

## 基于不规则顶棚假设的顶部开口舱室 烟气填充时间预测模型

李 强<sup>1,2</sup>, 陆守香<sup>1</sup>, 张佳庆<sup>1</sup>, 陈 兵<sup>3</sup>, 黎昌海<sup>1</sup>

(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. 中国人民武装警察部队学院, 河北廊坊 065000; 3. 中国安全生产科学研究院, 北京 100000)

**摘要:**基于不规则顶棚假设,建立了一种适用于顶部开口舱室火灾烟气填充时间的预测模型.通过与3.0 m(长)×3.0 m(宽)×1.95 m(高)顶部开口舱室油池火实验进行对比,考察了火源直径为0.10,0.14,0.20和0.30 m,顶部开口面积为0.01,0.04,0.09,0.14,0.25和0.32 m<sup>2</sup>情况下模型预测结果与实验测量结果(测温法和消光法)间的相似关系.结果表明,模型预测结果与实验测量结果表现出良好的一致性.

**关键词:**舱室火灾;顶部开口;烟气填充时间

**中图分类号:**X932      **文献标识码:**A      doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2013.05.008

**引用格式:** Li Qiang, Lu Shouxiang, Zhang Jiaqing, et al. A model for predicting smoke filling time in a compartment with ceiling vents based on the assumption of an irregular ceiling [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013, 43(5):402-409.

李强,陆守香,张佳庆,等. 基于不规则顶棚假设的顶部开口舱室烟气填充时间预测模型[J]. 中国科学技术大学学报,2013,43(5):402-409.

### A model for predicting smoke filling time in a compartment with ceiling vents based on the assumption of an irregular ceiling

LI Qiang<sup>1,2</sup>, LU Shouxiang<sup>1</sup>, ZHANG Jiaqing<sup>1</sup>, CHEN Bing<sup>3</sup>, LI Changhai<sup>1</sup>

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

2. Department of Fire Engineering, Chinese People's Armed Police Academy, Langfang 065000, China;

3. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100000, China)

**Abstract:** Based on the assumption of an irregular ceiling, a model was established for predicting smoke filling time in a compartment with ceiling vents. 24 experiments were conducted in a compartment with an interior dimension of 3.0 m(L)×3.0 m(W)×1.95 m(H). Four pool fires with diameters of 0.10, 0.14, 0.20 and 0.30 m, six ceiling vents with areas of 0.01, 0.04, 0.09, 0.14, 0.25, and 0.32 m<sup>2</sup> were used in the experiments. Two methods for measuring smoke filling time with temperature and light extinction were used. A comparison of the model prediction results with those of the experiments shows a good

收稿日期:2012-11-12;修回日期:2013-03-22

基金项目:国家自然科学基金(50976109),灭火救援技术公安部重点实验室开放课题(KF2012005),高等学校博士学科点专项科研基金(20123402110048)资助.

作者简介:李强,男,1979年生,博士生/副教授.研究方向:受限空间火灾动力学. E-mail: sterops@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:陆守香,博士/教授. E-mail: sxlu@ustc.edu.cn

agreement between them.

**Key words:** compartment fire; ceiling vent; smoke filling time

## 0 引言

烟气在单室空间的填充过程是火灾科学研究中所关注的基本内容之一<sup>[1]</sup>. 建立烟气填充时间预测模型, 不仅可以为评估建筑安全疏散设计给出烟气层填充至临界高度的可用安全疏散时间(available safe egress, ASET)<sup>[2]</sup>, 亦可以作为其他模型建立的基础, 预测温度等火灾参数的变化规律<sup>[3]</sup>. 前人对单室空间烟气填充过程的研究, 多是基于侧壁有门、窗等竖直开口的建筑空间开展的. 当空间体积相对较小时, 研究主要关注侧壁开口位置<sup>[4]</sup>、火源水平位置<sup>[5]</sup>和房间宽高比<sup>[6-7]</sup>等对烟气填充过程的影响. 而对于中庭等高大空间建筑, 研究则是基于小尺度实验和理论分析建立烟气填充时间预测模型<sup>[8-10]</sup>. 通过与全尺寸实验测量结果进行比较, 分析和评价模型的预测效果<sup>[10-13]</sup>. 对于顶部存在水平开口的建筑空间: ①当顶部开口为自然或机械排烟口、侧壁开口为补风口时, 研究主要侧重对顶部开口排烟效果的分析<sup>[14-15]</sup>, 所建立的模型以 Baines 点源湍流浮力羽流理论<sup>[16]</sup>为基础, 通过分析控制体内的质量守恒和能量守恒关系, 计算烟气层最终距地高度; ②当火源规模较大时, 顶部开口与侧壁竖直开口的耦合关系将会对火灾发展产生复杂影响<sup>[17-19]</sup>, 进而影响烟气的填充过程.

与上述建筑结构不同, 在船舶机舱、地下安全壳等受限空间, 出于功能需要开口通常位于空间顶部, 而在空间侧壁无其他开口. 在火灾学研究中, 该类空间被简化为一个仅具有顶部水平开口的受限空间, 称为顶部开口舱室<sup>[20-21]</sup>. 研究表明, 顶部开口舱室发生火灾时, 通过水平开口流入舱室的空气质量流量仅为相同尺寸竖直开口的 1/10<sup>[22]</sup>. 舱内的火行为与缺氧环境燃烧相似, 呈现出多种特殊火焰燃烧状态<sup>[18, 21, 23]</sup>. 此外, 在压力和密度差的共同驱动下, 顶部水平开口处存在较为复杂的气体交换模式<sup>[24-25]</sup>. 由于火灾烟气的产生和蔓延主要依赖于可燃物性质、燃烧状态以及舱室结构等因素影响<sup>[26]</sup>, 顶部开口舱室的特殊火焰燃烧状态和复杂开口气体交换模式将会对舱室内的烟气填充过程产生影响. 因此, 有必要建立适用于顶部开口舱室的烟气填充时间预测模型.

本文从质量守恒和能量守恒出发, 基于不规则顶棚假设, 建立了适用于顶部开口舱室的烟气填充时间预测模型. 通过与 3.0 m(长)×3.0 m(宽)×1.95 m(高)顶部开口舱室池火实验结果进行比较, 对模型预测结果进行了检验.

## 1 顶部开口舱室烟气填充时间预测模型

火灾产生的热烟气到达顶棚后, 在顶棚射流作用下向四周展开, 并不断下压开始对舱室空间进行填充. 考虑控制体内的质量守恒关系, 则有

$$\frac{d}{dt}(\rho_g V_g) - \dot{m}_p = 0 \quad (1)$$

式中,  $\rho_g$ /(kg·m<sup>-3</sup>)是烟气层的密度;  $V_g$ /m<sup>3</sup>是烟气层的体积;  $\dot{m}_p$ 是通过羽流卷吸离开下部控制体的质量流率, 根据 Zukoski 羽流方程<sup>[4]</sup>可表示为

$$\dot{m}_p = 0.21 \left[ \frac{\rho_a g}{c_p T_a} \right]^{1/3} \cdot \dot{Q}^{1/3} \cdot z^{5/3} \quad (2)$$

式中,  $\rho_a$ /(kg·m<sup>-3</sup>)是下部冷空气层的密度;  $T_a$ /K是下部冷空气层的温度;  $c_p$ /(kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)是空气的比定压热容;  $\dot{Q}$ /kW 是对流热释放速率;  $z$ /m 是烟气层距地高度.

对于如图 1 所示舱室, 式(1)可表示为

$$\rho_g \cdot S \cdot \frac{dz'}{dt} - \dot{m}_p = 0 \quad (3)$$

式中,  $S$ /m<sup>2</sup>是顶棚面积;  $z'$ /m 是烟气层厚度, 显然  $dz'/dt = -dz/dt$ .

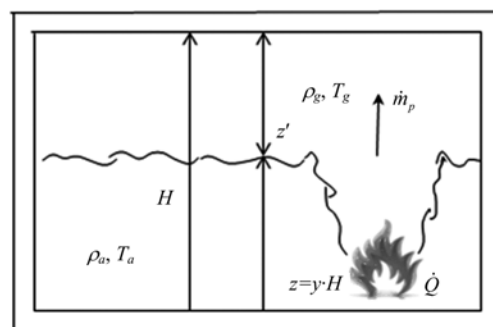


图 1 舱室空间的烟气填充过程示意图

Fig. 1 Schematic of the smoke filling process in a compartment

将式(2)带入式(3)进行整理, 可以得到舱室烟气填充时间为<sup>[27]</sup>

$$t = \frac{3}{2} \cdot \frac{\rho_g}{k \cdot \dot{Q}^{1/3}} \cdot S \cdot \left[ \frac{1}{z^{2/3}} - \frac{1}{H^{2/3}} \right] \quad (4)$$

式中,  $k=0.21(\rho_a g / (c_p T_a))^{1/3}$ .

而对于顶部开口舱室, 这里假设顶部开口所覆盖区域的顶棚高度为  $H_\infty$ . 如图 2 所示, 基于该假设顶部开口舱室按顶棚高度不同可分为两个空间. 其中, 空间 1 为水平开口所覆盖高于  $H_0$  的区域, 其高度为  $H_\infty - H_0$ , 覆盖面积为  $A_{\text{roof}}$ ; 空间 2 为舱室顶棚高度所覆盖的区域, 其顶棚高度为  $H_0$ , 顶棚面积为  $S$ .

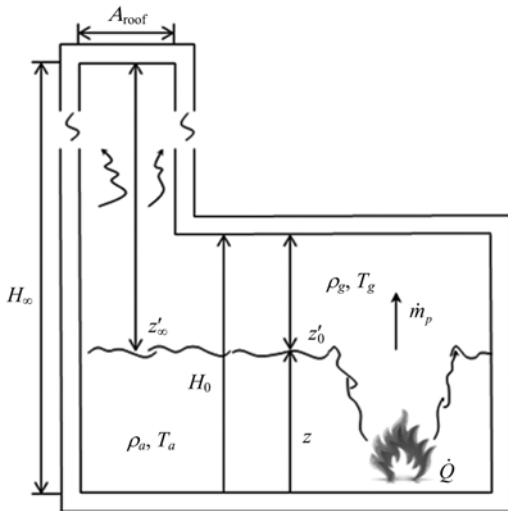


图 2 基于“不规则”顶棚假设的顶部开口舱室示意图

Fig. 2 Notation for a compartment with ceiling vent based on assumption of irregular ceiling

根据烟气层的质量守恒关系, 当烟气层下降至距地高度  $z(z \leq H)$  时, 顶部开口舱室的烟气填充时间可视为烟气分别对空间 1 和空间 2 进行填充所用时间的加合, 即:

$$t = t_\infty + t_0 \quad (5)$$

式中,  $t_\infty$  是单独考虑空间 1 时, 烟气层下降至距地高度  $H_0$  的烟气填充时间;  $t_0$  是单独考虑空间 2 时, 烟气层下降至距地高度  $z$  的烟气填充时间.

采用与式相同的推导方法, 可以得到空间 1 烟气层下降至距地高度  $H_0$  时的烟气填充时间:

$$t_\infty = \frac{3}{2} \cdot \frac{\rho_g}{k \cdot \dot{Q}^{1/3}} \cdot A_{\text{roof}} \cdot \left[ \frac{1}{z_0^{2/3}} - \frac{1}{(H_\infty - H_0)^{2/3}} \right] \quad (6)$$

对于顶部开口舱室, 区域 1 的顶棚高度趋于无限大, 即  $H_\infty \rightarrow \infty$ , 则式(6)可以整理为:

$$t_\infty = \frac{3}{2} \cdot \frac{\rho_g}{k \cdot \dot{Q}^{1/3}} \cdot \frac{A_{\text{roof}}}{H_0^{2/3}} \quad (7)$$

空间 2 烟气层下降至距地高度  $z$  时的烟气填充时间:

$$t_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{\rho_g}{k \cdot \dot{Q}^{1/3}} \cdot S \cdot \left[ \frac{1}{z^{2/3}} - \frac{1}{H_0^{2/3}} \right] \quad (8)$$

将式(7)和式(8)带入式(5)整理可以得到:

$$t = \frac{3}{2} \cdot \frac{\rho_g}{k \cdot \dot{Q}^{1/3}} \cdot \left[ \frac{S}{z^{2/3}} - \frac{S - A_{\text{roof}}}{H_0^{2/3}} \right] \quad (9)$$

此外, 烟气对舱室空间的填充应满足  $z \leq H$  的初始条件, 即:

$$t \geq \frac{3}{2} \cdot \frac{\rho_g}{k \cdot \dot{Q}^{1/3}} \cdot \frac{A_{\text{roof}}}{H_0^{2/3}} \quad (10)$$

式(9)和式(10)就是基于不规则顶棚假设的顶部开口舱室烟气填充时间预测模型. 式(9)和式(10)中均包含了上部热烟气层密度  $\rho_g$  这一未知量. 考虑顶部开口舱室内的能量守恒关系, 将上部热烟气层视为控制体, 则有

$$\frac{d}{dt} \iiint_{CV} \rho u dV + \sum \iint_{CS} \rho h v_n dS = \dot{Q} \quad (11)$$

式中,  $v_n$  是离开控制体的分速度;  $u$  是控制体的比内能,  $u = \frac{U}{m}$ ;  $h$  为比焓,  $h = u + \frac{P}{\rho}$ . 其中, 式(11)左侧第一项为控制体内能增长速率, 第二项为由于流体流动通过控制体表面流出的净能量.

根据理想气体状态方程有

$$\rho_g = \frac{P}{RT_g} \quad (12)$$

将式(12)带入式(11)左侧第一项, 进行整理可得

$$\frac{d}{dt} \iiint_{CV} \rho u dV = \frac{d}{dt} \iiint_{CV} \rho_g c_v T_g dV_g = \frac{d}{dt} \iiint_{CV} \frac{P}{R \cdot T_g} \cdot c_v \cdot T_g dV_g = \frac{dP}{dt} \cdot \frac{V_g c_v}{R} \quad (13)$$

由于舱室顶部开口的存在, 当经过火灾初期压力的迅速上升之后, 舱室内的压力会维持在一个稳定的状态. 为了简便计算, 这里假设  $dP/dt \approx 0$ , 则式(11)左侧第一项可以近似视为零.

式(11)左侧第二项由 3 部分组成, 即火羽流通过控制体造成的内能增加、气体从水平开口流出而损失的内能、外界空气流入造成的内能改变. 因此, 式(11)左侧第二项可以表示为

$$\sum \iint_{CS} \rho h v_n dS = \dot{m}_p c_p (T_g - T_a) + \dot{m}_e c_p (T_e - T_a) + \dot{m}_{\text{air}} c_p (T_a - T_a) \quad (14)$$

显然, 式(14)右侧第三项为 0, 即当外界空气温

度等于舱室初温  $T_a$  时,外界空气的流入不会对控制体内能造成改变.对于式(14)右侧第二项,当火源规模较大且顶部开口尺寸相对较小时,羽流质量流率  $\dot{m}_p$  将远大于通过顶部开口流出舱室的气体质量流率  $\dot{m}_e$ .此时,近似地认为  $\dot{m}_p + \dot{m}_e \approx \dot{m}_p$ ,则式(14)简化为

$$\sum_{CS} \iint \rho h v_n dS = \dot{m}_p c_p (T_g - T_a) \quad (15)$$

将式(15)带入式(11)可以得到

$$\dot{m}_p c_p (T_g - T_a) = \dot{Q} \quad (16)$$

若顶部开口气体流动对舱室内气体质量变化的影响可以忽略,则上部热烟气层的质量守恒关系可以表示为

$$\frac{d}{dt} [\rho_g (S - A_{\text{roof}}) z' + \rho_g A_{\text{roof}} z'_{\infty}] - \dot{m}_p = 0 \quad (17)$$

由图 2 可知,烟气层的下降速度等于下部冷空气层高度减小的速度,则有

$$\frac{dz'_{\infty}}{dt} = \frac{dz'}{dt} = - \frac{dz}{dt} \quad (18)$$

将式(18)带入式(17)进行整理可以得到

$$\dot{m}_p = - \frac{dz}{dt} \cdot \rho_g \cdot S \quad (19)$$

将式(19)带入式(16)可以得到

$$- \frac{dz}{dt} \cdot \rho_g \cdot S \cdot c_p (T_g - T_a) = \dot{Q} \quad (20)$$

忽略火灾初期压力变化的影响,在时间  $0 \sim t$  范围内对式(20)进行积分可以得到

$$(H - z) \cdot \rho_g \cdot S \cdot c_p (T_g - T_a) = \dot{Q} t \quad (21)$$

根据理想气体状态方程有

$$T_g = T_a \cdot \rho_a / \rho_g \quad (22)$$

将式(22)带入式(21),进行整理可以得到

$$\rho_g = \rho_a - \frac{\dot{Q} \cdot t}{(H - z) \cdot S \cdot c_p \cdot T_a} \quad (23)$$

在应用中先假设  $\rho_g$  为某一具体数值(如  $\rho_g = 1.0 \text{ kg/m}^3$ ),带入式(9)和式(10)计算  $t$  时刻的烟气层高度  $z$  和其适用范围,随后根据式(23)对所选取的  $\rho_g$  进行校验.

## 2 实验方法

如图 3 所示,实验舱室内尺寸为  $3.0 \text{ m}$ (长)  $\times$   $3.0 \text{ m}$ (宽)  $\times$   $1.95 \text{ m}$ (高).舱侧壁由 2 层  $3 \text{ mm}$  厚不锈钢板夹合 1 层  $60 \text{ mm}$  厚硅酸铝岩棉板构成.舱顶

棚由 1 厚度为  $5 \text{ mm}$  的不锈钢板和尺寸为  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$  的不锈钢网格支架组成,支架置于舱室外侧.为保证舱室的密封性,在舱室结构接缝处均采用密封措施.

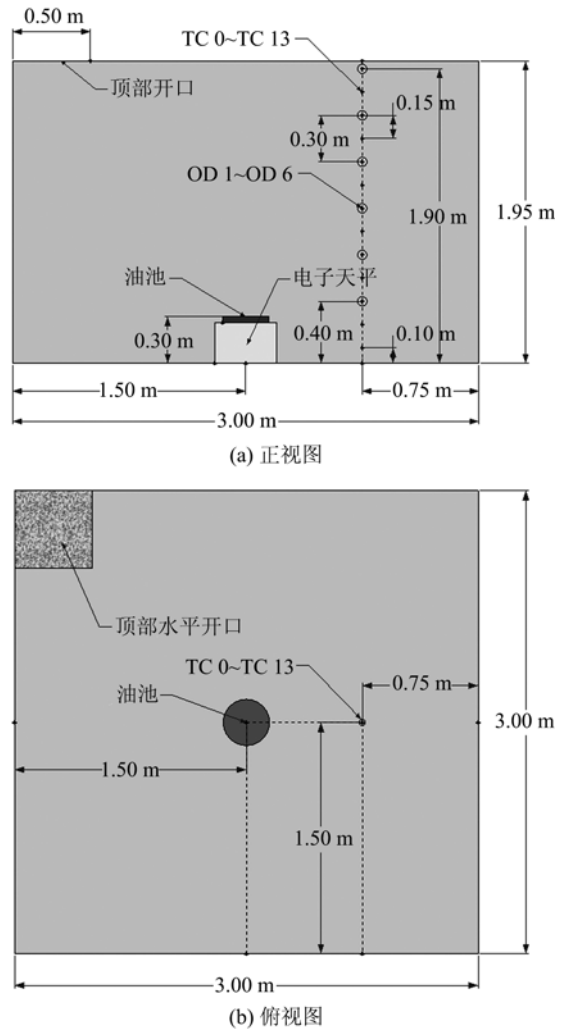


图 3 实验舱布置示意图

Fig. 3 Schematic of experiment setup

在舱室顶棚拐角处有一矩形水平开口,开口尺寸可以根据实验场景要求进行调整.研究中共考察 6 种不同顶部水平开口尺寸,分别为  $0.01 \text{ m}^2$  ( $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ ),  $0.04 \text{ m}^2$  ( $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ ),  $0.09 \text{ m}^2$  ( $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ ),  $0.14 \text{ m}^2$  ( $38 \text{ cm} \times 38 \text{ cm}$ ),  $0.25 \text{ m}^2$  ( $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ ) 和  $0.32 \text{ m}^2$  ( $54 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ ).使用直径为  $0.10, 0.14, 0.20$  和  $0.30 \text{ m}$  的圆形油池作为火源.实验开始前,在油池中注入厚度为  $0.035 \text{ m}$  的庚烷燃料.油池点火后没有燃料继续注入,因此油池液面将随燃烧的进行不断降低.使用 Sartorius LA64001S 电子天平自动记录燃料质量损失,天平

采样时间设为 1 s, 测量精度设为 0.1 g. 实验中, 电子天平置于舱室底板中央, 油池用金属支架置于电子天平之上, 油池上沿距地高度为 0.3 m. 在油池与金属支架间垫有 0.01 m 厚的防火石膏板. 因此, 可以认为在实验过程中油池与电子天平之间无热量传递.

为了记录舱内烟气的填充过程, 实验采用了测温法和消光法两种不同的测量手段. 测温法是通过设置在舱室内的热电偶树实现的. 热电偶树由 14 根 1 mm 直径 K 型铠装热电偶组成, 采样间隔时间设为 1 s. 热电偶树竖直布置如图 3(a) 所示, TC 0 距顶棚 2 mm, 用于标定烟气填充的起始时间; TC 1 至 TC 13 自上而下等间距布置(间距为 0.15 m), 用于记录舱室空间的纵向温度, 其中 TC 1 距地高度 1.90 m, TC 13 距地高度 0.10 m. 如图 3(b) 所示, 热电偶树水平布置于远离顶部开口的侧壁与火源之间, 其与相邻壁面的水平距离分别为 0.75 m 和 1.50 m. 消光法是通过设置在舱室侧壁的 6 套光学测量设备实现的. 每套光学测量设备由一台 ED650-30 激光器与一台 JW1100 激光功率计组成. 通过记录接收光强的变化, 判定烟气颗粒到达测量位置所需的时间. 实验中, ED650-30 激光器与 JW1100 激光功率计成套对射布置在相同水平高度处. 如图 3(a) 所示, 光学测量设备沿竖直方向等间距布置(间距为 0.30 m), 其中 OD 1 距地高度 1.90 m, OD 6 距地高度 0.40 m.

### 3 结果与讨论

以火源直径 0.2 m 为例, 不同顶部开口条件下模型预测结果与实验测量结果的比较如图 4 所示. 其中, 测温法得到的烟气填充时间是采用分段线性法<sup>[28]</sup>处理得到的. 可以看出, 在烟气层下降过程中, 当顶部开口面积小于 0.09 m<sup>2</sup> 时模型预测结果与实验测量结果表现出良好的一致性; 而当顶部开口面积大于 0.09 m<sup>2</sup> 时, 模型预测结果与消光法测量结果基本相同, 但稍早于测温法得到的烟气填充时间.

图 5 列出了当顶部开口面积为 0.25 m<sup>2</sup> 时, 不同火源大小情况下的模型预测结果与实验测量结果. 为了分析烟气填充不同阶段模型预测结果与实验测量结果间的差异, 这里选用烟气填充半程时间和烟气填充至火焰高度所需时间进行比较. 其中, 烟气填充半程时间是指烟气层下降到 1/2 舱室高度

(即  $z = H/2$ ) 所经历的时间. 不同方法得到的烟气填充半程时间和到达火焰高度附近位置所需时间如表 1 所示. 从烟气填充半程时间上看, 模型预测结果稍迟于消光法, 稍早于测温法得到的烟气填充时间. 对于烟气填充至火焰高度附近所需时间, 模型预测结果和测温法结果均明显迟于消光法结果, 其中: ①模型预测结果约是消光法测量结果的两倍; ②对于油池直径为 0.1 m 的场景, 测温法所得烟气填充时间约为模型预测结果的两倍. 这种差异随油池直径增加而减小, 当油池直径大于 0.3 m 时模型预测结果反而稍大于测温法所得烟气填充时间.

表 1 模型计算和实验测量得到的顶部开口舱室烟气填充时间 ( $A_{\text{roof}} = 0.25 \text{ m}^2$ )

Tab. 1 Smoke filling times from experiments and calculation results of the model ( $A_{\text{roof}} = 0.25 \text{ m}^2$ )

火源直径 /m	烟气层位置 /m	烟气填充时间/s		
		消光法	测温法	预测模型
0.10	1.0	44	98	56
	0.4	184	703	380
0.14	1.0	42	69	45
	0.4	139	406	313
0.20	1.0	27	54	30
	0.4	110	200	208
0.30	1.0	13	41	22
	0.4	91	148	153

以顶部开口面积 0.25 m<sup>2</sup> 所对应的 4 个场景为例, 为了考察模型预测结果的可靠性, 在表 2 中给出了模型与实验测量结果差值的数学期望和方差. 从表 2 可以看出, 当烟气层下降到 1/2 舱室高度时, 模型预测结果与实验测量得到的烟气填充时间差异较小, 表现出良好的一致性, 预测结果可靠性较高. 当烟气层下降到火焰高度附近时, 模型预测结果与实验测量结果差异增大. 其中, 与消光法测量结果的差异, 主要与烟气颗粒在舱室中的特殊填充规律<sup>[29]</sup>有关. 与图 2 所示的烟气层从上向下的填充过程不同, 在上部烟气颗粒向下填充的同时, 舱室底部堆积的烟气颗粒在环境流场作用下向上填充. 舱室内的烟气颗粒同时从舱室顶棚和底板向火焰高度位置进行填充. 因此, 与模型预测结果相比, 在火源高度附近消光法得到的烟气填充时间要更早一些. 而与测温法测量结果间的差异, 主要与预测模型的物理假设有关. 实验中, 烟气在密度差和膨胀压力差共同作用下通过顶部开口排出舱室, 当火源直径较小时, 顶部

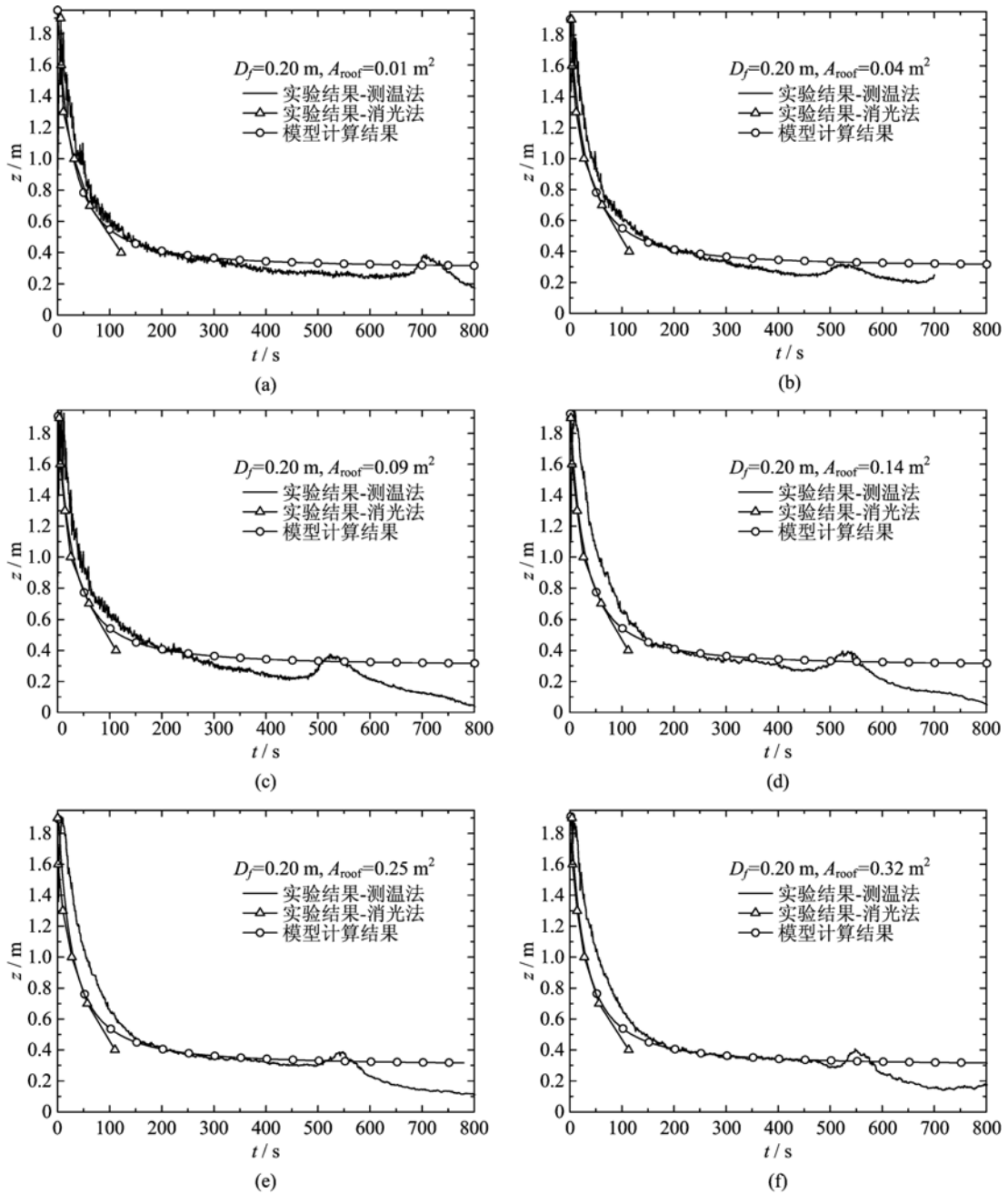


图 4 不同顶部开口条件下模型预测结果与实验测量结果的比较 ( $D_f = 0.2 \text{ m}$ )

Fig. 4 Comparison of experimentally measured results with the model under different vent areas ( $D_f = 0.2 \text{ m}$ )

开口延缓了烟气向火焰下方区域填充;当火源直径较大时,生成的大量热量难以及时通过顶部开口向外排出,上层烟气在气体膨胀的作用下填充到火焰下方空间.而在预测模型中,忽略了顶部开口排烟作用对烟气填充时间的影响.当火源较小时,模型预测结果早于测温法测量结果.当火源较大时,烟气层会对火源下方区域进行填充.而在预测模型中,烟气层不会填充至火源下方,模型预测结果迟于测温法测量结果.

表 2 模型计算与实验测量结果差值的数学期望与方差 ( $A_{\text{roof}} = 0.25 \text{ m}^2$ )

Tab. 2 Mathematical expectation and variance of the difference of calculation results of the model from experiments

烟气层位置/m	模型与消光法实验结果的差值		模型与测温法实验结果的差值	
	数学期望/s	方差	数学期望/s	方差
1	6.75	20.25	27.25	102.25
0.4	132.5	3 971.667	100.75	24 154.92

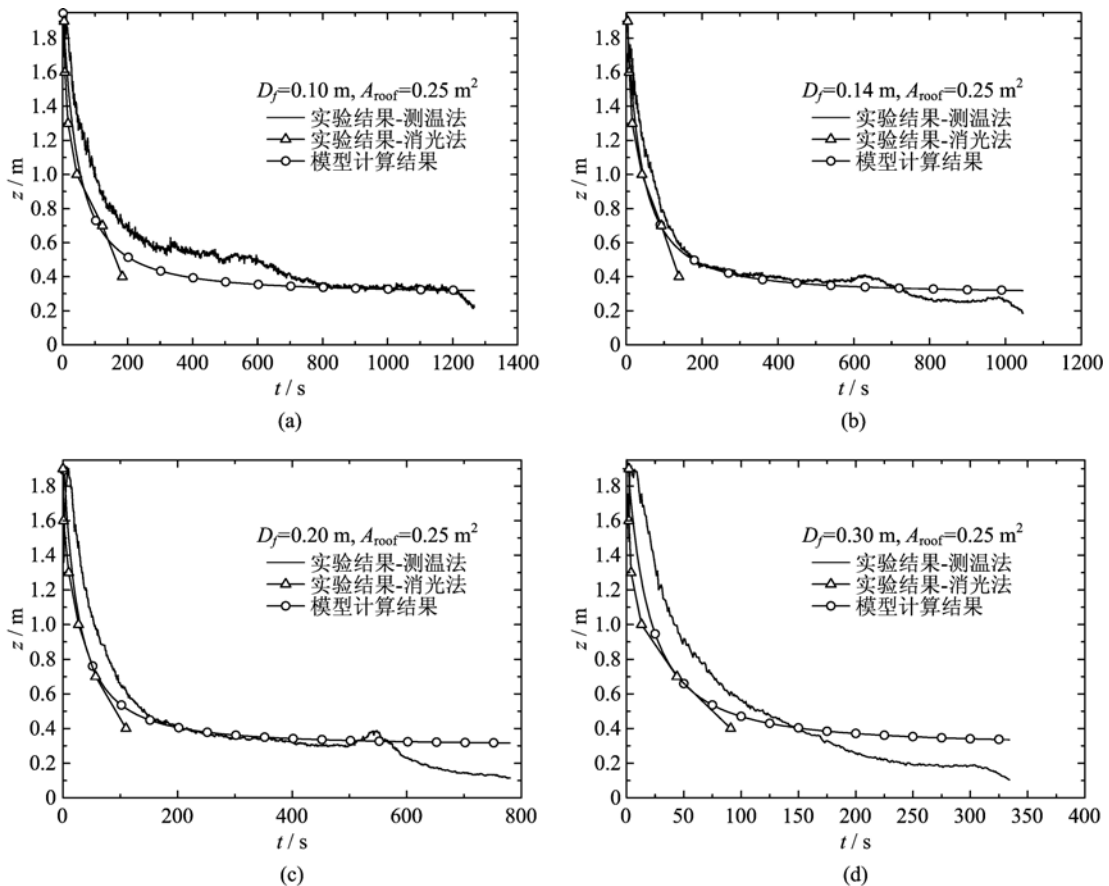


图 5 不同火源大小情况下模型预测结果与实验测量结果的比较 ( $A_{\text{roof}} = 0.25 \text{ m}^2$ )

Fig. 5 Comparison of experimentally measured results with the model under different fire source sizes ( $A_{\text{roof}} = 0.25 \text{ m}^2$ )

## 4 结论

将舱室顶部开口视为一不规则顶棚区域,从控制体的质量守恒和能量守恒出发,建立了顶部开口舱室烟气填充时间预测模型。

通过对比不同火源尺寸情况下模型预测和实验测量得到的烟气填充半程时间和烟气填充至火焰高度所需时间发现,模型在预测烟气层下降到  $1/2$  舱室高度时结果与实验测量结果差异较小,并且表现出良好的一致性。而当烟气层下降到火焰高度附近时,模型预测结果与消光法测量得到的烟气填充时间差异增大。这主要归因于烟气颗粒在舱室中的特殊填充规律。

### 参考文献 (References)

- [1] Bengtson S, Hägglund B. A smoke-filling simulation model and its engineering applications [J]. Fire Technology, 1986, 22(2): 92-103.
- [2] Purser D A, Bensilum M. Quantification of behaviour for engineering design standards and escape time calculations [J]. Safety Science, 2001, 38 (2): 157-182.
- [3] Mowrer F W. Enclosure smoke filling and management with mechanical ventilation [J]. Fire Technology, 2002, 38(1): 33-56.
- [4] Zukoski E E. Development of a stratified ceiling layer in the early stages of a closed-room fire [J]. Fire and Materials, 1978, 2(2): 54-62.
- [5] Mulholland G, Handa T, Sugawa O, et al. Smoke filling in an enclosure [J]. Fire Science and Technology, 1981, 1(1): 1-31.
- [6] Kaye N B, Hunt G R. Smoke filling time for a room due to a small fire; The effect of ceiling height to floor width aspect ratio [J]. Fire Safety Journal, 2007, 42(5): 329-339.
- [7] Kaye N B, Hunt G R. Overturning in a filling box [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 576: 297-323.
- [8] National Fire Protection Association. NFPA 92B: Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas [S]. National Fire Protection Association, 1995.

- [9] Capote J A, Alvear D, Abreu O V, et al. Scale tests of smoke filling in large atria[J]. *Fire Technology*, 2009, 45(2): 201-220.
- [10] Chow W K, Lo H H W. Scale modeling on natural smoke filling in an atrium [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2008, 29(1): 76-84.
- [11] Chow W K, Cui E, Li Y Z, et al. Experimental studies on natural smoke filling in atria[J]. *Journal of Fire Sciences*, 2000, 18(2): 84-103.
- [12] Huo R, Chow W, Jin X, et al. Experimental studies on natural smoke filling in atrium due to a shop fire [J]. *Building and Environment*, 2005, 40(9): 1 185-1 193.
- [13] Chow W K, Li Y Z, Cui E, et al. Natural smoke filling in atrium with liquid pool fires up to 1.6 MW [J]. *Building and Environment*, 2001, 36 (1): 121-127.
- [14] Jie J, Kaiyuan L, Wei Z, et al. Experimental investigation on influence of smoke venting velocity and vent height on mechanical smoke exhaust efficiency[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 177: 209-215.
- [15] Pr trel H, Such J M. Effect of ventilation procedures on the behaviour of a fire compartment scenario[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2005, 235 (20): 2 155-2 169.
- [16] Baines W D, Turner J S. Turbulent buoyant convection from a source in a confined region [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1969, 37: 51-80.
- [17] Li J, Li Q, Zhang J, et al. Numerical simulation of smoke exhausts function of roof vent in compartment fires [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 224: 418-421.
- [18] Li J, Li Q, Dong Y, et al. Numerical simulation of temperature profile in a compartment fire with a roof opening[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 538: 989-992.
- [19] Merci B, Vandeveldel P. Experimental study of natural roof ventilation in full-scale enclosure fire tests in a small compartment [J]. *Fire Safety Journal*, 2007, 42(8): 523-535.
- [20] Chen Bing, Lu Shouxiang, Li Qiang, et al. Burning behavior of compartment pool fires with different ceiling vent[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2011, 41(10): 895-901.
- 陈兵,陆守香,李强,等. 顶部不同开口尺寸腔室中油池火灾的发展过程[J]. *中国科学技术大学学报*, 2011, 41(10): 895-901.
- [21] Wu Yingchun, Wu Xuecheng, Lu Shouxiang, et al. Flame pulsation modes of pool fire in confined compartment with single ceiling opening[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2011, 17 (5): 425-431.
- 吴迎春,吴学成,陆守香,等. 顶棚开口受限空间油池火火焰振荡模式研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2011, 17(5): 425-431.
- [22] Quintiere J G. *Fundamentals of fire phenomena*[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2006.
- [23] Chen Bing. Experimental study on pool fire environment in ship room with ceiling vent[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011.
- 陈兵. 船舶顶部开口舱室油池火灾模拟实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2011.
- [24] Cooper L Y. Combined buoyancy and pressure-driven flow through a shallow, horizontal, circular vent[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1995, 117: 659-667.
- [25] Tan Q, Jaluria Y. Mass flow through a horizontal vent in an enclosure due to pressure and density differences [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44(8): 1 543-1 553.
- [26] Fan Weicheng, Wang Qingan, Jiang Fenghui, et al. *An Introduction to Fire Phenomena*[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1995.
- 范维澄,王清安,姜冯辉,等. *火灾学简明教程*[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995.
- [27] Karlsson B, Quintiere J G. *Enclosure fire dynamics* [M]. CRC Press, 2000.
- [28] Audouin L, Bourniaire B. New estimation of the thermal interface height in forced-ventilation enclosure fires [C]//Proceedings of the Sixth International Symposium on Fire Safety Science. Poitiers, France: 1999: 5-9.
- [29] Zhang J, Lu S, Li Q, et al. Smoke filling in closed compartments with elevated fire sources [J]. *Fire Safety Journal*, 2012, 54: 14-23.