

薄片型红外/被动毫米波复合诱饵的研究

熊钟洋¹, 朱晨光^{1,2*}, 端木凡顺¹, 李经纬¹

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏南京 210094;
2. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

摘要: 制备一种红外/被动毫米波复合诱饵。研究基于 MTV 型烟火药, 以超细红磷替代部分镁粉, 短切碳纤维作为功能添加剂, 制备了一种薄片型烟火材料, 对该种材料的红外辐射和毫米波辐射性能进行了测试分析。研究结果显示: 少量红磷的添加有利于提高烟火药辐射面积; 红磷添加量大于 10% 时, 火焰平均温度、红外辐射强度和毫米波辐射亮温随着红磷含量的增加持续降低, 在添加适量碳纤维后燃速燃温增加, 红外辐射增强; 烟火药的毫米波辐射亮温随碳纤维含量增加持续提高, 当红磷添加量为 10%, 碳纤维含量从 0 增加到 1.75% 时, 毫米波辐射亮温从 330 K 增加到 458 K, 且亮温在 400 K 以上持续时间较长。

关键词: 烟火药; 碳纤维; 红外辐射; 毫米波

中图分类号: TJ53; TN972+.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210455

Research on infrared/passive millimeter wave compound decoy

Xiong Zhongyang¹, Zhu Chenguang^{1,2*}, Duanmu Fanshun¹, Li Jingwei¹

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China)

Abstract: An infrared/passive millimeter wave compound decoy was prepared. On the basis of MTV pyrotechnic composition, red phosphorus was used to replace part of magnesium powder, short carbon fiber was used as a functional additive, and a thin-film pyrotechnic material was prepared. The infrared radiation and millimeter wave radiation properties of this material were tested and analyzed. The research results show that the addition of a small amount of red phosphorus was beneficial to increase the radiation area; When the proportion of red phosphorus added is more than 10%, the average flame temperature, infrared radiation intensity and millimeter wave brightness temperature continue to decrease with the increase of red phosphorus content, after adding a suitable amount of carbon fiber, the burning rate, flame temperature and the infrared radiation are both enhanced; The millimeter wave brightness temperature continues to increase with the increase of carbon fiber content, when the amount of red phosphorus added is 10% and the carbon fiber content increases from 0 to 1.75%, the millimeter wave brightness temperature increased from 330 K to 458 K, brightness temperature greater than 400 K, longer duration.

Key words: pyrotechnic composition; carbon fiber; infrared radiation; millimeter wave

收稿日期: 2021-11-10; 修订日期: 2021-12-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51676100)

作者简介: 熊钟洋, 男, 硕士生, 主要从事光电对抗技术方面的研究。

通讯作者: 朱晨光, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事烟火燃烧机理和应用方面的研究。

0 引言

毫米波是指波长在 1~10 mm 的电磁波,与微波相比,毫米波的波长短,能够提供更大的带宽和更高的分辨率,与红外和光波相比,毫米波的大气衰减小,穿透性好,受云雾、烟尘、小雨雪等低能见度气象条件影响较小,具有全天候工作能力^[1]。毫米波技术的快速发展,推动了毫米波在武器制导领域的应用,毫米波制导技术目前已广泛应用于各种导弹、末制导炮弹和末敏弹^[2]。毫米波制导导弹分为主动制导系统和被动制导系统,主动制导是通过毫米波雷达主动发射毫米波并接收从目标反射回来的电磁波来对目标进行识别、跟踪^[3];被动制导是通过毫米波辐射计只是接收目标散射或辐射的毫米波利用目标与背景的毫米波辐射特性差异进行目标的探测、识别和制导^[4]。由红外/毫米波辐射计制导的弹药融合弹道修正、自动寻的、制导控制、末段敏感等先进技术,具备搜索探测目标、精确制导的打击功能^[5],对坦克装甲、军用飞机等目标都构成了严重威胁。

金属目标的发射率较低,其毫米波辐射亮度较低,但当前装甲车辆、军用飞机都涂有雷达隐身涂层,涂层提高了毫米波发射率,当目标有隐身涂料时,目标不仅反射天空温度,而且自身辐射能量,因此涂层目标天线温度将比金属目标的天线温度高的多^[6-7]。在实际情况下,大多数地面金属目标为运动中的装甲目标,其发动机工作状态下的物理温度将远高于周围环境温度,涂覆在其表面的隐身涂层对雷达的隐身性能越好,则其毫米波辐射能力越强,越容易被辐射计所发现^[8]。以天空为背景时,空中金属目标的隐身吸波涂层不但不能起到隐身功能,反而会更加明显的暴露目标^[9]。

对毫米波雷达的诱饵干扰主要是利用具有毫米波散射特性的干扰材料,如金属箔片、角反射器等毫米波散射体,投放至敌方雷达作用空间后,散射体会对敌方雷达波进行吸收或散射,改变目标电磁辐射特性而造成假目标回波等,从而实现干扰目的。而对于采用毫米波辐射计进行制导的武器,目前还没有有效的诱饵干扰技术。因此,该研究通过探究烟火药火焰的温度、碳纤维对烟火药的发射率以及毫米波辐射的

影响,为制备红外和毫米波辐射与真实目标具有一定相似度的诱饵提供参考。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

试剂:超细红磷(800目),四川什邡三磷化学公司;PAN基碳纤维(1K),单丝直径7 μm ,短切长度1mm;镁粉(200目),唐山威豪镁粉有限公司;聚四氟乙烯微粉,上海迈瑞尔化学技术有限公司;氟橡胶,上海晨光科慕有限公司;丙酮,国药集团化学试剂有限公司;

仪器:德国 Infra Tec 公司 ImageIR[®]8355BB 型红外热像仪,焦距 12 mm,分辨率 640 \times 512,全帧 151 Hz,半帧 540 Hz,光谱范围 2.2~5.5 μm ,温度范围 -10~3 000 $^{\circ}\text{C}$;南京理工大学与南京源波电子研究所联合研制 3 mm 被动毫米波辐射计(见图 1),射频接收通带 $\geq 93.5\sim 95.5$ GHz,亮温测试范围 250~1 000 K,灵敏度 ≤ 2 K。



图 1 3 mm 被动毫米波辐射计与操作界面图

Fig.1 Diagram of 3 mm passive millimeter wave radiometer and operation interface

1.2 实验过程

1.2.1 碳纤维预处理

碳纤维类石墨结构的表面具有一定的化学惰性,难以浸润,而且短切的碳纤维容易聚集成团,为了减少碳纤维的聚集,使碳纤维能够均匀分散在丙酮中便于与药剂进行湿混,需要对碳纤维进行预处理。截取一定长度的碳纤维,在丙酮中浸泡 30 min,去胶。用去离子水冲洗去除碳纤维上残余的丙酮后置于浓硝酸中 6 h 使碳纤维表面氧化,氧化后的碳纤维表面变得粗糙,而且硝酸浸泡后纤维表面的羟基等含氧官能团增多^[10]。更易于在丙酮中浸润分散,分散后的碳纤维能更加均匀的混合在烟火药中。

1.2.2 烟火薄片的制作

以 1 号配方为基础配方,按照表 1 称取氟橡胶置于已加入丙酮的烧杯中密封,等待氟橡胶溶解。按照比例称取镁粉、聚四氟乙烯,用 50 目的标准筛过筛 3~5 次,混合均匀,再加入赤磷,赤磷易燃,不能过筛,手工混匀,备用。待氟橡胶完全溶解后,加入短切碳纤维,超声至碳纤维均匀分散于溶解氟橡胶的丙酮溶液中,再加入混合均匀的药剂,超声并搅拌,然后放入干燥箱中,待丙酮部分挥发,烟火药呈粘稠状时碾压成膜,烘干后裁剪成长 8 cm,宽 2 cm,厚约 0.2 mm,重约 0.6 g 的长条状薄片样品,如图 2 所示。1~5 号为未

添加碳纤维的空白样品,1-0.50~5-0.50 为添加了 0.5% 碳纤维的样品,在 3 号配方的基础上添加 0.25%、0.50%、0.75%、1.00%、1.25%、1.50%、1.75% 的碳纤维,分别记为 3-0.25C、3-0.50C、3-0.75C、3-1.00C、3-1.25C、3-1.50C、3-1.75C。

2 结果与讨论

2.1 燃烧性能

由红外热像仪对表 1 配方得到的样品的燃烧性能进行测试,为减小误差,每个配方测 4 个样品。通过红外热像仪自带软件,在燃烧火焰中选下图框中区域(该部分为毫米波辐射计天线对准区域),然后导出选中部分在整个燃烧过程中的火焰温度、燃烧持续时间,如图 3、图 4 所示。

由图 3 可以看出,当红磷含量小于 10% 时,样品

表 1 配方设计

Tab.1 Design of formulation

Number	Carbon fiber (1.0 mm)	Mg	P	PTFE	Viton
1	0%	50%	0%		
2	0%	45%	5%		
3	0%	40%	10%		
4	0%	35%	15%		
5	0%	30%	20%		
1-0.50	0.5%	50%	0%		
2-0.50	0.5%	45%	5%		
3-0.50	0.5%	40%	10%		
4-0.50	0.5%	35%	15%	50%	10%
5-0.50	0.5%	30%	20%		
3-0.25C	0.25%	40%	10%		
3-0.50C	0.50%	40%	10%		
3-0.75C	0.75%	40%	10%		
3-1.00C	1.00%	40%	10%		
3-1.25C	1.25%	40%	10%		
3-1.50C	1.50%	40%	10%		
3-1.75C	1.75%	40%	10%		

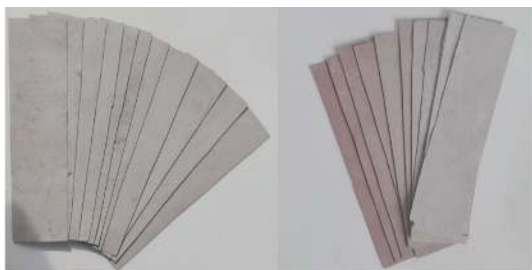


图 2 薄片样品图

Fig.2 Samples of membrane

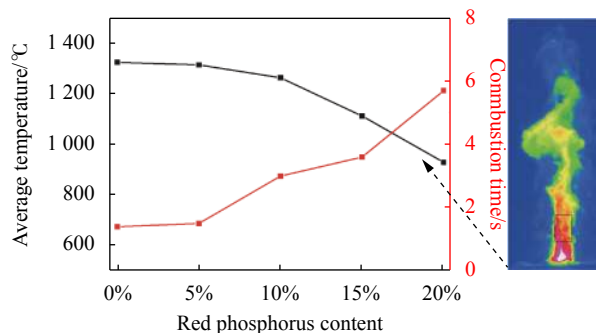


图 3 红磷含量不同的样品火焰平均温度和燃烧持续时间

Fig.3 Average temperature of flame and combustion time of sample with different content of red phosphorus

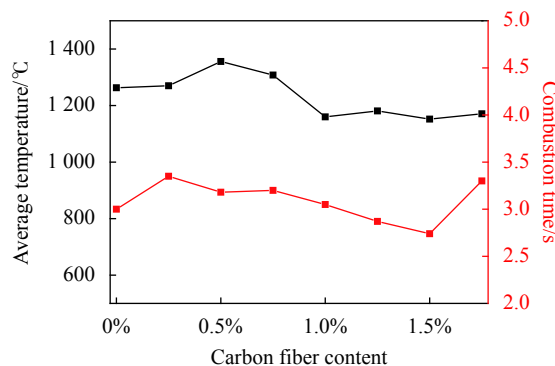


图 4 (3-0.25C~3-1.75C) 碳纤维含量不同的样品的火焰平均温度和燃烧持续时间

Fig.4 Average temperature of flame and combustion time of flame with different content of carbon fiber(3-0.25C-3-1.75C)

火焰温度变化不大,红磷含量大于 10% 时,燃温开始快速下降。红磷含量为 20% 时,烟火药薄膜样品的火焰平均温度从 1324 °C 降低到 929 °C,样品的燃烧持续时间由 1.5 s 增加到了 5.7s。图 4 中,随着 3 号配方中碳纤维含量的增加,火焰温度先上升后下降,碳纤维含量为 0.5% 时火焰温度从 1263 °C 上升到 1356 °C,碳纤维含量大于 0.5% 时,温度又逐渐下降。添加碳纤维后质量燃速提高,燃烧时间略微减少,碳纤维含量大于 1.5% 时,燃烧时间增加。

在红外热像图中圈出火焰部分,导出所选区域的红外辐射面积和平均辐射强度数据,得到稳定燃烧时最大辐射面积和对应平均辐射强度随红磷含量和碳纤维含量变化的图像,如图 5、图 6 所示。

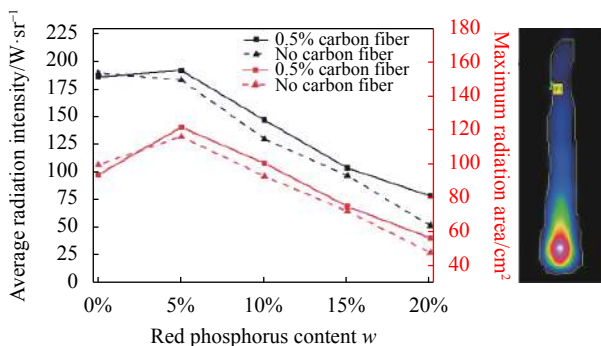


图 5 红磷含量不同的样品平均辐射强度和最大辐射面积

Fig.5 Average radiation intensity and maximum radiation area of sample with different content of red phosphorus

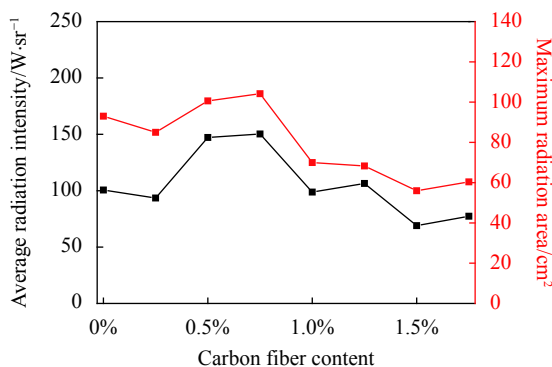


图 6 碳纤维含量不同的样品平均辐射强度和最大辐射面积

Fig.6 Average radiation intensity and maximum radiation area of sample with different content of carbon fiber

由图 5 可以看出,当红磷添加量为 5% 时,红外辐射强度变化不大,辐射面积达到最大 120 cm²,红磷

添加量大于 5% 时,样品辐射强度和辐射面积随着红磷比例的增加持续降低,添加碳纤维后样品的辐射强度和辐射面积均略高于无碳纤维的样品。当红磷含量增加到 20% 时,含碳纤维样品的辐射强度由 192.0 W·sr⁻¹ 降低到 78.7 W·sr⁻¹,辐射面积由 121.8 cm² 降低到 56.6 cm²,无碳纤维样品的辐射强度由 183.5 W·sr⁻¹ 降低到 52 W·sr⁻¹,辐射面积由 116.3 cm² 降低到 48 cm²。

图 6 中,红外辐射强度和辐射面积随碳纤维含量的增加先增大后减小,3 号配方的碳纤维含量由 0% 增加到 0.75%,辐射强度从 100.6 W·sr⁻¹ 增加到 150.3 W·sr⁻¹,碳纤维添加量大于 0.75% 时,红外辐射强度和辐射面积随碳纤维含量增加逐渐下降。

温度是影响烟火药红外辐射强度的主要因素,由图 3 可知,红磷含量大于 10% 时会明显的降低烟火药剂的燃温,添加红磷后燃温的降低是导致红外辐射强度降低的主要原因。红磷的引燃温度为 240 °C,416 °C 时升华,其燃烧反应较为缓慢,添加红磷后会降低样品的质量燃速,质量燃速的降低导致放热分散。另外,红磷是一种优良的发烟剂,P 会和空气中的 O₂ 反应,生成大量 P₂O₅、P₃O₄ 气体,P₂O₅ 的升华吸热^[11]。少量红磷的添加能增强烟火药的辐射面积,过量的红磷会导致 MTV 的燃速降低,燃烧持续时间增长,燃温降低,红外辐射强度降低。

碳纤维具有优异的导热性能,烟火药中添加碳纤维后,使得烟火药的导热系数增加^[12],加快燃烧质心热量的传导分散,提高质量燃速,提高烟火药的火焰温度,对烟火药的红外辐射有一定的增强作用。另外,碳纤维具有耐高温、不燃的特性,添加过量则会降低燃速,对燃烧形成一定的抑制作用,造成燃温降低,甚至断燃。

2.2 毫米波性能

2.2.1 样品毫米波亮温测试

辐射计的电压输出和接收辐射亮温之间是一种线性关系,该实验辐射计采用冷热匹配负载两点定标方法。以常温黑体和高温黑体作为定标源,常温黑体的温度由精密温度计测温得到,高温黑体由液氮标定后得到,由此两点确定辐射计输出信号与温度之间的关系。通过被动毫米波辐射计对薄片样品的毫米波辐射强度进行测试分析,图 7 (a)~(e) 是 1~5 号配方添

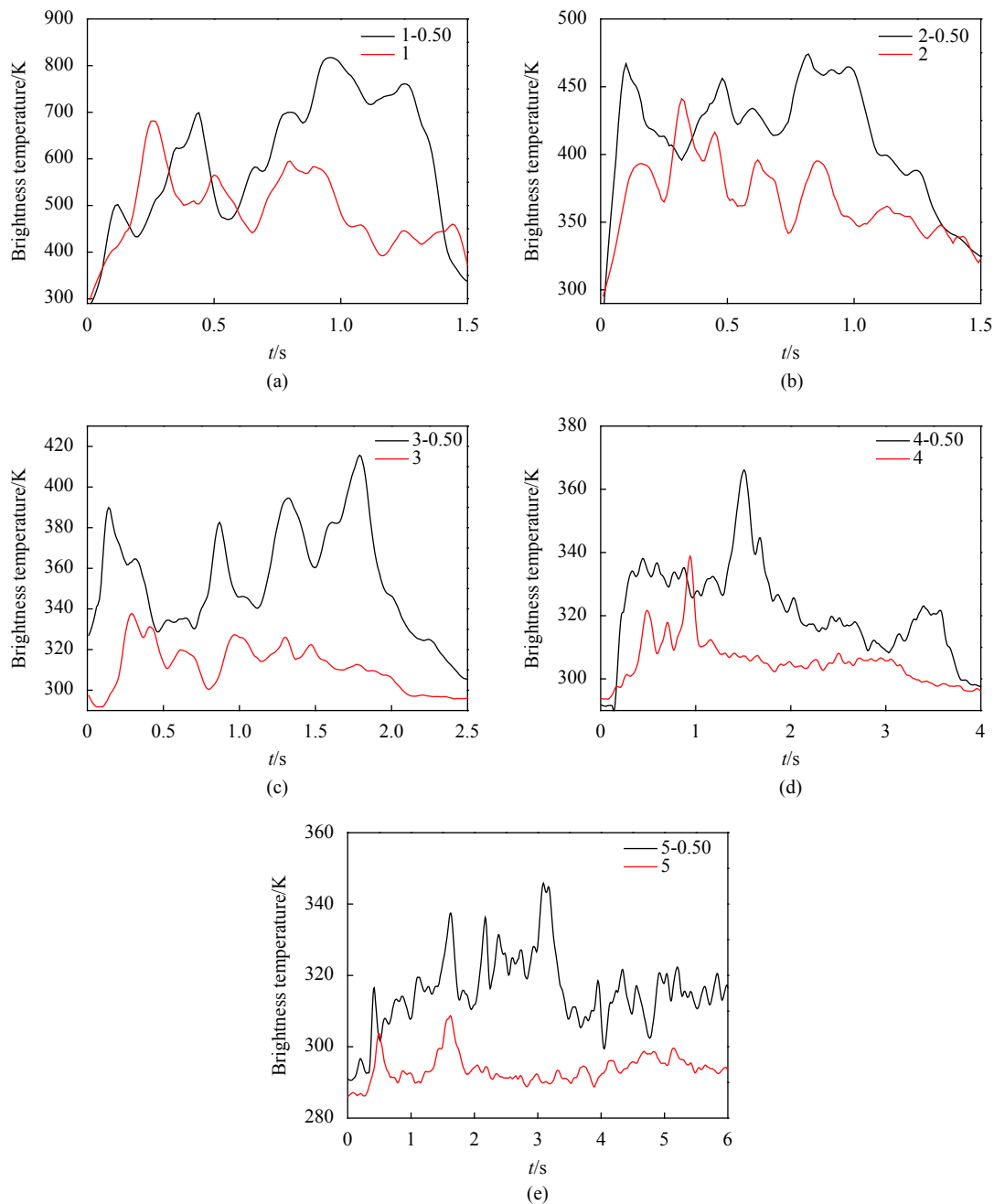


图 7 图 (a)-(e) 为样品 1~5 与 1-0.50~5-0.50 的毫米波辐射亮温对比图

Fig.7 Fig. (a)-(e) are the comparison of millimeter wave brightness temperature between 1-5 and 1-0.50-5-0.50

加了 0.50% 碳纤维与未添加碳纤维的辐射亮度温度对比图。

结合 2.1 可知, 从 1-5 号配方, 随着红磷含量的不断增加, 燃温持续下降, 毫米波辐射亮度持续降低, 但添加碳纤维后样品的毫米波辐射亮度均有所提高。不含碳纤维样品的亮温最大值从 690 K 降低到 308 K, 含碳纤维样品的亮温最大值从 824 K 降低到

347 K。在低燃温配方中添加碳纤维后, 毫米波辐射亮温差异更明显。这说明烟火药的毫米波辐射与燃温和碳纤维的添加有着一定的联系。为了进一步探究碳纤维对毫米波辐射的影响, 在 3 号配方基础上添加 0%~1.75%(碳纤维大于 1.75% 时难以均匀分散和压膜) 的碳纤维来探究对烟火药毫米波的影响, 如图 8 所示。

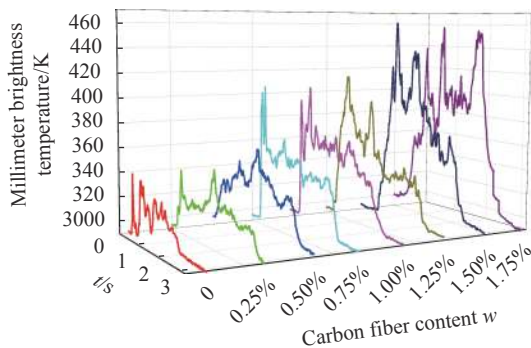


图 8 不同碳纤维含量样品的毫米波辐射亮温对比图

Fig.8 Comparison of millimeter wave radiation brightness temperature of samples with different carbon fiber

2.2.2 机理分析

根据普朗克定律,绝对零度以上的物质都会向外辐射电磁波,其辐射强度与物体的温度和性质有关。物体辐射的电磁波主要来自两个部分:一是目标本身的热辐射;二是目标反射其他辐射源的辐射。一个黑体在温度为 T 、频率为 f 时,其亮度 B_f 为^[13]:

$$B_f = \frac{2hc}{\lambda^3} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1} \quad (1)$$

式中: h 为普朗克常数 $=6.63 \times 10^{-34}$, J·s; K 为玻耳兹曼常数 $=1.38 \times 10^{-23}$, J/K; c 为光速 $=3 \times 10^8$, m/s; T 为温度, K; f 为频率, Hz; λ 为波长, μm 。

上式表明黑体的亮度是温度和频率的函数。在毫米波段, $hf/KT \ll 1$, 即 $e^{hf/KT} - 1 \approx \frac{hf}{KT}$, 则上式可化简为:

$$B_f = \frac{2f^2KT}{c^2} = \frac{2KT}{\lambda^2} \quad (2)$$

式中: $\lambda = c/f$ 为波长。

一般测量目标并非黑体,通常以黑体等效辐射温度来描述物体的辐射亮度,当毫米波接收机的带宽 f 很窄时,温度为 T 的黑体亮度为:

$$B_b = B_f \Delta f = \frac{2KT}{\lambda^2} \Delta f \quad (3)$$

公式 (3) 说明了,在确定波长下,辐射亮度与温度是一一对应的函数关系。通常测试目标为灰体,其辐射亮度与方向有关,即亮度温度:

$$B_{(\theta,\varphi)} = \frac{2K}{\lambda^2} T_{B(\theta,\varphi)} \Delta f \quad (4)$$

通常以发射率对物体的辐射亮度进行修正,即发射率为物体的辐射亮度与相同温度的黑体的辐射亮

度之比,即:

$$\varepsilon = \frac{B(\theta,\varphi)}{B_b} = \frac{T_{B(\theta,\varphi)}}{T} \quad (5)$$

物体的发射率 ε 受介电常数、表面粗糙度、温度等多种因素的影响,通常 ε 取 0~1。所以物体的辐射亮温总是低于实际温度,只有理想黑体的亮度温度等于实际温度。

由公式 (5) 可知,物体的亮度温度是其发射率与实际温度的乘积,且与方向有关。在 2.2.1 部分的实验中,假设 1~5 号配方的燃烧在燃烧过程中的发射率不变,忽略火焰中电磁场的影响,那么毫米波辐射亮温与温度呈线性关系,即毫米波辐射亮温随着温度的升高而升高。碳纤维是一种优良的导电、导热、耐高温材料,结合图 4 和图 8 分析可知,随着碳纤维含量的增加,烟火药的燃烧温度先增加后降低,而毫米波辐射亮温却持续增加。由公式 (5) 可知, $T_B = \varepsilon \cdot T$, 短切碳纤维从 0% 增加至 1.75%, 火焰温度 T 先增加后降低,辐射亮温 T_B 持续增加,从而说明毫米波发射率 ε 是持续增加的。

另一方面,火焰是一种时刻在变化的状态或现象,其毫米波辐射还与火焰状态和燃烧过程中产生的粒子有关。烟火药燃烧火焰可以认为是弱电离的等离子体,离子和电子通过化学电离反应在火焰内部自然形成,火焰中的带电粒子不断向外运动扩散^[14-17]。在燃烧火焰中施加电场时,在火焰中会形成离子电流,火焰形状也会随着电场的变化而变化^[18]。烟火药在燃烧过程中会产生正负离子、自由电子等带电粒子,这些带电粒子在温差电势的作用下定向运动,形成离子电流,火焰中不同区域的离子电流时刻在变化,形成变化的电场,变化的电场和自旋电子相互作用形成电磁波^[19]。因此,在烟火药中添加碳纤维后毫米波辐射明显增强可能是由于短切碳纤维的优良导电性,使其燃烧火焰中能够充当导体的作用,有利于火焰中带电粒子的传导聚集以及火焰中电磁场的形成,从而增强了烟火药火焰中的电磁辐射。则烟火药在燃烧过程中产生的毫米波辐射来自热辐射和火焰中的电磁场两个部分。从配方 1~5,随着燃温的降低,热辐射大幅减弱,总体辐射强度逐渐减弱,添加碳纤维后火焰中的电磁场增强使得烟火药毫米波辐射强度又明显增加。

3 结 论

在传统 MTV 型烟火药的基础上,以红磷部分替代 Mg 粉,添加短切碳纤维作为功能添加剂,对其红外和毫米波辐射性能进行测试分析,得出以下结论:

(1) 以红磷替代部分 Mg 粉,能有降低 MTV 型烟火药的燃温,延长燃烧时间。红磷添加量从 10% 增加至 20% 时,烟火药的燃温、红外辐射强度、辐射面积都随红磷含量的增加而持续降低,大于 20% 时会出现断燃现象。

(2) 添加碳纤维后,烟火药的燃温和红外辐射强度随着碳纤维含量的增加呈现先增加后降低的趋势,碳纤维含量为 0.75% 时出现峰值。

(3) 添加碳纤维能有效增强烟火药的毫米波辐射,烟火药中碳纤维含量从 0 增加至 1.75%,毫米波辐射亮温持续增加,且亮温在 400 K 以上的持续时间较长。因此,在低燃温诱饵中添加碳纤维是提高烟火药毫米波辐射的一种有效途径。

(4) 以碳纤维作为一种功能添加剂,对烟火药毫米波辐射起到一定的调节作用,在不同应用场景上可以酌情增减用量。

参考文献:

- [1] Ruan Chenli, Dong Yuliang. Millimeter Wave Theory and Technology[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press, 2013. (in Chinese)
- [2] Han Yusheng, Yao Ling, Wang Shuo. Jamming and counter technology of millimeter guidance weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S2): 444-448. (in Chinese)
- [3] Xiao Qin, Li Yinbo, Li Yan, et al. 8 mm focal plane array imaging technique [J]. *Telecommunication Engineering*, 2008, 48(5): 97-100. (in Chinese)
- [4] Qian Chongsong, Li Xinguo. Overview of passive millimeter wave image [J]. *Guidance & Fuze*, 2003, 24(4): 29-33, 36. (in Chinese)
- [5] Yin Ximei, Feng Pengpeng. Status and prospect of terminal sensitive technology [J]. *Journal of Detection & Control*, 2017, 39(5): 1-6. (in Chinese)
- [6] Nie Jiangying, Li Xingguo, Lou Guowei. Analysis and calculation of coating stealth targets with passive millimeter wave detection system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(5): 1-6. (in Chinese)
- [7] Nie Jiangying, Li Xingguo, Lou Guowei. Coating-stealth target radiation transmission characteristics [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2012, 27(4): 733-738. (in Chinese)
- [8] Hu Taiyang, Xiao Zelong, Xu Jianzhong. Method of anti-coating-stealth ground based metal targets by millimeter-wave radiometric detection [J]. *Telecommunication Engineering*, 2010, 50(4): 1-6. (in Chinese)
- [9] Xing Yexin, Lou Guowei, Li Xingguo, et al. Millimeter wave passive detection for stealth air target [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2011, 35(3): 289-293. (in Chinese)
- [10] Zhang Anhua. Study on surface treatment of carbon fiber and its composite material performance [J]. *Chemical Management*, 2020(3): 31-32. (in Chinese)
- [11] Li J, Chen X, Wang Y, et al. Burning and radiance properties of red phosphorus in Magnesium /PTFE/Viton(MTV)-based compositions [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 85: 109-113.
- [12] Chen Minghua, Ma Haimei. Influence of carbon fiber on burning rate infrared radiation intensity of Mg/PTFE infrared composition [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(10): 1008-1010. (in Chinese)
- [13] Li Xingguo, Li Yuehua. Millimeter Wave Short-range Detection Technology Foundation[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. (in Chinese)
- [14] Calcote H F, Keil D G. Ion-molecule reactions in sooting acetylene-oxygen flames [J]. *Combust and Flame*, 1988, 74(2): 131-146.
- [15] Goodings J M, Bohme D K, Chun-Wai Ng. Detailed ion chemistry in methane-oxygen flames. I. Positive ions [J]. *Combust and Flame*, 1979, 36: 27-43.
- [16] Chen B, Wang H, Wang Z, et al. Ion chemistry in premixed rich methane flames [J]. *Combust and Flame*, 2019, 202: 208-218.
- [17] Dong G, Feng Z, Li L, et al. The effect of electron ambipolar diffusion on the ion current signals in a premixed methane flame [J]. *Fuel*, 2019, 256: 115813.
- [18] Fukuyama T, Mukai N, Togawa G. Dynamic behaviours of a flame as plasma in a strong electric field [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 15811.
- [19] Peng Ru. The combustion name radiating millimeter wave and radiation mechanism based on pyrotechnic materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)