

中文引用格式:李森,王少鹏,林锦,等. 扁平大空间船舶火灾烟气控制试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5): 162-167.

英文引用格式:LI Sen, WANG Shaopeng, LIN Jin, et al. Experimental study on ship fire smoke control in large flat-space [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 162-167.

扁平大空间船舶火灾烟气控制试验研究*

李森^{1,2}工程师, 王少鹏³工程师, 林锦^{**1}副研究员, 陆守香¹研究员,
李倩¹副研究员, 陈国庆⁴高级工程师

(1 中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026; 2 上海船舶工艺研究所, 上海 200032;
3 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064; 4 中国船级社 上海规范研究所, 上海 200135)

中图分类号: X932

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.05.0252

【摘要】 为有效控制扁平大空间船舶火灾烟气蔓延, 研究大尺度火灾过程中的油池质量损失速率、舱室温度分布、隔热效率和烟气控制效果。利用尺寸为 30 m×24 m×2.3 m 的模拟舱, 在 0.35、0.55 和 0.70 m 等 3 种不同挡烟垂壁高度和机械通风条件下开展试验。结果表明: 挡烟垂壁高度增加, 油池质量损失速率峰值减小; 挡烟垂壁高度对舱室上层烟气温度的影响比对下层气体温度的影响更明显, 1.4 m 以上空间温度峰值明显下降, 而 1.4 m 以下空间温度峰值无明显变化。顶棚平均温度和隔热效率随挡烟垂壁高度增加而下降。随挡烟垂壁高度增加, 火源区与非火源区同时控烟模式隔热效率从 28.2% 提升至 50.8%, 火源区单独控烟模式隔热效率从 29.4% 提升至 54.7%。

【关键词】 扁平大空间; 船舶火灾; 烟气控制; 挡烟垂壁; 机械通风; 控烟模式; 隔热效率

Experimental study on ship fire smoke control in large flat-space

LI Sen^{1,2}, WANG Shaopeng³, LIN Jin¹, LU Shouxiang¹, LI Qian¹, CHEN Guoqing⁴

(1 Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei

Anhui 230026, China; 2 Shanghai Shipbuilding Technology Research Institute, Shanghai

200032, China; 3 China Ship Development and Design Center, Wuhan Hubei 430064, China;

4 Shanghai Rules and Research Institute, China Classification Society, Shanghai 200135, China)

Abstract: To effectively control the smoke spread in large flat-space ships, the oil pool mass loss rate, chamber temperature distribution, thermal insulation efficiency, and smoke control effect were investigated during large-scale fires. The experimental study was performed under three different smoke screen heights (0.35, 0.55, and 0.70 m) and mechanical ventilation conditions in a chamber with dimensions of 30 m×24 m×2.3 m. The results indicated that the increase in smoke screen height caused a decrease in the peak value of the oil pool mass loss. The smoke screen height had a more significant impact on the smoke temperature in the chamber's upper layer than that of the lower layer. The peak temperature above 1.4 m was significantly decreased, whereas no significant change in the peak temperature below 1.4 m was observed. The average ceiling temperature and thermal insulation efficiency decreased with the increase in

* 文章编号: 1003-3033(2024)05-0162-06; 收稿日期: 2023-11-11; 修稿日期: 2024-02-20

** 通信作者: 林锦 (1992—), 男, 福建福州人, 博士, 副研究员, 主要从事封闭空间火灾烟气消除、电气火灾孕育演化机制、船舶消防安全技术等方面的研究。E-mail: linjin@ustc.edu.cn.

the smoke screen height. The thermal insulation efficiency increased from 28.2% to 50.8% under the combined smoke control mode, and it increased from 29.4% to 54.7% under the independent smoke control mode.

Keywords: large flat-space; ship fire; smoke control; smoke screen; mechanical ventilation; smoke control mode; thermal insulation efficiency

0 引言

统计数据显示,导致海上人身伤亡事故中,船舶火灾事故占比 11.6%^[1]。扁平大空间是船舶典型的结构,空间长度及进深方向明显大于空间高度。当船舶扁平大空间发生火灾时,易形成火焰顶棚射流,在热浮力的驱动下火羽流上升,撞击屋顶后向四周快速扩散^[2]。由于船舶可燃物种类多、人员密集、防火分区大、火灾危险性高,若烟气控制策略不当,会给舱室人员安全和船舶结构安全造成威胁。

近年来,不少学者开展了挡烟垂壁对火灾烟气控制效果的研究,例如:李静娴等^[3]通过狭长走廊建筑火灾烟气全尺寸风洞试验,发现在排烟口后增设挡烟垂壁可以加强排烟效果。郭增辉等^[4]开展了商业建筑全尺度火灾试验研究,结果表明:增加挡烟垂壁的高度能够显著减少烟气向挡烟垂壁后方区域扩散。KRAJEWSKI 等^[5]利用数值模拟研究了空气隔幕对走廊和隧道火灾烟气的影响,给出了走廊和隧道空气隔幕角度和速率设计矩阵。BAED 等^[6]通过数值模拟方法研究了挡烟垂壁间隔大小对中等长度公路隧道火灾烟气的控制效果,结果表明:挡烟垂壁间隔为 100 m 时,烟气扩散延迟效果最佳。王鸿^[7]利用火灾动力学模拟器(Fire Dynamics Simulator, FDS)研究了不同高度挡烟垂壁对地下车库扁平大空间烟气的影响,发现当使用高度为 0.5 m 时,并不足以阻挡火灾烟气的蔓延;当高度增加到 1.0 m 时,对烟气起到了部分阻挡作用;当使用 1.5 m 高的挡烟垂壁时,能有效将烟气聚集在蓄烟池中。陈子健等^[8]利用 FDS 研究了不同高度、不同位置、不同数量挡烟垂壁对地铁站火灾烟气蔓延的影响,结果表明:增加挡烟垂壁高度、合理设置挡烟垂壁位置、增加挡烟垂壁数量,可以延长烟气蔓延到站厅层时间。

上述研究对象多为陆上建筑,研究方法几乎都是采用 FDS 数值模拟软件,缺乏对扁平大空间船舶火灾的大尺度试验研究,鉴于此,笔者拟利用尺寸为 30 m×24 m×2.3 m 的扁平大空间模拟舱,开展不同挡烟垂壁高度和机械通风条件下大尺度船舶火灾试

验,综合研究两者对烟气控制效果的影响,为扁平大空间防排烟设计提供试验数据支撑。

1 大尺度船舶火灾试验设计

1.1 试验舱室及防排烟系统

1.1.1 扁平大空间舱室

扁平大空间船舶火灾舱室尺寸 30 m×24 m×2.3 m,舱室结构如图 1 所示。

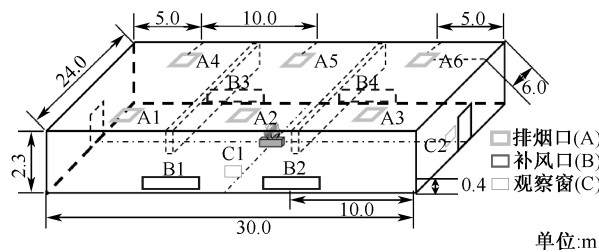


图 1 试验舱室

Fig. 1 Schematic diagram of the chamber

1.1.2 防排烟系统

在舱室长度方向 3 等分处设置 2 等分处设置 2 排挡烟垂壁,高度 H_s 分别为 0.35、0.55 和 0.70 m。在舱室顶棚 6 等分的中心处,设置 6 个 0.8 m×0.8 m 的排烟口(A1、A2、A3、A4、A5 和 A6),总机械排烟量 18 830 m³/h。侧壁靠近地面处设置 4 个 1.6 m×0.4 m 补风口(B1、B2、B3 和 B4),总机械补风量为 10 000 m³/h^[9]。点火 60 s 后同时开启排烟风机和补风风机。

1.2 试验火源设计

试验火源油池尺寸为 0.9 m×0.9 m,油池置于舱室正中央,燃料为 0 号柴油,柴油密度为 814 kg/m³,热值为 43.2 MJ/kg,质量损失速率为 39 g/(s·m²)。

1.3 试验测点设置

燃油质量采集系统采用多点式质量测量系统,布设于舱室中央;烟气温度测量采用 K 型铠装热电偶(T_1 — T_7),测点布置如图 2 所示。在过火源中心沿舱室长度方向上,设置 7 束热电偶树,间距 2.5 m;每束热电偶树共有 8 个热电偶,热电偶自下而上高度分别为 0.2、0.6、1.0、1.4、1.6、1.8、2.0 和 2.2 m。

从火源至舱壁,在舱室 2.2 m 高度处, 布置 13 个热电偶, 间距 1.25 m, 用于测量舱室顶棚温度。

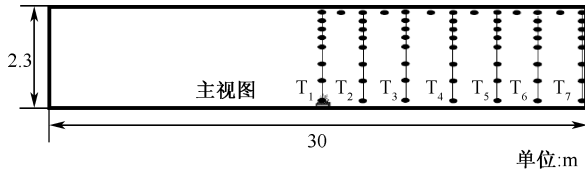


图2 热电偶测点布置

Fig.2 Thermocouple layout

1.4 试验工况设计

8 组试验工况见表 1。设置挡烟垂壁后, 扁平大空间被划分为 3 个防烟分区, 火源所在防烟分区称为火源区, 另外 2 个防烟分区为非火源区。控烟模式分为顶棚 6 个排烟口同时开启 (同时控烟模式) 和只开启火源所在分区内 A2 和 A5 排烟口 (火源区单独控烟模式) 2 种, 8 个工况机械补风一致。

表 1 试验工况

Table 1 Experimental conditions

工况	挡烟垂壁高度/m	开启的排烟口	控烟模式
1	0	A1—A6	同时控烟
2	0.35		
3	0.55		
4	0.7		
5	0	A2、A5	单独控烟
6	0.35		
7	0.55		
8	0.7		

2 船舶火灾烟气控制结果与讨论

2.1 燃油质量损失速率和热释放速率

同时控烟模式下船舶火灾燃料质量损失速率随时间的变化如图 3 所示。各工况质量损失速率从点火后快速增大, 250 s 左右出现峰值; 随着燃烧的进行, 质量损失速率逐渐下降至 0。试验过程中未出现稳定燃烧阶段, 是因为机械通风条件下, 新鲜空气的送入增加了空间氧气体积分数, 冷空气的送入以及高温热烟气的排出降低了舱室温度^[10]。

热释放速率可表示为:

$$\dot{Q}_f = \chi \Delta \dot{m}_f \Delta H_c A_f \quad (1)$$

式中: \dot{Q}_f 为热释放速率, kW; χ 为燃烧效率, 取值 0.8^[11-12]; $\Delta \dot{m}_f$ 为受限空间燃料质量损失速率, $g/(s \cdot m^2)$; ΔH_c 为燃料热值, MJ/kg; A_f 为油池面积, m^2 。 $\Delta \dot{m}_f$ 可表示为^[13]:

$$\Delta \dot{m}_f = \Delta \dot{m}_\infty [1 - \exp(-kD)] \quad (2)$$

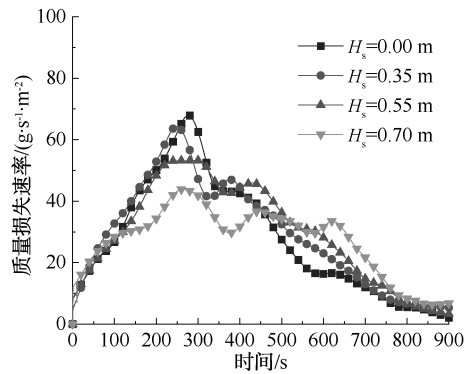


图3 同时控烟模式下质量损失速率变化

Fig.3 Mass loss rate in combined smoke exhaust mode

式中: $\Delta \dot{m}_\infty$ 为开放空间燃料质量损失速率, $g/(s \cdot m^2)$; k 为有效吸收系数, 取值 $3.5 m^{-1}$ ^[14]; D 为油池直径, m。

各工况质量损失速率峰值和热释放速率峰值见表 2。挡烟垂壁高度增加, 质量损失速率和热释放速率降低, 可能是因为当增加挡烟垂壁高度时, 火源区蓄积的烟气增加, 沉降至火焰区域, 氧气体积分数降低, 减弱了燃烧过程。单独控烟模式能够强化这种作用, 可能是因为总排烟量一定的情况下, 单独控烟模式可以更多地排出火源区蓄积的烟气, 降低烟气温度, 进一步减弱燃烧过程。

表 2 质量损失速率和热释放速率

Table 2 Mass loss rate and heat release rate

工况	挡烟垂壁高度/m	控烟模式	质量损失速率峰值/ ($g \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$)	热释放速率峰值/kW
1	0	同时控烟	67.9	1 819
2	0.35		64.3	1 723
3	0.55		53.3	1 428
4	0.7		43.9	1 176
5	0	单独控烟	58.8	1 575
6	0.35		56.7	1 522
7	0.55		52.4	1 404
8	0.7		42.8	1 147

2.2 船舶火灾温度变化分析

2.2.1 舱室气体温度垂直分布

距火源不同位置处船舶火灾烟气温度分布 (工况 4) 如图 4 所示。可以看出, 同一高度处, 距离火源越远, 温度越低。距火源 2.5 m 处, 1.0 m 以上区域, 高度越高, 温度越高; 1.0 m 以下区域, 出现下层温度高于上层温度的情况, 这是因为该处离火源较近, 底层温度直接受到火源辐射的影响。其他位置处, 温度均随高度增加而升高。

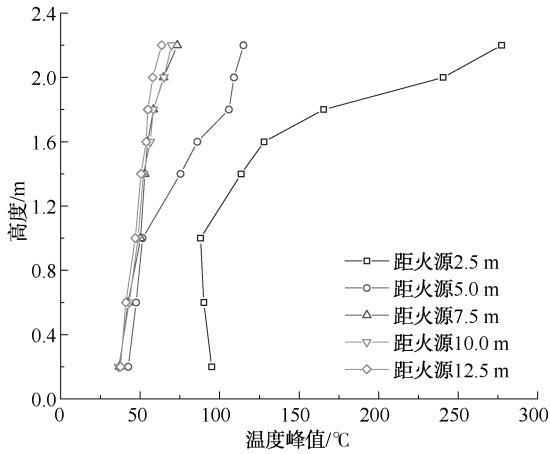


图 4 距火源不同距离处烟气温度分布
Fig. 4 Smoke temperature distribution at different distances from fire source

挡烟垂壁高度和控烟模式对船舶火灾舱室同一高度处烟气平均温度垂直分布影响如图 5 所示。可以看出,挡烟垂壁高度对舱室上层烟气温度的影响比下层气体温度影响更显著。当挡烟垂壁高度从 0 增加至 0.7 m 时,1.4 m 以上空间温度峰值明显下降,而 1.4 m 以下空间温度峰值则无明显变化。挡烟垂壁高度均为 0.55 m 时,单独控烟模式温度比同时控烟模式低。

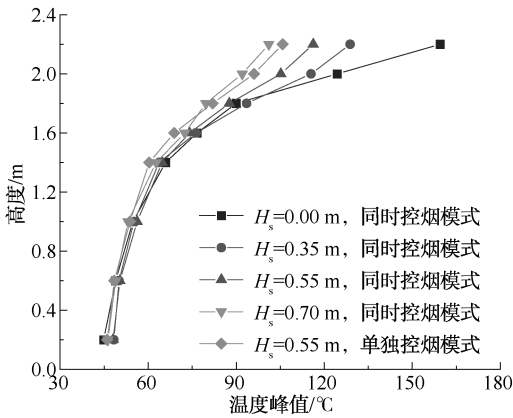


图 5 挡烟垂壁高度对舱室气体温度垂直分布影响
Fig. 5 Effect of smoke screen height on chamber's vertical air temperature distribution

2.2.2 顶棚烟气温度分布

船舶火灾顶棚烟气温度分布如图 6 所示。可以看出,火源区顶棚温度随距火源距离的增加快速下降;非火源区各位置处顶棚温度缓慢降低,距离火源同一距离处,挡烟垂壁高度越大,顶棚温度越低。

火源区和非火源区顶棚烟气平均温度见表 3。2 种控烟模式下,火源区和非火源区顶棚平均温度均随着挡烟垂壁高度的增加逐渐降低,挡烟垂壁高

度的增加可以有效控制顶棚温度。当挡烟垂壁高度为 0 m 时,同时控烟模式顶棚温度比单独控烟模式低,这是因为顶棚无阻碍物时,船舶火灾烟气触顶后向四周自由扩散蔓延,6 个机械排烟口同时启动,可以最大限度排出扁平大空间内顶棚积聚的烟气;而单独控烟模式中只有 2 个排烟口工作,若要排出远离排烟口处的船舶火灾烟气,则需要克服烟气蔓延自身浮力流动方向阻力。当设置挡烟垂壁时,同时控烟模式顶棚温度比单独控烟模式高,这是因为机械通风集中于火源区进行排烟,可以快速高效排出蓄积在火源区内的烟气。

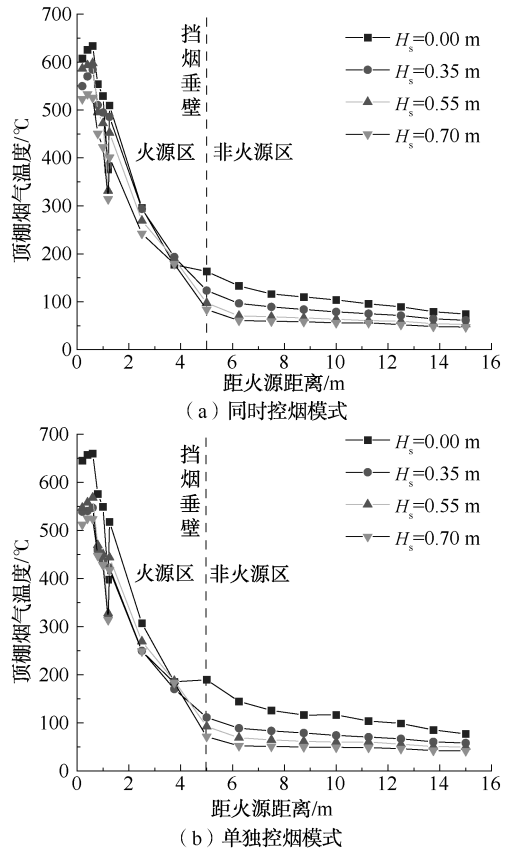


图 6 挡烟垂壁高度对舱室顶棚烟气温度影响
Fig. 6 Effect of smoke screen height on chamber's ceiling smoke temperature

表 3 火源区和非火源区顶棚烟气平均温度

Table 3 Average temperature of ceiling smoke in fire source area and non-fire source area °C

挡烟垂壁高度/m	火源区温度		非火源区温度	
	同时控烟	单独控烟	同时控烟	单独控烟
0.00	766	712	102	110
0.35	714	676	66	64
0.55	719	679	53	48
0.70	682	648	47	38

2.3 隔热效率分析

船舶火灾烟气控制的目标是降低火灾危害,确保人员安全和船舶结构安全。有研究表明:烟气是造成火灾伤亡的主要原因,烟气中的有毒气体会使人逐渐失去意识,烟气会显著降低能见度,干扰人员逃生路线选择,高温烟气会灼伤人的呼吸道,且烟气温度相比于减光性对疏散的影响更大^[15]。因此,烟气温度、能见度以及烟气有毒气体体积分数是判断烟气控制效果的重要指标。参照前人^[16-18]水幕在消防设计中的烟气控制性能评估方法,采用隔热效率表征挡烟垂壁对船舶火灾烟气控制的性能。隔热效率 η 表示无挡烟垂壁和有挡烟垂壁前后温升差值与无挡烟垂壁时温升的比值:

$$\eta = \frac{\Delta t_n - \Delta t_s}{\Delta t_n} \times 100\% \quad (3)$$

式中: Δt_n 为无挡烟垂壁时烟气温升,℃; Δt_s 为有挡烟垂壁时烟气温升,℃。将非火源区顶棚烟气温升平均值(即图 2 中 T_3 热电偶右侧 2.2 m 高度处 8 个热电偶)作为判读隔热效率的标准,非火源区顶棚烟气温升越低,则越过挡烟垂壁的烟气量越少,即隔热效率越好,反之则隔热效率越差。

不同挡烟垂壁高度和控烟模式下隔热效率随时间变化曲线如图 7 所示。在点火后至 60 s 开启机械排烟系统,各工况隔热效率快速增加;开启机械排烟系统至 500 s 左右,各工况隔热效率保持相对稳定,

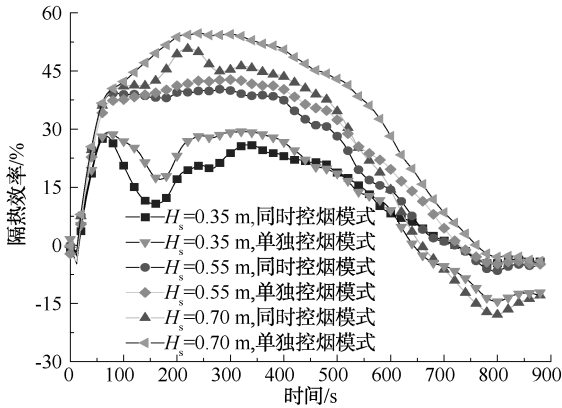


图 7 隔热效率随时间的变化

Fig. 7 Variations of thermal insulation efficiency

挡烟垂壁高度增加,隔热效率提高。500 s 后,各工况隔热效率开始快速下降。

隔热效率峰值见表 4。同一控烟模式下,隔热效率随挡烟垂壁高度增大而增加,同时控烟模式隔热效率从 28.2% 提升至 50.8%,单独控烟模式隔热效率从 29.4% 提升至 54.7%。相同挡烟垂壁高度条件下,单独控烟模式隔热效率比同时控烟模式高。

表 4 隔热效率峰值

Table 4 Peak value of thermal insulation efficiency

挡烟垂壁高度/m	同时控烟模式	单独控烟模式
0.35	28.2	29.4
0.55	40.3	42.8
0.70	50.8	54.7

3 结论

1) 同一控烟模式下,挡烟垂壁高度对扁平大空间船舶火灾油池质量损失速率产生显著影响,挡烟垂壁高度增加,油池质量损失速率峰值降低;同一挡烟垂壁高度下,单独控烟模式油池质量损失速率比同时控烟模式低,随着挡烟垂壁高度的增加,2 种控烟模式质量损失速率的差异越来越小。

2) 挡烟垂壁高度对船舶火灾舱室上层烟气温度的影响比下层气体温度影响更明显,当挡烟垂壁高度从 0 增加至 0.7 m 时,1.4 m 以上空间温度峰值明显下降,1.4 m 以下空间温度峰值则无明显变化。挡烟垂壁高度对扁平大空间舱室气体温度的影响比控烟模式对舱室气体温度的影响更明显。

3) 挡烟垂壁将扁平大空间船舶火灾顶棚温度分布划分为 2 个区域,火源区顶棚温度随距火源距离的增加快速下降,非火源区各位置处顶棚温度缓慢降低。顶棚平均温度随挡烟垂壁高度增加而下降,单独控烟模式顶棚平均温度比同时控烟模式低。

4) 挡烟垂壁高度从 0 增加至 0.7 m 时,同时控烟模式隔热效率从 28.2% 提升至 50.8%,单独控烟模式隔热效率从 29.4% 提升至 54.7%。挡烟垂壁高度相同时,单独控烟模式隔热效率比同时控烟模式高。

参考文献

[1] European Maritime Safety Agency. Annual overview of marine casualties and incidents 2022[R], 2022.
 [2] HUO Yan, GAO Ye, WU Hongmei. The characteristics of smoke spreading of fires in a flat underground building in cities[C]. 2009 International Conference on Management and Service Science. IEEE, 2009: 6 261-6 264.

- [3] 李静娴,何嘉鹏. 走廊内烟气组合控制的数值模拟与试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(12): 26-31.
LI Jingxian, HE Jiapeng. Numerical and experimental study on combination control of smoke in corridor[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(12): 26-31.
- [4] 郭增辉,何其泽,黎昌海. 挡烟垂壁与排烟口设置对烟气层高度的影响[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(8): 841-843.
GUO Zenghui, HE Qize, LI Changhai. Influence of smoke screen and exhaust port setting on smoke layer height[J]. Fire Science and Technology, 2013, 32(8): 841-843.
- [5] KRAJEWSKI G, WĘGRZYŃSKI W. Air curtain as a barrier for smoke in case of fire: numerical modelling [J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2015, 63(1): 145-153.
- [6] BAEK D, LEE S. Study of the characteristics of smoke spread by an installing smoke barrier in medium length road tunnel [J]. Fire Science and Engineering, 2016, 30(5): 9-17.
- [7] 王鸿. 扁平大空间排烟有效性的数值模拟研究[C]. 2017 消防科技与工程学术会议论文集, 2017:311-315.
- [8] 陈子健,肖峻峰,卢平,等. 挡烟垂壁对侧式地铁站烟气蔓延影响分析[J]. 武警学院学报, 2020, 36(4): 11-15.
CHEN Zijian, XIAO Junfeng, LU Ping, et al. Analysis on the influence of draft curtain on smoke spread in side platform subway station[J]. Journal of the Armed Police Academy, 2020, 36(4): 11-15.
- [9] GB 51251—2017, 建筑防烟排烟系统技术标准[S].
GB 51251-2017, Technical standard for smoke management systems in buildings[S].
- [10] QUINTIERE J G. Scaling applications in fire research [J]. Fire Safety Journal, 1989, 15(1): 3-29.
- [11] 陈国庆,陆守香,庄磊. 船舶机舱油料火灾的发展过程研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(1): 91-95.
CHEN Guoqing, LU Shouxiang, ZHUANG Lei. Fire development processes in machine rooms [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2006, 36(1): 91-95.
- [12] WANG Jinhui, ZHANG Ruiqing, WANG Yongchang, et al. Experimental study on combustion characteristics of pool fires in a sealed environment[J]. Energy, 2023, 283: DOI:10.1016/j.energy.2023.128497.
- [13] NFPA92-2018, Standard for smoke control systems[S].
- [14] MORGAN J H, DANIEL G, JOHN R H, et al. SFPE handbook of fire protection engineering[M]. Heidelberg: Springer, 2016: 3 437-3 475.
- [15] 丁厚成,徐远迪,邓权龙,等. 高层建筑火灾烟气流动对疏散影响的模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(12): 118-124.
DING Houcheng, XU Yuandi, DENG Quanlong, et al. Simulation study on influence of fire smoke flow on evacuation in highrise buildings[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(12): 118-124.
- [16] 高扬,廖鑫. 消防水幕对有害气体阻隔效果的试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(5): 77-82.
GAO Yang, LIAO Xin. Experimental study on dilution effect of water curtain on toxic gas[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(5): 77-82.
- [17] 靳红雨,吴义娟. 消防水幕隔热效果影响因素研究[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(6): 731-733.
JIN Hongyu, WU Yijuan. Experimental study on influencing factors of water curtain in attenuating fire radiation [J]. Fire Science and Technology, 2015, 34(6): 731-733.
- [18] 李涛,谢玮,苏紫敏,等. 受限空间水幕隔热阻烟性能的试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(12): 154-159.
LI Tao, XIE Wei, SU Zimin, et al. Experimental research on performance of water curtain for heat insulation and smoke blockage in confined space[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(12): 154-159.

作者简介: 李森 (1992—),男,安徽六安人,硕士,工程师,主要从事船舶火灾烟气控制、船舶消防安全技术等工作。E-mail:ls342423@mail.ustc.edu.cn。

