

文章编号: 1006-9941(2016)12-1219-06

短切碳纤维云团对毫米波/红外复合干扰性能影响

刘志龙, 王玄玉, 董文杰, 孙文选, 白海涛

(防化学院烟火技术实验室, 北京 102205)

摘要: 为了研究短切碳纤维云团对毫米波/红外的复合干扰性能, 构建了实验测试平台。在静风条件下进行了 1.5 mm/4 mm 碳纤维爆炸分散实验。研究了爆炸分散云团形成过程。测试并分析了云团对 3 mm 波、8 mm 波和 8~14 μm 红外的干扰性能。结果表明, 爆炸方式能够有效分散短切碳纤维。在实验的弹体结构和装填参数条件下能够形成稳定的烟幕云团, 呈现优良的毫米波/红外复合干扰性能。对毫米波和红外的最大衰减大于 95%。对 3 mm 波的有效作用时间(单程衰减分贝数 ≥ 5.2 dB)不小于 1 min, 对 8 mm 波能达到 30 s 以上, 对红外靶标的有效遮蔽时间(衰减率 $\geq 85\%$)大于 20 s, 碳纤维长度的变化对毫米波干扰性能影响较大。

关键词: 短切碳纤维; 云团; 毫米波; 红外; 干扰

中图分类号: TJ55; TJ06

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.12.016

1 引言

近年来, 随着光电侦察和精确制导武器的发展, 毫米波与红外复合制导技术越来越多地应用于各种光电武器系统, 极大提升了武器系统的抗干扰能力, 同时对烟幕无源干扰技术提出了新的挑战。为此, 国内外相继开展了毫米波/红外复合干扰技术的研究, 并成功研制了以富碳化合物和膨胀石墨为主的多组分燃烧型复合干扰材料^[1], 但局限于通过燃烧分散的方式形成烟幕云团使用。

碳纤维(Carbon Fiber, CF)是由有机纤维经碳化及石墨化处理得到的微晶石墨材料^[2], 具有优异的物理和化学性能^[3], 在航空航天、国防军事等高科技领域有着广泛的应用^[4]。短切碳纤维是由碳纤维长丝根据需要长度切割而成, 长度一般为毫米级, 具有质量轻、强度高、导电性好、吸波性能高等特点。目前, 短切碳纤维在光电对抗领域中的应用主要集中在武器装备结构隐身^[5]方面, 如战斧式巡航导弹壳体、B-2 隐形轰炸机的机身、F117A 隐形飞机的局部均采用了碳纤维改性的高分子吸波材料^[6]。在烟幕无源干扰方面, 美国专利 US5148173^[7] 公布了通过爆炸分散形成碳纤维遮蔽云团, 能有效干扰毫米波探测器的探测。目前

在国内光电对抗领域研究中, 短切碳纤维主要应用于复合隐身材料^[8]方面, 作为烟幕材料的研究多集中在材料表面改性和静态方式下对毫米波干扰效应的测试^[9], 而关于短切碳纤维爆炸分散云团形成过程及对毫米波/红外复合干扰性能动态测试方面的研究尚未见文献报道。

因此, 为了进一步探索短切碳纤维在烟幕无源干扰光电对抗领域中的应用, 本研究基于半波长谐振理论^[10], 选择 1.5mm/4mm 长度碳纤维, 采用爆炸的方式将其分散到大气环境中形成烟幕云团, 依托密闭爆炸实验室构建云团在线监测和毫米波/红外复合干扰性能动态测试平台, 通过静风条件下的爆炸实验, 研究短切碳纤维爆炸分散云团形成过程及烟幕云团对毫米波/红外的复合干扰性能变化规律, 为复合干扰爆炸型短切碳纤维的后续应用研究奠定基础。

2 实验部分

2.1 试剂与仪器

短切碳纤维: 长度 1.5mm/4mm, 纤维直径 7 μm , 拉伸强度 3800 MPa, 拉伸模量 228 GPa, 密度 1.75 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 电阻率 $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.6 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, 盐城市翔盛碳纤维制品有限公司。

实验样弹: 设计并制作两枚样弹, 分别记为 1# 弹和 2# 弹, 均采用柱状壳体中心爆管结构, 中心装药为 RDX, 电雷管引爆, 壳体为工程塑料材质, 高 10 cm, 外

收稿日期: 2016-06-19; 修回日期: 2016-07-21

作者简介: 刘志龙(1984-), 男, 博士生, 主要从事烟火技术研究。

e-mail: Liuzlong_nbc@sina.com

径 6.4 cm, 内径 5.8 cm, 碳纤维装填量为 75 g, 装填密度 $0.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 装药比 2%, 其中 1[#] 弹装填 1.5 mm 碳纤维, 2[#] 弹装填 4 mm 碳纤维。

3 mm/8 mm 波烟幕插损测试系统: 包括发射机和接收机两部分, 接收机由计算机控制, 能进行数据的采集和分析。工作温度: 45 ~ 55 °C; 测试距离: 室内大于 6 m, 野外 100 ~ 400 m。

高速摄像机: Phantom LAB310, 12 位 CMOS 传感器, 灵敏度 2000T (ISO12232 SAT), 最小曝光时间 $1 \mu\text{s}$, 全幅分辨率 (1280 × 860) 下的拍摄速率为 3260 帧/s, 最高拍摄速率可达 650000 帧/s, 美国 VRI 公司。

红外热成像仪: HY6800 型, 非制冷焦平面探测器, 工作波段 8 ~ 14 μm , 温度分辨率: 0.08 °C (在 30 °C 时), 测温范围 -10 ~ 1000 °C, 广州飒特电力红外技术有限公司。

2.2 实验平台与方法

依托密闭球形爆炸实验室, 构建了短切碳纤维爆炸分散实验测试平台, 主要包括 3 mm 波烟幕插损测试系统、8 mm 波烟幕插损测试系统、红外热成像仪、高速摄像机、照明系统、采样装置等, 布局如图 1 所示。爆炸室中心悬挂样弹, 地面自爆心投影位置每隔 0.5 m 放置采集样板, 可用于收集爆炸后碳纤维分散样品观察判断分散效果; 利用爆炸室观察窗口分别架设 3mm/8mm 波烟幕插损测试系统、红外热像仪和高速摄像机。为保证测试数据的有效性和实验的安全性, 毫米波、红外和高速摄像机测试窗口材料分别为泡沫板、多层塑料薄膜和防爆透明玻璃; 毫米波烟幕插损测试系统的发射机和接收机两两相对, 通过调整挂弹高度, 使其处于毫米波测试光路的中间位置; 在爆炸室内部靠近高速相机一侧设置碘钨灯提供高速摄像机拍摄所需灯光照明, 并作为红外热成像靶标 (由于观察窗口的限制, 实验中的挂弹高度略高于红外测试

实际数据, 但该数据仍可供参考)。

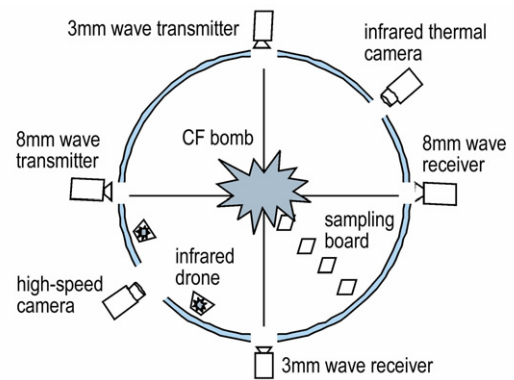


图 1 实验测试平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram figure of experimental test platform

各测试仪器调试好后, 除高速相机外, 其它仪器首先启动测试本底, 然后通过起爆器引爆样弹, 同时启动高速摄像机拍摄并记录云团膨胀过程, 烟幕插损测试系统测试云团对 3 mm 波和 8 mm 波衰减性能, 红外热成像仪采集红外视频, 记录爆炸前后不同时刻云团对靶标红外图像的遮蔽干扰效果。

3 结果与讨论

3.1 短切碳纤维爆炸分散云团形成过程

采用高速摄像机以 2000 fps 的拍摄速率分别记录了 1[#] 和 2[#] 弹短切碳纤维爆炸分散后云团形成过程, 典型分幅照片如图 2 所示。对高速记录图像中云团范围进行测量, 可得到云团扩展直径与时间关系曲线如图 3 所示, 进而得到云团扩展速度与时间关系如图 4 所示。由图 2 ~ 图 4 可以看出, 短切碳纤维爆炸以径向抛散为主, 云团分布基本保持轴向对称, 其分散过程可以分为加速运动、减速运动和扩散运动三个阶段。加速运动阶段, 在中心高能炸药爆炸作用下, 壳体膨胀

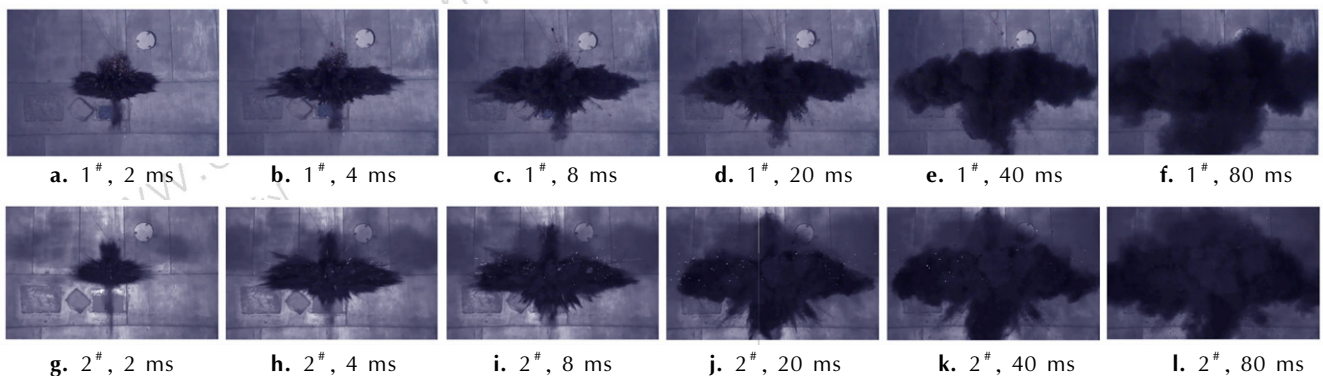


图 2 短切碳纤维爆炸云团高速摄像分幅图像

Fig. 2 Separation pictures from high-speed camera for explosion clouds of short carbon fibers

破裂,短切碳纤维随破裂壳体碎片沿径向和轴向向外喷射形成射流,此阶段爆炸力起主导作用,2 ms 时云团扩展速度达到最大值;减速运动阶段,爆炸作用力逐渐减弱,短切碳纤维受惯性力和空气阻力的作用作减速运动,云团主要沿径向进一步扩展,扩展速度逐渐衰减;大约 40 ms 后云团径向不再有明显扩展,开始作扩散运动,此阶段径向范围基本不变,轴向范围稍有扩展,且受湍流扩散影响,云团作局部翻滚,使碳纤维分散得更加均匀。从图中还可看出,在相同装药结构和装填参数条件下,短切碳纤维长度变化对云团直径、范围和扩展速度的影响很小。

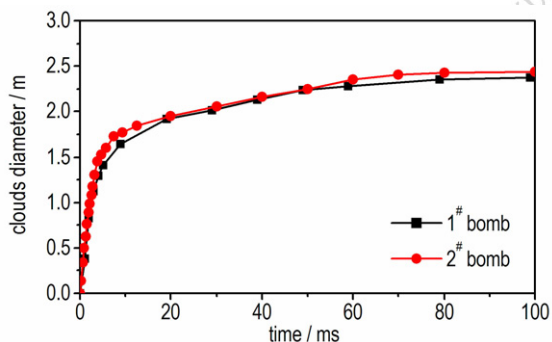


图 3 云团扩展直径与时间关系

Fig. 3 Clouds expanding diameter vs time

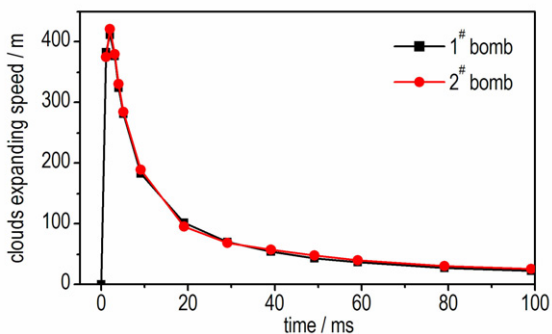


图 4 云团扩展速度与时间关系

Fig. 4 Clouds expanding speed vs time

3.2 短切碳纤维云团对毫米波衰减性能

利用 3 mm/8 mm 波烟幕插损测试系统分别测试

表 1 短切碳纤维云团对 3 mm/8 mm 波衰减测试结果

Table 1 The attenuation test results of chopped CF clouds to 3 mm/8 mm wave

bomb number	3 mm wave				8 mm wave			
	maximum attenuation decibel/dB	maximum attenuation rate/%	effective time/s	duration of stay /s	maximum attenuation decibel/dB	maximum attenuation rate/%	effective time/s	duration of stay /s
1#	14.5	96.5	106	98	7.4	81.8	32	37
2#	13.6	95.6	83	60	15.7	97.3	38	13

了云团对 3 mm、8 mm 波的动态衰减性能,结果如图 5、图 6 所示。由图 5、图 6 可见,短切碳纤维爆炸分散所形成烟幕云团对 3 mm 和 8 mm 波有显著的衰减效果。

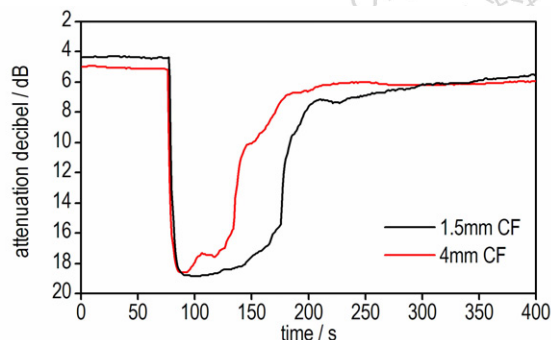


图 5 云团对 3 mm 波衰减测试曲线

Fig. 5 The attenuation test curves of clouds to 3 mm wave

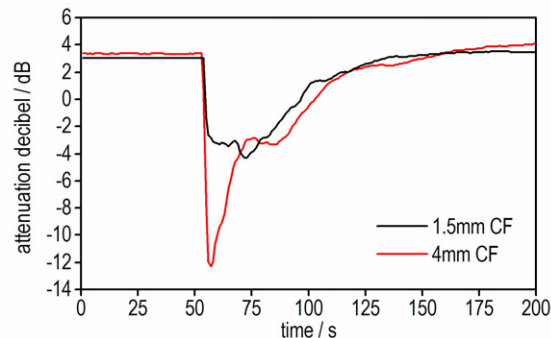


图 6 云团对 8 mm 波衰减测试曲线

Fig. 6 The attenuation test curves of clouds to 8 mm wave

为综合评价短切碳纤维作为毫米波干扰烟幕材料的性能,用衰减分贝数达到 5.2 dB(即单程衰减率为 70%,双程衰减率为 90%)以上所持续时间作为短切碳纤维云团干扰毫米波的有效作用时间,用达到最大衰减分贝数一半以上所持续时间作为留空时间,根据测试结果计算短切碳纤维云团对 3 mm 波和 8 mm 波的最大衰减值、最大衰减率、有效作用时间和留空时间,结果见表 1。

由表 1 结果可见: (1) 对于干扰 3 mm 波, 1.5 mm 长度碳纤维的最大衰减率高于 4 mm 长碳纤维, 对于干扰 8 mm 波, 4 mm 长碳纤维最大衰减率高于 1.5 mm 长碳纤维, 测试结果进一步验证了对于 3 mm 波和 8 mm 波, 半波长长度的碳纤维的干扰效果较佳, 与半波长谐振理论^[10]相符; 另外, 碳纤维长度的变化对 8 mm 波的衰减影响更为显著; (2) 云团对 3 mm 波、8 mm 波有效作用时间均大于 30 s, 对 3 mm 波的有效作用时间不小于 1 min, 再结合衰减率结果可以看出, 短切碳纤维云团对高频电磁波(3 mm 波)的衰减能力更强。从毫米波的衰减机理分析, 毫米波在碳纤维中的传输距离越短, 衰减越快, 趋肤效应^[11]越显著, 其对毫米波的衰减越明显; (3) 1[#]弹云团比 2[#]弹云团留空时间更长, 原因是在同样分散条件下, 碳

纤维长度越大越不利于分散, 而且受重力作用的影响, 4 mm 碳纤维沉降速度更快, 因此相比 1.5 mm 碳纤维留空时间变短。

3.3 短切碳纤维云团对红外干扰性能

实验中, 以照明碘钨灯为红外靶标(靶标成像温度 148 °C), 利用红外热成像仪采集了云团对靶标干扰过程的红外视频。图 7、图 8 显示了云团对靶标的遮蔽干扰效果, 原始目标图像见图 7a、图 8a, 由于短切碳纤维云团的散射和吸收作用, 热像仪接受到的靶标红外图像受到干扰, 图像变得模糊甚至完全消失(靶标成像温度 35 °C), 如图 7b、图 8b 所示; 随着云团沉降, 靶标重现, 见图 7c、图 8c, 说明短切碳纤维云团对 8 ~ 14 μm 红外成像系统有明显的遮蔽干扰效果。

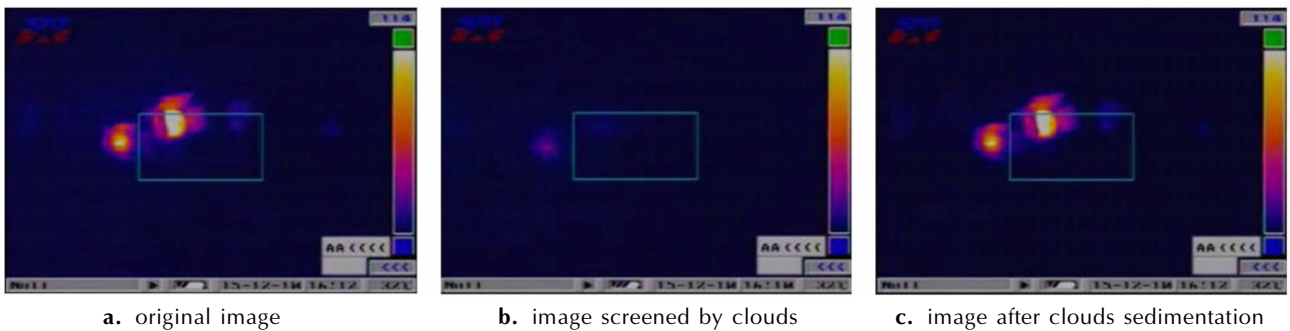


图 7 1[#]弹云团对红外目标的遮蔽干扰效果

Fig.7 The obscuring and interfering effect of 1[#] bomb clouds on infrared target

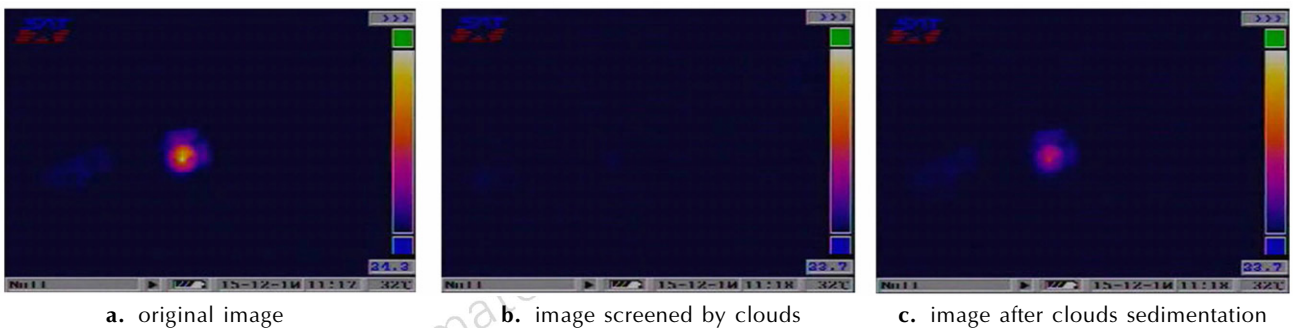


图 8 2[#]弹云团对红外目标的遮蔽干扰效果

Fig.8 The obscuring and interfering effect of 2[#] bomb clouds on infrared target

为定量评价烟幕云团对红外的干扰性能, 一般通过计算衰减率来表示, 其中, 烟幕对红外热成像的衰减率可通过红外视频图像的灰度值进行计算^[12], 计算公式为:

$$\beta = \left(1 - \frac{h_0(t) - h_1(t)}{h_0 - h_1} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中, β 为烟幕的红外衰减率(%); h_0 为施放烟幕前目标的灰度值; h_1 为施放烟幕前背景的灰度值; h_0

(t) 为施放烟幕后目标随时间 t 变化的灰度值; $h_1(t)$ 为施放烟幕后背景随时间 t 变化的灰度值。

通过视频编辑软件将采集的红外视频转换为不同时刻序列图像, 利用 Matlab 编写程序读取序列图像及选定目标区域和背景区域灰度值, 并计算云团形成前后目标及背景的平均灰度值, 经式(1)计算即可得到不同时刻的红外衰减率, 如图 9 所示。图 9 显示, 在本实验测试条件下, 短切碳纤维云团对 8 ~ 14 μm 红外

呈现良好的干扰性能,最大衰减率分别为 98% 和 99.8%,有效遮蔽时间(对 8~14 μm 红外衰减率 85% 以上)分别为 21 s 和 23 s,从最大衰减率和有效遮蔽时间分析,1.5 mm 和 4 mm 碳纤维长度变化对 8~14 μm 红外干扰效果的影响不大。

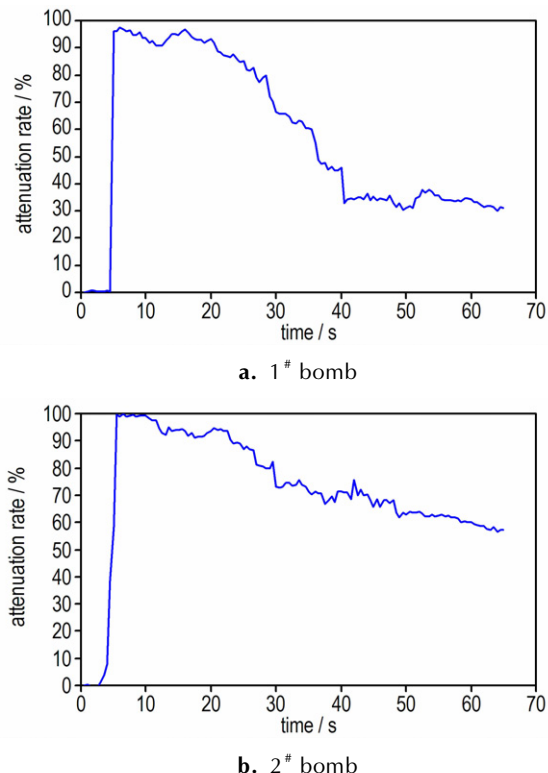


图9 短切碳纤维云团在 8~14 μm 波段红外衰减率曲线

Fig.9 Infraredattenuation rate at 8-14 μm of short CF

4 结论

(1)通过爆炸的方式可以有效分散短切碳纤维,分散过程分为加速运动、减速运动和扩散运动三个阶段,并以径向抛散为主,能够形成较为稳定的初始烟幕云团。在同样的装药结构和装填参数条件下,短切碳纤维长度的变化对烟幕云团参数影响很小。

(2)短切碳纤维云团具备优异的毫米波/红外复合干扰性能。在本次爆炸分散实验条件下,云团对 3 mm 波和 8 mm 波最大衰减在 95% 以上,单程衰减分贝数 ≥ 5.2 dB 时的有效作用时间均能达到 30 s 以上,对 3 mm 波的有效作用时间不小于 1 min; 对 8~14 μm 红外成像系统最大衰减接近 100%,衰减率 $\geq 85\%$ 时有效遮蔽时间可达 20 s 以上; 1.5 mm 碳纤维具有更好的空中悬浮特性,短切碳纤维长度的变化对 8 mm 波的衰减影响更为明显。

参考文献:

- [1] 赵纪金,李晓霞,豆正伟. 红外/毫米波干扰一体化材料—膨胀石墨的研究动态[J]. 红外技术, 2010, 32(7): 399-402.
ZHAO Ji-jin, LI Xiao-xia, DOU Zheng-wei. Research status of exfoliated graphite attenuating infrared/millimeter-wave simultaneously [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(7): 399-402.
- [2] 贺福. 碳纤维及其应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 2-3.
HE Fu. Carbon fiber and its applications technology[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2004: 2-3.
- [3] 孙敏. 碳纤维技术发展及应用分析[J]. 煤炭加工与综合利用, 2014 (8): 16-23.
SUN Min. Carbon fiber technology development and application[J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2014 (8): 16-23.
- [4] 孔令美, 郑威, 齐燕燕, 等. 3 种高性能纤维材料的研究进展[J]. 合成纤维, 2013, 42(5): 27-31.
KONG Ling-mei, ZHENG Wei, QI Yan-yan, et al. Development of three kinds of high performance fiber[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2013, 42(5): 27-31.
- [5] 温娇, 丁志荣, 欧卫国, 等. 雷达吸波功能纤维及纺织品的研究进展[J]. 南通大学学报: 自然科学版, 2014, 13(3): 43-48.
WEN Jiao, DING Zhi-rong, OU Wei-guo, et al. Development of study on radar-absorbing fiber and textile[J]. *Journal of Nantong University*, 2014, 13(3): 43-48.
- [6] 朱志强, 万里鹰, 黄基锐, 等. 碳纤维及其复合材料的研究进展[J]. 江西化工, 2013(2): 67-70.
ZHU Zhi-qiang, WAN Li-ying, HUANG Ji-rui, et al. Development of carbon fiber and composite[J]. *Jiangxi Chemical Industry*, 2013(2): 67-70.
- [7] Rouse, William G, Connie S, et al. Millimeter wave screening cloud and method; United States. US5148173 [P]. September 15, 1992.
- [8] 莫红松, 吕潇, 李光, 等. 复合材料中碳纤维的铺设方式对吸波性能的影响[J]. 功能材料, 2007, 38(5): 3063-3066.
MO Hong-song, LU Xiao, LI Guang, et al. The microwave absorption performance of composites with various aligned carbon fiber [J]. *Journal of Functional Materials*, 2007, 38(5): 3063-3066.
- [9] 张大志. 多频谱干扰材料复合技术及性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
ZHANG Da-zhi. Study on composite technology and performance of multi-spectrum interference materials [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [10] 杜桂萍, 缪云坤, 刘海峰. 短切碳纤维对 3 mm 波衰减性能研究[J]. 火工品, 2005(5): 6-7.
DU Gui-ping, MIU Yun-kun, LIU Hai-feng. Study on attenuation performance of short carbon fibers at 3 mm wave[J]. *Initiators & Pyrotechnic*, 2005(5): 6-7.
- [11] 姚聪, 罗马吉, 罗志平. 燃料电池双极板材料趋肤效应的模拟研究[J]. 电源技术, 2011, 35(9): 48-50.
YAO Cong, LUO Ma-ji, LUO Zhi-ping. Simulation of skin effect in bipolar plate material of fuel cell[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2011, 35(9): 48-50.
- [12] 刘香翠, 程翔, 张良, 等. 烟幕对红外热像仪遮蔽效果的定量表征[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 37-42.
LIU Xiang-cui, CHENG Xiang, ZHANG Liang, et al. Quantitative evaluation of obscuring effect of smoke to infrared thermal imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 37-42.

Composite Interference Performance of Chopped Carbon Fiber Clouds to Millimeter Wave and Infrared

LIU Zhi-long, WANG Xuan-yu, DONG Wen-jie, SUN Wen-xuan, BAI Hai-tao

(Laboratory of Pyrotechnical Technology, Institute of NBC Defense, Beijing 102205, China)

Abstract: To study the composite interference performance of chopped carbon fiber (CF) clouds to millimeter wave and infrared, the test platform was built. The 1.5 mm and 4 mm CF explosion dispersion experiments were carried out under the static wind condition. The process of forming explosion dispersion clouds was investigated. The interference performance of clouds to 3 mm wave, 8 mm wave and 8–14 μm infrared was measured and analyzed. The results show that chopped CF can be effectively dispersed by explosion, and the stable smoke clouds can be formed under the conditions of experimental bomb structure and loading parameters, revealing an excellent composite interference performance to the millimeter wave and infrared. The maximum attenuation to the millimeter wave and infrared is more than 95%. The effective effect time to 3 mm wave (one-way attenuation decibels ≥ 5.2 dB) is not less than 1 min, and the time to 8 mm wave can reach more than 30 s. The effective obscuring time to infrared target (attenuation rate $\geq 85\%$) is more than 20 s, and the change in CF length has a significant effect on the millimeter wave interference performance.

Key words: chopped CF; clouds; millimeter wave; infrared; interference

CLC number: TJ55; TJ06

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.12.016



《含能材料》“观点”征稿

为了丰富学术交流形式,及时传递含能材料领域同行们的学术观点和思想,《含能材料》开设了“观点”栏目。“观点”栏目的来稿应观点鲜明、内容新颖、形式上短小精悍。欢迎含能材料各领域的专家积极来稿。来稿时请附个人简介及主要研究工作介绍。

《含能材料》损伤与点火专栏征稿

含能材料的损伤特征与点火过程有密切的联系,炸药、推进剂的内部损伤及其对力学特性、安全特性和点火行为的影响规律受到了含能材料学界的高度重视,为推动这一重要研究方向的学术交流,本刊特设立“损伤与点火”专栏。专栏主要征集炸药、推进剂等含能材料的损伤观测与多尺度表征技术、含损伤的本构方程、准静态与动态损伤演化规律、损伤与破坏的宏(细)观模式、损伤对起爆、爆炸、爆轰成长以及非冲击起爆行为的影响等方向的原创性研究论文。来稿请注明“损伤与点火”专栏。

《含能材料》编辑部