

用锥形量热仪研究细水雾抑制熄灭 PVC 火

黄鑫, 刘江虹, 张永丰, 秦俊

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027)

[摘要] 利用锥形量热仪和单流体细水雾系统研究了细水雾抑制 PVC 火的过程, 并观察了重燃现象的发生, 测量了实验中热释放速率及 O_2 , CO_2 , CO 和烟气的浓度变化, 并对不同细水雾工作压力及不同热辐射流量下的结果进行了比较。由实验可知细水雾能快速扑灭 PVC 火, 且压力越大灭火越迅速, 但是在灭火后停止施加细水雾会发生重燃现象, 且重燃发生的时间长短与作用在燃料表面的水量有关。

[关键词] PVC 火; 细水雾; 热释放速率; 重燃

[中图分类号] X932 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)12-0102-05

聚氯乙烯 (PVC) 在燃烧时会产生许多有害气体, 例如氯化氢、氯气和二氧芑, 造成严重的环境污染^[1-3]。因此研究 PVC 在不同火灾场景下的燃烧特性以及如何降低 PVC 火灾的危险性就显得非常重要。此外, 为了能够更好地设计适合于扑灭 PVC 火灾的系统, 需要研究在施加灭火介质的状况下 PVC 的燃烧特性。

细水雾作为哈龙灭火剂的一种替代产品以其无环境污染、灭火迅速、耗水量低、对防护对象破坏性小等特点展示出广阔的应用前景, 目前已成为国际火灾科学前沿研究热点之一^[4,5]。前人做了许多细水雾与油池火、木垛火以及 PMMA 火相互作用的研究^[6-8], 但是关于 PVC 火的研究则较少。且细水雾扑灭固体燃烧火的情况与液体燃烧火不同, 液体火在被扑灭后停止施加细水雾将不再产生重燃现象, 而固体火被扑灭后停止施加细水雾有重燃的可能^[9], 因此作者使用锥形量热仪研究了细水雾抑制 PVC 火以及 PVC 火被扑灭后的重燃现象。

1 实验装置及实验方法

实验中使用的标准锥形量热仪 (ASTM E

1354)^[10]和单流体细水雾系统, 如图 1 所示。细水雾由一个小流量的压力式雾化喷头产生, 雾化锥角为 90° 。喷头距离 PVC 试样的距离为 80 mm, 产生的细水雾能够完全覆盖整个试样表面。实验中使用 0.4 MPa 和 0.7 MPa 两种不同的喷头工作压力, 保持喷头的工作压力稳定以恒定细水雾流量。在这两种工作压力下离喷口 100 mm 处细水雾粒径和速度的径向分布由三维激光多普勒粒子分析仪 (三维 LDV/APV 系统) 进行测量, 结果分别示于图 2 和图 3^[11]。两种压力下对应的细水雾流量分别为 103.5 mL/min 和 134 mL/min。

锥形量热仪的实验空间的几何尺寸为 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 0.7\text{ m}$, 它用于记录实验中 PVC 试样的热释放速率、燃烧产物 CO_2 和 CO 在空气中质量分数以及耗氧量随时间的变化曲线。实验前先将 3 mm 厚、面积为 100 mm^2 , 质量为 41 g 的 PVC 试样放置在垫有高岭棉的不锈钢盘中, 试样的表面与不锈钢盘的顶端齐平。试样四周用铝箔包好以降低边缘的影响, 可近似认为试样中是一维的热传递过程。当加热锥达到预定热辐射流量时把试样放置在正确位置, 利用热辐射使得 PVC 试样自发燃烧而不使用

[收稿日期] 2005-06-17

[基金项目] 国家重点基础研究专项资助项目 (2001CB409600) 及国家自然科学基金资助项目 (50323005)

[作者简介] 黄鑫 (1981-), 男, 江西赣州市人, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室博士研究生

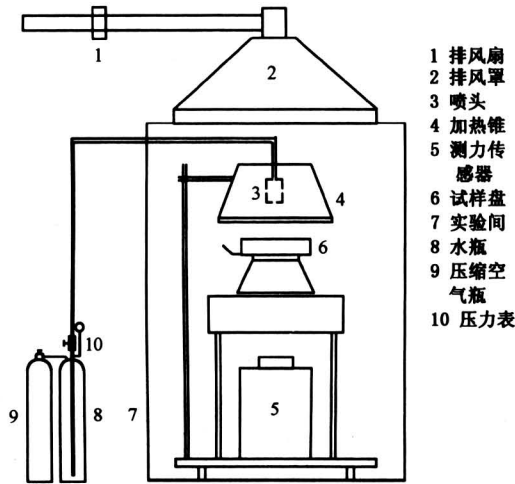


图 1 实验装置示意图
Fig.1 Experimental set-up

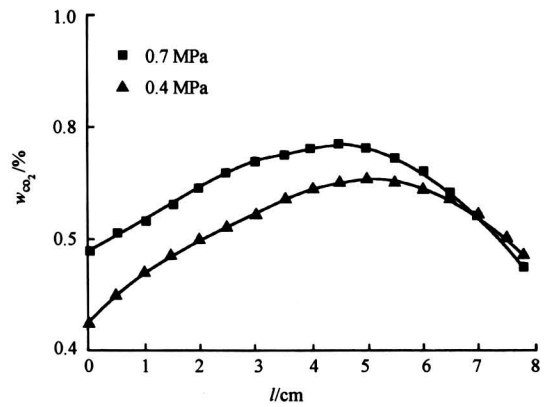


图 3 距喷口 100 mm 处细水雾轴向速度沿径向的分布

Fig.3 The radial distribution of the axial mean velocity of water mist

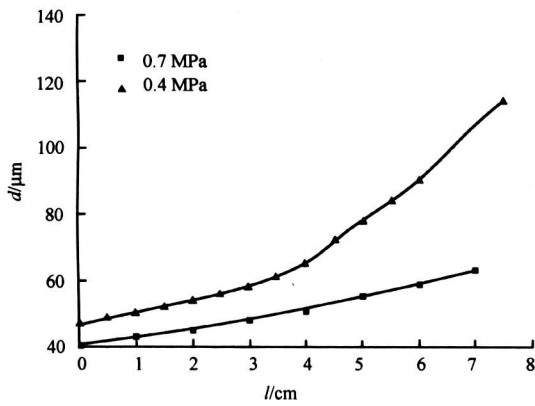


图 2 距喷口 100 mm 处细水雾粒径沿径向的分布
Fig.2 The radial distribution of the volume mean diameter of water mist

自动点火装置。当试样达到稳定燃烧状态后再维持燃烧一段时间直到试样质量减小到预先设定的值，此时开启细水雾系统施加细水雾。当明火消失后立刻关上细水雾系统，开始对重燃时间进行计时，直到 PVC 试样重燃后再关闭加热锥，实验结束。实验中的热辐射流量设定了 30, 50 和 70 kW/m² 三个值。

2 实验结果与讨论

PVC 材料的燃烧分为 2 个步骤：第一步（240 ~ 340 °C）主要产物是 HCl 气体和含双键的多烯烃；第二步（400 ~ 470 °C）是碳的燃烧^[12]。当热辐射流量为 30 kW/m² 时不能将 PVC 试样加热到 340 °C 以上，燃烧反应只进行到第一步，因此不能够自

发燃烧，在这种工况下不进行灭火和重燃实验。

当热辐射流量为 50 kW/m² 时，PVC 试样能够在不使用任何点火装置的情况下自燃，图 4 是在该热辐射流量下，细水雾压力为 0.4 MPa 时实验中热释放速率的变化曲线图。由图可见 PVC 试样在自燃后热辐射速率迅速上升，大约 30 s 后达到稳定阶段，稳定后再燃烧大约 40 s 试样质量达到预定值，此时开启细水雾。细水雾施加后火焰立刻得到抑制，热释放速率迅速下降，17 s 后就从 210 kW/m² 的峰值降到 40 kW/m²。火焰熄灭后关闭细水雾系统，利用加热锥对剩余的 PVC 试样继续加热观察重燃现象，大约 480 s 后试样重新自发燃烧。

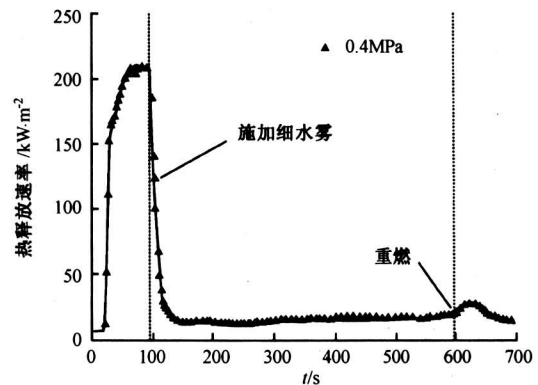


图 4 热辐射流量为 50 kW/m² 时热释放速率变化曲线图

Fig.4 Heat release rate at 50 kW/m²

细水雾灭火的主要机理是吸热、置换氧气和隔绝热辐射^[4-6]。在该实验中 PVC 试样的火焰高度为

80 mm 左右, 可以认为细水雾在施加后, 雾滴直接进入到了火焰区域。作者使用式 (1) 简单计算了雾滴在火焰区中的蒸发时间^[13]:

$$t = \frac{D_0^2}{\lambda} \quad (1)$$

其中, D_0 为雾滴的初始粒径, λ 为蒸发系数, 可由式 (2) 求得:

$$\lambda = \frac{8k \ln(1+B)}{C_p \rho} \quad (2)$$

其中 k 为水蒸气的导热系数; C_p 为水蒸气的定压热容; ρ 为水的密度; B 为传热数, 其定义式为:

$$B = \frac{C_p(T_\infty - T_b)}{L} \quad (3)$$

其中 T_b 为雾滴表面温度, 由于雾滴升温到 100 °C 所需的时间小于 0.01 s, 所以假设雾滴进入火焰区时温度已达沸点为 373 K; T_∞ 为雾滴周围的气体温度, 取 973 K, L 为水的汽化潜热, 为 2 257.1 kJ/kg。由计算得 50 μm 的雾滴完全蒸发所需的时间为 0.06 s。取雾滴的初始速度为 0.5 m/s; 匀速下落到达 PVC 试样表面的时间为 0.16 s, 但因火羽流的作用, 且雾滴运行过程中直径逐渐减小, 所以雾滴实际到达试样表面的时间要超过 0.16 s。因此, 可以认为刚开始施加的细水雾滴在没有到达燃料表面前就已经完全蒸发了。但由于雾滴在蒸发过程中从火焰区吸收大量的热降低了火焰温度和火焰高度, 所以后续细水雾能够穿透火羽流到达燃料表面, 起到冷却作用。此时会发生两种情况: a. 如果固体燃料表面没有足够的水或者燃料表面的累积水量速率与表面水的蒸发速率保持平衡, 则不能将火扑灭。细水雾的连续施加最终将会导致一个新的稳态燃烧过程; b. 如有足够的细水雾施加到燃料的表面, 同时有足够的时间, 则火焰最终将会被扑灭。而且 PVC 在稳定燃烧过程中主要是碳的燃烧, 此时会在燃料表面形成富碳的多孔区域, 必须有足够的细水雾穿透焦炭层, 到达已燃和未燃物料之间, 才能将火焰彻底扑灭并防止在停止施加细水雾后火焰立即重燃。在该实验中, 细水雾关闭后 PVC 试样没有立即重燃, 而是经过一段时间的水分蒸发和升温后才重新燃烧, 这说明对于所研究的工况而言用于灭火的细水雾的流量是足够的, 但是如果不能有效的消除或削弱外加的辐射源, 燃料有重燃的可能性。对于这种情况需要持续施加细水雾, 而不能在火焰被扑灭后就立刻关闭细水雾系统。

图 5 是燃烧产物中氧气质量分数的变化曲线,

可以看到细水雾施加后氧气质量分数迅速上升。这是因为火焰在此时立刻得到抑制, 燃烧强度减小而导致了耗氧量减小。虽然火焰外部空间的氧气质量分数上升了, 但是由于细水雾受热后很快蒸发成水蒸气, 其体积扩大了约 1 700 倍, 取代了雾滴周围的空气, 有效的稀释了火焰区中可燃气体和氧气的浓度, 因此在火焰内部存在对氧气的稀释作用, 它虽然不能使 PVC 火完全熄灭, 却可抑制火焰。此外在实验过程中加热锥是一直开启的, 这样细水雾不仅阻隔了火焰对燃料表面的辐射, 同时也阻隔了加热锥对燃料表面的辐射, 缩短了灭火时间。

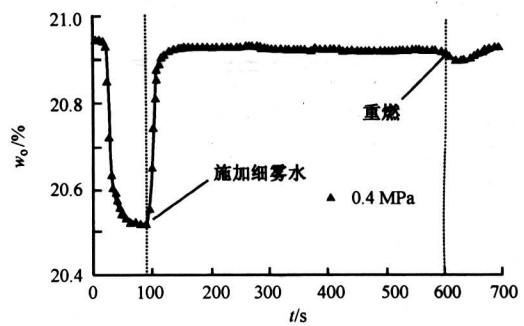


图 5 热辐射流量为 50 kW/m² 时 O₂ 质量分数变化曲线图

Fig.5 Oxygen concentration at 50 kW/m²

图 6, 图 7 分别是燃烧产物中 CO₂, CO 质量分数的变化曲线, 图 8 是烟气的比长度消光系数 (对

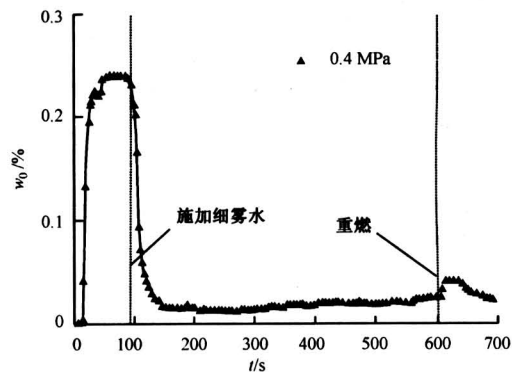


图 6 热辐射流量为 50 kW/m² 时 CO₂ 质量分数变化曲线图

Fig.6 Carbon dioxide concentration at 50 kW/m²

应于烟气质量分数) 的变化曲线。三者燃烧产物中的质量分数在细水雾施加后都迅速降低。这主要是因为火焰受到了抑制, 燃烧强度减小, 另外生成

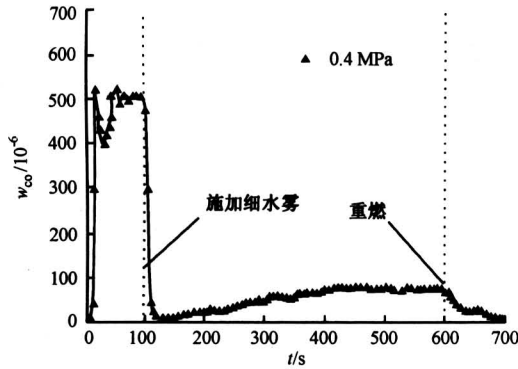


图 7 热辐射流量为 50 kW/m² 时 CO 质量分数变化曲线图

Fig.7 Carbon monoxide concentration at 50 kW/m²

水蒸气的稀释作用以及细水雾对烟气的冲刷作用降低了这些燃烧产物的质量分数。火焰在熄灭后 CO₂ 的质量分数基本维持不变，只是在重燃时才增加，CO 的质量分数则是缓慢的逐渐上升，这是因为 PVC 试样在加热锥的作用下处于阴燃的状态，主要产物为 CO 和烟气，而耗氧量和热释放速率非常小，所以此时耗氧量和热释放速率基本维持不变。当阴燃转为明火重燃时，CO 和烟气的质量分数都有所下降。

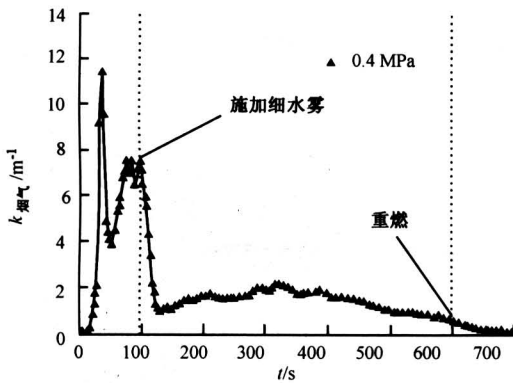


图 8 热辐射流量为 50 kW/m² 时烟气的比长度消光系数变化曲线图

Fig.8 Smoke ratio at 50 kW/m²

图 9 是热辐射流量为 70 kW/m² 时不同细水雾压力下的热释放速率变化曲线。由图可见细水雾压力增大时热释放速率加速下降，在 0.7 MPa 时，热释放速率 15 s 后就从 210 kW/m² 的峰值降到 40 kW/m²；而在 0.4MPa 下，此过程则用了 21 s。这是因为压力为 0.7 MPa 时细水雾的雾滴粒径更小，雾滴的速度更快，流量更大，粒径小细水雾蒸发更迅

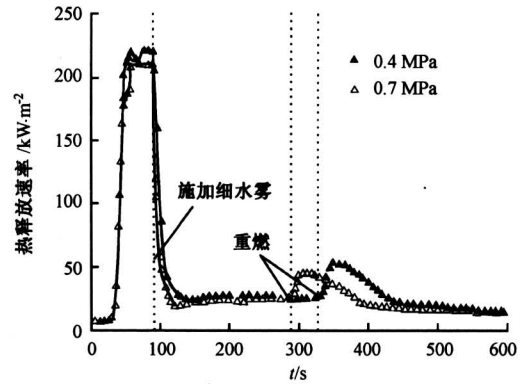


图 9 热辐射流量为 70 kW/m² 时不同细水雾压力下热释放速率变化曲线图

Fig.9 Heat release rate under different operating pressure at 70 kW/m²

速，速度快的雾滴更能克服火羽流的阻力进入火焰区，流量大细水雾对火焰和燃料表面的吸热量大，且粒径小浓度大的水雾能更好的阻隔加热锥对燃料的热辐射，所以工作压力大时细水雾灭 PVC 火更迅速。由图 9 还可看出 0.4 MPa 下熄灭的火焰在经过大约 220 s 后重燃，而 0.7 MPa 下熄灭的火焰经过了 185 s 后重燃，这是因为 0.4 MPa 下灭火时间较长，总用水量大于 0.7 MPa 下的用水量，燃料表面积聚的水量多，所以发生重燃的时间长。

图 10 是细水雾压力为 0.4 MPa 不同热辐射流量下热释放速率变化曲线的比较。由图可见热辐射流量大时热释放速率上升的更为迅速，燃烧的强度更大，施加细水雾后热释放速率下降得稍缓慢一些，而发生重燃则要快得多。

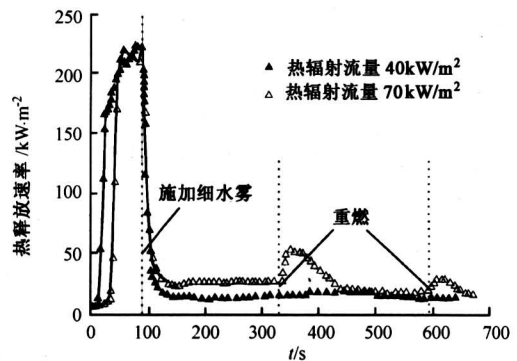


图 10 细水雾压力为 0.4 MPa 时不同热辐射流量下热释放速率变化曲线图

Fig.10 Heat release rate under operating pressure of 0.4 MPa at different radiant heat fluxes

3 结论

通过用锥形量热计对细水雾抑制熄灭 PVC 火的实验研究得到了以下结论:

1) 该实验设计的工况下, 细水雾主要通过对火焰和燃料表面的吸热达到灭火的目的, 置换氧气和阻隔热辐射的作用虽然不能直接扑灭 PVC 火, 但起到了很好的辅助作用;

2) 水雾施加后 PVC 火焰迅速得到抑制, 热释放速率、耗氧量以及 CO₂、CO 和烟气的质量分数迅速下降, 火焰熄灭后如果停止施加细水雾, PVC 试样会发生重燃;

3) 细水雾系统的工作压力越大, 灭 PVC 火的速度越快, 但是如果明火消失后立即停止施加细水雾, 则压力大发生重燃的时间反而更短, 这是因为重燃时间与燃料表面积聚的水量有关, 灭火时间长用水量, 则燃料表面积聚的水量会更多, 因此在实际应用中需要根据情况延长细水雾的施加时间甚至持续施加细水雾以防止 PVC 燃料的重燃。

参考文献

- [1] McNeill I C, Livia M, Cole W J. A study of the products of PVC thermal degradation[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 1995, 49(1): 181 ~ 191
- [2] Scheirs J, *Polymer Recycling: Science, Technology and Applications*[M], UK: Wiley Chichester, 1998. 220
- [3] 郭小汾, 杨雪莲, 李海滨, 等. 聚氯乙烯燃烧特性及 HCl 的生成机理[J]. *燃料化学学报*, 2000, 28(1): 67 ~ 70
- [4] Jones A, Nolan P F. Discussions on the use of fine water sprays or mists for fire suppression[J]. *Loss Prevention in the Process Industries*, 1995, 8(1): 17 ~ 22
- [5] 刘江虹, 廖光焯. 细水雾灭火技术与进展[J]. *科学通报*, 2003, 48(8): 761 ~ 767
- [6] Liu Jianghong, Liao Guangxuan, Fan Weicheng, etc. Study of Liquid Pool Fire Suppression with Water Mists by Cone Calorimeter[J]. *Journal of Fire Science*, 2002, 20(6): 465 ~ 477
- [7] Liu Jianghong, Liao Guangxuan, Yao Bin, et al. Experimental study on the interaction of fine water spray with solid pool fires[J]. *Science in China (Series E)*, 2003, 46(2): 218 ~ 224
- [8] Qin J, Chow W K. Bench-scale tests on PMMA fires with water mist[J]. *Polymer Testing*, 2005, 24: 39 ~ 63
- [9] Moghtaderi B. Effect of water spray on re-ignition characteristics of solid fuels[A]. *Proceedings of the 5th International Symposium on Fire Safety Science* [C]. Boston MA, 1997. 829 ~ 840
- [10] Redfern J P. Rate of heat release measurement using the cone calorimeter[J]. *Journal of Thermal Analysis*, 1989, 35: 1861 ~ 1877
- [11] 秦俊, 姚斌, 廖光焯. APV 激光流场诊断系统及其应用[J]. *火灾科学*, 1999, 8(2): 37 ~ 42
- [12] Miranda R, Yang J, Roy C. Vacuum pyrolysis of PVC I. Kinetic study [J]. *Polymer Degradation and Stability*. 1999, 64(1): 127 ~ 144
- [13] Lefebvre A H. *Atomization and Sprays*[M]. New York: Taylor&Francis, 1989

Study of Suppressing PVC Fire with Water Mist Using a Cone Calorimeter

Huang Xin, Liu Jianghong, Zhang Yongfeng, Qin Jun

(State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230027, China)

[Abstract] In this paper, the action of water mist on PVC fires in a cone calorimeter under different external radiant heat fluxes was studied and the reignition of the PVC fires was analyzed. Water mist was generated by a single pressure nozzle. Physical characteristics of the water mist were measured by LDV/APV system. The heat release rate, oxygen, carbon dioxide, and carbon monoxide concentrations and other important parameters of the interaction under various conditions were measured by cone calorimeter. The experiment illustrated that water mist would suppress the PVC fire by evaporation cooling, oxygen displacement and radiant heat attenuation. After the fire was extinguished and water mist was shut off, fire might reignite after a period of time. The reignition time depended on the total quantity of water mist.

[Key words] PVC fire; water mist; heat release rate; reignition