

薄膜型低燃温红外诱饵的辐射性能研究

林红雪, 朱晨光, 李敏, 汪海珍

(南京理工大学 化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 以传统镁/聚四氟乙烯配方的红外诱饵剂为基础, 以燃烧时间、燃烧温度和红外辐射强度作为考核参数, 对以红磷和氧化铜作为功能添加剂的薄膜型低燃温红外诱饵剂进行了实验研究。以镁、聚四氟乙烯、红磷和氧化铜的导热性系数作为参量, 综合比较了不同配方对反应速度的影响, 以及对燃烧温度、辐射强度的影响。研究结果显示, 以红磷和氧化铜为功能添加剂可以改善低火焰温度条件下的燃烧稳定性。当红磷含量为 25%, 镁粉含量为 25%, 氧化铜含量为 10%~15%, 聚四氟乙烯含量为 35%~40% 时, 0.03 cm 厚燃烧反应薄膜的燃烧最为稳定, 燃烧时间大于 3 s, 辐射强度在 1.5 W/sr 左右, 燃温为 800 °C 左右。

关键词: 红外诱饵; 薄膜; 低燃温; 辐射强度

中图分类号: TJ53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3193-06

Performance of radiation on film-type infrared flare with low-temperature combustion

Lin Hongxue, Zhu Chenguang, Li Min, Wang Haizhen

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: This research builds upon the traditional composition of the infrared flare (Magnesium/Teflon, MT), and red phosphorus and copper oxide were chose as functional additives, a composition of thin-film infrared flare with low flame temperature was optimized based on its burning time, flame temperature and radiation intensity. In addition to respective conductivity of the material component were chosen as parameters, combustion rates of different prescriptions were analyzed based on their conductivity, and an indication of the impact of combustion temperature and radiation intensity was given. The results of the study show that red phosphorus and copper oxide added can improve combustion stability under lower flame temperature. When the content of red phosphorus was 25%, magnesium powder was 25%, copper oxide was 10%–15%, teflon was 35%–40%, the combustion of the 0.03 cm-thick thin film was most stable, and its combustion time is greater than about 3 s, the most radiation intensity is 1.5 W/sr, the flame temperature is about 800 °C.

Key words: infrared flare; thin film; low flare temperature; radiation intensity

收稿日期: 2014-02-05; 修订日期: 2014-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(51076066)

作者简介: 林红雪(1986-), 女, 硕士生, 主要从事低燃温诱饵技术方面的研究。Email: hlj_lhx@yahoo.cn

导师简介: 朱晨光(1967-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事烟火药燃烧机理方面的研究。Email: zhuchen1967@gmail.com

0 引言

诱饵能否有效诱使导弹偏离真实目标主要取决于诱饵与真实目标的相似程度^[1-2]。活动在海天背景中的飞机和舰船的高温部位温度约为 600~700 °C^[3], 容易被红外探测器发现与识别。而诱饵弹中应用最为广泛的镁/特氟隆/维通(MTV)配方或类似配方, 因火焰温度高、光谱不匹配而不能对抗采用光谱匹配技术的制导系统。

薄膜型红外诱饵剂是使用大量燃烧反应薄膜形成面源诱饵来代替传统的柱状诱饵, 保证燃烧时能量不会过于集中, 从而降低燃烧温度^[4-5]。德国研制开发出了一种具有高辐射强度的可燃箔条弹, 这种红外诱饵弹在空中爆燃之后, 燃烧所形成的微粒会形成红外辐射云, 向空中发射装有这些箔条的诱饵弹就会形成热辐射云层, 从而起到假目标和诱导的效应; 法国法德圣路易研究所开展用红磷替代纳米铝, 作为还原剂开发新一代烟火药——红磷基纳米铝热剂, CuO/P 混合物与传统的铝基铝热剂一样, 加热就会剧烈燃烧, 具有很强的反应活性; 埃及军方开展了红磷基空间诱饵剂的理论与实验研究, 结果显示, 与 MTV 诱饵弹相比, 红磷基诱饵弹可实现在空间大面积散布, 燃烧温度低, 与平台光谱匹配性可调, 但却存在面源诱饵的红外辐射强度偏低问题。

尽管将镁/聚四氟乙烯配方为基础可以制作成

燃烧反应薄膜, 可以保证燃烧时能量不会过于集中, 从而降低燃烧温度, 但也带来了断燃和不易点火等系列问题。文中以镁/聚四氟乙烯为基础, 用红磷和氧化铜作为功能添加剂, 以燃烧温度、红外辐射强度与燃烧时间作为考核指标, 进行不同配比下红外诱饵剂燃烧与辐射性能研究。

1 实验

1.1 试剂与样品制备

试剂: 镁粉, 200 目雾化球形镁粉, 唐山威豪镁粉有限公司; 聚四氟乙烯, 工业品; 红磷, 800 目, 分析纯, 四川省什邡三磷化学公司; 氧化铜, 分析纯, 上海新宝精细化工厂。

将聚四氟乙烯和氧化铜分别用标准筛过筛, 取 80 目与 100 目之间的样品, 按表 1 和表 2 称取各组分, 进行混合。外加 10% 的粘合剂, 用适量的有机溶剂溶解, 加入混合样品进行湿混至均匀。制成长 18 cm, 宽 1.5 cm, 厚度约为 0.03 cm 的薄膜, 如图 1 所示。将薄膜样品放入干燥箱内烘干, 烘干后的质量约为 0.55 g。样品设计配方如表 1、2 所示。

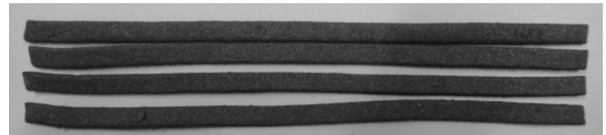


图 1 薄膜型红外诱饵剂

Fig.1 Infrared flare with film-type

表 1 A、B、C 组配方

Tab.1 Formula A, B and C

Component	Formula A						Formula B						Formula C					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Mg/%	45	45	45	45	45	45	40	40	40	40	40	40	35	35	35	35	35	35
PTFE/%	45	40	35	30	25	20	45	40	35	30	25	20	45	40	35	30	25	20
P/%	5	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10	10	15	15	15	15	15	15
CuO/%	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30

表 2 D、E、F 组配方

Tab.2 Formula D, E and F

Component	Formula D						Formula E						Formula F					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	E1	E2	E3	E4	E5	E6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Mg/%	30	30	30	30	30	30	25	25	25	25	25	25	20	20	20	20	20	20
PTFE/%	45	40	35	30	25	20	45	40	35	30	25	20	45	40	35	30	25	20
P/%	20	20	20	20	20	20	25	25	25	25	25	25	30	30	30	30	30	30
CuO/%	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30

1.2 仪器与实验方法

温度测试设备: IGA-140 非接触式远红外测温仪(德国 IMPAC 公司),在发射率选择正确的情况下,1 500 °C 以下时测温精度为 $\pm 0.3\% T_e$,1 500 °C 以上时为测温精度为 $\pm 0.5\% T_e$ (其中 T_e 为试验测试温度,°C);光谱范围为 1.45~1.8 μm ;响应时间为 1 ms;发射率范围为 0.2~1;红外辐射强度测试设备:SR5000 型的红外辐射度计(以色列 CI 公司);测试光谱范围主要

是 0.4~3.5 μm ,2.5~15 μm (可见光-近红外),视场角为 6 mrad,测量距离为 15 m。

1.3 实验结果

上述 6 组配方共计 36 个配方,每个配方制备 5 个样品(共 180 个样品),分别测定其燃烧温度、辐射强度和燃烧时间,计算样品的质量燃烧速度和线燃烧速度。测量及计算结果取 5 组平均值(断燃和熄火测试样品剔除),结果如表 3~5 所示。

表 3 配方 A 和 B 的实验及计算结果

Tab. 3 Test and calculated results of formula A & B

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6
$m/\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	0.39	0.32	0.25	0.37	0.26	0.25	0.26	0.29	0.20	0.32	0.29	0.34
$V/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	12.9	10.6	8.2	12	8.6	8.2	8.6	9.5	6.7	10.6	9.5	11.3
t/s	1.4	1.7	2.2	1.5	2.1	2.2	2.1	1.9	2.7	1.7	1.9	1.6
$T/^\circ\text{C}$	913	944	872	916	912	947	959	1 029	964	859	807	688
$I_{\text{max}}/\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	2.69	2.69	2.45	2.69	2.43	2.59	2.60	2.57	2.69	2.66	2.51	0.32
$I_{\text{average}}/\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	1.63	1.38	0.76	1.46	1.30	1.10	1.31	0.96	1.14	1.02	1.36	0.27

表 4 配方 C 和 D 的实验及计算结果

Tab. 4 Test and calculated results of formula C & D

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	D1	D2	D3	D4	D5	D6
$m/\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	0.24	0.24	0.26	0.28	0.26	0.28	0.20	0.26	0.28	0.24	0.23	0.32
$V/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	7.8	7.8	8.6	9	8.6	9	6.4	8.6	9	7.8	7.5	10.6
t/s	2.3	2.3	2.1	2	2.1	2	2.8	2.1	2	2.3	2.4	1.7
$T/^\circ\text{C}$	921	859	889	805	947	832	941	789	791	904	938	911
$I_{\text{max}}/\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	2.54	2.66	2.45	2.06	1.86	2.51	1.96	2.27	1.87	2.46	2.53	1.64
$I_{\text{average}}/\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	0.89	1.19	1.09	1.04	0.99	1.05	1.15	0.86	0.91	1.50	1.1	0.98

表 5 配方 E 和 F 的实验及计算结果

Tab.5 Test and calculated results of formula E & F

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
$m/\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	0.22	0.17	0.14	0.16	0.18	0.16	0.18	0.17	0.15	0.18	0.20	0.25
$V/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	7.2	5.6	5.6	5.1	5.8	5.1	6	5.6	4.7	5.1	6.7	8.2
t/s	2.5	3.2	3.9	3.5	3.1	3.5	3	3.2	3.8	3.5	2.7	2.2
$T/^\circ\text{C}$	725	807	806	874	715	872	1 000	893	884	869	857	837
$I_{\text{max}}/\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	1.93	1.81	1.59	1.36	1.24	2.13	2.06	1.24	1.92	1.39	1.42	1.78
$I_{\text{average}}/\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	0.76	0.77	0.65	0.69	0.57	0.75	0.64	0.65	0.78	0.77	0.81	0.76

* 表中各符号的物理意义: m 为质量燃烧速度; v 为线燃烧速度; t 为燃烧时间; T 为平均燃烧温度; I_{max} 为红外辐射强最大值; I_{average} 为红外辐射强度平均值。

由表 3~5 可知,A~F 配方中随着红磷含量的增加,诱饵剂的燃烧温度逐渐降低,燃烧时间增长,红外辐射强度也呈现降低趋势;随着氧化铜含量的增加,

燃烧温度、燃烧时间和辐射强度均无明显规律。分析认为:少量的氧化铜可以起到催化剂的作用,加快反应进程,随着氧化铜含量的增加,氧化铜与其他组分之间协同或抑制均对反应过程有很大影响。

从 36 组配方的燃烧温度变化曲线分析,配方 E2、E3 的燃烧温度曲线最为平稳连续,如图 2 所示。

同时,配方 E2 和 E3 的 5 组平行试验表明,在燃烧过程中没有一例发生断续或熄灭现象。由表 5 知,配方 E2 和 E3 的燃烧时间分别为 3.2 s 和 3.9 s;平均燃烧温度分别为 807 °C 和 806 °C;最大红外辐射强度值分别为 1.81 W/sr 和 1.59 W/sr。

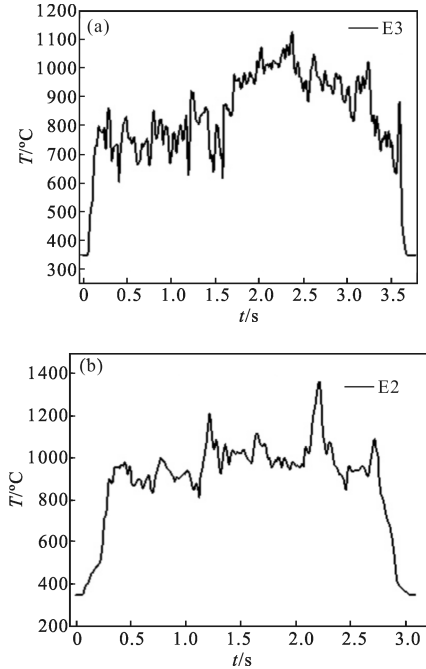


图 2 配方 E2 和 E3 的燃烧温度曲线

Fig.2 Curves of combustion temperature of formula E2, E3

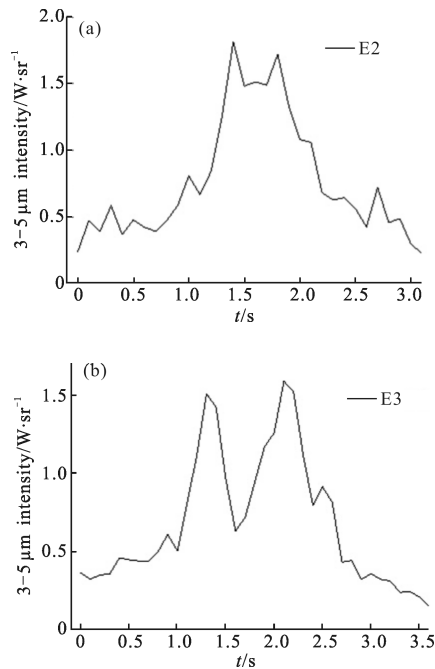


图 3 配方 E2 和 E3 的辐射强度变化曲线

Fig.3 Curves of radiant intensity of formula E2,E3

2 结果与讨论

2.1 配方的组分对其燃烧时间的影响

薄膜厚度约为 0.03 cm,燃烧过程中,燃烧面积基本保持恒定,可视为恒面燃烧^[6],在恒面燃烧的条件下,质量燃烧速度可表示为:

$$m = \frac{\rho dv}{dt} = \frac{\rho A ds}{dt} = \rho Av \tag{1}$$

式中:dv 为 dt 时间内薄膜燃烧的体积;ρ 为密度;A 为薄膜的横截面积;v 为线燃烧速度, v=ds/dt。

对于由两种(或以上)物质组成的材料,可用最简单的模型对材料的导热系数进行计算^[7-8]。例如:由两种物质(a 和 b)组成的材料, x_a 和 x_b 分别表示 a 和 b 两种物质的质量分数;λ_a 和 λ_b 分别表示 a 和 b 两种物质的导热系数。当两种组分的物质沿热流方向并联交替排列时导热系数 λ 最大, λ=x_aλ_a+x_bλ_b;串联交替排列时导热系数 λ 最小, λ=λ_aλ_b/(x_aλ_b+x_bλ_a)。材料的比热容表示为: Cp=x_aCp_a+x_bCp_b, 导温系数表示为:

$$\alpha = \lambda / (\rho Cp) \tag{2}$$

镁、磷、氧化铜和聚四氟乙烯的混合物近似视为各组物质的串联排列,假设各组分充分混合,薄膜的比热容和导热系数可以表示为:

$$C_p = x_{Mg}Cp_{Mg} + x_P Cp_P + x_{CuO}Cp_{CuO} + x_{PTFE}Cp_{PTFE} \tag{3}$$

$$\lambda = \frac{\lambda_{Mg}\lambda_P\lambda_{CuO}\lambda_{PTFE}}{x_{Mg}\lambda_P\lambda_{CuO}\lambda_{PTFE} + x_P\lambda_{Mg}\lambda_{CuO}\lambda_{PTFE} + x_{CuO}\lambda_{Mg}\lambda_P\lambda_{PTFE} + x_{PTFE}\lambda_{Mg}\lambda_P\lambda_{CuO}} \tag{4}$$

各组分的导热系数、比热容及密度的值见表 6 所示^[9], P 和 CuO 组分对薄膜的导热系数影响如图 4 所示。

表 6 各组分的导热系数、比热容及密度

Tab.6 Heat conductivity, specific heat capacity and density of components

	$\lambda / J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$	$Cp / J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$\rho / Kg \cdot m^{-3}$
Mg	165.1	1 000	1 745
P	0.235	795	2 340
CuO	18	540	6 315
PTFE	0.24	1 050	2 190

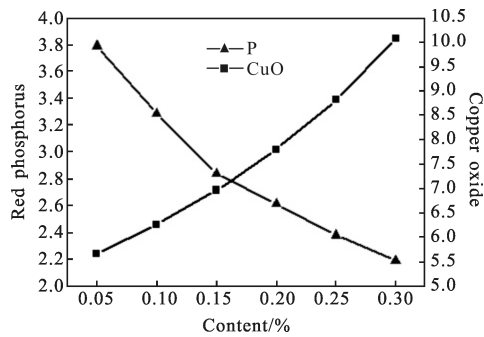


图 4 P、CuO 含量与导热系数的关系

Fig.4 Relationship of the thermal conductivity between content P & CuO

导热系数的增加使薄膜的扩散速率上升,故其燃烧速度也增加。根据图 4 可知,随着红磷含量在药剂中含量的增加,药剂的导热系数快速降低;随着氧化铜含量的增加,药剂的导热系数快速升高,根据公式(3)计算可知热容变化均不大,因此药剂的导热系数就随着红磷含量的增加而显著降低,燃烧速度迅速降低;随氧化铜含量的增加则反之。

表 3~5 中, A1~F1 配方红磷含量从 5% 增加至 30%, 镁粉含量从 45% 降低到 20%, 聚四氟乙烯和氧化铜含量不变, 分别为 45% 和 5%, 燃烧时间分别为 1.4s、2.1s、2.3s、2.8s、2.5s 和 3s, 可见随红磷含量的增加, 燃烧时间明显增加; C 组配方中 C1~C6 配方氧化铜的含量从 5% 增加至 30%, 聚四氟乙烯含量从 45% 降至 20%, 镁粉和红磷含量不变分别为 35% 和 15%, 燃烧时间从 2.3s 减短至 2s, B 和 E 组配方随着氧化铜含量的增加, 燃烧时间均减少, 但 A、E 和 F 配方随氧化铜含量的增加, 燃烧时间先增加后减小。

2.2 配方组分对其燃烧温度的影响

氧化剂 PTFE、CuO, 燃料 Mg、P 均匀混合颗粒的燃烧是粒状扩散燃烧, 与 Mg/PTFE 配方体系相比较, CuO/P 组成的混合物更容易点火, 燃烧反应温度降低。燃烧过程分如下几个步骤: 首先混合物配方中 CuO 与 P 起反应, 并在混合物间放出热量; 混合物吸收热量在 CuO 的催化下气化解生成 C_2F_4 等, Mg、P 外层熔化、气化; 熔化、气化的 Mg 和 P 与 PTFE 的分解产物 C_2F_4 反应生成 MgF_2 、 PF_5 等, 并放出大量的热, CuO 受热分解生成 Cu 和 O_2 等; 各种颗粒被排向气相区, 其中镁和磷在气相区继续燃烧; 如果氧化剂不足, 则镁和磷与空气中的氧气反应。其中关键的步骤是氧化剂的气化解和还原剂的熔化与气化。

CuO 既可以作为氧化剂释放氧气, 又可以作为催化剂, 氧化铜在 1000°C 时会分解成氧化亚铜, 即 $4\text{CuO} \xrightarrow{1000^\circ\text{C}} 2\text{Cu}_2\text{O} + \text{O}_2$, 由于氧化铜和氧化亚铜颗粒表面富有一定量的氧自由基, 可以催化 PTFE 分解反应, 使整个燃烧过程的起始反应温度和燃烧温度均降低。但是当氧化铜含量过多时, 氧化铜反而容易发生聚集而沉降, 从而降低了催化剂的总比表面积, 使得催化剂与反应物质的有效接触面积减少, 导致催化效率下降。A→F 配方中镁粉逐渐被红磷替代, 红磷的引燃温度仅为 260°C 、熔点为 590°C , 镁粉的熔点约为 500°C 、熔点为 650°C , 故红磷较镁粉容易熔化气化, 且先与氧化剂反应。根据红磷和氧化铜对导热系数的影响, 红磷含量增加使反应速度降低, 单位时间内放出的能量减少, 平均燃烧温度则降低; 氧化铜含量增加的配方则反之。红磷与氧化铜组分的增加, 相当于用 P/CuO 替换 Mg/PTFE 组分, 按照红磷和镁粉完全反应计算燃烧热^[9], 得 P/CuO 的燃烧热为 -8.8kJ/g , Mg/PTFE 的燃烧热为 -27.6kJ/g , 故 P/CuO 的加入使配方的燃烧温度有效降低。

2.3 配方组分对其红外辐射强度的影响

红外辐射强度主要受反应产物和燃烧温度的影响。由于 PTFE 分解出的 F 的电负性(4.10)比含氧的氧化剂分解出的 O 的电负性(3.50)大^[10], F 的强氧化能力必导致 PTFE-Mg 燃烧反应先产生大量的 MgF_2 , Mg 的金属性强, 更容易被氧化。A 到 F 配方中 CuO 的含量逐渐增加, 则生成的 P_2O_5 和 MgO 含量逐渐增多, 而辐射主要集中在红外区域的 MgF_2 含量减少, 辐射强度势必减小。

由表 3~5 可知, A~F 配方中 P 的含量逐渐增加, 红磷燃烧的生成热远小于镁粉燃烧的生成热, 使得辐射强度降低。A 和 B 组配方的红外辐射强度均为 2.6W/Sr 左右; F 组配方中辐射强度的最小值仅为 1.24W/Sr ; D 和 E 配方的辐射强度在 2W/Sr 左右。由表 3~5 可知, A 组配方的燃烧温度在 900°C 左右, 而 F 组配方的燃烧温度均为 800 左右, A1 配方的燃烧温度为 913°C , F6 配方的燃烧温度为 837°C , 其中 P/CuO 的总质量从 10% 增加到 60%, 燃烧温度降低了 76°C 。但由于 CuO 对配方的催化作用, 燃烧温度较低的配方集中在 D 组和 E 组配方, D2、D3、E1 和 E5 配方的燃烧温度均不到 800°C , E2 和 E3 配方燃

烧温度分别为 807 °C 和 806 °C。根据图 5 中曲线^[10]可知, 800 °C 时黑体的辐射峰所对应的波长在 3~4 μm 之间。研究表明, E2 和 E3 配方不仅燃烧稳定, 而且其燃烧温度处在黑体辐射的 3~4 μm 波段最大峰附近, 即辐射效率处在最大值。

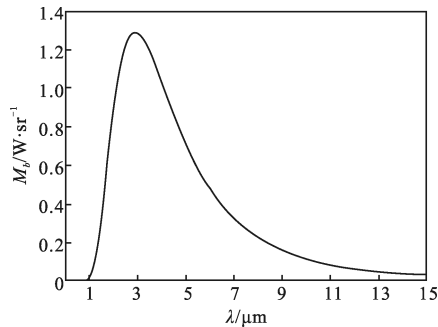


图 5 800 °C 下绝对黑体的光谱辐射出射度曲线

Fig. 5 Curve of spectral radiant exitance of blackbody at 800 °C

3 结 论

将 CuO/P 基铝热剂作为功能添加剂, 有效地改善了 Mg/PTFE 基薄膜型红外诱饵剂的燃烧性能, 降低了红外诱饵剂的燃烧温度。研究结果表明:

(1) 导热系数随着氧化铜含量的增加而提高, 随着红磷含量的增加而减少, 线燃烧速度和质量燃烧速度均正比于其导热系数;

(2) 随着红磷含量的增加, 诱饵剂的燃烧温度降低, E 组配方和 F1~F4 配方的燃烧时间均超过 3 s, 燃烧时间较长, 且燃烧过程无断续现象;

(3) 红磷和氧化铜含量的增加均使总红外辐射强度降低, E1、E2 配方在 3~5 μm 波段的最大红外辐射强度为分别为 1.81 W/Sr 和 1.59 W/Sr, 燃烧反应温度与该温度下黑体的最强辐射值较接近;

(4) 当红磷含量为 25%, 氧化铜含量为 10%~15% 时, 药剂的燃烧最为稳定, 没有断续或熄灭现象, 燃烧时间大于 3 s, 燃温相对较低, 为 800 °C 左右。

参 考 文 献:

[1] Gan Yuanliu, Song Bin. Discussion on infrared guided missile and infrared decoy flare[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2005, 20(6): 7-9. (in Chinese)

淦元柳, 宋斌. 论红外导弹与红外干扰弹的对抗 [J]. 光电技术应用, 2005, 20(6): 7-9.

- [2] Kong Lingchun. Summary of self-protection system against IR guided missile [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2005, 20(1): 6-9. (in Chinese)
孔令春. 飞机自卫反红外导弹综述 [J]. 光电技术应用, 2005, 20(1): 6-9.
- [3] Yuan Jiangtao, Yang Li, Chen Xuan, et al. Analysis of infrared radiation on modern naval ship and its control strategies [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36 (10): 943-947. (in Chinese)
袁江涛, 杨立, 陈翺, 等. 现代舰船红外辐射及其控制策略分析[J]. 激光与红外, 2006, 36(10): 943-947.
- [4] Rbernard D, Douda E. Survey of military pyrotechnics [R]. AD-A238923, 1991.
- [5] Briere P S, Michel S O, Roy A, et al. NoZZles for pyrotechnic IR decoy flares: US, 5866840[P]. 1999-02-02.
- [6] Chen Minghua, Liu Weiqi, Li Dongyang, et al. A method for calculating infrared radiation intensity of Mg/PTFE composition[J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34(5): 341-343. (in Chinese)
陈明华, 柳维旗, 李东阳, 等. 镁/聚四氟乙烯诱饵剂红外辐射强度的计算[J]. 激光与红外, 2004, 34(5): 341-343.
- [7] Chen Minghua, Jiao Qingjie, Chang Fei, et al. The research on infrared emission performance of Mg/PTFE infrared composition[J]. *Laser & Infrared*, 2002, 32(4): 253-256. (in Chinese)
陈明华, 焦清介, 常非, 等. 镁/聚四氟乙烯红外诱饵剂的红外辐射性能研究[J]. 激光与红外, 2002, 32(4): 253-256.
- [8] Tu Chuanjing, Shen Luochan, Wu Zijing. Heat Conduction [M]. Beijing: Higher Education Press, 1989. (in Chinese)
屠传经, 沈珞婵, 吴子静. 热传导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [9] James G Speight. Lange' S Handbook of Chemistry (16 Edition)[M]. New York: McGraw-Hill, Inc, 2005.
- [10] Pan Gongpei, Zhu Changjiang, Wang Xue, et al. Factors influencing on the radiant intensity of infrared radiation pyrotechnics[J]. *Energetic Materials*, 1999, 7(2): 57-59. (in Chinese)
潘功配, 朱长江, 王雪, 等. 影响红外辐射烟火剂辐射强度的因素[J]. 含能材料, 1999, 7(2): 57-59.