科学通报 2008 年 第 53 卷 第 14 期: 1724 ~ 1729
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

细水雾与煤油火相互作用机制研究

周晓猛[①], 秦俊[②], 廖光煊[②]

① 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071;
② 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026
E-mail: zhouxm@nankai.edu.cn

2007-10-19 收稿, 2008-06-10 接受
国家重点基础研究发展计划(编号: 2001CB409600)和中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室开放课题(编号: HZ2006-KF10)资助项目

摘要 通过以锥形量热计为基础的小尺度灭火试验平台, 对细水雾施加过程中煤油火的热释放速率、一氧化碳、二氧化碳、氧气的变化规律进行了定量试验测量; 试验结果表明, 在细水雾施加的初期阶段, 煤油火火焰急剧增大, 然后快速降低, 且火焰的变化剧烈程度和细水雾的释放压力有较大的关联. 通过细水雾和煤油火作用过程中的物理和化学耦合作用机制的研究, 对该试验现象的形成原因进行了剖析和讨论. 研究结果对于该现象的认识可以为细水雾的工程化应用提供数据支持和理论指导.

关键词
细水雾
作用机制
哈龙替代
煤油火
灭火机制

细水雾灭火技术在 20 世纪 50 年代开始出现, 但随着“哈龙”灭火技术的兴起, 细水雾灭火技术的发展一度处于停滞状态. 然而, 在 20 世纪 80 年代, 研究环境的科学家们发现, “哈龙”灭火介质对大气臭氧层存在着严重的破坏作用, 故联合国通过了一系列条约, 对其生产和使用做出了严格的限制. 此后, 细水雾灭火技术重新受到了人们的关注, 尤其在近些年来, 更是得到了快速的发展[1~3]. 在灭火过程中, 细水雾的灭火效率主要由细水雾的粒径分布、释放位置、释放动量、封闭空间的几何结构和保护空间的障碍物位置共同决定[4]. 为了获得最优的工程设计, 研究细水雾和火焰的相互作用过程以及细水雾的各种灭火机制对灭火的贡献显得尤为重要[5,6].

在细水雾和火焰相互作用机制研究方面, 为了定量表述细水雾汽化对燃烧过程的影响规律, 各国学者开展了大量的研究工作. 虽然这些研究工作存在一定的交叉和重合, 但研究的方法和内容却有很大的不同, 相互之间进行比较分析非常困难, 其中一些研究工作表明, 细水雾不仅具有物理灭火作用, 还具有化学灭火机制[7,8]. 另外一些研究表明, 细水雾的灭火作用主要是通过降温而实现灭火[9,10]. 在文献[11]中, 作者通过小尺度扩散火焰试验和理论分析的结合, 研究了细水雾的灭火机制. 该论文的试验装置可以控制燃料的成分、燃烧火焰的温度以及燃料和氧气进入燃烧器的速度. 试验结果表明在火焰燃烧区提高细水雾的浓度可以导致一氧化碳被氧化为二氧化碳, 故燃烧变得更为完全, 火焰的温度也有所增加. 细水雾对火焰的化学增强作用依赖于细水雾的浓度、氧气浓度和火焰温度. 这些数据表明细水雾对火焰的化学反应有着重要的影响, 该论文的研究引起了广泛的关注.

此外, 针对细水雾的灭火机制, 目前已经开展了大量的试验研究[12,13]. 研究结果表明, 细水雾的物理灭火机制主要体现在两个方面: (ⅰ) 当细水雾遇到高温火焰时, 细水雾迅速汽化, 吸收大量的热量, 故燃烧表面的温度得到快速冷却; (ⅱ) 细水雾汽化后的水蒸气, 对火焰周围的氧气起到稀释作用, 故细水雾对火焰具有一定的窒息作用. 此外, 细水雾灭火机制还包括以下 3 种形式: (ⅰ) 细水雾遇到火焰时, 快速地汽化为水蒸气, 提高了细水雾阻止火焰热辐射的能力; (ⅱ) 由于细水雾汽化引起的体积膨胀, 提高了燃料和空气的混合程度; (ⅲ) 虽然目前仍然了解甚少, 但是有明显的化学灭火作用. 然而, 目前对于

(ⅱ)和(ⅲ)的灭火机制了解甚少. 故加强细水雾和油池火的相互作用过程研究将提高对细水雾灭火机制的了解, 同时, 对细水雾灭火系统的设计, 灭火效率的提高以及拓宽其应用范围也具有积极的推动意义.

本文通过以锥形量热计为主要设备的试验平台, 定量测量细水雾施加过程中煤油火的热释放速率、一氧化碳、二氧化碳和氧气浓度的变化, 研究施加细水雾对煤油火的影响规律. 并且, 通过研究细水雾物理和化学耦合作用机制, 对试验结果进行解释和讨论.

1 试验装置和平台

1.1 细水雾发生装置

细水雾的雾化过程是通过图 1 所示的装置实现的. 在该试验装置中, 采用的是已经商业化的细水雾喷头, 喷头的雾化锥角大约为 90°. 细水雾发生装置中使用的水首先要经过过滤, 然后再流入细水雾喷嘴. 细水雾的雾滴大小、雾滴速率和体积流量是通过激光多普勒三维动态粒子分析仪进行测定的. 该分析设备的使用方法和测量结构在相关的文献中已经有了详细的描述[14,15]. 该设备主要的部件包括激光发生器、光学元件、信号转换系统、信号收集系统、光电探测器、信号处理器和外部的数据输入系统以及计算机软件控制系统等.

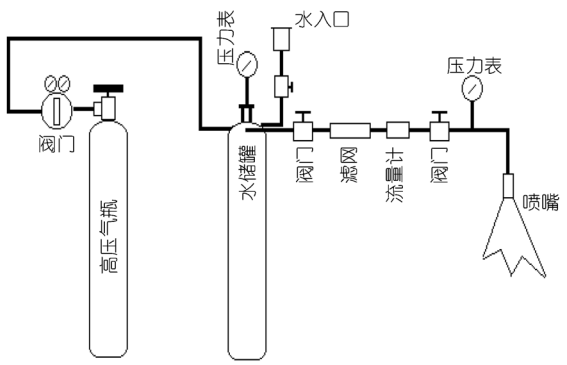

图 1 细水雾发生装置示意图

通过激光多普勒三维动态粒子分析仪, 细水雾的雾化特性可以得到定量的表征. 图 2 是细水雾雾滴特征的试验测定结果. 在 0.3~0.7 MPa 的试验条件下, 在不同距中心线的位置上, 细水雾的颗粒分布如图 2(a)所示, 细水雾的纵向平均速率如图 2(b)所示. 由图 2(a)和 2(b)可知, 在细水雾喷射的中心线附近, 细水雾的体积平均直径是 90~110 μm; 在细水雾喷射的边缘地带, 细水雾的体积平均直径是 120~150 μm. 在细水雾喷射中心线附近, 细水雾的纵向速率是 1.7~2.0 $m\cdot s^{-1}$; 在细水雾喷射的边缘位置, 细水雾的纵向速率是 1.0~1.4 $m\cdot s^{-1}$. 细水雾的雾通量的测量, 是通过设置一个收集盘, 放置在离喷嘴 2.5 m 的垂直平面上, 测量数据如图3所示. 结果表明随着释放压力的提高, 在喷嘴的正下方, 细水雾的雾通量从 2.5 变化到 3.7 $L\cdot min^{-1}\cdot m^{-2}$; 在细水雾喷射的边缘地带, 细水雾的雾通量在 0.6~1.2 $L\cdot min^{-1}\cdot m^{-2}$ 的范围内变化.

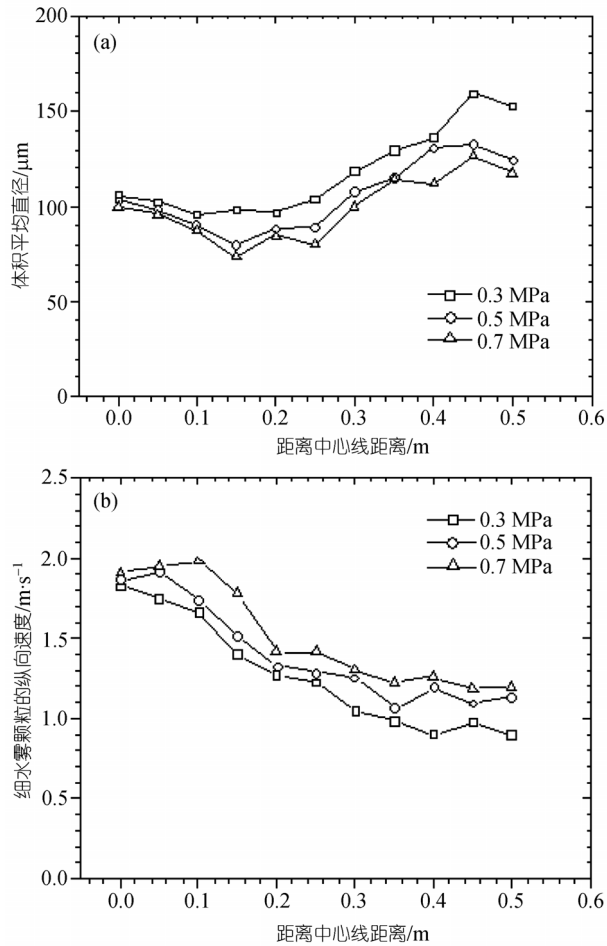

图 2 细水雾粒径分布和纵向速率分布

(a) 距喷嘴中心线的距离和细水雾的平均体积直径关系曲线;
(b) 距喷嘴中心线的距离和细水雾颗粒的纵向速度关系曲线

1.2 试验方法

细水雾发生装置的喷头安装在一个标准的 ASTM1354 型的锥形量热计中, 装置的结构示意图如图 4 所示. 锥形量热计是一种专门测量燃料热释放速率和在有稳定空气流入情况下燃烧产物的仪器[16].

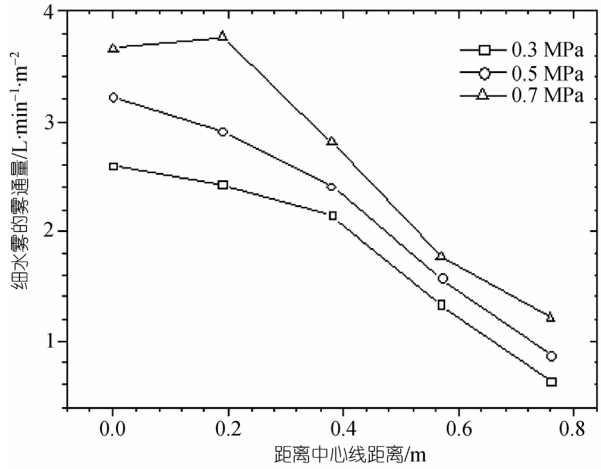

图 3 距喷嘴中心线的距离和细水雾的平均雾通量分布曲线

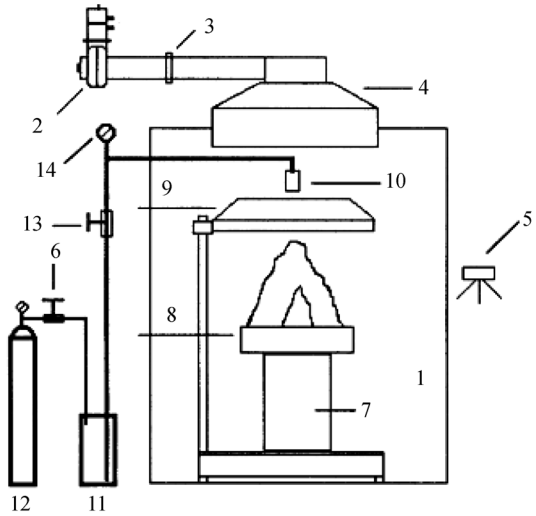

图 4 试验装置示意图

1, 实验室; 2, 排气扇; 3, 排气管; 4, 收集罩; 5, CCD 录像机; 6, 气体阀门; 7, 称重传感器; 8, 样品支架; 9, 辐射加热器; 10, 细水雾喷嘴; 11, 储水罐; 12, 压缩空气罐; 13, 流体阀门; 14, 压力表

一些常用的燃烧特性表征参数, 例如, 热释放速率、燃烧效率、燃烧延迟时间和气体的浓度都可以通过该试验设备进行采集. 本论文对有细水雾施加和无细水雾施加的条件下, 分别对煤油火的燃烧特性进行了定量的测量. 本论文的灭火试验是在锥形量热计 0.6 m×0.6 m×0.7 m 的玻璃封闭空间中进行的, 试验过程中, 燃料被放置在称重传感器上, 燃烧产物通过一个罩子进行收集和传递, 然后对其进行测量和分析. 新鲜空气流入封闭空间的速率可以通过调节风扇的速率实现, 本试验选择 24 L/s 的空气流入速率. 为了保证称重传感器不受细水雾施加的影响, 本试验安装了一个防水护罩, 该防水护罩是由 1 mm 厚、经过电镀处理的钢片材质构成. 在加热辐射器下面, 放置了一个托盘, 对溢出的水进行收集. 试验时, 100 g 的煤油试样加入到 100 mm×100 mm×100 mm 的不锈钢盘. 为了保证细水雾对油盘形成完全覆盖, 在试验过程中, 喷嘴和煤油盘之间的距离, 保持为 80 mm. 在每一次的试验中, 细水雾的施加量由施加时间控制.

在开始试验之前, 辐射加热器设定为额定的功率. 试样支架放置在辐射加热器的下部, 试样暴露在辐射加热器的辐射空间之内. 同时, 锥形量热器的电子点火器开始点火, 当在燃料上方出现稳定火焰并且持续燃烧后, 关闭电子点火器, 煤油开始自由燃烧, 当煤油火到达稳定阶段时, 施加细水雾, 在火焰成功扑灭后, 停止细水雾的施加.

2 试验结果

2.1 细水雾施加过程中火焰大小的变化

由于火焰的热释放速率越大, 火焰燃烧的越剧烈, 故本文通过一系列试验, 测量细水雾施加过程中火焰热释放速率的变化, 由此反映火焰的剧烈程度. 如图 5 所示, 在细水雾施加之前, 煤油火燃烧稳定, 热释放速率基本维持在一个恒定的数值, 直至煤油被完全消耗掉. 但在施加细水雾的过程中, 煤油火的热释放速率在起始阶段迅速升高, 然后, 热释放速率呈现出一个急剧降低的过程. 图 5 还显示出释放压力越高, 热释放速率越小.

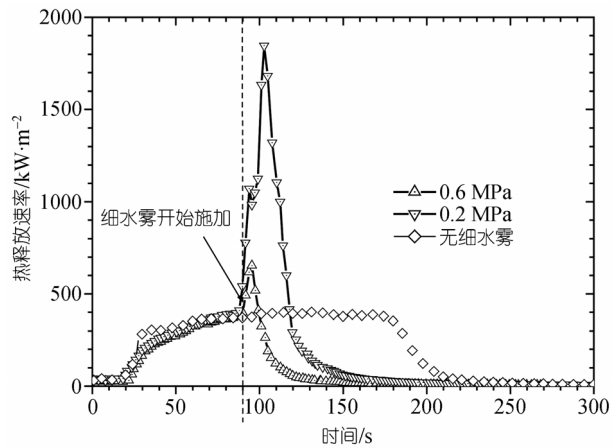

图 5 在细水雾施加或无细水雾施加条件下的煤油火热释放速率的变化

2.2 二氧化碳与一氧化碳的浓度变化

在不同试验条件下, 二氧化碳浓度变化的试验测

量结果如图6所示. 由图6可知, 二氧化碳浓度的变化趋势与火焰的剧烈程度变化相一致. 在细水雾施加前, 二氧化碳的浓度稳定, 在细水雾开始施加后, 二氧化碳的浓度出现急剧升高, 然后逐渐降低, 直至熄灭.

如图 7 所示, 当细水雾开始施加时, 一氧化碳的浓度迅速升高, 然后, 一氧化碳浓度迅速降低. 此外, 释放压力越高, 一氧化碳浓度越小, 如果无细水雾施加, 一氧化碳的浓度基本无变化. 和二氧化碳浓度进行比较发现, 一氧化碳的浓度稳定, 随着细水雾的施加生成速率的波动幅度较小, 但不同的释放压力条件下, 一氧化碳的浓度的变化幅度较大.

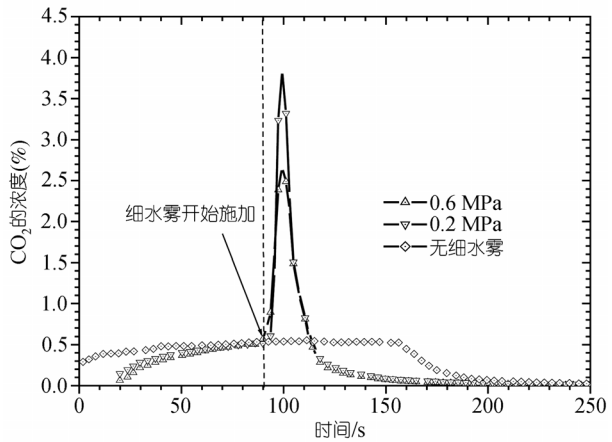

图 6　在细水雾施加或无细水雾施加条件下的二氧化碳浓度变化

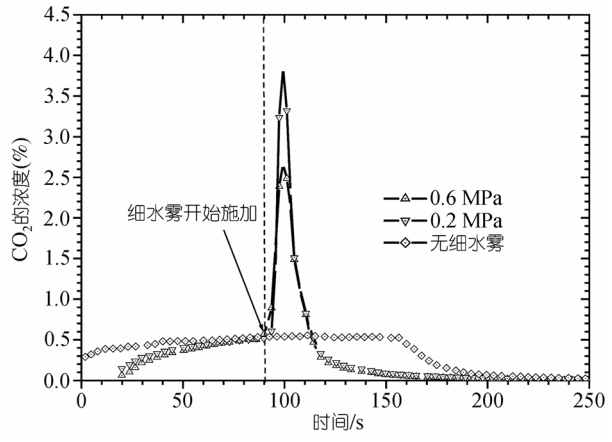

图 7　在细水雾施加或无细水雾施加条件下的一氧化碳浓度变化

2.3　氧气的浓度变化

如图 8 所示, 氧气的浓度变化和一氧化碳与二氧化碳的浓度的变化趋势相吻合. 在细水雾施加之前, 氧气的浓度比较稳定. 在细水雾开始施加时, 氧气的浓度首先出现一个急剧的下降, 然后浓度快速上升. 在煤油火被扑灭以后, 氧气的浓度重新变得稳定. 这是因为随着煤油火的剧烈燃烧, 氧气的消耗速率快速增加, 火焰周围的新鲜空气不能及时地流入到燃烧区域进行补充. 几秒钟后, 燃烧被控制住, 周围新鲜空气的流入速率可以在燃烧区域和大气间保持平衡, 所以氧气的浓度重新变得稳定.

2.4　煤油火质量的变化

如图 9 所示, 如果无细水雾的施加, 燃料在油盘中的质量变化是逐渐降低, 原因是燃料在燃烧过程中逐渐被消耗. 如果细水雾在煤油火上方进行施加,

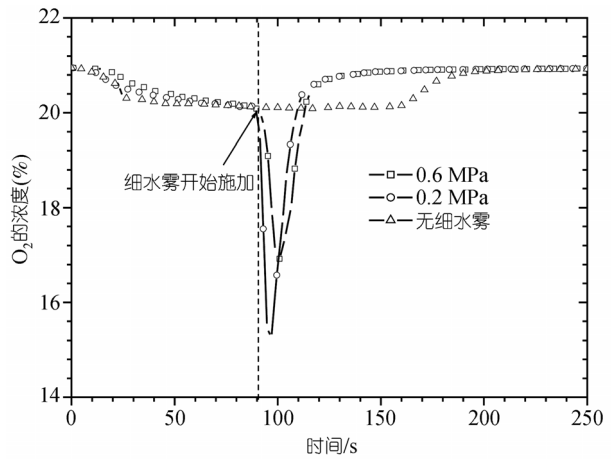

图 8　在细水雾施加或无细水雾施加条件下的氧气浓度变化

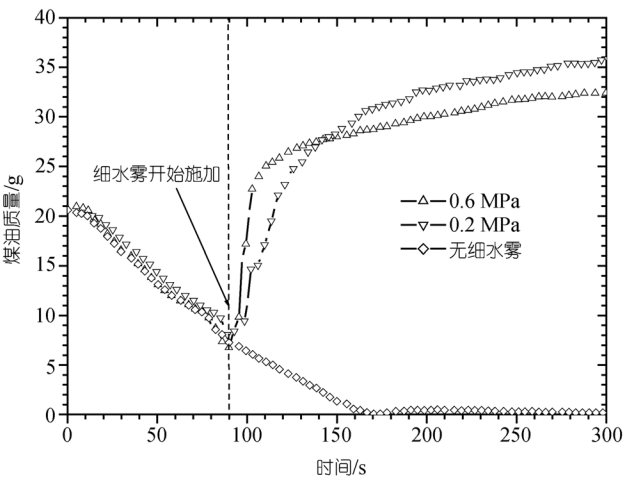

图 9　在细水雾施加或无细水雾施加条件下的煤油质量的变化

油盘中煤油的质量逐渐上升，这是由于一些具有足够动量的细水雾雾滴能够穿透煤油火的火羽流溶解于煤油中而造成的结果.

3 结果讨论

细水雾对油类火的作用方式有很多种，而且各种作用方式之间是密切相关的. 例如：热量的损失意味着温度的降低，温度的降低引起燃烧化学反应速率的减慢，反应速度的减慢意味着燃烧产物的生成速率降低和放热量的减少，由此会造成火焰温度的降低等. 对于细水雾来说，灭火机制至少包括 3 个方面[17,18]：(ⅰ) 燃料表面的冷却作用；(ⅱ) 水蒸气对氧气的稀释作用；(ⅲ) 细水雾对热辐射的阻止作用.

通过上述灭火机制的耦合作用，在细水雾施加过程中，火焰被迅速地控制住并最终熄灭. 然而试验结果表明：刚开始施加细水雾时，煤油火焰剧烈燃烧，随即迅速被控制住. 造成该现象的原因是细水雾冷却火焰、稀释氧浓度、提高燃料和空气的混合度的协同作用，导致细水雾和油池火作用过程中的一定程度的不可预见性[19]. 具体的作用过程讨论如下：由图 5 可知，在细水雾的施加初期，热释放速率非常快，所以当细水雾遇到高温火焰时，细水雾迅速汽化，产生大量的热蒸气. 水蒸气的快速大量生成，并且由于热膨胀而向上部上升，会造成周边的新鲜空气不停地卷入，在该过程中，空气和煤油蒸气会剧烈混合，燃料和氧气的接触面积会急剧升高[20]. 由于该作用过程的存在，造成了燃烧速率在短时间内的迅速上升. 由图 8 所示的细水雾施加过程中氧气浓度的变化过程也可以判断出，周围的新鲜空气不停地对火焰燃烧区域的氧气形成补充，该现象也和上述的分析过程相吻合.

如图 9 所示，随着细水雾的施加，油盘中煤油的质量在不断地上升，这表明一些具有足够动量的细水雾雾滴，将穿透煤油火的火羽流溶解到煤油当中. 由于燃烧造成煤油的温度很高，在煤油中溶解的部分细水雾会迅速汽化，细水雾的汽化和汽化后热蒸气的上升会造成煤油的扰动，而煤油表面的剧烈扰动会造成煤油和空气接触的表面积增加[21]，在煤油火被控制住之前，这种扰动作用会一直存在，故煤油火的燃烧速率会大幅度提高.

比较图 6 和 7 可知，在细水雾施加过程中，一氧化碳生成速率的增加幅度要远低于二氧化碳生成速率的增加幅度，原因在于·OH+CO→H·+CO_2 是一氧化碳氧化的主要途径，当细水雾施加到煤油火时，H_2O+H→H_2+OH成为·OH形成的重要途径，·OH的浓度增加，使得燃烧变得更为完全，故一氧化碳生成速率的增加程度低于二氧化碳生成速率的增加程度[22,23]. 同时，随着燃烧程度的提高，煤油火的燃烧速率也相应增加.

此外，细水雾提高煤油火燃烧速度的作用，和细水雾的释放压力、氧气浓度和火焰的温度密切相关. 依据试验结果，释放压力越高，在细水雾施加的过程中，火焰增大的程度越低，造成该现象的原因为：在细水雾的施加过程中，存在两种相互作用的灭火机制[22]：(ⅰ) 对火焰的物理和化学增大作用；(ⅱ) 细水雾的灭火作用. 细水雾的灭火能力受雾滴尺寸分布和雾动量的影响，随着释放压力的提高，细水雾的雾滴尺寸降低，雾动量增加，所以细水雾的灭火能力得到提高. 而随着细水雾释放压力的提高，细水雾对火焰的增大作用降低.

在另一方面，试验结果表明细水雾的释放压力对一氧化碳生成速率的影响程度要大于对二氧化碳生成速率的影响程度，造成这种现象的原因主要是因为氧气的浓度以及细水雾的释放速率. 首先，如果释放压力升高，燃烧速率降低，氧气的浓度要高于低释放压力，故一氧化碳生成量会降低；其次，如果释放压力增加，细水雾的灭火能力增加，灭火时间缩短，不完全燃烧的燃料降低，该影响过程也降低了一氧化碳的生成量，故释放压力的变化对一氧化碳生成速率的影响程度较大.

然而，在研究细水雾和煤油火的作用机制过程中，一些现象只能进行定性讨论和推理，没有能够对燃烧过程中出现的自由基以及火焰中的其他燃烧分子碎片进行定量的实时在线测量. 此外，燃料和空气的混合程度和燃烧反应的过程非常复杂，各个参数并不是静态不变的参量. 本论文中，所获得的数据大都是一定时间段的平均数据，对细水雾灭火的微观机制不能给出深入细微的探讨，故实时测量火焰中的自由基种类和浓度可以为下一步的研究细水雾的灭火机制提供更为强有力的支持.

4 结论

本论文的研究加深了对细水雾和油类火相互作用过程的理解. 首先，在细水雾施加的初始阶段，油

类火的燃烧强度剧烈增加，这是因为水蒸气提高了空气和燃料的混合程度，燃烧变得更为充分；其次，在很短时间以后，火焰的大小迅速降低，这是由于细水雾的灭火能力迅速占据了主导作用；再次，细水雾的释放压力越高，煤油火在细水雾施加时，火焰的剧烈增大程度越低．这是因为随着释放压力的升高，细水雾的雾滴尺寸降低，雾滴动量增加，也就是说，细水雾的灭火能力增强．最后，试验结果还显示出和不同释放压力下二氧化碳的生成速率相比，一氧化碳的生成速率和释放压力的相关性较高，造成这种现象的原因是随着释放压力的提高，燃烧区域的燃烧速度变慢，氧气的缺乏程度降低．本论文的研究可以为细水雾的工业设计提供理论基础，提高细水雾的灭火效率，拓宽其应用范围．

参考文献

1 Robert E T. Halon fire extinguishing substitutes. Fire Saf Mag, 2001: 6—11
2 Yang W H, Robert J K. The Effect of monodispersed water mists on the structure, burning velocity, and extinction behavior of freely propagating, stoichiometric, premixed, methane-air flames. Comb Flam, 2002, 130(4): 322—335[DOI]
3 Zhou X M, Liao G X, Cai B. Improvement of water mist fire-extinguishing efficiency with MC additive. Fire Saf J, 2006, 41(1): 39—45[DOI]
4 Heskestad G. Extinction of gas and liquid pool fires with water sprays. Fire saf J, 2003, 38(4): 301—317[DOI]
5 Richard J, Garo J P, Souil J M, et al. On the flame structure at the base of a pool fire interacting with a water mist. Exp Therm Fluid Sci, 2003, 27(4): 439—448[DOI]
6 Prasad K, Patnaik G, Kailasanath K. A numerical study of water-mist suppression of large scale compartment fires. Fire Saf J, 2002, 37(6): 569—589[DOI]
7 Jiang Z, Chow W K, Tang J, et al. Preliminary study on the suppression chemistry of water mists on poly (Methyl Methacrylate) flames. Polym Degrad Stab, 2004, 86(2): 293—300[DOI]
8 Manzello S L, Yang J C, Cleary T G. On the interaction of a liquid droplet with a pool of hot cooking oil. Fire Saf J, 2003, 38(7): 651—659[DOI]
9 Yang W H, Parker T, Ladouceur H D, et al. The interaction of thermal radiation and water mist in fire suppression. Fire Saf J, 2004, 39(1): 41—66[DOI]
10 Lian Z X, Chao X, Li F. Numerical simulation of water-mist in confined space. Mech Manage Dev, 2008, 23(1): 27—28
11 Atreya A, Crompton T, Such J. A study of the chemical and physical mechanism of fire suppression by water. Fire Saf Sci, 2000, 35(7): 493—504[DOI]
12 Morita M, Minami T, Kikkawn A. Suppression mechanism of water mist for poll fire. Fifteenth Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, 2000, 1: 273—279
13 Liu Z, Kim A K. A review of water mist fire suppression systems—fundamental studies. J Fire Prot Eng, 2000, 10(3): 32—50
14 Qin J, Liao G X, Wang X S, et al. Water mists measurement of the flow field of the water mist by 3D LDV. Chin J Quantum Electron, 2001, 18(3): 281—284
15 Qin J, Weng W G. Preliminary study of water mist suppressing ghee flame in historical building in the northwest China. J Cultural Heritage, 2006, 7(4): 329—333[DOI]
16 ASTM. Standard Test Method for Health and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia: ASTM, 1990
17 Liang Q S, Liang Q Q, Xu W Y. Water mist characteristics and its fire suppression mechanism. Fire Sci Technol, 2005, 24(4): 447—451
18 Liu Z G, Kim A K, Carpenter D. A study of portable water mist fire extinguishers used for extinguishment of multiple fire types. Fire Saf J, 2007, 42(1): 25—42[DOI]
19 Richard J, Garo J P, Souil J M, et al. On the flame structure at the base of a pool fire interacting with a water mist. Exp Therm Fluid Sci, 2003, 27(4): 439—448[DOI]
20 Liu C, Jia C G. Numerical study of water spray suppression of single room fire by zone model. J Combust Sci Technol, 2004, 10(4): 308—313
21 Wang X S, Liao G X, Qin J, et al. Experimental study on effectiveness of extinction of a pool fire with water mist. J Fire Sci, 2002, 20(4): 279—295
22 Richard J, Garo J P, Souil J M, et al. Chemical and physical effects of water vapor addition on diffusion flames. Fire Saf J, 2003, 38(6): 569—587[DOI]
23 Schofield D P, Kjaergard H G. High-level ab initio studies of the electronic excited states of the hydroxyl radical and water—hydroxyl complex. J Chem Phys, 2004, 120(15): 6930—6934[DOI]