

文章编号: 1006-9941(2015)04-0368-04

硼粉含量对 $\text{KNO}_3/\text{Mg-Al}$ 红外诱饵剂燃烧及红外辐射特性的影响杜珺¹, 关华¹, 李捷¹, 郜永¹, 姚文佳²

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 北方华安工业集团有限公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘要: 为提高 $\text{KNO}_3/\text{Mg-Al}$ 红外诱饵剂红外辐射强度, 采用药剂中添加硼(B)粉的方法, 借助远红外热像仪对诱饵剂燃烧及红外辐射特性进行了实验研究。结果表明, 添加 B 粉后诱饵剂的质量燃速、燃烧温度、辐射亮度增大。当 B 粉含量由 0% 增加到 2% 时, 诱饵剂的质量燃速从 $0.394 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 提高到 $0.564 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当 B 粉含量由 0% 增加到 4% 时, 燃烧温度和辐射亮度分别从 $727.71 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $995.68 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 增加到 $1046.19 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1681.59 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。辐射强度随 B 粉含量增加呈现出先增加后减小的趋势, B 粉含量为 4% 时辐射强度达到极值 $2.64 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$, 显示一定比例 B 粉可有效提高诱饵剂的质量燃速、燃烧温度及红外辐射特性。

关键词: 诱饵剂; B 粉; 燃烧特性; 辐射特性**中图分类号:** TJ55; TN976; TQ567**文献标志码:** A**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.04.011

1 引言

红外诱饵剂是一种在燃烧过程中能产生强烈红外辐射的烟火药剂, 用于对红外制导、探测及观瞄系统实施诱骗干扰。由于第一代和第二代红外制导导弹的工作波段基本上都在近、中红外波段, 因此, 与之对抗的红外诱饵剂主要集中在近、中红外波段。随着远红外成像制导技术的广泛应用, 对远红外诱饵剂的研究迫在眉睫^[1]。

目前, 国内外对红外诱饵剂的研究主要以镁/聚四氟乙烯(Mg/PTFE , MTV)为基本组分, 通过调整药剂配方来研究光谱及辐射特性。如, 陈明华^[2-3]等用 10~15 g 药柱进行实验, 结果显示当 Mg/PTFE 质量比为 50/50 时, 红外辐射强度最大, $3 \sim 5 \text{ } \mu\text{m}/8 \sim 14 \text{ } \mu\text{m}$ 处分别为 $66.10/5.60 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$; 而 $\text{Mg}_4\text{Al}_3/\text{PTFE}$ 质量比为 70/30 时药剂的中、远红外辐射强度最大, 分别为 $254.8 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ 和 $26.33 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。Campbell^[4-5]利用热塑粘合剂将 TSE-MTV 频谱效率由 $E_{2-3 \text{ } \mu\text{m}} = 185 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 提高至 $215 \sim 330 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。于志良^[6]提出添加选择性辐射体如石墨粉、SiC 等可有效提高 $3 \sim 5 \text{ } \mu\text{m}$ 红外辐射强度。另外, Weiser 等^[7-8]用以 $\text{Al}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 为基础的铝热剂与

$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 和含能有机物结合制成诱饵剂, 可提高 $3 \sim 5 \text{ } \mu\text{m}$ 处辐射强度同时降低 $1 \sim 3 \text{ } \mu\text{m}$ 辐射强度。MTV 诱饵剂的光谱比为 $2 \sim 3 \text{ } \mu\text{m} / 3 \sim 5 \text{ } \mu\text{m} = 1.33$, 而真实目标光谱比为 $0.5 \leq 2 \sim 3 \text{ } \mu\text{m} / 3 \sim 5 \text{ } \mu\text{m} \leq 0.8$ (随发动机不同而不同)^[9], 而且在提高诱饵剂远红外辐射时, $3 \sim 5 \text{ } \mu\text{m}$ 的辐射会随之显著提高。

为了满足诱饵剂 $2 \sim 3 \text{ } \mu\text{m}/3 \sim 5 \text{ } \mu\text{m}$ 光谱比与真实目标相近, 研究了以 $\text{KNO}_3/\text{Mg-Al}$ 为基础配方的红外诱饵剂, 结果显示 $\text{KNO}_3/\text{Mg-Al}$ 光谱比为 $2 \sim 3 \text{ } \mu\text{m} / 3 \sim 5 \text{ } \mu\text{m} = 0.77$, 同时 $\text{KNO}_3/\text{Mg-Al}$ 在远红外的辐射比 MTV 略强。为进一步提高药剂红外辐射, 本研究选择在 $\text{KNO}_3/\text{Mg-Al}$ 诱饵剂中添加具有较强热效应的硼粉(B), 研究不同比例 B 粉对药剂的质量燃速、燃烧温度和辐射亮度等燃烧及红外辐射特性影响规律, 以获得提高诱饵剂远红外辐射强度的合适 B 比例。

2 提高诱饵剂红外辐射强度的理论分析

红外诱饵剂燃烧时的辐射强度主要取决于质量燃速、燃烧温度和燃烧产物成分, 其中红外辐射强度与质量燃速之间的关系^[9]为:

$$I = E_m \dot{m} \quad (1)$$

式中, I 为红外辐射强度, $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$; E_m 为比辐射能, $\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$; \dot{m} 为质量燃速, $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由式(1)可知, 红外辐射强度与药剂质量燃速成正比, 由于药剂组成基本一致, 比辐射能近似相等, 因

收稿日期: 2014-02-25; 修回日期: 2014-05-23

作者简介: 杜珺(1989-), 女, 博士研究生, 主要从事光电对抗与无源干扰技术研究。e-mail: dina522044582@163.com

通信联系人: 关华(1965-), 女, 研究员, 主要从事光电对抗与无源干扰技术研究。e-mail: guanhua@njut.edu.cn

此,比辐射能变化可忽略不计,增加红外诱饵剂的质量燃速可提高辐射强度。

诱饵剂燃烧产生一定温度,其温度与红外辐射一般符合斯蒂芬-玻尔兹曼定律^[10]:

$$M = \sigma T^4 \quad (2)$$

式中, M 为辐射出射度, $W \cdot m^{-2}$; σ 为斯蒂芬常数; T 为燃烧温度, K 。

辐射出射度 M 定义式为^[10]:

$$M = \frac{dP}{dA} = \int_{2\pi\text{球面度}} L \cos\theta d\Omega \quad (3)$$

式中, dP 是 dA 向半球空间发射的辐射功率; dA 是源面上的小面源; L 是辐射亮度, $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$; θ 是与面源的法向夹角; $d\Omega$ 是 θ 方向上的小立体角元。

根据式(2)和式(3)可推导出红外辐射亮度与燃烧温度的关系:

$$\sigma T^4 = \int_{2\pi\text{球面度}} L \cos\theta d\Omega \quad (4)$$

因此,由式(4)可以看出,红外辐射亮度与燃烧温度的四次方成正比,提高燃烧温度可显著提高红外辐射亮度。

辐射强度与辐射亮度存在以下关系^[10]:

$$I = \int_{\Delta A} L dA \cos\theta \quad (5)$$

式中, ΔA 是辐射面积, m^2 。

测试时样品燃烧面与测试仪器法相垂直,面源充满整个视场且辐射均匀, ΔA 在位置、角度上不变,所以,公式(5)可简化为:

$$I = L \Delta A \cos\theta \quad (6)$$

由此得出辐射强度与燃烧温度关系为:

$$\sigma T^4 = \int_{2\pi\text{球面度}} \frac{I}{\Delta A} d\Omega \quad (7)$$

由式(7)可知,辐射强度与燃烧温度的四次方成正比,因此,提高诱饵剂燃烧温度可有效提高诱饵剂红外辐射性能。

3 药剂燃烧及红外辐射特性实验

主要原材料:硝酸钾(KNO₃),分析纯,西陇化工股份有限公司;镁铝合金粉(Mg-Al),东北轻合金;硼(B),活性B含量为86%~89%;氟橡胶为晨光氟橡胶FPM2603。

样品制备:实验采用80目筛下主要成分KNO₃/Mg-Al质量配比为58:29的诱饵剂作为基础配方,分别添加质量比为1%,2%,3%……10%的B粉,湿混

后制成药浆,制成3 cm×3 cm相同质量的箔片,厚度均匀,约为1 mm。

测试仪器设备:美国Flir公司SC7000型远红外热像仪,光谱响应波段7.7~9.3 μm;分辨率320×240像素;温度分辨率<20 mK;测试镜头25 mm,背景、大气温度12℃,室温17℃,辐射率设为1。

测试时,将试验样品置于仪器镜头正前方1.1 m试验台,样品燃烧面正对仪器,点燃样品表面点火药后,样品迅速全面呈面源燃烧,测试样品燃烧过程。利用远红外热像仪测试样品燃烧时间、燃烧温度、辐射面积、辐射亮度。

4 实验结果与讨论

4.1 B粉对诱饵剂燃烧特性的影响

利用远红外热像仪测定燃烧时间和燃烧温度,结果取平均值。硼粉添加剂对药剂燃速和燃烧温度的影响结果如图1所示。其中质量燃速 \dot{m} 定义为 $\dot{m} = M/t$, M 为样品质量, g ; t 为燃烧时间, s 。

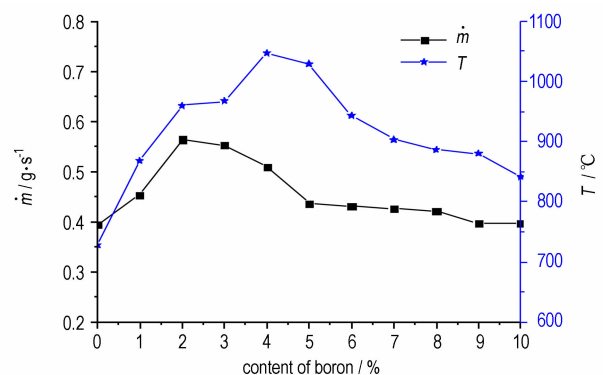


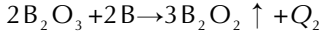
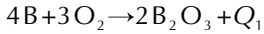
图1 硼粉含量对诱饵剂的质量燃速和燃烧温度的影响

Fig.1 Effect of the content of boron powder on the mass burning rate and combustion temperature of the decoy

从图1可见,添加B粉后药剂质量燃速、燃烧温度均显著提高,随着B粉含量的增加燃速逐渐加快,当增加到2%时,燃速由0.394 $g \cdot s^{-1}$ 增加到0.564 $g \cdot s^{-1}$,之后燃速开始减慢;当B粉含量增加到4%时,燃烧温度从727.71℃升高到1046.19℃的极值,之后继续增加B粉,燃烧温度逐渐降低,当B粉含量为10%时,燃烧温度为841.12℃。诱饵剂中添加B粉后燃速和燃烧温度增加,主要是因为B与KNO₃发生氧化还原反应产生大量反应热。

已知B在327℃时开始缓慢氧化,477℃时B表面的氧化层B₂O₃开始由固态变为液态,777~

1227 °C时 B_2O_3 与 B 进一步反应生成气态 B_2O_2 。其反应式依次为:



其中, $Q_1 > 0$ 为放热反应, $Q_2 < 0$ 为吸热反应^[11]。药剂点燃后, B 粉受热氧化释放热量, 促进了基础配方 $KNO_3/Mg-Al$ 的燃烧, 从而同时提高了质量燃速和燃烧温度。但是随 B 粉含量的进一步增加, 促进了 B_2O_3 的分解, 导致反应吸收的热量增加; 另一方面, $Mg-Al$ 合金与 B 粉存在竞争氧化反应^[12], B 粉含量的增加阻碍了 $Mg-Al$ 合金的氧化还原反应, 导致药剂的燃烧反应热减少, 因此药剂质量燃速和燃烧温度随着 B 粉含量的进一步增加呈现下降趋势。

4.2 B 粉对诱饵剂红外辐射特性的影响

利用远红外热像仪可测得 B 粉含量不同时药剂燃烧某一时刻的红外热图如图 2 所示。

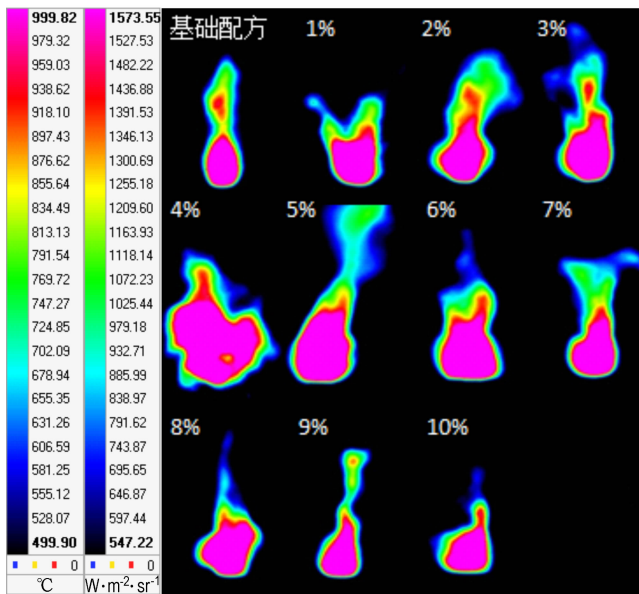


图 2 添加不同比例 B 粉的诱饵剂的红外热图

Fig. 2 Infrared thermal images of the decoy with different proportion of boron powder

利用热像仪自带 Altair 软件沿图 2 中蓝色 (约 500 °C) 选择读取数据的范围, 直接获得所选范围的辐射亮度和辐射面积, 并由此按公式 (6) 计算辐射强度 (由于热像仪记录结果为样品垂直方向辐射特性, 因此式中 $\theta = 0^\circ$), 硼粉添加剂对药剂辐射强度的影响测定及计算结果如表 1 和图 3 所示。

从图 3 可见, 随着 B 粉含量的增加, 药剂红外辐射亮度由 $995.68 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 提高到 $1681.59 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ (此时 B 粉含量为 4%) 后逐渐降低。4.1 结果显示,

添加 B 后, 药剂燃烧温度增加, 由公式 (4) 可知药剂辐射亮度主要与燃烧温度有关, 因此 B 粉的加入有效增加了热辐射, 另外 B 粉燃烧可能生成 B_2O_3 ^[11], 从而进一步提高辐射亮度。当 B 粉含量大于 4% 时, 随着 B 粉含量的进一步增加可能导致 $Mg-Al$ 氧化反应受阻, 从而反应产生的辐射源减少。因此, 随着 B 粉含量增加辐射亮度先增后减。

表 1 硼粉对诱饵剂辐射强度的影响

Table 1 Effect of boron powder on the radiation intensity of the decoy

the proportion of boron / %	radiance / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	radiating area $\times 10^{-6} / \text{m}^2$	radiation intensity / $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$
0	995.68	1099.99	1.10
1	1284.87	1284.94	1.65
2	1484.69	1289.81	1.91
3	1500.61	1301.98	1.95
4	1681.59	1572.11	2.64
5	1639.39	1216.80	1.99
6	1446.80	717.08	1.04
7	1360.75	713.80	0.97
8	1325.02	705.09	0.93
9	1309.05	639.75	0.84
10	1223.85	580.96	0.71

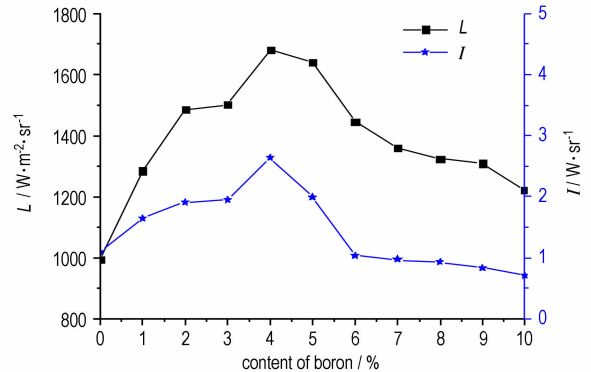


图 3 硼粉比例对诱饵剂辐射亮度和辐射强度的影响

Fig. 3 Effect of the proportion of boron on radiation radiance and radiation intensity of the decoy

同时从图 3 还可以明显地看出, 随着药剂中 B 粉含量的增加, 药剂红外辐射强度由 $1.10 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ 提高到 $2.64 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ 后 (B 粉含量为 4%) 快速降低, 当 B 粉所占比例大于 6% 时, 药剂辐射强度较未添加 B 粉的基础配方略低。由公式 (6) 可知, 这主要是因为辐射亮度和辐射面积的影响。相较于辐射亮度, 辐射面积变化较大, 随着 B 粉含量的增加辐射面积从 $1099.99 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 增加到 $1216.80 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 极值后快速减小。原因是药剂燃烧生成大量固体和液体颗粒,

同时 B 燃烧反应可能生成 B_2O_2 气体,增加了反应体系中气体量,从而增大了辐射面积,但随着 B 粉的进一步增加,B 与 Mg/Al 竞争关系加剧,Mg/Al 在燃面附近气相反馈减少,同时氧化生成的 MgO 、 Al_2O_3 等固体辐射源减少,导致辐射面积快速减小^[12]。因此,随着 B 粉含量增加辐射强度先增后减。

5 结 论

(1) 添加 B 粉可有效提高 $\text{KNO}_3/\text{Mg-Al}$ 诱饵剂的燃烧速度、燃烧温度。当 B 粉含量为 2% 时药剂燃烧速度达到极大值 $0.564 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, B 粉含量为 4% 时药剂燃烧温度达到极大值 $1046.19 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

(2) 在 $\text{KNO}_3/\text{Mg-Al}$ 诱饵剂中添加 B 粉后, B 粉含量为 4% 时药剂辐射亮度和辐射强度均达到极大值,分别为 $1681.59 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 、 $2.64 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。这是由于添加 B 粉增加了体系中固体组分含量,产生大量燃烧反应热,从而提高了燃烧温度,进而提高了红外辐射。

参考文献:

- [1] 刘默伟,王志刚. 红外成像制导武器的装备概况与发展分析[J]. 舰船电子工程,2009,29(6): 36-37.
LIU Mo-wei, WANG Zhi-gang. Equipment overview and the development analysis of infrared imaging guided weapons[J]. *Ship Electronic Engineering*,2009, 29(6): 36-37.
- [2] 陈明华,焦清介,温玉全,等. $\text{Mg}_4\text{Al}_3/\text{PTFE}$ 红外诱饵剂的辐射性能研究[J]. 激光与红外,2005,35(7): 500-503.
CHEN Ming-hua, JIAO Qing-jie, WEN Yu-quan, LU Bin. The research on emission performance of $\text{Mg}_4\text{Al}_3/\text{PTFE}$ infrared composition[J]. *Laser & Infrared*, 2005,35(7): 500-503.
- [3] 陈明华,马桂海. 碳纤维对镁/聚四氟乙烯燃烧速度和红外辐射强

- 度的影响[J]. 激光与红外,2008,38(10): 1008-1010.
CHEN Ming-hua, MA Gui-hai. Influence of carbon fiber on burning rate and infrared radiation intensity of Mg/PTFE infrared composition[J]. *Laser & Infrared*, 2008,38(10): 1008-1010.
- [4] Campbell C. Twin screw extruder production of MTTP decoy flares SERDP WP-1240 [R], *Thiokol Propulsion* ADA 451087, 2005,12.
- [5] Ray M A, Ashcroft B N, Blau R J, et al. An example of magnesium-terflon-thermoplastic (MTTP), a viable blackbody emitting composition that has been produced via a solvent-free twin-screw extrusion process[C] // 33rd Int. Pyrotech. Sem, Fort Collins, CO, 2006,7: 297.
- [6] 于志良. 提高红外诱饵 3-5 μm 选择辐射的途径探讨[J]. 光电对抗与无源干扰,1994(2): 12-15.
YU Zhi-liang. Discussion on the ways to enhance the IR decoy flare selective radiation in 3-5 μm [J]. *Electro-Optic Warfare & Radar Passive Countermeasures*, 1994(2): 12-15.
- [7] Weiser V, Kelzenberg S, Neutz J, et al. Neue Ansätze zur Entwicklung von spektralen Täuschkörpern und Brandsätzen[C] // Wehrtechnisches Symposium Wirkung und Schutz, Explosivstoffe,2006,12, Mannheim, Deutschland.
- [8] Weiser V, Blanc A, Deimling L, et al. Pyroorganic flares a new approach for aircraft protection[C] // 9^{ème} Congres International de Pyrotechnie, Beaune France,2007: 785.
- [9] Ernst-Christian Koch. Review on pyrotechnic aerial infrared decoys[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2001, 26: 3-11.
- [10] 张建奇,方小平. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社,2004.
- [11] Alessandro Gomez, Rosner Daniel E, Roni Zvuloni. Recent studies of the kinetics of solid boron gasification by $\text{B}_2\text{O}_3(\text{g})$ and their chemical propulsion implications [R]. *CRC Press Inc*, 1993:113-132.
- [12] 吴婉娥,毛根旺,鲁军,等. 镁铝金属粉对含硼富燃料推进剂燃烧性能及硼氧化效率的影响[J]. 含能材料,2008,16(4): 458-461.
WU Wan-e, MAO Gen-wang, LU Jun, et al. Effect of Mg and Al powders on combustion performance of boron-based fuel-rich propellant and oxidation efficiency of boron [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailliao)*, 2008,16(4): 458-461.

Effect of Boron Power on Combustion and Infrared Radiation Characteristics of $\text{KNO}_3/\text{Mg-Al}$ Decoy

DU Jun¹, GUAN Hua¹, LI Jie¹, GAO Yong¹, YAO Wen-jia²

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. North Hua'an Industrial Group Co. Ltd, Qiqihaer 161006, China)

Abstract: To improve the infrared radiation intensity of $\text{KNO}_3/\text{Mg-Al}$ decoy, the combustion and infrared radiation characteristics of the decoy were experimentally studied via the method of adding boron powder in the decoy by a far infrared thermal imager. Results show that the mass burning rate, combustion temperature and radiation radiance of the decoy increase by adding boron powder. With the content of boron powder increases from 0% to 2%, the mass burning rate of the decoy increasing from $0.390 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ to $0.564 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$. When the content of boron powder increases from 0% to 4%, the combustion temperature and radiation radiance increase from $727.71 \text{ }^\circ\text{C}$, $995.68 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ to $1046.19 \text{ }^\circ\text{C}$, $1681.59 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ respectively. With increasing the content of boron powder, the radiation intensity reveals the trend to increase firstly and then decrease. When the content of boron powder is 4%, the radiation intensity increases to the maximum of $2.64 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$, revealing that adding a certain proportion of boron powder can effectively improve the mass burning rate, combustion temperature and infrared radiation characteristics of the decoy.

Key words: decoy; boron power; combustion characteristics; radiation characteristics

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.04.011