

文章编号: 1006-9941(1999)02-0057-03

影响红外辐射烟火剂辐射强度的因素

潘功配, 朱长江, 王雪, 李毅

(南京理工大学, 江苏南京 210094)

摘要: 以 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 为特定波段, 就红外辐射烟火剂的氧化剂成分、质量燃烧率和燃烧温度对辐射强度的影响开展了试验研究。结果表明, 聚四氟乙烯 (PTFE) 是一种提高红外辐射强度的良好氧化剂, 由 PTFE-Mg 组成的药剂其质量燃烧率与辐射强度成正比; 温度升高时波长短的 ($3 \sim 5 \mu\text{m}$) 较波长长的 ($8 \sim 14 \mu\text{m}$) 辐射强度升幅大。

关键词: 烟火剂; 红外辐射; 辐射强度; 氧化剂; 质量燃烧率

中图分类号: TQ567

文献标识码: A

1 引言

红外辐射烟火剂研究的关键是在特定光谱波段内应具有最大的红外辐射强度。所谓特定波段是指红外大气窗口 $1 \sim 3 \mu\text{m}$, $2 \sim 3 \mu\text{m}$, $3 \sim 5 \mu\text{m}$, $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 等波段。欲在特定波段内获取最大的辐射强度, 研究影响辐射强度的因素至关重要。

一般说来, 红外辐射烟火剂的辐射强度与药剂的原材料性能 (包括材料活性、粒度、粒径级配)、配方、装填密度、装填结构、燃烧速度、燃烧温度等因素相关。Nadler^[1] 以 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 和 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 为特定波段, 就 NH_4ClO_4 -Mg 药剂配方, 研究了 NH_4ClO_4 与 Mg 的比率、两种不同粘结剂 (Sylgard 182 和 HTPB)、Mg 粉粒径级配诸因素对辐射强度的影响, 获得了一些有价值的结果。

本研究以 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 为特定波段, 就药剂配方中氧化剂成分、药剂质量燃烧率和燃烧温度诸因素对辐射强度的影响开展了试验研究。

2 试验条件

试样采用密度为 1.9g/cm^3 的圆柱体药柱, 其侧面与底端以绝热包覆剂包覆, 端面燃烧; 采用钽酸锂双通道红外辐射计同时测定 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段辐射强度值; 用 WH-6 红外测温仪测定燃烧温度。

3 结果及讨论

3.1 氧化剂成分对辐射强度的影响

以 NH_4ClO_4 、 KClO_4 、 KNO_3 、 NaNO_3 、 $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 及 PTFE (聚四氟乙烯) 七种氧化剂, 分别与可燃剂 Mg 粉按化学计量配比配制, 并将其压制成 $> 20 \text{mm}$ 样品药柱, 试验结果如表 1 所示。

表 1 氧化剂对辐射强度影响

Table 1 Influence of oxidizers on radiant intensity

样品号	氧化剂	燃速 $/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	辐射强度 $I_{\lambda_1 - \lambda_2} / \text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	
			$I_{3 \sim 5 \mu\text{m}}$	$I_{8 \sim 14 \mu\text{m}}$
1	NH_4ClO_4	3.26	79.3	14.5
2	KClO_4	4.31	85.0	16.5
3	KNO_3	4.50	89.4	18.0
4	NaNO_3	4.60	96.3	25.0
5	$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	4.40	172.9	27.7
6	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	4.30	157.0	28.9
7	PTFE	2.80	202.0	28.4

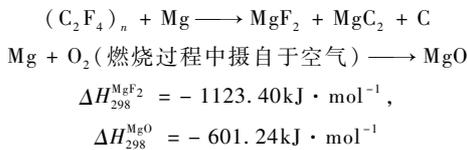
由表 1 可见, 含卤素 F 的无氧氧化剂 PTFE 比其它六种含氧氧化剂对红外辐射强度影响大。从表中看出: 氧化剂 PTFE 的 $I_{3 \sim 5 \mu\text{m}}$ 值最大, 而其 $I_{8 \sim 14 \mu\text{m}}$ 值虽与 $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 相当, 但由于 PTFE 的燃速远低于 $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, 实际上单位质量药剂还是 PTFE 居上。用 PTFE 作氧化剂有较高红外输出, 其原因主要是因为 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, F 的强氧化能力必导致 PTFE-Mg 燃烧反应产生大量的 MgF_2 , 而 MgF_2

收稿日期: 1998-05-07 修回日期: 1998-08-10

基金来源: “八五”国防重点预研项目 (22B.9)

作者简介: 潘功配, 男, 1945 年 7 月生, 博士生导师, 发表学术论文近百篇

在红外区有较高的光谱能量分布,它比由含氧化剂与 Mg 燃烧产生的氧化物的生成热高得多^[2]:



此外,PTFE-Mg 燃烧还会产生出游离 C 粒,它有着很高的比辐射率。至于含氧化剂,以 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 为例,其反应式为:



其中, N_2 为同核分子,不产生红外辐射^[3],而 $\Delta H_{298}^{\text{BaO}} = -553.54 \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$,总热效应显然不及 PTFE-Mg。所以,含卤素 F 的无氧氧化剂 PTFE 比含氧化剂 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 的红外辐射强度高。因此,PTFE 是一种能获得高红外辐射强度的良好氧化剂。

3.2 质量燃烧率对辐射强度的影响

以表 1 中 7 号样品(即 PTFE-Mg)为试样药剂,将之压制成密度相同的 >23 、 >38 、 >51 、 >56 、 >67 、 >74 、 $>90 \text{mm}$ 的药柱,由于燃烧截面积不同而获得的质量燃烧率不同,试验结果如表 2 所示。表中质量燃烧率 $\dot{m} (\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$ 定义为 $\dot{m} = M/t$, M 为样品药柱的质量(g), t 为样品药柱燃烧时间(s),有效辐射率 $E_{\lambda_1-\lambda_2} (\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1})$ 定义为 $E_{\lambda_1-\lambda_2} = I_{\lambda_1-\lambda_2}/\dot{m}$ 。图 1 和图 2 分别为质量燃烧率 \dot{m} 与辐射强度 $I_{\lambda_1-\lambda_2}$ 和有效辐射率 $E_{\lambda_1-\lambda_2}$ 的关系曲线。

表 2 质量燃烧率对辐射强度的影响

Table 2 Influence of mass burning rate on radiant intensity

样品尺寸	\dot{m} / $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	$I_{\lambda_1-\lambda_2}/\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$		$E_{\lambda_1-\lambda_2}/\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$	
		$I_{3-5\mu\text{m}}$	$I_{8-14\mu\text{m}}$	$E_{3-5\mu\text{m}}$	$E_{8-14\mu\text{m}}$
>23	2.43	232	18	91	10.3
>38	7.00	233	105	104.7	15
>51	12.90	1662	266	128.8	20.6
>56	15.38	1992	390	129.5	23.4
>67	21.77	3164	658	145.3	30.2
>74	26.65	4133	753	155.1	28.3
>90	38.96	5985	1151	153.6	29.5

由图 1 可见,质量燃烧率与辐射强度呈线性(正比)关系。质量燃烧率对辐射强度的影响应该说是物理因素,它使得相应波段内有效辐射的质点数发生变化。提高质量燃烧率尽管能提高辐射强度,但从图 2 看出,质量燃烧率增大到一定程度时,有效辐射率不再

明显增大。这是因为有效辐射率 $E_{\lambda_1-\lambda_2}$ 是一种比光能,它是单位质量单位立体角内的辐射能。在燃烧反应条件一定的情况下,每克药剂的有效辐射质点数一定。因此,以提高质量燃烧率来获取更高辐射强度并不是一种经济的技术途径。

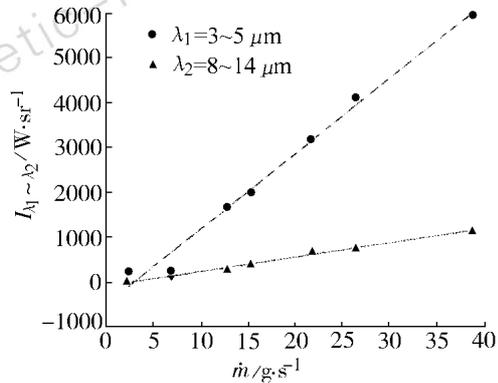


图 1 $\dot{m} - I_{\lambda_1-\lambda_2}$ 关系曲线

Fig. 1 $\dot{m} - I_{\lambda_1-\lambda_2}$ curves

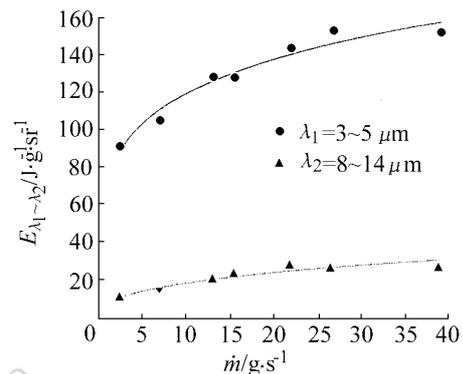


图 2 $\dot{m} - E_{\lambda_1-\lambda_2}$ 关系曲线

Fig. 2 $\dot{m} - E_{\lambda_1-\lambda_2}$ curves

3.3 燃烧温度对辐射强度的影响

以表 1 中 7 号样品(PTFE-Mg)为试样药剂,以惰性添加剂调节燃烧温度,试样药柱为 $>15 \text{mm}$,试验结果如图 3 所示。温度变化对 $I_{3-5\mu\text{m}}/I_{8-14\mu\text{m}}$ 比值的影响见表 3。

随着红外辐射烟火剂燃烧温度的升高,其红外辐射强度增大。这是因为温度升高,会使更多的辐射体分子或原子内电子获得能量进入激发态后再返回基态而辐射。由 Planck^[4] 绝对黑体的光谱辐射出射度方程 $M_{b\lambda} = C_1 \lambda^{-5} (\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1)^{-1}$ 和 Stepfen-Blotzmann^[4] 定律 $M_b = \sigma T^4$,亦知温度与辐射出射度呈指数关系。因此,

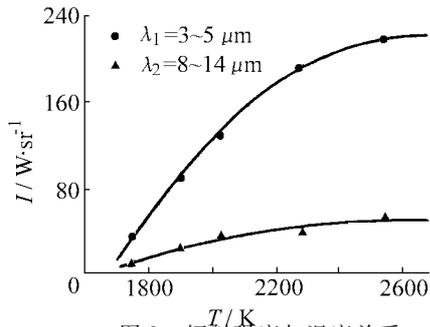


图 3 辐射强度与温度关系

Fig. 3 Radiant intensity versus temperatures

表 3 温度变化对 $I_{3\sim 5\mu\text{m}}/I_{8\sim 14\mu\text{m}}$ 比值的影响

Table 3 Relation between temperature and $I_{3\sim 5\mu\text{m}}/I_{8\sim 14\mu\text{m}}$

$T/^\circ\text{C}$	$I_{3\sim 5\mu\text{m}}/I_{8\sim 14\mu\text{m}}$	$T/^\circ\text{C}$	$I_{3\sim 5\mu\text{m}}/I_{8\sim 14\mu\text{m}}$
1550	3.15	2100	4.90
1700	3.80	2190	4.94
1790	4.28	2356	7.37
1830	4.40		

燃烧温度的很小变化亦带来辐射强度的很大变化。但必须注意, T 升高时, I 上升幅度与波长 λ 相关。图 3 表明 T 升高, $I_{3\sim 5\mu\text{m}}$ 上升快, 而 $I_{8\sim 14\mu\text{m}}$ 则缓慢。这可由图 4 绝对黑体的光谱辐射出射度曲线来解释: 温度升高时辐射出射度的峰值总是移向短波方向, 而温度降低时辐射出射度的峰值移向长波方向。表 3 的结果表明 T 升高 $I_{3\sim 5\mu\text{m}}/I_{8\sim 14\mu\text{m}}$ 比值增大, 这也说明 T 升高时, 波长短的 ($3\sim 5\mu\text{m}$) 较波长长的 ($8\sim 14\mu\text{m}$) 辐射强度上升幅度要大。由此也说明升高温度能显著提高

近、中红外 ($1\sim 3\mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\mu\text{m}$) 的辐射强度, 而对远红外 ($8\sim 14\mu\text{m}$) 辐射强度的提高则不明显。

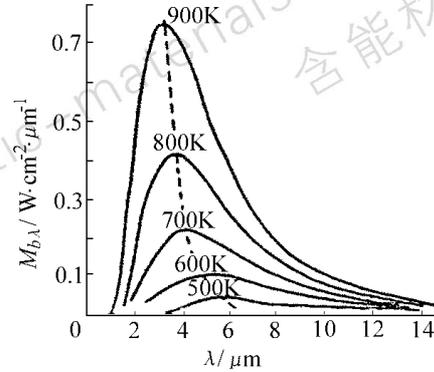


图 4 绝对黑体的光谱辐射出射度曲线

Fig. 4 Radiant exitance curves of ideal blackbody

参 考 文 献

[1] Nadler M P. Examination of the variation of infrared flare energy with grain configuration and binder[C]. Proceeding of the 9th Symposium on Explosives and Pyrotechnics, Pennsylvania; Franklin Institute Research Labs. Sept., 1976.

[2] 梁英教, 车萌昌. 无机物力学数据手册[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993.

[3] 陈衡. 红外物理学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.

[4] 刘景生. 红外物理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.

Factors Influencing on the Radiant Intensity of Infrared Radiation Pyrotechnics

PAN Gong-pei, ZHU Chang-jiang, WANG Xue, LI Yi

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The effect of oxidizer, mass burning rate and combustion temperature on the radiant intensity (RI) of infrared radiation pyrotechnics were experimentally investigated in the specific wavelength of $3\sim 5\mu\text{m}$ and $8\sim 14\mu\text{m}$ regions. The results show that PTFE (Polytetrafluoroethylene) is an excellent oxidizer having a high RI, the increase of RI is directly proportional to mass burning rate, the increase rate of RI in the range of $3\sim 5\mu\text{m}$ is higher than those of $8\sim 14\mu\text{m}$ with the rise of temperature.

Key words: infrared radiation; mass burning rate; oxidizer; pyrotechnics; radiant intensity