

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.02.006

# 一种燃烧型干扰剂的设计及其多频谱消光性能研究<sup>\*</sup>

江 飞 谢 强 刘 威 何 杰 刘震宇 王泽清 陈厚和 徐 铭  
南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 为实现一剂化可见光、红外、激光的多频谱遮蔽干扰,基于铝热燃烧反应设计了一种新型燃烧型多频谱干扰剂,结合理论计算与实验获得了优选配方,并在烟箱内进行了干扰性能测试。结果表明:烟幕对可见光、近红外光(1~3 μm 波段)、中红外光(3~5 μm 波段)和波长为 1.06 μm 的激光可基本实现完全遮蔽;对远红外光(8~14 μm 波段)的消光系数可达 0.967 m<sup>2</sup>/g,对波长为 10.60 μm 激光的消光系数为 0.655 m<sup>2</sup>/g。设计的干扰剂配方可基本实现一剂化多频谱干扰的目的,有望应用于燃烧型烟幕干扰弹。

[关键词] 燃烧型;干扰剂;消光系数;多频谱

[分类号] TQ567.5

## Design of a Combustion Type Interference Agent and Its Multi-Spectrum Extinction Performance

JIANG Fei, XIE Qiang, LIU Wei, HE Jie, LIU Zhenyu, WANG Zeqing, CHEN Houhe, XU Ming  
School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] In order to achieve the multi-spectrum shielding interference of visible light, infrared, and laser by a single dose, a new combustion type multi-spectrum interference agent was designed based on the thermite reaction. The optimal formula was obtained from theoretical calculations and experiments. Interference performance test was carried out in the smoke box. The results show that smoke screen can basically completely shield visible light, near infrared light (1-3 μm band), mid infrared light (3-5 μm band) and the laser with a wavelength of 1.06 μm. Extinction coefficient of the far infrared light (8-14 μm band) can reach 0.967 m<sup>2</sup>/g, and that of the laser with a wavelength of 10.60 μm is 0.655 m<sup>2</sup>/g. Therefore, the interfering agent formula designed in this study can basically achieve the purpose of multi-spectrum interference by one dose, and it is expected to be applied to burning smoke jamming bombs.

[KEYWORDS] combustion type; interference agent; extinction coefficient; multi-spectrum

### 引言

烟幕是由发烟剂形成的人工气溶胶,对光具有吸收和散射的作用,能够干扰光电观瞄器材和光电制导武器。然而,随着第三代激光制导武器系统的发展,目前的单一波段的干扰剂已无法满足战场的需求<sup>[1-2]</sup>。燃烧型红外干扰剂形成的烟幕分散均匀、悬浮时间长,具有广泛的装填适用性。因此,世界各国一直致力于燃烧型多频谱干扰剂的研究<sup>[3-4]</sup>。

德国专利 DE199140953 中介绍了一种发烟剂,在传统发烟剂中加入磷或磷的硫化物及包覆后的碳

纤维偶极子,可用于干扰可见光、红外光、毫米波多个波段<sup>[5]</sup>。美国专利 USP6726964 中介绍了一种采用超声波法将金属沉积在聚合物微粒表面的多频谱干扰材料,其干扰波段为1~10 mm;选用的微粒材料以碳纤维、石墨等碳基材料为主。目前,国内有关同时干扰可见光、红外光(1~3 μm、3~5 μm、8~14 μm 波段)和波长 1.06、10.60 μm 激光的燃烧型多频谱干扰剂的研究较少,而且大多都是有关红磷烟幕的相关研究<sup>[6]</sup>。王玄玉等<sup>[7]</sup>研究红磷烟幕的成烟过程与遮蔽特性发现,红磷烟幕对波长10.60 μm 激光的消光作用以吸收效应为主,随着烟幕浓度的增加,烟幕的质量消光系数呈下降趋势。郑付兴等<sup>[8]</sup>

<sup>\*</sup> 收稿日期:2020-09-05  
第一作者:江飞(1996-),男,硕士研究生,主要从事抗红外发烟剂的配方研究。E-mail:13199570318@163.com  
通信作者:陈厚和(1961-),男,博导,研究员,主要从事纳米材料、含能材料的制备。E-mail:chhh42792@sina.cn

研究了氧化剂对红磷烟幕抗10.60 μm 激光性能的影响,结果表明,硝酸铋更适合作为红磷烟幕的氧化剂。

红磷安定性差,且着火点低,遇氯酸钾、高锰酸钾等氧化剂时可引起爆炸<sup>[9-11]</sup>。因此,为了提高干扰剂安全性能的同时实现多频谱干扰,基于铝热燃烧反应裂解富碳化合物设计了一种干扰剂。结合理论计算和实验获得了优选配方,并进行了干扰剂对可见光、红外光(1~3 μm、3~5 μm、8~14 μm 波段)和激光(波长 1.06、10.60 μm)的干扰性能测试。

1 燃烧型多频谱干扰剂配方的设计

1.1 干扰剂配方的设计

燃烧型多频谱干扰剂应具有一定的燃烧速度,能形成均匀、连续的烟幕并持续一定时间。基于铝热剂,利用铝热燃烧反应裂解富碳化合物,产生大量无毒、无腐蚀的炭黑等物质,借助燃烧产物的消光性实现遮蔽干扰。选择富碳化合物 A 作为主要成烟物质,常用的可燃剂有 Mg 和 Al。表 1、表 2 列举了 Mg、Al 与一些常用氧化物氧化剂的反应热。

表 1 Mg 与常用氧化剂的反应热(以 1 mol Mg 计)

Tab. 1 Heat of reaction between Mg and oxidants in common use (calculated by 1mol Mg)

kJ/mol		
氧化剂	生成热	反应热
TiO <sub>2</sub>	-933.032	-134.725
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-825.503	-326.073
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	-1 118.383	-321.645
MnO <sub>2</sub>	-520.071	-341.205
SiO <sub>2</sub>	-910.857	-145.813
CuO	-155.854	-445.387
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-1 270.403	-177.764

表 2 Al 与常用氧化剂的反应热(以 1mol Al 计)

Tab. 2 Heat of reaction between Al and oxidants in common use (calculated by 1mol Al)

kJ/mol		
氧化剂	生成热	反应热
TiO <sub>2</sub>	-933.032	-137.863
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-825.503	-424.886
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	-1 118.383	-418.243
MnO <sub>2</sub>	-520.071	-447.584
SiO <sub>2</sub>	-910.857	-154.494
CuO	-155.854	-603.856
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-1 129.680	-272.797

1.2 理想配比的计算

根据炭黑的产生机理,反应必须在负氧平衡条件下进行,且必须提供 1 000 K 以上的炭黑生成温度的过热体系<sup>[12]</sup>。因此,理论上体系中的富碳化合物越多,能裂解产生的炭黑粒子也更多。

下面以 Mg 与 TiO<sub>2</sub> 为例,计算体系中理论富碳化合物 A 的最大质量。

Mg、TiO<sub>2</sub>、富碳化合物 A 各组分质量分别为  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ ,共计 1 000 g。

当 Mg、TiO<sub>2</sub> 完全反应放出的热量恰好能使富碳化合物 A 的温度上升到 1 000 K 时,有

$$\begin{cases} -(\frac{m_1}{24} \cdot \Delta_r H_m^\ominus) = \frac{m_3}{284.8} \cdot \int_{298}^{1000} C_p dT; \\ m_2 = \frac{m_1}{24} \cdot \frac{1}{2} \cdot 79.9; \\ m_1 + m_2 + m_3 = 1\,000. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $C_p$  为富碳化合物 A 的标准摩尔热容,为 201.2 J/(mol·K); $\Delta_r H_m^\ominus$  为 Mg 与 TiO<sub>2</sub> 的反应热,为 -134.725 kJ/mol。

计算得富碳化合物 A 的最大质量为 810.1 g。

同理,可计算出不同可燃剂与各种氧化剂体系中富碳化合物 A 的最大质量,如表 3 所示。

表 3 富碳化合物 A 的最大质量计算值

Tab. 3 Calculated value of the maximum amount of carbon-rich compound A

g		
氧化剂	与 Mg	与 Al
TiO <sub>2</sub>	810.1	761.88
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	894.8	820.65
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	887.9	880.95
MnO <sub>2</sub>	910.7	907.18
SiO <sub>2</sub>	844.8	811.90
CuO	896.3	892.40
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	883.5	842.42

通过表 3 计算结果发现,Mg、Al 与各氧化剂反应的效果相差不大。原材料市场价格见表 4(由麦克林公司提供)。考虑原材料的经济性,最后选择 Mg 与 MnO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、SiO<sub>2</sub> 进行实验测试。

2 燃烧型多频谱干扰剂配方的优化

2.1 实验药品及测试设备

药品:富碳化合物 A;Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、MnO<sub>2</sub>、SiO<sub>2</sub>,

表4 常用金属粉及氧化剂的市场价格

Tab.4 Market price of metal powders and oxidants in common use

药品名称	价格(以 500 g 计)/元
Mg	215
Al	381
TiO <sub>2</sub>	40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	47
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	55
MnO <sub>2</sub>	48
SiO <sub>2</sub>	14
CuO	113
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	90

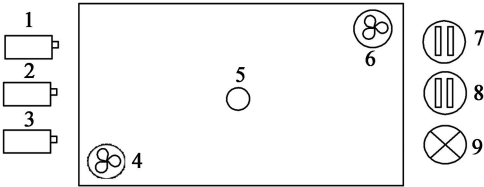
分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;Mg,化学纯,国药集团化学试剂有限公司。

在 33.8 m<sup>3</sup> 烟幕箱实验系统进行实验。该烟幕箱实验系统光程 4.8 m,配备有可见光透过率测试仪、激光透过率测试仪、红外光透过率测试仪等,如图 1 所示。

表5 各配方透过率测试

Tab.5 Transmittance test results of each formula

配方	$w(A)/\%$	$w(Mg)/\%$	$w(\text{氧化剂})/\%$				透过率		备注
			MnO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	8 ~ 14 μm 红外光	10.60 μm 激光	
1 <sup>#</sup>	91.0	3.2	5.8				—	—	未点燃
2 <sup>#</sup>	89.0	3.9	7.1				—	—	未点燃
3 <sup>#</sup>	87.0	4.6	8.4				0.32	0.48	
4 <sup>#</sup>	85.0	5.3	9.7				0.22	0.36	
5 <sup>#</sup>	83.0	6.1	10.9				0.28	0.44	
6 <sup>#</sup>	89.0	3.4		7.6			—	—	未点燃
7 <sup>#</sup>	87.0	4.0		9.0			0.22	0.35	
8 <sup>#</sup>	85.0	4.7		10.3			0.13	0.26	
9 <sup>#</sup>	83.0	5.3		11.7			0.08	0.17	
10 <sup>#</sup>	81.0	5.9		13.1			0.12	0.22	
11 <sup>#</sup>	84.0	7.1			8.9		0.44	0.56	
12 <sup>#</sup>	82.0	8.0			10.0		0.42	0.55	
13 <sup>#</sup>	80.0	8.9			11.1		0.36	0.48	
14 <sup>#</sup>	78.0	9.8			12.2		0.35	0.48	
15 <sup>#</sup>	76.0	10.7			13.3		0.44	0.56	
16 <sup>#</sup>	89.0	3.2				7.8	—	—	未点燃
17 <sup>#</sup>	87.0	3.8				9.2	0.33	0.47	
18 <sup>#</sup>	85.0	4.4				10.6	0.23	0.35	
19 <sup>#</sup>	83.0	5.0				12.0	0.14	0.28	
20 <sup>#</sup>	81.0	5.6				13.4	0.16	0.33	



1,2,3-3种透过率测试仪;4,6-风扇;  
5-样品放置台;7,8-黑体;9-灯。

图1 烟幕箱测试系统图

Fig.1 Test system diagram of smoke screen box

2.2 实验过程

基于上述计算,设计了一系列配方,制备成 34 g 药柱,在烟幕箱内进行光的透过率测试。光的透过率是评价物质对电磁波干扰性能的重要指标。透过率越小,表明电磁波在该物质中的衰减性能越好。结果如表 5 所示。表 5 中选取了 8 ~ 14 μm 红外光和 10.60 μm 激光两个典型波段。

由表5结果发现:由于实际反应还存在碳裂解等过程,需要消耗能量,实际富碳化合物A的含量不能达到计算最大值;并且,富碳化合物A的量过高时会出现无法点燃的现象。综合以上过程,最后

选定最优配方(质量分数)为:富碳化合物 A 83.0%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  11.7%, Mg 5.3%。

### 3 实验结果与分析

按优选配方制成药柱。在烟幕箱内进行干扰剂烟幕对可见光、红外光(1~3、3~5、8~14  $\mu\text{m}$ )和激光(1.06、10.60  $\mu\text{m}$ )的干扰性能测试。

#### 3.1 对可见光的干扰性能

图 2 为测试时间内干扰剂燃烧产生的烟幕干扰可见光的透过率曲线。可以看出,点火后,随着烟幕的形成,可见光的透过率迅速下降至 0 附近,且透过率的数值趋于稳定。可见光处于完全遮蔽状态,且有效遮蔽时间大于 500 s。测试结果表明,该干扰剂具有优异的可见光干扰性能。

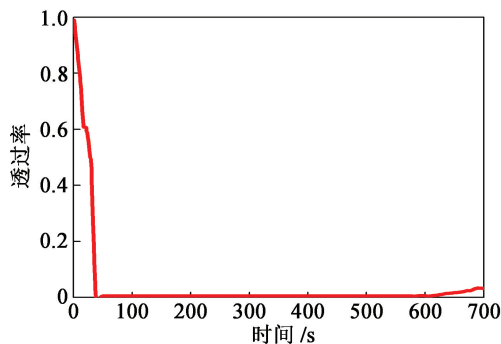


图 2 可见光的透过率

Fig. 2 Transmittance test results of visible light

#### 3.2 对中、远红外光的干扰性能

图 3 为干扰剂燃烧产生的烟幕干扰红外光不同波段的透过率曲线。点火后,在铝热反应产生的高温作用下,富碳化合物分子裂解、脱氢、聚合和环化凝聚生成晶核的先驱物质。然后,在火焰中形成大量的炭黑,由每个独特的炭黑形成一些炭黑聚集体,这些聚集体有非常大的比表面积和粒径,这种结构

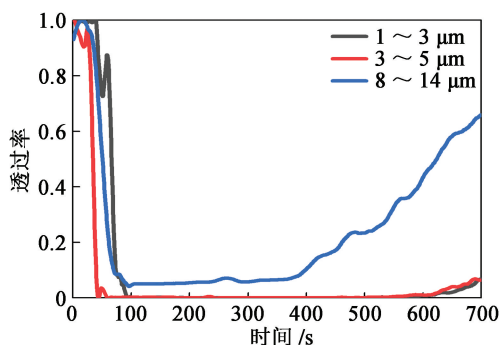


图 3 中远红外光波段的透过率

Fig. 3 Transmittance test results of mid-to-far infrared band

决定了其对红外辐射产生强烈的吸收作用。药柱燃烧过程中,测试系统探测的透过率呈一定的振荡趋势。药柱燃烧完毕后,开动风扇搅拌 20 s,使得烟幕在烟幕箱内分散均匀,透过率下降至最低。之后,烟幕在烟幕箱内逐渐沉降,透过率随之逐渐上升。结果表明:该干扰剂可使近、中红外光的透过率衰减至 0,具有优异的干扰性能,且有效干扰时间大于 500 s;对远红外光波段干扰效果虽不如近、中红外光波段,透过率也能下降至 5% 左右,干扰性能良好,且有效干扰时间大于 300 s。

#### 3.3 对激光的干扰性能

图 4 为干扰剂燃烧产生的烟幕干扰 1.06  $\mu\text{m}$  和 10.60  $\mu\text{m}$  激光的透过率曲线。可以看出,干扰剂对 1.06  $\mu\text{m}$  激光同样具有很好的干扰性能,随着燃烧反应的进行,激光透过率逐渐减小,烟幕稳定后,1.06  $\mu\text{m}$  激光的透过率小于 6%,且有效干扰时间大于 300 s。对 10.60  $\mu\text{m}$  激光也有较好的干扰效果,10.60  $\mu\text{m}$  激光的透过率在 10% 左右,且有效干扰时间大于 200 s。

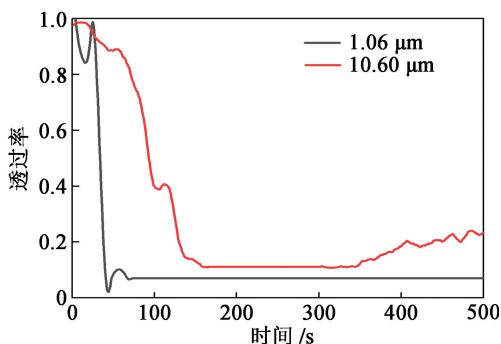


图 4 激光的透过率

Fig. 4 Transmittance test of laser

结果表明,该干扰剂基本完成了一剂化对可见光、红外光、激光的多频谱遮蔽干扰。

#### 3.4 平均质量消光系数

质量消光系数  $\alpha$  计算公式<sup>[13]</sup>为

$$\alpha = \frac{\ln T}{cL} \quad (2)$$

式中: $T$  为光的透过率; $c$  为烟幕质量浓度; $L$  为测试烟幕箱的光程。

测试不同烟幕质量浓度条件下的  $T$ ,通过式(2)计算出  $\alpha$ ,然后计算出  $\alpha$  的平均值(表 6)。

根据有关文献报道,常规红磷烟幕对 8~14  $\mu\text{m}$  红外光波段的平均质量消光系数为 0.367  $\text{m}^2/\text{g}$ <sup>[6]</sup>,对 10.60  $\mu\text{m}$  激光的平均质量消光系数为 0.574  $\text{m}^2/\text{g}$ <sup>[7]</sup>。由表 6 可知,该干扰剂对 1.06  $\mu\text{m}$  激光和 10.60  $\mu\text{m}$  激光的平均质量消光系数分别为 0.967

表 6 中、远红外光和激光的消光系数  
Tab.6 Extinction coefficient of mid infrared  
light, far infrared light and laser

质量浓度/ ( g · m <sup>-3</sup> )	红外光		激光
	3 ~ 5 μm	8 ~ 14 μm	10. 6 μm
1. 0	0. 554	0. 223	0. 121
1. 5	1. 096	0. 459	0. 271
2. 0	1. 919	0. 764	0. 578
2. 5	2. 399	1. 199	0. 923
3. 0	2. 878	2. 192	1. 380
平均值	1. 769	0. 967	0. 655

m<sup>2</sup>/g 和 0. 655 m<sup>2</sup>/g, 干扰性能优于常规红磷烟幕。

4 结论

基于铝热燃烧反应裂解富碳化合物产生炭黑等物质的原理设计了燃烧型多频谱干扰剂的配方(质量分数):富碳化合物 A 83. 0% , Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 11. 7% , Mg 5. 3% 。通过烟幕箱测试发现:燃烧产生的烟幕对可见光、1 ~ 3 μm 和 3 ~ 5 μm 波段的红外光、1. 06 μm 激光可基本实现完全遮蔽;对 8 ~ 14 μm 波段红外光的平均质量消光系数为 0. 967 m<sup>2</sup>/g, 对 10. 60 μm 激光的平均质量消光系数为 0. 655 m<sup>2</sup>/g。作为一种新型燃烧型干扰剂,基本实现了一剂干扰多频谱的设计目的,有望应用于燃烧型烟幕弹药。

参 考 文 献

[1] 王玄玉. 抗红外烟幕材料及消光性能研究进展[J]. 红外与激光工程, 2020,49(7):20201019.  
WANG X Y. Development of anti-infrared smoke material and its extinction performance[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020,49(7):20201019.

[2] 罗威, 杨华兵, 戴定川, 等. 多激光制导目标时激光角度欺骗干扰问题研究[J]. 激光与红外, 2019,49(12):1461-1466.  
LUO W, YANG H B, DAI D C, et al. Research of laser angle deception jamming to multi-targets of laser guidance[J]. Laser & Infared, 2019,49(12):1461-1466.

[3] 刘松涛, 高东华. 光电对抗技术及其发展[J]. 光电技术应用, 2012,27(3):1-9.  
LIU S T, GAO D H. Opto-electronic countermeasure technologies and their development[J]. Electro-Optic Technology Application, 2012,27(3):1-9.

[4] 关华, 潘功配, 朱晨光, 等. 一种燃烧型抗红外/毫米

波双模发烟剂研究[J]. 火工品, 2004(3):13-15,19.  
GUAN H, PAN G P, ZHU C G, et al. Study on a combustion smoke composition for anti-infrared and anti-millimeter wave[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2004(3):13-15,19.

[5] KOCH E C. Smoke screen aerosols opaque in visible-IR-millimeter-band spectra containing coated microfiber dipoles: DE199140953[P]. 2003-04-15.

[6] 王玄玉, 潘功配. 红磷烟幕中红外光谱和红外消光性能研究[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(5):397-400.  
WANG X Y, PANG G P. Study on middle infrared spectrum and extinction performance of red phosphorus smoke[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25(5):397-400.

[7] 王玄玉, 潘功配. 红磷烟幕对 10. 6 μm 激光的消光系数测试研究[J]. 红外与激光工程, 2005,34(6):636-640.  
WANG X Y, PANG G P. Study and test of extinction coefficient of red phosphorus smoke to 10. 6 μm laser emission[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005,34(6):636-640.

[8] 郑付兴, 王玄玉, 宋黎, 等. 氧化剂对红磷烟幕抗 10. 6 μm 激光性能的影响研究[J]. 含能材料, 2007, 15(2):155-157.  
ZHENG F X, WANG X Y, SONG L, et al. Effects of oxidants on RP smoke to anti-10. 6 μm laser[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15(2):155-157.

[9] 彭文联, 张兴高, 刘庚冉, 等. 纳米石墨基烟幕材料的遮蔽干扰特性研究[J]. 光电技术应用, 2019,34(6):17-20.  
PENG W L, ZHANG X G, LIU G R, et al. Research on shadowing and interference characteristics of nano-graphite based smoke screen material[J]. Electro-Optic Technology Application, 2019,34(6):17-20.

[10] COLLINS P J D, SMIT K J, HUBBLE B R. The use of red phosphorus in pyrotechnics: results of an international investigation[C]// 31st International Pyrotechnics Seminar. Fort Collins, CO, US, 2004.

[11] SAU C, LAIAROAIE C, ZECHERU T, et al. Toxicity evaluation of smoke pyrotechnic compositions based on the dimensional analysis of solid combustion products[J]. Revista de Chimie, 2011,62(7):718-722.

[12] 周遵宁. 燃烧型抗红外发烟剂配方设计及应用研究[D]. 南京:南京理工大学, 2003.  
ZHOU Z N. Composition design and application research on pyrotechnic anti-infrared smoke agent[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2003.