

文章编号: 1003-1480 (2004) 02-0001-03

# 可膨胀石墨发烟剂对毫米波 衰减性能的实验研究

关华, 潘功配, 周遵宁, 朱晨光

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京, 210094)

**摘要:** 本文在分析可膨胀石墨膨胀机理的基础上, 实验研究了可膨胀石墨发烟剂产生的膨胀石墨烟幕对 3mm 波、8mm 波的衰减性能。结果显示, 膨胀石墨烟幕能够较好地衰减 3mm 波和 8mm 波辐射, 其衰减性能随可膨胀石墨的粒度减小而下降, 利用可膨胀石墨发烟剂产生的烟幕来干扰毫米波雷达探测是可行的。

**关键词:** 膨胀石墨; 发烟剂; 毫米波; 衰减

**中图分类号:** TQ567.5      **文献标识码:** A

## Experimental Study on Millimeter Wave Attenuation Properties of Expansive Graphite Smoke Composition

GUAN Hua, PAN Gong-pei, ZHOU Zun-ning, ZHU Chen-guang

(Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing, 210094)

**Abstract:** Based on theoretical analysis of expansible graphite mechanism, the attenuation properties of expanded graphite and its smoke on 3mm and 8mm wave were experimentally studied. The result showed that the smoke generated by expansible graphite smoke composition could greatly attenuate 3mm and 8mm wave, and its attenuation power decreased with decreasing the particle size of expansible graphite. Expansible graphite was proved to be a possible countermeasure to millimeter wave radar.

**Key words:** Expanded graphite; Smoke composition; Millimeter wave; Attenuation

可膨胀石墨 (Expansible Graphite, 以下简称 EG) 是由天然鳞片石墨经插层、水洗、干燥后得到的产品, EG 经高温膨胀即形成疏松多孔的蠕虫状膨胀石墨。膨胀石墨长度可达数毫米, 具有导电性, 堆积密度  $0.002\sim 0.004\text{g}/\text{cm}^3$ , 由于这些特性被用于制造军用烟幕。1995 年, 德国 NICO 公司首先使用了 EG 制成 NG19 发烟剂, 产生的膨胀石墨烟幕对毫米波具有显著的衰减作用<sup>[1]</sup>。国内也进行了膨胀石墨对 8mm 波辐射衰减性能初步研

究<sup>[2~4]</sup>。为此, 本研究在分析可膨胀石墨膨胀机理基础上, 就其粒度对烟幕 3mm 波、8mm 波衰减特性影响进行了测试, 以求将 EG 用做毫米波干扰发烟剂主体材料。

## 1 EG 的膨胀机理

石墨的结构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  $\sigma$

收稿日期: 2004-02-20

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。

基金项目: 国防预研基金资助项目 (404040502)。

键连接在一起,每个C原子周围形成3个 $\sigma$ 键并且还有一个 $2p$ 轨道,其中有一个 $2p$ 电子。这些 $2p$ 轨道都垂直于 $sp^2$ 杂化轨道的平面,因此互相平行。层面碳原子间是极强的大 $\pi$ 键,具有金属键一样的键能。层间以微弱的范德华力结合,这样就给某些化学物质顺利突破层间结合力侵入其中形成石墨层间化合物(graphite intercalation compounds, GICs)创造了条件。在强氧化剂的作用下,插层物质在浓差推动力或电场力的作用下“挤入”石墨层间并在层间扩散。在高温作用下,层间化合物分解使石墨沿层间垂直的 $c$ 轴方向膨胀,而与层面平行的 $a$ 轴变化不大,形成蠕虫状膨胀石墨。膨胀石墨密度很小,体积是原来的几百倍。因此,将EG加入到烟火材料中,利用烟火药燃烧反应产生的热量

使其膨胀来制造膨胀石墨烟幕。

## 2 实验部分

### 2.1 试样制备

以15% EG与85%的烟火材料配制成EG发烟剂,取其20g压制成直径为23.5mm、密度为 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ 的EG药柱,用于产生烟幕。

### 2.2 毫米波衰减性能测试

实验装置:试样在烟箱内燃烧产生烟幕,烟箱体积为 $(1\times 1\times 1)\text{m}^3$ ;烟幕的毫米波衰减性能测试装置主要由3mm(8mm)波噪声发生器、接收器、以及数据采集与处理系统等组成。烟箱位于发生器 and 接收器之间。毫米波衰减测试原理见图1。

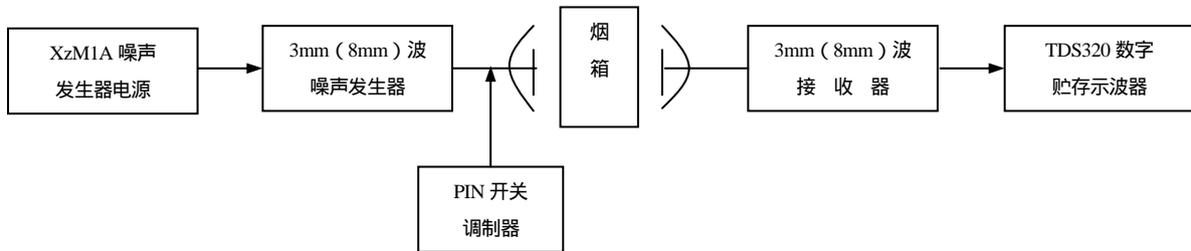


图1 毫米波衰减测试原理

测试方法:测量时,首先测量释放烟幕前3mm(8mm)波信号电压值 $U_0$ ,点燃药柱后再测量通过烟幕后信号电压值 $U_1$ 。根据(1)式求出毫米波通过被测试样的透过率 $T$ :

$$T = \frac{U_1}{U_0} \quad (1)$$

被测膨胀石墨的衰减 $A$ 为:

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

## 3 结果与讨论

将EG加入到烟火材料中,利用烟火药燃烧反应产生的热量使其膨胀并随热烟幕漂浮空中,实现对毫米波的干扰。根据这一设计思路,研制出了一种毫米波干扰发烟剂,其烟幕状况如图2所示,膨胀石墨悬浮于烟幕中。

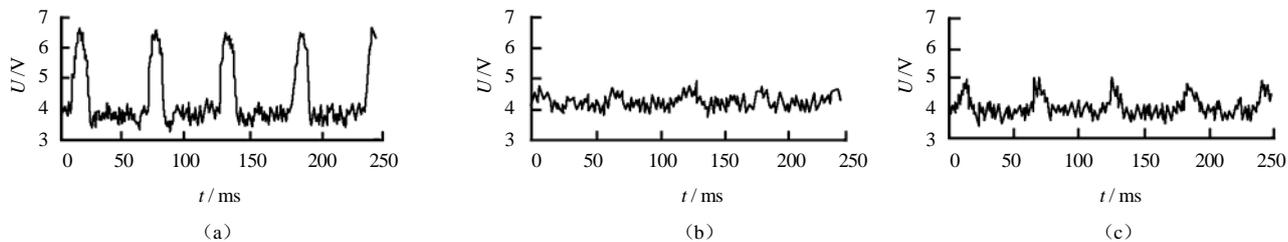
为了考核不同粒度EG加入到烟火药中所产生的烟幕对毫米波的实际干扰效果的影响,开展了EG发烟剂对3mm、8mm波衰减性能的测试研究。

实验时,分别将含有不同粒度EG发烟剂制成试验药柱,试验结果如图3、图4所示,不同粒度EG对3mm、8mm信号电压衰减测试结果见表1。

由表1可见,EG发烟剂产生的烟幕对3mm和8mm波均具有明显的衰减作用。但随着粒度不同,对毫米波的衰减结果亦不同。粒度越大的EG形成烟幕后对毫米波的衰减越强。由图3、图4可以直观地看到,粒度 $450\sim 300\mu\text{m}$ 的EG与 $200\sim 150\mu\text{m}$ 的EG相比,前者产生的烟幕对毫米波的衰减效果较好。烟幕对毫米波具有衰减作用主要原因是膨胀石墨的存在。膨胀石墨是长度数毫米的蠕虫状物质,它保留了石墨的导电性,对毫米波具有一定

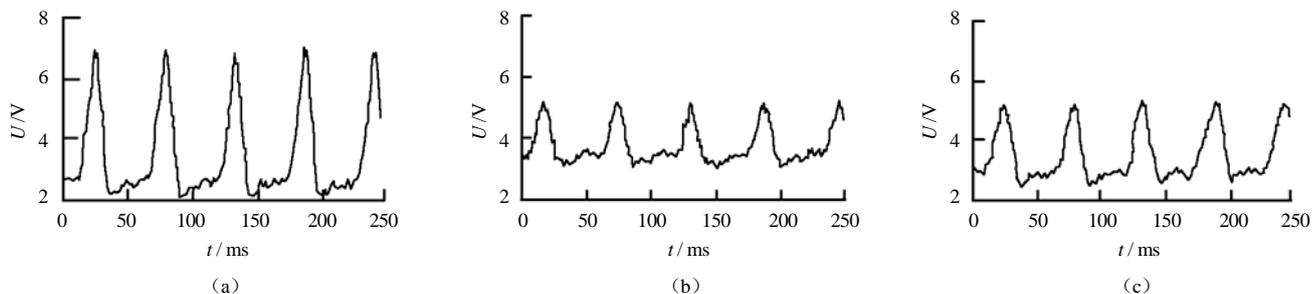


图2 EG发烟剂燃烧产生的烟幕状态



注: a 为 3mm 信号电压; b 为 450~300 $\mu\text{m}$  EG 烟幕 3mm 信号电压; c 为 200~150 $\mu\text{m}$  EG 烟幕 3mm 信号电压

图3 烟幕对 3mm 信号电压的衰减



注: a 为 8mm 信号电压; b 为 450~300 $\mu\text{m}$  EG 烟幕 8mm 信号电压; c 为 200~150 $\mu\text{m}$  EG 烟幕 8mm 信号电压

图4 烟幕对 8mm 信号电压的衰减

表1 膨胀石墨烟幕对 3mm、8mm 波的衰减结果

波段	粒度 / $\mu\text{m}$	$U_0$ / V	$U_1$ / V	$T$ / %	$A$ / dB
3mm	900~450	3.20	0.932	29.1	10.7
	450~300		0.967	30.2	10.4
	300~200		1.140	35.6	8.96
	200~150		1.400	43.8	7.17
8mm	900~450	4.87	1.98	40.6	7.83
	450~300		1.97	40.4	7.87
	300~200		2.26	46.4	6.65
	200~150		2.70	55.4	5.12

的散射。除散射引起的衰减外,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  $0.35 \sim 0.50 \Omega \cdot \text{cm}$ 。作为一种具有有限电阻率的介质材料,它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。膨胀石墨对毫米波的衰减是散射和吸收共同作用的结果。随着 EG 粒度的增大,膨胀石墨长度越长,使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,衰减结果随着增大。

此外,在重力作用下,粒度较大的膨胀石墨悬浮时间相对较短,从而降低了烟幕稳定性及衰减效果。所以,选择 EG 作为毫米波干扰材料时并非粒

度越大越好。

## 4 结论

(1) EG 发烟剂产生的烟幕对 3mm 波、8mm 波具有明显衰减作用。随着 EG 粒度的减小,衰减能力降低。当粒度选择得当时,可获得最佳的衰减效果。

(2) 利用 EG 制成的发烟剂产生烟幕实现对毫米波雷达干扰是可行的。该发烟剂设计的关键技术是将膨胀石墨长时间地悬浮于空中。

## 参考文献:

- [1] Uwe Krone. Pyrotechnic smoke composition for camou-flage purposes [P]. USP5 656 794, 1995.
- [2] 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.
- [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 (2): 70~73.
- [4] 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.
- [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.