

文章编号: 1006-9941(2002)03-0128-04

# 赤磷对改进型 HC 发烟剂烟幕性能影响的试验研究

周遵宁, 潘功配, 李毅, 关华  
(南京理工大学化工学院, 江苏南京 210094)

**摘要:** 以改进型 HC 发烟剂为基础配方, 试验研究了发烟剂中赤磷的含量对所成烟幕的红外光谱透过率、初始浓度和沉降速度及烟幕粒谱分布的影响。试验结果表明, 当发烟剂中不含赤磷时, 其烟幕在 8~14  $\mu\text{m}$  波段的红外光谱平均透过率为 22.4%, 当发烟剂中赤磷含量为 10% 时, 形成的烟幕在 8~14  $\mu\text{m}$  波段的红外光谱平均透过率降至 7.8%。

**关键词:** 赤磷; 红外; 发烟剂; 透过率

**中图分类号:** TQ567.5

**文献标识码:** A

## 1 引言

近年来, 为了对付在战场上日益广泛使用的先进的红外探测器材, 人们对烟幕遮蔽能力的要求也从可见光波段拓展到中、远红外波段。过去使用的 HC 发烟剂(含六氯乙烷和金属粉)产生的烟幕在可见光波段有较好的遮蔽作用, 但在 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~14  $\mu\text{m}$  的红外波段干扰效果并不明显。为了提高此类发烟剂的红外干扰性能, 研究者对其进行了改进。如 1982 年法国专利<sup>[1]</sup>介绍了一种以六氯代苯为主要成分的红外发烟剂, 1995 年美国专利<sup>[2]</sup>报导了以富碳有机化合物为主要成分的红外发烟剂等。这些改进型发烟剂的成烟机理都是在燃烧过程中, 通过富碳有机化合物的不完全燃烧, 生成大量的直径为几个微米到毫米级的絮片碳粒子。虽然这种改进型发烟剂形成的烟幕对 3~5  $\mu\text{m}$  波段的红外干扰效果较好, 但对 8~14  $\mu\text{m}$  波段的红外干扰不是非常有效。因此, 提高改进型 HC 发烟剂形成的烟幕在 8~14  $\mu\text{m}$  波段的红外干扰性能, 已成为该类红外干扰发烟剂研究的技术关键。

由于赤磷(RP)形成的烟幕在 8~11  $\mu\text{m}$  波段内对红外有一个明显的特征吸收峰, 因此, 本文尝试采用改进型 HC 发烟剂与 RP 复合, 即在改进型 HC 发烟剂中添加不同比例的 RP, 以研究其烟幕对 8~14  $\mu\text{m}$  波段的红外光干扰效果。

## 2 试验

### 2.1 试样制备

以某改进型 HC 发烟剂为基础配方, 按一定比例添加 RP 后, 经机械混合, 过 60 目筛, 压制成  $\phi 35$  mm、 $\rho = 1.25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、质量为 60 g 的药柱。RP 的添加比例(质量分数)如表 1 所示。

表 1 RP 的添加比例及试样代号

Table 1 Appending proportion and sample symbol of RP

试样	A	B	C	D	E
RP 含量/%	0	5	10	15	25

### 2.2 烟幕性能测试

#### 2.2.1 测试仪器、设备及测试条件

测试仪器设备: 20  $\text{m}^3$  (6.1 m  $\times$  2.0 m  $\times$  1.8 m) 烟幕箱; Mark III 型红外光谱辐射计(1.34 ~ 13.94  $\mu\text{m}$ ), 黑体温度 800  $^{\circ}\text{C}$ ; 质量浓度与粒谱分布采样、称量装置。

测试条件: 试验温度 20 ~ 25  $^{\circ}\text{C}$ ; 相对湿度 45% ~ 55%。

#### 2.2.2 测试过程

将试样分别在 20  $\text{m}^3$  烟幕箱中点燃, 同时启动烟幕箱中的搅拌装置, 待试样燃烧结束时, 开始计时, 并用 Mark III 型红外光谱辐射计扫描不同时间时烟幕的红外光谱透过率。红外光谱辐射计进行扫描的同时, 测试烟幕的质量浓度并测试 0 ~ 2 min 时烟幕的粒谱分布。烟幕性能测试装置如图 1 所示。

收稿日期: 2002-03-28; 修回日期: 2002-05-20

作者简介: 周遵宁(1969-), 男, 在读博士, 从事烟火技术与应用研究。

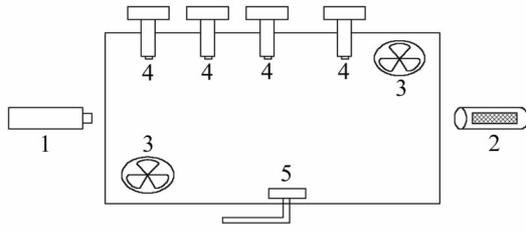


图 1 烟幕性能测试装置原理图

1—红外光谱辐射计, 2—标准黑体, 3—搅拌风扇,  
4—质量浓度采样器, 5—发烟剂药柱

Fig. 1 Assembly sketch of smoke chamber

1—infrared spectrum meter, 2—standard black body, 3—fan,  
4—mass concentration sampling device, 5—composition grain

### 3 测试结果与讨论

#### 3.1 RP 对改进型 HC 发烟剂的烟幕红外光谱透过率的影响

8 ~ 14  $\mu\text{m}$  红外光谱对各试样形成烟幕的平均透过率  $T$  随时间的变化情况如图 2 所示,图 3 为纯 RP 烟幕在 8 ~ 14  $\mu\text{m}$  波段的红外光谱透过率曲线图,图 4 是 0.5 min 时各试样在 8 ~ 14  $\mu\text{m}$  波段的红外光谱透过率曲线图。

从图 2 可以看出,当 RP 添加量小于 10% 时,烟幕的红外光谱透过率随 RP 添加量的增加而逐渐降低(如图 2 和图 4 中的曲线 A, B 和 C 所示),当 RP 添加量达到 10% 时,烟幕的红外光谱透过率最低。说明 RP 的加入对改进型 HC 发烟剂形成烟幕的干扰效果起到了正向促进作用。出现这种情况的原因有:(1) RP 的加入改变了发烟剂的燃烧温度,由于碳粒子的消光性能与生成温度有很大关系<sup>[3]</sup>,因此燃烧温度的改变使火焰中碳粒子的粒径变小,聚集加速,使烟幕中碳粒子的粒径变大<sup>[4]</sup>(如图 5 和图 6 所示),导致碳粒子的消光效率增大。(2) 当发烟剂中加入 RP 后,由于碳粒子吸附了烟幕中的磷烟液滴后,碳聚集体表面的吸附力增强,各聚集体之间能以较弱的羽状结构形成数量众多的葡萄串式网络结构的聚集体(如图 7 所示),这种结构有高的比表面积,增加了烟幕粒子的消光截面,从而使烟幕的透过率大大降低。

图 2 还表明,当 RP 添加量大于 10% 时,随着 RP 添加量的增加,烟幕的红外光谱平均透过率随时间的变化趋势是先高,后低,接着再逐渐升高(如图 2 中的曲线 D 和 E 所示)。而当 RP 添加量达到 25% 时,烟幕红外光谱透过率曲线(图 4 中的曲线 D 所示)呈现出磷烟的特征吸收峰(如图 3 所示),此时烟幕的颜色

为浅灰白色。这是由于 RP 含量的增加,使发烟剂的燃烧温度升高,导致 HC 发烟剂反应完全,没有生成大量的碳粒子,而是生成了  $\text{CO}_2$  和  $\text{CO}$  气体,导致烟幕成分以磷烟为主,因此烟幕呈现出磷烟的红外光谱特征。

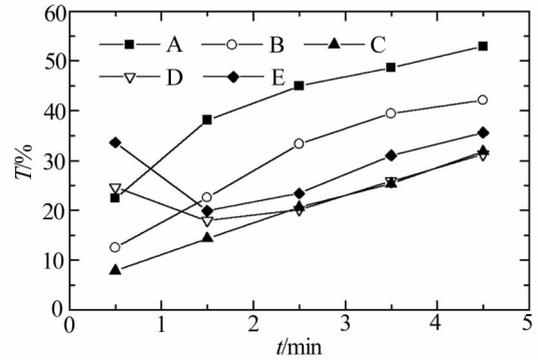


图 2 各试样的烟幕平均透过率与时间的关系

Fig. 2 Average smoke transmissivity vs. time

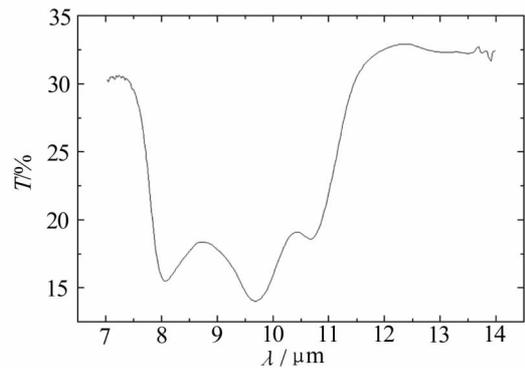


图 3 RP 烟幕的红外光谱透过率曲线图

Fig. 3 Infrared spectrum transmissivity of RP smoke

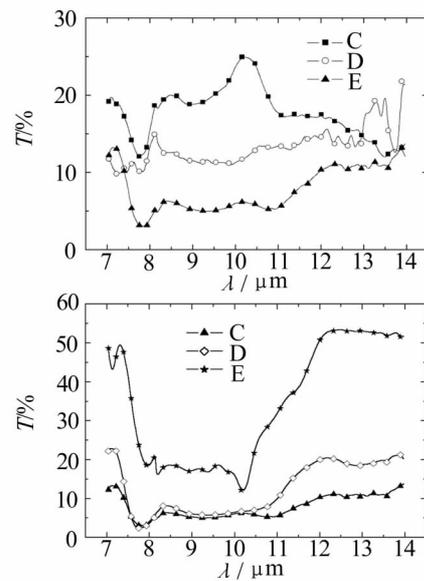


图 4 0.5 min 时各试样的红外光谱透过率曲线图

Fig. 4 Infrared spectrum transmissivity after 0.5 minute

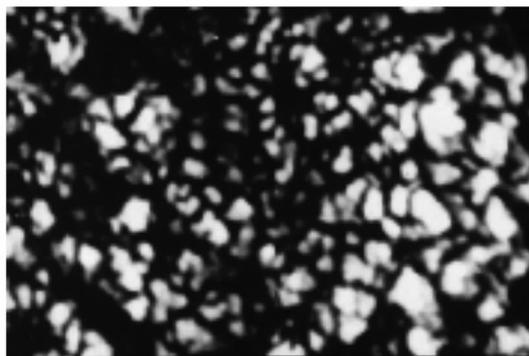


图 5 A 样品烟幕的 SEM 图

Fig. 5 SEM photograph of the smoke of sample A

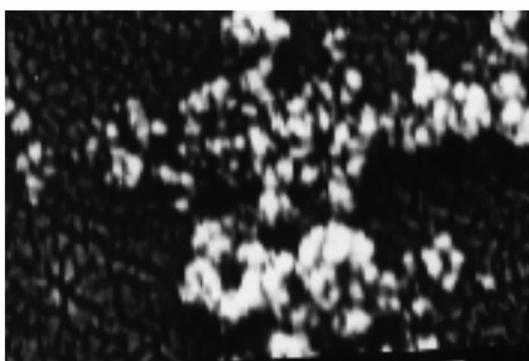


图 6 C 样品烟幕的 SEM 图

Fig. 6 SEM photograph of the smoke of sample C

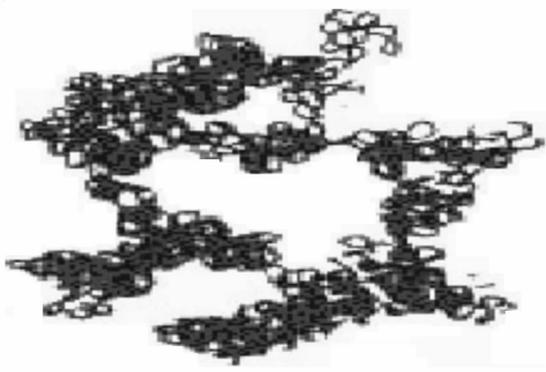


图 7 聚集体间形成的网络结构 TEM 图

Fig. 7 TEM photograph of aggregates network

### 3.2 RP 对改进型 HC 发烟剂的烟幕初始浓度和沉降速度的影响

根据文献[5],通过测试烟幕质量浓度,我们计算出了烟幕的初始浓度和沉降速度,结果如表 2 所示。由表 2 知,各试样的初始浓度( $C_0$ )随 RP 添加量的增加而增加,当含量 25% 时达到了最高值,这符合磷烟的浓度变化规律,表明烟幕中磷烟的含量越来越高,而碳粒子的含量却越来越低,烟幕的沉降速度可进一步

证明这一规律。

表 2 还表明,随着 RP 添加量的增加,烟幕的沉降速度( $v_D$ )是先增加后降低。A 样品不含 RP,碳粒子是烟幕的主要成分,而 B 和 C 样品添加了 RP,因此烟幕中既含碳粒子又含磷烟液滴。由于烟幕中的碳粒子有很强的吸附性,它们吸附了磷烟粒子后,密度增大,因此导致了沉降速度的增大。可能 C 样品生成的磷烟液滴与生成的碳粒子的比例相当,结果烟幕中不存在大量的未吸附磷烟的碳粒子,因此其沉降速度最大。E 样品的沉降速度最慢,说明烟幕中碳粒子的含量较低,磷烟的含量较高,烟幕颜色为浅灰白色可定性说明这一特点。

表 2 各试样的烟幕初始浓度和沉降速度计算结果

Table 2 Calculation results of smoke initial concentration and settling velocity

	A	B	C	D	E
$C_0/g \cdot cm^{-3}$	0.72	0.77	0.81	0.97	1.48
$v_D/m \cdot min^{-1}$	0.20	0.25	0.29	0.26	0.14

### 3.3 RP 对改进型 HC 发烟剂烟幕粒谱分布的影响

试验测定了各试样的烟幕粒谱分布,其中典型的 A、C、E 试样的烟幕粒谱分布图如图 8~10 所示,图中横坐标的编号与烟幕粒子粒径区间对应,如表 3 所示。

表 3 烟幕粒子的粒径区间

Table 3 Particle size range of smoke

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
粒径区间/ $\mu m$	<0.4	0.4~0.62	0.62~1.2	1.2~2.2	2.2~3.2	3.2~4.4	4.4~6.1	6.1~8.8	>8.8

从图 8 可以看出,由于发烟剂中不含 RP,发烟剂的燃烧速度慢,生成的大粒径的碳没有形成烟幕,而是留在残渣中,只有小粒径的碳形成烟幕,因此烟幕中的粒子质量中值直径在  $2 \mu m$  左右。而当发烟剂添加了 10% 的 RP 后,发烟剂的燃烧温度和燃烧速度适中,生成的碳粒子大部分形成了烟幕。由于烟幕中的碳粒子吸收磷烟液滴,形成了数量众多的葡萄串式的网络结构聚集体,使烟幕粒谱分布向大粒径方向发展,形成的烟幕粒子的质量中值直径大于  $8 \mu m$  (如图 9 所示)。而 E 样品由于 RP 的含量高,发烟剂的燃烧温度高且燃烧速度慢,生成的碳大部分与空气中的氧气继续反应生成 CO 和  $CO_2$ ,导致烟幕中碳粒子含量很低,形成了以磷烟液滴为主要成分的烟幕。因此,图 10 中的烟幕粒子的质量中值直径基本上在  $1 \mu m$  左右。

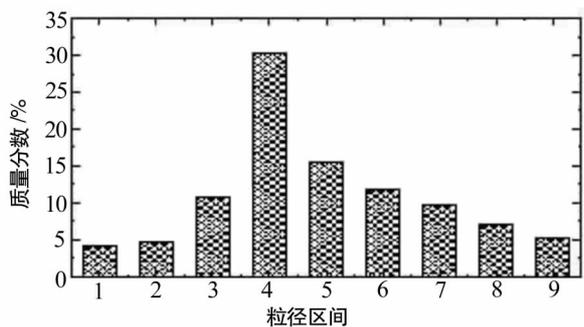


图8 A样品烟幕的粒径分布图

Fig.8 Particle size distribution of the smoke of sample A

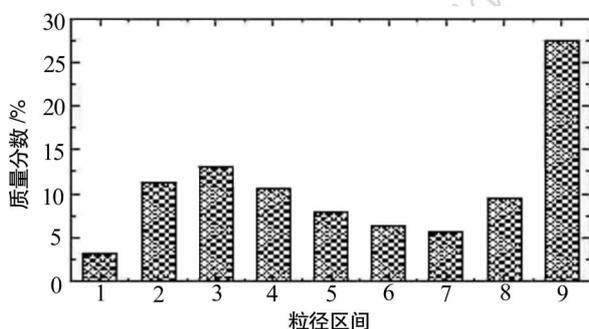


图9 C样品烟幕的粒径分布图

Fig.9 Particle size distribution of the smoke of sample C

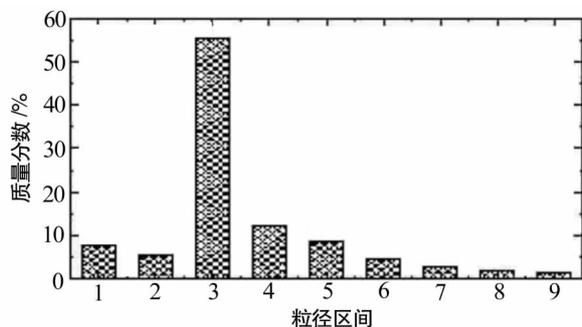


图10 E样品烟幕的粒径分布图

Fig.10 Particle size distribution of the smoke of sample E

## 4 结论

(1) RP对改进型HC发烟剂的烟幕红外光谱透过率有显著影响。在改进型HC发烟剂中,不添加RP时,其烟幕在8~14 μm波段的红外光谱平均透过率为22.4%;当添加10%的RP后,其烟幕在8~14 μm波段的红外光谱平均透过率降至7.8%;当添加RP的量达到25%时,烟幕的红外干扰特征主要显示磷烟的性能。因此,对本文采用的改进型HC发烟剂,RP的最佳添加比例为10%。

(2) RP添加到改进型HC发烟剂中,可提高烟幕的质量浓度;随RP添加比例的提高,烟幕沉降速度的变化趋势是先快后慢。

(3) 改进型HC发烟剂中添加RP后,烟幕粒子聚集体会发生吸附作用,形成葡萄串式的网络结构,导致烟幕粒径增大。烟幕粒子聚集体的葡萄串式网络结构的形成与RP的添加比例有关。

### 参考文献:

- [1] André Espagnacq et Gérard Sauvestre. Composition pyrotechnique génératrice de fumée opaque au rayonnement infrarouge et munition fumigène obtenue[P]. FR2560186,1982.
- [2] H. B. Berchtesgaden, J. S. Bischofswiesen. Composition generating an IR - opaque smoke[P]. US5389308,1995.
- [3] 李毅,潘功配,周遵宁. 碳黑消光性能的影响因素[J]. 火工品. 2000(4): 7-9.
- [4] 李炳炎. 炭黑生产与应用手册[M]. 北京: 化学工业出版社,2000.
- [5] 周遵宁,潘功配,李毅. 烟幕箱中红外烟幕瞬时质量浓度测试计算方法[A]. 中国兵工学会第十一届火工烟火学术年会论文集[C]. 北海: 中国兵工学会火工烟火学术专业委员会,2001.5: 349-353.

## Experimental Research of the Influence of Adding RP on Smoke Characteristic of Modified HC

ZHOU Zun-ning, PAN Gong-pei, LI Yi, GUAN Hua

(Department of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Based on modified HC, the influence of red phosphorus (RP) content on smoke spectrum transmissivity, initial concentration, settling velocity and particle size distribution is studied. Smoke chamber experiment results show that when RP content is 0%, the average infrared spectrum transmissivity is 22.4% with smoke in 8~14 μm; when RP content is 10%, the average infrared spectrum transmissivity is reduced to 7.8% in the same smoke region.

**Key words:** RP; IR; smoke composition; transmissivity