

·测试、试验与仿真·

燃烧型炭黑烟幕红外遮蔽性能研究

保石¹, 周冶¹, 张紫浩^{1,2}, 阎俊宏¹

(1. 东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000; 2. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

摘要: 简要介绍了燃烧型炭黑烟幕的形成机理及其生成特性, 并对几种红外发烟剂形成的红外烟幕进行了热图像测试、对比和分析, 证明了其对3~5 μm 、8~12 μm 波段具有良好的遮蔽性能, 同时化合物含碳量、燃烧速度及温度又是影响炭黑生成量的主要因素。

关键词: 炭黑; 红外烟幕; 遮蔽性能

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-05-0085-04

Research on Infrared Smoke Obscuring Performance of Burnable Carbon Black

BAO Shi¹, ZHOU Ye¹, ZHANG Zi-hao^{1,2}, YAN Jun-hong¹

(1. Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China; 2. Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Sanhe 065201, China)

Abstract: The structure principles and production characteristics of the smoke of burnable carbon black are introduced. The thermal images of the infrared smoke formed by several kinds of infrared smoke agent are tested, compared and analyzed. The results show that the smoke has good obscuring characteristics at the band of 3~5 μm and 8~12 μm . And the main factors influencing the output of carbon black are the carbon content of compound, burning speed and temperature.

Key words: carbon black; infrared smoke; obscuring performance

炭黑是碳的同素异形体, 晶格结构类似石墨, 被视之为石墨的“准晶体”, 其形态介于结晶碳和无定形碳二者之间, 具有形态不规则、各向异性、外形独特等特点, 这一结构决定了其对可见光和红外辐射具有较强的衰减作用。炭黑烟幕是富碳化合物通过烟火燃烧反应炭化形成炭黑聚集体的一种烟幕, 炭黑聚集体质地疏松, 比表面积和粒径均比较大, 可对红外辐射产生强烈的吸收, 同时具有烟幕形成时间短、稳定性好、持续时间长、低毒无腐蚀等特性。

1 炭黑烟幕机理及生成特性

1.1 炭黑形成机理

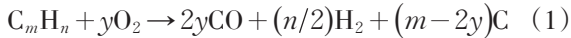
炭黑是由富碳化合物在不完全燃烧或在无氧条

件下热裂解生成的。富碳化合物在一定的高温条件下裂解、脱氢、聚合和环化凝聚, 生成炭黑晶核, 由于表面的聚集或附聚作用, 晶核通过极小炭黑粒子的表面沉积过程以及小颗粒的联结或合并过程, 最终熔结成长度约100~1 000 nm并具有一定密度的链状炭黑聚集体。炭黑形成过程是一个包括自由基、离子向分子转化进而生成还有数万个原子和氢碳比(H/C)高的大粒子过程。炭黑生成后存在有大量的分子混合物、基团和离子。例如以烃类原料脱氢后再聚合, 或先聚合为多环芳香烃再脱氢, 生成炭黑, 其生成路径如图1所示。

1.2 生成特性

炭黑型发烟剂的组成成分, 从体系上可以分为

四个部分:炭黑生成剂、能量供给剂、粘合剂、附加物。其中炭黑生成剂主要采用富碳型化合物,通过烟火燃烧反应脱碳、脱氧,随即转化成脱氢苯,脱氢苯在重新排列成苯的二价自由基,继而聚合成纤维型结构的炭黑聚集体。根据炭黑的形成机理,富碳化合物在燃烧反应中生成炭黑的热力学方程为



由炭黑生成的热力学方程可知,仅在 $m > 2n$ 时才能生成炭黑,亦即 C/H 比必须大于 1。

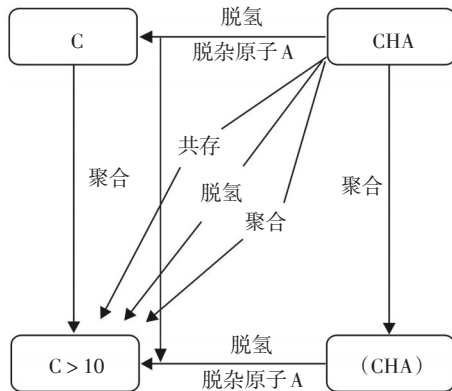


图1 炭黑生成路径

炭黑聚集体质地疏松,带有裂缝,比表面积和粒径均比较大,因此有较好的消光性能。根据国内外相关文献资料,文中选取了2种高分子有机物作为炭黑生成剂^[1],主要为芳香族衍生物,其分子结构中含有苯环或O、N等杂原子,在不完全燃烧时能释放出较多炭黑粒子。

能量供给剂是用于提供富碳化合物炭化形成炭黑粒子时提供温度和能量,一般由可燃剂和氧化剂组成,是发烟剂的基础。可燃剂需要具有足够的热效应,其燃烧热对于发烟剂燃烧时达到的温度影响很大,且发烟剂在燃烧温度下产物的状态是由可燃剂的氧化生成物决定的。粘合剂的使用目的是使发烟剂具有足够的机械强度,减缓药剂的燃烧速度,降低药剂机械感度,改善发烟剂的安定性,而附加物的作用是增加发烟剂的各种性能,如增强特种效应,降低感度,增加安定性,一般根据发烟剂的不同用途,不同配方,选择合适的附加物。

以金属粉和氧化剂作为能量供给剂,燃烧反应可产生超过 1 000 °C 的高温,其热量可以保证富碳化合物炭化形成炭黑聚集体粒子。添加物选取具有吸热能力的材料,主要用于平衡炭黑生成剂和能量供给剂之间的能量平衡,保证炭黑生成剂能稳定形成

高浓度的炭黑聚集体烟幕。

2 实验与分析

炭黑型烟幕对红外辐射的衰减主要表现为对吸收衰减,其遮蔽效果可由烟幕对某一波长(或波段)的红外辐射遮蔽率进行评价,烟幕的红外遮蔽率可通过烟幕遮蔽前后的热图像分析计算获得^[2-3]。

2.1 测试图像

将两种富碳化合物(A与B)与能量供给剂、粘合剂、附加物按照不同配比均匀混合后,经过过筛、干燥后压制成 200 g 样品,在自然环境中燃烧形成烟幕,利用热像仪和靶标系统记录炭黑烟幕的红外图像,通过测试距离、环境温度、被观测目标发射率等参数及内部校正参数进行补偿计算,可求得视场内各点的视在温度值 T 。红外测试图像如图 2 所示,热源温度测试结果见图 3~图 5。

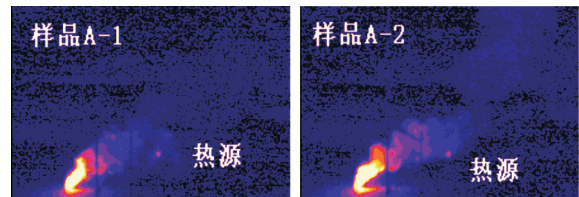


图2 富碳化合物A燃烧烟幕红外测试图像

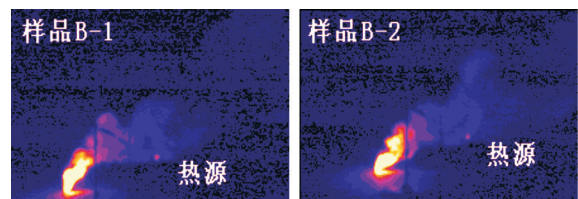
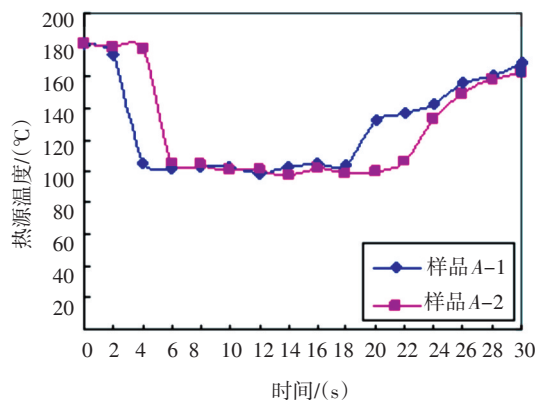
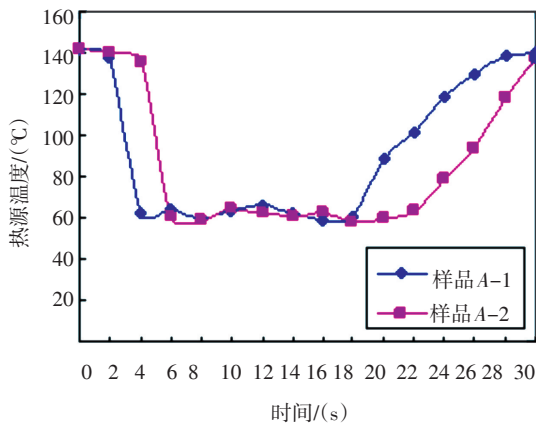


图3 富碳化合物B燃烧烟幕红外测试图像

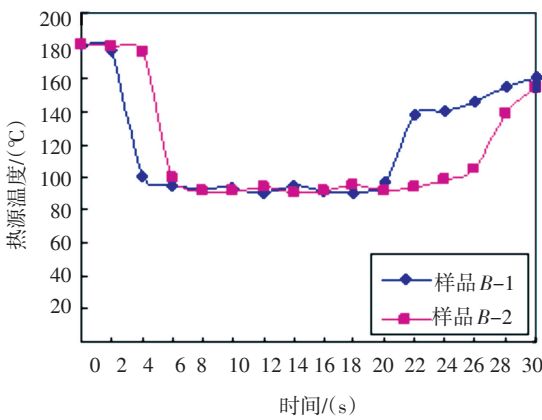


(a) 3~5 μm 波段

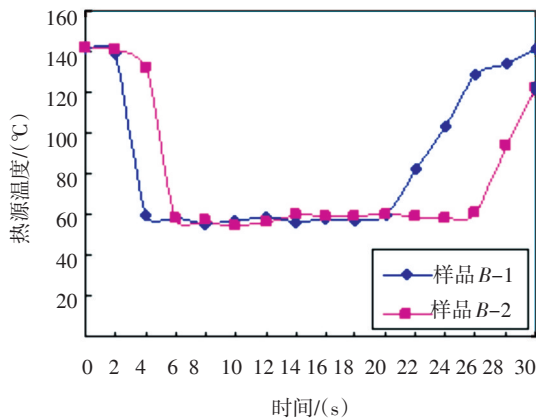


(b) 8~12 μm 波段

图4 样品A烟幕遮蔽热源温度测试结果



(a) 3~5 μm 波段



(b) 8~12 μm 波段

图5 样品B烟幕遮蔽热源温度测试结果

2.2 烟幕遮蔽率

根据红外热像仪获得的视场内各点的视在温度,通过温度对比法可以得出炭黑烟幕在对应波段的遮蔽率,遮蔽率 η 的计算公式为

$$\eta = 1 - \left| \frac{M(T') - M(T_m)}{M(T_0) + \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot M(T_b)} \right| \quad (2)$$

式中, $M(T)$ 为对应温度的波段辐射出射度, $M_{\Delta\lambda T} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} d\lambda$ (c_1 为第一辐射常数($3.7415 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$), c_2 为第二辐射常数($1.439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$), λ_1 、 λ_2 在中红外波段对应 $3 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$,在远红外波段对应 $8 \mu\text{m}$ 、 $12 \mu\text{m}$ ^[4-5]); ε 为热像仪设定的发射率(整个视场取一个值); T_0 为烟幕遮蔽前热源的视在温度; T_b 为背景温度; T_m 为烟幕视在温度; T' 为烟幕遮蔽后热源的视在温度。各种样品在中、远红外波段的遮蔽率计算结果见表1。

表1 炭黑烟幕遮蔽率计算结果

发烟剂编号	3~5 μm 平均遮蔽率	8~12 μm 平均遮蔽率	有效遮蔽时间 /(s)
A-1	81.69%	79.70%	16
A-2	82.22%	79.42%	19
B-1	85.66%	81.71%	18
B-2	85.41%	81.75%	22

2.3 影响因素分析

2.3.1 富碳化合物

以两种富碳化合物(A和B)为炭黑生成剂的发烟剂材料均可通过燃烧形成炭黑烟幕并有效遮蔽3~5 μm和8~12 μm波段的红外辐射,但在同等条件下,B型发烟剂的烟幕效果优于A型发烟剂,B型发烟剂燃烧形成的烟幕中炭黑含量更高,遮蔽率也更高,烟幕持续时间更长。这是因为富碳化合物B的分子式中碳氢比更高,而在燃烧反应过程中,碳与氢与氧发生反应的速度相同。因此,含碳量高的富碳化合物在燃烧过程中析出的碳也更多,炭黑生成量也更高。

2.3.2 燃烧速度和温度

在炭黑生成剂相同的条件下,样品1的成烟时间更快,但在燃烧反应后期,出现烟幕变为灰白,遮蔽率下降,表明烟幕中炭黑含量降低。这是因为样品1的发烟剂配方中能量供给剂含量较高,因此在燃烧

反应初期可以较快地达到富碳化合物的析碳温度,烟幕形成时间更短,但燃烧型炭黑烟幕的形成过程是一个自供热的链式反应,在反应过程中多余的热量会导致反应温度升高,反应加快,燃烧温度也随之升高,导致反应中生成的炭黑在较高温度下继续与空气中的氧气反应生成CO和CO₂,使烟幕中的含碳量降低。

因此要保证发烟剂燃烧时能产生大量的炭黑粒子,必须保证发烟剂燃烧过程中有适当的燃烧速度和温度,保证燃烧温度在富碳化合物的析碳点附近,并在燃烧过程中的热量平衡及稳定燃烧。

3 结 论

富碳化合物燃烧形成的炭黑烟幕在中、远红外波段的遮蔽率可达80%以上。在富碳化合物燃烧形成烟幕的过程中,燃烧反应温度和速度是影响最终炭黑生成量的主要因素,通过调整富碳化合物与能量供给剂的配比,可有效控制燃烧温度和速度,从而提高烟幕的炭黑生成效率和持续时间。

参考文献

- [1] 刘泽龙,郭建广,缪云坤,等. 几种燃烧型有机类干扰烟幕的红外干扰性能比较[J]. 红外技术, 2006, 28(2): 116-119.
- [2] 阎俊宏,高磊,闵江. 烟幕红外消光系数的热像仪测试[J]. 光电技术应用, 2012, 27(2):79-82.
- [3] 朱晨光. 红外烟幕遮蔽率测试方法研究[J]. 红外技术, 2004, 26(4):81-84.
- [4] 张建奇,方小平. 红外物理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004:9-10.
- [5] 陈衡. 红外物理学[M]. 北京:国防工业出版社, 1985.
- [6] 宋东明,刘顺民,王乃岩,等. 原材料粒径对烟幕红外消光能力影响的研究[J]. 火工品, 2005(2):6-9.
- [7] 姚禄玖. 烟幕理论与测试技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
- [8] 胡碧茹,吴文健,满亚辉,等. 红外热像仪定性评判烟幕的遮蔽效果[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(4):90-92.
- [9] 周遵宁. 均匀设计的红外发烟剂配方[J]. 火炸药学报, 2003, 26(2):76-79.

版 权 声 明

本刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中文科技期刊数据库》、《中国期刊全文数据库》、《中国学术期刊综合评价数据库》、美国《乌利希期刊指南》、波兰《哥白尼索引》收录期刊,加入了中国光学期刊网,建立了《光电技术应用》期刊网站,所刊载的文章在国内外数据库检索机构及网站(包括纸版、光盘版、网络版)报道时,不再征求作者意见。稿件刊登录用后作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给,并赠送当期样刊两份。