

# 含沙火源对室内火灾温度的影响

宋 虎, 杨立中, 范维澄, 翁文国

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230027)

**[摘要]** 当室内火灾发展到轰燃时, 房间温度急剧升高, 室内所有可燃物表面都发生燃烧, 从而造成严重的建筑破坏、财产损失和人员伤亡。研究了汽油作为燃料的情况下, 在其中加不同量的沙子, 对室内火灾温度的抑制作用。通过假设沙面下方存在着一定厚度的过渡层, 对火源的燃烧过程进行简化处理, 发现腔室上层热烟气温度到达峰值的时间、峰值大小和熄火速率都与火源的含沙量有明显的依赖关系。实验数据显示, 这种理论分析是合理的。

**[关键词]** 含沙火源; 室内火灾; 轰燃

**[中图分类号]** TU998.12

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1009-1742(2002)05-59-04

在人们的日常生活中, 室内火灾的发生频率和火灾损失呈逐年上升趋势。造成建筑物破坏、财产损失以及人员伤亡的一个重要原因是, 房间内充满了高温的火焰和热烟气。在室内火灾的初始阶段, 随着局部小火的逐渐增大, 顶篷下方逐渐积累了大量的热烟气, 形成一个热气层, 热气层对火源的辐射使得小火迅速增长, 进而提高了烟气层的温度。在这个正反馈作用下, 房间内的其它可燃物逐渐热解气化, 当条件具备时, 它们表面都会起火, 于是室内便充满了熊熊大火。这就是室内火灾的常见现象——轰燃<sup>[1,2]</sup>。轰燃伴随着释热速率和温度的急剧增高, 并可能有火焰从门窗向外蹿出。空气的缺乏使得燃烧无法充分进行, 因此室内充满了大量的高温烟气。轰燃一旦发生, 房间内的生命体几乎没有存活希望, 房屋结构也会受到严重的损坏。根据BFRL的报道, 城市火灾中有80%的死亡是在产生轰燃的房间外部发生的<sup>[3]</sup>。如果我们能够有效地抑制火源的功率, 那么就可以大大降低房间的温度, 从而避免轰燃的发生, 减少财产损失、人员伤亡和保护房屋建筑。在抑制轰燃方面, 很多人进行了水喷淋方面的研究<sup>[4-7]</sup>。而我们知道, 在实际的消防过程中, 沙子对于扑灭油火是比较有效

的。因此, 作者研究了汽油作为火源的情况下, 其含沙量对腔室温度演变过程的影响。

## 1 轰燃实验台简介

作者设计了一个小尺度的轰燃实验台(见图1), 整个腔体的内尺寸是800 mm×800 mm×800 mm, 壁面材料使用的是硅酸棉, 以保证实验过程中腔体内部热量通过壁面的损失较小。腔体前端是可控高度和宽度的通风口。其中, 6支热电偶每

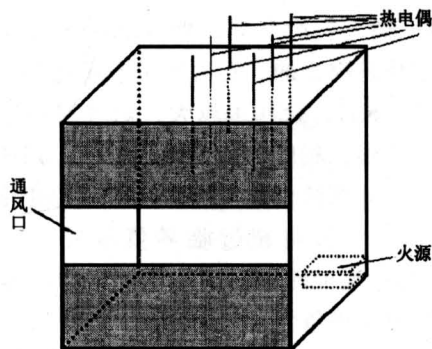


图1 轰燃实验台示意图

Fig.1 Sketch of flashover compartment

**[收稿日期]** 2001-12-03

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目(59936140), 国家重点基础研究专项经费(2001CB409600)

**[作者简介]** 宋虎(1975-), 男, 山东莱州市人, 中国科技大学博士研究生

支上布有5支热电偶,用来测量热烟气层在不同高度的温度。火源是一个铁制方型容器,所盛的燃料是90号汽油,置于腔体的后端墙角。

## 2 实验工况及结果分析

在所有的实验工况下,开口下缘为300 mm,上缘为500 mm,高度为200 mm,宽度为800 mm。其中,含沙量 $\varphi$ 定义为沙层与浸在其中的汽油的体积之比;临界含沙量 $\varphi_c$ 为单位体积汽油所能浸透的最大沙层体积。通过实验确定, $\varphi_c = 1.79$ ;  $H$ 为总油量除以火源的基底面积。

通过图2可以看出:

- 1) 当火源未含沙时(S3曲线),烟气层的温度在517 s时达到峰值831℃(见表1);
- 2) S4实验的油量和含沙量都较大,而且油面高于沙面,烟气层的温度在259 s时即达到其峰值507℃;
- 3) S5实验的油量和含沙量大致是S4实验的

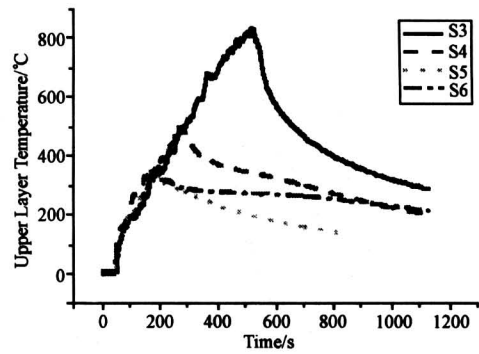


图2 含沙量对烟气层温度的影响

Fig.2 Effect of sand ratio on smoke layer temperature

一半,但油全部浸在沙层里,烟气层温度达到峰值(361℃)的时间的提前至189 s;

- 4) S6实验的油量介于S3和S4之间,但含沙量是最大的,油完全浸在沙层里,烟气层温度在174 s时达到峰值357℃。

表1 不同汽油量、沙量的实验数据

Table 1 Experiment data of different quantity of gasoline and sand

实验编号	火源尺寸 /mm·mm	汽油量 /ml	沙层高度 /mm	油面净高度 /mm	含沙量 $v/\%$	热烟气层最高平均温度 /℃
3	200×200	1100	0	27.5	0	831
4	200×200	790	30	3	1.52	507
5	200×200	380	17	0	1.79	361
6	200×200	940	48	0	2.04	357

比较S3~S6,我们发现,烟气层温度在开始阶段的变化趋势是吻合的,在含沙量不超过临界值的情况下(S3~S5),含沙量越大,烟气层到达温度峰值的时间越短,相应的温度峰值越低;到达温度峰值以后,不同含沙量对应的降温速率的变化趋势是类似的。当含沙量超过临界值以后(S5~S6),烟气层到达温度峰值的时间相近,含沙量越大,对应的降温速率越慢。

点火之前,汽油表面上方已经存在着少量的挥发气,点火以后,气相火焰迅速扩大,向上形成火焰羽流,到达顶篷以后在水平方向蔓延形成射流。聚积在顶篷下方的热烟气层和羽流对火源进行辐射加热,从而增大了汽油的挥发速度,提高了火源的燃烧速率,进而又促进了热烟气层温度的升高。要维持这个反馈作用,一方面需要充足的空气,另一方面需要充足的汽油。当第一个条件不满足时,室

内火灾就会从燃料控制向通风控制转变,这个转变过程也可称为轰燃;为了满足第二个条件,要求汽油挥发气不断从沙层内部向表面逸出。下面就第二个条件进行详细的阐述。

假设沙面下方存在一个厚度为常数 $\delta$ 的沙层过渡层见图3,在这个过渡层内,汽油的挥发速度与油层的大致相等;过渡层以下的部分(厚度为 $d' = d - \delta$ ),汽油的挥发速度明显变慢。从而可以把油层与过渡层合并成厚度为 $h'$ 的复合油层,在这个层内,汽油的挥发速度快,使得燃烧速率持续增大,当挥发完毕后,烟气层到达温度峰值;然后汽油挥发气以较低的速度从厚度为 $d' = d - \delta$ 的沙层里逸出,燃烧速率下降,烟气层温度开始降低,直至熄火。从上面的分析可以看出, $h'$ 决定了达到峰值的时间,而熄火的速率则由复合油层下部沙层的含油量决定。

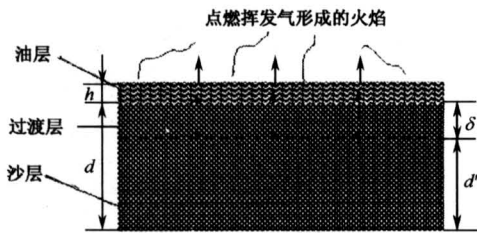


图3 含沙火源燃烧示意图

Fig.3 Sketch of combustion process of fire source with sand

1)  $\varphi < \varphi_c$ :

根据含沙量  $\varphi$  的定义, 可以得到  $\varphi = \frac{d}{H}$ 。  $\varphi < \varphi_c$  意味着沙层全部浸透在汽油中, 所以复合油层厚度  $h'$  与含沙量  $\varphi$  的关系如下:

$$h' = h + \frac{\delta}{\varphi_c} = \left( H - \frac{d}{\varphi_c} \right) + \frac{\delta}{\varphi_c} = H \left( 1 - \frac{\varphi}{\varphi_c} \right) + \frac{\delta}{\varphi_c} \quad (1)$$

如果固定  $H$ , 则  $\varphi$  越大,  $h'$  越小, 汽油挥发量越少, 从而燃烧速率和烟气层温度越低, 烟气层温度到达峰值的时间越短, 峰值也随之降低。

因为复合油层以下沙层是被汽油完全浸透的, 因此含油量  $\psi$  为:

$$\psi = \frac{1}{\varphi_c} \quad (2)$$

容易看到,  $\psi$  是个常数, 即油面高于沙面时, 熄火速率与含沙量无关。

2)  $\varphi \geq \varphi_c$ :

当  $\varphi \geq \varphi_c$  时, 根据  $\delta$  的定义, 过渡层内仍是被汽油浸透的, 即有:

$$h' = \frac{\delta}{\varphi_c} = \text{常数} \quad (3)$$

所以不论油量多少, 烟气层温度到达峰值的时间和峰值大小完全由常数  $h'$  的大小决定。而复合油层以下沙层的含油量  $\psi$  为:

$$\psi = \frac{H - h'}{d'} = \frac{H - \frac{\delta}{\varphi_c}}{d - \delta} = \frac{H - \frac{\delta}{\varphi_c}}{H\varphi - \delta} \quad (4)$$

可见,  $H$  不变的情况下, 含沙量  $\varphi$  越大,  $d'$  越厚, 从而熄火速率越低, 熄火所需时间越长。

在实验中还发现, 含沙的汽油比不含沙的汽油, 点燃后产生的火焰羽流要稳定的多, 这是因为挥发气从沙层内部向外逸出的过程中, 沙子颗粒的

阻力使得逸出速度相对平稳。

### 3 结论

1) 不含沙情形下, 汽油火可以在室内产生高达  $800\text{ }^\circ\text{C}$  的上层热烟气, 这个温度足以使得室内其他可燃物发生足够的热解乃至燃烧, 然而含沙火源所产生的热烟气温度显著降低, 到达温度峰值的时间也明显提前, 这就大大减少了室内火灾发生的可能性。这就为实际中的扑救火灾提供了一定的实验和理论依据。

2) 将沙面下方的过渡面假设成为油面, 可以解释实验测得的烟气层温度曲线: 在总油量一定的情况下, 当含沙量超过临界值时, 含沙量越大, 热烟气层温度到达峰值的时间越提前, 峰值越低, 而熄火速率是恒定的; 当汽油的含沙量低于临界值时, 热烟气层温度到达峰值的时间与含沙量无关, 而熄火速率随着含沙量的增大而降低。

### 4 进一步的工作

(3) 式和 (4) 式的适用前提是总油量能够浸透厚度为  $\delta$  的沙层, 即  $H \geq \frac{\delta}{\varphi_c}$ 。如果含沙量过大, 该前提无法满足, 故有  $\delta = 0$ , 即  $h' = 0$ ,  $d' = d$ , 从而 (4) 式化为

$$\psi = \frac{H}{d} = \frac{1}{\varphi_c} \quad (5)$$

在这种情况下, 热烟气层温度到达温度峰值的时间应该变短, 而峰值应当变小, 不过这有待更多的实验数据来证明。

#### 参考文献

- [1] 范维澄等编著, 火灾科学导论[M], 湖北科学技术出版社, 1993, 403-426
- [2] Drystale D D. An Introduction to Fire Dynamics(2nd Edition)[M], December 1998
- [3] BFRL Program, Reduced Risk of Flashover [Z], [http://www.bfrl.nist.gov/goals\\_programs/01prgmRRF.htm](http://www.bfrl.nist.gov/goals_programs/01prgmRRF.htm)
- [4] Novozhilov V. Flashover control under fire suppression conditions[J]. Fire Safety Journal, 2001, 36:641~660
- [5] Novozhilov V, Kent J H. Effect of sprinkler operation on flashover development of compartment fires [A]. 1999 Australian Symposium on Combustion and the Sixth Australian Flame Days [C]. The University of Newcastle, 175~179.

- [6] Mawhinney J, DiNunno P J, Williams, F W. Water mist flashover suppression and boundary cooling system for integration with DC-ARM volume I: Summary of testing[J]. NRL/MR/6180-99-8400, 30 September 1999
- [7] Kung H C, Cooling of room fires by sprinkler spray[J]. ASME Trans J Heat Transfer 1977,99:353.

## The Effect of Fire Source with Sand on the Temperature of Compartmental Fires

Song Hu, Yang Lizhong, Fan Weicheng, Weng Wenguo  
(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

[Abstract] When compartment fire reaches flashover, the temperature rises rapidly, resulting in the ignition of all surfaces of the combustibles within the compartment. In this paper, the suppression method of adding sand into the fire source (gasoline) is discussed. Through assuming a transition layer below the surface of sand, the combustion process of the fire source can be simplified. It is found that the time to the peak value of the upper layer temperature, the peak value itself and the rate of extinguishment have obvious dependence on the volume ratio of sand to the fire source (gasoline). Experimental results show that the theoretical analysis is reasonable.

[Key words] fire source with sand; compartmental fire; flashover



中国工程院

ENGINEERING SCIENCE (English Edition)

## 《中国工程科学》(英文版)征稿启事

由中国工程院出版委员会主办的综合学术科技期刊 **ENGINEERING SCIENCE English Edition (Quarterly)**——《中国工程科学》英文版(季刊)将于2002年9月创刊。它以国内外科技工作者及高校师生为读者对象,报道工程科学技术的最新研究成果及发展趋势。本刊欢迎有关机械、运载、信息、电子、化工、能源、矿业、土木、水利、建筑、农业、轻纺、环境、医药卫生等工程领域及工程管理方面的高质量学术论文、最新科技信息、综述、书评等稿件。

### 来稿要求及注意事项

1. 论文要用英文撰写,要求论点明确,数据可靠,条理分明,文词精炼,一般不超过8000单词。来稿一定是5号字(12~10 pt)的打印件,中英文各2份,并附软盘。
2. 来稿要有100~200单词的英文摘要和3~8个关键词。如引用他人研究成果时要指明出处,并在参考文献中列出。本刊参考文献的著录格式采用“顺序编码制”。如文稿阐述的研究工作受到基金资助,请在文章首页注明(脚注)基金种类和资助项目编号。
3. 图表要清晰准确。图件最好用计算机绘制,激光打印;照片用原件或高线扫描件;表格采用“三线表”。

4. 论文的撰写应符合国际惯例,执行国家标准和法规,使用法定的计量单位和量符号。

5. 请附信简要说明工作背景、成果意义及学科分类。请提供作者简介(如姓名、性别、出生年、毕业学校及专业、学位及技术职称、工作单位及主要研究方向等)和联系方式。同时提供2~4位非本单位的同行专家学者的详细通讯方式,以便稿件送审时参考。

文稿采用与否,由本刊编委会审定。如作者在投稿后的三个月内未得到录用或修改稿件通知,可自行处理。切莫一稿两投。

### 来稿请寄:

北京西直门外文兴街1号  
《中国工程科学》杂志社  
(注明:英文版)  
邮编:100044  
电话及传真:  
010-68336805  
E-mail:  
bees@public3.bta.net.cn

