

舰船火灾中烟气沿通道蔓延特征的计算机模拟*

董华 刘忠 张人杰★ 范维澄 麻柏坤★ 成瑛文▲

(中国科学技术大学, 合肥, 230026; ★中国科学技术大学北京研究生院; ▲海司军训部, 北京, 100083)

摘 要

本文采用区域模型对舰船火灾中烟气沿通道蔓延的热物理特征进行了计算机模拟, 并根据区域模型的基本思想, 采用纵向分段的方法, 解决了纵向长通道内烟气蔓延中分层热物理参数不均匀问题, 提高了模拟计算的准确性。模拟结果与模型实验符合较好。

关键词: 舰船火灾 烟气蔓延 计算机模拟 长通道

1. 引言

舰船通道的特点是纵向尺寸较大而横截面较小, 壁面导热系数亦与一般建筑物的走廊有所不同。为保证舰船的水密性, 通道的密封性较好且舱门较小, 舰船结构的这种特点使得舰船发生火灾后, 烟气在狭窄的通道中迅速蔓延, 并以极快的速度充填通道的大部分空间, 阻碍灭火工作的正常进行。烟气的产生和蔓延是造成人员伤亡和火势蔓延的重要因素, 重大舰船火灾中大量人员伤亡和财产损失主要源于火灾过程中产生的高温、有毒烟气。从火灾烟气的产生入手, 对烟气的结构及运动规律进行逐步深入的研究, 将能够为舰船的防火安全设计提供理论基础。同时, 这种研究的结果作为舰船火灾双重性规律的一个重要组成部分——舰船火灾的确定性, 构成舰船火灾危险性评估的重要一环。

本文针对舰船初起火灾的特性, 采用低功率火源以描述火灾的初起状态, 对由单舱可燃物燃烧产生, 并沿水平通道蔓延的烟气进行热物理场的模拟计算, 对烟气层的结构及烟气水平蔓延的运动规律进行研究。

2. 烟气沿通道蔓延的区域模型

区域模拟已在火灾科学领域内获得广泛应用。采用区域模拟研究烟气沿通道蔓延的基本现象, 主要是基于这种考虑: 通道远离火源, 其间的热烟气运动具有较为明显的分区现象, 符合区域模拟的基本假设。

为使问题的分析研究更具有代表性, 现就如下研究对象进行分析:

1. 单舱起火, 火源的典型位置有三个: 舱室中央, 舱室侧壁和舱室拐角;

• 海军科研基金资助项目

2. 为便于与实验结果对比, 设定火源功率分段恒定;
3. 起火舱除舱口外的进排风系统全部关闭;
4. 烟气蔓延的路线为由起火间经舱口进入通道, 然后由通道出口排至舷外;

为使各有关区域边界和初始条件与实验更为接近, 将通道截为五段, 即成为五个相对独立的单元, 如图 1 所示。各单元之间的联结面之面积与通道面积相等。各单元内的空间分为两个控制容积即包含热烟气的上层和包含冷空气的下层, 各层内部气体的质量、密度、温度及容积满足如下基本关系

$$\rho_i = \frac{M_i}{V_i} (\text{密度}) \quad (1) \quad E_i = C_v M_i T_i (\text{内能}) \quad (2)$$

$$P = R \rho_i T_i (\text{理想气体}) \quad (3) \quad V = V_L + V_U (\text{总容积}) \quad (4)$$

其中: $i=l$ 为底层冷空气; $i=u$ 为上层热烟气。

上述方程组中的 7 个关系式中包含 11 个独立变量, 为求得定解从下述方程中选取式 (7)、(8*)、(11) 构成封闭方程组。

设各层气体的质量变化率为:

$$\frac{dM_L}{dt} = \dot{M}_L \quad \frac{dM_U}{dt} = \dot{M}_U \quad (5)$$

根据热力学第一定律: 内能的增加与气体膨胀所作的功等于气体焓的增加, 其微分表达式为:

$$\frac{dE_i}{dt} + \frac{dV_i}{dt} p = \dot{h}_i \quad (6)$$

由于 $\frac{dV_U}{dt} = -\frac{dV_L}{dt}$, 则压力的微分方程为:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} (\dot{h}_l + \dot{h}_u) \quad (7)$$

各层容积、内能、度及温度的微分方程依次为:

$$\frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{\gamma p} [(\gamma - 1) \dot{h}_i - V_i \frac{dp}{dt}] \quad (8)$$

$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{1}{\gamma} (\dot{h}_i + V_i \frac{dp}{dt}) \quad (9)$$

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \frac{1}{C_p \rho_i V_i} [(\dot{h}_i - C_p \dot{M}_i T_i) - \frac{V_i}{\gamma - 1} \cdot \frac{dp}{dt}] \quad (10)$$

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{C_p \rho_i V_i} [(\dot{h}_i - C_p \dot{M}_i T_i) - V_i \frac{dp}{dt}] \quad (11)$$

通道烟气蔓延的区域模拟尚需在上述方程的基础上解决源项问题, 源项问题的解决主要考虑火源、羽流、顶棚射流、侧壁的反浮力射流、区域之间及区域与壁面的质量和热交换, 从而构造出通道内热烟气层状态及蔓延问题的定解。

火源的处理: 由于单舱多处同时起火的可能性极小, 故只考虑一处起火的问题。在舱门敞开的情况下, 实际的燃烧过程是燃料的非完全燃烧, 若

$$X_A = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_A}, \quad X_r = \frac{\dot{Q}_r}{\dot{Q}_A} \quad \text{则有: } \dot{Q}_A = X_A H_c M_b$$

• 采用式 (8) 中 $i = u$ 的关系式

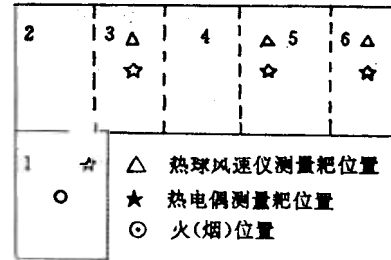


图 1 通道烟气蔓延模拟分段平面图

当自然对流所提供的氧气使得燃料在火羽流区内完成燃烧过程, 则正常的释热速率为:

$$\dot{Q} = H_c M_b$$

考虑甲烷火 $X_r \approx 1$, 作为初步近似, 有: $\dot{Q}_A \approx \dot{Q} - H_c M_b$, 该热量的一部分以辐射的方式, 向周围传递 $\dot{Q}_r = X_r \dot{Q}$. 根据甲烷火的辐射率, 取 $X_r = 0.15$, 其余的热量以浮力羽流的方式传递到舱室的上层 (忽略燃烧器底部的热传导), 则: $\dot{Q}_c = (1 - X_r) \dot{Q}$

从火焰到顶棚卷吸质量流量的估算: McCaffreyh 和 Cetegen 等人曾进行过大量的实验研究, 得出如下关系:

$$\begin{aligned} M_s &= 0.011 \dot{Q} \left(\frac{Z}{\dot{Q}^{\frac{1}{3}}} \right)^{0.566} & 0.00 \leq \left(\frac{Z}{\dot{Q}^{\frac{1}{3}}} \right) < 0.08 \\ M_s &= 0.026 \dot{Q} \left(\frac{Z}{\dot{Q}^{\frac{1}{3}}} \right)^{0.909} & 0.08 \leq \left(\frac{Z}{\dot{Q}^{\frac{1}{3}}} \right) < 0.20 \\ M_s &= 0.124 \dot{Q} \left(\frac{Z}{\dot{Q}^{\frac{1}{3}}} \right)^{1.895} & 0.20 \leq \left(\frac{Z}{\dot{Q}^{\frac{1}{3}}} \right) \end{aligned}$$

其中 Z 是离开火焰底部的高度。

起火舱的处理基本上可以分为三个区域: 即火焰羽流区、上部热烟气层和下部冷空气层。通道分割及各级之间的联系描述如下: 火焰羽流在上升的过程中卷吸大量冷空气, 到达舱顶后沿顶棚扩散并在侧壁形成反浮力射流, 堆积在顶棚上方。堆积的过程实际上是区域动量和压差的积累, 在这种积累的一定时刻, 烟气从舱门的上方以羽流的方式扩散到毗邻通道, 通道各段间的传递以通道流的方式进行。

通道流的速率可根据下述公式计算

$$V = C \left(\frac{2\delta_p}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

其中 V 是质量流速; C 是流动系数; δ_p 是通过界面的压力; ρ 是源侧的气体密度。

通道流的质量流量为:

$$M = \int_w \int_A \rho V dz dW$$

该质量流量所携带的焓值在运动过程中以辐射、对流和传导的方式向边界扩散, 辐射部分采用双墙模型进行计算; 热传导满足傅里叶定律; 对流部分的控制方程为:

$$\dot{Q}_c = h_c (T_g - T_w) A_w$$

假定为自然对流, 则系数 h_c 可写为:

$$\begin{aligned} h_c &= \frac{k}{l} C_0 (G_r P_r)^{\frac{1}{4}} \\ G_r &= \frac{g l^3 |T_g - T_w|}{\nu^2 T_g} \\ k &= 2.72 \times 10^{-4} \left(\frac{|T_g + T_w|}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \nu &= 7.18 \times 10^{-10} \left(\frac{|T_g + T_w|}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

其中 T_g 和 T_w 为对应于气体和壁面的温度; A_w 为区域接触面积; G_r 为葛拉晓夫数; P_r 为普朗特数 (0.72); l 为特征长度 $\approx (A_w)^{\frac{1}{2}}$; C_0 为方向系数, 其取值如下:

方向:	垂向	($T_g > T_w$)	水平	($T_g < T_w$)
C_0	0.130	0.210	0.012	

3. 计算结果及分析

模拟计算主要的初始及边界条件为:

环境温度: 室内 286K; 室外: 284K; 相对湿度: 71%; 风速: 0; 大气压力: 101300Pa;

假定 0 时刻起火火焰功率恒定为 2.1kW, 1800 秒时火源消失, 模拟计算的热烟气层温度和厚度(b)随时间变化的关系如图 2 所示: (这里仅给出具有代表意义的通道第 2、4、6 段的计算结果)

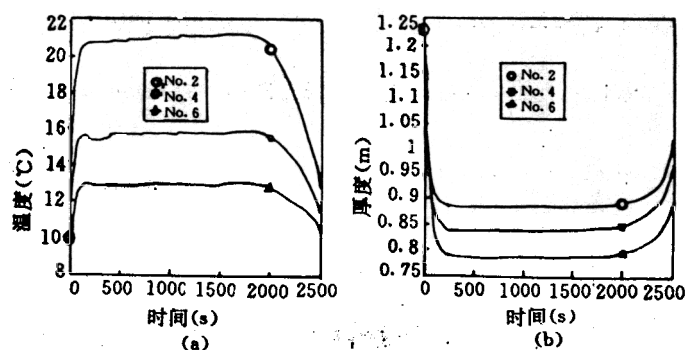


图 2 烟气沿通道蔓延模拟计算的部分结果

在单室结构及外界条件确定的前提下, 显然热烟气从门口上方向临近区域的蔓延主要取决于燃烧功率, 在供氧量保持一定的前提下, 燃料供应愈多, 燃烧愈不完全, 烟气浓度愈大, 顶棚热烟气层厚度的增长愈快, 因而也导致热烟气从门口向外蔓延速率的加大和时间的提前。模拟计算和实验都表明: 热烟气在通道的蔓延速率极快, 可在极短的时间内进入准稳态。这意味着舰船初起火灾的限制和消除是舰船火灾防治的关键, 在火灾初起阶段将其扑灭是抑制火灾损失和降低火灾防治代价的主要环节。

通道内热烟气层的稳定厚度主要取决于火源功率、通道的几何尺寸及通道门框上方高度, 火源位置对其有重要影响。燃烧释放的能量使烟气层的温度高于周围环境温度, 烟气流动主要受到浮力的影响, 烟气层内部的密度梯度与压力梯度的方向不同, 使得流场中不断形成大尺度涡团, 这种湍浮力流在流动过程中对环境空气有着强烈的卷吸作用; 火源位置的变化, 改变了羽流上升时的卷吸空间, 因而会导致烟气层厚度的变化。另一个重要的现象是热烟气向远离火源的方向蔓延时, 其厚度不断增加。这与非受限空间内烟气的蔓延一样, 缘于热烟气在运动过程中对冷空气的卷吸。

热烟气层在沿通道向前推移的过程中, 由于冷空气的掺混及与壁面的热交换, 温度有较大下降, 因而在对通道进行模拟时应将其适当分段, 可以确保计算的准确性。

本文所作模拟计算与在中国科技大学火灾科学国家重点实验室模型实验楼内完成的模型实验进行了对比。模型实验采用低功率火源模拟火灾初起时的燃烧特性。实验时, 将火源设置在模型通道尽端的一个舱室内。模拟火源所产生的烟气从燃烧舱通过舱门进入通道。然后贯穿通道从出口排入大气, 在相同的结构尺寸初始条件及边界条件下, 实验测量如图 1 所示。结果表明, 两者符合较好。说明区域模拟方法在结构进行合理划分的前提下可以在大空间烟气蔓延及扩散的研究中予以应用。

参 考 文 献

- [1] McCaffrey, B. J., Momentum Implications for Buoyant Diffusion Flames, *Combustion and Flame* 52, 1983, P. 149
- [2] Cetegen, B. M., Entrainment and Flame Geometry of Fire Plumes, Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena 1982
- [3] 范维澄, 流体流动、传热传质和燃烧过程的计算机模拟, 安徽科学技术出版社, 1990
- [4] 袁理明, 霍然, 走廊中烟气传播速度的测量与计算, 全国高等学校工程热物理第四届学术会议论文集, P427—430, 1992
- [5] Partankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Mc Graw Hill Book Company, New York, 1980
- [6] Walter W. Jones & Glenn P. Forney, Improvement in Predicting Smoke movement in Compartmented Structures, *Fire Safety Journal* 21 (1993) 267—279

A Computer Simulation of Smoke Spread along a Long-Distance Corridor in Marine Fires

Dong Hua Liu Zhong Zhang Ren Jie[★] Fan Wei Cheng
Ma Bokun[★] Cheng Ying Wen[▲]

(University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, 230026)

(★ Beijing graduate school of USTC 100039)

(▲ Naval Headquarters of China Beijing 100083)

ABSTRACT

A computer simulation was performed for smoke spread along a corridor in marine fires on the basis of Zone modeling, in which the long-distance corridor was lengthwise divided into several sections, the problem of lengthwise distributed nonuniformity of thermophysical parameters of smoke was resolved, and the accuracy of prediction was improved. The comparison with reduced-scale experiments has been found to be satisfactory.

Key words: Marine Fire Smoke Spread Computer Simulation Long-distance Corridor