

# 气溶胶灭火剂的配方及优化设计的研究<sup>\*</sup>

赵 宇<sup>①</sup> 陈 斌<sup>②</sup> 黄寅生<sup>①</sup> 戴晓静<sup>①</sup> 张文成<sup>①</sup>

①南京理工大学(江苏南京,210094)

②江西三星气龙消防安全股份有限公司(江西南昌,330000)

[摘 要] 文章为了研究气溶胶灭火剂在工程应用中的灭火能力及所遇到的腐蚀问题,采用对比实验方法对 K 型和 S 型的气溶胶灭火剂的配方进行了研究。主要选择了以锶盐为主、钾盐为辅的氧化剂,设计并优化了几种配方。结果表明:从灭火效能、喷射时间、Cu 板颜色变化等性能参数可以看出,当  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$  与  $\text{KNO}_3$  的比值在 1.4 ~ 5.0 范围内效果最好,灭火效能为  $95 \text{ g/m}^3$ ,喷射时间为 42 s,且 Cu 板没有明显地变绿,既保证了气溶胶的灭火能力,又较好地解决了腐蚀性的问题。

[关键词] S 型气溶胶 灭火剂 配方设计 灭火效能

[分类号] TQ569 TJ53+3

## 引言

20 世纪 70 年代,前苏联配制的灭火剂中选用的氧化剂主要有  $\text{KNO}_3$ 、 $\text{KClO}_3$  及  $\text{NaNO}_3$ ,燃料有硝酸胍和双氰胺等,还在配方中加了一些性能调节剂碳酸盐<sup>[1]</sup>。美国 Filter 等<sup>[2]</sup>研制的灭火剂组分中有卤碳化合物,且灭火能力低。如可夫<sup>[3]</sup>针对上述的配方进行了改进,在原料选择方面选择了硝酸钾、铁氰化钾、碳粉及少量的调节剂。

2001 年,乔海涛<sup>[4]</sup>介绍了气溶胶灭火剂的配方组成和性质,讨论了灭火剂的灭火机理。2002 年,张文超<sup>[5]</sup>研究出了水基气溶胶灭火剂,即 SQ 灭火剂。2003 年,王华<sup>[6]</sup>对 HEAE 灭火剂在原材料方面选择了钾盐物质。2004 年,罗震<sup>[7]</sup>等通过改变配方来减少残留物对被保护物的腐蚀。2006 年,马文丽<sup>[8]</sup>对新型气溶胶灭火剂的配方进行了配制,得出了氧化剂与可燃剂质量的最佳比为 2.878。2010 年,罗国庆<sup>[9]</sup>研究的配方中氧化剂的质量分数为 65% ~ 97%,可燃剂的质量分数为 3% ~ 35%,使其更加环保且充分利用本地资源。2010 年,郭洪宝<sup>[10]</sup>研究了气溶胶灭火剂的组成对普通电子设备的影响,选用钾盐的质量分数为 15% ~ 20%,锶盐的质量分数为 48% ~ 52%,此种配方比先前的更科学环保。

本文主要选择了氧化剂以  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$  为主、 $\text{KNO}_3$  为辅的复合型灭火剂,这样设计既保证了气溶胶灭火剂的灭火能力,又使其具有一定的抗腐蚀性。由于  $\text{SrO}$  的熔点为  $2450^\circ\text{C}$ ,远高于灭火剂生成

的反应温度区,不会使其过多地挥发,因此,灭火气体中固体微粒含量少且粒径小,不易沉降,更接近洁净气体灭火剂,同时也使灭火能力提高。

## 1 配方设计

### 1.1 气溶胶灭火剂原料的组成

气溶胶灭火剂由氧化剂、可燃剂和粘结剂等组成,氧化剂要选择含有效氧多、燃烧易释放、安全性好且不易形成毒性的化合物,本文选用了  $\text{KNO}_3$  和  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 。在选择燃料时,要选择极易被氧化且燃烧需氧量少、化学安全性好的化合物,因此选用了硝酸胍、双氰胺、碳粉。粘结剂选择了粘合力强且安定性好的化合物,如环氧树脂、糯米粉等。

### 1.2 气溶胶灭火剂的配方设计原理

气溶胶灭火剂也叫烟火型灭火剂,在进行配方设计时要以零氧平衡为基础,设计成负氧平衡,对气溶胶灭火剂的配方进行理论分析与计算。首先通过正交试验来确定部分成分的优化参数,进而算出氧化剂与可燃剂的配比。

K 型灭火剂的灭火能力较高,在原料的初步选择方面,主要选择了以钾盐为主的氧化剂,为了生成更多的惰性气体,使产物具有更好的灭火效果,可燃剂选择了双氰胺、石墨等。初步设计了 4 种配方,配方 1、2、3 为 K 型气溶胶灭火剂;配方 4 为 S 型气溶胶灭火剂。K 型灭火剂是以  $\text{KNO}_3$  为主氧化剂的气溶胶发生剂,S 型灭火剂是以  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$  为主氧化剂的气溶胶发生剂,见表 1 所示。

## 2 实验

<sup>\*</sup> 收稿日期:2012-03-22

作者简介:赵宇(1985~),女,硕士,主要从事气溶胶灭火剂方面的研究。

通讯作者:黄寅生(1962~)男,博士,教授,主要从事军事化学与烟火技术的研究。E-mail:huangyinsheng@sina.com

表 1 原料配方的质量分数 %

配方	Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	KNO <sub>3</sub>	可燃剂	粘结剂	燃速调节剂
1	—	56	39	5	—
2	—	69	26	5	—
3	—	63	30	5	2
4	46	23	26	5	—

2.1 实验结果与分析

按表 1 的原料配方,每种药剂取 5 g,放在 0.14 m<sup>3</sup> 的密闭容器中,对每种配方进行预点火,观察其燃烧性能。实验所选的火源为蜡烛和柴油。其中,灭火剂的喷射时间为灭火剂从点燃到燃烧结束所需要的时间;灭火时间为灭火剂从点燃到火源熄灭所需要的时间;反应速率为 1 s 内燃烧的药柱的长度,其燃烧性能参数如表 2 所示。

表 2 不同配方性能参数的测试

性能	火源	配方 1	配方 2	配方 3	配方 4
喷射时间/s	蜡烛/柴油	20	17	22	25
灭火时间/s	蜡烛	12	12	14	18
	柴油	14	15	16	21
反应速率/ (cm·s <sup>-1</sup> )	蜡烛	0.19	0.18	0.16	0.11
	柴油	0.17	0.15	0.14	0.08
火焰状态	蜡烛/柴油	强烈	强烈	强烈	较强烈
残渣形状	蜡烛/柴油	团状	团状	团状	粒状
产烟量	蜡烛/柴油	大	大	少	较少

由表 2 看出:配方 1、2、3 的灭火效率高,火焰燃烧剧烈,残渣呈团状;配方 4 产烟量较小,火焰比较剧烈,残渣呈粒状且燃速较低。产生这种现象的原因是:K 型灭火剂的固体产物主要有 K<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、KHCO<sub>3</sub> 3 种物质,且极易吸湿,并且均能与水溶液形成强碱性溶液,对被保护对象具有较强的腐蚀性;S 型灭火剂固体颗粒的熔点较高,不易形成腐蚀性物质,更接近洁净气体灭火剂。

2.2 配方的优化设计

综合 K 型灭火剂的灭火能力高,S 型灭火剂的腐蚀性小的优点,选择了氧化剂以 Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 为主,

KNO<sub>3</sub> 为辅的 S 型复合气溶胶灭火剂;可燃剂选用了硝酸胍,其质量分数为 35%。通过正交实验得到的优化参数为:调节剂 A 的质量分数为 3%,调节剂 B 的质量分数为 1%,调节剂 C 的质量分数为 2%,糯米粉的质量分数为 5%,碳粉的质量分数为 6%,在此基础上,加入 Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 和 KNO<sub>3</sub> 两种氧化剂,重新设计了 10 种配方,如表 3。

表 3 不同配方氧化剂的质量分数 %

配方	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	48	43	38	33	28	23	18	13	8	0
KNO <sub>3</sub>	0	5	10	15	20	25	30	35	40	48

表 3 的配制也是根据上述的配方设计原理,利用正交试验来确定灭火剂配方的优化参数,先确定可燃剂的质量分数,进而算出氧化剂中 Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 与 KNO<sub>3</sub> 质量分数的比例。配制上述 10 种配方的药剂各 5 g,预点燃后均燃烧,实验参数见表 4。

通过表 4 中的实验结果看出:

1) 配方 3、4、5 的性能参数符合条件,Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 与 KNO<sub>3</sub> 的配比为 1.4~5.0;2) 喷射时间越长,残渣量越少,灭火效果越好;3) 随着 Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 与 KNO<sub>3</sub> 比值的降低,喷射时间增大,产烟量增强,残渣率降低,但当降低到一定值时,喷射时间降低,产烟量降低,残渣呈团状,结块严重。随着灭火剂中 KNO<sub>3</sub> 含量的增加,分解热越多,燃烧速度越慢,灭火剂不能完全燃烧,当 KNO<sub>3</sub> 含量增加到一定数值时,使燃烧面的热平衡不能稳定,以致于燃烧无法持续下去。

鉴于以上的实验结果,对配方进行筛选和优化,配制 4 种配方,如表 5 列出。每种配方的药剂量为 5 g,预点燃的结果显示为:配方 5 产烟量大,火焰燃烧剧烈;配方 11 喷射时间为 30 s,火焰燃烧柔和且完全,产烟量较大,残渣呈疏松状;配方 12 喷射时间为 28 s,产烟量大,火焰燃烧剧烈;配方 13 喷射时间为 25 s,火焰柔和且产烟量大,残渣呈均匀的疏松状。

表 4 不同优化配方的性能试验

配方	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
燃烧程度	充分	充分	充分	充分	充分	充分	充分	不充分	不充分	不充分
产烟量	少	大	较大	较大	特大	较大	大	少	少	较少
火焰	柔和	柔和	柔和	柔和	较柔和	少许柔和	比较剧烈	不柔和	不柔和	不柔和
残渣形状	疏松	疏松	疏松	疏松	少许团状	少许团状	团状	结块较严重	结块严重	结块严重
残渣量/g	1.77	1.75	1.67	1.57	1.52	1.60	2.05	3.72	4.15	4.82
喷射时间/s	30	22	20	29	33	28	29	12	8	2

表 5 筛选及优化后的质量分数 %

配方	5	11	12	13
KNO <sub>3</sub>	20	—	15	8
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	28	45	40	38
调节剂 A	3	3	4	3
碳粉	6	6	6	6
调节剂 B	1	1	1	1
硝酸胍	35	35	35	35
糯米粉	5	5	5	5
调节剂 C	2	1	1	2
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	—	2	2	2

2.3 在 1m³ 的密闭空间内灭火能力的测试

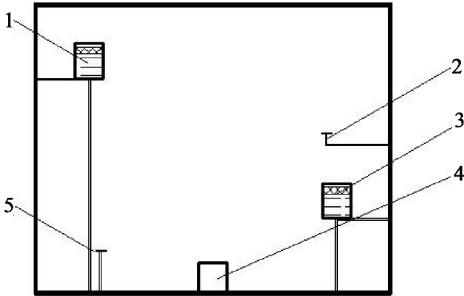
2.3.1 灭火能力的表征

通常所说的灭火能力主要体现在气溶胶灭火剂的灭火浓度和灭火时间上。灭火浓度是指不考虑任何安全系数,在确定的实验条件下扑灭单位体积的火灾所需要的灭火剂的最小质量,通常用 g/cm³ 来表示<sup>[11]</sup>。灭火时间是指从灭火剂的点燃到火灾熄灭所需要的时间,它与灭火剂的配方、火灾类型及火源的燃烧程度有关,一般情况下对火灾的灭火时间越短越有利<sup>[12]</sup>。

本实验是在实验室条件下进行的,由于实验设备及条件受限制,粗略地模拟了灭火浓度测试的试验条件,计算出的灭火浓度同样可以作为灭火能力的表征。用表 5 配方各配制 100 g 气溶胶发生剂,在 1m×1m×1m 的空间进行灭火能力的测试,灭火剂的药柱直径为 80 mm。

2.3.2 实验条件

- 1) 环境温度:27 ~ 30℃ ;
- 2) 启动电流:启动系统是由点火具、导线、直流电源组成。其中直流电流为 1A,电压为 12V ;
- 3) 火灾实验模型<sup>[13]</sup>:如图1所示,灭火室的尺寸为1m×1m×1m;火源:90#汽油;反应器内径:80 mm,高度:83 mm;油罐内径:80 mm,高度:100 mm;底部用水作垫层,水层:70 mm;油层:20 mm;油罐 A、B 的放置高度分别为610 mm和120 mm,它们距



1 - 油罐 A;2 - Cu 板 D 放置处;3 - 油罐 B;  
4 - 灭火剂燃烧反应器;5 - Cu 板 C 放置处

图 1 火灾装置模拟实验图

容器壁的距离都为 150 mm,把经过打磨的 Cu 板 D、Cu 板 C 分别放在 2、5 位置,通过 Cu 板的颜色变化来测试产生的固态沉降物是否具有腐蚀性<sup>[14]</sup>,其中,2、5 位置距离容器壁都为 180 mm,位置 5 的高度为 115 mm,位置 2 的高度为 450 mm。实验在 1 m³ 的密闭空间内进行,取两个油罐,里面放入 90#汽油,把配制的气溶胶发生剂放在密闭容器的中间位置。

2.3.3 实验结果与分析

从表 6 的实验可以看出:配方 5 和配方 12 的灭火浓度都较低,但是腐蚀性严重;配方 11 的抗腐蚀性好,缺点是灭火浓度较高;配方 13 的灭火浓度低,抗腐蚀较好,在工程应用中是可以运用的。

3 结论

- 1) S 型气溶胶灭火剂比 K 型气溶胶灭火剂的抗腐蚀性好,在选择氧化剂原料时应尽量选择铋盐;
- 2) 通过合理的配方设计,添加一些性能调节剂对配方的性能参数有一定影响;
- 3) Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 与 KNO<sub>3</sub> 的最佳配比为 1.4 ~ 5.0,随着 Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 与 KNO<sub>3</sub> 比值的降低,喷射时间增大,产烟量增强,残渣率降低,但当降低到一定值时,燃烧不完全,其喷射时间降低,产烟量降低,残渣呈团状,结块严重;
- 4) 配方 13 的综合灭火能力强且抗腐蚀性较好,可应用于实际工程中。

表 6 不同配方的性能试验<sup>[15]</sup>

配方	灭火浓度/ (g · m <sup>-3</sup> )	灭火时间/s		喷射时间/ s	铜板 C 颜色	铜板 D 颜色	残渣率/ %
		A	B				
5	100	40	66	54	稍微变绿	变绿	29.7
11	130	46	82	58	不明显	不明显	29.3
12	90	47	68	57	变绿	明显变绿	34.0
13	95	35	50	42	不明显	稍微变绿	29.1

参 考 文 献

[1] 李晓东,杨荣杰,李建民,等. 固体微粒气溶胶灭火剂产物腐蚀性研究[J]. 火灾科学,2002,11(3):142-146.

[2] 潘功配,杨硕. 烟火学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1997:108-125.

[3] Korostelev V. G. Aerosol-Generating Pyrotechnic Compositions with Components Interacting in the Combustion Wave[J]. Combust. Explo. Shock + ,2005,41(3):315-318.

[4] 乔海涛,杨荣杰. 气溶胶灭火剂的研究概括[J]. 消防技术与产品信息,1998(3):27-29.

[5] 张文超. SQ 灭火剂在自动灭火系统中的应用[D]. 南京:南京理工大学,2002:27-34.

[6] 王华,潘仁明,张永丰. 配方组成对气溶胶灭火剂燃速的影响规律的研究[J]. 化工时刊,2003,17(12):51-53.

[7] 罗震,刘艳平,景中兴. EBM 气溶胶灭火剂产物的潮解研究[J]. 河北化工,2004(1):34-36.

[8] 马文丽. 新型防腐气溶胶灭火剂制备及性能研究[D]. 西安:西安科技大学,2006:25-31.

[9] 罗国庆. 一种新型气溶胶灭火剂配方:中国, CN101810919A[P]. 2010-04-12.

[10] Guo H. , Zhang Z. Fire-extinguishing Aerosol Composition for Common Electric Apparatuses: US, 2010/0187465 A1[P]. 2010-07-29.

[11] 中国公安部. GB/T5907-1986 消防基本术语第一部分[S]. 1986.

[12] Back G. , Boosinger M. , Forssell E. , et al. An Evaluation of Aerosol Extinguishing Systems for Machinery Space Applications[J]. Fire Technology,2009,45(1):43-69.

[13] Zakharov Yu. A. , Nazarov, Yu. G. , Shcherbatova S. V. , et al. Atomic Absorption Spectrometry of Fire-extinguishing Aerosols[J]. J. Appl. Spectrosc. , 2002, 69(6):936-942.

[14] 马剑,刘向荣,麻梅侠,等. 钾盐型气溶胶灭火剂弥漫性及二次损害性研究[J]. 消防科学与技术,2010,29(1):60-63.

[15] 杨杰. 灭火气溶胶发生剂灭火机理及配方设计[J]. 火炸药学报,2003,26(4):84-86.

Research on the Formulation of Aerogel Extinguisher and the Optimization Design

ZHAO Yu<sup>①</sup>, CHEN Bin<sup>②</sup>, HUANG Yinsheng<sup>①</sup>, DAI Xiaojing<sup>①</sup>, ZHANG Wencheng<sup>①</sup>

①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Techology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②Jiangxi Samsung Aeridragon Control Safety Co. , Ltd (Jiangxi Nanchang, 330000)

[ABSTRACT] In order to study the fire extinguishing capacity and the corrosion problem of the fire extinguishing aerosols in engineering application, experimental comparison for the formulation of the fire extinguishing aerosols between K type and S type was carried out in this paper. Taking strontium salt as the main oxidant and potassium salt as the supplement, several formulations were designed and optimized. From the results of the extinguishing concentration, spray time, Cu board color change and other performance parameters, it can be seen that the best performance is obtained when the ratio of  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$  to  $\text{KNO}_3$  is 1.4 : 5.0. Its fire extinguishing efficiency is  $95 \text{ g/m}^3$ , spray time is 42 s, and Cu board has no obvious turned green, which not only ensures the aerosol extinguishing ability, but also provides a good way to solve the corrosion problem.

[KEY WORDS] S type aerosol, fire extinguishing agent, formulation design, extinguishing property

《爆破器材》第五届编委会委员名单  
(以姓氏笔画为序)

- 主 编:吕春绪
- 常务副主编:吴红梅
- 副 主 编:于立志 龙 源 许毅达 陆 明 杨祖一 熊代余
- 编委会委员:王宝兴 王越胜 刘永存 孙金华 张同来 李国仲 李晓杰 沈兆武 沈瑞琪
- 宋锦泉 郭子如 倪欧琪 黄寅生 曹端林 彭金华 蒋荣光 颜事龙