

## 水与 $K_2CO_3$ 的协同灭火作用

刘 皓<sup>1</sup>, 张天巍<sup>1,2</sup>, 夏登友<sup>1</sup>, 郭子东<sup>1</sup>

(1. 中国人民武装警察部队学院消防指挥系, 廊坊 065000;  
2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 实验研究了惰性灭火介质水与化学灭火介质的协同灭火作用. 通过测定纯水、含  $K_2CO_3$  添加剂细水雾及  $K_2CO_3$  干粉的最小灭火浓度, 分析了水与  $K_2CO_3$  的结合对两者单独使用时灭火有效性的影响. 结果表明: 含  $K_2CO_3$  添加剂细水雾可以分别提升纯水与  $K_2CO_3$  干粉的灭火效能, 并且灭火效能随着溶液中  $K_2CO_3$  含量的增加而增强. 水与  $K_2CO_3$  在火焰温度下发挥协同灭火作用的实质是水蒸气的存在对  $K_2CO_3$  有一定的活化作用, 使其更容易在平衡产物中生成大量的灭火活性物质 KOH.

**关键词:** 细水雾;  $K_2CO_3$ ; 灭火; 协同作用; 杯式燃烧器

中图分类号: X932 文献标志码: A 文章编号: 1006-8740(2018)01-0009-06

## Synergistic Effect of Fire Extinguishing by Water and $K_2CO_3$

Liu Hao<sup>1</sup>, Zhang Tianwei<sup>1,2</sup>, Xia Dengyou<sup>1</sup>, Guo Zidong<sup>1</sup>

(1. Department of Fire Commanding, The Chinese People's Armed Police Forces Academy, Langfang 065000, China;  
2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The work experimentally studied the synergistic effect of fire extinguishing by inert extinguishing medium water and chemical fire extinguishing media  $K_2CO_3$ . By measuring the minimum extinguishing concentration (MEC) of pure water mist, water mist with  $K_2CO_3$  additive and  $K_2CO_3$  dry powder, the effect of the combination of water and  $K_2CO_3$  on the effectiveness of fire suppression by water and  $K_2CO_3$  used individually was analyzed. The results show that water mist containing  $K_2CO_3$  can enhance the fire extinguishing efficiency of pure water and  $K_2CO_3$  dry powder, respectively, and the fire extinguishing efficiency was enhanced with the increase of  $K_2CO_3$  content in the solution. The essence of synergistic role of water and  $K_2CO_3$  under flame temperature lies in the existence of water vapor, which could activate  $K_2CO_3$ , making it easier to generate a large amount of gaseous KOH, an active substance for fire extinguishing, in the equilibrium products.

**Keywords:** water mist;  $K_2CO_3$ ; fire extinguishing; synergistic effect; cup-burner

随着哈龙系列灭火剂的禁用, 寻找哈龙替代品逐渐成为灭火剂研究领域的热点问题. 细水雾与干粉灭火剂可以扑灭多种类型火灾<sup>[1-4]</sup>, 其灭火效能高、环境友好并且成本低廉等特点成为了卤代烷系列灭火

剂的主要替代品. 前人的研究表明在两种不同的灭火介质之间存在协同灭火作用, 即两种灭火介质混合物的灭火效能高于任何一种灭火介质的灭火效能<sup>[5]</sup>, 因此, 将细水雾与干粉相结合, 研究含添加剂细水雾

收稿日期: 2017-01-04.

基金项目: 河北省重点研发计划自筹资金资助项目(15215605); 灭火救援技术公安部重点实验室开放课题资助项目(kf201604).

作者简介: 刘 皓(1982—), 女, 博士, 讲师.

通讯作者: 刘 皓, liuhao406@outlook.com.

的灭火有效性在学术上具有重要意义并且具有潜在的社会效益与经济效益。

目前在灭火剂的研究中关注的问题是最小灭火浓度和灭火有效性影响因素等. Sakurai 等<sup>[6]</sup>应用杯式燃烧器得到纯水细水雾的最小灭火浓度为 12.6%，并研究了杯式燃烧器本身的设计参数，如燃烧杯厚度对细水雾最小灭火浓度的影响. Hamins<sup>[7]</sup>应用杯式燃烧器测定了  $\text{NaHCO}_3$  的最小灭火浓度并肯定了碱金属盐的化学灭火效能. 朱鹏等<sup>[8]</sup>研究了碱金属盐  $\text{K}_2\text{CO}_3$  和  $\text{CH}_3\text{COOK}$  抑制熄灭食用油火灾的灭火效能. 研究发现，含添加剂细水雾的灭火效能随溶质质量分数的增加而增强，但增强的趋势逐渐减小，当质量分数超过 20% 时，继续增大质量分数对灭火效能几乎没有改变. 随后，Zhang 等<sup>[9-11]</sup>应用杯式燃烧器法测定了 6 种含碱金属盐添加剂的细水雾的最小灭火浓度，并进行了含钾盐添加剂细水雾抑制熄灭食用油火及其冷却特点影响因素的相关研究. 但是，上述研究只单独考虑了纯水、干粉或含添加剂细水雾的灭火有效性，并未考虑三者的内在联系，并且不同研究者所开展的实验条件并不完全相同，不利于含添加剂细水雾灭火有效性的评价以及添加剂的选型和推广应用。

本文应用杯式燃烧器，在同一实验平台下测试纯水细水雾、质量分数分别为 1%、2% 和 5% 的  $\text{K}_2\text{CO}_3$  添加剂细水雾及  $\text{K}_2\text{CO}_3$  干粉的灭火有效性，讨论惰性灭火介质与化学灭火介质间的协同灭火作用，并依据热力学计算软件 HSC Chemistry6.0 研究水蒸气对  $\text{K}_2\text{CO}_3$  的活化作用，为碱金属盐添加剂的选型提供理论指导。

## 1 实验设备与方法

杯式燃烧器实验系统如图 1 所示. 主要由燃烧杯、外罩、底座、细水雾发生及控制系统、支撑台架、燃料及氧化剂接口、细水雾收集系统、小型干粉储罐和数据分析测试系统组成. 燃烧杯与外罩同轴放置. 实验过程中，燃料与氧化剂同轴流动，灭火剂和氧化剂由氧化剂接口进入携流管道. 燃烧杯两侧的分体式激光粒度仪用于测试到达燃烧杯口雾滴和粉体的粒径大小。

为保证携流进入火焰区的细水雾颗粒均匀且流场稳定，在携流管道入口设置 3 层金属丝网平整气流. 由于装置器壁和金属丝网的冷凝作用和颗粒间的碰撞作用，细水雾随氧化剂上升的过程中会有一定的损失，在石英玻璃管口设置细水雾收集装置，通过

装置中脱脂棉及吸水硅胶质量的变化可以真实记录实验过程中实际到达燃烧杯出口处的水雾量。

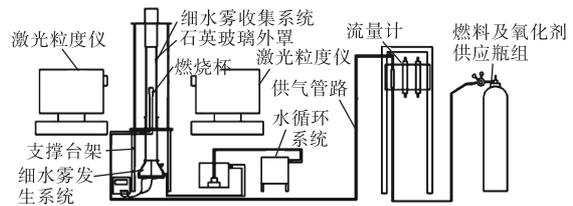


图 1 杯式燃烧器实验系统

Fig.1 Cup-burner experimental system

细水雾灭火实验中，燃料为甲烷，流量为 0.32 L/min；氧化剂为空气，流量为 40 L/min. 实验步骤如下：点燃甲烷气体，经过 60 s 达到稳定燃烧后，通入灭火剂，气体灭火剂用转子流量计控制流量，液体灭火剂用雾化模块数和电压控制细水雾在携流空气中的质量分数. 改变灭火剂的量，使火焰稳定燃烧 60 s 后再进行下一次改变，直到火焰熄灭为止. 通过计算每升空气中细水雾的含量得到细水雾的最小灭火浓度。

干粉灭火实验中，燃料、携流空气的流量与最小灭火浓度的测试过程与细水雾灭火实验相同. 不同的是需对杯式燃烧器实验系统进行改进，去掉水循环系统及收集系统部分，换为小型干粉压力储罐，储罐的进气口连接带有减压阀的空气瓶，使用空气作为供应干粉至火焰区的气体，调节减压阀的压力来调节供粉量，通过计算干粉储罐中粉体质量的改变计算干粉的最小灭火浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 携流灭火剂单体颗粒的受力分析

单个液滴在携流管道中主要受气流曳力、空气浮力和重力作用，当携流气体流速达到某一值时，三者平衡，液滴静止在管道中，说明在携流气体流速为定值时，细水雾粒径必须小于某一值，才能在携流气体的带动下到达火焰区参与灭火. 单个液滴静止时受力平衡为

$$F_1 + F_d = F_g \quad (1)$$

即：

$$\rho_g V g + C_D S \Delta p = \rho_l V g \quad (2)$$

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho_g u^2 \quad (3)$$

式中： $\rho_g$  为空气密度， $\text{kg/m}^3$ ； $V$  为液滴的体积， $\text{m}^3$ ； $S$  为液滴在运动方向上的投影面积， $\text{m}^2$ ； $C_D$  为曳力系数； $\Delta p$  为液滴所受流体压强， $\text{Pa}$ ； $\rho_l$  为液体密度， $\text{kg/m}^3$ ； $u$  为携流空气流速， $\text{m/s}$ 。

方程(2)中的曳力系数  $C_D$  与雷诺数  $Re$  相关，由

Stokes 定律<sup>[12]</sup>可知, 假设液滴与粉体颗粒为刚性球体, 曳力系数的定义式为

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} \left( 1 + \frac{1}{6} Re^{2/3} \right) & (Re \leq 1000) \\ 0.424 & (Re > 1000) \end{cases} \quad (4)$$

雷诺数定义为<sup>[13]</sup>

$$Re = \frac{\rho_g u d}{\mu_g} \quad (5)$$

式中  $\mu_g$  为携流空气的运动黏度,  $m^2/s$ .

当  $Re < 1$  时,  $C_D = 24/Re$ <sup>[14]</sup>, 结合方程 (2) 和 (3), 得到

$$d = \sqrt{\frac{18\mu_g u}{(\rho_l - \rho_g)g}} \quad (6)$$

方程 (6) 是携流空气流量为 40 L/min 时, 液滴静止在携流管道中的临界粒径, 只有当液滴粒径小于临界粒径才能随着携流空气到达火焰区. 带入相关参数进行计算得到临界粒径  $d = 6.21 \times 10^{-5} m = 62.1 \mu m$ . 由激光粒度仪测试得到的不同灭火介质在最小灭火浓度时刻的颗粒粒径如表 1 所示.

表 1 不同灭火介质在最小灭火浓度时刻的粒径测试结果  
Tab.1 The droplet size of different extinguishing agents under the minimum extinguishing concentration

灭火剂	$D_{10}/\mu m$	$D_{32}/\mu m$	$D_{50}/\mu m$	$D_{90}/\mu m$
纯水	4.327	5.431	5.540	7.123
1% $K_2CO_3$ 溶液	4.433	5.556	5.666	7.256
2% $K_2CO_3$ 溶液	4.366	5.504	5.622	7.262
5% $K_2CO_3$ 溶液	4.451	5.576	5.686	7.267
$K_2CO_3$ 干粉	—	—	11.930	28.500

由表可知, 本实验中经超声雾化产生的细水雾粒径及由储罐输送的干粉粒径  $D_{90}$  均小于临界粒径, 因此, 可以认为实验过程中产生的细水雾及粉体颗粒能够在携流空气的带动下到达火焰区参与灭火, 具有较好的跟随性.

## 2.2 不同灭火介质最小灭火浓度的确定

图 2 给出的是不同灭火介质与  $CH_4$  扩散火焰相互作用过程中某一时刻的火焰颜色和外形. 由图可知, 与纯水相比, 加入其他灭火介质后, 火焰的外形与颜色均发生显著变化. 火焰夹角在灭火介质的作用下发生明显的变化, 图 2(a)~(d) 的火焰夹角分别为  $21.34^\circ$ 、 $19.08^\circ$ 、 $14.33^\circ$ 、 $11.12^\circ$ , 说明不同的灭火介质对火焰外形的影响不同, 灭火介质对火焰外形会产生一定的拉伸作用, 导致火焰夹角减小. 由于火焰受到钾盐添加剂的抑制作用, 火焰高度明显小于纯水抑制的火焰高度, 并且在燃烧杯口和石英玻璃管壁附近出现了大量固体颗粒, 同时出现明显的“彩色”火焰面. 由于  $CH_4$ /空气扩散火焰的温度最高可达

$1100^\circ C$ ,  $K_2CO_3$  在高温火焰下发生气化解, 参与到火焰的链式反应中, 导致火焰受到抑制作用, 高度降低, 并发生焰色反应<sup>[15]</sup>. 由于  $K_2CO_3$  在有无水蒸气条件下的表现不同, 导致参与燃烧抑制反应的机制不同, 因此, 虽然同为  $K_2CO_3$ , 所发生的焰色反应并不完全相同.

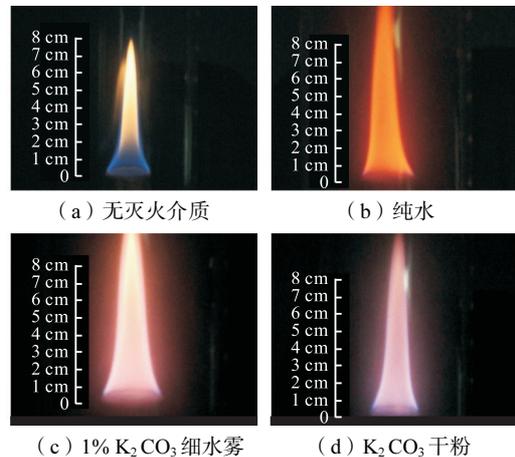


图 2 不同灭火介质作用下火焰颜色与外形

Fig.2 Flame color and shape under different fire extinguishing agents

图 3 为不同灭火介质抑制、熄灭  $CH_4$  扩散火焰的浓度与灭火时间关系图. 由图可知, 在无水蒸气环境中,  $K_2CO_3$  干粉的灭火效能明显弱于纯水细水雾, 这是由于  $K_2CO_3$  在  $CH_4$  火焰温度条件下相对稳

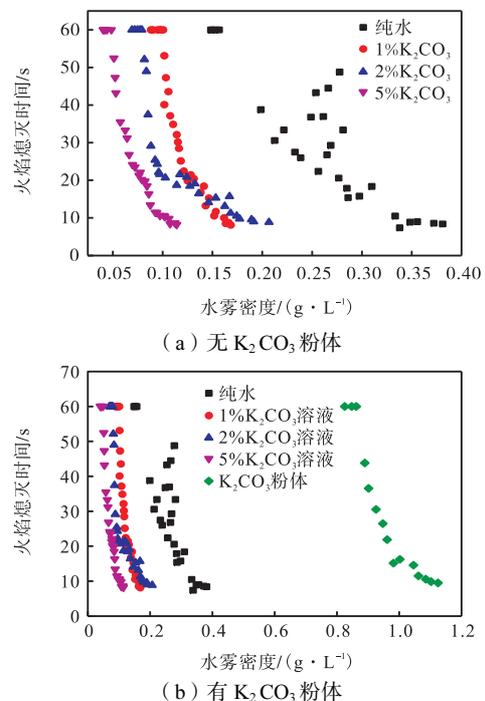


图 3 不同灭火介质抑制、熄灭火焰的浓度与灭火时间的关系

Fig.3 Relationship between extinguishing concentration and extinguishing time under different fire extinguishing agents

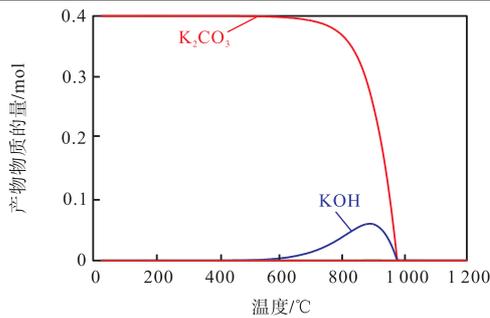
定. 虽然  $\text{CH}_4$  火焰温度在  $1\ 000\ ^\circ\text{C}$  左右, 高于  $\text{K}_2\text{CO}_3$  的熔点  $901\ ^\circ\text{C}$ , 但在大量  $\text{K}_2\text{CO}_3$  粉体的作用下, 火焰温度基本维持在  $\text{K}_2\text{CO}_3$  的熔点温度以下, 很难打开  $\text{K}_2\text{CO}_3$  的化学键发挥其化学灭火效能. 另一方面, 随着灭火介质的浓度达到某一临界值, 火焰熄灭时间逐渐成为定值, 说明继续增加灭火介质的浓度对灭火效能的提高意义不大, 而此临界值即不同灭火介质的最小灭火浓度.

不同灭火介质的最小灭火浓度实验结果列于表 2, 与纯水细水雾灭火相比灭火效率提高的百分比作为参考值列于表中.

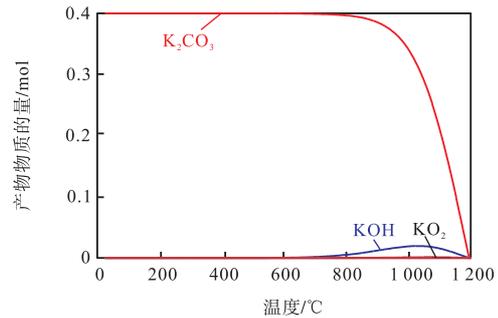
表 2 不同灭火介质的最小灭火浓度

Tab.2 The minimum extinguishing concentration of different extinguishing agents

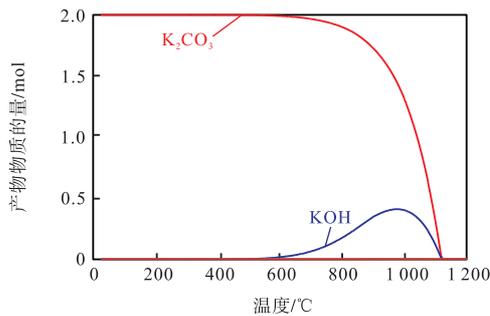
灭火剂	最小灭火浓度/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	提升百分比/%
纯水	0.266	0
1% $\text{K}_2\text{CO}_3$ 溶液	0.114	57.14
2% $\text{K}_2\text{CO}_3$ 溶液	0.085	68.05
5% $\text{K}_2\text{CO}_3$ 溶液	0.052	80.45
$\text{K}_2\text{CO}_3$ 干粉	0.961	-261.28



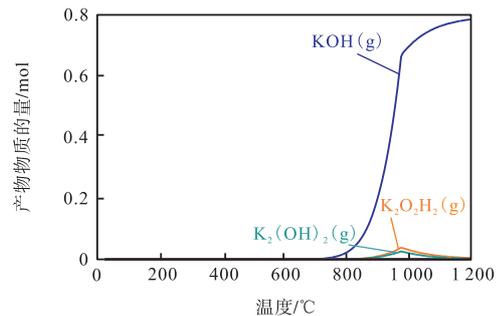
(a) 1% 的  $\text{K}_2\text{CO}_3$  平衡计算结果(固相)



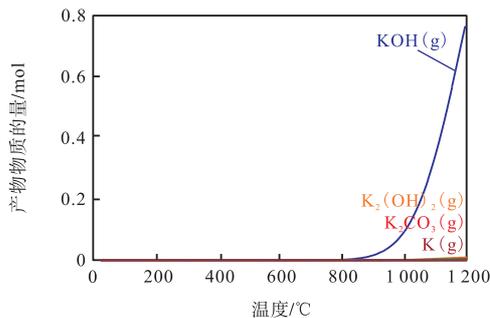
(b)  $\text{K}_2\text{CO}_3$  干粉平衡计算结果(固相)



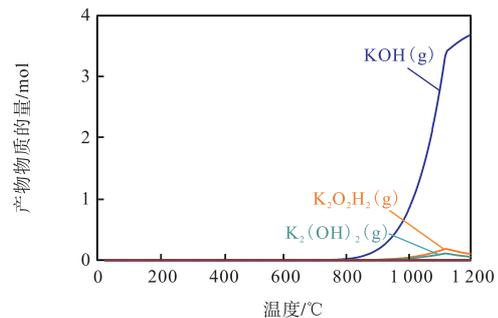
(c) 5% 的  $\text{K}_2\text{CO}_3$  平衡计算结果(固相)



(d) 1% 的  $\text{K}_2\text{CO}_3$  平衡计算结果(气相)



(e)  $\text{K}_2\text{CO}_3$  干粉平衡计算结果(气相)



(f) 5% 的  $\text{K}_2\text{CO}_3$  平衡计算结果(气相)

图 4  $\text{K}_2\text{CO}_3$  灭火介质与  $\text{CH}_4$ /空气火焰相互作用产物随体系温度的变化

Fig.4 Variation of the products by the interaction between  $\text{K}_2\text{CO}_3$  and  $\text{CH}_4$ /air flame with system temperature

由表 2 中数据可知, 在水蒸气存在的条件下, 含  $\text{K}_2\text{CO}_3$  添加剂细水雾的灭火效能明显优于纯水细水雾, 并且纯水细水雾的灭火有效性随着  $\text{K}_2\text{CO}_3$  溶液质量分数的增加而增强. Cup-burner 实验中可以明显观察到无水条件下的  $\text{K}_2\text{CO}_3$  干粉不具有灭火有效性, 说明  $\text{K}_2\text{CO}_3$  干粉不具有明显的吸热降温的灭火作用. 但是, 与水结合后, 1% 的  $\text{K}_2\text{CO}_3$  溶液细水雾将  $\text{K}_2\text{CO}_3$  干粉的灭火效能提升 121.87%, 一方面说明在火焰温度下, 水蒸气对  $\text{K}_2\text{CO}_3$  有一定的活化作用, 另一方面说明  $\text{K}_2\text{CO}_3$  在水蒸气环境下发挥了化学灭火效能, 与惰性灭火介质水蒸气具有协同灭火作用.

### 2.3 水蒸气对 $\text{K}_2\text{CO}_3$ 灭火有效性的影响

应用化学热力学计算软件 HSC Chemistry 6.0 对  $\text{K}_2\text{CO}_3$  灭火介质与  $\text{CH}_4$ /空气燃烧体系相互作用的产物进行平衡计算, 得到产物随体系温度的变化, 如图 4 所示. 平衡计算过程中,  $\text{K}_2\text{CO}_3$  干粉的量与质量分数为 1% 的  $\text{K}_2\text{CO}_3$  溶液中溶质的量相同.

Jensen 和 Jones<sup>[16]</sup>的研究表明, 含 K 物质的火焰化学反应为



即含 K 物质的化学灭火作用是通过灭火活性物质 KOH 与火焰重要自由基 OH、H 等发生链终止反应而导致火焰熄灭的, 因此, 气态 KOH 为钾盐类灭火介质发挥化学灭火效能的关键物质<sup>[17]</sup>. 由图 4(a) ~ (c) 可知, 随着反应体系温度的升高, 固态  $K_2CO_3$  颗粒的量减小, 固态 KOH 的量出现先增加后减小的现象. 在  $K_2CO_3$  干粉体系中, 出现固态 KOH 时的温度高于有水存在条件下的值, 生成的 KOH 的量低于有水存在条件下的值, 这是由于水蒸气的存在增加了  $K_2CO_3$  的活性, 在火焰温度下发生了  $K_2CO_3$  的水解反应  $K_2CO_3 + H_2O \rightleftharpoons 2KOH + CO_2$ , 生成大量的 KOH, 而当温度高于 KOH 熔点温度 404 °C 时, 固态 KOH 逐渐熔融, 因此固态 KOH 含量会降低. 在水蒸气条件下,  $K_2CO_3$  活性增加的实质是由于体系中 KOH 的体积含量的不断增加, 降低了固态  $K_2CO_3$  转换成熔融态  $K_2CO_3$  的温度, 降低了打开  $K_2CO_3$  化学键并释放出 K 离子的“难度”.

另一方面, 由于 KOH 的熔点较低, 随着体系温度的不断增加, 越来越多的 KOH 熔化并蒸发成气态 KOH, 导致凝聚相 KOH 的量不断减小. 由图 4(d) ~ (f) 可知, 当含  $K_2CO_3$  的灭火介质与  $CH_4$ /空气燃烧体系达到化学平衡时, 体系中含量最多的物质为气态的 KOH 及气态 KOH 的同分异构体  $K_2O_2H_2$  及  $K_2(OH)_2$  等物质.  $K_2CO_3$  干粉体系中生成气态 KOH 物质的起始温度滞后, KOH 物质的量也低于含  $K_2CO_3$  添加剂的细水雾体系, 使得  $K_2CO_3$  干粉不利于灭火.

### 3 结 论

(1) 应用杯式燃烧器测试了纯水、含  $K_2CO_3$  添加剂细水雾及  $K_2CO_3$  干粉的最小灭火浓度, 发现  $K_2CO_3$  干粉几乎不具有灭火有效性, 含  $K_2CO_3$  添加剂细水雾能显著提高纯水和  $K_2CO_3$  干粉的灭火有效性, 并且灭火效能随着溶液中  $K_2CO_3$  质量分数的增加而增强.

(2) 纯水、质量分数分别为 1%、2%、5% 的  $K_2CO_3$  溶液和  $K_2CO_3$  干粉的最小灭火浓度分别为 0.266 g/L、0.114 g/L、0.085 g/L、0.052 g/L 及 0.961 g/L, 说明水蒸气的存在对  $K_2CO_3$  具有一定的活化作用, 含  $K_2CO_3$  添加剂的细水雾可以分别提升纯水和

$K_2CO_3$  干粉的灭火效能, 说明惰性灭火介质水与化学灭火介质  $K_2CO_3$  在火焰温度下具有协同灭火作用.

(3)  $K_2CO_3$  类灭火介质发挥化学灭火效能是在水蒸气存在的情况下, 在火焰中生成气态 KOH 并参与到火焰的链终止反应实现的. 水与  $K_2CO_3$  的协同灭火作用本质为水蒸气存在的条件降低了打开  $K_2CO_3$  化学键的“难度”, 使平衡产物中存在大量气态 KOH.

### 参考文献:

- [1] 丛北华, 翁 韬, 王喜世, 等. 细水雾抑制熄灭固体火的机理[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(1): 40-44. Cong Beihua, Weng Tao, Wang Xishi, et al. Fire suppression mechanism of solid fires with water mist[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2007, 13(1): 40-44 (in Chinese).
- [2] 秦文茜, 王喜世, 谷 睿, 等. 超细水雾作用下瓦斯的爆炸压力及升压速率[J]. 燃烧科学与技术, 2012, 18(1): 90-95. Qin Wenqian, Wang Xishi, Gu Rui, et al. Methane explosion overpressure and overpressure rise rate with suppression by ultra-fine water mist[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2012, 18(1): 90-95 (in Chinese).
- [3] 秦 俊, 廖光焯, 王喜世, 等. 细水雾抑制气体扩散火焰的机理研究[J]. 燃烧科学与技术, 2003, 9(5): 391-396. Qin Jun, Liao Guangxuan, Wang Xishi, et al. Study on extinguishing gaseous diffusion flame by water mist [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2003, 9(5): 391-396 (in Chinese).
- [4] 周晓猛, 姜丽珍, 陈 涛. 超细粉体灭火介质的表面特性及灭火性能[J]. 燃烧科学与技术, 2009, 15(3): 214-218. Zhou Xiaomeng, Jiang Lizhen, Chen Tao. Surface characteristics and fire extinguishing ability of superfine powder fire extinguishing agent[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2009, 15(3): 214-218 (in Chinese).
- [5] 卢大勇, 陈 涛, 周晓猛. 7FA 临界灭火浓度的测定及 7FA/BTP 协同灭火作用研究[J]. 安全与环境学报, 2015(4): 117-121. Lu Dayong, Chen Tao, Zhou Xiaomeng. On the determination of critical fire-stamping concentration of 7FA and the synergetic effect between 7FA and BTP in fire-suppression[J]. *Journal of Safety and Environment*,

- 2015(4): 117-121 (in Chinese).
- [ 6 ] Sakurai I, Suzuki J, Kotani Y, et al. Extinguishment of propane/air co-flowing diffusion flames by fine water droplets[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 2727-2734.
- [ 7 ] Hamins A. Flame extinction by sodium bicarbonate powder in a cup burner[J]. *Symposium on Combustion*, 1998, 27(2): 2857-2864.
- [ 8 ] 朱 鹏, 刘惠平, 徐凡席, 等. 含添加剂细水雾熄灭 K 类火灾的实验研究[J]. *消防科学与技术*, 2013, 31(5): 559-569.  
Zhu Peng, Liu Huiping, Xu Fanxi, et al. Experimental research on class K fire suppression by water mist with additives[J]. *Fire Science and Technology*, 2013, 31(5): 559-569 (in Chinese).
- [ 9 ] Zhang T, Han Z, Du Z, et al. Application of thermal mechanism to evaluate the effectiveness of the extinguishment of CH<sub>4</sub>/air cup-burner flame by water mist with additives[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(33): 15078-15088.
- [ 10 ] Zhang T W, Du Z M, Han Z Y, et al. Performance evaluation of water mist with additives in suppressing cooking oil fires based on temperature analysis[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 102: 1069-1074.
- [ 11 ] Zhang T W, Han Z Y, Du Z M, et al. Cooling characteristics of cooking oil using water mist during fire extinguishment[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 107: 863-869.
- [ 12 ] 王志彬, 李颖川. 气井连续携液机理[J]. *石油学报*, 2012, 33(4): 681-686.  
Wang Zhibin, Li Yingchuan. The mechanism of continuously removing liquids from gas wells[J]. *Acta Petroleisinnica*, 2012, 33(4): 681-686 (in Chinese).
- [ 13 ] Jayaweera T M, Yu H Z. Scaling of fire cooling by water mist under low drop Reynolds number conditions[J]. *Fire Safety Journal*, 2008, 43(1): 63-70.
- [ 14 ] 梁天水. 超细水雾灭火有效性的模拟实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 2012.  
Liang Tianshui. Numerical and Experimental Study of Fire Extinguishing Performance of Ultra-Fine Water Mist [D]. Hefei: State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, 2012 (in Chinese).
- [ 15 ] Lide D R, Frederikse H P R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*[M]. 78th Edition. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Inc, 1997.
- [ 16 ] Jensen D E, Jones G A. Kinetics of flame inhibition by sodium[J]. *Journal of the Chemical Society Faraday Transactions*, 1982, 78(9): 2843-2850.
- [ 17 ] Mchale E T. Flame inhibition by potassium compounds [J]. *Combustion & Flame*, 1975, 24(75): 277-279.