本文网址: http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03116 **期刊网址:** www.ship-research.com

引用格式: 赵智强, 陈潇, 陆守香, 等. 住舱走廊区烟气温度分布特性实验分析 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(6): 119–127.
ZHAO Z Q, CHEN X, LU S X, et al. Experimental study on smoke temperature distribution characteristics in corridors of crew cabins[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(6): 119–127.

住舱走廊区烟气温度分布特性实验分析

扫码阅读全文

赵智强，陈潇*，陆守香，康宁，张毅，王锦波
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: ［**目的**］船舶多层住舱段发生火灾时, 烟气沿走廊通道和梯口蔓延过程中的温度分布规律与建筑火灾相比有着明显的区别, 需要充分认识船舶住舱火灾的特性。［**方法**］通过改变庚烷油盘尺寸和梯口启闭状态, 在 1∶5 的缩尺多层住舱实验台内开展单层和跨层走廊火灾烟气温度分布特性的实验研究。［**结果**］结果显示, 在火灾烟气单层蔓延情况下, 走廊内竖向温度的分布存在明显的热分层现象, 热分层高度在 0.4 m 以上, 而在跨层蔓延情况下, 走廊内竖向温度梯度有所减小, 热分层高度降低至 0.2 m 以下; 热分层高度在走廊转角和岔口等结构处有所降低; 在水平蔓延过程中, 烟气温度会持续降低, 温度的分布符合指数衰减规律。［**结论**］火灾烟气在跨层蔓延后走廊区的热分层高度相比单层蔓延显著降低, 水平蔓延过程中的温度衰减系数 k 随火源尺寸的增大而增大, 所做研究可为船舶火灾风险评估以及消防设计提供理论支撑。

关键词: 船舶火灾; 住舱段; 烟气流动; 温度分布
中图分类号: U664.88 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.03116

Experimental study on smoke temperature distribution characteristics in corridors of crew cabins

ZHAO Zhiqiang, *CHEN Xiao**, *LU Shouxiang*, *KANG Ning*, *ZHANG Yi*, *WANG Jinbo*
State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

Abstract: ［**Objective**］When a fire occurs in the multi-storey dwelling section of a ship, the temperature distribution pattern during the spread of smoke along corridors and ladder openings is significantly different from that of a building fire. Therefore, it is necessary to fully understand the characteristics of fire smoke in crew cabins. ［**Methods**］An experimental study on the temperature distribution characteristics of fire smoke in single and multi-storey corridors is carried out in a 1∶5 scaled down ship model by changing the size of the heptane oil pool and the states of ladder openings. ［**Results**］In the case of a single-storey spread of fire smoke, the vertical temperature distribution in the corridor shows an obvious thermal stratification phenomenon with a height of over 0.4 m. In the case of a multi-storey spread, the vertical temperature gradient in the corridors is lowered and the thermal stratification height is reduced to 0.2 m or less; the vertical thermal stratification height within the corridors is reduced at corners and turnouts; the smoke temperature continues to decrease during horizontal spreading; and the temperature distribution satisfies the exponential decay law. ［**Conclusions**］The thermal stratification height in a multi-storey corridor is significantly reduced compared with a single-storey spread of fire smoke, and the temperature attenuation coefficient k in the horizontal spread process increases as the size of the fire source increases. The results of this study can provide theoretical support for the fire risk assessment and fire protection design of ships.

Key words: ship fire; crew cabins; smoke flow; temperature distribution

收稿日期: 2022–09–30 **修回日期:** 2023–02–13 **网络首发时间:** 2023–04–06 14:33
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51704268)

作者简介: 赵智强, 男, 1997 年生, 硕士。研究方向: 受限空间火灾动力学。E-mail: zqzhao@mail.ustc.edu.cn
陈潇, 女, 1988 年生, 博士, 副教授。研究方向: 船舶火灾安全, 封闭空间火灾动力学等。
E-mail: summercx@ustc.edu.cn
陆守香, 男, 1962 年生, 博士, 教授。研究方向: 船舶火灾动力学及风险评估。E-mail: sxlu@ustc.edu.cn
***通信作者:** 陈潇

0 引 言

大型船舶内部甲板层数量多、结构复杂，且可燃物的种类和数量也繁多。当火灾发生时，烟气会沿走廊和梯口等结构在舱段内快速蔓延，给人员的逃生和消防救援带来严重困扰。在住舱段的走廊内，火灾烟气的温度分布特性主要受火源大小、走廊结构等因素的影响，研究火灾烟气温度的分布对于船舶内部火灾传感器的布置和火灾风险评估具有重要指导意义[1-2]。

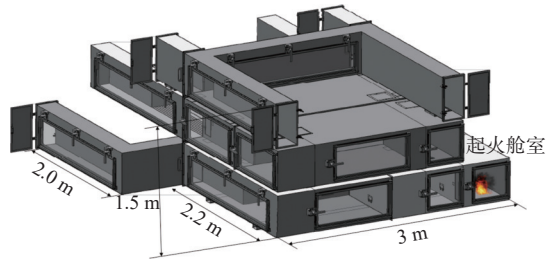
McCaffrey 等[3]通过分析火源的热释放速率和壁面间对流热损失对起火舱室上层烟气温度的影响，提出了起火舱室上层烟气温度的预测公式，研究显示，烟气从起火舱室溢出后在沿走廊蔓延的过程中会与冷空气发生混合，并同时向侧壁面和顶棚不断散热，从而导致温度持续降低。Xing 等[4]通过在开口处引入虚点源火羽流理论，建立了腔室毗邻走廊烟气温度的预测公式，结果显示通道内烟气温度的衰减规律是火灾研究中的重点问题。Hu 等[5-6]在忽略空气卷吸的情况下指出烟气在长直通道内的温度分布满足指数衰减规律，温度衰减系数 k 主要取决于烟气与壁面和环境间的热交换以及烟气质量流率。Li 等[7]、Meng 等[8]、Zhao 等[9]和 Ji 等[10]研究了不同火灾场景下长直通道内的温度衰减规律。 而对于走廊竖向高度上的温度分布，Oka 等[11-12]通过实验研究给出了热分层厚度随烟气蔓延距离变化的预测公式，并对烟气层内部的温度分布进行了数学描述。

梯口处的烟气流动可以视为水平开口处的流动。Epstein[13]通过盐水模拟实验，首次提出了开口流动的质量流率计算公式。Zhang 等[14]开展了顶部开口腔室的池火实验，并验证了其可行性。胡玉琦等[15-16]开展了多层建筑结构的火灾烟气流动和模拟研究，对烟气到达竖井过程中的热危害行为进行了分析。张博思[17]在全尺寸双层舰船住舱段内开展烟气流动实验，提出了舰船走廊区的温度计算方法。汤静等[18]和 Kweon 等[19]研究了走廊转角和岔口结构处火灾烟气温度的分布规律，得出转角结构处热危险性会升高的结论。

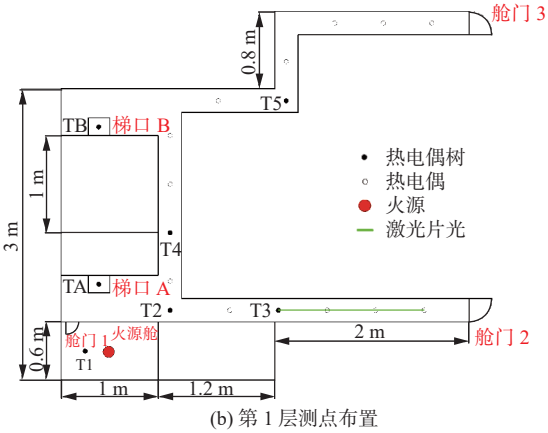
前人对船舶舱段火灾烟气温度分布特性的研究主要集中在单舱室和长直通道，而对住舱段典型走廊烟气温度分布特性的研究则十分欠缺。因此，本文拟针对住舱单层和跨层舱段走廊的烟气温度分布规律开展实验研究，分析不同火源大小情况下住舱段走廊水平和竖向温度的分布特性，用以指导船舶消防设计和损管救援。

1 实验方案

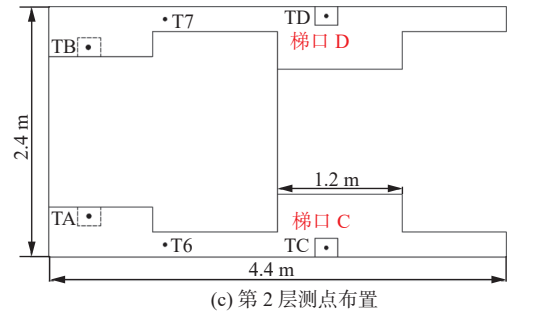
本文将基于 3 层住舱缩尺实验平台开展火灾实验。实验台的外部尺寸（长×宽×高）为 4.4 m×3.8 m×1.5 m，每层层高 0.5 m。其中第 1 层和第 2 层是由舱室和走廊组成的住舱舱体，第 3 层为一段“H”形走廊，相邻两层舱段之间通过 2 个楼梯口连通。火源舱室设置于实验平台第 1 层，火源舱的尺寸（长×宽×高）为 1.0 m×0.6 m×0.5 m，火源舱的一侧壁面为耐温玻璃，以便于图像采集，其余壁面以及舱体结构均由钢板组成。在各层走廊内和梯口位置处均设置了热电偶树，用于测量竖向温度分布。走廊内热电偶的竖向高度分别为 0.08, 0.16, 0.24, 0.32, 0.40, 0.48 m，梯口位置处热电偶的竖向高度分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.99 m。走廊顶棚水平排布的热电偶位于顶棚下方 0.02 m 处。为了更好地拍摄烟气流动形态，在第 1 层南侧直走廊内设置了激光片光源。实验平台舱室布局和测点布置情况如图 1 所示。



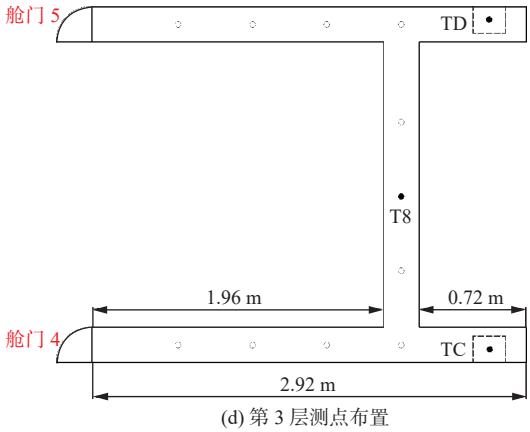
(a) 住舱实验平台



(b) 第 1 层测点布置



(c) 第 2 层测点布置



(d) 第 3 层测点布置

图 1　实验平台及测点位置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of experimental platform and measurement point locations

为研究不同火源大小情况下住舱段走廊火灾烟气温度的分布特性，在实验中，依据实际舱室中火灾载荷的最大热值进行缩比计算，选取了直径 D = 8, 10, 12 和 15 cm 这 4 种尺寸的圆形油盘。油盘位于火源舱室底部中心，所用燃料为正庚烷，初始油层厚度均为 2 cm。在油盘下方做隔热处理并放置电子天平以测量和记录燃料的质量损失速率，天平的量程为 3 kg，测量精度为 0.01 g，燃烧效率取值 86.5%[20-21]。通过开启或关闭 A, B, C, D 这 4 个梯口来实现火灾烟气的单层或跨层流动，实验工况见表 1。其中工况 1～4 为单层流动，梯口全部关闭，舱门 1, 2, 3 开启；工况 5～7 为跨层流动，梯口全部开启，舱门 1, 4, 5 开启。每组工况重复 2 次，取实验结果的平均值进行分析。

表 1　实验工况表

Table 1　Experimental conditions

工况	油盘直径 D/cm	燃烧时间 t/s	热释放速率 Q/kW	梯口状态
1	8	937	2.34	梯口关闭，单层流动
2	10	805	3.76	
3	12	523	5.10	
4	15	477	13.73	
5	10	826	3.94	梯口开启，跨3层流动
6	12	500	4.87	
7	15	466	13.64	

为了将缩尺实验结果还原至实际尺寸进行分析，本文所涉及物理量遵循的相似关系如下。

几何相似：

$$x_m/x_f = l_m/l_f = \lambda$$

火源功率相似：

$$Q_m/Q_f = \lambda^{5/2}$$

温度关系：

$$T_m = T_f$$

时间关系：

$$t_m/t_f = \lambda^{1/2}$$

式中：x 为空间几何尺寸；l 为特征长度；λ 为几何比例；Q 为热释放速率；T 为温度；t 为时间；下标 m, f 分别表示模型和原型。

2　实验结果与分析

2.1　火灾发展过程

图 2 展示了工况 1 的火源热释放速率和火焰形态的变化过程。由图可见，火源被点燃后在 0～600 s 内燃烧稳定，热释放速率维持在 2 kW 附近，舱室内外近似维持热平衡状态；在稳定燃烧阶段，火焰宽度较窄，呈现周期性的收缩和膨胀。600 s 以后，由于热烟气对燃料的热反馈作用持续增强，油盘中的燃料逐渐向沸腾燃烧转变，火焰宽度显著增大且振荡剧烈，火焰脱离油盘液面并在油盘周围燃烧，热释放速率也快速增长；900 s 后，燃料燃尽，火焰熄灭。不同油盘直径情况下的火源燃烧过程与之类似，但随着油盘直径的增大，相同时刻下的热释放速率增大而燃烧持续时间缩短（表 1）。由于释放的热量增多，导致油盘受到的热反馈作用增强，火源维持稳定燃烧的时间缩短。

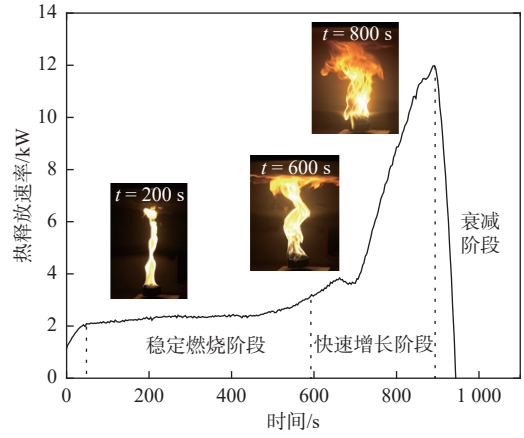
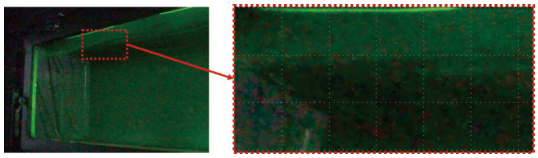


图 2　火源热释放速率变化过程(D = 8 cm)

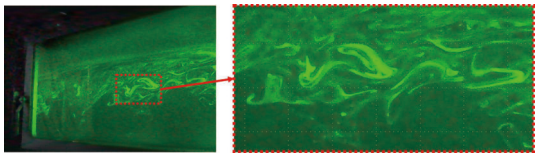
Fig. 2　Heat release rate of the fire source (D = 8 cm)

图 3 显示了烟气单层流动工况下第 1 层舱段南侧直走廊内不同时刻的烟气层形态。由图 3(a) 可见，在 0～600 s 的稳定燃烧阶段，走廊内烟气层与空气层间的分界面清晰，上层为向外流动的热烟气层，下层为向内流动的冷空气层。由图 3(b) 可见，在 600 s 后，火源的热释放速率升高，走廊

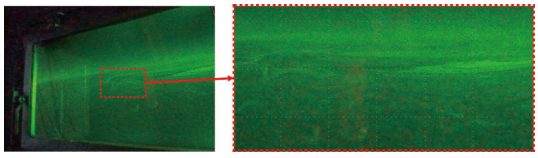
内烟气流动速度的增大导致在烟气层与空气层分界面出现较多的涡旋结构，烟气层分界面开始变得模糊，其原因是烟气层与空气层间逆向流动速度差的增大导致剪切作用增强，空气卷吸强度的增大削弱了分层流动的稳定性。由图 3(c)可见，当火源的热释放速率达到峰值时，烟气层与空气间分界面模糊，不存在明显的分层现象。



(a) 稳定燃烧阶段 (t = 200 s)



(b) 快速增长阶段 (t = 600 s)

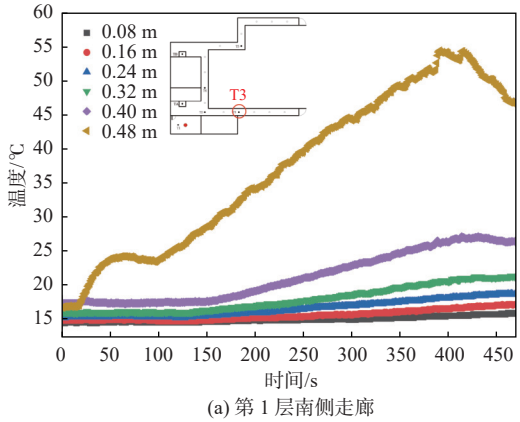


(c) 沸腾燃烧阶段 (t = 800 s)

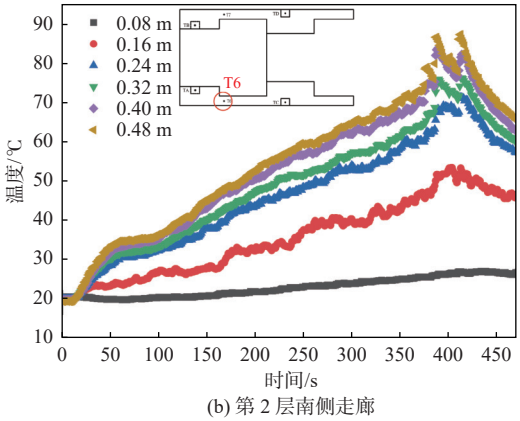
图 3 直走廊烟气流动形态(D = 8 cm)

Fig. 3 Flow pattern of the smoke in the straight corridor (D = 8 cm)

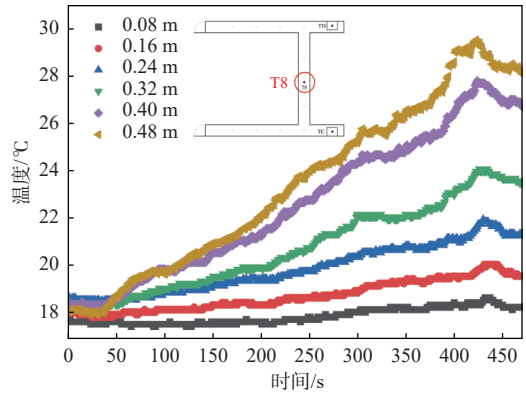
图 4 展示了火灾烟气跨层蔓延至各层走廊内时不同高度处的温度变化过程。由图可知，在火源燃烧过程中，各层舱段走廊区的温度是持续增



(a) 第 1 层南侧走廊



(b) 第 2 层南侧走廊



(c) 第 3 层中部走廊

图 4 跨层舱段走廊不同高度处的温度变化(D = 15 cm)

Fig. 4 Temperature variation at different heights in multistorey corridors (D = 15 cm)

长的，其中第 1 层南侧直走廊 T3 测点处烟气的最高温度为 55 ℃，第 2 层南侧走廊 T6 测点处烟气的最高温度为 90 ℃，第 3 层中部走廊 T8 测点处烟气的最高温度仅 30 ℃。可见第 1 层和第 2 层走廊内上、下层间温度差异较大，具有明显的热分层现象，而第 3 层走廊内竖向温度梯度则有所减小，不存在明显的热分层现象。

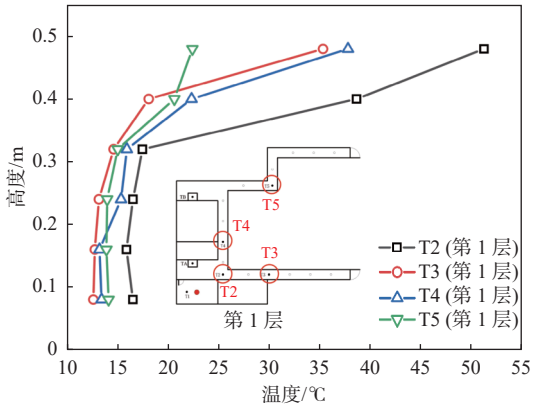
2.2 火灾烟气温度分布特性

2.2.1 走廊竖向温度分布

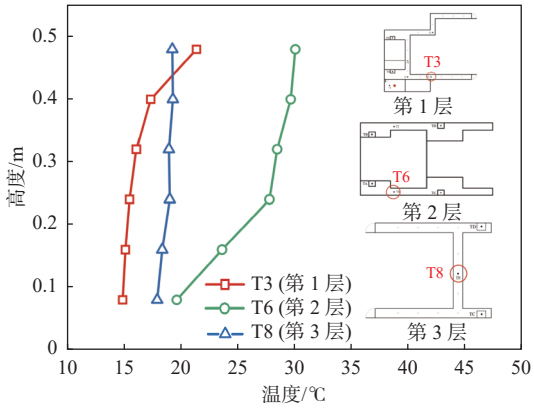
船舶住舱段发生火灾时，走廊上部为向外流动的热烟气层，下部为向起火舱室流动以供给氧气的冷空气层，走廊内竖向温度的分布对于计算烟气层高度和评估逃生通道的危险性具有重要参考价值。图 5 展示了油盘直径 D = 12 cm，在烟气单层流动和跨层流动工况下走廊通道不同高度处的温度分布情况。由图可见，在单层流动工况下，走廊上部和下部的温差较大，竖向热分层现象明显；而在跨层流动工况下，各层走廊内竖向温度分布均匀，不存在明显的热分层现象。产生该现象的原因可能是在跨层流动过程中，梯口位置处的烟气因竖向流动而发生顶棚射流，致使烟气与空气间剧烈掺混。

2.2.2 梯口处温度分布

在实验工况 5～7 下，4 个梯口位置处的最大温升如表 2 所示。由表可知，当油盘直径 D = 10, 12, 15 cm 时，离第 1 层起火舱室较近的梯口 A 位置处的最大烟气温升分别为 11.4, 25.3 和 38.9 ℃，而距离起火舱室较远的梯口 B 和梯口 D 位置处的最大烟气温升仅 3～5 ℃。梯口 A 位置处的温升远高于另外 3 个梯口，这表明大量烟气通过梯口 A 蔓延到了第 2 层南侧走廊，导致舱段北侧烟气的质量流率减小，且在水平蔓延过程中烟气的



(a) 单层流动



(b) 跨层流动

图 5　走廊处的竖向温度分布(D = 12 cm)

Fig. 5　Vertical temperature distribution in corridors (D = 12 cm)

表 2　梯口处的最大烟气温升

Table 2　Maximum temperature rise of smoke at ladder openings

梯口位置	温升/℃		
	D = 10 cm	D = 12 cm	D = 15 cm
A	11.4	25.3	38.9
B	3.8	4.4	4.3
C	8.3	10.7	13.0
D	5.0	5.4	5.0

温度快速衰减。

在稳定燃烧阶段，梯口 A 位置处竖向温度的分布如图 6 所示。梯口竖向最大温差为 33 ℃，其中梯口平面附近的温度最高。因梯口下部空间为冷空气层，上部空间为水平溢流的热烟气，热烟气在竖向流动的过程中冷却降温，在到达上层顶棚附近时会发生射流转变，因此空气因剧烈掺混而导致温度降低。梯口 C 位置处的温度分布与梯口 A 类似，距离火源舱较远的北侧梯口 B 和梯口 D 位置处的温度变化可以忽略。

2.2.3　走廊处温度衰减规律

图 7 展示了不同油盘尺寸情况下火灾烟气在第 1 层南侧的直走廊(T2～T3)和北侧的弯折走廊(T4～T5)顶棚下方的温度分布情况。由图可见，南侧直走廊内的温度衰减曲线相比具有转角、岔口结构的北侧弯折走廊更为平缓。烟气在流经岔口、转角结构时，在侧壁的约束下，烟气层会向下沉降与空气混合，从而导致流动状态紊乱，温度衰减程度加剧。随着油盘直径的增大，走廊顶棚的烟气温度升高，相同流动距离内的烟气温度衰减加剧。因船舶住舱段走廊具有空间狭窄、分叉转折结构多变等特点，故火灾烟气在流经转角、岔口等结构时其温度的分布规律相较于直走廊会发生改变。

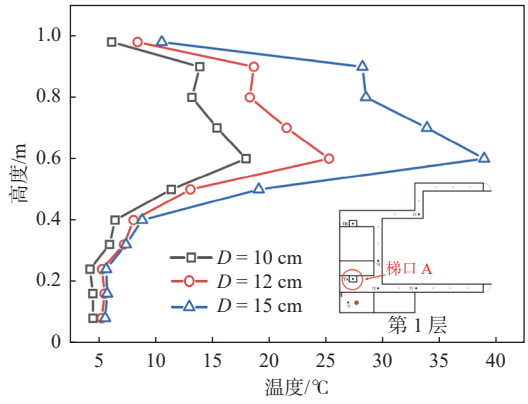
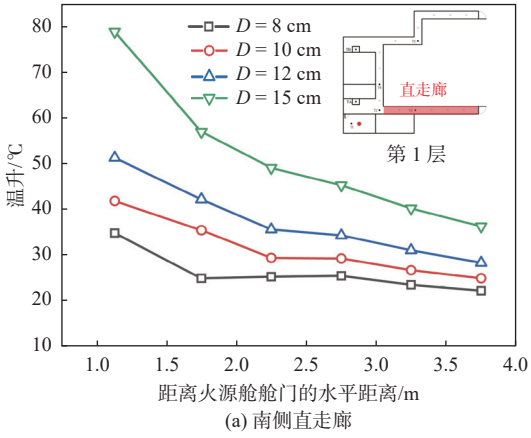
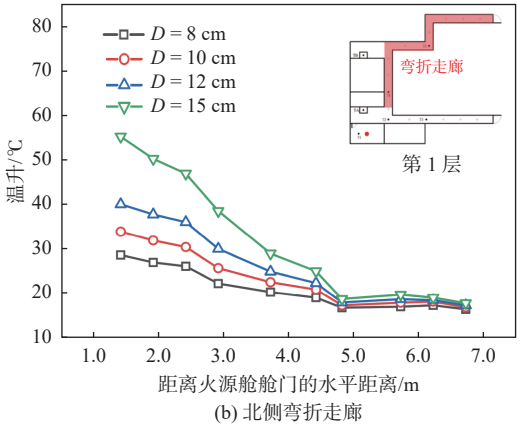


图 6　梯口 A 位置处竖向温度分布

Fig. 6　Vertical temperature distribution at ladder opening A



(a) 南侧直走廊



(b) 北侧弯折走廊

图 7　单层舱段走廊水平温度分布

Fig. 7　Horizontal temperature distribution in single story corridors

图 8 展示了油盘直径 $D=15$ cm，在跨层流动工况下各层走廊顶棚的水平温度分布情况。由图可见，火灾烟气在跨层蔓延的过程中温度持续衰减，该烟气温度主要与水平流动距离相关。由于梯口 A 位于火源舱附近，大量的烟气在通过梯口 A 蔓延至第 2 层时，会导致起火层舱段所分得的烟气减少。在第 2 层走廊，相同流动距离的烟气温度反而高于起火层，而当烟气蔓延至第 3 层时温升仅 10 ℃。

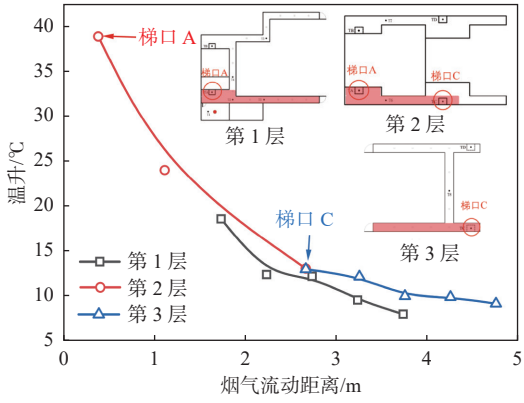


图 8 跨层舱段火灾烟气纵向温度分布($D=15$ cm)

Fig. 8 Longitudinal temperature distribution of smoke in multi-storey corridors ($D=15$ cm)

2.3 油盘尺寸对烟气温度分布的影响

2.3.1 走廊竖向热分层高度

在火灾烟气沿走廊通道向远距离蔓延的过程中，由于湍流混合作用，烟气层的高度将不断降低，在火灾研究中常通过计算烟气热分层的高度来判断烟气层高度。He 等[22]提出采用最小积分比法来计算烟气层高度。通过将走廊通道内的竖向温度分布以不同高度作为积分的上、下限，分别对上层和下层求积分比，则烟气层高度的位置为上、下层积分比之和 r 的最小值所对应的位置，如图 9 所示。

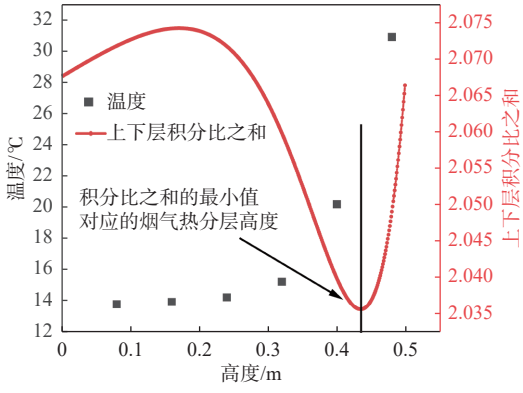


图 9 最小积分比法计算的烟气热分层高度

Fig. 9 Thermal stratification height calculated by the minimum integration ratio method

$$r=\frac{1}{(H-H_{\mathrm{i}})^2}\int_{H_{\mathrm{i}}}^{H}T(z)\mathrm{d}z\int_{H_{\mathrm{i}}}^{H}\frac{1}{T(z)}\mathrm{d}z+\frac{1}{H_{\mathrm{i}}^2}\int_{0}^{H_{\mathrm{i}}}T(z)\mathrm{d}z\int_{0}^{H_{\mathrm{i}}}\frac{1}{T(z)}\mathrm{d}z \tag{1}$$

$$r(H_{\mathrm{i}})=\min(r) \tag{2}$$

式中：r 为上、下层积分比之和；H_{i} 为烟气热分层高度；H 为走廊通道高度；$T(z)$ 为竖向温度分布函数；z 为竖向高度。

在不同油盘尺寸情况下，单层和跨层流动工况下走廊区的热分层高度如图 10 所示。在单层流动工况(图 10(a))下，直走廊内烟气的热分层高度均维持在 0.4 m 以上，不同油盘直径下同一位置处的热分层高度变化较小。火灾烟气在流经走廊分叉结构(T2)和转角结构(T5)时，烟气热分层的高度相比直走廊有所降低。由于固壁面限制了惯性浮力分层流流动方向的转变，烟气在流经转角和分叉结构时会形成向下的逆浮力流进而导致烟气层高度降低，在流出此类结构后，烟气层高度有所回升。

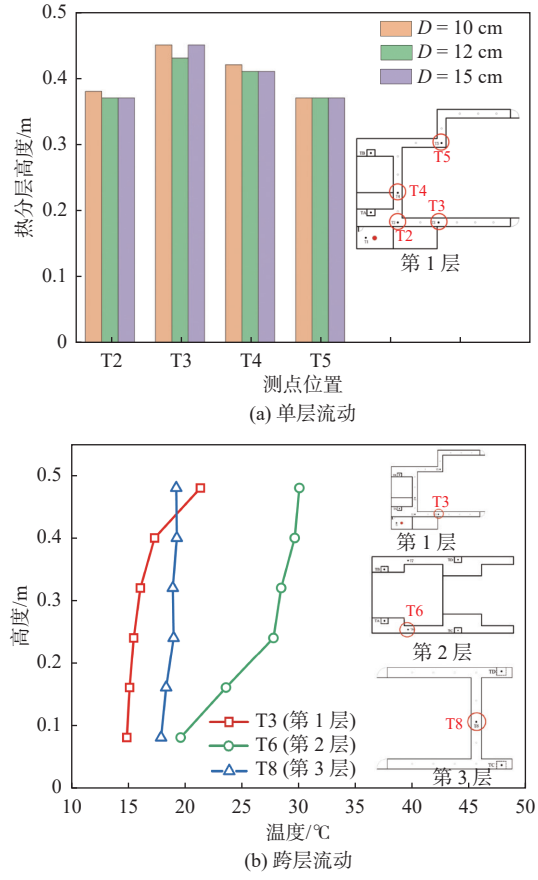


图 10 走廊热分层高度

Fig. 10 Thermal stratification height of corridors

而在跨层流动工况(图 10(b))下，第 1 层直走廊的热分层现象十分明显，烟气热分层高度在 0.4 m 以上。而第 2 层和第 3 层走廊的热分层高度相比

第 1 层显著降低，计算出的热分层高度均低于 0.2 m。这是由于梯口和不规则走廊的存在导致了烟气层与空气层间不断湍流混合。因此，在跨层蔓延过程中，第 2 层走廊的烟气温度最高且热分层高度有所降低，火灾热危险性明显提高。通过量纲分析并还原到实际尺寸下的船舶舱段发现，单层蔓延情况下的烟气层高度维持在 2.0 m 以上，超过了人员的安全高度 1.7 m；而跨层蔓延后，第 2 层和第 3 层舱段走廊内的热分层高度均小于 1 m，远低于人员的安全高度，火灾危险性较大。

2.3.2　走廊温度衰减系数

在火源稳定燃烧阶段，走廊顶棚烟气流的质量和能量守恒方程如下[5]：

$$\mathrm{d}(\rho h_s u)/\mathrm{d}x = \rho_\infty w_e \tag{3}$$

$$\mathrm{d}(\rho h_s u T)/\mathrm{d}x = \rho_\infty w_e T_\infty + \dot{q}_{\mathrm{loss}} \tag{4}$$

式中：ρ为烟气密度；h_s为烟气层厚度；u 为烟气流速；w_e为烟气流动卷吸流率，水平流动阶段的空气卷吸可忽略，故$\rho h_s u$可视为常数；$\dot{q}_{\mathrm{loss}}$为壁面换热损失热量，$q=\alpha(T_\infty - T)$，α为壁面换热系数。式 (4) 可以简化为

$$\mathrm{d}(\rho h_s u T)/\mathrm{d}x = \alpha(T_\infty - T) \tag{5}$$

由于$\rho h_s u$为常数，故式 (5) 可以写为

$$\mathrm{d}T/(T_\infty - T) = \alpha \mathrm{d}x/\rho h_s u \tag{6}$$

将式(6)两端积分，并将直走廊和弯折走廊起始点的坐标 x 设定为 x_0，温度设定为 T_0，得到走廊温度指数衰减模型为

$$\Delta T/\Delta T_0 = \mathrm{e}^{-k(x-x_0)} \tag{7}$$

式中：ΔT为烟气温升；ΔT_0为参考位置处的烟气温升；k 为温度衰减系数，受烟气质量流率和壁面换热的影响，$k=\alpha/\rho h_s u$。温度衰减系数 k 是表征烟气温度衰减速率的重要参数，k 越大，温度衰减速度越快。

图 11 展示了油盘直径 D = 12 cm、单层流动工况下第 1 层南侧直走廊(T2～T3)和北侧弯折走廊(T4～T5)的无量纲温升与烟气蔓延距离的拟合关系。由图可见，南侧直走廊分支顶棚温度的衰减速率稍快于北侧弯折走廊。由于北侧走廊转角、岔口结构的存在，使得烟气在流经该处时流速减缓，烟气与壁面间的传热效率降低，在局部形成热量积聚进而使温度的衰减速度变慢。不同油盘尺寸下温度衰减系数 k 的统计结果如表 3 所示。可见，随着油盘尺寸的增大，烟气在单层流动过程中的温度衰减系数增大，温度的衰减速率也增大。

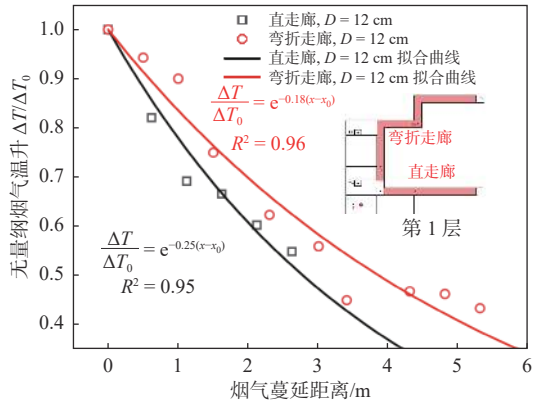


图 11　单层走廊无量纲温升与流动距离的拟合关系

Fig. 11　Fitted relationship between dimensionless temperature rise and flow distance in single story corridor

表 3　不同油盘尺寸下的温度衰减系数

Table 3　Attenuation coefficient of smoke temperature at different oil pool sizes

油盘直径D/cm	直走廊		弯折走廊	
	温度衰减系数k	拟合度R^2	温度衰减系数k	拟合度R^2
8	0.21	0.57	0.12	0.93
10	0.22	0.93	0.15	0.95
12	0.25	0.95	0.18	0.96
15	0.35	0.93	0.25	0.97

不同油盘尺寸下跨层舱段走廊的温度衰减规律如图 12 所示。由图可见，当烟气蔓延至第 3 层后，温度会衰减至较低水平，且第 3 层内温度几乎维持不变。随着油盘尺寸的增大时，温度衰减系数 k 随之增大，舱段走廊内温度衰减速度加快。

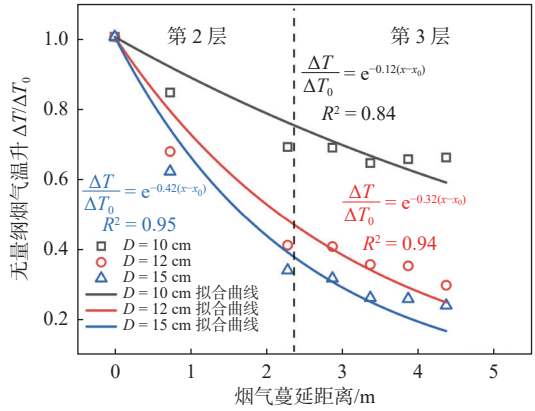


图 12　跨层舱段无量纲温升与流动距离的拟合关系

Fig. 12　Fitted relationship between dimensionless temperature rise and flow distance in multistorey corridors

3　结　论

本文基于船舶三层住舱缩尺模型，开展了单层和跨层舱段走廊的火灾烟气流动实验，探究了住舱单层和跨层走廊区的烟气温度分布特性以及

其影响因素，主要得到如下结论：

1）住舱单层舱段走廊的竖向温度分布具有热分层现象，热分层高度在 0.4 m 以上（实际尺寸下为 2.0 m）；在跨层舱段，在烟气蔓延过程中走廊的竖向温度均匀分布，热分层高度降低至 0.2 m 以下（实际尺寸下为 1.0 m）。

2）在火灾烟气沿走廊蔓延的过程中，温度的分布主要受水平流动距离的影响，走廊顶棚的水平温度分布满足指数衰减规律，温度衰减系数 k 随油盘尺寸增大。

3）与直走廊结构相比，火灾烟气流经走廊岔口、转角结构时热分层高度会有所降低，温度衰减系数 k 减小。

参考文献：

[1] 汪金辉, 张宪达, 陈科烨. 顶部开口船舱火灾下结构热力耦合方法研究 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(3): 74–85, 111.
WANG J H, ZHANG X D, CHEN K Y. Study on thermo-mechanical coupling method of ship cabin with ceiling vent under fire condition[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(3): 74–85, 111 (in Chinese).

[2] 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 S X, CHEN X, WU X W. Research status of warship fire safety engineering[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(5): 1–12 (in Chinese).

[3] 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.

[4] XING Z L, MAO J F, HUANG Y L, et al. Scaled experimental study on maximum smoke temperature along corridors subject to room fires[J]. Sustainability, 2015, 7(8): 11190–11212.

[5] HU L H, HUO R, LI Y Z, et al. Full-scale burning tests on studying smoke temperature and velocity along a corridor[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(3): 223–229.

[6] HU L H, HUO R, WANG H B, et al. Experimental studies on fire-induced buoyant smoke temperature distribution along tunnel ceiling[J]. Building and Environment, 2007, 42(11): 3905–3915.

[7] LI L M, CHENG X D, WANG X G, et al. Temperature distribution of fire-induced flow along tunnels under natural ventilation[J]. Journal of Fire Sciences, 2012, 30(2): 122–137.

[8] MENG N, WANG Q, LIU Z X, et al. Smoke flow temperature beneath tunnel ceiling for train fire at subway station: reduced-scale experiments and correlations[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 115: 995–1003.

[9] ZHAO Y C, ZHU G Q, GAO Y J. Experimental study on smoke temperature distribution under different power conditions in utility tunnel[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2018, 12: 69–76.

[10] JI J, TAN T T, GAO Z H, et al. Numerical investigation on the influence of length–width ratio of fire source on the smoke movement and temperature distribution in tunnel fires[J]. Fire Technology, 2019, 55(3): 963–979.

[11] OKA Y, OKA H, IMAZEKI O. Ceiling-jet thickness and vertical distribution along flat-ceilinged horizontal tunnel with natural ventilation[J]. Tunnelling and underground space technology, 2016, 53: 68–77.

[12] OKA Y, OKA H. Velocity and temperature attenuation of a ceiling-jet along a horizontal tunnel with a flat ceiling and natural ventilation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 56: 79–89.

[13] EPSTEIN M. Buoyancy-driven exchange flow through small openings in horizontal partitions[J]. Journal of Heat Transfer, 1988, 110(4a): 885–893.

[14] ZHANG J Q, LU S X, LI C H, et al. Fire-induced temperature correlations in ceiling vented compartments[J]. Fire Technology, 2015, 51(2): 369–379.

[15] 胡玉琦, 吴众刚, 周晓冬, 等. 典型多层建筑结构火灾烟气迁移特性研究 [C]//高等学校工程热物理第二十届全国学术会议论文集——热流体力学专辑. 青岛: 中国高等教育学会工程热物理专业委员会, 2014: 183−192.
HU Y Q, WU Z G, ZHOU X D, et al. Study of fire smoke migration characteristics on typical multi-story building structure[C]//Proceedings of the 20th National Academic Conference on Engineering Thermophysics in Higher Education: Thermal Fluid Mechanics Album. Qingdao, 2014: 183−192 (in Chinese).

[16] 钟茂华, 厉培德, 刘铁民, 等. 多层多室建筑室内火灾烟气运动过程模拟实验研究 [J]. 中国科学 E 辑 工程科学 材料科学, 2005, 35(5): 490–502.
ZHONG M H, LI P D, LIU T M, et al. Model simulation study on smoke spread of multi-layer and multi room building fire[J]. Science in China Series E Engineering & Materials Science, 2005, 35(5): 490–502 (in Chinese).

[17] 张博思. 舰船典型区域火灾烟气流动特性与控制方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
ZHANG B S. Smoke transportation characteristics and control strategy of fires in typical zones on ships[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016 (in Chinese).

[18] 汤静, 石必明, 陈昆. 典型结构走廊火灾烟气流场的数值模拟研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(10): 33–37.
TANG J, SHI B M, CHEN K. Numerical simulation of fire smoke flow in typical structure of building corridor [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015,

11(10): 33–37 (in Chinese).

[19] KWEON O S, KANG H, KIM H Y. Experimental study on the spread characteristics of initial fires according to corridor types[J]. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 2021, 21(4): 49–59.

[20] 王景栋, 贺元骅, 陶波. 单、双喷头细水雾对正庚烷池火灾的抑制作用 [J]. 消防科学与技术, 2021, 40(5): 696–700.
WANG J D, HE Y H, TAO B. Inhibition effect of water mist with single and double nozzles on n-heptane pool fire[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(5): 696–700 (in Chinese).

[21] 吕志豪. 民机货舱细水雾雾场特性及抑灭火有效性研究 [D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2020.
LYU Z H. Study on flow field characteristics and fire suppression effectiveness of water mist in aircraft cargo compartment[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2016 (in Chinese).

[22] HE Y P, FERNANDO A, LUO M C. Determination of interface height from measured parameter profile in enclosure fire experiment[J]. Fire Safety Journal, 1998, 31(1): 19–38.

相关论文

[1] 陈兵, 张世奇, 时训先, 黎昌海, 陆守香. 水平开口有限空间油池火燃烧特性分析 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(5): 106−111. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.01503

[2] 邱金水, 任广鲁, 刘伯运, 陈如木. 机械排烟时补风口高度对竖直单开口舱室火灾烟气特性的影响 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(5): 112−118. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.01542

[3] 袁书生, 丁伟锋, 赵元立. 细水雾抑制舰船会议室火灾的大涡模拟 [J]. 中国舰船研究, 2016, 11(5): 120−127. doi: 10.3969/j.issn.1673-3185.2016.05.018

[4] 姚绪梁, 蔡晶. 一种船舶舱室火灾报警优先级评估模型 [J]. 中国舰船研究, 2013, 8(5): 91−96. doi: 10.3969/j.issn.1673-3185.2013.05.016

[5] 曾勇, 杨满江. 平台固定式水成膜泡沫灭火系统消防安全试验与评估 [J]. 中国舰船研究, 2013, 8(2): 105−110. doi: 10.3969/j.issn.1673-3185.2013.02.019

[6] 曹琳. 水面舰船火灾烟雾的控制和管理方法 [J]. 中国舰船研究, 2011, 6(2): 84−87. doi: 10.3969/j.issn.1673-3185.2011.02.018

[7] 陈晓洪, 张光辉, 刘辉. 潜艇舱室内的火灾模拟及消防决策研究 [J]. 中国舰船研究, 2010, 5(1): 34−38. doi: 10.3969/j.issn.1673-3185.2010.01.008