

# 油池火中细水雾强化火焰现象的研究

陆强, 李钙, 廖光焯, 黄鑫, 朱伟

(中华人民共和国公安部消防局科研处, 北京 100021)

**[摘要]** 细水雾与油池火相互作用之初往往会使燃烧剧烈, 强化火焰。实验研究与理论分析表明, 雾滴在可燃物表面蒸发是造成这种现象的主要原因。通过改变燃料种类、喷头雾特性参数等实验工况发现火焰强化程度主要决定于燃料的挥发性以及雾滴的直径、速度等参数。而在油盆中加水后燃料表面温度降低、火焰功率下降, 火焰强化现象随着加水量的增加而逐渐弱化乃至消失, 细水雾系统的灭火时间也明显缩短。

**[关键词]** 细水雾; 油池火; 共沸; 过压; 热释放速率

**[中图分类号]** P7 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)07-0078-05

自从蒙特利尔公约签定之后, 火灾安全领域就一直致力于寻找哈龙的替代物。由于具备清洁、高效、安全、稳定等特点, 细水雾渐渐走入人们的视野, 而今细水雾已被公认为一种理想的卤代烷替代物并应用于多种场所。

与传统水灭火系统相比, 细水雾灭火系统的一个重要优点在于其扑灭 B 类火的有效性。在细水雾扑灭油池火时经常出现燃烧强化现象, 即当细水雾接触火焰时, 火焰往往会突然爆发(扩张), 并且在一些实验中测得火焰的燃烧速率在较长时间内明显增加。在许多情况下, 爆发之后火焰随即被压制并熄灭。如果雾动力不足以使火焰熄灭, 在施加细水雾的情况下, 火焰仍将继续剧烈燃烧。

一些研究人员认为火焰的瞬间强化是由于雾滴撞击燃料表面导致燃料飞溅, 增大了蒸发速率。Kokkala 提到了当水雾撞击到高温、高沸点液体并大量蒸发时产生的火球。Mawhinney<sup>[1]</sup>在进行从柴油盘下部喷射细水雾以直接作用于火羽流的实验时, 也注意到了这个现象。通过观察以及热电偶显示, 在施加细水雾时, 高压下的火焰处于剧烈的湍流状态, 并且燃烧被强化。

Mawhinney<sup>[2]</sup>等测量了施加细水雾时, 正庚烷

和柴油油盘火的热释放速率, 其中实验工况均相同, 结果显示当燃料为柴油时, 细水雾系统启动后曲线中有一个“短钉”, 而后火焰于 60 s 内熄灭。对于庚烷火, 同样有一个“短钉”, 火焰被部分抑制, 其后热释放速率持续增加。细水雾灭火失败, 湍流火焰一直持续到燃料耗尽为止。在燃烧的一段时间内, 施加细水雾火焰的热释放速率超过了未施加细水雾的火焰的热释放速率。由于燃烧被强化, 总的燃烧时间缩短了。究其原因, 可能是水雾向火焰区带入了额外的空气而强化燃烧。Jackson<sup>[3]</sup>等提出扬沸可能是形成火焰强化现象的主要原因。此外 Bannister<sup>[4]</sup>等的研究表明在高湿度条件下燃料可以在较低的表面温度下持续燃烧。

上述原因均有可能导致燃烧加剧, 作者则试图从共沸的角度探讨细水雾对油池火的强化作用。

## 1 共沸

对于互不相溶的 2 种液体, 根据道尔顿分压定律当其共存时总蒸气压等于各分压之和, 在该体系中只要 2 种液体共存, 不管其相对数量如何, 体系的总蒸气压恒高于任一纯组分的蒸气压, 沸点则恒低于任一纯组分的沸点。众所周知, 当某种液体的

[收稿日期] 2005-03-25; 修回日期 2005-06-23

[基金项目] 国家基础研究发展规划资助项目(2001CB409609)

[作者简介] 陆强(1971-), 男, 广东中山市人, 中华人民共和国公安部消防局科技处博士

蒸气压等于大气压 (101 325 Pa) 时, 即开始沸腾。选取水、丙酮和茴香醚 3 种液体, 它们在 1 个标准大气压下的沸点分别为 100 °C, 57.5 °C<sup>[5]</sup> 和 153.9 °C<sup>[5]</sup>。图 1 为不同温度下水和丙酮混合物中各组份的分蒸气压图, 可以看到 53.4 °C<sup>[5]</sup> 下水与丙酮的蒸气压之和即达到 101 325 Pa, 也即该混合物的沸点降至 53.4 °C。图 2 则为不同温度下水和茴香醚混合物中各组份的分蒸气压图, 可知该混合物的沸点为 95.5 °C<sup>[5]</sup>。像这样 2 种或多种互不相溶的液体在低于各单相组分沸点的情况下开始沸腾的现象称为共沸。相对而言, 低挥发性液体由于其同温度下的蒸气压较低因而其沸点的降低更为明显。如茴香醚与水混合后其沸点从 153.9 °C 降至 95.5 °C。挥发性较强的液体其沸点的降低则并不明显, 如丙酮与水混合后其沸点仅下降了 4 °C 左右。

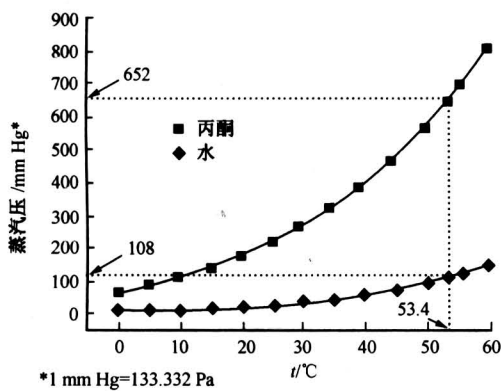


图 1 不同温度下水/丙酮的饱和蒸气压  
Fig.1 Saturated vapor pressure of water/acetone under different temperature

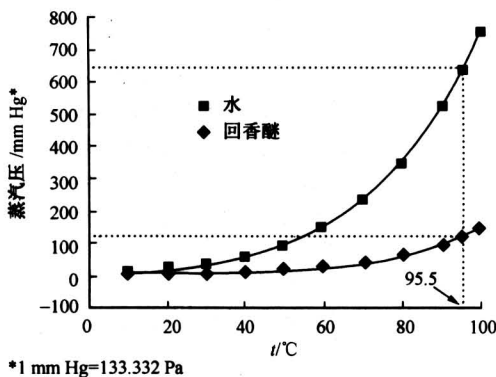


图 2 不同温度下水/茴香醚的饱和蒸气压  
Fig.2 Saturated vapor pressure of water/anisole under different temperature

当细水雾扑灭油池火时, 挥发性较强的液体燃料如苯、汽油和丙酮等由于沸点较低, 燃烧时液体表面温度也较低, 假定雾滴到达液体表面时的温度等于该液体的沸点, 对于丙酮而言此时雾滴的温度即为 57.5 °C, 水的蒸气压为 17 718 Pa, 两者的蒸气压之和为 119 056 Pa, 压力增加并不明显。对于挥发性较差的燃料如柴油、煤油和茴香醚, 由于其沸点较高, 燃烧时液体表面温度也较高, 此时如到达燃料表面的雾滴温度已达到其沸点, 则总的蒸气压就很高。如茴香醚的沸点为 153.9 °C, 100 °C 下水的饱和蒸气压为 101 325 Pa, 此时混合溶液的总蒸气压达到了  $2 \times 10^5$  Pa。这相当于在一个密闭容器中将茴香醚加热至 200 °C, 而后容器突然被打开, 自然会导致溶液的剧烈沸腾, 而沸腾的加剧一方面使得短时间内溶液的气化量大幅增加, 即增加了气相可燃物量, 另一方面又破坏了扩散火焰的稳定性, 导致湍流加剧, 从而最终强化了燃烧。

## 2 模拟实验

为了进一步定性分析共沸对细水雾强化燃烧的影响, 在细水雾模拟灭火实验平台上做了一系列相关实验, 喷头分别为细水雾喷头 1 (简称喷头 1)、细水雾喷头 2 (简称喷头 2) 和水喷淋喷头; 燃料分别为酒精、汽油、煤油和柴油, 采用  $\phi 350$  mm, 高 60 mm 的不锈钢油盆, 预燃时间均为 60 s。

首先研究细水雾与油池火相互作用时不同燃料对燃烧强化现象的影响, 其中除燃料不同外其他工况均相同; 然后改变喷头种类及喷头压力, 以考察不同雾特性参数对燃烧强化现象的影响; 最后在油盆中加入一定量的水作为自由面以考察其对燃烧强化及细水雾灭火有效性的影响。采用热电偶测量火焰区与燃料表面的温度并由数据采集系统实时记录。为更好地判断细水雾对火焰形态的影响还使用了数字摄像系统对灭火的整个动态过程进行记录。

## 3 典型实验结果及讨论

图 3 是未施加细水雾的煤油火; 图 4 为喷头 1 在 0.8 MPa 压力下启动瞬间的煤油火, 与图 3 相比火焰出现了明显的膨胀现象, 边界的湍动也很明显, 显示燃烧加剧了。煤油沸点为 210 °C ~ 310 °C, 汽油沸点为 35 °C ~ 195 °C, 酒精的沸点为 78 °C。在上述工况下测得的煤油表面温度为 240 °C 左右, 汽油为 80 °C 左右。假设雾滴到达煤油表面后的温度

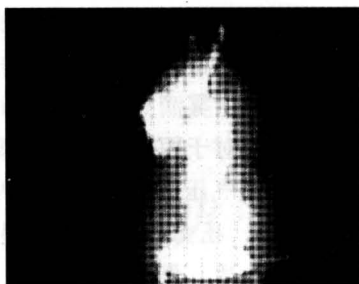


图 3 未施加细水雾的煤油火

Fig.3 Kerosene fire without water mist



图 4 细水雾施加瞬间的煤油火

Fig.4 Kerosene fire with water mist instantly

为  $100^{\circ}\text{C}$ ，到达汽油表面的温度为  $80^{\circ}\text{C}$ ，此时水的蒸气压分别为  $101\ 325\ \text{Pa}$  和  $47\ 329\ \text{Pa}$ ，则两种混合物的蒸气总压分别为  $202\ 649\ \text{Pa}$  和  $148\ 654\ \text{Pa}$ 。如前所述，这相当于将燃料在密闭容器内分别加压至  $202\ 649\ \text{Pa}$  和  $148\ 654\ \text{Pa}$  后突然释放，由于过压而导致溶液的沸腾加剧，大幅提高了溶液的气化速率，导致燃烧加剧。两种燃料燃烧加剧程度的不同可能源自过压的大小。对于酒精，由于与水互溶，因而混合物的蒸气压应遵循拉乌尔定律，即：

$$P_A = P_A^* X_A \quad (1)$$

其中  $P_A^*$  为该温度下该组分单独存在时的蒸气压， $X_A$  为溶液中该组分的摩尔分数，对酒精而言并不存在雾滴在燃料表面蒸发而形成的过压，也就不存在燃烧的强化现象。

水喷淋系统的水滴粒径一般为  $2 \sim 3\ \text{mm}$ ，此时其在火焰区内的温升为：

$$\delta T = \frac{Q}{C_p m} = \frac{Q}{C_p \rho V} \quad (2)$$

而液滴在火焰区内的吸热量为

$$Q = Q_r + Q_c \quad (3)$$

其中：

$$Q_r = \epsilon_w F_w \sigma_0 (T_f^4 - T_w^4) \quad (4)$$

$$Q_c = \alpha F_w (T_f - T_w) \quad (5)$$

$\alpha$  可由经典的 Ranz-Marshall 公式求取：

$$Nu^* = \frac{\alpha^* d_w}{\lambda} = 2 + 0.6 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

以上方程中， $\epsilon_w$  取  $0.96$ ， $T_w$  的初值为环境温度  $20^{\circ}\text{C}$ ，火焰区温度由热电偶测得为  $900^{\circ}\text{C}$ 。液滴在喷头出口处的速度为  $5\ \text{m/s}$ ，粒径取  $2\ \text{mm}$ ，火焰高度取  $0.6\ \text{m}$ ，因而液滴在火焰区的驻留时间为  $0.14\ \text{s}$ 。上述 4 式联立得到液滴在火焰区的吸热量为  $0.45\ \text{J}$ ，再由式 (2) 可得液滴在到达燃料表面时的温度为  $45^{\circ}\text{C}$ ，距其沸点尚远，因而也就不会产生共沸现象。

此后又在  $0.8\ \text{MPa}$  压力下采用喷头 2 进行相关实验，燃料为煤油，实验结果表明细水雾的施加并未产生任何火焰强化现象。为此针对这两种细水雾喷头的不同特性参数对其在火焰区的蒸发情况进行了简单计算。根据三维激光多普勒仪的测量结果，喷头 1 和喷头 2 的粒径分别取  $450\ \mu$  和  $150\ \mu$ ，喷头出口处的垂直方向速度分别为  $3\ \text{m/s}$ 、 $1\ \text{m/s}$ ，雾滴在火焰区的蒸发速率可由下式求取：

$$D_0^2 - D^2 = \lambda t \quad (7)$$

其中  $D_0$  与  $D$  分别为雾滴初始粒径与瞬时粒径， $\lambda$  为蒸发系数，可由下式<sup>[6]</sup>求取：

$$\lambda = \frac{8k \ln(1+B)}{C_p \rho} \quad (8)$$

其中  $k$  为水蒸气的导热系数， $C_p$  为水蒸气的热容， $\rho$  为水的密度， $B$  为传热数，其定义为：

$$B = \frac{C_p (T_{\infty} - T_b)}{L} \quad (9)$$

其中  $T_b$  为雾滴表面温度，取  $373\ \text{K}$ ， $T_{\infty}$  为雾滴周围的气体温度，取  $1\ 173\ \text{K}$ ， $L$  为水的汽化潜热，为  $2\ 257.1\ \text{kJ/kg}$ 。上述 3 式联立可得喷头 1 所喷雾滴在表面温度到达  $100^{\circ}\text{C}$  后完全蒸发需要  $1.66\ \text{s}$  时间，根据式 (2) 至式 (6) 可得雾滴表面达到  $100^{\circ}\text{C}$  所需时间大约  $0.03\ \text{s}$ ，故喷头 1 产生的雾滴在火焰区完全蒸发需时  $1.69\ \text{s}$ 。而由雾滴的初始速度可知雾滴在火焰区的驻留时间大约为  $0.2\ \text{s}$ ，即喷头 1 产生的雾滴并不能在火焰区内完全蒸发。而计算表明喷头 2 产生的雾滴在表面温度到达  $100^{\circ}\text{C}$  后完全蒸发所需时间为  $0.4\ \text{s}$ ，而雾滴表面达到  $100^{\circ}\text{C}$  所需时间近似为  $0.01\ \text{s}$ 。故喷头 2 产生的雾滴在火焰区完全蒸发需时  $0.41\ \text{s}$ 。而雾滴在火焰区的驻留时间大约  $0.6\ \text{s}$ ，即雾滴在火焰区内就完全蒸发而不能到达燃料表面，因而也就不存在共沸现

象了。

如前所述，以往对于细水雾强化火焰现象产生原因有着种种猜测，但如果认为是雾滴撞击燃料表面导致燃料飞溅而增大了蒸发速率，那么水喷淋系统的液滴对燃料表面的撞击效果显然更强，但此时除了火焰形状被压制外并无任何火焰强化现象产生。若认为是湍流使燃料的燃烧速率加快，那么喷头的改变只会影响火焰强化的强弱程度而不可能使其完全消失。对于额外空气说而言，在改变喷头后，细水雾仍然向火焰区带入额外空气，且由于雾滴粒径的减小，此种卷吸效果反而应该更强。此外扬沸的发生一般都需要一个较长的时间，且往往发生在 2 种或 2 种以上的混合液体中，在我们的实验场景中并不具备发生的条件。因此 Mawhinney 等人对于细水雾强化火焰现象成因的推测也许有其合理性，但均不属于主要原因。细水雾施加早期火焰产生强化现象的根本原因应当是细水雾到达燃料表面后的急剧沸腾所产生的过压。由于过压大大提高了燃料的沸腾速率，从而加剧了燃烧。

在进行的全尺度细水雾模拟灭火实验<sup>[7,8]</sup>中，考虑到节约燃料的用量并降低油盆温度以延长其使用寿命，在模拟油池火时往往在油盆底部加入一定量的水作为自由面。为了考察加水对细水雾系统灭火效果的影响，进行了相关的对比实验，实验中其它工况均相同。如图 5 所示，相同工况下加水后的灭火所需时间明显缩短，温度测定结果表明加水后燃料的表面温度明显降低。未加水时在稳态燃烧情况下煤油表面的平均温度约为 240℃，而加水后稳态燃烧条件下煤油表面的平均温度降至 150℃左右这显示出加水后由于共沸现象的存在，混合物的沸点较单一燃料（煤油）的沸点明显降低。

共沸对于燃烧情况的影响包括两个方面：其一，与未加水时相比，加水后燃料的表面温度降低，煤油的气化潜热明显升高。由于火焰温度较之燃料表面温度要高出很多，因而火焰对燃料表面的辐射通量基本不变，气化潜热的升高就必然导致燃料气化速率的减缓，从而使燃烧速率降低。其二，加水后的沸腾属于共沸，即混合物中的水同样也在气化，在燃料表面上方产生的水蒸气对火焰辐射有一定的衰减作用，更重要的是在火焰辐射不变的条件下由于水的蒸发吸热，燃料吸热量减小，气化速率降低，从而降低了火焰功率。在此种火灾场景下细水雾系统的灭火时间将随火焰功率的减小而

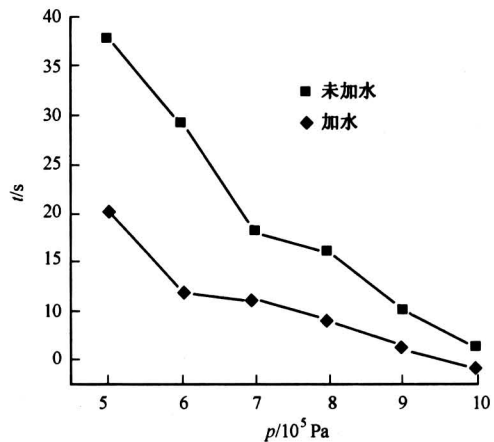


图 5 加水对细水雾灭火时间的影响

Fig.5 Effect on extinguishing time by adding water

缩短。

为了验证上述分析，采用锥形量热计对加水前后火焰功率的变化情况进行了测量，使用的油盆为 0.6 m × 0.5 m 的矩形油盆，燃料为 0 号柴油。测量结果见图 6。结果表明加水后稳态条件下火焰功率降低了 15% 以上。

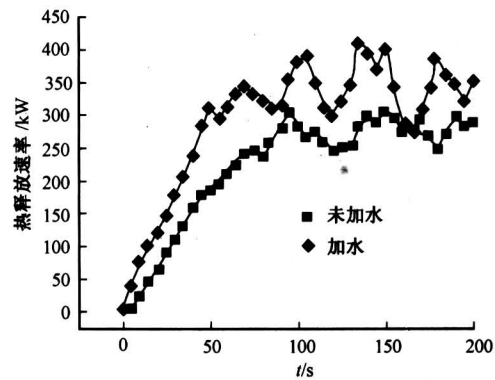


图 6 加水对火焰热释放速率的影响

Fig.6 Effect on heat rate by adding water

在加水后进行的灭火模拟实验中还发现，在加水量较小时，火焰强化现象依然明显，而当加水量逐渐增加时，火焰强化现象也随之弱化。当加水高度达到 40 mm 时，强化现象已完全消失。产生这种现象的原因主要与加水对燃料表面下方的温度梯度影响有关。当加水量很小时燃料表面下方的温度梯度较小，雾滴撞击燃料表面进入其内部后所受的冷却作用很小，其沸腾速率依然很高，因而仍存在着火焰强化作用。而随着加入水量的增加，燃料表面下方的温度梯度也逐渐增加，实验中热电偶的测

量结果表明在加水量达到 40 mm 厚时, 燃烧时距燃料表面 30 mm 处的温度只有 35℃, 此时雾滴在撞击燃料表面而后进入液体内部时将产生强烈的冷却效应, 从而导致其蒸发速率趋缓甚至停止, 火焰强化效果也因此而被弱化乃至消失了。

#### 4 结论

根据模拟实验结果与理论分析可以认为: 在一些火灾场景下导致细水雾施加初期火焰强化的主要原因可能是雾滴在到达燃料表面后的蒸发所产生的共沸现象, 因这些燃料的挥发性较差、沸点较高, 雾滴在此高温环境下蒸发而形成了燃料表面处的过压, 从而强化了燃料的沸腾, 使得燃料的气化速率提高, 燃烧加剧。决定火焰强化现象存在与否的主要因素是雾滴能否到达燃料表面且处于沸腾状态。燃料的沸点、加水量的多少以及雾滴的初始参数(粒径、速度等)则决定了火焰强化现象强弱。

需要注意的是实验结果表明加水将明显降低火焰的热释放速率并进而影响到模拟实验中的各项测试参数尤其是细水雾系统的灭火时间。考虑到在细水雾扑灭油池火的全尺度实验中在油盆中加水是非常普遍的, 认为有必要定量评估加水对实验结果的影响, 以保证全尺度实验结果的准确性与可靠性。此外由于加水量较大时细水雾对火焰的强化作用不再存在, 此时灭火模拟实验将无法再现真实的火灾场景, 实验意义也因而有所降低。

在细水雾扑灭油池火中, 细水雾施加初期对火焰的强化作用比较普遍的, 在实际火灾场景这种强化现象可能造成火灾的蔓延甚至危及消防人员的安全, 因而有必要对其影响因素以及该现象对细水雾

灭火过程产生的影响做进一步研究, 为细水雾灭火系统的设计提供准确翔实的设计参数。

#### 参考文献

- [ 1 ] Mawhinney J R. Characteristics of water mist for fire suppression in enclosures [ A ]. Proceedings of the Halon Alternatives Technical Working Conference [ C ]. Albuquerque NM: New Mexico Engineering Research Institute, 1993. 279 ~ 289
- [ 2 ] Mawhinney J R, Dlugogorski B Z, Kim A. K. A closer look at the extinguishing properties of water mist [ A ]. Fire Safety Science-Proceedings of the Fourth International Symposium [ C ]. Ottawa Canada, 1994. 47 ~ 60
- [ 3 ] Jackson C. Boilover [ J ]. Industrial Fire World, 15 ( 3 ): 2000. 26 ~ 35
- [ 4 ] Bannister W W, Euaphanasate N, Jahngen E, Whitten J. Polar effects in initiation of ignition, proceedings [ A ]. Halon Options Working Conference [ C ]. Albuquerque NM, 2001. 58 ~ 69
- [ 5 ] NFPA325, Fire Hazard Properties, Flammable Liquids, Gases & Volatile Solids [ M ]. Boston MA: National Fire Protection Association, 1994
- [ 6 ] Lefebvre A H. Atomization and Sprays [ M ]. New York: Taylor & Francis, 1989
- [ 7 ] Yuan L M, Charles P Lazzara. The effect of ventilation and preburn time on water mist extinguishing of diesel fuel pool fires [ J ]. Journal of Fire Sciences, 2004, 22 ( 5 ), 379 ~ 404
- [ 8 ] Pepi J S. Performance evaluation of a low pressure water mist system in a marine machinery space with open doorway [ A ]. Halon Options Technical Working Conference [ C ]. Albuquerque, NM, 1995. 58 ~ 69

## Investigation of Fire Enhancement in Pool Fire by Water Mist

Lu Qiang, Li Gai, Liao Guangxuan, Huang Xin, Zhu Wei

( Science & Technology Division of Fire Department, MPS, Beijing 100021, China )

[ Abstract ] In the process of water mist fire suppression the phenomenon of fire expansion may be found initially. Experiments and theoretic study show that evaporation of mist on the surface of fuel plays a crucial role in the fire expansion. In experiments of varied conditions, it is found that volatility of fuel and characteristics of water mist determine the degree of fire intensification. It is found that water in the bottom of tray will make fuel surface temperature and fire heat release rate descend. And with increase of water quantity, fire intensification will be weakened, extinguishing time also be shortened. So further research on change of fire heat release rate owing to water pouring is necessary to ensure the reliability of experiment data.

[ Key words ] water mist; pool fire; azeotropic; overpressure; heat release rate