

doi: 10.11857/j.issn.1674-5124.2018100099



排烟机功率对船舶舱室烟气特性影响的仿真实验研究

蒋晓刚^{1,2}, 苑志江^{1,2}, 郑智林^{1,2}, 金良安^{1,2}

(1. 海军大连舰艇学院航海系, 辽宁 大连 116018; 2. 军事航海军队重点实验室, 辽宁 大连 116018)

摘要: 对于船舶住舱等小型舱室而言, 人员相对密集而火灾事故造成的烟气又难以通过有效手段排放。针对船舶住舱火灾烟气控制所采用的典型排烟方法, 运用火灾动力学软件 PyroSim 进行数值模拟计算, 并精心采用仿真验证试验, 研究无排烟和排烟机工作时的船舶舱室烟雾蔓延规律, 在此基础上依据燃烧所产生的热量设置 6 种排烟机功率依次增大的排烟工况, 研究不同工况排烟机功率和补风条件下的控烟效果, 得出较为接近实际的烟气蔓延流动时烟气温度和烟气浓度等特性参数的变化规律, 以及优化选择最佳的补风方式和排烟功率的总体思路。研究结果对于船舶舱室烟气高效防控具有一定的理论和现实指导意义。

关键词: 舱室火灾; 仿真实验; 烟气控制; 排烟机功率; 补风量

中图分类号: X913.4

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2019)02-0042-06

Simulation study on the effect of mobile smoke exhauster on the characteristics of ship cabin smoke

JIANG Xiaogang^{1,2}, YUAN Zhijiang^{1,2}, ZHENG Zhilin^{1,2}, JIN Liang'an^{1,2}

(1. Dept. of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;

2. Military Navigation Army Key Laboratory, Dalian 116018, China)

Abstract: For a small cabin, it is difficult to discharge the flue gas which is caused by a relatively intensive and fire accident by personnel. In view of the typical smoke exhaust method used for fire control of cabin fire, numerical simulation calculation was performed with PyroSim. The simulation test was designed to study the law of smoke spread in the cabin of ships without smoke and smoke ventilator. Based on the amount of heat generated, the smoke control effect of 6 kinds of smoke exhaust machines was set according to the heat generated by combustion, and the smoke control effect under different conditions was studied. The variation rules of characteristic parameters, such as smoke temperature and smoke concentration, which are close to the actual flue gas spreading flow are obtained. The research results have certain theoretical and practical significance for the efficient prevention and control of smoke in ship cabin.

Keywords: cabin fire; simulation experiment; smoke control; smoke exhaust power; supply air

收稿日期: 2018-10-21; 收到修改稿日期: 2018-11-29

基金项目: 海军大连舰艇学院科研发展基金资助项目(DJYKYKT2018-08)

作者简介: 蒋晓刚(1988-), 男, 河南许昌市人, 讲师, 博士, 主要从事舰船消防安全等研究。

通信作者: 苑志江(1983-), 男, 河北邢台市人, 讲师, 博士, 主要从事舰船安全防护研究。

0 引言

鉴于船舶排风系统和管路布置的复杂性,一般船舶住舱内仅分布有通风系统,并未设置舱室排烟系统,一旦发生火灾,住舱往往只能依靠移动式排烟设备进行低位排烟。由于火灾烟气的流动特性,低位排烟机的效率受到较大影响^[1],然而住舱等舱室发生火灾后对人员安全的威胁往往最大,因此研究移动排烟设备的排烟效率显得十分重要。

目前,关于火灾烟气控制方法的研究主要分为民用和军用两个方面,在民用方面多集中于高层建筑、地铁通道、隧道等控烟方法的研究,例如,李雪飞^[2]对层高为 29 m 的中庭火灾进行了机械排烟效果研究,通过对补风口面积和风机排量等参数的改变得出了自然补风和机械补风条件下排烟效果较好的参数设置;姜学鹏等^[3]对公路隧道排烟系统的排烟效率进行了研究,通过缩比试验研究了多个火源功率和不同机械排烟条件下的临界排烟速率试验值,表明了临界排烟速率试验值与火源功率线性相关;王欢等^[4]运用数值模拟方法对挡烟垂壁在长通道烟流控制中的作用进行了研究,结果表明由于垂壁高度的不同,挡烟垂壁对其上下游烟气温度的影响分别表现为减缓衰减与加速衰减 2 种效果。在军事方面多集中于机库、机舱等大型舱室的控烟方法研究,例如,刘伯运等^[5]对大型舰船机库机械排烟系统优化设计进行了研究,采用正交试验和极差方差分析方法在一定程度上得到了机械排烟系统的最佳配置方案;刘义^[6]对船舶机舱火灾烟气填充及控制技术进行了研究,通过全尺寸实验研究了送风口位置、风机启动时间和排烟量等因素对烟气控制的影响;金键等^[7]对大型舰船直升机机库排烟系统优化进行了研究,提出了利用机库的自然排烟和机械排烟相结合的方法对机库火灾实施除烟,并采用 FDS 软件进行了模拟。

烟气的肆意蔓延对于人员的安全逃生极其不利,火灾事故造成的人员伤亡大多数是由于烟气无法有效控制形成高温窒息环境引起的^[8-9],尤其是对于船舶住舱等小型舱室而言,人员相对密集而烟气又难以通过有效手段排放,然而目前针对船舶住舱等小型舱室的烟气控制方法相对较少,因此本文运用 PyroSim 模拟计算,分析了烟气蔓延流动时烟气温度和烟气浓度等特性参数的变化规律,优化选择最佳的补风方式和排烟功率,研究结果对于船舶舱室烟气高效防控具有一定的理论和现实指导意义。

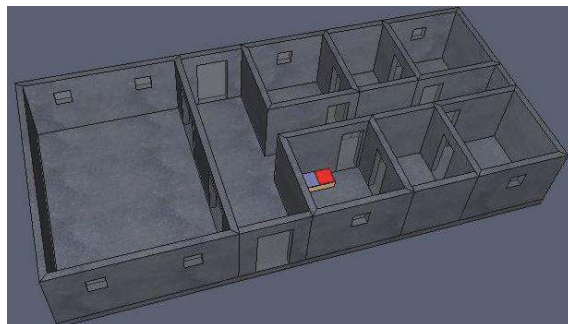
1 模型建立

1.1 舱室几何模型

以某船舶部分舱室及通道为原型,依据现代船舶设计原则,舱室及通道尺寸为 15.5 m×7.0 m×2.2 m,内设 4 个舰员住舱、2 个卫生间、1 个厨房和 1 组通道,通道同一侧的 2 个舰员住舱之间公用 1 个卫生间,每个舱室均设置有不同数量的舷窗和门,忽略船舶舱室外部尺寸和细小部件的影响,建立简化后的船舶舱室几何模型如图 1 所示。



(a) 船舶舱室布局图



(b) 船舶舱室侧视图

图 1 船舶舱室几何模型

1.2 参数设置

1) 火源设置

火源位于其中一个舰员住舱,面积为 0.5 m×0.4 m,结合实际情况,将火源设计在棉被之上,棉被最终被完全烧毁。实验研究表明^[10],在热辐射强度大于 6 kW/m² 时,在使用点火器的情况下,棉花可发生明火燃烧,燃烧后最大热释放速率可达 65 kW/m²,按照火势发展最为严重的情况考虑,将棉花热释放速率设定为 65 kW/m²,环境温度设置为 20 ℃,舱壁材质设置为 STEEL。另外,查阅相关资料^[11-12],棉花的主要组分为纤维素 94%,蛋白质 1%~1.5%,果胶酸 1%,矿物物质 1%,酸、糖 2%,蜡 0.5%,以此为依据将 PyroSim 中燃烧反应的 C、H、O、N 4 种元素的含量比例设置 6.3:7.1:2.1:1.0。

2) 监测点设置

起火舱室的温度和烟气变化规律是需要考察的重要对象,内部通道和两端出口是人员逃生的重要路径,因此在设置监测点时需要重点考虑上述位置。考虑到船舶舱室空间较小,人员密度大,人体耐受的临界值相应降低,将地板以上 1.5 m 处平面上烟气温度超过 60 °C、烟气能见度小于 5 m 作为危险状态的判定标准。具体监测点设置为 $Z=1.5$ m 平面上,通道 1 中心线 $X=6.0$ m,通道 2 中心线 $Y=3.5$ m 处,火源所在房间中心区域 ($X=8.5$ m, $Y=2.5$ m) 处,起火舱室出口位置 $X=9$ m 处,其他各舱室的中心区域 ($X=2.5$ m, $Y=3.5$ m), ($X=11.0$ m, $Y=1.5$ m), ($X=13.5$ m, $Y=1.5$ m), ($X=8.5$ m, $Y=5.5$ m), ($X=11.0$ m, $Y=5.5$ m), ($X=13.5$ m, $Y=5.5$ m), 监测烟气参数的变化规律。

3) 网格设置

关于模型的网格尺寸,采用 PyroSim 推荐的无量纲数 D^*/δ_x 判据求得,根据 Kevin 等做的网格独立性测试实验,得出火源特征直径 D^* 与计算网格尺寸 δ_x 的比例在 4~16 之间时,可以得出一个合理的求解结果^[13],其中火源特征直径表达式为:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_0 C_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (1)$$

式中: Q ——火源热释放速率, kW/m²;

ρ_0 ——空气密度, 1.205 kg/m³;

C_p ——空气的定压比热, 1.000 6 kJ/(kg·K);

T_0 ——环境初始温度, 20 °C;

g ——重力加速度, 9.8 m/s²。

火焰稳定功率为 65 kW, 计算可得 D^* 为 0.86。综合考虑计算结果的准确性以及计算机的性能,本文采用 $\delta_x = 0.1$ m 网格尺寸进行计算,网格分布为 150×80×25, 网格总数为 300 000。

4) 初始环境设置

初始温度设定为 20 °C, 压强为 $1.013 2 \times 10^5$ Pa, 烟气初始浓度为 0, 且舱室各处初始温度和压强相同, 将计算时间设定为 120 s。

2 仿真实验及数据分析

为了考察排烟机对于舱室烟气蔓延规律的影响, 首先对未设置排烟机时的舱室烟气蔓延规律进行仿真研究, 结合人员逃生救生, 主要从烟气温度和烟气能见度两方面进行研究。

2.1 无排烟时的烟气特性

1) 烟气温度特性

由于舰艇的外壳均是金属材质, 起火舱室温度的升高对临舱等附近舱室影响较大, 出于消防和人员安全考虑, 对模型中的 4 个住舱和相邻卫生间温度进行对比分析。

图 2 是未设置排烟机时住舱及卫生间在 $Z=1.5$ m 处烟气温度变化曲线, 住舱 1 的温度在起火不到 20 s 即超过了 60 °C, 已高于人体承受极限。同时相邻卫生间 1 的温度也接近 60 °C, 表明舱室金属材质的导热性极好, 随着舱室距离着火点距离的增加, 温度逐渐下降, 距离着火点最远的住舱 4 温度已经下降到 25 °C 左右。

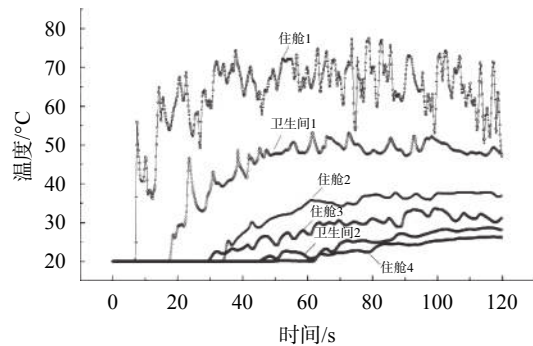


图 2 舱室 $Z=1.5$ m 高度处烟气温度变化

另外, 通道内部的烟气温度传播趋势如图 3 所示, 可知通道烟气温度在起火舱室门口最高, 并快速向通道四周蔓延。在燃烧进行到 80 s 时, 烟气温度在通道内已经传播的十分充分, 这可为火灾和人员施救时间提供参考。

图 2 是未设置排烟机时住舱及卫生间在 $Z=1.5$ m 处烟气温度变化曲线, 住舱 1 的温度在起火不到 20 s 即超过了 60 °C, 已高于人体承受极限。同时相邻卫生间 1 的温度也接近 60 °C, 表明舱室金属材质的导热性极好, 随着舱室距着火点距离的增加, 温度逐渐下降, 距离着火点最远的住舱 4 温度已经下降到 25 °C 左右。

2) 烟气能见度特性

烟气能见度对于人员逃生救生而言具有重要研究价值, 能见度的高低直接影响人员对于逃生路径的选择, 鉴于上述原因, 在 T 型通道内相应位置布置能见度传感器, 传感器布置在 $Z=1.5$ m 的平面上, 具体位置为: 传感器 1 ($X=6.0$ m, $Y=4.5$ m), 传感器 2 ($X=6.0$ m, $Y=2.5$ m), 传感器 3 ($X=6.0$ m, $Y=6.5$ m),

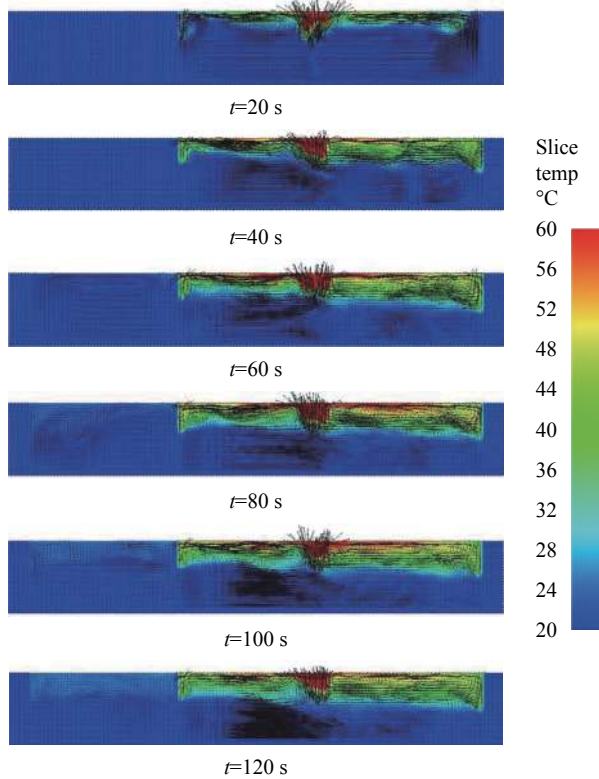
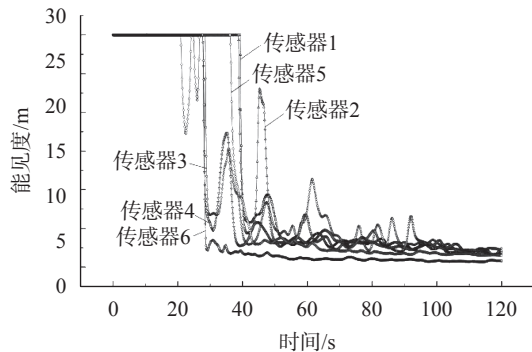


图 3 通道烟气温度传播趋势

传感器 4($X=6.0$ m, $Y=0.5$ m), 传感器 5($X=8.0$ m, $Y=3.5$ m), 传感器 6($X=12.0$ m, $Y=3.5$ m), 建模仿真结果如图 4 所示。

图 4 通道 $Z=1.5$ m 高度处烟气能见度变化

由图 4 可知, 随着燃烧的进行, 烟气能见度越来越低, 在燃烧至 40 s 时能见度数值下跌至 5 m 以内, 表明烟气浓度增大极快, 如果不及时排除浓烟, 将对火灾及人员施救产生极其不利的影响。在不考虑自然通风的情况下, 由于烟气自身的湍流性质, 靠近通道出口位置的传感器 3 和传感器 4 能见度数值起伏较大, 在燃烧进行 40 s 后基本维持在 5 m 左右。靠近通道最内侧的传感器 6 在燃烧进行至 60 s 以后能见度数值已经下跌至 2 m 左右, 可见在环境

相对封闭的船舶舱室内部, 烟气能见度下降极快。

2.2 排烟机工作时的烟气特性

1) 排烟机设置

显然, 只有当排烟机排烟速率大于烟气生成速率时, 才有可能把烟气尽快排除, 因此首先需要计算当前模型生成烟气的速率, 为选择排烟机功率提供依据。根据 Thomas-Hinkley 等^[14]在大量试验和理论研究基础上提出的轴对称烟羽流烟气生成速率计算公式, 如式(2)和式(3)所示:

$$m_e = C_e P_f Z^{3/2} \quad (2)$$

$$Z = 1.6 + 0.1H \quad (3)$$

式中: C_e ——烟的质量流量系数, 当火源发生在小房间并靠近房间开口时, $C_e = 0.21 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^{5/2})$;

P_f ——火源周界长度, m;

H ——空间高度, m;

Z ——烟气层界面至可燃物表面的垂直高度, m。

为便于确定排烟量, 将烟气生成率 m_e 换算为体积生成率 V , 换算公式为:

$$V = m_e T / (\rho_0 T_0) \quad (4)$$

$$T = T_0 + \Delta T \quad (5)$$

$$\Delta T = Q_c / m_e C_p \quad (6)$$

式中: V ——烟气体积生成率, m^3/s ;

ρ_0 ——环境温度下空气密度, 取 $\rho_0 = 1.22 \text{ kg}/\text{m}^3$;

T ——计算点烟气平均温度, K;

T_0 ——环境的初始温度, 取 $T_0 = 293 \text{ K}$;

ΔT ——烟气初始温度与环境温度差, K;

Q_c ——火源总热释放率 Q 的对流部分, kW/m^2 (通常 $0.6Q \leq Q_c \leq 0.8Q$);

C_p ——羽流中气体的定压比热容, $C_p = 1.02 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

通过公式计算得出本文棉被燃烧烟气生成速率为 $7.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 因此排烟机排烟量 O 应不小于 $7.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

另外, 建筑设计防火规范中规定^[15], 对于密闭空间设置机械排烟系统时, 补风量 I 不应小于排烟量的 50%。为了研究排烟机功率对排烟效果的影响并减少其余参数干扰, 依据相关研究数据^[1], 将补风量设置为排烟量的 75%。排烟机设置在靠近起火点的通道舱门处, 排烟面积为 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$, 考虑人员逃生需要, 将补风口设置为与排烟机对应的通道另一侧舱门。

根据 2.1 节仿真结果, 火灾发展 80 s 后, 烟气浓度基本达到饱和, 为了考察排烟机与补风量对于排

烟效果的影响,排烟与补风在火灾进行80 s后开启,考察烟气完全蔓延情况下的排烟效果。结合上述分析,具体工况设置如表1所示。

表1 具体工况设置

工况	补风量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	排烟量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
1	5.625	7.5
2	7.5	10.0
3	9.375	12.5
4	11.25	15.0
5	13.125	17.5
6	15.0	20.0

2) 烟气温度特性

烟气温度与人员耐受度直接相关,人员逃生需要寻求烟气温度较低区域,并且向逃生通道靠近,因此研究逃生通道及出口的烟气温度显得十分重要。结合上述工况,对通道内烟气温度变化趋势进行仿真计算,计算结果如图5所示。

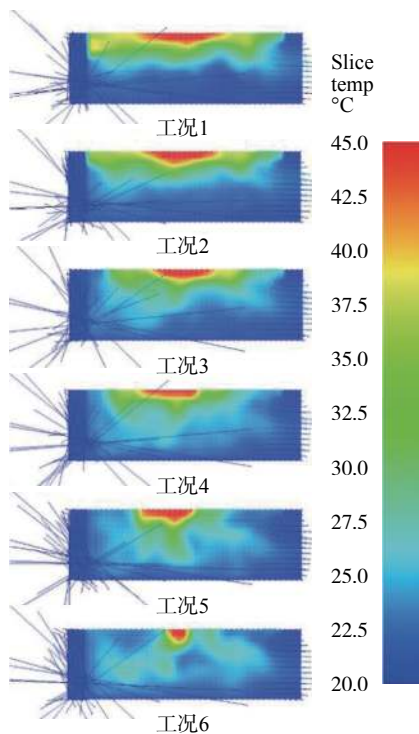


图5 排烟机工作后通道温度变化图 ($t=120\text{ s}$)

由图5可知,经过同样的排烟与补风时间,工况1($I=5.625\text{ m}^3/\text{s}$, $O=7.5\text{ m}^3/\text{s}$)通道温度最高,工况6($I=15.0\text{ m}^3/\text{s}$, $O=20.0\text{ m}^3/\text{s}$)通道温度最低,表明在当前补风量与排烟量关系下,排烟机功率越大,烟

气温度降低越快。

3) 烟气能见度特性

根据补风口和排烟机位置,在通道内选取靠近补风口即逃生出口位置设置能见度传感器,该位置的能见度对于人员顺利逃生具有重要意义,具体计算数据如图6所示。

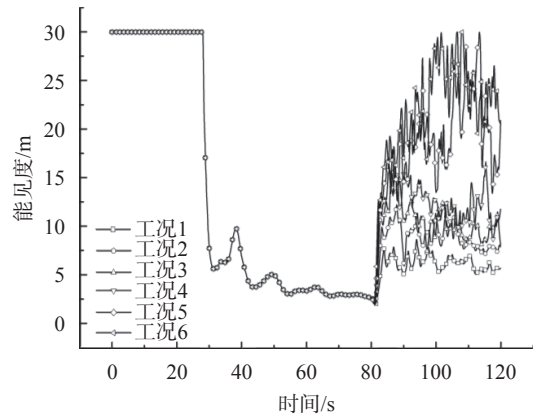


图6 逃生出口能见度变化数据

由于 t 在0~80 s时排烟机未开启,各工况烟气蔓延情况相同,为了更加清楚的观察排烟机开启后烟气蔓延规律,将 $t=80\text{ s}$ 后烟气能见度数据单独显示如图7所示。

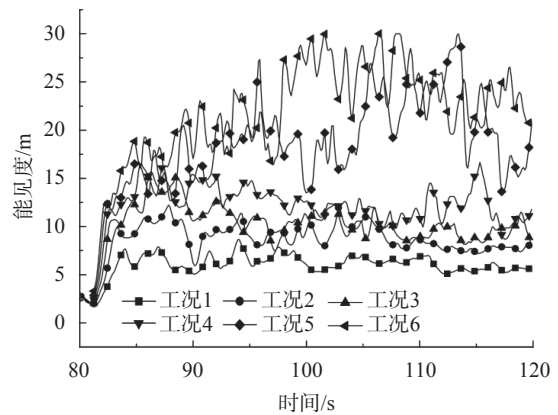


图7 $t=80\text{ s}$ 后逃生出口烟气能见度数据

由图6和图7可知,在开启排烟和补风后,工况1至工况6的能见度数值均得到明显提升,表明排烟机的排烟效果显著。需要说明的是,工况1到工况4排烟机的排烟效果相似,工况5排烟机的排烟效果明显提升,之后工况6与工况5排烟效果再次接近,表明在相同烟气规模下,选择适当的排烟机功率和补风条件可达到节能高效的控烟效果。对于仿真实验中的6个工况,选择工况5条件下的排

烟机功率和补风条件最符合工程实际。

3 结束语

1) 针对船舶住舱等小型舱室排烟效率问题, 利用 PyroSim 建模分析了移动式排烟机对排烟效果的影响, 结果表明排烟效率与排烟机功率和补风量成正比。

2) 无排烟情况下, 燃烧进行 20 s 后舱室温度即超过了人体的最高耐受温度, 燃烧进行 80 s 后烟气即充满了整个空间, 能见度也迅速下降至 3 m 以下。开启排烟设备后, 舱室温度逐渐下降, 运行至 120 s 时, 通道最高温度已下降至 45 °C, 并且主要集中在舱室顶部区域, 能见度也快速恢复至 5 m 以上。

3) 对于 6 种排烟机工况, 随着排烟机功率的增大, 排烟效果也随之增强, 但是工况 1 到工况 4 的排烟效果接近, 工况 5 的排烟效果明显增强, 之后工况 6 又与工况 5 排烟效果接近, 因此从工程应用角度而言, 工况 5 是较为经济的排烟方式。

4) 随着补风量的增大, 由于新鲜空气的进入, 会造成火势的进一步扩大, 舱室温度也随之升高, 因而在选择排烟机功率和补风量时要综合考虑排烟和火势蔓延两种情况, 在后续研究中需要对上述情况进行更加深入地探讨。

参考文献

- [1] 雷晶晶, 周汝, 蒋军成, 等. 着火房间最优化机械排烟效率理论分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2018, 40(4): 125-130.
- [2] 李雪飞. 补风方式对中庭类大空间建筑机械排烟效果的影响[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(2): 193-197.
- [3] 姜学鹏, 陈姝, 郭昆. 集中排烟公路隧道临界排烟速率计算模型[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(10): 50-55.
- [4] 王欢, 齐庆杰, 周新华, 等. 挡烟垂壁对长通道顶棚温度分布的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(11): 24-30.
- [5] 刘伯运, 胡建华, 李昂. 大型舰船机库机械排烟系统优化设计[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(9): 1225-1229.
- [6] 刘义. 全尺寸船舶机舱火灾烟气填充及控制技术[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [7] 金键, 仲晨华, 牟金磊, 等. 大型舰船直升机机库排烟系统优化[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(6): 739-743.
- [8] 杨天佑. 高速列车火灾烟气防治研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011: 45-55.
- [9] 李田成. 船舶密闭舱火场温度与烟气规律的模拟研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 12-15.
- [10] 夏恩亮, 刘申友, 程旭东, 等. 棉花阴燃和明火燃烧特性的对比研究[J]. 火灾科学, 2013, 22(2): 70-76.
- [11] 孙玉福. 实用工程材料手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 190-192.
- [12] 欧凯, 洪晓斌, 文泽贵, 等. 基于正交试验的建材燃烧烟密度测试装置参数组合优化[J]. 中国测试, 2014, 40(4): 128-131.
- [13] KEVIN M, GLENN F. User's guide for fire dynamics simulator(version4)[M]. Washington: U.S. Governing Printing Office, 2004: 20-58.
- [14] THOMAS H. On the upward movement of smoke and related shopping mall problems[J]. Fire Safety Journal, 1987, 12: 191-203.
- [15] 建筑设计防火规范: GB 50016-2014[S]. 北京: 中国质检出版社, 2014.

(编辑:徐柳)