

组分含量对水基热气溶胶灭火剂 燃速影响规律的研究

周晓猛¹, 廖光焯¹, 潘仁明²

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026;

2. 南京理工大学化工学院, 南京 210094)

[摘要] 水基热气溶胶灭火剂是以替代哈龙为目的而研制的新一代灭火剂。通过水基热气溶胶灭火剂在燃烧器中燃烧, 产生以水蒸气和惰性气体为主体的气溶胶灭火介质, 经冷却后, 排放到被保护空间, 对火灾实施有效扑救。因此, 水基热气溶胶灭火剂在燃烧器中的燃烧速度, 对其灭火效率有重要影响。研究了硝酸钾、催化剂 (caty1)、水分、淀粉等组分含量对水基热气溶胶灭火剂的平均质量燃速的影响规律。

[关键词] 灭火剂; 气溶胶; 哈龙; 替代物; 燃烧速度

[中图分类号] X932 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2006) 01-0072-05

1 前言

由于哈龙灭火介质对大气臭氧层的破坏作用, 联合国通过了一系列公约对其进行限用或禁用^[1,2]。气溶胶灭火剂是为替哈龙灭火介质而开发的新一代灭火剂^[3,4]。已经产业化的气溶胶灭火剂如EBM、气龙等, 在灭火时产生的灭火介质中由于含有大量的碱金属氧化物固体颗粒, 其灭火介质具有能导电、易腐蚀等缺陷^[5-8]。为了克服气溶胶灭火剂的这些不足, 作者所在的气溶胶研究小组开发了一种称之为水基热气溶胶的新型灭火剂, 此灭火剂产生的灭火介质中不仅水汽质量分数在50%以上; 而且不含碱金属氧化物固体颗粒 (固体颗粒质量分数低于1.0%^[9])。由于水汽在灭火过程中不仅对火灾具有窒息作用, 还可以通过汽化吸收热量—冷凝释放热量—再汽化吸收热量—再冷凝释放热量的循环过程分散热量, 降低火场局部温度^[8], 因此, 水基热气溶胶灭火剂不但具有传统气溶胶灭火剂灭火高效的长处, 而且具有无污染, 无腐蚀等优点, 故广泛应用。水基热气溶胶灭火剂的灭火效率主要由2个因素决定: 一为灭火浓度, 它反映了灭火剂产生的灭火介质灭火能力; 二为灭

火介质的释放速度, 即灭火剂燃烧速度, 它反映了灭火剂产生的气溶胶灭火介质在着火空间达到灭火浓度所需的时间^[10,11]。然而, 如果水基热气溶胶灭火剂的燃烧速度过快, 燃烧器中由于燃烧产生的惰性气体不能及时释放而压力急剧升高, 达到一定程度后就会发生爆炸。为了选择水基热气溶胶灭火剂在燃烧器中适宜的燃烧速度, 作者研究了硝酸钾、催化剂 (caty1)、水分、淀粉等组分含量对水基热气溶胶灭火剂的平均质量燃速的影响规律。

2 实验

1.1 实验样品

实验用水基热气溶胶灭火剂为红褐色粉状混合物, 由主氧化剂、可燃物、催化剂、燃速调节剂及少量水分组成, 平均粒径在150 μm以下。氧系数是指实际存在的氧化剂 (元素O) 量与被氧化组分 (可燃物) 经燃烧氧化成最终产物时所需的氧化剂 (元素O) 量之差。对水基热气溶胶灭火剂而言, 氧化性元素为O, 可燃元素为C, H, N和金属元素。为了将在燃烧过程中产生的不完全燃烧产物, 如CO, NO等量降低到最小, 配方中各组分氧系数之和设计为零, 也就是说金属元素转化为全价氧

[收稿日期] 2004-10-09

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划 (九七三) 资助项目 (2001CB409600)

[作者简介] 周晓猛 (1975-) 男, 山东济宁市人, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室博士研究生

化物，C，H 分别转化为 CO_2 和 H_2O ，N 转化为 N_2 时，不存在多余或不足的氧量。

1.2 实验装置与测试方法

1) 实验装置由点火启动器、计时器、燃烧器、点火具等组成，燃烧测量装置如图 1 所示。利用该装置可测定燃速和记录观察实验现象。实验用的点火具与燃烧器的形状尺寸有良好的匹配关系，点火具能瞬间全面点燃灭火剂。在点火瞬间由计时器记录燃烧时间，并由此推算灭火剂的平均质量燃速。

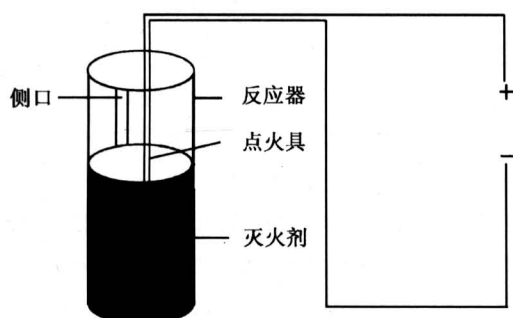


图 1 燃烧测量装置图

Fig.1 The combustion measure devise

2) 灭火装置中燃烧器结构如图 2 所示。图 1 所示燃烧测量装置中的燃烧器结构和图 2 中全尺度灭火装置使用的灭火器有较好的相似性。例如：水基热气溶胶燃烧过程中产生的液态产物都可以由沟槽排出，燃烧过程比较稳定，起始段和结束段燃烧速度基本相同。因此，燃烧速度的测量结果可真实

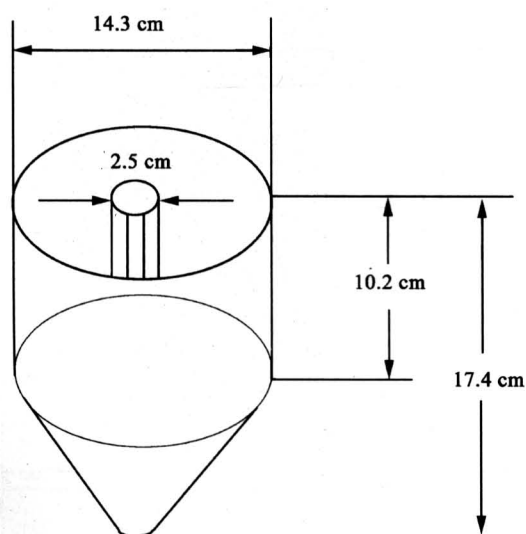


图 2 全尺度灭火装置中燃烧器结构图

Fig.2 Burner construction in full-scale fire extinguishing device

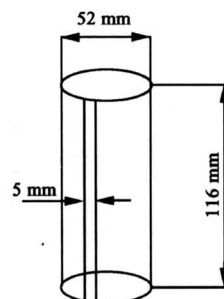
反映灭火过程中的燃烧速度。

1.3 实验方案及相关条件

1) 测定 $w(KNO_3)$ 对水基热气溶胶灭火剂燃烧速度影响实验条件如下：初温 $10\text{ }^\circ\text{C}$ ；试样 $100.0 \pm 0.5\text{ g}$ ；燃烧器为圆筒型，尺寸见图 3；秒表计时，精确度为 $\pm 0.01\text{ s}$ ；点火装置由 NGI-1 型点火具、导线和电源组成。

2) 测定 w_{catyl} 对水基热气溶胶灭火剂燃烧速度影响实验条件： $w_{catyl} = 0.5\% \sim 2.0\%$ ；灭火剂由 $w_{氧化剂} = 83.0\%$ （包括 KNO_3 ）； $w_{可燃物} = 16.8\%$ （包括淀粉）和 $w(H_2O) = 0.2\%$ 组成。其他条件同 1)。

3) 测定 $w(H_2O)$ 对水基热气溶胶灭火剂燃烧速度影响实验条件： $w(H_2O) = 0 \sim 0.58\%$ ； $w_{catyl} = 0$ ；其他条件同 2)。



点火电压 6 V； $w(KNO_3) = 0 \sim 77.7\%$

图 3 燃烧器结构图

Fig.3 Burner construction in combustion measure device

4) 测定 $w_{淀粉}$ 对水基热气溶胶灭火剂燃烧速度影响实验条件： $w_{catyl} = 0$ ；其他条件同 2)。

2 实验结果与讨论

2.1 KNO_3 的加入量对水基热气溶胶灭火剂平均质量燃速的影响

图 4 是不同 KNO_3 含量配方中灭火剂平均质量燃速实测值。燃速每点平行测 3 次，取平均值。由图 4 可知，随着 KNO_3 含量增加，水基热气溶胶灭火剂的燃速总体上呈上升趋势，当 $w(KNO_3)$ 在 $0 \sim 58.59\%$ 范围内变化时，对燃烧速度影响不敏感；当 $w(KNO_3)$ 在 $58.59\% \sim 79.62\%$ 范围内变化时，随 KNO_3 含量的微量增加燃速急剧增大。

实验中可以观察到当灭火剂中加入 KNO_3 后，在燃烧过程中灭火剂表面有液态物质生成，并均匀地覆盖在燃烧表面上。理论分析可知液态物质是由

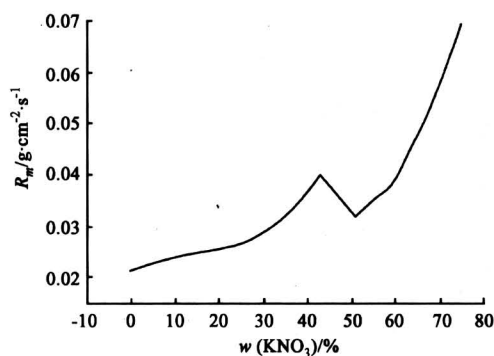
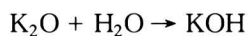
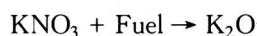


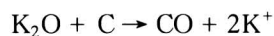
图4 KNO_3 含量与对应灭火剂的燃速关系曲线

Fig.4 The relation curve between combustion rate and concentration of KNO_3

K_2O 和 KOH 组成的混合物, 反应式为^[12,13]



在高温燃烧的条件下, K_2O 和可燃物分解产物可进行下列反应^[14]:



这些反应均为吸热反应, 故由 K_2O 和 KOH 组成的混合物覆盖在燃烧面上能使火焰温度降低, 并减少已经汽化的可燃分子裂解成自由基的能量, 抑制燃烧反应。同时, 由表 1 可知, 随 KNO_3 的加入, 灭火剂的活化能降低, 故燃烧反应随 KNO_3 含量增加又呈现加快趋势。当 KNO_3 含量较低时, 由于液态物质生成量很小, 故加快作用强于遏制作用, 因此灭火剂的燃烧速度随 KNO_3 含量增加而上升; 当 KNO_3 含量达到一定量时, K_2O 和 KOH 组成的混合物对燃烧的强烈遏制作用占据主导地位, 故灭火剂的燃烧速度随 KNO_3 增加而下降; 但当 KNO_3 含量进一步增加时, 灭火剂初期的快速燃烧反应使生成的液态物质不能在燃烧面上形成积累, 从而没有形成对燃烧反应的抑止作用, 故此燃速随 KNO_3 含量增加而增加。

表 1 KNO_3 加入量和活化能间的关系

Table 1 The KNO_3 content and corresponding active energy

试样	1	2	3
$w(\text{KNO}_3)/\%$	18.09	46.35	67.55
活化能/ $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	151.01	91.28	48.05

2.2 催化剂对燃速的影响

图 5 是催化剂 (catyl) 含量与燃烧速度之间

的关系曲线。其中, 每个燃烧速度数据重复测量 3 次, 取平均值。由图 5 可知 w_{catyl} 为 0%~1.0% 范围内时, 燃烧速度随 catyl 含量的增加而上升, 当 w_{catyl} 在 1.0%~2.0% 范围内时, 燃烧速度随 catyl 含量的增加而下降。

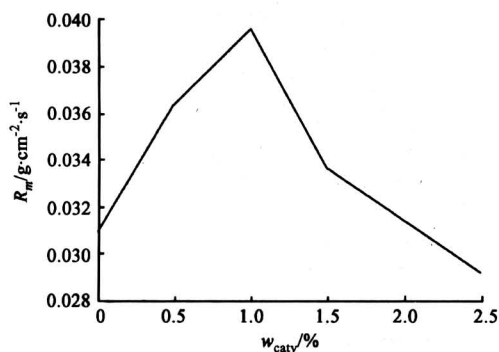


图 5 catyl 含量与对应的灭火剂燃速曲线图

Fig.5 The relation curve between combustion rate and catalyzer content

水基热气溶胶灭火剂是由颗粒状的氧化剂和还原剂组成的自身含氧的固体燃烧剂, 与复合推进剂相比, 其组成、燃烧特性极为相似。为此作者借助复合推进剂的燃烧模型来分析提高水基热气溶胶灭火效率的基本途径。

美国科学家 Summerfield 在分析复合推进剂组成特征和燃烧特征的基础上, 提出了复合推进剂的 GDF 燃烧模型, 并建立了复合推进剂线形燃速与压力 p 之间的关系式^[15]:

$$1/r = a/p + b(d)/p^{1/3} \quad (1)$$

其中: a 为化学反应时间参数, 与推进剂的性质有关。 $b(d)$ 值大小反映了扩散火焰的扩散混合速度对燃速的控制程度, 与推进剂的粒度有关。

表达式分别如下:

$$a = \frac{\rho_p R_u T_g}{M_g} \times$$

$$\left[\frac{c_s(T_s - T_0) - Q_s}{\lambda_g(T_g - T_s)B \cdot \exp(-E_g/R_u T_g)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$b(d) = \mu^{1/3} \rho_p \left(\frac{R_u T_g}{M_g} \right)^{5/6} \times$$

$$\left[\frac{c_s(T_s - T_0) - Q_s}{\lambda_g(T_g - T_s)(p_0 D_{g0})} \right]^{1/2} \quad (3)$$

其中 D_{g0} 为标准大气压下气体扩散系数的平均值; p_0 为标准大气压; T_0 为标准温度; C_s 为比热; Q_s 为灭火剂汽化时净放热量^[16]。

由式 (1), 式 (2) 和式 (3) 可知, 采用以下

途径将有利于燃速的提高：**a.** 提高灭火剂导热系数和增加反应放热量；**b.** 降低反应活化能；**c.** 降低热容，增强气相燃烧反应向固相的热反馈。

作者采用催化剂的主要成分是铝粉和 Fe_2O_3 。增加铝粉含量可以提高灭火剂的导热系数，增加反应放热量，故灭火剂燃烧速度有随铝粉含量增加而上升的趋势； Fe_2O_3 通常在水基热气溶胶灭火剂配方中作为正催化剂使用，它一方面降低了复合推进剂的反应活化能，另一方面提高了反应过程中的热反馈，故 Fe_2O_3 对灭火剂燃烧也有增强作用^[17]。然而，当在灭火剂组分中加入铝粉和 Fe_2O_3 时，灭火剂燃烧生成的液态残液不仅变得粘稠，且量也增加。由于灭火剂燃烧表面的液态残液会减少气相反应向固相的热反馈，所以燃烧速度又随铝粉含量增加而下降。

2.3 水分对水基热气溶胶灭火剂燃烧速度的影响

表 2 列出不同水分含量下水基热气溶胶灭火剂燃速实测值。燃速每点平行测 3 次，取平均值。

表 2 不同水分含量对应的灭火剂燃速

Table 2 The water content and corresponding combustion rate

$w(\text{H}_2\text{O})/\%$	0.58	0.13	0.06	0
$R_m/\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 10^{-2}$	1.99	2.94	3.00	3.12

由表 2 可知水分含量越高，燃烧速度越慢，水分含量与燃速基本呈反比关系。水分对灭火剂燃烧速度的影响是由于水为惰性物质，在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时发生汽化并吸收大量的热，因而在灭火剂燃烧时，水分使得燃烧速度降低。

2.4 淀粉对水基热气溶胶灭火剂燃速的影响

表 3 为不同淀粉含量下水基热气溶胶灭火剂燃烧速度实测值。燃速每点平行测 3 次，取平均值。

表 3 不同淀粉含量及对应的燃速

Table 3 The amylum content and corresponding combustion rate

序号	1	2	3	4	5
$w_{\text{淀粉}}/\%$	0	5.0	10.0	15.0	20.0
$R_m/\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot 10^{-2}$	3.83	3.18	1.62	1.44	1.41

从图 6 及表 3 可知随着淀粉含量的增加，燃烧速度变慢； $w_{\text{淀粉}}$ 低于 10.0% 时，灭火剂的燃烧速度随淀粉含量增加显著下降，当 $w_{\text{淀粉}}$ 高于 10.0% 时，燃烧速度随淀粉含量增加下降趋势趋于和缓。

因为和木粉相比较，淀粉的燃烧活化能更高，由复合推进剂的 GDF 燃烧模型可以得出，活化能升高，燃烧速度下降^[15]。

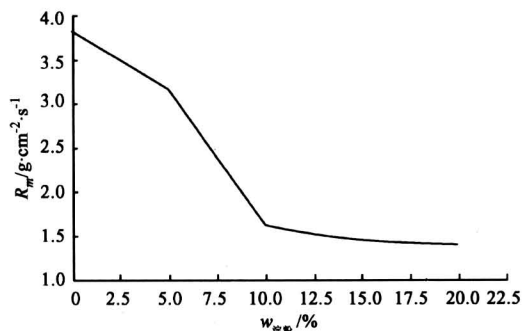


图 6 不同淀粉含量与对应的燃速

Fig.6 The relation curve between combustion rate and amyllum content

3 结论

1) KNO_3 的加入，可以大幅度提高水基热气溶胶灭火剂的产气速率，这有利于减少喷射时间，提高灭火效率。

2) 适量加入金属催化剂 caty1 可以提高燃速，caty1 加入量过大，水基热气溶胶灭火剂燃烧速度降低。

3) 降低灭火剂中的含水量有利于提高水基热气溶胶灭火剂的燃烧速度。

4) 在灭火剂中加入淀粉，灭火速度降低，由此可以通过改变水基热气溶胶灭火剂可燃物中木粉和淀粉的比率来调节燃速。

参考文献

- [1] Tapscott R E. Halon fire extinguishing substitutes [J]. Fire & Safety Magazine, 2001, 6~11
- [2] Tapscott R E, Skaggs S R, Dierdorf D. Perfluoroalkyl iodides and other new-generation Halon-replacements [A]. ACS Symp. Ser, 1995, 611 (Halon Replacements) [C]. 151~60
- [3] 陈继承. 中国淘汰哈龙行动 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000. 3~126
- [4] 潘仁明, 周晓猛. “哈龙”替代物的现状和发展趋势 [J]. 民爆器材, 2001, (4): 30~34
- [5] 余明高, 廖光焯, 等. 哈龙替代产品的研究现状及发展趋势 [J]. 火灾科学, 2002, 11 (2): 108~112

- [6] 松全才, 丁士友, 金韶华. 活性高效灭火组合物及其制备方法 [P]. 中国专利: 99116719. 7, 1997-04-02
- [7] 卞建峰, 郭鸿宝. 气溶胶灭火机理及其应用探讨 [J]. 消防技术与产品信息, 2001, 7 (4): 40~42
- [8] 景中兴. 高效灭火剂及其制备方法 [P]. 中国专利: 93105871. 6, 1994-11-30
- [9] 周晓猛, 潘仁明, 刘玉海, 等. 充装条件对水基热气溶胶灭火剂燃速影响规律的研究 [J]. 火灾科学, 2002, 11 (2): 76~78
- [10] 王清安. 城市火灾与燃烧 [M]. 合肥: 中国科技大学工程热物理系, 1990. 175~148
- [11] Drakin N V. Process and apparatus for extinguishing fires by a gas-aerosol mixture [P]. Eur. Pat. Appl. EP976, 423
- [12] Jia F, Gslea E R, Patel M K. The numerical simulation of fire spread within a compartment using an integrated gas and solid phase combustion model [J]. J Appl Fire Sci, 1999, 8 (4): 327~352
- [13] Zhegrov E F. Multicomponent aerosol-forming fire extinguishers containing flame suppressants and combustion inhibitors [P]. PCT Int. Appl. WO 0015, 305
- [14] Drakin N V. Process and apparatus for extinguishing fires by a gas-aerosol mixture [P]. Eur. Pat. Appl. EP 976423
- [15] 吴颐伦. 碱金属碳酸氢盐干粉灭火剂灭火机理 [J]. 消防技术与产品信息, 2001, (12): 29~32
- [16] 王克秀, 等. 固体推进剂及燃烧 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1983. 129~133

The Influence of Compositions of Water Aerosol Fire-extinguishing Agent on Its Combustion Rate

Zhou Xiaomeng¹, Liao Guangxuan¹, Pan Renming²

(1. State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230027, China;

2. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

[Abstract] The water aerosol fire-extinguishing agent (WAE) is a new generation of Halon replacement. When the fire is taking place, WAE will rapidly burn and generate a great deal of inert gas, hot mist and a little amount of particulates. After those combustion product are cooled in the cooling layer, they will be discharged into the ambience and extinguish the fire. So, to WAE, the combustion rate has an important effect on the fire extinguishing efficiency. This article mainly discusses the influence law of WAE's compositions on combustion rate.

[Key words] fire extinguishing agent; aerosol; Halon replacement; combustion rate

(cont. from p.57)

A New Algorithm of Fractal Image Coding

Wang Xiuni¹, Jiang Wei¹, Wang Licun²

(1. College of Information Science and Engineering, Shandong University,

Jinan 250100, China; 2. School of Communication and Information Engineering,

University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)

[Abstract] Because it takes too much of time in fractal image coding, the paper analyses the factors that affect the speed of fractal image coding, and proposes a novel idea by using the reformed variance (tentatively) to improve image fractal compression performance. A theorem is proved that the IFS cannot change the image blocks' reformed variance. Moreover, it gives a novel fractal image compression method based on the reformed variance. The simulation results illuminate that the new method can run fast, at the same time it can improve the PSNR when compared with other fast algorithms.

[Key words] fractal coding; image compression; variance