

横纵向尺度对圆柱形密闭空间火烟流影响分析

王磊, 浦金云

海军工程大学船舶与动力学院, 武汉 430033

摘要 分析了圆柱形密闭空间内火驱动烟气流动的几何特征。由于顶蓬的拱形形状限制, 烟流既沿着顶蓬倾斜向下运动, 还将向火区中心水平流动, 使得火区上方的烟气沉降速度要较两侧明显加快。采用大涡模拟和混合分数方法, 对圆形横截面密闭空间火灾进行数值分析, 计算结果验证了圆柱形密闭空间内烟流的几何预测。通过对横向尺寸为 6.4m, 纵向尺度分别为 6m、9m、12m 的圆柱形空间火灾烟气温度分布比较, 表明随着纵向尺度的增加, 受限空间内顶蓬下 2cm 和顶蓬下 $D/4$ 处温度值显著下降, 且延迟了顶蓬处达到温度最大值的时间。通过对纵向尺度为 12m, 横向尺度分别为 3.2m、6.4m、9.2m 的圆柱形空间温度分布比较, 表明随着横向尺度的增加, 顶棚下 2cm 和顶蓬下 $D/4$ 处温度温度同样明显下降, 并当横截面尺度为 3.2m 时, 使得受限空间内氧气含量不足, 约 160s 时火源停止了燃烧。横截面尺度的缩小将限制火源的持续燃烧, 使火源热释放速率迅速下降, 显著降低火场的危害性。

关键词 火烟流; 圆柱形空间; 横纵向尺度; 场模拟

中图分类号 TU834

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)05-0045-04

Effect of Cylindrical Confined Space Size on Fire Induced Smoke Flow

WANG Lei, PU Jinyun

Architecture and Power Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract This paper discusses the geometry characteristics of the fire-induced smoke flow in cylindrical confined spaces. Due to the confined nature of the vaulted ceiling, the smoke moves down along the wall and close to the fire source, with a sedimentation rate greater in upper side of the fire source than that around the fire. LES and mixture fraction numerical methods are used to simulate the smoke movement in cross sectional confined spaces. The results well validate the forecast of the flow course. Smoke temperature distributions with transverse size of 6.4m and longitudinal size of 6m, 9m, and 12m are compared. The results show that as the longitudinal size increases, the temperature at places under 2cm and $D/4$ of the top in the spaces is obviously reduced, meanwhile, the temperature at the top delays its time to reach the maximum value. The smoke temperature distributions in cylindrical spaces with longitudinal size of 12m and transverse size of 3.2m, 6.4m and 9.2m are compared. The results show that as the transverse size increases, the temperature at places under 2cm and $D/4$ of the top in the space is also obviously reduced. When the transverse size decreases to 3.2m, the oxygen concentration is too low to sustain the fire source combustion, about 160s later, the combustion stops. The reduction of the transverse size will restrict the combustion of the fire source, and quickly reduce the heat release rate, then reduce the fire danger.

Keywords fire-induced smoke flow; cylindrical space; horizontal and vertical scales; numerical simulation

随火灾确定性研究领域的不断扩展, 公路隧道、铁路隧道、舰艇舱室等非规则受限空间内火烟流的特性逐渐引起重视^[1-3]。区域模拟方法中常见的 Zukoski、McCaffery 和 Thomas-Hinkley 等烟流模型的适用条件为矩形空间或类矩形空间^[6],

而对隧道、舰艇舱室等圆柱形受限空间的场模拟研究大都对研究对象作了近似的矩形认同, 或缺乏深入的研究。本研究利用大涡模拟和混合分数模型的方法, 对圆柱形密闭空间的火灾烟气流动特性、横截面和纵向尺寸变化对火灾烟气流场

收稿日期: 2009-11-05

作者简介: 王磊, 博士研究生, 研究方向为舰艇消防工程与技术, 电子信箱: sunshinewl@live.cn; 浦金云 (通信作者), 教授, 研究方向为舰艇生命力, 电子信箱: qjx205@live.cn

的热参数分布影响进行分析。

1 圆柱形受限空间烟流几何预测

火灾过程中,燃烧产生的热烟气由浮力驱动从火焰区直接上升形成羽流。在矩形受限空间内,顶篷限制烟气流动方向,形成沿顶篷下表面水平流动的顶棚射流,当积累到一定厚度后继续垂直沉降运动^[7]。在圆柱形受限空间内,由于顶篷的不规则形状限制,烟流既沿着顶篷倾斜向下运动,还向火区中心水平流动,使得火区上方的烟气沉降速度较火区周围附近明显加快。矩形和圆柱形密闭空间烟流剖面如图 1 所示,其中水平箭头表示烟气流动对新鲜空气的卷吸运动,垂直箭头表示烟气层或新鲜空气前锋的下降过程。

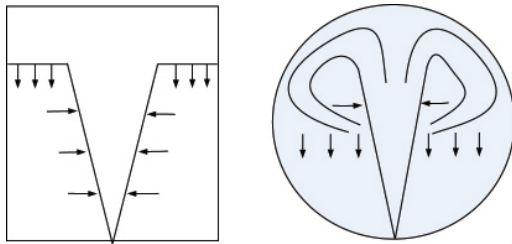


图 1 矩形和圆柱形受限空间烟流示意

Fig. 1 Schematics diagram of the smoke flow with space confinement in transverse and longitudinal directions

2 大涡模拟与混合分数模型

采用基于 Smagorinsky 假设条件的大涡模型^[8]。黏性力张量 τ 为

$$\tau = \mu [2 \text{defu} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) I]$$

其中,

$$\text{defu} = \frac{1}{2} [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}$$

由于在大涡模拟中网格划分不够良好,无法捕捉到相关尺度内的混合过程,采用亚格子模型,对黏性系数 μ 的模化为

$$\mu = \rho (c_s \Delta)^2 [2 (\text{defu}) \cdot (\text{defu}) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u})^2]$$

式中, c_s 为经验系数, Δ 为网格特征尺度。

燃烧模型采用混合分数模型,定义混合分数为

$$Z = \frac{s Y_F - (Y_O - Y_O^0)}{s Y_F^0 + Y_O^0} \quad s = \frac{v_O M_O}{v_F M_F}$$

式中, Y_F 为燃料质量分数, Y_F^0 为燃料源处质量分数, Y_O 为氧气的质量分数, Y_O^0 为初始环境中氧气的质量分数, M_O 和 M_F 分别

为氧气和燃料的相对分子质量, v_O 和 v_F 分别为氧气和燃烧化学反映的计量系数。

3 火灾场景设置与初始条件

场景空间布置如图 2 所示,沿纵向长度均匀布置 1#~9# 热电偶,顶篷下 0.2m 处布置 10# 热电偶。

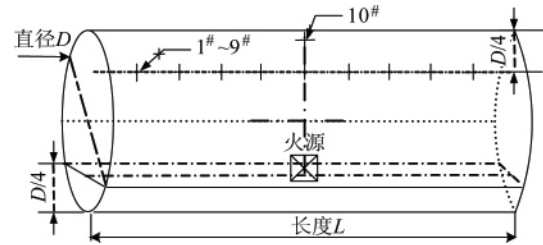


图 2 火灾场景空间布置

Fig. 2 Experiment setup of the fire scene

初始状态下,密闭空间内温度为 20℃,无空气流动。火源使用柴油,柴油的燃烧热为 41MJ·kg⁻¹,密度为 940kg·m⁻³,渐进燃烧速率为 35/17.5g·m⁻²·s⁻¹,燃烧效率为 0.9,对流传热系数为 0.6,辐射传热系数为 0.3,有效吸收系数为 1.7m⁻¹。火源功率由油盘尺寸来控制,位于高 D/4 的平面中心。

为了得到圆柱形受限空间尺寸对烟流的影响,设置仿真实验空间尺寸和网格划分的具体参数如表 1。

表 1 火灾场景设置

Table 1 Fire scene setting

序号	横截面直径/m	纵向长度/m	油盘尺寸	网格划分
1	6.4	6	1m×2m	36×30×36
2	6.4	9	1m×2m	36×45×36
3	6.4	12	1m×2m	36×60×36
4	3.2	12	1m×1m	20×40×20
5	6.4	12	1m×1m	36×60×36
6	9.2	12	1m×1m	50×40×50

4 圆柱形受限空间实例分析

4.1 烟气流动空间分布分析验证

以场景 6 的设置为例。计算表明,受限空间的最高温度和速度出现在顶篷以下横截面直径的 1% 处,这对于火灾探测器和喷水喷淋头的安装位置有特殊意义。当 $t=20s$ 时,顶篷下温度明显高于周边空气环境的温度(图 3)。同时,由 w 方向的速度等值线可知(图 4),烟气层与新鲜空气前锋的边界在垂直方向上的速度接近于 0,此时烟气层趋于稳定。

当 $t=6.7s$ 时,烟气流由于受顶篷作用,中轴线处烟气沉降速度明显大于轴线附近的烟流。当 $t=22.6s$ 时,烟气流在水平和垂直方向扩散开来,形成较为稳定的烟气层,此后将稳定垂直

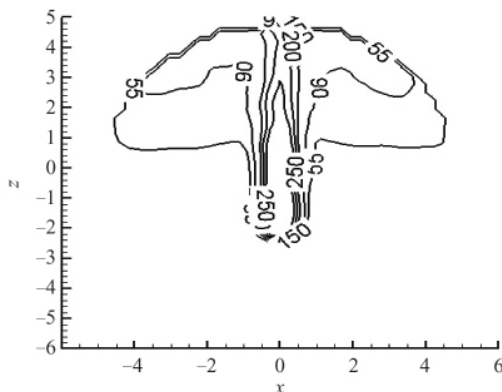
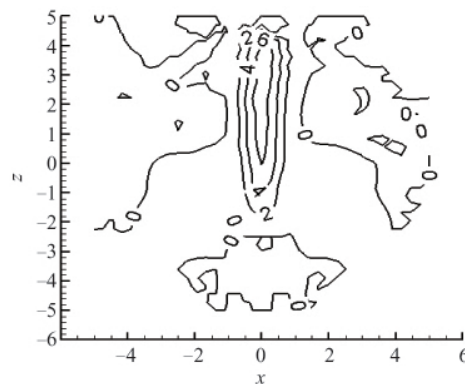


图3 $t=20s, y=0$ 截面温度等值线
Fig. 3 Temperature at $t=20s, y=0$



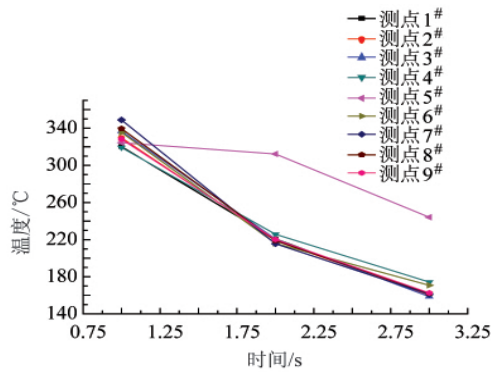

 图9 1#~9# 测点最高温度值随 D 的变化

Fig. 9 Temperature variation at 1#~9# in tests 4~6

5 结论

- 1) 圆柱形密闭空间的几何形状影响火区上方的烟气沉降速度,当顶蓬为拱形时,火区上方烟气沉降速度较两侧要快。
- 2) 纵向和横向尺度的增加使得密闭空间内顶蓬下 2cm 和 $D/4$ 处温度值显著下降,并延迟顶蓬处的温度极大值出现的时间。
- 3) 密闭空间横截面缩小到特定尺寸时有可能限制火源的持续燃烧,使火源热释放速率迅速下降,显著降低火场的危害性。

参考文献 (References)

[1] Hu L H, Huo R, Peng W, et al. On the maximum smoke temperature under

the ceiling in tunnel fires [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, 21: 650-655.

[2] 李元洲, 霍然, 易亮, 等. 隧道火灾烟气发展的模拟计算研究 [J]. *中国工程科学*, 2004, 6(2): 67-72.

Li Yuanzhou, Huo Ran, Yi Liang, et al. *Engineering Science*, 2004, 6(2): 67-72.

[3] 李博, 姜蓬. 隧道火灾中火羽流特性的数值模拟 [J]. *消防科学与技术*, 2007, 26(6): 599-602.

Li Bo, Jiang Peng. *Fire Science and Technology*, 2007, 26(6): 599-602.

[4] 谢宁, 冯炼, 王婉娈, 等. 隧道火灾三维数值模拟的瞬态分析 [J]. *中国铁道科学*, 2005, 26(6): 89-92.

Xie Ning, Feng Lian, Wang Wandu, et al. *China Railway Science*, 2005, 26(6): 89-92.

[5] 陈建忠, 涂耘. 控制纵向通风隧道火灾烟流的模型 [J]. *公路隧道*, 2007(4): 68-71.

Chen Jianzhong, Tu Yun. *Road Tunnel*, 2007, 60(4): 68-71.

[6] 程远平, 陈亮, 张孟君. 火灾过程中羽流模型及其评价 [J]. *火灾科学*, 2002, 11(3): 132-136.

Cheng Yuanping, Chen Liang, Zhang Mengjun. *Fire Safety Science*, 2002, 11(3): 132-136.

[7] Kaye N B, Hunt G R. Smoke filling time for a room due to a small fire: The effect of ceiling height to floor width aspect ratio [J]. *Fire Safety Journal*, 2007, 42: 329-339.

[8] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

Tao Wenquan. *Numerical heat transfer* [M]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 2001.

(责任编辑 陈广仁)

第五届国际先进光学制造 与检测学术会议 AOMATT CHINA 2010

时间: 2010年4月26-29日

地点: 辽宁·大连

主办单位: 中国光学学会 (COS) 中国科学院光电技术研究所 (IOE)

协办单位: 国家科学技术部 中国科学院等

承办单位: 中国光学学会光学制造技术专委会

联系电话: 028-85100583 电子信箱: yangli@ioe.ac.cn

通信地址: 四川成都双流350信箱(610209)

会议网站: <http://159.226.167.88/aomatt2010/english/index.htm>