 信号电压衰减情况如图 2、图 3 所示。

表 2 三维空间中膨胀石墨对 3 mm、8 mm 波衰减结果

Table 2 The results of attenuation performance of expanded graphite in three-dimensional space to 3 mm and 8 mm wave

wave band/mm	particle size/ $\mu\text{m}$	signal voltage/V	voltage of expanded graphite/V	transmittance/%	attenuation decibel/dB
3	900 ~ 450	3.18	0.900	28.3	11.0
	450 ~ 300		0.867	27.3	11.3
	300 ~ 200		1.170	36.8	8.68
	200 ~ 150		1.400	44.0	7.13
8	900 ~ 450	4.93	0.733	14.9	16.6
	450 ~ 300		0.712	14.4	16.8
	300 ~ 200		2.100	43.6	7.22
	200 ~ 150		2.700	54.8	5.22

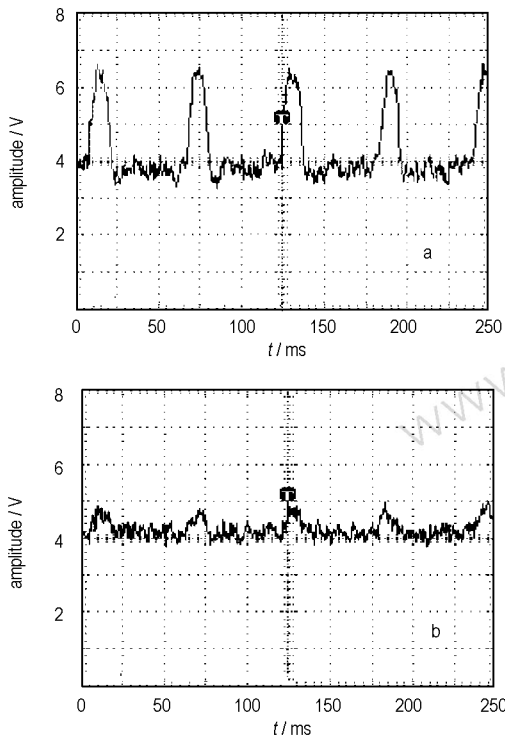


图 2 膨胀石墨对 3 mm 信号电压的衰减

a—3 mm 信号电压, b—膨胀石墨(粒度 450 ~ 300 μm)样板的 3 mm 信号电压

Fig. 2 Attenuation of the expanded graphite to 3 mm signal voltage  
a—3 mm signal voltage, b—attenuation of the expanded graphite (particle size 450 ~ 300 μm) to 3 mm signal voltage

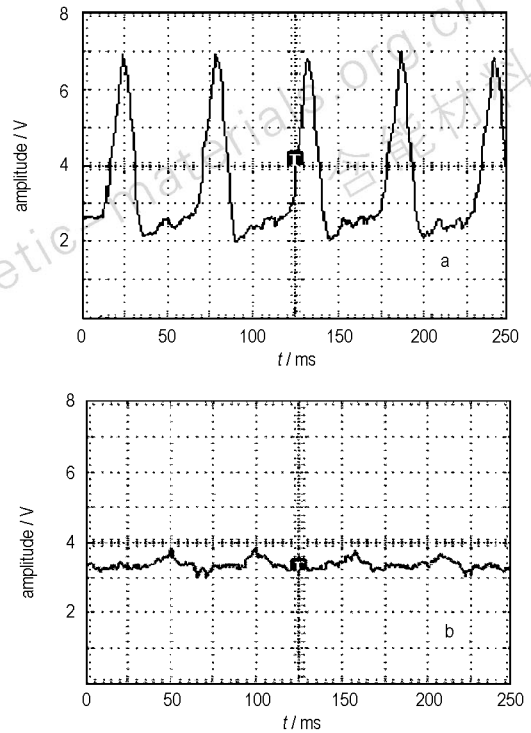


图 3 膨胀石墨对 8 mm 信号电压的衰减

a—8 mm 信号电压, b—膨胀石墨(粒度 450 ~ 300 μm)样板的 8 mm 的信号电压

Fig. 3 Attenuation of the expanded graphite to 8 mm signal voltage  
a—8 mm signal voltage, b—Attenuation of the expanded graphite (particle size 450 ~ 300 μm) to 8 mm signal voltage

膨胀石墨对 3 mm、8 mm 波辐射均具有明显的衰减作用。不同粒度可膨胀石墨,在相同质量的情况下,膨化得到的膨胀石墨对 3 mm、8 mm 波的衰减性能差别很大。由图 2、图 3 可看出,当可膨胀石墨粒度为 450 ~ 300 μm 时,膨胀石墨样板对 3 mm 波信号电压有了大幅度降低,由 3.18 V 衰减到 0.867 V,由公式(1)、(2)计算其对 3 mm 波的衰减为 11.3 dB; 同样,计算得到其对 8 mm 波的衰减为 16.8 dB。由表 2 可知,对同一波长而言,随着可膨胀石墨粒度的减小,对 3 mm、8 mm 波的衰减能力也在减小。当可膨胀石墨粒度为 900 ~ 300 μm 时,对 3 mm、8 mm 波均具有较好衰减效果;当粒度较大时,膨胀石墨对 8 mm 波的衰减能力明显强于 3 mm 波,而当粒度较小时,膨胀石墨对 3 mm 波的衰减能力反而略强于 8 mm 波。

膨胀石墨对毫米波的衰减是吸收和散射共同作用的结果,吸收在衰减中起重要作用。膨胀石墨电阻率是各向异性的, a 轴方向约为  $7 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ , c 轴方向约为  $0.35 \sim 0.5 \Omega \cdot \text{cm}$ , 作为一种具有有限

电阻率的介质材料,使进入其中的电磁波产生传导电流和位移电流,从而产生热损耗而被吸收。随着可膨胀石墨粒度的增大,膨胀体积增大,膨胀石墨表面积增大,表面自由能及表面吸收活性增强,因此对入射的毫米波吸收作用增强,表现为对毫米波的衰减能力增大。除吸收引起的衰减外,膨胀石墨保留了石墨的导电性,对毫米波有一定的散射作用,膨胀石墨长度的不同可能是引起 3 mm、8 mm 波衰减性能差异的主要原因。

### 5 结 论

(1) 在质量相同的情况下,不同粒度的可膨胀石墨对 3 mm 和 8 mm 波的衰减结果不同。随着其粒度的减小,衰减能力均下降;同一粒度的可膨胀石墨,对 3 mm、8 mm 的衰减能力不同,粒度较大时,对 8 mm 的衰减能力强,粒度较小时,对 3 mm 的衰减能力略强。

(2) 当可膨胀石墨作为毫米波干扰新型材料或发烟剂主体成分时,选用合适粒度才可以获得较好的毫米波衰减效果。

## 参考文献:

- [1] 王昭群,朱长江,陈作如. 毫米波无源干扰技术进展及途径分析[J]. 南京理工大学学报,1998,(1): 22-25.  
WANG Zhao-qun,ZHU Chang-jiang,CHEN Zuo-ru. Development and analysis of method for technique of millimeter wave passive countermeasure [J]. *Journal of Nanjiang University of Science and Technology*,1998(1): 22-25.
- [2] Uwe Krone, Klaus Moller, Ernest Schulz. Pyrotechnic smoke generator for camouflage purposes[P]. USP 5 656 794,1995.
- [3] 乔小晶,张同来,任慧,等. 爆炸法制备膨胀石墨及其干扰性能[J]. 火炸药学报,2003,26(1): 70-73.  
QIAO Xiao-jing,ZHANG Tong-lai,REN Hui,et al. Preparation by explosion method and the interference function of expanded graphite[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*,2003,26(1): 70-73.
- [4] 朱长江,陈作如. 膨胀石墨的毫米波二维平面衰减性能研究[J]. 材料科学与工程,2002,20(4): 487-489.  
ZHU Chang-jiang,CHEN Zuo-ru. Study on two dimensional planar millimeter wave attenuation characteristic of expanded graphite[J]. *Materials Science & Engineering*,2002,20(4): 487-489.
- [5] 朱长江,陈作如. 膨胀石墨的毫米波二维平面散射截面研究[J]. 材料科学与工程学报,2003,21(3): 350-352.  
ZHU Chang-jiang,CHEN Zuo-ru. Study on two dimensional planar millimeter wave scattering cross section of expanded graphite[J]. *Journal of Materials Science & Engineering*,2003,21(3): 350-352.
- [6] 大连理工大学无机化学教研室编. 无机化学(第三版)上册[M]. 北京:高等教育出版社,1993.
- [7] 刘国钦,闫珉. 利用细磷片石墨制备膨胀石墨的研究[J]. 新型炭材料,2002,17(2): 13-18.  
LIU Guo-qin,YAN Min. The preparation of expanded graphite using fine flaky graphite[J]. *New Carbon Materials*,2002,17(2): 13-18.
- [8] 冯硕,杨丽华,翟彤宇,等. 以甲酸为插入剂制备无硫可膨胀石墨[J]. 河北农业大学学报,2002,25(2): 111-113.  
FENG Shuo,YANG Li-hua,ZAI Tong-yu,et al. The preparation of sulfur-free and expandable graphite by formic acid as intercalate [J]. *Journal of Agriculture University of Hebei*,2002,25(2): 111-113.
- [9] 可膨胀石墨[S]. GB10698-89.

## Study on the Millimeter Wave Attenuation Performance of Expanded Graphite in Three-dimensional Space

GUAN Hua<sup>1,2</sup>, PAN Gong-pei<sup>1</sup>, WANG Guang<sup>2</sup>, ZHOU Zun-ning<sup>1</sup>

(1. Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

2. Jianhua Industry Limited Responsibility Company, Qiqihar 161006, China)

**Abstract:** On the basis of analyzing expanded mechanism of expansible graphite,attenuation performance of expanded graphite in three-dimensional space at 3 mm and 8 mm wave was studied by experiments. The results show that expanded graphite has a valuable attenuation performance at 3 mm and 8 mm wave, and its attenuation performance decreases with the reduction of expansible graphite particle size. It is essential to choose appropriate particle size to obtain a valuable attenuation performance when expansible graphite is used as a new millimeter wave interfering material or the main component of smoke composition.

**Key words:** optics; expanded graphite; smoke composition; millimeter wave; attenuation