

硅酸锆对 $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}$ 红外诱饵剂 远红外辐射性能影响*

王冰¹⁾²⁾ 陈宗胜²⁾ 时家明^{2)†} 许河秀^{1)‡}

1) (空军工程大学防空反导学院, 西安 710051)

2) (国防科技大学, 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230031)

(2024 年 7 月 29 日收到; 2025 年 1 月 3 日收到修改稿)

传统镁/聚四氟乙烯 (Mg/PTFE) 红外诱饵剂被广泛应用于对抗红外制导武器, 但随着红外制导技术发展, 其长波红外辐射不足、燃烧温度过高等缺点令其难以对抗新型红外制导弹药. 针对这一问题, 提出了采用硅酸锆 (ZrSiO_4) 作为添加剂来提高传统诱饵剂红外辐射的方法. 以四氧化三铅/镁粉/聚四氟乙烯 ($\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}$) 红外诱饵剂作为基础配方, 设计了 7 种配方, 通过实验研究了不同 ZrSiO_4 添加量对 $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}$ 红外诱饵剂效能的影响. 首先测试了基础配方 (ZrSiO_4 添加量为 0) 和 12% ZrSiO_4 添加量配方的热分解性能, 然后用 7.5—14 μm 远红外热像仪测量了压制成药柱样品的燃烧过程, 并计算出每个样品的燃烧时间、燃烧温度、质量燃速、辐射面积、远红外辐射亮度和辐射强度. 结果表明: 添加 ZrSiO_4 后, 混合红外诱饵剂反应放热峰值减小, 热效应变差; 随着 ZrSiO_4 添加量增大, 样品燃烧时间持续变长, 燃烧温度持续降低. 当 ZrSiO_4 添加比例为 18% 时, 样品反应时间最长达 3.73 s, 燃烧温度最低达 765.46 $^{\circ}\text{C}$; 远红外辐射亮度和辐射强度均随着 ZrSiO_4 添加比例升高先增大后减小, 且当 ZrSiO_4 添加比例为 6% 时分别达到最大值 2461 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$ 和 142 W/sr ; 当 ZrSiO_4 添加比例在 18% 以内和 9% 以内时分别对基础配方的远红外辐射亮度和辐射强度有提升作用.

关键词: 红外诱饵剂, 热分解性能, 导温系数, 辐射强度

PACS: 44.40.+a, 42.70.Km, 82.33.Vx

DOI: 10.7498/aps.74.20241048

CSTR: 32037.14.aps.74.20241048

1 引言

红外制导武器能够对目标实施全方位、多角度精确打击, 已成为战争中进攻利器, 发挥着至关重要的作用. 红外诱饵剂作为对抗红外制导武器主要手段, 被广泛应用于保护装备免受敌方红外制导弹药精确打击^[1-2]. 然而随着科技不断进步, 红外制导弹药对目标和红外诱饵剂的辨识能力也在不断提高, 传统镁/聚四氟乙烯 (Mg/PTFE) 红外诱饵剂存在燃烧温度过高以及长波红外辐射不足等缺点, 令其难以对抗新型红外制导弹药. 因此, 对传统红

外诱饵剂进行改进成为当前研究的热点^[3-6]. Elbassuny 等^[7]将石墨和三氧化二铁 (Fe_2O_3) 纳米颗粒添加到聚四氟乙烯/镁铝合金/氟橡胶配方中进行改进, 通过实验发现当添加 2% 的 Fe_2O_3 纳米颗粒和 6% 的石墨时, 改进配方光谱辐射性能表现较好. 金青君等^[8]利用 $\alpha\beta$ 合金作为添加剂对传统 Mg/PTFE 红外诱饵剂进行改进, 通过理论计算和实验研究发现, 随 $\alpha\beta$ 合金含量增大, 产物中氟化镁 (MgF_2) 质量比例逐渐减小而辐射强度的主要贡献源 $\beta\text{-F}$ 和 $\alpha\text{-C}$ 质量比例逐渐增大, 从而导致混合诱饵剂辐射强度不断提高, 其中 $\alpha\text{-C}$ 最高质量比例接近 50%. 胡亚鹏等^[9]将四氯化钛添加进传

* 国防预研基金 (批准号: HJJ2017-0671) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shijiaming17@nudt.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: hxxuellen@gmail.com

统 Mg/PTFE 红外诱饵剂中, 经过一系列工序将混合配方制成薄片型红外诱饵材料后进行实验测试, 结果表明该材料平均燃烧温度达到 855 °C, 单条该型薄片远红外辐射强度达到 158 W/sr. 杨谦^[10]在烟火药薄膜中添加乌洛托品、氧化铁、硝化棉、石墨、硼等 5 种添加剂后经实验研究发现, 添加 15% 的硼粉使原始药剂中远红外辐射能量、燃烧温度、燃速分别提升 144 J/(sr·g), 84 J/(sr·g), 220 °C, 0.21 g/s, 对药剂 4 项性能的提升作用最明显.

根据红外辐射原理, 物体发射率越高, 其辐射越强^[11]. 红外诱饵剂燃烧过程中会发生一系列复杂化学反应, 燃烧产生火焰由多种状态反应产物组成^[12], 其中固态或液态产物 (即凝聚相产物) 对红外辐射贡献最大^[11]. 因此, 为提高红外诱饵剂远红外波段的辐射, 可以在红外诱饵剂反应剩余物中增加远红外波段具有高发射率且反应温度下为凝聚相的物质. 增加方式包括两种: 第一种是向红外诱饵剂中添加不参与反应的添加剂, 使该添加剂在红外诱饵剂反应过程中被加热至高温, 并在远红外波段贡献辐射, 这种方式要求该添加剂自身具有高远红外发射率和较高熔点; 第二种是向红外诱饵剂中添加能参与反应的添加剂, 且反应后生成高远红外发射率产物, 使生成产物在远红外波段贡献辐射, 这种方式要求该添加剂能够和红外诱饵剂反应生成具有高远红外发射率和较高熔点产物. ZrSiO₄ 在远红外波段发射率达到 0.82—0.99^[13], 这表明其有助于提高红外诱饵剂远红外波段的辐射, 同时 ZrSiO₄ 具有 2800 °C 的高熔点, 且不会与 Pb₃O₄, Mg 和 PTFE 发生反应, 因此 ZrSiO₄ 符合上述第一种通过添加剂提高远红外波段辐射的方式, 结合前文研究^[14], 引入 Pb₃O₄ 后对 Mg/PTFE 红外诱饵剂产生正向影响, 且质量比 $m(\text{Mg}): m(\text{PTFE}): m(\text{Pb}_3\text{O}_4)=10:3:7$ 时综合效果最佳, 适合作为基础配方继续进行研究. 所以本文采用 ZrSiO₄ 作为添加剂, 并以质量比 $m(\text{Mg}): m(\text{PTFE}): m(\text{Pb}_3\text{O}_4)=10:3:7$ 的 Pb₃O₄/Mg/PTFE 红外诱饵剂作为基础配方, 通过改变 ZrSiO₄ 添加量设计了 7 种配方, 制备了混合红外诱饵剂药柱样品, 通过实验研究了 ZrSiO₄ 对 Pb₃O₄/Mg/PTFE 红外诱饵剂效能影响.

2 实验

2.1 实验试剂与仪器

实验试剂包括 ZrSiO₄ 粉、Mg 粉、Pb₃O₄ 粉、

PTFE 粉. 药剂称重选用上海奔普仪器科技有限公司生产的电子天平, 精度为 0.01 g; 药柱样品制作选用天津天光光学仪器有限公司的 HY-12 型红外压片机和直径 30 mm 圆柱型模具, 压片机压力设置为 15 MPa; 热分解性能测试选用美国 TA 有限公司生产的 SDT-Q600 同步热分析仪, 天平灵敏度为 0.1 μg, 温度范围为室温至 1500 °C, 设置加热速率 20.0 °C/min, 测试气体环境为空气; 远红外辐射测量选用德国 InfraTec 有限公司生产的 VarioCAMHD875sl 红外热像仪, 拍摄频率为 30 f/s, 光谱范围为 7.5—14 μm.

2.2 实验过程

2.2.1 样品制备

本实验采用质量比为 $m(\text{Mg}): m(\text{PTFE}): m(\text{Pb}_3\text{O}_4) = 10:3:7$ 的 Pb₃O₄/Mg/PTFE 红外诱饵剂作为基础配方^[14], 通过改变 ZrSiO₄ 添加量设计了 7 种配方, 具体配方如表 1 所示. 每种配方制作 2 个质量为 16 g 的药柱样品, 制作步骤有: 1) 称重 (按照设计配方计算并称取相应质量试剂粉末); 2) 混合 (将各种试剂人工混合均匀); 3) 压片 (将混合红外诱饵剂粉末放入模具中, 并用红外压片机进行压片, 保压时间 20 s); 4) 退模 (退模取出药柱样品). 按照该方法共制作 14 个药柱样品进行实验, 并取每种配方 2 个样品实验结果的平均值作为该种配方实验结果.

表 1 7 种不同 ZrSiO₄ 添加量混合红外诱饵剂配方成分比例

Table 1. Compositional ratios of 7 types of composite infrared decoys with varied ZrSiO₄.

Formula	$m(\text{Pb}_3\text{O}_4)/\%$	$m(\text{Mg})/\%$	$m(\text{PTFE})/\%$	$m(\text{ZrSiO}_4)/\%$
1	35	50	15	0
2	33.95	48.5	14.55	3
3	32.9	47	14.1	6
4	31.85	45.5	13.65	9
5	30.8	44	13.2	12
6	29.75	42.5	12.75	15
7	28.7	41	12.3	18

制作过程存在一定损耗, 因此制作成的药柱样品实际质量可能少于设计质量 16 g. 表 2 列出了 14 个不同 ZrSiO₄ 添加量混合红外诱饵剂药柱样品实际质量和高度, 图 1 所示为 14 个不同 ZrSiO₄ 添加量混合红外诱饵剂药柱样品实物.

表 2 14 个不同 ZrSiO_4 添加量混合红外诱饵剂药柱样品质量和高度
Table 2. Weight and height of 14 samples of composite infrared decoys with varied ZrSiO_4 .

Formula	I		II		Average	
	Weight/g	Height/mm	Weight/g	Height/mm	Weight/g	Height/mm
1	15.99	12.97	15.98	13.01	15.99	12.99
2	15.99	12.96	15.98	12.90	15.99	12.93
3	15.99	12.95	15.99	12.85	15.99	12.90
4	15.96	12.84	15.96	12.83	15.96	12.84
5	15.97	12.61	15.97	12.75	15.97	12.68
6	15.99	12.53	15.95	12.74	15.97	12.64
7	15.98	12.45	15.98	12.41	15.98	12.43



图 1 14 个不同 ZrSiO_4 添加量混合红外诱饵剂药柱样品实物图

Fig. 1. Photograph of 14 samples of composite infrared decoys with varied ZrSiO_4 .

2.2.2 燃烧实验

红外诱饵剂燃烧测试实验在室外进行, 环境温度为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, 实验场景设置如图 2 所示, 其中实验样品放置于红外热像仪正前方 8 m 处. 将 14 个不同 ZrSiO_4 添加量混合红外诱饵剂药柱样品按序号依次点燃, 使用红外热像仪记录每个药柱样品完整燃烧过程, 并用配套软件 IRBIS3 将数据和红外图像进行处理.

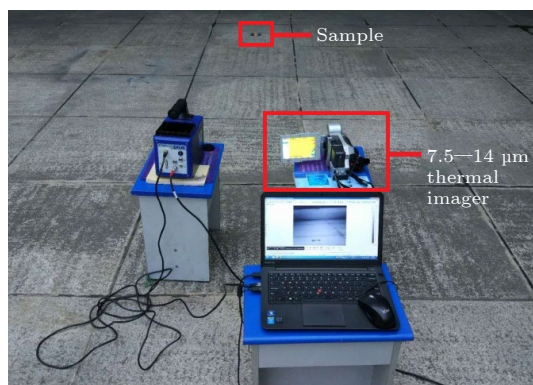


图 2 药柱样品燃烧实验及测试场景

Fig. 2. Experimental setup and testing scenarios for combustion of samples.

3 结果与讨论

3.1 添加硅酸锆对混合红外诱饵剂热分解性能的影响

为研究添加 ZrSiO_4 对 $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}$ 红外诱饵剂热分解性能的影响, 利用 SDT-Q600 型同步热分析仪分别测试了 1 号配方 (基础配方) 和 5 号配方 (ZrSiO_4 添加比例为 12% 配方) 热分解过程, 测试所得的热分解性能图 (即 TG-DSC 图) 如图 3 和图 4 所示.

图 3 所示为 1 号配方 (即基础配方) TG-DSC 图, 其中棕色曲线代表 DSC 曲线 (即 HeatFlow 曲线, 反映热量变化), 绿色曲线代表 TG 曲线 (即 Weight 曲线, 反映质量变化), 蓝色曲线代表 DTG 曲线 (表示质量变化率). 根据 DTG 曲线分析, 样品在升温过程中出现了 5 个质量变化较大的反应过程. 从温度轴开始观察, 在 $320.30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, DTG 曲线上出现了第 1 个峰 (正向), DSC 曲线呈现出一个微小吸热峰, 该过程是 PTFE 熔化过程; 从 $441.68\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $550.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 在 DTG 曲线上出现第 2 个峰 (正向), 对应 TG 曲线迅速下降, 显示失重率为 10.84%. 在这一过程中, DSC 曲线呈现出一个放热峰, 其起始温度为 $466.87\text{ }^{\circ}\text{C}$, 峰温为 $519.84\text{ }^{\circ}\text{C}$. 综合以上现象判断该过程是 PTFE 聚合物连接键 (C—C 键) 断裂并分解生成 C_2F_4 过程 (在空气气氛中, PTFE 解聚为放热反应; 而在惰性气体气氛中, 则为吸热反应^[15]. 本实验所用气体环境为空气, 因此 PTFE 解聚过程属于放热反应); 从 $550.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $595.64\text{ }^{\circ}\text{C}$ 在 DTG 曲线上出现了第 3 个峰 (正向), 其峰值小于第 2 个, 表明该过程失重速率小于第 2 个过程. 对应 TG 曲线显示失重率为 2.38%. 当温度高于 $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, Pb_3O_4 开始分解为氧化铅 (PbO) 和氧气 (O_2), 为吸热反应. 而在该阶段仍存在部分 PTFE 未完成分解, 所以, 该阶段在进行 Pb_3O_4 和

PTFE 这两种物质的分解, 两个分解反应热量中和导致该过程对应 DSC 曲线呈稳定状态; 从 595.64—680.86 °C 在 DTG 曲线上出现第 4 个峰 (正向), 其峰值小于第 3 个峰值, 即失重速率比第 3 个过程小, 表明 PTFE 已经完全分解, 仅有未分解完的 Pb_3O_4 在发生分解失重. 对应 TG 曲线显示该过程失重率为 3.06%. 对应 DSC 曲线上, 从 644.78 °C 开始出现一个较大吸热峰, 峰温为 651.8 °C, 主要是由 Mg 熔化吸热引起 (Mg 熔点为 648 °C, 而图中所得 Mg 熔点为 644.78 °C, 测试误差为 0.4%), 同时 Pb_3O_4 分解吸热也对该吸热峰有部分贡献; 从 680.86—1012.40 °C 在 DTG 曲线上出现第 5 个峰 (负向), 对应 TG 曲线迅速上升, 显示该过程样品质量增加 38.02%, 该过程结束后, 样品最终质量超过初始质量. 同时, 在 DSC 曲线上出现了一个较大放热峰, 峰温为 888.90 °C, 放热量较多. 综合分析认为此处进行的是红外诱饵剂中的 Mg 与氧化剂以及空气氛围中 O_2 发生反应^[14], 反应比较剧烈, 放热效果明显. 增重主要是因为 Mg 和空气中 O_2 反应生成了 MgO 等固体.

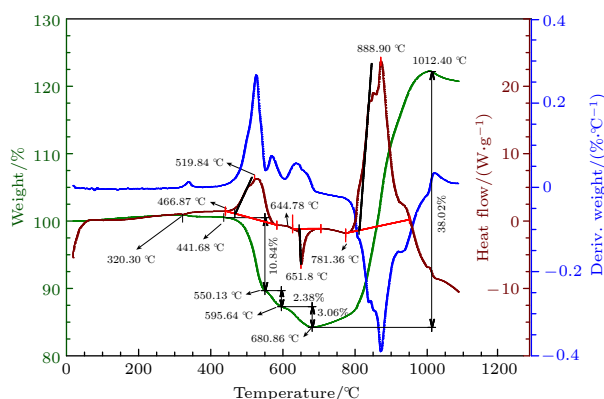


图 3 $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}$ 红外诱饵剂基础配方 TG-DSC 曲线
Fig. 3. TG-DSC curve of basic formula of $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}$ composite infrared decoy.

图 4 所示为 5 号配方 (即添加 ZrSiO_4 比例为 12% 配方) TG-DSC 图, 与图 3 进行对比发现, 添加 ZrSiO_4 后, 温度低于 700 °C 时, 反应物物态变化温度、失重阶段和失重比例与基础配方基本一致. 然而当温度高于 700 °C 以后, 反应放热峰变为两个, 峰温分别位于 861.27 °C 和 941.49 °C, 且这两个峰型和峰值基本一致, 与基础配方只有一个反应放热峰不同. 但两个反应放热峰峰值相较于基础配方有所减小, 主要是因为 ZrSiO_4 不参加反应导致混合红外诱饵剂中能够反应的成分含量降低, 单

位质量药剂反应放热减小, 热效应变差. 同时, ZrSiO_4 需要吸收部分基础配方反应产生的热量, 因此可以推断, 添加 ZrSiO_4 可能会降低反应温度.

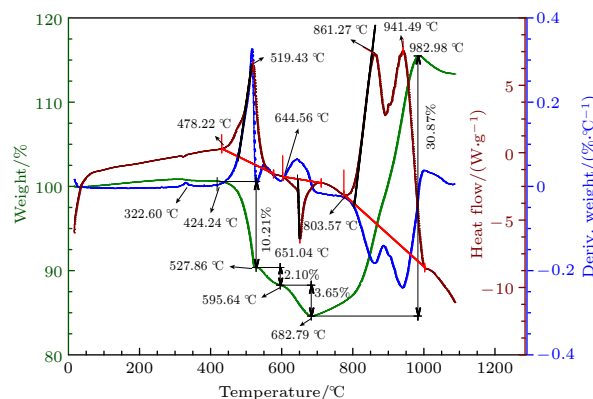


图 4 ZrSiO_4 添加量为 12% 时 $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}/\text{ZrSiO}_4$ 混合红外诱饵剂 TG-DSC 曲线
Fig. 4. TG-DSC curve of $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}/\text{ZrSiO}_4$ composite infrared decoy with 12% addition of ZrSiO_4 .

对 1 号 (即基础配方) 和 5 号配方 (即添加 ZrSiO_4 比例为 12% 配方) 测试反应剩余物进行 X 射线衍射 (XRD) 测试, 图 5 所示为得出的反应剩余物 XRD 测试图, 由图 5 可知, 1 号和 5 号配方的反应剩余物中均检出 C, Mg, MgO, MgF_2 , Pb, PbO , Li_2MgCd 等物质, 其中 C, MgO, MgF_2 , Pb 为混合红外诱饵反应产物^[15], PbO 为 Pb_3O_4 分解产生, Mg 均为未完全参与反应的剩余物, Li_2MgCd 为所用 Mg 粉中存在的少量杂质, 因为实际应用中

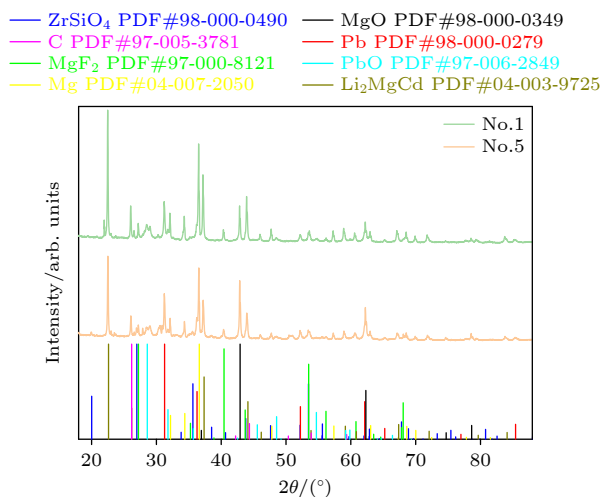


图 5 $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}$ 红外诱饵剂基础配方 (1 号配方) 和 ZrSiO_4 添加量为 12% 配方 (5 号配方) 的 XRD 测试图
Fig. 5. XRD curve of basic formula of $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}$ composite infrared decoy (No.1) and $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}/\text{ZrSiO}_4$ composite infrared decoy with 12% addition of ZrSiO_4 (No.5).

要考虑到成本因素, 故所使用的 Mg 粉纯度未达到最高, 其中存在少量 Li_2MgCd 杂质. 同时, 5 号配方中检出 ZrSiO_4 , 而 1 号配方中无相应波峰即未检出 ZrSiO_4 .

3.2 硅酸锆添加量对混合红外诱饵剂燃烧特性的影响

对药柱样品燃烧实验红外图像进行处理, 得出 7 种不同 ZrSiO_4 添加量混合红外诱饵剂配方燃烧时间、燃烧温度和质量燃速数据, 具体结果见表 3. 图 6 所示为 7 种不同 ZrSiO_4 添加量混合红外诱饵剂配方反应温度.

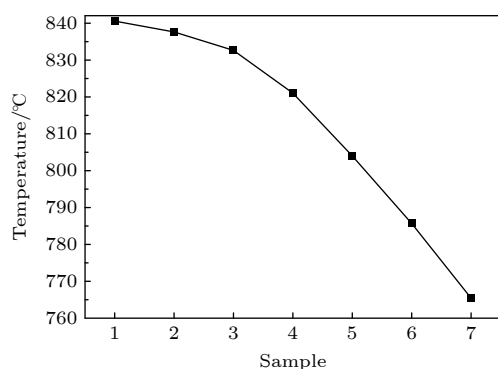


图 6 7 种不同 ZrSiO_4 添加量混合红外诱饵剂配方反应温度

Fig. 6. Combustion temperature of 7 types of composite infrared decoys with varied ZrSiO_4 .

根据图 6 显示, 随着 ZrSiO_4 添加比例升高, 样品反应温度持续降低, 当添加比例小于 18% 时, 反应温度均低于基础配方. 这是因为 ZrSiO_4 不参与基础配方的反应, 并且其添加方式为等质量替代基础配方. 由于基础配方在反应中产生热量, 在 ZrSiO_4 含量增大的过程中, 基础配方比例减小, 从

而产生热量也减小. 同时, ZrSiO_4 需要吸收热量以提升自身温度, 又消耗部分药剂产生的热量. 因此, 从 1 号到 7 号配方, 随着 ZrSiO_4 添加比例升高, 混合红外诱饵剂产生热量不断减小, 导致反应温度持续降低.

图 7 所示为 7 种混合红外诱饵剂配方燃烧时间和质量燃速图, 分析图中数据变化规律可知, 随着 ZrSiO_4 添加比例升高 (1 号—7 号配方), 样品燃烧时间持续增加, 质量燃速持续减小, 主要受导热系数影响 [14,16]. 导热系数越大, 热量传导越快, 而药柱样品燃烧是粒状扩散燃烧, 属于层状燃烧 [17], 燃烧第 1 步是反应物由固态融化气化变为可反应状态, 这也是最重要一步, 热量传导越快, 未反应区越快过渡为反应区, 反应进程就越快.

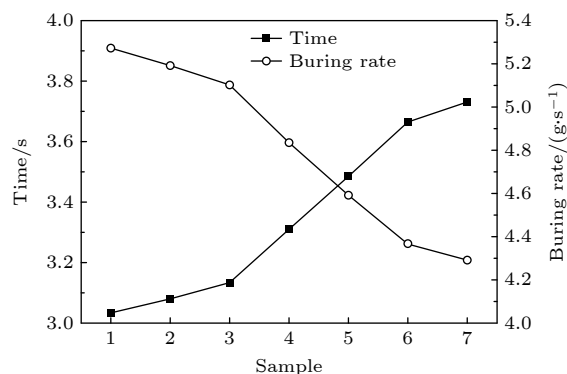


图 7 7 种不同 ZrSiO_4 添加量混合红外诱饵剂配方燃烧时间和质量燃速

Fig. 7. Combustion time and burning rate of 7 types of composite infrared decoys with varied ZrSiO_4 .

可采用最简单的模型 (即把 Pb_3O_4 , Mg, PTFE, ZrSiO_4 这 4 种物质的混合物看作沿热流传递方向串联排列) 来计算 $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}/\text{ZrSiO}_4$ 混合红外诱饵剂导热系数 [18], 则其导热系数:

表 3 7 种不同 ZrSiO_4 添加量混合红外诱饵剂配方燃烧时间、温度和燃速

Table 3. Combustion time, temperature, and burning rate of 7 types of composite infrared decoys with varied ZrSiO_4 .

Formula	I			II			Average		
	$T/^\circ\text{C}$	Combustion time/s	Burning rate/(g·s ⁻¹)	$T/^\circ\text{C}$	Combustion time/s	Burning rate/(g·s ⁻¹)	$T/^\circ\text{C}$	Combustion time/s	Burning rate/(g·s ⁻¹)
1	857.00	3.01	5.32	823.90	3.06	5.23	840.50	3.03	5.27
2	822.58	3.09	5.18	852.19	3.07	5.21	837.39	3.08	5.19
3	830.89	3.16	5.06	834.05	3.11	5.14	832.47	3.14	5.10
4	817.44	3.37	4.75	824.39	3.25	4.92	820.91	3.31	4.84
5	809.42	3.44	4.65	798.71	3.53	4.53	804.06	3.49	4.59
6	782.70	3.71	4.31	788.54	3.62	4.42	785.62	3.67	4.37
7	761.32	3.77	4.24	769.59	3.69	4.34	765.46	3.73	4.29

$$\begin{aligned} \lambda = & \lambda_{\text{Pb}_3\text{O}_4} \lambda_{\text{Mg}} \lambda_{\text{PTFE}} \lambda_{\text{ZrSiO}_4} / (\Phi_{\text{Pb}_3\text{O}_4} \lambda_{\text{Mg}} \lambda_{\text{PTFE}} \lambda_{\text{ZrSiO}_4} \\ & + \Phi_{\text{Mg}} \lambda_{\text{Pb}_3\text{O}_4} \lambda_{\text{PTFE}} \lambda_{\text{ZrSiO}_4} \\ & + \Phi_{\text{PTFE}} \lambda_{\text{Pb}_3\text{O}_4} \lambda_{\text{Mg}} \lambda_{\text{ZrSiO}_4} \\ & + \Phi_{\text{ZrSiO}_4} \lambda_{\text{Pb}_3\text{O}_4} \lambda_{\text{Mg}} \lambda_{\text{PTFE}}), \end{aligned} \quad (1)$$

比热容为

$$\begin{aligned} c = & \zeta_{\text{Pb}_3\text{O}_4} c_{\text{Pb}_3\text{O}_4} + \zeta_{\text{Mg}} c_{\text{Mg}} + \zeta_{\text{PTFE}} c_{\text{PTFE}} \\ & + \zeta_{\text{ZrSiO}_4} c_{\text{ZrSiO}_4}, \end{aligned} \quad (2)$$

导热系数为

$$\alpha = \lambda / (\rho c). \quad (3)$$

(1) 式—(3) 式中, Φ 为体积分数, ζ 为质量分数, ρ 为密度; Pb_3O_4 , Mg, PTFE 和 ZrSiO_4 物理性质^[19,20] 如表 4 所示.

图 8 所示为计算所得 7 种不同 ZrSiO_4 添加量混合红外诱饵剂配方的导热系数. 由图 8 可知, 随着 ZrSiO_4 添加量增大 (1 号—7 号配方), 导热系数持续减小, 因此 1 号—7 号配方质量燃速也持续减小, 和导热系数变化趋势一致, 这表明添加 ZrSiO_4 可以延长混合红外诱饵剂作用时间.

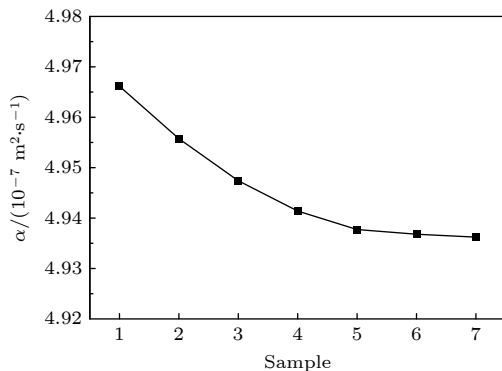


图 8 7 种不同 ZrSiO_4 添加量混合红外诱饵剂配方导热系数
Fig. 8. Thermal Diffusivity of 7 types of composite infrared decoys with varied ZrSiO_4 .

表 4 Pb_3O_4 , Mg, PTFE 和 ZrSiO_4 物理性质
Table 4. Physical properties of Pb_3O_4 , Mg, PTFE, and ZrSiO_4 .

Material	$\lambda / (\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
Mg	165.1	1000	1745
PTFE	0.24	1050	2150
Pb_3O_4	0.288	226	9100
ZrSiO_4	5.1	800	4560

3.3 硅酸锆添加量对混合红外诱饵剂红外辐射特性的影响

对药柱样品燃烧实验红外图像进行处理, 并计算出辐射面积 (S) 和辐射亮度 (L) 的数值 (图像中温度超过 400°C 范围内), 根据辐射强度 $I = L \cdot S$ ^[11], 算出辐射强度 I . 图 9 所示为 7 种不同 ZrSiO_4 添加量混合红外诱饵剂配方远红外辐射强度最大时红外热像图. 表 5 为根据热像仪所拍摄图像计算得出的 7 种混合红外诱饵剂配方红外辐射特性表.

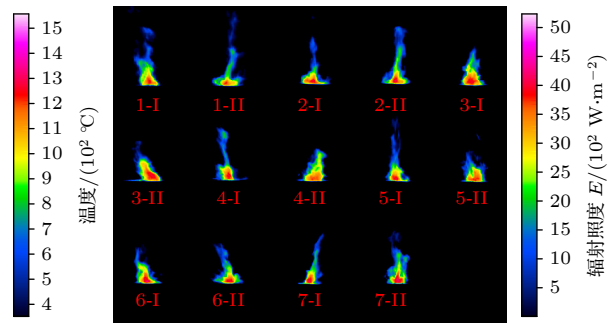


图 9 7 种不同 ZrSiO_4 添加量混合红外诱饵剂配方燃烧红外热像图
Fig. 9. Infrared thermal image of 7 types of composite infrared decoys with varied ZrSiO_4 .

图 10 所示为 7 种混合红外诱饵剂配方远红外辐射特性, 分析图中数据变化规律可知, 药柱样品远红外辐射亮度和辐射强度随着 ZrSiO_4 添加量

表 5 7 种不同 ZrSiO_4 添加量混合红外诱饵剂配方辐射特性

Table 5. Radiation characteristics of 7 types of composite infrared decoys with varied ZrSiO_4 .

Formula	I			II			Average		
	Radiance/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)	Radiation area/ mm^2	Radiation intensity/ ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$)	Radiance/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)	Radiation area/ mm^2	Radiation intensity/ ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$)	Radiance/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)	Radiation area/ mm^2	Radiation intensity/ ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$)
1	2134	54957	117	2071	46744	97	2103	50851	107
2	2067	50508	104	2329	51714	120	2198	51111	112
3	2452	59449	146	2470	55706	138	2461	57577	142
4	2240	43043	96	2410	59574	144	2325	51308	120
5	2317	41358	96	2277	40256	92	2297	40807	94
6	2256	39882	90	2290	39050	89	2273	39466	90
7	2228	38302	85	2248	36888	82	2238	37595	84

增大均先增大, 且当 ZrSiO_4 添加比例为 6% 时, 达到最大值 2461 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$ 和 142 W/sr . 然后随着 ZrSiO_4 添加量继续增大, 而药柱样品辐射亮度和辐射强度均开始减小, 且当 ZrSiO_4 添加比例为 18% 以内和 9% 以内时, 药柱样品辐射亮度和辐射强度均大于基础配方.

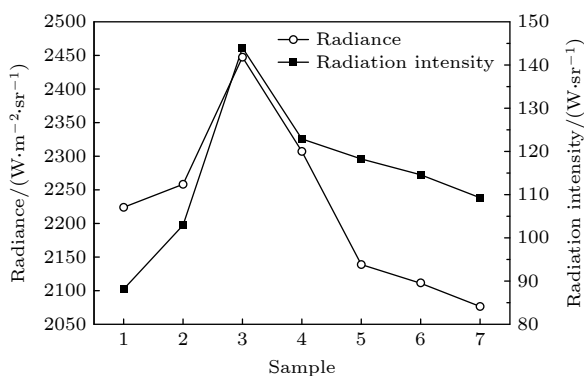


图 10 7 种不同 ZrSiO_4 添加量混合红外诱饵剂配方辐射特性
Fig. 10. Radiation characteristics of 7 types of composite infrared decoys with varied ZrSiO_4 .

根据前文研究^[14], $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}$ 红外诱饵剂主要由 Mg 与 Pb_3O_4 , PTFE 反应生成 C, MgO , Pb 和 MgF_2 来贡献辐射, 其中 C 因红外发射率较高而为辐射主要贡献源. 由 ZrSiO_4 光谱发射率数据可知^[13], 其在远红外波段内发射率大于 MgO (0.15—0.45), Pb (0.05) 和 MgF_2 (0.72), 并且接近于 C 发射率值 (0.85—0.9). 2 号样品辐射亮度比 1 号样品大, 可以从反应产物和反应温度两个方面进行分析. 在反应产物方面: 由表 1 可知, 2 号样品和 1 号样品区别是质量比例 3% 基础配方被等质量替换为 ZrSiO_4 , 对被替换这部分基础配方进行平衡产理论计算, 可得其原本参与反应能生成质量比例为 3% 的产物, C 只占其中一部分, 另外部分为 MgO , Pb, MgF_2 等, 而被 ZrSiO_4 替换后, 由于 ZrSiO_4 不参与反应, 产物中变为质量比例为 3% 的 ZrSiO_4 , 远多于质量比例 3% 基础配方参与反应生成 C 的量, 尽管 ZrSiO_4 发射率略低于 C, 但由于 ZrSiO_4 量多, 所以用 ZrSiO_4 替换基础配方导致产物的改变对辐射具有提升作用. 在反应温度方面: 2 号配方反应温度虽然有所下降, 但下降幅度并不明显, 因此温度下降对辐射的减小作用没有产物改变对辐射的提升作用大, 从而导致最终 2 号配方远红外辐射亮度增大. 同理, 3 号配方远红外辐射亮度继续增大. 3 号以后, 由于基础配方比例减

小导致产物中由基础配方生成的 C 等固体物质继续减少, 而 ZrSiO_4 含量则继续增大, 然而根据表 3 所示, 温度降低幅度变大, 这导致温度下降对辐射的减小作用比产物改变对辐射的提升作用大, 因此, 远红外辐射亮度开始不断减小, 即 4 号到 7 号样品远红外辐射亮度呈减小趋势, 不过降低幅度相对平缓, 并且始终高于基础配方远红外辐射亮度, 这表明添加 ZrSiO_4 比例在 18% 以内均能提升基础配方远红外辐射亮度.

远红外辐射强度变化趋势和辐射亮度基本一致, 但只有 ZrSiO_4 添加比例小于 9% 时辐射强度比基础配方有所增强.

4 结 论

经过对 7 种不同 ZrSiO_4 添加量混合红外诱饵剂配方实验数据分析发现, 添加 ZrSiO_4 后, 样品热分解过程放热峰值变小, 热效应变差. 随着 ZrSiO_4 添加比例升高, 样品燃烧温度持续降低, 均低于基础配方; 质量燃速也逐渐减小, 从而使燃烧时间延长. 远红外辐射性能则受反应温度和反应后剩余物影响, 当 ZrSiO_4 添加比例为 18% 以内和 9% 以内时分别对基础配方远红外辐射亮度和辐射强度有提升作用, 且当 ZrSiO_4 添加比例为 6% 时, 样品远红外辐射亮度和强度均达到最大值. 因此, 添加 ZrSiO_4 比例为 6% 时, 对 $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}$ 红外诱饵剂远红外辐射性能提升最显著, 同时燃烧温度有所降低, 对作用时间也有所延长, 经综合考虑较适合作为 $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}$ 红外诱饵剂改进配方.

参考文献

- [1] Shao X G 2019 *Guidance Fuze* **40** 020012 (in Chinese) [邵晓光 2019 制导与引信 **40** 020012]
- [2] Lu X, Liang X G, Jia X H 2021 *Infrared Laser Eng.* **50** 29 (in Chinese) [卢晓, 梁晓庚, 贾晓洪 2021 红外与激光工程 **50** 29]
- [3] Zhou Z N 2017 *Fundermental of Electro-optical Countermeasure Materials* (Beijing: Beijing Institute of Technology Press) (in Chinese) [周遵宁 2017 光电对抗材料基础 (北京: 北京理工大学出版社)]
- [4] Li Z J, Li Z Y, Zhan M M, Zhang B, Yao K, Li Q Y, Zhang D H 2024 *J. Solid Rocket Technol.* **47** 15 (in Chinese) [李泽军, 李志勇, 占明明, 张波, 姚鲲鹏, 李秋怡, 张定宏 2024 固体火箭技术 **47** 15]
- [5] Zhao L, Ju X Z 2019 *Aerospace Electron. Warfare* **35** 50 (in Chinese) [赵亮, 巨秀芝 2019 航天电子对抗 **35** 50]
- [6] Ye S Q, Zhu C G, Lin H X, Ouyang D H, Pan G P 2017 *Infrared Laser Eng.* **46** 90 (in Chinese) [叶淑琴, 朱晨光, 林红雪, 欧阳的华, 潘功配 2017 红外与激光工程 **46** 90]

- [7] Elbasuney S, Elmotaz A A, Sadek M A 2020 *J. Mater. Sci. Mater. El.* **31** 6130
- [8] Jin Q J, Wu Y, Shi H X, Ren X J, Zhao J F 2020 *Initiators Pyrotechn.* **3** 41 (in Chinese) [金青君, 吴昱, 史红星, 任秀娟, 赵建锋 2020 *火工品* **3** 41]
- [9] Hu Y P, Wang H, Nie X H, Sun H T, Jiang J Z, Guo P H, Qiang W X 2023 *Initiators Pyrotechn.* **5** 34 (in Chinese) [胡亚鹏, 王虎, 聂学辉, 孙宏涛, 姜建增, 郭鹏宏, 强文学 2023 *火工品* **5** 34]
- [10] Yang Q 2021 *M. S. Thesis* (Nanjing: Nanjing University of Science & Technology) (in Chinese) [杨谦 2021 硕士学位论文 (南京: 南京理工大学)]
- [11] Zhang J Q, Fang X P 2011 *Infrared Physics* (Xian: Xidian University Press) (in Chinese) [张建奇, 方小平 2011 红外物理 (西安: 西安电子科技大学出版社)]
- [12] Yu Z L 1994 *Electro-Opt. Technol. Appl.* **2** 12 (in Chinese) [于志良 1994 光电技术应用 **2** 12]
- [13] Lu K W 1983 *Infrared Radiation Heating Technology* (Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers) (in Chinese) [卢为开 1983 远红外辐射加热技术 (上海: 上海科学技术出版社)]
- [14] Wang B, Chen Z S, Liu Y, Wang J C, Shi J M 2018 *Initiators Pyrotechn.* **3** 13 (in Chinese) [王冰, 陈宗胜, 刘洋, 汪家春, 时家明 2018 *火工品* **3** 13]
- [15] Griffiths T T, Robertson J, Hall P G 1985 *16th International Annual ICT Conference*, Germany, 1985 p19
- [16] Shilov (translated by Ma Y L) 1959 *Flame Radiation of Fire Works Composition* (Beijing: National Defence Industry Press) (in Chinese) [希洛夫著 (马永利译) 1959 烟火药火焰的发光 (北京: 国防工业出版社)]
- [17] Wang B X, Feng Z G 1997 *Theory of Gunpowder Combustion* (Beijing: BeiJing Institute Of Technology Press) (in Chinese) [王伯羲, 冯增国 1997 火药燃烧理论 (北京: 北京理工大学出版社)]
- [18] Tu C J 1992 *Infrared Physics* (Beijing: Higher Education Press) (in Chinese) [屠传经 1992 热传导 (北京: 高等教育出版社)]
- [19] Liu G Q, Ma L X, Xiang S G 2013 *Chemical and Chemical Data Sheet* (Beijing: Chemical Industry Press) (in Chinese) [刘光启, 马连湘, 项曙光 2013 化学化工物性数据手册·无机卷 (北京: 化学工业出版社)]
- [20] James G Speight 2005 *Lange's Handbook of Chemistry* (16th Ed.) (New York: Mc Graw-Hill, Inc)

Effect of ZrSiO_4 on far-infrared radiation characteristics of $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}$ infrared decoy*

WANG Bing¹⁾²⁾ CHEN Zongsheng²⁾ SHI Jiaming^{2)†} XU Hexiu^{1)‡}

1) (*Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China*)

2) (*State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei 230031, China*)

(Received 29 July 2024; revised manuscript received 3 January 2025)

Abstract

Traditional composite infrared decoy, magnesium/teflon (Mg/PTFE), has been widely used in countering infrared guided weapons since its advent. However, with the development of infrared guidance technology, its drawbacks such as insufficient far-infrared radiation and high combustion temperature emerge, making it difficult to counter novel infrared guided weapons. To address this issue, a strategy of utilizing zirconium silicate (ZrSiO_4) as an additive is proposed to improve the infrared radiation of infrared decoy. Therein, seven formulations with different ratios of ZrSiO_4 are designed based on the basic formula of trilead tetraoxide/magnesium/teflon ($\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}$) mixed powder. And the effect of ZrSiO_4 serving as an additive on the performance of $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}$ infrared decoy is analyzed through experiments. First, initial experiments are conducted on the thermal decomposition characteristics of the basic formula (ZrSiO_4 addition ratio is 0%) and its variant counterpart with 12% ZrSiO_4 . Subsequently, the combustion behaviors of the compacted formulation samples are examined using an infrared thermal imager operating within the 7.5–14 μm range, subsequently, the combustion time, combustion temperature, burning rate, radiation area, radiance, and radiation intensity of individual samples are computed. These results show that incorporation of ZrSiO_4 reduces the intensity of the primary exothermic peak during the reactions with a mixed infrared decoy agent, yielding suboptimal thermal efficiencies. Furthermore, the combustion durations of the samples progressively increase with ZrSiO_4 addition increasing, accompanied by consistent reductions in their combustion temperatures. Specifically, the sample reaction time peaks at 3.73 s at a ZrSiO_4 addition ratio of 18%, while the combustion temperature drops to a minimum value of 765.46 °C. Moreover, the far-infrared radiance and radiation intensity demonstrate an initial-increase-then-decrease trend with ZrSiO_4 addition increasing, thereby achieving the maximum values of 2461 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$ and 142 W/sr , respectively at a ZrSiO_4 addition ratio of 6%. Furthermore, the far-infrared radiance and radiation intensity of the base formulation are enhanced when ZrSiO_4 addition ratios are kept within 18% and 9% respectively. Based on the comprehensive analysis of the experimental data and considering the requirements for the infrared decoy in practical applications, a formulation with a ZrSiO_4 addition ratio of 6% is adopted as an improved formulation for the $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}$ infrared decoy.

Keywords: infrared decoy, thermal decomposition, thermal diffusivity, radiation intensity

PACS: 44.40.+a, 42.70.Km, 82.33.Vx

DOI: 10.7498/aps.74.20241048

CSTR: 32037.14.aps.74.20241048

* Project supported by the National Defense Pre-Research Foundation of China (Grant No. HJJ2017-0671).

† Corresponding author. E-mail: shijiaming17@nudt.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: hxxuellen@gmail.com

硅酸锆对 $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}$ 红外诱饵剂远红外辐射性能影响

王冰 陈宗胜 时家明 许河秀

Effect of ZrSiO_4 on far-infrared radiation characteristics of $\text{Pb}_3\text{O}_4/\text{Mg}/\text{PTFE}$ infrared decoy

WANG Bing CHEN Zongsheng SHI Jiaming XU Hexiu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 084401 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241048

CSTR: 32037.14.aps.74.20241048

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241048>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铁磁异质结的远红外脉冲辐射及其光热调控研究

Pulsed far-infrared radiation of ferromagnetic heterojunction and its photothermal regulation

物理学报. 2023, 72(15): 157801 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230543>

红外光谱辐射计探测器高阶非线性响应校正方法

High-order nonlinear response correction method for infrared radiation detector

物理学报. 2021, 70(6): 060701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201530>

氧化钪(Sc_2O_3)的热漫散射强度解析

Analysis of thermal diffuse scattering intensity of scandium oxide (Sc_2O_3)

物理学报. 2024, 73(6): 063401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231241>

近红外二区长波发射硅酸盐及多格位占据光谱展宽

Long wavelength near-infrared II emitting $\text{Na}_3\text{YSi}_3\text{O}_9:x\text{Cr}^{3+}$ silicate and spectral broadening by multi-site occupancy

物理学报. 2024, 73(15): 157803 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240663>

静态强磁场对临近空间飞行器中天线辐射性能的影响

Influence of static strong magnetic field on antenna radiation in hypersonic vehicle

物理学报. 2022, 71(8): 085202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212044>

高温热辐射输运模拟的蒙特卡罗全局降方差方法

Global variance reduction method for Monte Carlo simulation of thermal radiation transport

物理学报. 2023, 72(13): 139501 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230218>