

文章编号:1671-1637(2015)02-0059-11

## 船舶舱室火灾烟气蔓延的场-区耦合模型

汪金辉,焦宇,许涛,陈伟炯

(上海海事大学 海洋科学与工程学院,上海 201306)

**摘要:**针对大型船舶火灾中的烟气蔓延,分析了场模型 FDS 软件和区域模型 CFAST 软件各自的局限性。基于能量传输、组分转换和压力平衡原理,建立了船舶舱室火灾烟气蔓延的场-区耦合模型。搭建了带有 4 个测点的船舶舱室火灾缩尺试验平台,验证了耦合模型的有效性。对船舶舱室火灾的烟气蔓延进行了场模拟、区域模拟和场-区耦合模拟,并将温度和烟气层高度的模拟结果进行对比分析。分析结果表明:4 个测点的温度均随着时间的增大而上升,在同一时刻距火源近的测点温度高,随着与火源间距离的变大,测点温度降低,4 个测点的温度受烟气湍流的影响略有波动;在燃烧达到稳定状态之后,场-区耦合模型能较准确地模拟烟气层高度的变化规律,均优于场模型和区域模型的模拟结果;在计算时间上,场-区耦合模型比场模型缩减了约 54% 的计算时间;场-区耦合模型的模拟结果与试验结果具有良好的一致性,因此,其具有较好的工程应用价值。

**关键词:**船舶工程;船舶舱室;火灾烟气;场-区耦合模型;尺度试验

**中图分类号:**U664.8 **文献标志码:**A

### Field-zone coupling model of fire smoke propagation in ship cabin

WANG Jin-hui, JIAO Yu, XU Tao, CHEN Wei-jiong

(School of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Aiming at the fire smoke propagation in large ship cabin, the limitations of field model FDS and zone model CFAST were analyzed. Based on the principles of energy transmission, component transformation and pressure balance, the field-zone coupling model of smoke propagation in ship cabin was developed, and the small scale experiment platform with 4 temperature measuring points of ship cabin fire was set up to verify the effectiveness of the established coupling model. The simulations of fire smoke propagation in ship cabin were carried out by field model, zone model and field-zone coupling model respectively, and the simulation results of temperature and smoke layer height were compared. Analysis result shows the temperatures of 4 measuring points increase with the increase of time, the measuring point near fire has higher temperature at the same time. With the increase of distance from fire, the temperature of measuring point falls, and the slight fluctuations of the temperatures at 4 measuring points appear due to smoke turbulent flow. When fire burning reaches steady state, the change regular of smoke layer height can be simulated by using the models, and the simulation result by using field-zone coupling model is better than the simulation results by using

收稿日期:2014-11-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51109127);上海市教委一流学科建设项目(A151021402S);上海市研究生教育创新计划实施项目(20131129);上海市晨光计划项目(10CG51)

作者简介:汪金辉(1981-),男,安徽桐城人,上海海事大学讲师,工学博士,从事船舶火灾风险评估研究。

field model and zone model. The calculation time for field-zone coupling model is about 54% less than the calculation time for field model. The simulation result by using field-zone coupling model is consist with the test result, so the field-zone coupling model has better engineering value.

1 tab, 25 figs, 28 refs.

**Key words:** ship engineering; ship cabin; fire smoke; field-zone coupling model; scale test

**Author resume:** WANG Jin-hui (1981-), male, lecturer, PhD, +86-21-38282517, wangjh@shmtu.edu.cn.

## 0 引 言

在经济全球化的当今世界,国际贸易运输量的90%由海上船舶来完成<sup>[1]</sup>,而火灾是当前船舶面临的主要危害之一<sup>[2]</sup>。船舶是漂浮在海洋中的一个独立建筑实体,发生火灾的概率很大。随着经济的发展,航运业越来越发达,由于火灾而引发的海难事故大幅增加。基于风险的船舶设计强调安全可靠的船舶设计理念,其中船舶防火安全设计是一个重要环节<sup>[3]</sup>,其前提是要对船舶火灾特征有全面了解。船舶火灾发生后,产生的有毒、有害、高温烟气迅速扩散,而高温、有毒烟气是造成人员伤亡的直接原因。船舶舱室火灾与普通建筑火灾明显不同,作为水上交通运输工具,船舶舱室空间利用率要求较高,内部设备密集,管线复杂,走廊过道狭小,是一种非常典型的受限空间火灾,因此,研究船舶舱室火灾烟气的温度场、浓度场与火灾烟气蔓延规律,分析火灾在船舶空间结构里的传播和火灾烟气的发展变化规律,探索能直接对船舶火灾的烟气运动进行数值模拟的新方法,对于基于风险的船舶设计和船舶运输安全具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。

针对火灾与烟气场景特性的数值计算方法主要有场模型和区域模型,Wang等采用场模拟工具FDS软件对船舶机舱火灾的烟气蔓延规律进行了研究<sup>[5]</sup>;Ahmed采用火灾区域模型对单一舱室火灾进行了烟气特征模拟计算<sup>[6]</sup>,但在同时描述火场和远离火场区域的烟气蔓延时具有一定的局限性;Wang等对场模型和区域模型在船舶火灾中的适用性进行了对比研究,指出了2种模型的局限性,可利用场模型计算火源所在舱室的烟气物理参数,但要利用场模型来计算火源相邻舱室与烟气在更大范围内蔓延的情况则会大大降低计算精度和耗费计算时间,而区域模型的局限性则是难以得出火源附近详细的物理参数<sup>[7-8]</sup>;Shi等分别采用FDS软件和CFAST软件对环形走廊进行了火灾模拟研究<sup>[9-10]</sup>,但仍没有建立场模型与区域模型的耦合模型,无法

将不同模型的优点结合起来,难以高效得出较为全面的数据信息<sup>[10]</sup>。

国内外学者对场-区耦合模拟技术开展了卓有成效的研究。Burton等分别采用SMARTFIRE软件和CFAST软件建立了场-区耦合模型,对不同火灾场景进行了模拟分析,分析结果表明针对特定场景,耦合模型可减少56%的网格数量,节省48%的计算时间<sup>[11]</sup>;姚建达等开展了建筑火灾场-区耦合模型的研究,建立了基于体积守恒与修正压力的场-区耦合模型,可以较好地模拟建筑火灾中的烟气运动<sup>[12]</sup>;Yao等采用场模型、区域模型以及二者的耦合模型研究了建筑火灾与烟气的运移规律,采用低马赫数的三维可压缩Navier-Stokes方程对着火房间内的烟气运动过程进行模拟<sup>[13]</sup>;杨锐等对单个多室建筑模型与实体多室建筑内的火灾烟气运动过程进行数值分析,并将模拟结果与试验数据进行对比<sup>[14]</sup>;Hua等建立了耦合火灾模型,模拟了烟气在多层建筑物内的传播,并对模型的有效性进行了分析<sup>[15]</sup>;任鸿翔等提出了基于场模拟与区域模拟研究船舶火灾烟气运移规律的思路<sup>[16]</sup>,但目前未见关于该思路的具体研究内容;Jiao等搭建了船舶通道火灾试验平台,提出了船舶火灾场-区耦合模拟的基本思路,选择FDS软件和CFAST软件分别作为场模拟和区域模拟工具,实现二者在边界条件上的耦合和数据传输<sup>[17]</sup>,但具体研究过程并没有耦合边界条件的确定准则。

船舶火灾发展与烟气蔓延是个非稳态过程,火灾载荷、空间结构与壁面传热性能均有其自身特点,因此,所建立的船舶火灾场区结合的模式应充分考虑船舶舱壁温度、热传导率与非稳态导热系数等重要因素,这就需要基于专门的船舶空间结构特征和壁面材料特性,将场模拟与区域模拟结合起来,开发二者之间的耦合技术,同时,也需要建立相应的船舶火灾试验模型对船舶火灾场-区耦合模型进行检验和修正。本文基于能量传输、组分转换和压力平衡原理构建了场-区耦合模型,建立了场区耦合的热通

量边界条件、压力边界条件和组分守恒边界条件,对船舶舱室火灾的烟气蔓延进行了场模拟、区域模拟和场-区耦合模拟,并将温度和烟气层高度的模拟结果进行了对比分析,搭建缩尺寸的模拟船舶舱室火灾场景特性的试验平台,分析了耦合模型的有效性,为研究船舶火灾的产生、发展与烟气的时空运移规律提供思路。

## 1 场-区耦合模拟技术

### 1.1 场模型

场是指流场状态参数的空间动态分布,为正确描述火灾过程,需要了解参数的空间分布及其随时间的变化规律。对场模型进行数值模拟,须建立体现质量、动量和化学组分变化规律,由连续方程、动量方程、能量方程、组分方程和辅助方程构成的数学方程<sup>[18]</sup>。

在场模型中,把研究区域划分为许多控制体单元(图 1),A~G 为边界点。控制体单元之间通过边界上的节点进行能量、质量和化学组分的交换,可以得到较真实的瞬态流场与各种物理量的详细分布,精度较高,适用于建筑火灾中的着火房间或有强通风的房间,需要较长的计算时间和强大的计算能力,目前对整个大型船舶内的烟气流动进行场模拟显然是不太符合实际。场模型中的数学方程很难求出解析解,需要借助计算机进行数值求解。目前,基于场模型技术用于火灾动力学分析的软件较多,应用最广泛的为 FDS 软件。

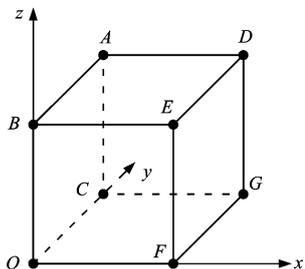


图 1 控制体  
Fig. 1 Control body

### 1.2 区域模型

区域模型是基于对空间上下层气体形态的假设建立起来的火灾模型,认为着火区域分为上下 2 层,上层为热烟气层,下层为冷空气层,见图 2。每层内的物理参数如温度、烟气浓度等均为均匀分布,所需的计算时间较短,并且在假设成立的前提下能给出较合理的结果<sup>[6]</sup>,但对于有复杂几何形状、有强火源或者强通风的房间,其误差将很大以致失去真实

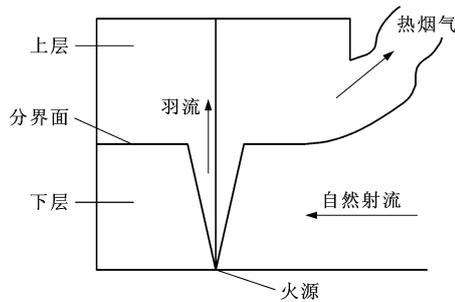


图 2 区域模型  
Fig. 2 Zone model

性。目前应用最广泛的火灾区域模型软件是 CFAST 软件。

### 1.3 场-区耦合模型

对于船舶火灾尤其是大型船舶火灾中的烟气运动,显然以上 2 种模型各有局限,只有把这 2 种模型结合起来,充分发挥各自的优点,才能找到更适用于船舶火灾中烟气运动的数值模拟方法,即场-区耦合模型。在场-区耦合模型中,由于火灾附近的流场参数变化梯度大,一般将火源附近区域用场模型进行分析,距离火源较远的区域用区域模型进行分析,既能满足工程计算的精度要求,又能节省模拟计算时间。

场-区耦合模型的关键技术点在于其边界面流场物理参数的耦合,边界条件的处理实际是边界面上质量、能量、动量和组分的传输和交换过程,将场模型在边界面输出的各种流体参数通过加总或者加权的方法等效处理,输入到区域模型中,可确保结果的准确性,从而实现场-区耦合模型的模拟。

#### 1.3.1 热通量边界条件

场-区耦合模型边界面热交换包括对流热和辐射热 2 部分<sup>[19-20]</sup>,由场模型边界输入到区域模型的总放热可以通过对流热和辐射热分别求解。

(1) 对流热交换。热烟气在区域模型和场模型边界面的流动完成了热交换,热交换强度取决于边界面的热烟气流量和单位质量热烟气温升所需热量,对流热强度为

$$Q_c = c_p \rho v (T - T_0) \quad (1)$$

式中: $Q_c$  为对流热强度(kW); $c_p$  为流体定压热容 [ $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ]; $v$  为边界面体积流率 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ); $\rho$  为流体密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $T$  为边界面流体热力学温度(K); $T_0$  为边界面流体初始热力学温度(K)。

(2) 辐射热交换。将火源看作是一个热辐射的中心,根据火源辐射模型原理(图 3),向边界面辐射

的热量为<sup>[21]</sup>

$$Q_R = \frac{\chi_R m_f \Delta H \tau S}{4\pi l^2} \quad (2)$$

式中: $Q_R$  为辐射热强度(kW); $\chi_R$  为辐射热效率; $\tau$  为空气透射率; $l$  为辐射距离(m); $m_f$  为燃料质量燃烧损失速率( $g \cdot s^{-1}$ ); $S$  为边界面积( $m^2$ ); $\Delta H$  为燃烧热( $kJ \cdot g^{-1}$ )。

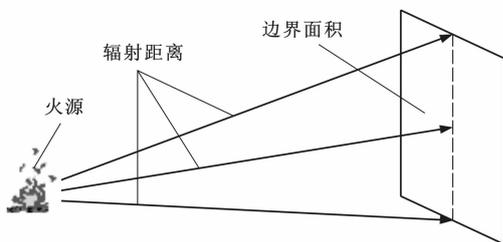


图 3 火源辐射模型

Fig. 3 Fire radiation model

在耦合边界条件上,区域模型的热通量和场模型的热通量相等,即

$$Q_r = Q_z = Q_c + Q_R \quad (3)$$

式中: $Q_r$  为场模型的热通量(kW); $Q_z$  为区域模型的热通量(kW)。

### 1.3.2 体积守恒的压力边界条件

场模型边界输出的压力可以分为动压  $P_d$  和静压  $P_s$  两部分,即

$$P_d = -\frac{\rho V^2}{2} \quad (4)$$

$$P_s = \begin{cases} -g\rho_1 h_1 & h_1 \leq h_2 \\ -g[\rho_1 h_2 + \rho_0 (h_1 - h_2)] & h_1 > h_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $V$  为流体垂直于边界面的速度( $m \cdot s^{-1}$ ); $h_1$  为流体高度(m); $h_2$  为烟气层高度(m); $\rho_0$  为烟气层内的流体密度( $kg \cdot m^{-3}$ ); $\rho_1$  为烟气层外的流体密度( $kg \cdot m^{-3}$ )。

在耦合边界条件上,区域模型的压力和场模型的压力相等,即

$$P_r = P_z = P_d + P_s \quad (6)$$

式中: $P_r$  为场模型对应的压力(Pa); $P_z$  为区域模型对应的压力(Pa)。

### 1.3.3 组分守恒边界条件

组分守恒是通过等效火源实现的,假设边界面的热量功率交换为  $Q_i$ ,区域模型等效燃烧质量燃烧损失速率为

$$m_i = \frac{Q_i}{\Delta H \chi_i} \quad (7)$$

式中: $\chi_i$  为燃烧热效率。

## 2 场-区耦合模型有效性分析

### 2.1 试验平台模拟结果分析

#### 2.1.1 试验平台设计

船舶舱室的空间结构一般由单体舱室和狭长的通道组成<sup>[22]</sup>。参照这种结构,本文构建了狭长通道试验平台,模拟较小尺寸的通道火灾场景,空间几何缩尺为 1/6,主要保证缩尺试验平台中烟气温度的空间分布规律与全尺舱室中的相等。试验平台顶板为双层不锈钢板加筋结构,中间夹层为岩棉,由不锈钢板包裹,与船用舱壁用材 A60 具有热惰性相似关系。在试验中,为了便于试验观察,侧壁面为耐火玻璃,耐高温 800 °C。

图 4 为试验舱室的几何尺寸与温度测点布置,试验平台是由 13 个方格(编号为 1~13)构成的“L”形一次折曲长方体,第 1 段为火源所在长方体空间,长度为 7 150 mm,第 2 段长度为 6 000 mm,方格间由轴向宽度为 70 mm、径向深度为 75 mm 的加强筋相互连接。试验台上下壁面芯材为复合岩棉结构的保温层,内表面为薄不锈钢板。火源位置左、右侧面方格为厚度为 10 mm 的石英玻璃;其余侧面均为厚度为 10 mm 的钢化玻璃。在左、右侧第 1 个方格顶部中央分别设置出风口和进风口,断面积均为 300 mm×300 mm。

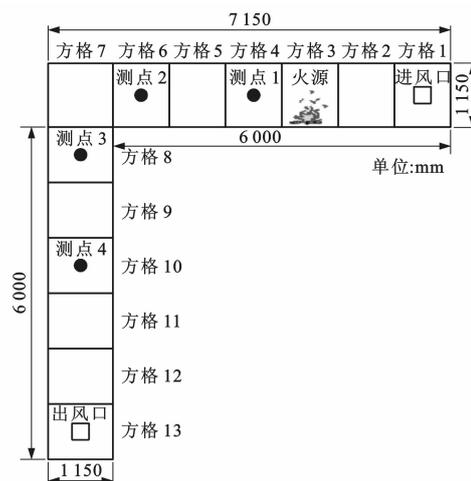


图 4 试验模型

Fig. 4 Test model

试验装置由火源系统、燃油恒定供给系统、密闭舱室、数据采集处理系统、自动控制通风系统组成。火源系统位于方格 3 中,为直径为 19.5 cm 的油盘,燃料为煤油,液面距下底面 12 cm。设置 4 组位于方格中心的竖直温度测棒(精确到 1 °C)进行试验结果监测,分别测定各方格烟气温度,温度监测数据与

火源系统中燃料数据通过多通道数据采集仪 ZRRX40 传输到数据采集电脑,并通过软件程序实现试验数据的记录和分析。

### 2.1.2 火源热释放功率

在船舶舱室火灾中以高压燃油和润滑油等液体火灾居多,这些油类均是组份复杂的烃类混合物,如作为动力燃油的柴油是沸点范围和黏度介于煤油与润滑油之间的液态石油馏分(碳原子数为 10~22)。当设备损坏导致燃料与高温热源接触发生火灾时,很容易形成油池火、油蒸气火或喷射火<sup>[4]</sup>。真实的机舱火灾中燃油的燃烧方式可能是单一的,也可能是几种燃烧方式并存,因此,机舱火灾具有复杂性。由于本文重点研究船舶舱室火灾烟气蔓延的模拟技术,分析火灾烟气的温度场和烟气层高度变化,因此,不考虑燃料差别在试验通道中燃烧可能存在的差别,所以试验中采用煤油(碳原子数为 11~17)作为燃料。

图 5 为油盘在试验平台内的燃烧状态,燃烧试验历时 600 s,在记录数据的时间段内,油盘燃烧状态稳定。假设从油盘中蒸发的燃料蒸气都参与了燃烧反应,油池的质量损失速率等于火源的质量燃烧速率,即燃料的消耗速率等于参加燃烧反应的燃料质量变化率。



图 5 火源燃烧状态

Fig. 5 Fire burning status

图 6 为基于电子天平得到的质量-时间曲线,从中可以看出质量随着时间的增加而稳步下降,与燃烧对油池燃料的不断消耗质量不断下降相吻合,即在燃烧过程中试验平台内的氧气足以支持煤油在试验时段内稳定燃烧,火源功率保持相对恒定。

本文对质量-时间曲线进行平滑处理,并进行一

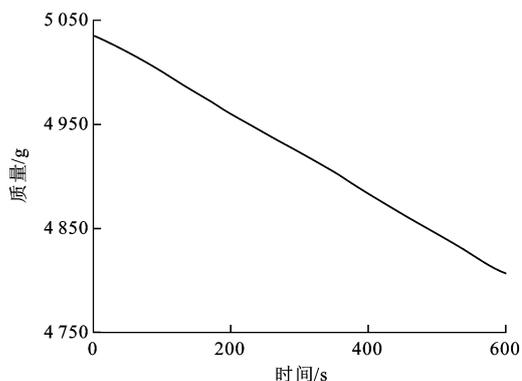


图 6 质量与时间的关系

Fig. 6 Relationship between mass and time

次求导,再取负数即可计算出试验中煤油燃烧速率为  $0.36876 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据式(7),参考文献[23], $\Delta H$  取  $45 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ , $\chi_f$  取 0.68,可计算得到火源的热释放功率为 11.284 kW。

根据文献[24-26],在保证烟气温度相等的情况下,缩尺与全尺试验舱中的火源热量相似关系为

$$\frac{Q_m}{Q_f} = C^{\frac{5}{2}} \quad (8)$$

式中: $Q_m$  为缩尺舱中的热释放功率(kW); $Q_f$  为全尺舱中的热释放速率(kW); $C$  为几何缩比。

按照 IMO 在船舶水基灭火有效性标准试验(IMO, MSC/Circ 668)中对标准热释放功率规定有 1、4、6 MW 3 种尺度的情况,本文仅针对 1 MW 标准情况进行缩尺模拟试验,即  $Q_f$  为 1 MW,本试验舱几何缩比  $C$  为 1/6,故根据式(8)计算可得  $Q_m$  为 11.340 kW,计算结果与式(8)缩尺试验舱中所用火源功率非常吻合,可以看出缩尺试验舱中所用火源符合火源热量相似要求。

### 2.1.3 试验结果分析

在试验工况中,火源为功率稳定在 11.284 kW 的煤油池火,燃烧时间为 600 s,进风口关闭,出风口敞开,无机械通风,环境温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,图 7~10 为试验过程中 4 个测点上层烟气温度( $^\circ\text{C}$ ,下同)随时间的变化,从中可以看出,油池火释放的能量使烟气层的温度高于周围环境的温度,4 个测点的温度均随着时间的增长而上升。在燃烧试验的前 200 s,4 个测点的温度随时间较快升高,燃烧至 350 s 后,温度变化趋于稳定。上述升温特征和火源的燃烧特性相一致,即从开始燃烧到旺盛燃烧阶段热释放速率增长较快,而后趋于稳定。在同一时间点,距离火源较近的测点温度较高,随着与火源间距离的变大,测点温度降低,这是由于热烟气自火源沿通

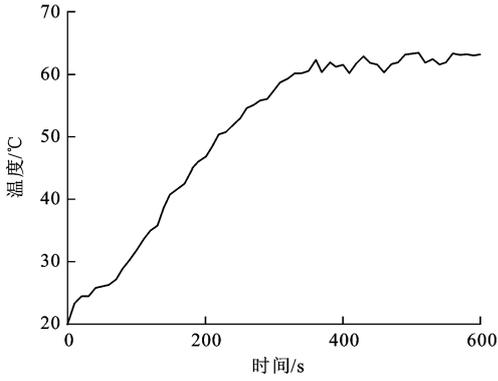


图7 试验工况下测点1的温度曲线

Fig. 7 Temperature curve at measuring point 1 under test condition

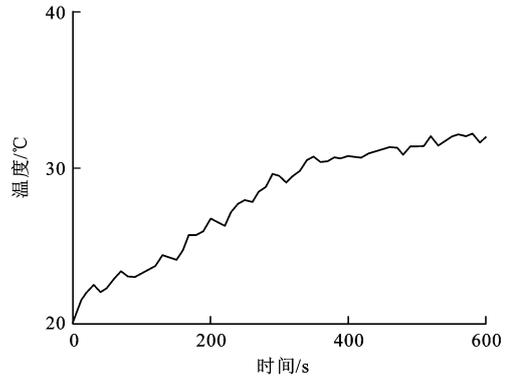


图10 试验工况下测点4的温度曲线

Fig. 10 Temperature curve at measuring point 4 under test condition

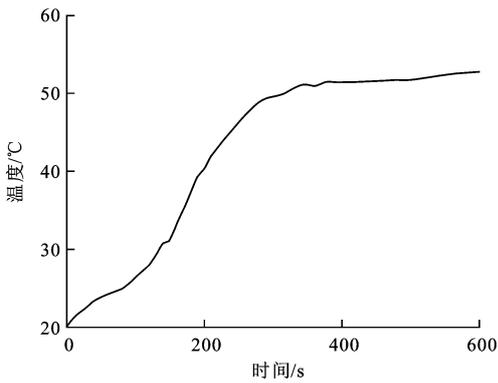


图8 试验工况下测点2的温度曲线

Fig. 8 Temperature curve at measuring point 2 under test condition

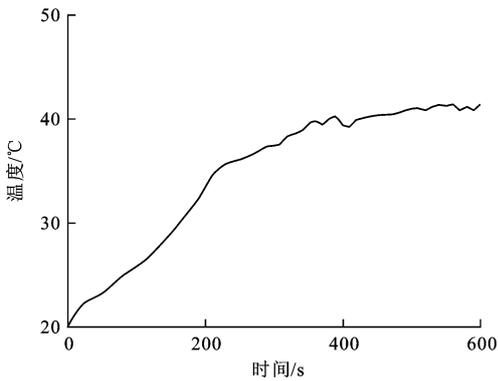


图9 试验工况下测点3的温度曲线

Fig. 9 Temperature curve at measuring point 3 under test condition

道的蔓延过程中,通过对流和热辐射向壁面传热,导致烟气由于热损失而使温度降低。另外,从4个测点的升温曲线可以看出,温度在随时间升高的过程中有波动,甚至局部出现温度降低的现象,这与燃烧状态烟气的湍流有关系,由于高温烟气在运输过程中和温度较低空气的卷吸作用,造成温度的波动。

## 2.2 场-区耦合模型模拟结果分析

### 2.2.1 耦合模型建立

在场-区耦合模型中,选取方格1~3为场模型模拟区域,方格4~13为区域模型模拟区域,则方格3、4的边界面为场-区耦合模型模拟的边界,场-区耦合模型见图11。

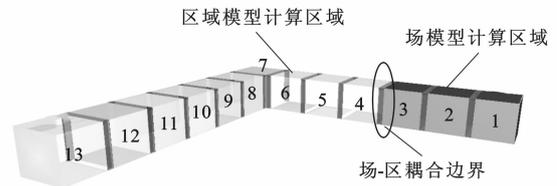


图11 场-区耦合模型

Fig. 11 Field-zone coupling model

在场模型中,经由方格3、4的边界面输出到方格4的热通量曲线见图12。可将方格3输出到方格4的热通量等效为位置在方格3、4边界面上的1个火源,图12为该火源的热通量曲线。通过对方格3、4的边界面输出的边界压力、密度和速度等参数进行等效处理,得到边界面区域模型的等效压力为0.220 Pa。

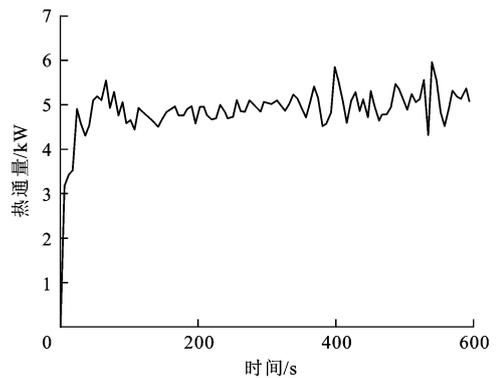


图12 热通量曲线

Fig. 12 Heat flux curve

### 2.2.2 模拟结果分析

在 2000 年,先后在美国和英国召开的“国际火灾安全科学高级论坛”将温度确定为必须通过试验测量获取的重要代表性火灾烟气参数<sup>[27-28]</sup>。燃烧是一种剧烈的化学反应,其过程受温度影响大,因此,对火灾空间烟气的温度场进行测量、模拟和分析,对研究热烟气行为规律有重要意义。本文基于所建立的热通量边界条件、压力边界条件和组分守恒边界条件,进行燃烧过程的数值模拟。图 13~16 分别为测点 1~4 的场-区耦合模拟结果,燃烧模拟工况与试验工况相同。

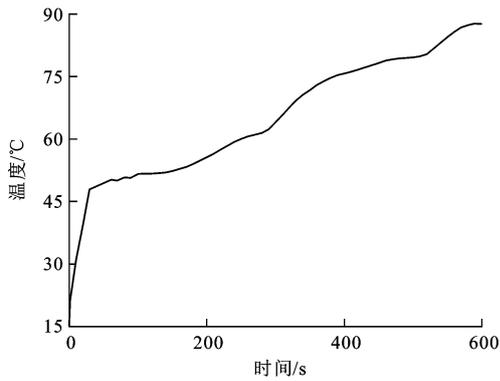


图 13 模拟工况下测点 1 的温度曲线

Fig. 13 Temperature curve at measuring point 1 under simulation condition

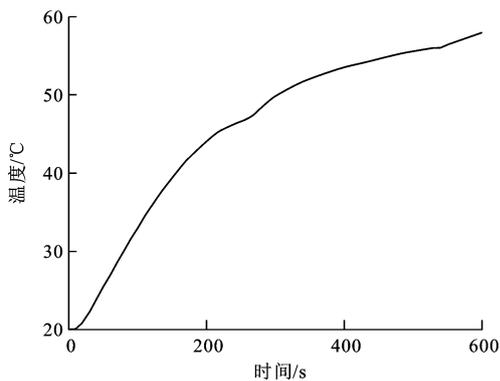


图 14 模拟工况下测点 2 的温度曲线

Fig. 14 Temperature curve at measuring point 2 under simulation condition

由图 13~16 可以看出,场-区耦合模型模拟得出的温度曲线与试验结果有相同的趋势,从开始燃烧到旺盛燃烧阶段,温度上升较快,而后趋于稳定。由于场-区耦合的物理边界为方格 3、4 的边界,相当于在该边界面上存在 1 个等效热源,测点 1 紧邻等效热源,测点 1 的温度模拟计算结果被放大,高于试验测试值(图 13),而导致场-区耦合模型的模拟结果明显偏大,不能反映真实的试验结果。尤其是

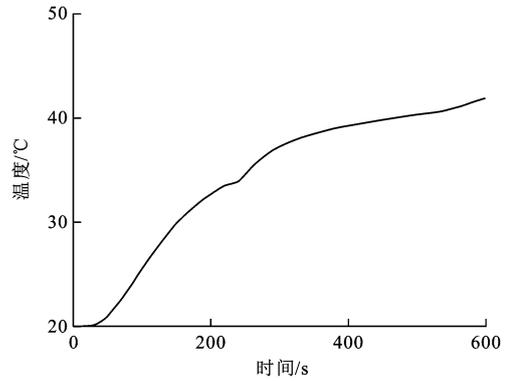


图 15 模拟工况下测点 3 的温度曲线

Fig. 15 Temperature curve at measuring point 3 under simulation condition

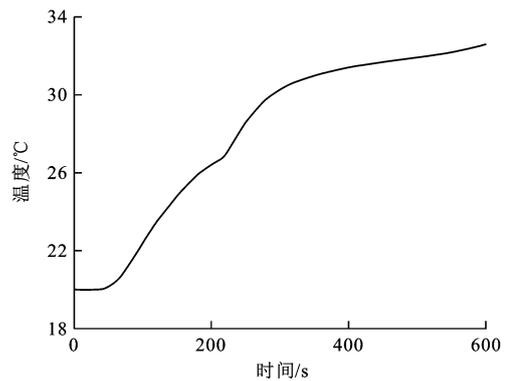


图 16 模拟工况下测点 4 的温度曲线

Fig. 16 Temperature curve at measuring point 4 under simulation condition

在 0~50 s 内,由于等效热源的热辐射和热对流作用,仿真工况下测点 1 的温度上升很快,而后转为稳步上升。测点 2 相对于测点 1 而言,模拟结果和试验结果相对接近,随着与等效热源间的距离的增大(测点 2~4),场-区耦合模型的模拟结果与试验结果较好吻合(图 14~16),且测点 3、4 的模拟结果和试验结果在 300 s 后一致性较高。以上分析表明,场-区耦合模型在距离耦合边界面较远的距离(距边界面距离不低于 1 m)和燃烧趋于稳定 2 个条件下,与试验结果的一致性较好,初步表明场-区耦合模型的数据模拟结果有效,可应用耦合模型对船舶舱室火灾中的温度场的分布进行数值模拟。

## 3 场-区耦合模型数值模拟结果分析

### 3.1 单一模型的构建

在上述工况条件下,分别基于 FDS 软件和 CFAST 软件构建场模型和区域模型模拟物理场景和边界条件,进行相同工况下的场模型模拟和区域模型模拟,并将单一场与区域模型模拟的温度和烟

气层下降高度结果与场-区耦合模拟结果进行对比。图 17 为构建的场模型,表 1 为构建的区域模型的参数设置<sup>[14]</sup>。根据区域模型 CFAST 软件的参数输入特征,表 1 中的房间数量为 13 表示计算空间的 13 个方格,而将相邻 2 个方格间的边界面视为水平通风口,水平通风口数量为 12。

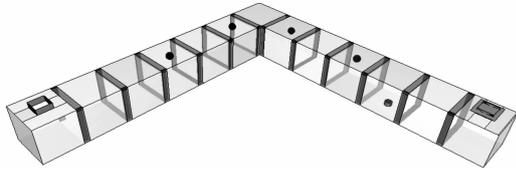


图 17 场模型

Fig17 Field model

表 1 模型参数

Tab.1 Model parameters

分类	变量	参数
环境模块	环境温度/°C	20
	模拟时长/s	600
房间模块	房间数量	13
通风模块	水平通风口数量	12
	竖直通风口数量	1
火源模块	火源材料	煤油
	煤油热值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	45 000
	质量损失速率/(g·s <sup>-1</sup> )	0.368 76
	燃烧效率	0.68
	煤油气化吸热/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	750
	挥发温度/°C	26
	火焰辐射系数	0.33
	火灾发展趋势	稳定火源
	火源功率/kW	11.284
	火焰面积/m <sup>2</sup>	0.031 4
	火焰高度/m	0.415 5

### 3.2 温度场数值模拟结果对比分析

图 18~21 分别为温度测点 1~4 的场与区域单一模型模拟的温度结果与场-区耦合模型模拟结果的对比,从中可以看出,在相同工况下,单一场模型与区域模型模拟结果与场-区耦合模型模拟结果具有相同的变化趋势。

如前文对图 7、13 的分析可知,由于等效热源的存在使场-区耦合模型模拟的温度结果在测点 1 处的 0~50 s 内上升显著。从图 18~21 可以看出,场模型的模拟结果在 200 s 前上升最显著,达到准稳定阶段的时间较短,准稳定阶段温度较高,这是由于在场模型数值模拟中,忽略了各种传热

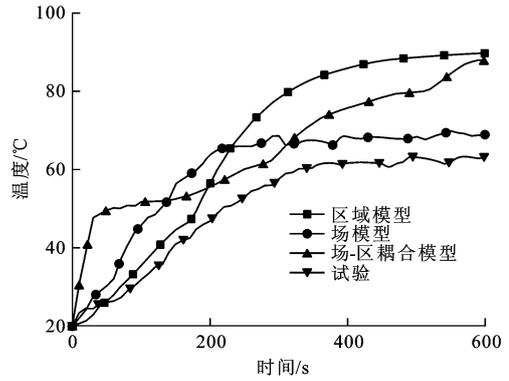


图 18 测点 1 的 4 种温度曲线

Fig.18 Four temperature curves at measuring point 1

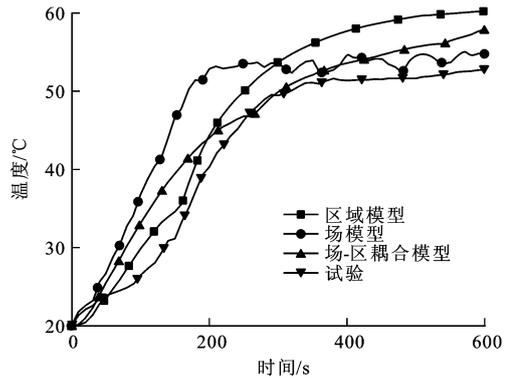


图 19 测点 2 的 4 种温度曲线

Fig.19 Four temperature curves at measuring point 2

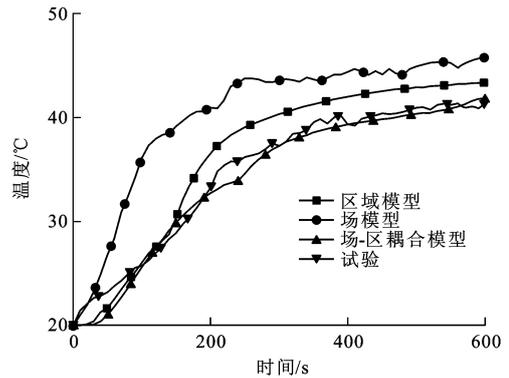


图 20 测点 3 的 4 种温度曲线

Fig.20 Four temperature curves at measuring point 3

影响而导致的。

对比场模型和区域模型的模拟结果,在经历约 200 s 燃烧达到稳定燃烧状态之后,测点 1、2 场模型的温度曲线更贴近试验结果,这是由于场模型把研究区域划分为许多微元控制体,能给出较详细的各种物理量的分布,适用于火灾中的着火舱室及其附近区域。由于火源的存在导致热烟气层温度迅速上升,温度明显偏高,从而导致区域模型模拟严重失真,但测点 3、4 的区域模型模拟的温度曲线更贴近试验结果。可见,场模型在计算火源邻近区域的温

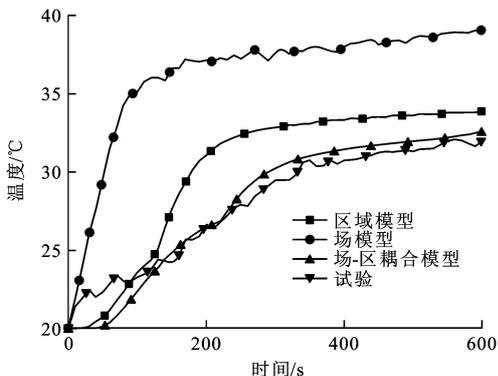


图 21 测点 4 的 4 种温度曲线

Fig. 21 Four temperature curves at measuring point 4

度场时更具优势,而区域模型在计算火源较远区域的温度场时具有优势。

对比场-区耦合模型和单一模型的模拟结果,在经历约 200 s 燃烧达到稳定燃烧状态之后,测点 2 的场-区耦合模型的温度曲线和试验结果开始有较好的贴合,测点 3、4 的场-区耦合模型的温度曲线和试验结果贴合效果更好,均好于场模型和区域模型的模拟结果。这表明场-区耦合模型相对于单一的场模型或区域模型来说,在燃烧稳定后更适合用于计算热烟气的温度场。这是因为在火源邻近区域,场-区耦合模型发挥了场模型的计算优势,在场-区耦合的边界面上为区域模型输出了详细准确的参数,作为区域模型的等效热源输入,进而在距离火源较远区域(测点 3、4),发挥了区域模型的计算优势。

### 3.3 烟气层下降高度数值模拟结果对比分析

图 22~25 分别为单一场模型、区域模型与场-区耦合模型在测点 1~4 位置竖直方向上烟气层下降高度的对比,从中可以看出,3 种模型模拟得到的烟气层下降高度变化规律基本相同。

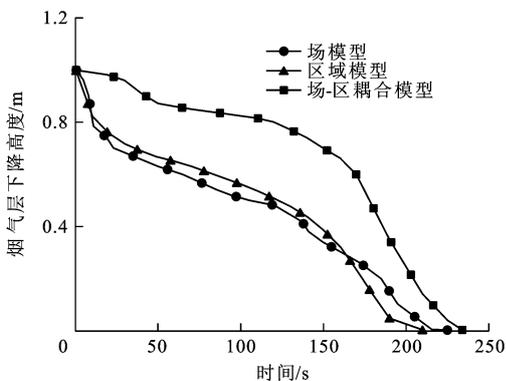


图 22 测点 1 的 3 种下降高度变化曲线

Fig. 22 Three change curves of descent heights at measuring point 1

在燃烧起始阶段的约 30 s 内,烟气依次流经测

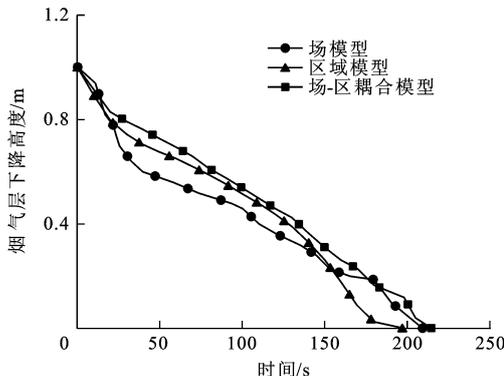


图 23 测点 2 的 3 种下降高度变化曲线

Fig. 23 Three change curves of descent heights at measuring point 2

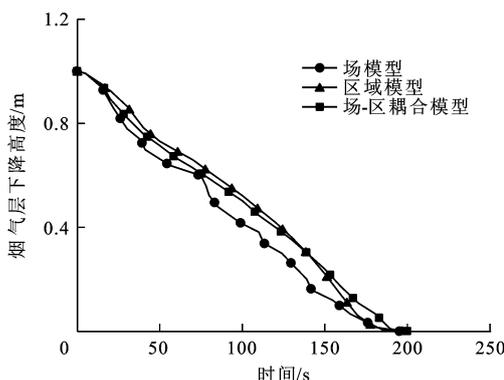


图 24 测点 3 的 3 种下降高度变化曲线

Fig. 24 Three change curves of descent heights at measuring point 3

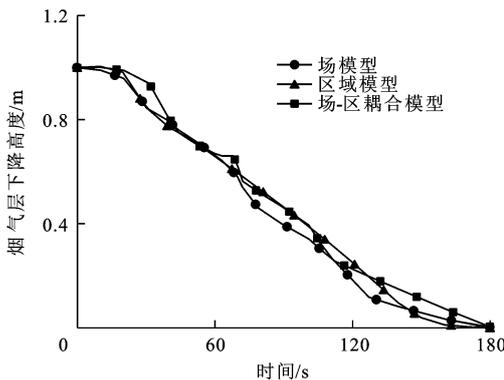


图 25 测点 4 的 3 种下降高度变化曲线

Fig. 25 Three change curves of descent heights at measuring point 4

点 1~4,因此,测点 1 所在的竖直线上的烟气层高度下降最快,测点 4 所在的竖直线上的烟气层高度变化明显滞后,烟气层高度变化不显著,但测点 4 处的烟气最先降到通道底部,约在 180 s 内烟气即沉降到底部,而测点 1~3 烟气沉降到底部用时逐渐减小。在烟气蔓延过程中,通过热对流和热辐射向壁面传热,温度降低,烟气逐渐沉降。由于热烟气首先

充满边缘区域,然后由远及近依次充满空间,致使烟气在通道出风口端下沉回流,更促使测点 4 处的烟气最先沉降到底部。

对于测点 1,场-区耦合模型模拟结果明显偏离场模型与区域模型模拟结果(图 22),这是由于测点 1 在场-区耦合边界区域,等效热源产生的高温导致热烟气急剧膨胀向外扩散,因此,在较长的一段时间内烟气层下降缓慢。当燃烧经历一段时间后,下沉回流的烟气回流到火源附近时被重新加热,然后上升,从而导致烟气层迅速充满整个空间,这与耦合边界处温度场模拟结果的失真(图 13)相一致。

在远离火源的区域(测点 2~4),场、区与耦合模型的结果非常吻合,由此证明在火源及其相邻区域之外,场-区耦合模型能很好地模拟烟气层高度的变化规律,场-区耦合模型的有效性得到进一步验证,运用场-区耦合模型也可以实现对船舶舱室火灾中烟气流场的模拟计算。

在模拟工况条件下,采用火灾场模拟软件构建图 17 中的场模型进行模拟计算所需的计算时间为 8 301 s,而采用图 11 中的场-区耦合模型所需的计算时间为 3 819 s,可见,场-区耦合模型在保证模拟结果的有效性的基础上,将计算时间缩减了约 54%。

## 4 结 语

本文构建了船舶舱室火灾场-区耦合模型,搭建了船舶舱室火灾试验平台,进行了场-区模型的试验验证。研究表明,基于场-区耦合模型的火灾温度场的分布规律和烟气层高度的变化规律与试验结果、单一模型模拟结果一致性较高,且在燃烧稳定后,距离火源较远区域的模拟结果与试验结果吻合,验证了场-区耦合模型用于火灾流场模拟分析的可行性。在运行时间上,场-区耦合模型比单一场模型缩减了约 54%的时间,对较大空间的烟气流动进行场-区耦合模型模拟计算,可在一定程度上既满足工程计算的精度要求,又可节省计算时间,相比于单一计算模型,具有较好的工程应用价值。本文开发的船舶舱室火灾场-区耦合模型可充分发挥场模型与区域模型的技术优势,有效利用计算资源,在空间结构较为复杂的舱室、通道等特殊场所具有较好的应用可能。在下一步的研究工作中,可选取典型的船舶火灾事故案例,进行船舶舱室火灾场-区耦合模拟的应用研究,完善场-区耦合模型的计算功能。

## 参 考 文 献 :

### References :

- [ 1 ] 范 斐. 世界海洋运输格局时空演化[D]. 上海:华东师范大学, 2014.  
FAN Fei. The spatial-temporal evolution of the world marine transportation pattern[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014. (in Chinese)
- [ 2 ] 朱小俊,杨志青,王东涛,等. 船舶火灾研究综述[J]. 消防科学与技术,2008,27(3):159-162.  
ZHU Xiao-jun, YANG Zhi-qing, WANG Dong-tao, et al. The summarization of ship fire research[J]. Fire Science and Technology, 2008, 27(3): 159-162. (in Chinese)
- [ 3 ] PAWLING R, GRANDISON A, LOHRMANN P, et al. Methods and tools for risk-based approach to fire safety in ship design[J]. Ship Technology Research, 2012, 59(3): 38-49.
- [ 4 ] 李 强. 船舶顶部开口舱室火灾烟气特性实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2013.  
LI Qiang. Experimental study on some properties in a ship room with ceiling vent[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
- [ 5 ] WANG Liang, WANG Xian-miao, SU Shi-chuan. Study the smoke characteristics of fire in the ship engine room based on the different speeds of inlet air[J]. Mechanical Design and Power Engineering, 2014, 490-491: 519-523.
- [ 6 ] AHMED M S. Parametric analysis of a cabin fire using a zone fire model[J]. Alexandria Engineering Journal, 2013, 52(4): 627-636.
- [ 7 ] WANG Z, JIA F, GALEA E R. Predicting toxic gas concentrations resulting from enclosure fires using local equivalence ratio concept linked to fire field models[J]. Fire and Materials, 2007, 31(1): 27-51.
- [ 8 ] BAMONTE P, FELICETTI R, GAMBAROVA P G, et al. On the fire scenario in road tunnels; a comparison between zone and field models[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 82: 764-769.
- [ 9 ] SHI Wei, GAO Fu-sheng. Numerical simulation and evaluation of mechanical smoke exhaust in a loop corridor of a high-rise hotel[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2014, 263: 83-91.
- [10] CHRISTAKIS N, CROSS M, PATEL M, et al. A hybrid approach for the modelling of complex systems[J]. Journal of Algorithms and Computational Technology, 2013, 7(2): 113-144.
- [11] BURTON D, GRANDISON A, PATEL M, et al. Development of a hybrid field/zone fire model[C]//International Association for Fire Safety Science. The 10th International IAFSS Symposium. London: IAFSS, 2011: 1373-1386.
- [12] 姚建达,范维澄,佐藤晃由,等. 建筑火灾中场区网数值模型的应用[J]. 中国科学技术大学学报,1997,27(3):304-308.  
YAO Jian-da, FAN Wei-cheng, SATOH K, et al. Applications of FZN model in building fire[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 1997, 27(3): 304-308. (in Chinese)

- Chinese)
- [13] YAO Jian-da, FAN Wei-cheng, SATOH K, et al. Verification and application of field-zone-network model in building fire[J]. Fire Safety Journal, 1999, 33(1): 35-44.
- [14] 杨锐,蒋勇,纪杰,等.建筑火灾中基于大涡模拟的场区复合数值模型及其应用[J].自然科学进展,2003,13(6):637-641.  
YANG Rui, JIANG Yong, JI Jie, et al. Field/zone compound numerical model based on large eddy simulation and its application in building fire[J]. Progress in Natural Science, 2003, 13(6): 637-641. (in Chinese)
- [15] HUA Jin-song, WANG Jian, KUMAR K. Development of a hybrid field and zone model for fire smoke propagation simulation in buildings[J]. Fire Safety Journal, 2005, 40(2): 99-119.
- [16] 任鸿翔,金一丞,尹勇.船舶火灾模拟训练系统研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2010,34(1):19-22.  
REN Hong-xiang, JIN Yi-cheng, YIN Yong. Study on simulation training system of ship fire[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2010, 34(1): 19-22. (in Chinese)
- [17] JIAO Yu, WANG Jin-hui, XIAO Meng-jie, et al. Development of field-zone-net model for fire smoke propagation simulation in ships[C]//IEEE. Proceedings of Seventh IEEE International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. New York: IEEE, 2014: 190-193.
- [18] SU Shi-chuan, WANG Liang. Three dimensional reconstruction of the fire in a ship engine room with multilayer structures[J]. Ocean Engineering, 2013, 70: 201-207.
- [19] 姜冯辉.聚合物燃烧火焰辐射近似模型[J].自然科学进展,1997,7(3):214-221.  
JIANG Feng-hui. Approximate flame radiation model of polymer combustion[J]. Progress in Natural Science, 1997, 7(3): 214-221. (in Chinese)
- [20] 吴小华,李耀庄,易亮.室内火灾区域模拟及火灾各分模型的模化[J].消防科学与技术,2010,29(10):925-929.  
WU Xiao-hua, LI Yao-zhuang, YI Liang. Zone modeling of indoor fire and modeling of fire sub-model[J]. Fire Science and Technology, 2010, 29(10): 925-929. (in Chinese)
- [21] 孙标,郭开华. LNG池火热辐射模型及安全距离影响因素研究[J].中国安全科学学报,2010,20(9):51-55.  
SUN Biao, GUO Kai-hua. Research on the thermal radiation models for LNG pool fire and its influencing factors on safety distance[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(9): 51-55. (in Chinese)
- [22] 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.  
CHEN Bing. Experimental study on pool fire environment in ship room with ceiling vent[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
- [23] 易亮,霍然,张靖岩,等.柴油油池火功率特性[J].燃烧科学与技术,2006,12(2):164-168.  
YI Liang, HUO Ran, ZHANG Jing-yan, et al. Characteristics of heat release of diesel oil pool fire[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2006, 12(2): 164-168. (in Chinese)
- [24] 刘暉亚,徐士良,陆守香,等.舰船火灾模拟舱相似模型分析与设计[J].消防科学与技术,2004,23(5):413-417.  
LIU Xuan-ya, XU Shi-liang, LU Shou-xiang, et al. Analysis and design of similarity model of ship fire simulation cabin[J]. 2004, 23(5): 413-417. (in Chinese)
- [25] 刘暉亚,陆守香,徐士良.船舶机舱水雾灭火相似模型分析与设计[J].热科学与技术,2005,4(4):367-372.  
LIU Xuan-ya, LU Shou-xiang, XU Shi-liang. Similarity model design and analysis of fires in ship machinery cabin[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2005, 4(4): 367-372. (in Chinese)
- [26] 王进军,涂然,曾怡,等.火灾标准燃烧室相似模型试验箱设计及有效性研究[J].安全与环境学报,2011,11(6):181-184.  
WANG Jin-jun, TU Ran, ZENG Yi, et al. Design and validity analysis of the scaling model and the fire detection standard combustion room[J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11(6): 181-184. (in Chinese)
- [27] 师文喜.高层建筑楼梯间及相连空间内烟气流动特性与火行为研究[D].合肥:中国科学技术大学,2014.  
SHI Wen-xi. Study on fire behaviors and smoke movement in staircase and adjacent compartment of high-rise buildings[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [28] 许伟伟,郑江华,余丹林.地铁站火灾人员安全疏散研究综述[J].工业安全与环保,2015,41(1):65-69.  
XU Wei-wei, ZHENG Jiang-hua, YU Dan-lin. Review on study of personnel evacuation in subway station fires[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015, 41(1): 65-69. (in Chinese)