

障碍物影响下船舶机舱烟气填充特性研究

张毅, 陈潇, 陆守香

(中国科学技术大学火灾科学全国重点实验室, 合肥 230027)

摘要: 船舶机舱内设备众多且空间狭小, 火源燃烧过程易受障碍物影响, 进而改变烟气填充过程。现有研究多忽视了内部障碍物的存在对机舱火灾的实际影响。论文通过小尺度火灾实验, 研究了障碍物影响下船舶机舱烟气填充特性。结果表明, 在平行壁面限制条件下, 烟气沉降速度慢于单一壁面条件; 随着壁面到火源距离减小, 烟气层沉降速度减慢, 达到相同高度所需时间延长。通过引入卷吸受限因子 K_s 和 K_d , 考虑机舱壁面限制对火源的影响, 构建了封闭机舱火灾烟气层高度预测模型。在不同距离 S 下, 模型预测结果的最大误差不超过 26%。

关键词: 船舶机舱; 封闭舱室; 障碍物限制; 烟气填充

中图分类号: TK11

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2025)06-0644-07

Filling Characteristics of Smoke in a Ship Engine Room Under the Influence of Obstacles

Zhang Yi, Chen Xiao, Lu Shouxiang

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: There are numerous devices and limited space in the engine room of a ship. The combustion process of the fire source is easily affected by obstacles, which in turn changes the smoke filling process. Existing studies have largely ignored the actual impact of the presence of internal obstacles on engine room fires. This paper studies the smoke filling characteristics of the engine room under the influence of obstacles through small-scale fire experiments. The results show that under the condition of parallel wall restrictions, the smoke settling velocity is slower than that under the condition of a single wall. As the distance from the wall to the fire source decreases, the settling velocity of the smoke layer slows down, and the time required to reach the same height is prolonged. By introducing the suction restriction factors K_s and K_d , a prediction model for the height of the smoke layer in a closed engine room fire is constructed. The maximum error of the model's prediction results does not exceed 26% at different distances S .

Keywords: ship engine room; enclosed cabin; obstacle restriction; smoke filling

舰船火灾事故往往会对船上人员和重要设备造成严重损伤和破坏, 已成为舰船安全的主要威胁。其

中, 机舱火灾由于频率高、载荷大、探测和扑救难度高等特点^[1-2], 是目前的研究重点之一。机舱发生火

收稿日期: 2025-02-19.

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(2408085ME131); 中国科学技术大学“双一流高校建设科研”基金资助项目(YD2320002008); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(WK2320000058).

作者简介: 张毅(1999—), 男, 硕士研究生, plkdzhang@mail.ustc.edu.cn.

通信作者: 陈潇, 女, 博士, 副教授, summercx@ustc.edu.cn.

灾时, 烟气的遮光性、高温和毒性会对人员造成严重伤害, 因此在评估机舱火灾危险性时, 必须了解并掌握舱内烟气蔓延及填充规律. 然而, 在机舱有限的空间中却布置有复杂的电力系统和动力系统, 舱内烟气流动会不可避免受到障碍物的影响. 目前的研究大多将机舱的物理结构简化为无内部模型的封闭舱室或具有壁面开口的单一受限空间, 忽视了内部障碍物的存在对机舱火灾的影响, 对于障碍物影响下舱室烟气填充特性的相关研究仍然缺乏.

针对机舱火灾烟气填充过程, 前人已经开展了一些研究. 胡靖等^[3]通过实验发现封闭机舱火灾中存在循环卷吸现象, 同时提出了稀密两个烟气层的概念. Zhang 等^[4]发现在火源抬高情况下封闭舱室内烟气层会下降到与火源表面持平高度. 毛少华等^[5]基于理想羽流模型和质量守恒, 建立了考虑温度梯度分布的烟气沉降预测模型. 李元洲等^[6]研究了内部障碍物形成的不规则截面舱室中烟气沉降规律, 建立了不规则截面时烟气沉降理论预测模型. Wang 等^[7]研究了密闭机舱火灾中的烟气羽流卷吸和填充行为, 构建了羽流卷吸和烟气填充的理论模型. Wu 等^[8]对强制通风条件下船舶机舱烟层高度进行了实验和理论研究, 构建了不同强制通风条件下烟气层高度的预测模型.

因此, 本研究通过开展机舱小尺度火灾实验, 对不同障碍物限制类型和不同壁面到火源距离条件下舱室内烟气层高度变化规律进行研究, 并建立障碍物影响下烟气层高度预测模型. 对于了解并掌握机舱火灾烟气蔓延机理以及制定机舱损管战术具有重要参考意义.

1 实验方法

基于弗诺德相似准则, 本研究设计并搭建了缩尺比为 1:5 的机舱小尺度实验平台. 实验平台主要由机舱舱室、柴油机模型和通风系统组成. 机舱舱室结构如图 1 所示, 舱室上、下表面的垂直高度为 1.20 m, 上表面的尺寸为 4.00 m(长) × 2.60 m(宽), 下表面的尺寸为 3.10 m(长) × 2.60 m(宽). 舱室顶部围井尺寸为 2.5 m(长) × 0.8 m(宽) × 0.5 m(高). 舱室正前方的防火门的尺寸为 0.90 m(宽) × 1.10 m(高). 实验台材质为不锈钢. 舱内布置有 2 个柴油机障碍物模型, 尺寸为 1.95 m(长) × 0.56 m(宽) × 1.00 m(高). 障碍物材质为不锈钢, 模型如图 2 所示.

实验通过 HYPX-601 电子天平测量燃烧过程中火源的质量变化, 其量程为 0~3 kg, 精度为 0.1 g, 采样频率为 1 Hz. 在舱内不同位置以及火焰中心线上

布置了热电偶阵列. 实验所用热电偶为直径 1 mm 的 K 型铠装热电偶, 精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$. K 型热电偶的测温范围为 $-200 \sim 1\,200^\circ\text{C}$, 测量点每隔 1 s 输出一次. 热电偶树布置在机舱内四周 a~e 共 5 处位置, 具体位置见图 3. a~d 位置的热电偶树上每隔 0.1 m 固定一个热电偶, 一个热电偶树总共有 13 个热电偶, 主要用来测量舱室四周烟气在不同高度上的温度分布. e 位置的热电偶树每隔 0.1 m 固定一个热电偶, 共 15 个热电偶, 主要用来测量火源中心线在不同高度上的温度分布.



图 1 机舱实验平台实物图(正面)

Fig.1 Engine room test platform (front)



图 2 柴油机障碍物模型

Fig.2 Diesel engine obstacle model

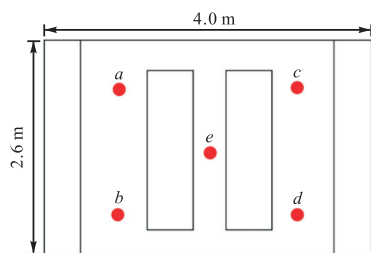
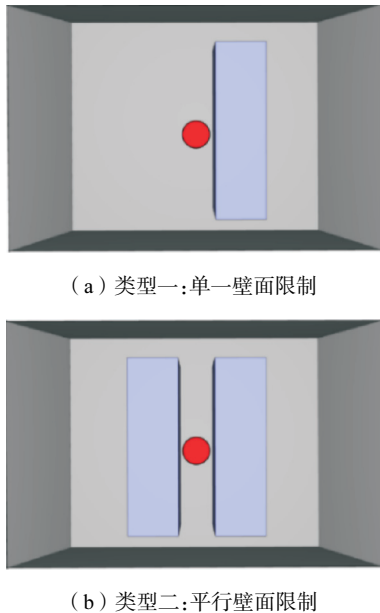


图 3 温度测量系统布置位置

Fig.3 Temperature measuring system layout

实验中火源为油池火, 采用庚烷(C_7H_{16})作为燃料. 为研究障碍物影响下机舱火灾烟气填充规律, 本研究首先在没有设置障碍物的条件下开展封闭舱室内不同油盘大小的实验, 具体的工况如表 1 中组别 1 所示, 选取 10~30 cm 之间 6 个不同大小的火源开展实验, 共 6 个工况. 进一步通过设置障碍物, 形成两种典型火源受限类型, 即单一壁面限制(火源位于单

个障碍物一侧)和平行壁面限制(火源位于两个平行障碍物中间),如图4和图5所示.针对每个条件,选取火源直径 $D = 20\text{ cm}$ 的火源在不同壁面限制类型和不同壁面到火源距离的实验.实验火源燃料厚度均为 1.3 cm . 具体的工况设计如表1中组别2所示,共17个工况.



(a) 类型一:单一壁面限制

(b) 类型二:平行壁面限制

图4 两种壁面限制条件

Fig.4 Two kinds of wall restrictions

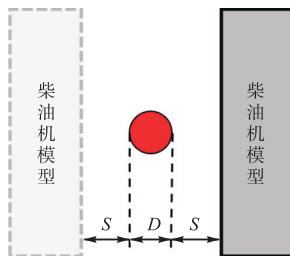


图5 火源与柴油机模型壁面相对位置关系

Fig.5 The relative position of fire source and diesel engine model wall

表1 实验工况设计

Tab.1 Experimental condition design

组别	油盘直径 D/cm	壁面限制条件	壁面到油盘的距离 S/cm
1	10, 15, 20, 25, 28, 30	无限制条件	—
2	20	单一壁面限制	40, 30, 25, 20, 16, 12, 8, 4, 0.5
		平行壁面限制	40, 30, 25, 16, 12, 8, 4, 0.5

2 障碍物影响下机舱烟气层高度变化规律

基于热电偶测得的不同高度处的温度变化,利用分段线性法获得不同条件下舱内烟气层高度.图6

为 $D = 20\text{ cm}$ 火源在单一壁面限制条件下舱室烟气层高度变化.从图中可以看出,点火后的一段时间内,舱室内烟气层高度没有明显变化,这是由于热烟气需要先流向顶棚并向舱室四周蔓延;之后,烟气层高度随时间逐渐下降,下降速度逐渐变慢.对比不同 S 条件下的烟气层高度变化曲线可以看到,在 $S > 12\text{ cm}$ 范围内烟气层高度变化曲线基本一致,当 S 继续减小时,烟气层沉降速度变慢,烟气沉降相同高度所需时间更长.

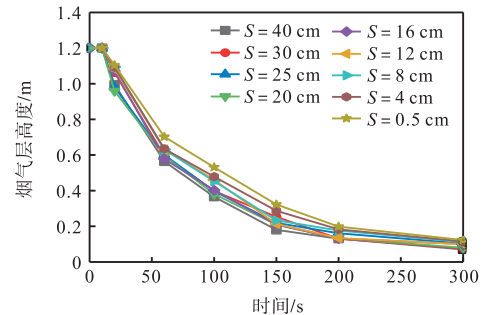


图6 火源受单一壁面限制时舱内烟气层高度

Fig.6 The height of the smoke layer in the cabin when the fire source is limited by a single wall

图7为 $D = 20\text{ cm}$ 火源在平行壁面限制条件下舱室烟气层高度变化.在平行壁面限制下,舱室内烟气层高度随时间的变化规律与单一壁面限制条件下基本一致.但对比不同 S 条件下的烟气层高度曲线,可以发现只有当 S 较小时 ($S \leq 4\text{ cm}$) 才能出现明显的烟气层高度差异.同时可以发现火源在平行壁面限制条件下舱室内烟气沉降速度要慢于单一壁面限制条件.

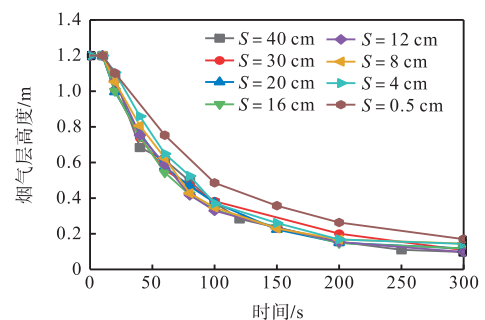


图7 火源受平行壁面限制时舱内烟气层高度

Fig.7 The height of the smoke layer in the cabin when the fire source is limited by a single wall

3 障碍物影响下火源羽流卷吸过程分析

障碍物壁面会限制羽流卷吸^[9-11],而在羽流理论中烟气量与卷吸空气存在着质量守恒定律,烟气的产生量取决于卷吸的空气量.因此有必要对障碍物影

响下火源羽流卷吸过程进行分析. 本研究基于前人经典的 Heskestad 羽流模型(式(1))构建障碍物影响下的火源羽流卷吸模型.

$$\dot{m} = E \left(\frac{g \rho_{\infty}^2}{c_p T_{\infty}} \right)^{1/3} \dot{Q}_c^{1/3} (z - z_0)^{5/3} \cdot \left[1 + \frac{G \dot{Q}_c^{2/3}}{(g^{1/2} c_p \rho_{\infty} T_{\infty})^{2/3} (z - z_0)^{5/3}} \right] \quad (1)$$

$$\dot{Q}_c \approx 0.6 \dot{Q} \sim 0.8 \dot{Q}$$

$$z_0 = 0.083 \dot{Q}^{2/5} - 1.02 D$$

式中: \dot{Q}_c 为热释放速率的对流部分; z_0 为虚点源与地面的高度; g 、 ρ_{∞} 、 c_p 、 T_{∞} 分别为重力加速度、空气密度、空气定压比热容和环境温度; Heskestad 给出了无量纲参数 E 和 G 的参考值为 0.196 和 2.9.

针对障碍物壁面对卷吸的影响, 引入卷吸影响因子 K_s 和 K_d 对卷吸模型进行修正. 首先对壁面限制下火焰燃烧的卷吸模式进行物理建模分析, 以构建火焰高度预测模型. 图 8 给出了受限条件下空气卷吸的物理机制.

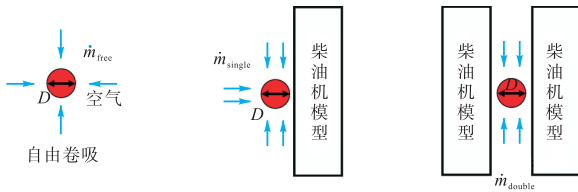


图 8 不同条件下火焰卷吸示意

Fig.8 Schematic diagram of flame entrainment under different conditions

当火焰不受限制时, 卷吸空气量 \dot{m}_{free} 与燃烧器周长有关, 可近似表示为

$$\dot{m}_{\text{free}} \propto \alpha C = \pi D \alpha \quad (2)$$

式中 α 为卷吸系数.

当火焰受到平行壁面限制时, 更多的空气从平行壁面之间的位置卷吸并受到两个平行壁的限制而向上移动, 引入无量纲的距离影响因子 $1 - D/(D + 2S)$ 来表征壁面对火源的影响. 对距离 S 处于极限条件下的卷吸进行分析: 当 S 趋于 $+\infty$ 时, 火源卷吸的空气量正比于 $\pi D \alpha$, 当 S 趋于 0 时, 火源卷吸的空气量正比于 $2D \alpha$. 因此可以将平行壁面限制条件下火源卷吸的空气量 \dot{m}_{double} 表示为:

$$\dot{m}_{\text{double}} \propto 2D \alpha + (\pi D - 2D) \left(1 - \frac{D}{D + 2S} \right) \alpha = \left[\pi - \frac{D}{D + 2S} (\pi - 2) \right] D \alpha \quad (3)$$

当火焰受到单一壁面限制时, 空气卷吸主要来自平行于壁面方向和垂直于壁面方向, 参考平行壁面

限制, 可以给出此时卷吸的空气量 \dot{m}_{single} 为

$$\dot{m}_{\text{single}} \propto \frac{\pi}{2} D \alpha + \frac{1}{2} \left[\pi - \frac{(\pi - 2) D}{D + 2S} \right] D \alpha = \left[\pi - \frac{D}{D + 2S} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \right] D \alpha \quad (4)$$

由于火焰高度与卷吸率呈反比, 因此火焰高度影响因素 K 可以定义为:

(1) 单一壁面限制:

$$K_s = \frac{\dot{m}_{\text{free}}}{\dot{m}_{\text{single}}} = 1 / \left[1 - \frac{D}{D + 2S} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \right) \right] \quad (5)$$

$$\dot{m}_{\text{single}} = \dot{m} / K_s \quad (6)$$

(2) 平行壁面限制:

$$K_d = \frac{\dot{m}_{\text{free}}}{\dot{m}_{\text{double}}} = \frac{1}{\left[1 - \frac{D}{D + 2S} \left(1 - \frac{2}{\pi} \right) \right]} \quad (7)$$

$$\dot{m}_{\text{double}} = \dot{m} / K_d \quad (8)$$

4 障碍物影响下机舱烟气层高度预测模型

4.1 预测模型构建

实际火灾过程中封闭机舱内的火源燃烧过程、燃烧产物和变化的环境条件之间的相互作用是相当复杂的, 为简化物理模型, 假设火灾过程中烟气遵循理想气体定律, 其热容和气体常数保持不变. 在实际火灾中, 烟气层和空气层并没有明显界限, 在理论分析时忽略烟气填充过程中的过渡层, 仅考虑上层烟气层和下层空气层. 此外, 由于研究的是燃烧区域以外烟气羽流的发展, 因此不考虑火灾时燃烧过程以及化学反应引发的烟气成分的变化.

本舱室模型经过简化后可分为 3 部分: 舱室主体、顶部围井、舱室内柴油发动机模型. 忽略了烟气填充过程中的过渡层, 仅考虑上层热烟气层和下层冷空气层. 基于上述假设, 首先以烟气层为控制体, 如图 9 所示, 图中 Z_u 和 Z_l 指本舱室中烟气层和空气层厚度.

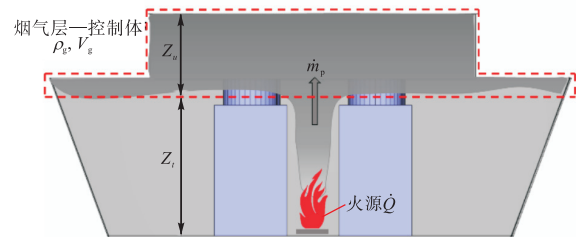


图 9 机舱烟气层控制体示意

Fig.9 Schematic diagram of engine room smoke layer control body

在烟气沉降过程中, 控制体总是遵守质量和能量

守恒方程. 控制体内的变化过程主要有两方面: ①火源处产生的烟气进入控制体, 控制体内烟气质量增加; ②烟气层下沉导致控制体体积变化. 控制体中没有烟气质量的流出, 因此其守恒方程可以表示为

$$\dot{m}_p - \frac{d\rho_g V_g}{dt} = 0 \quad (9)$$

式中, \dot{m}_p 为通过羽流卷吸离开下部冷空气层的质量流率; ρ_g 为烟气密度; V_g 为烟气层体积.

基于前文假设, 进一步将式 (9) 改写为

$$\dot{m}_p - \rho_g \frac{dV_g}{dt} = 0 \quad (10)$$

控制体的体积变化率 dV_g , 也就是控制体下方微元的体积, 由于微元厚度 dZ 无限小, 整个微元的体积可以依照立方体体积进行计算, $dV_g = A_z dZ_u$. 因此,

$$\dot{m}_p - \rho_g \frac{A_z dZ_u}{dt} = 0 \quad (11)$$

$$-\frac{dZ_u}{dt} = \frac{\dot{m}_p}{A\rho_g} \quad (12)$$

式中: A 为舱室中不同位置处有效截面积 (舱室水平截面积-内部障碍物水平截面积), m^2 . 此外, 上式为基于区域模型在理想条件下得到的结果. 而在实际场景中, 羽流从火源上升到顶棚以及扩散到舱室四周形成烟气层均需要一定时间, 在本研究中, 基于前人研究结论, 给出羽流上升时间 t_0 和顶棚射流扩散时间 t_1 的近似计算公式. 对于羽流上升过程, 依据 Hu 等^[12] 的研究结论可以给出羽流上升到舱室顶棚的时间计算公式:

$$t_0 = 1.87\dot{Q}^{-1/3} H^{4/3} \quad (13)$$

对于烟气在顶棚的蔓延过程, 参考 Alpert^[13] 对于顶棚射流的研究, 对于 $r/H > 0.15$ 的情形, 顶棚射流最大速度 u_{max} 可以由式 (14) 计算:

$$u_{max} = 0.195 \frac{\dot{Q}^{1/3} H^{1/2}}{r^{5/6}} \quad (14)$$

则烟气层在顶棚蔓延完成的时间 t_1 可以近似表示为

$$t_1 \approx \int_0^L \frac{1}{u_{max}} dr \quad (15)$$

式中, L 为烟气水平方向的蔓延距离.

综合上述分析, 最后得到如下微分方程及初值条件:

$$-\frac{dZ_t}{dt} = \frac{\dot{m}_p}{A\rho_g} \quad (16)$$

$$Z_t = H \quad (t = t_0 + t_1) \quad (17)$$

首先基于封闭机舱小尺度火灾实验结果对 Heskestad 羽流模型计算公式右侧两项的系数进行修

正. 修正前的羽流模型为

$$\dot{m} = 0.071\dot{Q}_c^{1/3} (z - z_0)^{5/3} + 0.0018\dot{Q}_c \quad (18)$$

联立式 (16) ~ 式 (18), 对无障碍物条件下的烟气层高度进行预测并与实验结果进行对比发现, 预测结果相差较大. 通过修正羽流模型右侧系数, 可以提高模型预测结果和实验值的吻合度, 修正后羽流模型如式 (19) 所示, 修正后模型的预测结果如图 10 所示. 基于无障碍物条件下烟气层高度变化曲线, 修正后的 \dot{m} 计算公式如下:

$$\dot{m} = 0.07\dot{Q}_c^{1/3} (z - z_0)^{5/3} + 0.0006\dot{Q}_c \quad (19)$$

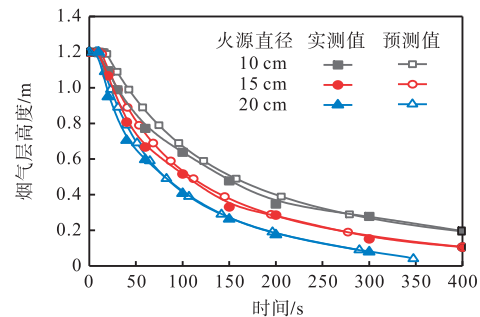


图 10 机舱烟气层控制体示意

Fig.10 Comparison of prediction results of smoke layer height without obstacles

因此, 最终可以给出适用于封闭舱室障碍物影响下的烟气填充时间预测模型为

$$-\frac{dz}{dt} = \frac{0.07\dot{Q}_c^{1/3} (z - z_0)^{5/3} + 0.0006\dot{Q}_c}{A\rho_g K} \quad (20)$$

式中: 火源在单一壁面限制时, $K = K_s$, 火源在平行壁面限制时, $K = K_d$. 模型的初值条件为: $t = t_0 + t_1$ 时, $Z_t = H$.

4.2 预测模型结果验证

前文构建了障碍物影响下舱室烟气层高度预测模型, 基于微分方程和初值条件, 通过求解可以给出不同火源直径 D 和不同壁面到火源距离 S 条件下的烟气层高度随时间变化曲线. 图 11 为直径 $D = 20$ cm 的火源在单一壁面限制条件下舱内烟气层高度变化曲线. 这里选取先前实验中烟气层存在明显差异的壁面到火源距离 S 的数据进行验证. 通过对比可以看出, 本文构建的模型能够有效预测火源在单一壁面限制条件下舱室内烟气层高度, 对于烟气沉降初期的稳定阶段和沉降后期的缓慢段均能够做出良好的预测. 不同距离 S 下, 预测值与实验值的最大误差不超过 24%.

图 12 为直径 $D = 20$ cm 的火源在平行壁面限制条件下舱内烟气层高度变化曲线. 同样的, 选取烟气

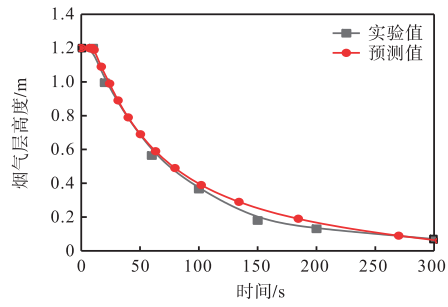
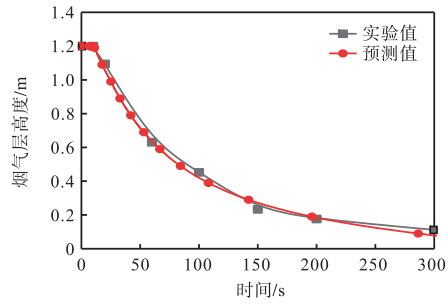
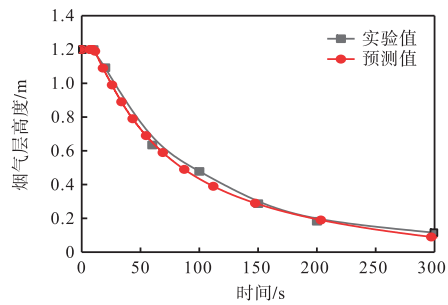
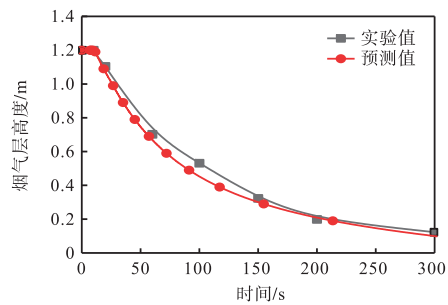
(a) $S = 40$ cm(b) $S = 8$ cm(c) $S = 4$ cm(d) $S = 0.5$ cm

图 11 不同 S 条件下烟气层高度预测模型结果验证(单一壁面限制, $D = 20$ cm)

Fig.11 Verification of prediction model results of smoke layer height under different S conditions (single wall restriction, $D = 20$ cm)

层高度差异较为明显的 4 个不同距离进行求解验证. 通过对比可以看出, 本文构建的模型能够有效预测火源在两侧平行壁面限制下的烟气层高度, 对于烟气沉降初期的稳定阶段和沉降后期的缓慢段均能够做出良好的预测. 不同距离 S 下, 预测值与实验值的最大误差不超过 26%.

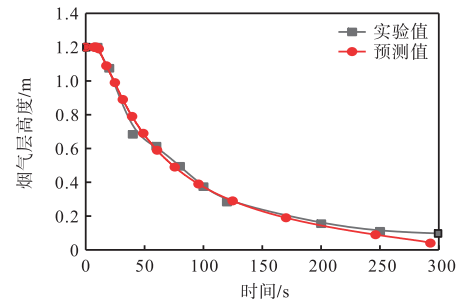
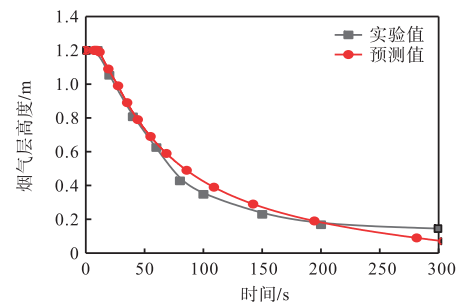
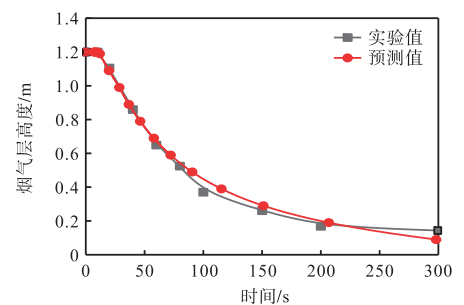
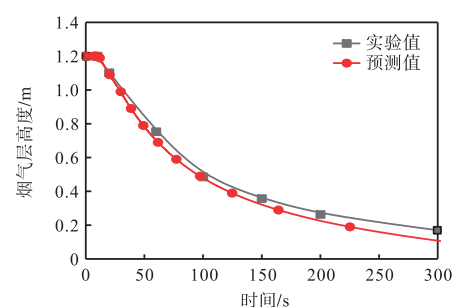
(a) $S = 40$ cm(b) $S = 8$ cm(c) $S = 4$ cm(d) $S = 0.5$ cm

图 12 不同 S 条件下烟气层高度预测模型结果验证(平行壁面限制, $D = 20$ cm)

Fig.12 Verification of prediction model results of smoke layer height under different S conditions (parallel wall restriction, $D = 20$ cm)

5 结论

本文开展了机舱小尺度火灾实验研究, 研究了障碍物影响下船舶机舱烟气填充特性.

(1) 火源在平行壁面限制条件下舱室内烟气沉降

速度要慢于单一壁面限制条件. 当壁面到火源距离降低时, 烟气层沉降速度变慢, 烟气沉降相同高度所需时间更长.

(2) 基于火羽流理论, 引入无量纲卷吸受限因子 K_s 和 K_d 修正了障碍物壁面对羽流卷吸影响, 同时考虑了羽流上升时间 t_0 和水平蔓延时间 t_1 , 构建了烟气层高度预测模型. 模型预测结果与实验结果的对比表明, 模型能够预测不同壁面限制类型和壁面到火源距离条件下封闭机舱内烟气层高度变化, 模型预测结果和实验结果偏差较小, 不同距离 S 条件下预测值与实验值的最大误差不超过 26%.

参考文献:

- [1] 陆守香, 陈 潇, 吴晓伟. 舰船消防安全工程研究现状 [J]. 中国舰船研究, 2017, 12(5): 1-12.
Lu Shouxiang, Chen Xiao, Wu Xiaowei. Research status of warship fire safety engineering[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2017, 12(5): 1-12(in Chinese).
- [2] Wang L, Wang J, Shi M, et al. Critical risk factors in ship fire accidents[J]. *Maritime Policy & Management*, 2021, 48(6): 895-913.
- [3] 胡 靖, 陆守香, 黎昌海, 等. 船舶封闭舱室火灾烟气温度特性研究[J]. 火灾科学, 2010, 19(3): 109-115.
Hu Jing, Lu Shouxiang, Li Changhai, et al. A study on temperature characteristic in enclosed cabin fire[J]. *Fire Safety Science*, 2010, 19(3): 109-115(in Chinese).
- [4] 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.
- [5] 毛少华, 黄 洋, 陈祥峰, 等. 全尺寸船舶机舱火灾发展及烟气充填行为 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38(2): 386-391.
Mao Shaohua, Huang Yang, Chen Xiangfeng, et al. Fire development and smoke filling behaviors in full-scale marine engine rooms[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(2): 386-391(in Chinese).
- [6] 李元洲, 刘 义. 全尺寸船舶机舱火灾烟气填充研究 [J]. 安全与环境学报, 2018, 18(2): 542-547.
Li Yuanzhou, Liu Yi. Study on smoke filling process in ship-engine room based on full-scale tests [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(2): 542-547(in Chinese).
- [7] Wang J, Zhang R, Wang Y, et al. Smoke filling and entrainment behaviors of fire in a sealed ship engine room [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 245: 110521.
- [8] Wu X, Zhang Y, Jia J, et al. Experimental and theoretical analysis of the smoke layer height in the engine room under the forced air condition[J]. *Fire*, 2023, 6(1): 16.
- [9] Pan R, Zhu G, Xu G, et al. Experimental analysis on burning rate and temperature profile produced by pool fire in a curved tunnel as a function of fire location[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 152: 549-567.
- [10] Tao Z, Yang W, Sun Z, et al. Experimental study of oil pool shape and environment pressure on the wall fire behavior in an airplane cargo compartment[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, 174: 107440.
- [11] Tao Z, Wu J, Wei N, et al. Effects of environmental pressure and wall distance on rectangular pool fires in a full-size simulated cargo compartment[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, 148(13): 6327-6335.
- [12] Hu L H, Li Y Z, Huo R, et al. Experimental studies on the rise-time of buoyant fire plume fronts induced by pool fires[J]. *Journal of Fire Sciences*, 2004, 22(1): 69-86.
- [13] Alpert R L. Calculation of response time of ceiling-mounted fire detectors[J]. *Fire Technology*, 1972, 8: 181-195.