

文章编号:1001-9014(2004)01-0072-05

## 膨胀石墨对3mm、8mm波衰减性能研究

关华<sup>1</sup>, 潘功配<sup>1</sup>, 姜力<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094;

2. 建华工业有限责任公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

**摘要:**采用静态测试方法,研究了膨胀石墨对3mm、8mm波衰减性能,并与传统的毫米波干扰材料—铝箔条进行了对比。膨胀石墨对3mm、8mm波衰减分别为17.0dB和16.6dB,而铝箔条分别只有7.4dB和4.1dB,表明膨胀石墨是一种较好的毫米波干扰材料。同时,研究了膨胀石墨粒度(直径及长度)对衰减性能的影响,并给出了最大衰减效果的最佳粒度范围。所得结论对全波段发烟剂设计有较好的参考价值。

**关键词:**全波段烟幕;毫米波干扰;膨胀石墨;3mm;8mm

**中图分类号:**0613.71;TQ567.5 **文献标识码:**A

## STUDY ON ATTENUATION PERFORMANCE OF EXPANDED GRAPHITE AT THE BANDS OF 3mm AND 8mm

GUAN Hua<sup>1</sup>, PAN Gong-Pei<sup>1</sup>, JIANG Li<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** The millimeter wave attenuation performance of expanded graphite at 3mm and 8mm wavelength was studied by static experiments. The comparative experiment using aluminum chaff, which is a kind of well-known millimeter wave countermeasure material, was also done. The results show that the attenuation of expanded graphite at 3mm and 8mm wavelength are 17.0dB and 16.6dB respectively, and the attenuation of aluminum chaff are 7.4dB and 4.1dB. It means that the expanded graphite could be a better millimeter wave countermeasure material. The optimal particle size (including diameter and length) of expansive graphite that achieves the maximal attenuation was also obtained by experiments. These results could be a valuable reference for the design of full band screen smoke.

**Key words:** full band screening smoke; millimeter wave countermeasure; expanded graphic (EG); 3mm; 8mm

### 引言

毫米波具有传输能力强、分辨率高、波束窄、频率宽和多普勒频移大等特点<sup>[1]</sup>,其对云、雾、尘埃和战场烟幕的穿透性好,因此,毫米波探测器在军事上得到了广泛的应用。美国等西方国家已经拥有3mm、8mm制导武器。为了对抗毫米波制导武器的威胁,世界各国开展了干扰毫米波技术研究,箔条等纤维状导电材料在射频对抗,特别是干扰中起到了重要作用。根据半波偶极子理论,当纤维的特征尺寸接近半波时,对毫米波或厘米波具有较好的干扰效果<sup>[2]</sup>,但利用箔条等纤维作为干扰毫米波材料时,

切割加工工艺复杂、精度差、包装和分散技术难度大,特别作为3mm频段干扰材料时,将带来一系列难以解决的问题<sup>[3]</sup>。因此,研究其它材料对毫米波的干扰性能,找到一种对毫米波有效、实用、易于实施的毫米波干扰材料,将对毫米波无源干扰技术以及全波段烟幕技术的发展起到推动作用。

1995年美国专利公布了一种全波段发烟剂<sup>[4]</sup>,该发烟剂燃烧后产生的气溶胶具有干扰毫米波的能力,其主要干扰组分是膨胀石墨。关于膨胀石墨对毫米波衰减性能的进一步研究未见报道。本文实验研究了膨胀石墨对毫米波的衰减效果及其几何尺寸对衰减效果的影响。

收稿日期:2003-01-06,修回日期:2003-08-19

基金项目:国防预研基金资助项目(404040502)

作者简介:关华(1965—),女(满族),黑龙江齐齐哈尔人,高级工程师,博士研究生,主要从事军事化学与烟火技术研究。

Received Date: 2003-01-06, revised Date: 2003-08-19

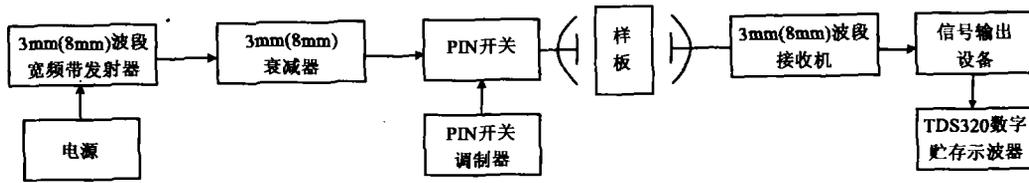


图1 毫米波衰减测试原理图

Fig.1 Principle drawing of millimeter wave attenuation test

膨胀石墨是可膨胀石墨在高温作用下产生的,可膨胀石墨是石墨通过适当氧化处理,将其它种类的分子或原子插入其层间,形成石墨层间化合物.通过高温处理,使层间化合物分解同时沿石墨层垂直方向( $c$ 轴)急速膨胀,石墨平面( $a$ 轴)方向尺寸基本不变,体积可增加原来的几百倍,形成蠕虫状.利用这一性质可通过烟火药氧化还原反应产生的热,将可膨胀石墨加热生成悬浮于空中的膨胀石墨烟幕,用于干扰毫米波.

## 1 实验

### 1.1 样品制备

膨胀石墨:采用石墨硫酸氢盐插层的可膨胀石墨(膨胀倍率约250ml/g)在高温下生成.直径200~450 $\mu\text{m}$ ,长度1~12mm.

实验样板:将膨胀石墨密度均匀、方向随机地分散在面积和形状一定的聚氯乙烯样板上,样板尺寸为 $9 \times 9\text{cm}^2$ ,试样重60mg.铝箔条样板中箔条长度0.5~5mm.

### 1.2 实验方法

毫米波通过干扰材料时,在干扰材料的吸收和散射作用下衰减.设一定的实验样板(面积为 $S$ ,厚度为 $L$ ),放置浓度为 $C$ 的干扰材料时对毫米波信号衰减电压为 $V$ ,无干扰材料时毫米波信号电压为 $V_0$ ,干扰材料的毫米波透过率为:

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

干扰材料对毫米波的衰减:

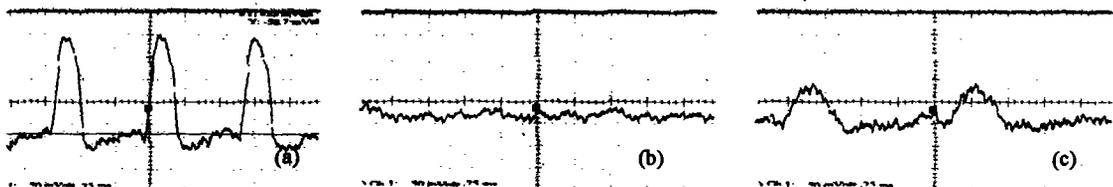


图2 不同样板对3mm信号电压衰减(a)未放干扰物前样板(b)膨胀石墨样板(c)铝箔条样板

Fig.2 Attenuation of the following different templates to 3mm signal voltage (a) Template without disturbing objects (b) EG template (c) Aluminum chaff template

$$A = -20\log T(\text{dB}). \quad (2)$$

毫米波衰减测试原理如图1:

## 2 结果与讨论

### 2.1 膨胀石墨与铝箔条对3mm、8mm波衰减性能对比

膨胀石墨和铝箔条对3mm和8mm信号电压衰减分别如图2、图3所示,电压峰值和衰减结果见表1.从图表上可以明显看到:放置膨胀石墨后3mm信号电压有了大幅度降低,由258mV衰减到36.7mV,由式(1)、式(2)计算信号最大衰减为17.0dB;放置铝箔条时,3mm信号电压衰减到113mV,最大衰减为7.4dB.膨胀石墨对3mm波具有明显的衰减作用,较铝箔条大9.8dB.

膨胀石墨将8mm信号电压由317mV衰减到46.9mV,计算信号最大衰减为16.6dB;铝箔条将信号电压衰减到197mV,最大衰减4.1dB.膨胀石墨对8mm波也具有明显的衰减作用,较铝箔条大12.5dB.

膨胀石墨长度数毫米,在室温条件下 $a$ 轴方向电阻率为 $5.4 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ , $c$ 轴方向为 $3.0 \times 10^{-2} \Omega\text{cm}$ .我们知道,粒子对电磁波的消光作用是由散射和吸收两部分共同作用的结果,这两部分的强弱是由粒子的导电性及粒子的形状和大小等因素共同决定的,一般情况下,导电性越强,其散射干扰能力越大.膨胀石墨粒子尺寸与毫米波波长相当,并且具有导电性,所以表现出对毫米波的衰减.由于膨胀石墨导电性低于铝箔条,故吸收衰减起了很大的作用.影

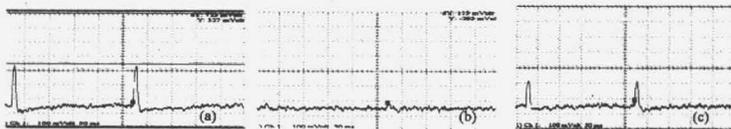


图3 不同样板对8mm信号电压衰减 (a)未放干扰物前样板(b)膨胀石墨样板(c)铝箔条样板

Fig.3 Attenuation of the following different templates to 8mm signal voltage (a) Template without disturbing objects (b) EG template (c) Aluminum chaff template

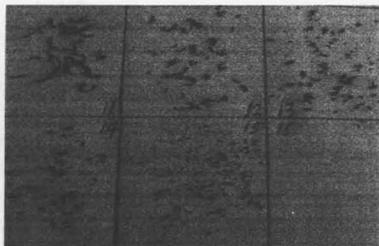


图4 不同粒度可膨胀石墨膨化生成的膨胀石墨

Fig.4 EG generated by different sizes of expansible graphite

响毫米波衰减效果的因素较多,最重要的因素是材料的导电性能和单位重量材料的偶极子数.膨胀石墨对毫米波衰减能力优于铝箔条的主要原因在于其密度很小,相比之下,虽然铝箔条导电性能优于膨胀石墨,但由于铝箔条的比重要比膨胀石墨大得多,单位重量的偶极子数量相对较少,此时,偶极子数多少对毫米波衰减的影响成为主要因素.

## 2.2 膨胀石墨粒度对毫米波衰减性能的影响

粒度是对粒子的消光性能影响最大的因素,对膨胀石墨来说,粒度包括直径和长度,可膨胀石墨在高温下主要沿 $c$ 轴方向(长度)发生膨胀,在 $a$ 轴方向(直径)变化不大.膨胀石墨直径即为原材料的粒度.实验采用的可膨胀石墨粒度范围20~120目/英寸(n/in),筛分5级即20~40n/in,40~60n/in,60~80n/in,80~100n/in,100~120n/in,其直径依次减小.膨胀后,依次对应图4所示的11、12、13、14、15.

表1 膨胀石墨和铝箔条对3mm和8mm衰减结果

Table 1 Test result of a attenuation performance of EG and aluminum chaff at 3mm and 8mm

波段	未放干扰物前样板信号		膨胀石墨样板信号		铝箔条样板信号		衰减/dB
	电压峰值/mV	电压峰值/mV	电压峰值/mV	电压峰值/mV	膨胀石墨	铝箔条	
3mm	258	36.7	113	17.0	7.4		
8mm	317	46.9	197	16.6	4.1		

## 2.2.1 膨胀石墨直径

5种直径膨胀石墨制成的样板,不同波段毫米波衰减性能测试结果如图5所示.由图5可以看出,不同直径的膨胀石墨对毫米波的衰减能力不同,在烟火药原材料常用的粒度范围内,对3mm、8mm衰减均存在一最大值,之后,随着膨胀石墨直径的减小,对毫米波的衰减能力也减小.对3mm最大衰减17.3dB,此膨胀石墨直径为40~60n/in;对8mm最大衰减值为17.0dB,此膨胀石墨直径为60~80n/in,长度为1~12mm.由此说明对该种膨胀石墨来说,当直径为40~80n/in(200~450 $\mu$ m),长度1~12mm时对毫米波衰减最有效.分析其原因主要是膨胀石墨的长度和数量双重作用的结果.不同直径的膨胀石墨是由不同粒度的可膨胀石墨生成的,可膨胀石墨粒度决定着单位重量膨胀石墨的数量和体积,粒度越大,膨胀石墨数量越小,长度越长;总之,粒度越小,膨胀石墨数量越多,但体积越小,两者均表现出体积密度较小,阻挡毫米波能力减弱,所以表现出粒度太大或太小时对毫米波的衰减效果减弱.只有当膨胀石墨的尺寸与波长接近,并且数量较多时,才表现出良好的毫米波衰减性能.

## 2.2.2 膨胀石墨长度

表2给出了一定直径范围内(200~450 $\mu$ m)不同长度膨胀石墨样板对3mm,8mm波的衰减性能测试结果.在该直径下,不同长度的膨胀石墨对毫米波的衰减性能不同.随着长度的增加,对3mm,8mm的衰减能力提高,当长度为 $4 \pm 2$ mm时达到最大,长度继续增加时,衰减性能又逐渐降低.对3mm和8mm,

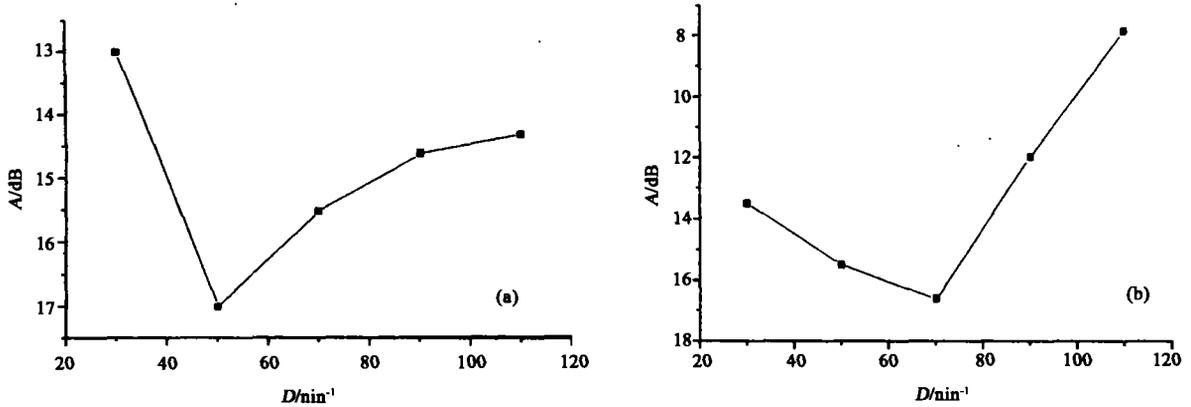


图5 不同波段毫米波衰减与膨胀石墨直径关系(a)3mm(b)8mm  
Fig.5 Relationship of attenuation at different MMV and diameters of EG (a)3mm (b)8mm

最佳衰减长度均为  $4 \pm 2$ mm.

表2 不同长度膨胀石墨与毫米波衰减性能测试结果  
Table 2 Test result of MMV attenuation performance of different length of EG

序号	长度范围/mm	3mm 透过率/(%)	3mm 衰减/dB	8mm 透过率/(%)	8mm 衰减/dB
1	$1.5 \pm 1$	22.8	12.8	37.8	8.4
2	$4 \pm 2$	14.8	16.6	12.6	18.0
3	$10 \pm 2$	17.4	15.2	21.0	13.5

由于膨胀石墨在物理形态上与导电纤维相似,近似为直线形,并具有导电性,采用导电纤维对电磁波的衰减模型计算膨胀石墨对毫米波的衰减. 计算时设:膨胀石墨半径 0.14mm,密度 0.01g/cc,电导率  $1E4S/m$ ,理论模拟曲线<sup>[5]</sup>如图6所示. 干扰物对毫米波的散射和吸收作用表现对入射光的衰减(消光系数 a). 无论是衰减系数、散射系数还是吸收系数,在膨胀石墨很短的时候都很小,对8mm波衰减

系数达到极大值时,石墨长度4mm左右;对3mm波衰减系数达到极大值时,石墨长度1mm左右,以后开始出现震荡变化,并且随着长度的增大,吸收系数、散射系数均在降低. 理论模拟结果表明,膨胀石墨对毫米波衰减符合半波偶极子理论.

由实验结果可知:对8mm而言,测试结果与理论模拟的结果相符;而对3mm出现偏差. 膨胀石墨的毫米波衰减性能并不完全符合半波偶极子理论. 理论模型计算时一个重要假设是纤维为理想导体的导线,而膨胀石墨的导电性与这一假设有一定的差距,除散射引起的电磁衰减作用外,膨胀石墨作为一种具有有限电导率的介质材料,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并被完全吸收,吸收在膨胀石墨相比,前者是由更小粒度的可膨胀石墨生成的,此石墨体积密度最小,对毫米波吸收衰减最小. 而  $10 \pm 2$ mm的膨胀石墨,在同样体密度的条件下,干扰材料数量减小,干扰效果随之降低. 另一方面,当膨胀石墨较短时,在同一直径范围

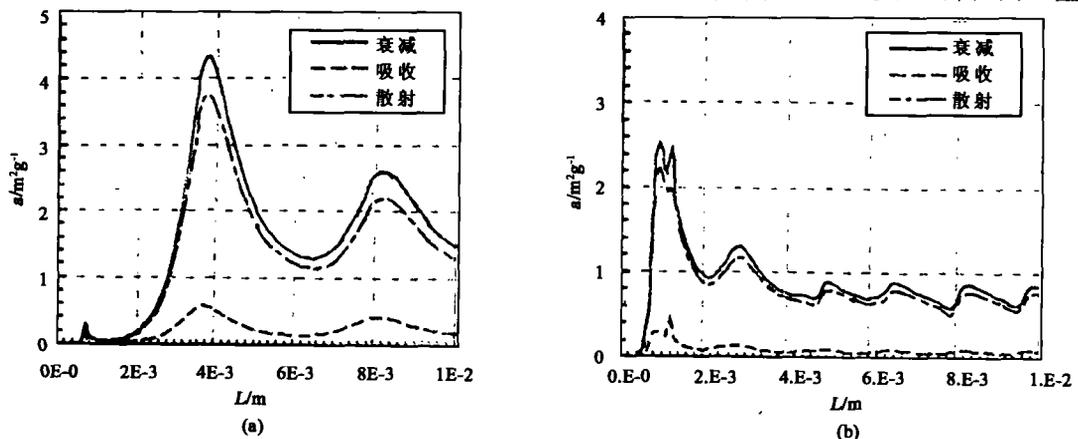


图6 消光系数与膨胀石墨长度关系的模拟曲线(a)入射波长8.57mm (b)入射波长3.19mm  
Fig.6 Simulated curve of extinction coefficient to the length of EG (a) incident wavelength 8.57mm (b) incident wavelength 3.19mm

内,长细比较大,与纤维状材料相比,如此大的长细比,也是3mm衰减结果出现偏差的一个主要原因.

### 3 结论

综上所述,我们可得出以下结论:(1)膨胀石墨对3mm、8mm波具有明显的衰减效果,60mg试样在面密度为 $2.47\text{mg}/\text{cm}^3$ 样板上,对3mm单程最大衰减达17.0dB,而8mm单程最大衰减达16.6dB,目前使用的毫米波干扰材料铝箔条只有7.4dB和4.1dB.膨胀石墨是一种较好的毫米波干扰材料;(2)高温下,膨胀石墨的尺寸由可膨胀石墨粒度决定,粒度越大,其长度和直径也越大,并呈蠕虫状.膨胀石墨对毫米波的衰减能力与其直径有直接关系,最佳衰减直径为 $40\sim 80\text{n}/\text{in}$ ,达到最大值后随着直径的减小,对毫米波的衰减能力降低;同一直径范围( $40\sim 80\text{n}/\text{in}$ )的膨胀石墨在不同的长度条件下,对毫米波的衰减能力不同,对8mm而言,最佳衰减长度 $4\pm 2\text{mm}$ ;而3mm,最佳衰减长度也是 $4\pm 2\text{mm}$ ,膨胀石墨对毫米波的衰减不完全符合半波偶极子理论.

因此,全波段发烟剂设计时建议采用的可膨胀石墨粒度范围最好为 $40\sim 80\text{n}/\text{in}$ ,膨胀石墨长度为 $4\pm 2\text{mm}$ .

### REFERENCES

- [1] DIAO Yu-Cai, ZUO Feng-Qin. *Millimeter Wave Technique and Application*[M]. Beijing: Ordnance Industry Publishing House(刁育才,左凤琴.毫米波技术及其军事应用.北京:兵器工业出版社), 1991:2—3
- [2] WANG Zhao-Qun, ZHU Chang-Jiang, PAN Gong-Pei. Study on chaff disturbing millimeter wave[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*(王昭群,朱长江,潘功配.箔条对毫米波干扰的实验研究.弹箭与制导学报), 1993, 13(4): 59—63
- [3] WANG Zhao-Qun, ZHU Chang-Jiang, CHEN Zuo-Ru. Develop and analysis of method for technique of millimeter wave passive countermeasure[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*(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.南京理工大学学报), 1998, 22(1): 22—25
- [4] Uwe Kron, Klaus Moller, Ernest Shulz. Pyrotechnic smoke generator for camouflage purposes[J]. *PCT/DE94/01237*. Germany. C06B 43/00. US5656794. 1995
- [5] MIAO Yun-Kun, JIN Bao-Yuan, WU Qi-Jun, et al. Study on attenuation performance of millimeter wave screening expansive graphite smoke[C]. *The eleventh Proceedings of Article and Pyrotechnic Technique Symposium Chinese Ordnance Industry Institute*, Beihai: Article and Pyrotechnic Technique Professional Committee of Chinese Ordnance Industry Institute(缪云坤,金宝源,吴启军,等.膨胀石墨烟幕对毫米波衰减性能研究.中国兵工学会第十一届火工烟火学术年会论文集.北海:中国兵工学会火工烟火学术专业委员会), 2001: 295—298