

超细水雾抑制受限空间轰燃有效性实验研究

陈吕义^{1,2}, 宗若雯^{1,2}, 李松阳^{1,2}, 魏涛^{1,2}, 廖光煊^{1,2}

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230027;

2. 中国科学技术大学苏州研究院苏州城市公共安全重点实验室, 江苏苏州 215123)

摘要: 抑制轰燃能有效降低火灾造成的人员伤亡与财产损失。通过搭建超细水雾抑制受限空间轰燃的小尺寸实验台, 研究了超细水雾抑制轰燃的有效性及其影响因素。研究发现, 超细水雾抑制轰燃的效果依赖于雾通量、施加时刻、施加位置等因素。在雾通量充足时, 早期施加的抑制效果优于晚期施加, 从受限空间底部施加的抑制效果强于从侧上方施加; 雾通量不足时, 超细水雾的强化燃烧功能将加速、加剧轰燃的发生。

关键词: 轰燃; 超细水雾; 雾通量; 施加时刻; 施加位置

中图分类号: X932 文献标识码: A

Experimental study on restraining flashover by ultra-fine water mist in confined space

CHEN Lv-yi^{1,2}, ZONG Ruo-wen^{1,2}, LI Song-yang^{1,2}, WEI Tao^{1,2}, LIAO Guang-xuan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Suzhou Key Laboratory of Urban Public Safety, Suzhou Institute for Advanced Study, University of Science and Technology of China, Suzhou 215123, China)

Abstract: Restraining flashover would reduce fire loss effectively. After building a small scale compartment with ultra-fine water mist restraining confined space flashover, the restraining efficiency and influencing factors were investigated. It was found that the restraining effect relies on mist flux, discharging moment and position. With sufficient mist, early discharging showed better effect compared with discharging later, while discharging from the bottom worked better than from side faces. When insufficient mist flux, the combustion enhancing effect would accelerate and intensify flashover.

Key words: flashover; ultra-fine water mist; mist flux; discharge time; discharge position

0 引言

轰燃是建筑火灾中一类重要现象, 它始于一个相当小的固定火灾, 在某一时刻其增长速率和强度突然有一个快速的增加。轰燃的发生受房间大小、火

源位置、火源高度、开口大小、燃料荷载密度等因素的共同影响^[1]。在着火房间内, 通过启动自动灭火系统, 减小火源功率、降低烟气层温度、减少火源及烟气层对临近可燃物的热辐射, 可以避免或延缓轰燃的发生。

收稿日期: 2008-11-11; 修回日期: 2009-01-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50536030)和国家科技支撑计划(2006BAK06B07)资助。

作者简介: 陈吕义, 男, 1983年生, 博士生。研究方向: 清洁高效灭火。E-mail: lvyichen@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 宗若雯, 博士/副教授。E-mail: zongrw@ustc.edu.cn

细水雾灭火技术,以其清洁、高效的优越性,已成为哈龙灭火剂的主要替代技术,并在诸多领域内得到广泛的应用^[2~4]. 美国海军的 Mawhinney 等^[5]开展过利用细水雾抑制船舶舱室火灾的研究,结果表明细水雾能有效降低壁面及烟气层温度,抑制轰燃的发生. 第二代细水雾灭火技术——超细水雾^[6],其雾滴粒径小于 $50\ \mu\text{m}$,流动性更好,能绕过障碍物到达着火区域以降低火源功率;其比表面积的大能加速烟气冷却,有效降低烟气层的热辐射;此外,其用水量相比常规细水雾更少,在某些带电场所使用更加安全.

已有的超细水雾技术应用研究主要关注控火或灭火^[7,8]. 例如英国海军进行了超细水雾扑救潜艇鱼雷舱火灾的试验;英国民航局和美国联邦航空局研究了超细水雾控制民航机客舱火灾的有效性;英国石油公司开发了海上钻井平台机房燃料油贮罐高压喷雾超细水雾自动灭火系统^[9~11]. 轰燃是火灾增长的重要阶段,通过施加超细水雾抑制轰燃的发生,避免火势进一步增长,具有重要的实际意义,将超细水雾用于抑制轰燃,有着突出的技术优势与良好的应用前景.

因此,本文将构建模拟实验平台,对超细水雾抑制受限空间轰燃的有效性进行研究,总结其影响因素,期待为超细水雾抑制轰燃的工程应用提供理论依据与数据支持.

1 超细水雾抑制受限空间轰燃实验台及工况设计

参考 Holborn、Drysdale 等^[12,13]的小尺寸轰燃实验装置,本文设计的超细水雾抑制受限空间轰燃实验腔室尺寸为 $0.3\text{m}\times 0.3\text{m}\times 0.3\text{m}$,两面通风;中央布置一个油池火源,使用的油池尺寸为 $5.0\text{cm}\times 5.0\text{cm}$, $6.0\text{cm}\times 6.0\text{cm}$, $7.5\text{cm}\times 7.5\text{cm}$ 和 $9.0\text{cm}\times 9.0\text{cm}$,燃料为 93# 汽油;在油池底部装有电子天平,测量火源的质量损失速率. 实验台示意图如图 1 所示.

实验腔的壁面分为三层,最外层是钢板,中间为防火板,内衬为胶合板,在提供必要的可燃物的同时保证一定的隔热效果和密封性. 腔室的一个侧壁安装耐高温的钢化玻璃,以便使用摄像机记录实验过程. 在腔室内布置了 15 个热电偶,分成 3 层,用来测量超细水雾施加前后烟气层温度变化.

在实验台的底面和两个侧面设置喷雾口,开口

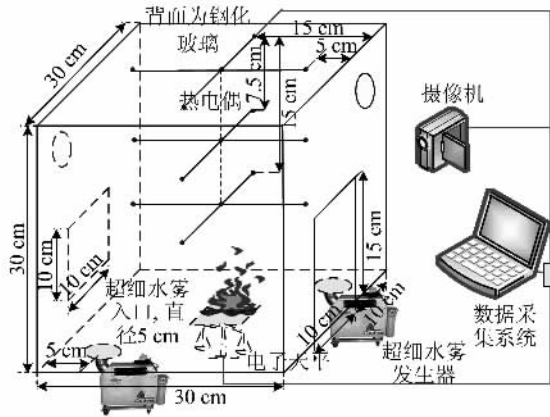


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental compartment

直径 5 cm,中心距离壁面边缘 5 cm,将其与超细水雾发生装置相连. 使用的超细水雾系统为两台超声雾化器,该装置利用高频超声波振动,将水雾化为 $5\sim 30\ \mu\text{m}$ 的微粒,单台雾化器的超细水雾生成速率为 $12\ \text{kg/h}$.

通过改变油盘尺寸、超细水雾施加与否、开始施加的时间及位置,得到的实验工况及抑制轰燃效果见表 1.

表 1 实验工况和结果

Tab. 1 Cases studied and results

工况编号	油盘尺寸 / (cm×cm)	燃料量 / g	细水雾施加与否及位置	施加时刻 / min	轰燃	玻璃破碎
1	5.0×5.0	58	不施加	—	否	否
2	6.0×6.0	83	不施加	—	否	否
3	7.5×7.5	120	不施加	—	是	否
4	7.5×7.5	120	底部两个	1	否	否
5	7.5×7.5	120	底部两个	8	是	是
6	7.5×7.5	120	两边两个	1	否	否
7	9.0×9.0	175	不施加	—	是	否
8	9.0×9.0	175	底部两个	1	是	否

2 实验结果与分析

实验中,烟气温度通过 15 个热电偶分层测量. 数据分析处理时,对每一层 5 个热电偶所测的温度求平均值,得到三个不同高度下的平均温度,再利用状态方程平均法^[14],求得烟气层平均温度. 假定油池燃料热解组分充分燃烧,通过测量得到的质量损失速率估算火源功率.

轰燃发生与否常用的判据如下^[15]:

- (I) 热烟气层温度超过 $600\ ^\circ\text{C}$;
- (II) 地面接收到的辐射热通量超过 $20\ \text{kW/m}^2$;

(Ⅲ) 腔室内所有可燃物被引燃, 并有火焰从通风口窜出;

本文选择准则(Ⅲ)作为腔室内是否发生轰燃的判断标准.

2.1 火源功率对轰燃发生的影响

受限空间内火源功率的大小对是否发生轰燃起着决定性影响. 火源功率必须要达到一个临界值才能发生轰燃现象. 典型变化火源功率的实验工况为 2, 3 和 7, 热释放速率曲线如图 2 所示, 三者的最大热释放速率分别为 8, 14 和 22 kW, 三者的烟气层平均温度曲线如图 3 所示.

McCaffrey 等^[16]和 Thomas^[17]分别提出了估算轰燃的临界热释放速率的经验模型, 如式(1), (2)所示.

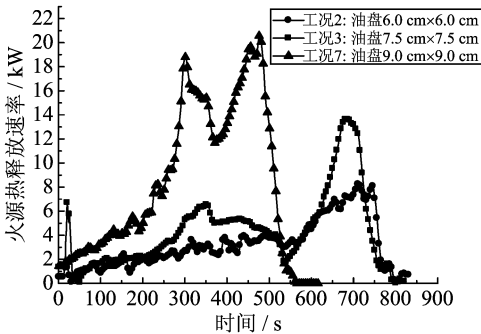


图 2 不同尺寸油盘火源热释放速率曲线

Fig. 2 Heat release rates with different pool fire acreages

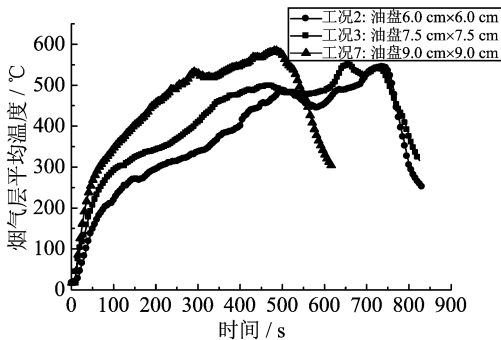


图 3 不同尺寸油盘烟气层温度变化曲线

Fig. 3 Temperature variation under different pool fire sizes

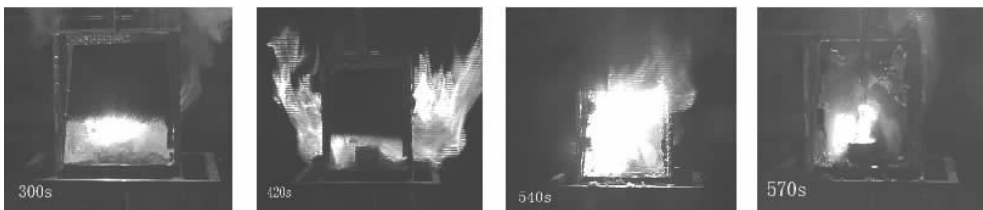


图 4 未施加超细水雾轰燃过程

Fig. 4 Flashover process without ultra-fine water mist

$$\dot{Q}_{to} = 750A_o \sqrt{H_o} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{to} = 7.8A_t + 378A_o \sqrt{H_o} \quad (2)$$

式中, A_o 为开口面积; A_t 为房间内表面面积减去开口面积; H_o 为开口高度. 利用 McCaffrey 及 Thomas 经验模型计算得出实验空间轰燃的临界热释放速率分别为 9.4 kW 和 8.7 kW. 由此可见, 对于工况 2, 由于油盘面积较小, 火源最大热释放速率不足, 受限空间热量积累不够, 烟气层温度始终没能上升到轰燃临界温度 600 °C, 燃烧一直持续到燃料耗尽, 不会发生轰燃. 当火源最大热释放速率超过临界值时, 能观察到明显的轰燃现象, 如工况 3 和 7. 值得注意的是, 工况 3 的平均烟气层温度并未达到 600 °C, 但是能观察到腔室内所有可燃物被引燃, 有火焰从通风口窜出, 因此本文未选择 600 °C 为轰燃判据是合理的.

2.2 超细水雾抑制轰燃过程分析

图 4 为未施加超细水雾的工况 7 发生轰燃的视频截图. 油盘点燃后, 腔室上部逐渐形成高温烟气层, 和火源一起通过热辐射加热腔室内的可燃物, 同时加速火源燃烧. 随着烟气层温度的逐步升高, 壁面接收到的热辐射也不断增加, 最终以瞬间燃烧强化的形式发生轰燃, 如图中 420 s 时火焰从腔室两边的开口涌出, 火源热释放速率显著增大, 钢化玻璃也随之破碎.

工况 4 中在燃烧 1 min 后从腔室底部施加超细水雾, 图 5 为此时的抑制轰燃效果截图. 超细水雾施加后被火羽流卷吸至顶部烟气层, 其良好的降温效果抑制了烟气层温升, 使之始终低于轰燃临界温度 600 °C, 避免了轰燃的发生. 此外, 卷吸至火焰区的超细水雾也能有效降低火焰区温度, 同时烟气层反馈的热辐射也显著减少, 因此火源的热释放速率也会随着超细水雾的施加而降低.

2.3 超细水雾抑制受限空间轰燃的影响因素分析

2.3.1 超细水雾雾通量对抑制效果的影响

在火源功率、超细水雾施加时间、施加位置一定

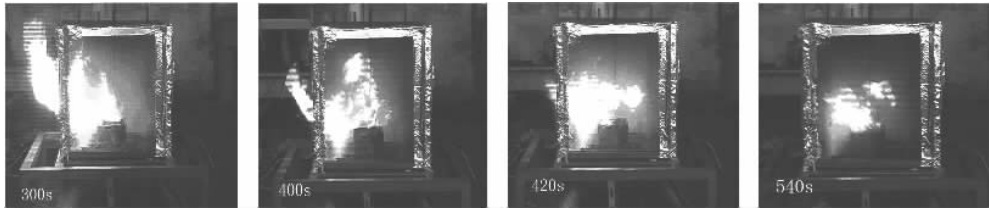


图 5 超细水雾抑制轰燃过程

Fig. 5 Flashover restraining process with ultra-fine water mist

时,雾通量的大小决定了抑制轰燃的效果;雾通量固定时,抑制效果则依赖于施加时的火源功率.以工况 4 和 8 为例,点火 1 min 后施加超细水雾,火源功率和烟气层温度对比如图 6 和图 7 所示.由图可见,工况 8 超细水雾施加时烟气层温度已经达到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,实验使用的雾通量已无法对烟气实施有效降温,导致烟气层温度继续升高至 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$,火源热释放速率增长至 37 kW ,最终发生了轰燃;而工况 4 施加超细水雾时烟气温度仅为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,实验使用的雾通量能有效抑制烟气升温,避免了轰燃的发生.

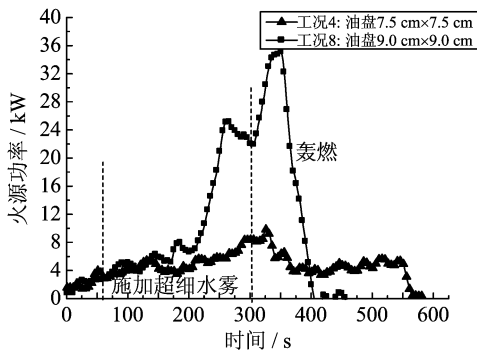


图 6 不同尺寸池火施加超细水雾火源功率变化曲线

Fig. 6 Heat release rates with ultra-fine mist discharge under different pool fire sizes

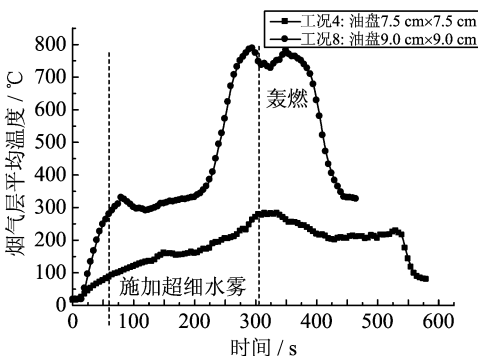


图 7 不同尺寸池火施加超细水雾烟气层温度变化曲线

Fig. 7 Temperature variation with ultra-fine mist discharge under different pool fire sizes

由此可见,超细水雾抑制轰燃必须满足一定的雾通量,保证蒸发吸热能有效抑制烟气层温升,才能实现抑制轰燃的目标.

2.3.2 超细水雾施加时间对抑制效果的影响

超细水雾施加时间对抑制效果也至关重要.和细水雾在其他火灾场合的应用一样,在火灾发生的早期施加超细水雾取得的抑制效果最明显.当火灾发展到临近轰燃时,超细水雾不仅不能遏制火势,反而可能会因细水雾的强化燃烧而加速加剧轰燃的发生.

图 8 和图 9 给出了不同时刻施加超细水雾后的热释放速率和温度变化曲线.如图所示,工况 4 和 5 中,火源功率相同,工况 5 在 8 min 时施加超细水雾,此时的烟气层温度约 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$,超细水雾无法有效降低烟气温度,反而加速了轰燃的发生.如图 8 中热释放速率曲线,480 s 施加超细水雾后有个明显的增大过程,最大热释放速率达到 25 kW ,远远高出施加超细水雾时的最大热释放速率 14 kW .

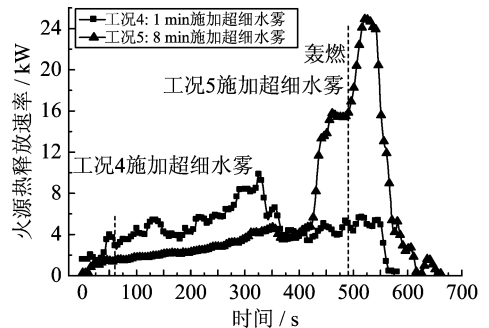


图 8 不同时刻施加超细水雾火源功率变化曲线

Fig. 8 Heat release rates with ultra-fine mist discharge at different moment

因此,使用超细水雾抑制轰燃时,及早释放超细水雾抑制效果较好,反之则易加速加剧轰燃的发生.

2.3.3 超细水雾施加位置对抑制效果的影响

实验发现,在不同位置施加超细水雾对抑制轰燃也有不同的效果.改变工况 4 的超细水雾施加位

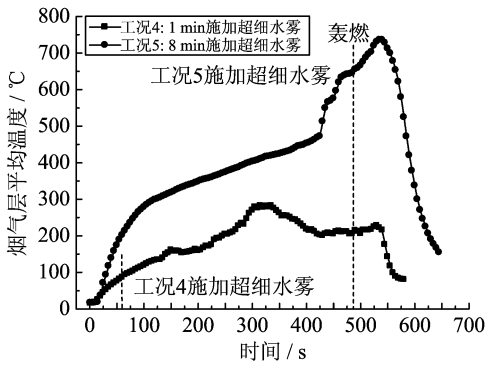


图9 不同时刻施加超细水雾烟气层温度变化曲线

Fig. 9 Temperature variation with ultra-fine water mist discharge at different moment

置,工况6的超细水雾从侧上方的两个入口施加,实验得出的热释放速率曲线和烟气层温度曲线对比如图10和图11所示。两者都能有效抑制轰燃,热释放速率峰值基本相同,但是工况6的烟气温度明显高于工况4。分析原因为底部施加时能更有效地降低燃烧区的温度,其降温效果优于侧面施加,这种方式

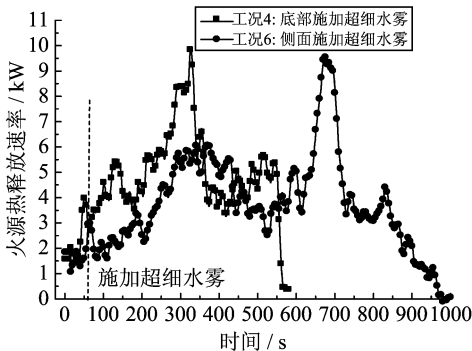


图10 不同位置施加超细水雾火源功率变化曲线

Fig. 10 Heat release rates with ultra-fine mist discharge from different location

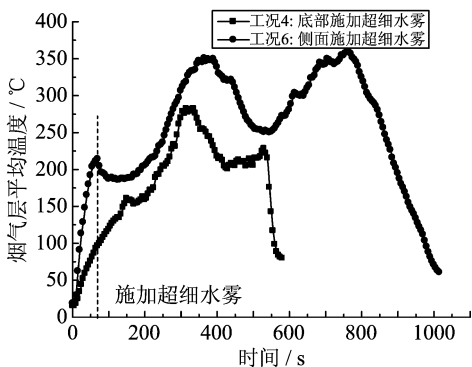


图11 不同位置施加超细水雾烟气层温度变化曲线

Fig. 11 Temperature variation with ultra-fine mist discharge from different location

更为可取。

3 结论

通过上述工况的实验可以发现,对于一定尺寸的受限空间,在不施加超细水雾的情况下,其火源功率必须达到一定的临界值才会出现轰燃现象。超细水雾的降温、阻隔热辐射能力使得它能够有效抑制轰燃的发生,其抑制轰燃的效果与其雾通量、施加时间、施加位置等因素相关,实验揭示其影响规律如下:

(I) 超细水雾抑制轰燃必须有足够大的雾通量,以实现烟气层有效降温或延缓其升温。

(II) 在雾通量足够大的情况下,火灾早期施加超细水雾能明显抑制轰燃的发生;相对来说晚期施加的抑制效果不佳,超细水雾的强化燃烧功能可能加速加剧轰燃的发生。

(III) 从受限空间底部施加超细水雾能同时降低烟气温度和燃烧区域温度,其抑制效果优于从侧上方施加。

参考文献(References)

- [1] Thomas P H, Bullen M L, Quintiere J G, et al. Flashover and instabilities in fire behavior [J]. Combustion and Flame, 1980(38):159-171.
- [2] Mawhinney J R, Solomon R S. Water mist fire suppression systems[M]. Fire protection handbook. 18th ed. Quincy: National Fire Protection Association, 1997.
- [3] Liao Guang-xuan, Huang Xin, Cong Bei-hua, et al. Progress in water mist fire suppression technology[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2006, 36(1):9-19.
- [4] 姚斌,廖光焯,范维澄,等. 细水雾抑制扩散火焰的研究[J]. 中国科学技术大学学报,1998,28(5):610-617.
- [5] Mawhinney J R, DiNunno P J, Williams F W. Using water mist for flashover suppression on navy ships [C]// Proceedings of halon alternatives technical working conference. 1999:395-403.
- [6] Adiga K C, Adiga R, Hatcher R F. Method and device for production, extraction and delivery of mist with ultrafine droplets; US, 6883724[P]. 2005-04-26.
- [7] Adiga K C, Adiga R. Fire suppression using water mist with ultra fine size droplets; US, 7090028[P]. 2006-08-15.
- [8] Adiga K C, Williams F W. Ultra-fine water mist as a total flooding agent: A feasibility study [C]//

- Proceedings of Halon Options Technical Working Conference. 2004.
- [9] DiNenno P J, Starchville M D. Fire protection of vital electronics spaces [R]. Washington, DC: Naval Research Laboratory, 1987.
- [10] Scheffey J L. Outline Fire Hazard Analysis for DDX Electronics Spaces. Version 1.1[R]. Bath Iron Works and Northrup Grumman Ship Systems, 2002.
- [11] DiNenno P J, Scheffey J L, Tatem P A, et al. Inert Gas/Water Hybrid Suppression System for Naval Shipboard Use[R]. Washington, DC: Naval Research Laboratory, 2001. NRL Letter Report Ser 6180/0364.
- [12] Holborn P G, Bishop S R, Drysdale D D, et al. Experimental and theoretical models of flashover[J]. Fire Safety Journal, 1993, 21:257-266.
- [13] Bishop S R, Holborn P G, Beard A N, et al. Nonlinear dynamics of flashover in compartment fires [J]. Fire Safety Journal, 1993, 21:11-45.
- [14] He Y. On experimental data reduction for zone model validation[J]. Journal of Fire Sciences, 1997, 15: 144-161.
- [15] Drysdale D. An Introduction to Fire Dynamics[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [16] McCaffrey B J, Quintiere J G, Harkleroad M F. Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations[J]. Fire Technology, 1981, 17 (2): 98-119.
- [17] Thomas P H. Testing products and materials for their contribution to flashover in rooms [J]. Fire and Materials, 1981, 5 (3):103-111.

(上接第 776 页)

- [3] 孙即祥. 现代模式识别[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.
- [4] 边肇祺, 张学工. 模式识别(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [5] 牛丽红, 倪国强, 苏秉华. 一种新的自组织聚类网络及其在数据融合目标分类中的应用[J]. 光学技术, 2003, 29(1):66-68.
- [6] 牛丽红, 苏秉华, 倪国强. 基于 Dignet 网络的数据融合方法[J]. 光学技术, 2006, 32(2):171-173, 176.
- [7] Wann C D, Thomopoulos S C. Unsupervised learning neural networks with applications to data fusion[C]// Proceeding of 1994 American Control Conference. 1994:1 361-1 365.
- [8] Thomopoulos S C A, Bougoulas D K, Wann C D. Dignet: an unsupervised-learning clustering algorithm for clustering and data fusion[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1995, 31 (1): 21-38.
- [9] Carpenter G A, Grossberg S. ART2: Self-organization of stable category recognition codes for analog input patterns[J]. Applied Optics, 1987, 26 (23): 4 919-4 930.
- [10] Wang De-min, Wu Long-biao, Wu Zhen-kun. A fire detection system using self-adaptive clustering algorithm[C]//Proceedings of the 2002 International Symposium on Safety Science and Technology. Beijing: Science Press, 2002:1 214-1 219.
- [11] 王德民. 基于智能信息处理方法的火灾探测算法研究[D]. 硕士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2003.
- [12] Wann C D, Thomopoulos S C A. A comparative study of self-organizing clustering algorithms Dignet and ART2[J]. Neural Networks, 1997, 10(4):737-753.
- [13] Wann C D, Thomopoulos S C A. Application of self-organizing neural networks to multiradar data fusion [J]. Optical Engineering, 1997, 36(3):799-813.
- [14] European Committee for Standardization. Part7, point type smoke detectors: Detectors using scattered light, transmitted light or ionization[S]//European Standard EN54: Components of automatic fire detection systems. Brussels: European Committee for Standardization, 1984.