

17

311-316

# 细水雾与火焰相互作用的红外 全场诊断方法研究\*

王喜世 廖光焯 秦俊 姚斌

(中国科技大学火灾科学国家重点实验室, 安徽, 合肥, 230026)

X932

**摘要** 利用 TVS-2000ST 型热像系统, 通过观察和测量细水雾与火焰相互作用前后火焰热场结构的变化, 分别对细水雾与煤油、酒精和正庚烷等液体扩散火焰的相互作用进行了实验研究, 为进一步认识细水雾与扩散火焰相互作用的机理提供了简捷可靠的实验手段。

**关键词** 热像系统, 扩散火焰, 细水雾。

火灾控制 红外全场诊断

## 引言

在火灾防制技术中, 越来越注重灭火的有效性、经济性、对扑救和防护对象的无破坏性, 特别是对环境的无污染性等。而传统气体灭火技术对人员有窒息作用, 卤代烷系列(海龙 1301 等)灭火剂则会严重破坏大气臭氧层, 对人类的生存环境造成直接的威胁。细水雾作为卤代烷系列灭火剂的主要替代品, 对其灭火特性的研究已得到广泛的重视, 并成为目前国际火灾科学前沿的研究热点之一<sup>[1]</sup>。

通常, 把平均滴径在 30~300 $\mu\text{m}$  的水雾称为细水雾。国际上已广泛开展了细水雾灭火技术的研究, 并在大量实验的基础上, 提出了细水雾灭火系统的工程技术指标和雾特性参数等方面的标准<sup>[2~4]</sup>。国内在细水雾灭火方面也已作了一系列的研究工作, 特别是在利用 LDV/APV (Laser Doppler Velocimetry or Adaptive Phase Doppler Velocimetry) 系统对雾特性进行实验研究的基础上, 注重开展细水雾与火相互作用机理的研究<sup>[5~6]</sup>。但总的来看, 目前对细水雾灭火的研究主要集中在细水雾本身的产生和雾特性参数的测量方面, 对细水雾与火相互作用的研究, 也大都局限于对有关参量的点测量研究。实际上, 细水雾在抑制和扑灭火灾的过程中, 它与火的相互作用是一个十分复杂的物理化学过程, 并同时在大程度上受外界条件的影响, 因而细水雾与火相互作用的强弱在时间和空间上都体现出非均匀性, 致使通过点测量等手段很难对其相互作用的机理进行较全面的认识。因此, 研究和发展一种适合于细水雾与火相互作用机理研究的全场诊断技术, 将对准确、全面地研究细水雾与火相互作用的机理提供有力工具, 进而为优化细水雾灭火系统提供科学依据。本文利用热像系统, 通过观察和测量细水雾与扩散火焰作用前后火焰热场结构的变化, 研究了细水雾与火相互作用的机理, 取得了一些有意义的实验结果。

\* 国家自然科学基金(编号:59876038)资助项目  
稿件收到日期 1998-06-04, 修改稿收到日期 1999-01-15

## 1 实验装置

图1为细水雾与火焰相互作用的模拟实验装置. 利用该装置, 分别对细水雾与煤油、酒精以及正庚烷火焰相互作用的机理进行了实验研究. 其中所用燃烧器的内径分别为150mm和50mm, 高均为10mm, 为了减少地面目标对细水雾与火相互作用的影响, 其距地面的高度大于600mm. 细水雾由图1中所示的细水雾发生装置产生, 实验中只采用一个离心式喷头, 并采用LDV/APV系统测量其粒径大小、尺度分布以及雾通量等参数(细水雾平均粒径约为 $100\mu\text{m}$ ). 采用TVS-2000ST型热像仪, 对细水雾施加前后几种扩散火焰温度场的变化情况进行了实时观察研究, 图2给出了TVS-2000ST型热像仪的实物图.

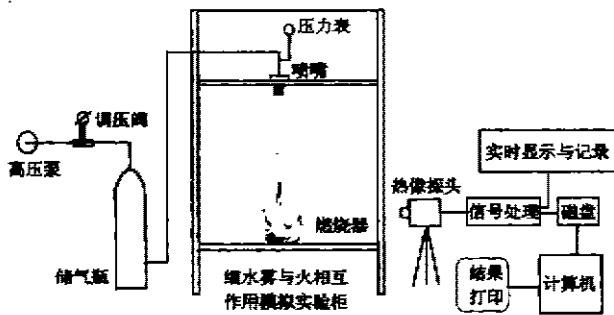


图1 细水雾与火相互作用模拟实验装置  
Fig. 1 The set-up of simulant experiment for the interaction of water mist with fire



图2 TVS-2000ST型热像系统  
Fig. 2 Thermal video system of model TVS-2000ST

热像技术是热场显示中应用最广泛的一种技术, 它通过热像仪可以获取红外不透明物体(固体或液体)表面温度场的瞬时分布信息, 并将其转换为可视图像, 从而在监视器上以灰度级或伪彩色显示出来. 由于该技术采用了非接触遥测方式, 因此它一方面不对被测目标造成任何干扰和影响, 另一方面又可以实现对那些不易接近的目标(如高温窑炉、保温容器、高压变压器等)的在线监视和检测, 从而提高了温度测量的真实性和客观性, 同时大大拓宽了其应用领域. 值得指出的是, 在利用红外热像仪进行火焰温度场测量时, 探测目标的发射率必须事先设置, 这对本工作造成了一定的难度, 因为对火焰发射率分布的精确测量, 目前仍难以实现. 因此, 在本工作的实验研究中, 首先假定火焰发射率为1, 然后通过比较典型点处热像测量结果与热电偶测量结果的差异, 进而对热像测温数据进行发射率修正, 从而获取比较真实的火焰热场信息.

## 2 红外热像测试原理

众所周知, 热交换有三种方式: 辐射、对流和传导. 接触型测温仪是通过传导工作的, 而非接触型测温仪是通过测量物体的热辐射进行测温的, 红外热像仪属于后一种测温仪器. 处在一定温度下的物体要不断地向周围空间发射红外辐射, 红外辐射的波长范围为 $0.76\sim 1000\mu\text{m}$ . 根据 Stefan-Boltzman 定律, 物体发射辐射能量与其温度的4次方成正比, 即

$$W = \epsilon \sigma T^4, \quad (1)$$

式(1)中  $W$  为物体单位面积的总辐射能  $(W/m^2)$ ,  $\epsilon$  为物体表面的发射率,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数,  $T$  为物体的绝对温度 (K). 热像仪利用红外探测器接收物体表面的辐射能, 并将其转换为电信号, 通过放大等各种处理后, 给出物体表面的温度分布, 这就是红外热像仪的测温原理.

如前所述, 热像仪接收和测量来自目标表面的红外辐射, 将其数字量值通常称为热值. 而我们知道, 热像仪接收的红外辐射热值 (或称红外热像仪的电压输出值) 和被测目标的红外光子辐射成线性关系, 但与被测目标表面的温度则是非线性关系. 因此, 将热像仪用于测温, 必须在热像仪的热值和目标温度值之间建立定标函数关系. 若热像仪距探测目标的距离较远, 则还应该考虑大气透过特性的影响<sup>[7]</sup>.

### 3 实验结果与讨论

利用上述实验装置和仪器对细水雾与煤油、酒精以及正庚烷等扩散火焰的相互作用情

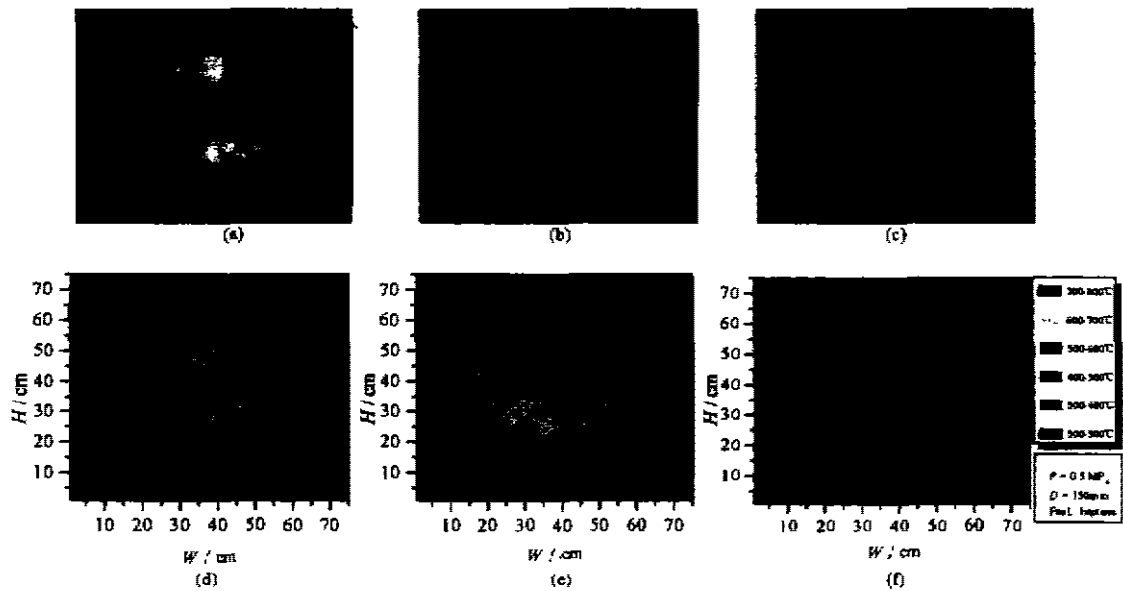


图 3 正庚烷火焰在细水雾作用前后的热像图和热场等值线图

- (a) 没有细水雾作用时的热像图 (b) 施加细水雾 40s 后的热像图  
 (c) 施加细水雾 56s 后的热像图 (d) 没有细水雾作用时的热场等值线图  
 (e) 施加细水雾 40s 后的热场等值线图 (f) 施加细水雾 56s 后的热场等值线图

Fig. 3 The thermal images and thermal field contours of heptane flame with or without the interaction of water mist

- (a) the thermal image without the interaction of water mist  
 (b) the thermal image with the interaction of water mist after 40s  
 (c) the thermal image with the interaction of water mist after 56s  
 (d) the thermal field contour without the interaction of water mist  
 (e) the thermal field contour with the interaction of water mist after 40s  
 (f) the thermal field contour with the interaction of water mist after 56s

况进行了实时监测和数据分析研究,获取了细水雾作用前后扩散火焰的热场分布信息.这一方面可实时监测并记录细水雾与火相互作用的全过程,更重要的是为获取细水雾与火不同时刻、不同位置的相互作用信息提供了可能,从而为进一步研究细水雾与火相互作用的机理提供了更可靠、直观、快捷的研究方法.

图3给出了正庚烷扩散火焰在细水雾作用前后的热像图和热场等值线图.燃烧池内径为150mm,水压为0.5MPa.由图3不难看出,在没有细水雾作用时,火焰燃烧比较旺盛,火焰高度较高,它与空气的卷吸作用清晰可见.而当对其施加细水雾后,火势减小,整个火焰区的温度明显下降.在不到1min内,火焰高度减小了将近一半,火焰区温度下降了一半左右.这主要是在对扩散火焰施加细水雾后,细水雾与火焰发生相互作用,一方面细水雾通过汽化冷却燃料表面和氧化剂,另一方面通过体积膨胀隔氧以及吸收热辐射等使燃料表面和氧化剂的温度降低,从而抑制了燃烧速率,最终使火焰燃烧区温度降低、燃烧区域缩小直至火焰熄灭.

然而,实验发现当煤油火焰与细水雾发生相互作用时,其表现出与上面两种火焰明显不同的结果.图4给出了煤油与细水雾作用前后的热像图和热场等值线图,燃烧池内径为

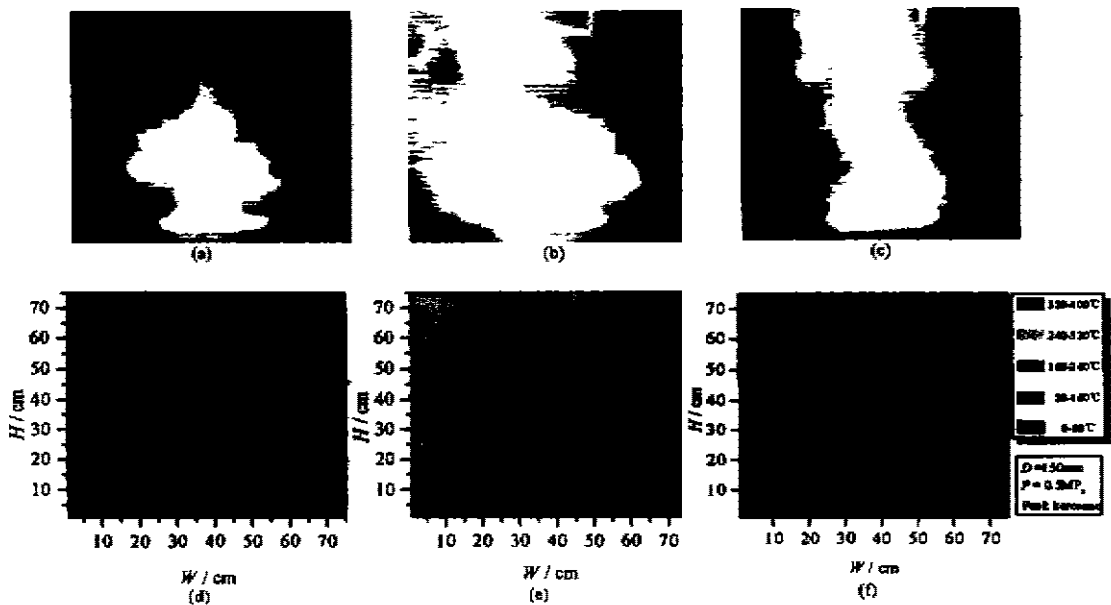


图4 煤油火焰在细水雾作用前后的热像图和热场等值线图

- (a) 没有细水雾作用时的热像图 (b) 施加细水雾 35s 后的热像图  
(c) 施加细水雾 60s 后的热像图 (d) 没有细水雾作用时的热场等值线图  
(e) 施加细水雾 35s 后的热场等值线图 (f) 施加细水雾 60s 后的热场等值线图

Fig. 4 The thermal images and thermal field contours of kerosene flame with or without the interaction of water mist

- (a) the thermal image without the interaction of water mist  
(b) the thermal image with the interaction of water mist after 35s  
(c) the thermal image with the interaction of water mist after 60s  
(d) the thermal field contour without the interaction of water mist  
(e) the thermal field contour with the interaction of water mist after 35s  
(f) the thermal field contour with the interaction of water mist after 60s

150mm, 水压为 0.5MPa. 从其热场结构图很容易看出, 当对煤油扩散火焰喷射细水雾时, 煤油火焰的高温区迅速扩大, 火焰高度也相应增大. 如在细水雾作用 35s 后, 整个火焰的高温区扩大了将近一倍多, 火焰与空气的卷吸作用也有所增强, 直到细水雾作用 60s 以后, 火势才逐渐减小, 高温区慢慢缩小. 初步分析认为, 出现这种现象的原因一方面是煤油燃烧时烟气浓度较大, 另一方面是该工质煤油的燃烧速率较大所致. 因为在这种情况下, 一部分细水雾在未达到火焰高温区就已经汽化或被烟气所带走, 反而使到达高温区特别是燃料表面的细水雾粒子大大减少, 这既减小了细水雾的汽化降温 and 冷却作用, 从而加速了气体燃料和氧化剂的混合过程. 此外, 水蒸汽的微爆和水分子分解可改变燃烧过程中的链反应(chain reaction), 同时释放更多的热量并减少热量的辐射损失.

#### 4 结论

通过上述实验研究, 初步得到以下结论:

(1) 对一定工质, 对于细水雾较易到达燃烧高温区和燃料表面的火焰, 细水雾主要通过汽化隔氧和冷却作用, 使火焰燃烧区和燃料表面的温度降低, 使火势减小, 直至熄灭火焰.

(2) 细水雾与煤油等烟气较浓的火焰在一定工质下发生相互作用时, 可加强火焰燃烧. 因此, 如果要通过细水雾有效抑制和熄灭煤油等燃料的火焰, 必须科学选择细水雾通量.

(3) 将热像仪应用于细水雾与火相互作用的实验研究, 大大提高了研究的科学性、有效性和模拟研究的可视性, 值得深入推广.

(4) 将热像仪应用于细水雾与火相互作用的实验研究, 为提高温度测量的精度, 通过实验测量获取燃烧火焰的发射率实际分布, 以便对红外热像仪的测温数据进行发射率修正.

#### REFERENCES

- 1 Ronald L. Alpert Incentive for use of misting sprays as a fire suppression flooding agent, *Water Mist Fire Suppression Workshop*, 1993, (Proceedings): 31~35
- 2 Mawhunny J R. Engineering criteria for water mist fire suppression system, *Water Mist Fire Suppression Workshop*, 1993(Proceedings): 37~73
- 3 William D B. Advances in spray drop size and velocity measurement capabilities for the characterization of fire protection systems, *Water Mist Fire Suppression Workshop*, 1993(Proceedings), 75~92
- 4 Sankar S V, Weber B J, Kamemoto D Y, Bachalo W D. Sizing fine particles with the phase Doppler interferometric technique, *Applied Optics*, 1991, 30(33): 65~81
- 5 QIN Jun, LIAO Guang-Xuan, WANG Xi-Shi, YAO Bin. Study on optical arrangement of numerical value experimentation in measurement large water mist drop diameter, *Chinese Journal of Quantum Electromes* (秦俊, 廖光焯, 王喜世, 姚斌, 大颗粒细水雾测量中光学系统布局的数值实验研究, *量子电子学报*), 1999, 16(1): 90~96
- 6 YAO Bin, LIAO Guang-Xuan, FAN Wei-Chen. Experiment study on the interaction of water mist with flame in the confined space, *Fire Science* (姚斌, 廖光焯, 范维澄, 受限空间内细水雾与火相互作用的实验研究, *火灾科学*), 1997, 6(2): 48~52
- 7 ZHANG Ming, ZENG Ling-Ke. IR thermal imaging test of the flare dynamic temperature field, *Laser & Infrared*, (张明, 曾令可, 火焰温度场的红外热成像动态测试, *激光与红外*), 1997, 27(5): 288~291

## INTERACTION OF WATER MIST WITH FLAME BY THE INFRARED FIELD DIAGNOSTIC METHOD\*

WANG Xi-Shi LIAO Guang-Xuan QIN Jun YAO Bin

(State Key Laboratory of Fire Science of USTC, Hefei, Anhui 230026, China)

**Abstract** By using the TVS-2000ST thermal video system, the thermal field structure variations of the diffusion flames were observed and measured before and after interaction with the water mist, and the interactions of the water mist with the flame of kerosene, ethanol and heptane were studied in the experiments, respectively, providing a simple and reliable experiment method for cognizance of the interaction mechanism of the water mist with the flame.

**Key words** thermal video system, diffusion flame, water mist.

---

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China  
Received 1998-06-04, revised 1999-01-15