

体育场馆火灾烟气运动数值模拟中发现的 2 个典型现象

陈建国 陈海昕 符松

(清华大学航天航空学院工程力学系, 北京 100084. E-mail: cjg00@mails.tsinghua.edu.cn)

摘要 通过求解流体 Navier-Stokes 方程对一综合体育馆火灾场景进行了数值模拟. 模拟湍流采用 Smagorinsky 大涡模拟方法, 模拟燃烧采用混合比例燃烧模型, 对火灾工况下的流体流动做了低马赫数假设. 通过对数值计算结果揭示的流场速度、温度、组分浓度等物理量的分析, 发现在火灾发生后, 利用自然通风或机械通风排烟过程中, 存在门效应和烟气堵塞两种不利于烟气控制的重要现象. 在这两种效应的作用下, 不合理的通风口位置, 甚至机械通风的引入都可能导致排烟效果的恶化. 分析了两种效应的产生原因和作用机理, 最后对消除这两种现象提出了参考性体育场馆火灾通风设计.

关键词 门效应 烟气堵塞 数值模拟 自然通风 机械通风

类似大会堂、展览馆、影剧院、体育馆之类的大空间建筑, 受到人们的普遍欢迎, 已成为新型建筑的重要设计方向之一. 其内部空间面积可达几千至几万平方米, 高度达 10~30 m^[1].

由于建筑结构的特殊性和使用功能的具体需要, 大空间建筑难以进行防火防烟分隔. 火灾烟气作为燃烧产物与卷吸空气的混合物, 在大空间中可不受阻碍地四处蔓延, 对建筑内的各区域造成严重影响. 火灾发生时烟气在大空间中的输运、迁移规律以及对烟气的有效控制成为大空间建筑防火设计的关键问题.

近几十年来, 随着计算机科学和数值计算方法的发展, 人们开始建立描述火灾过程的数学模型, 并运用计算机进行求解. Cox和Kumar^[2]利用NS方程结合两方程湍流模型和简单的辐射模型计算了火灾中机械通风问题, 得到火灾环境中的温度、速度、压力和关键化学组分的空间分布及其随时间的变化. McGrattan等人^[3-5]采用数值方法求解一组描述热驱动的低速流动的NS方程, 对湍流效应采用Smagorinsky模型^[6]进行大涡模拟, 燃烧采用flamelet模型, 计算结果与实验对比的误差均在10%以内, 已能较好满足火灾的预测. 目前的很多通用计算软件, 如Fluent, CFX, StarCD等, 利用其解决燃烧问题的模块, 也可以模拟小型火灾, 而在处理大空间火灾时, 尤其是与单纯燃烧有所不同的烟气输运问题时, 则并不适合.

1 计算方法

对普通火灾工况, 考虑热驱动的理想气体, 流动

可以作低马赫数假设^[3], 或微可压缩假设, 其控制方程为:

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0; \quad (1)$$

组分方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_l) + \nabla \cdot \rho Y_l \mathbf{u} = \nabla \cdot (\rho D)_l \nabla Y_l + W_l''; \quad (2)$$

动量方程:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}; \quad (3)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} - \frac{Dp_0}{Dt} = \dot{q}''' + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_l h_l (\rho D)_l \nabla Y_l; \quad (4)$$

状态方程:

$$p_0 = \rho RT \sum_l Y_l / M_l. \quad (5)$$

这里 ρ 为密度, \mathbf{u} 为速度矢量, Y_l 和 D_l 为第 l 种组分气体的质量百分比和扩散系数, p 为压力, $\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$ 为黏性应力张量, \mathbf{g} 为重力加速度, h 为焓, T 为气体温度, k 为热传导系数, t 为时间, \dot{q}''' 单位体积释热率, R 为气体常数.

黏性应力张量的分量为

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right). \quad (6)$$

现有计算能力允许的网格分辨率尚不能描述所有尺度的湍流混合过程,因此本研究对湍流效应采用大涡模拟(LES),对尺度小于网格分辨率的湍流效应通过亚格子尺度模型来模拟. Smagorinsky模型^[6]中

$$\mu_{LES} = C_s^2 \rho \Delta^2 |S|. \quad (7)$$

这里 C_s 为模型参数, Δ 为滤波长度尺度, $|S|$ 为变形率张量的模.

热传导系数和热扩散系数用湍流黏性系数为

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} c_p}{Pr}, \quad (\rho D)_{LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc}.$$

湍流普朗特数 Pr 和施密特数 Sc 在特定工况下为常数.

燃烧模型采用混合比例模型^[3]. 该模型中,仅对混合比例这一量建立模型并求解,其他所有反应物与生成物与这一量有一一对应关系.

上述控制方程的求解空间离散使用二阶精度的中心差分,时间方向利用显式二阶精度预测-校正格式. 壁面假设为绝热边界.

2 计算结果与讨论

图 1 中的清华大学综合体育馆建于 2001 年,能同时容纳 5000 名左右的观众. 其顶盖为拱形,俯视图呈椭圆形. 长、宽、高 3 个方向的最大尺寸为 82.5、64 和 29 m. 第 1 层各入口均为自动门,场馆运行或休息状态下均关闭,第 2 层为观众入口,分别从东南西北 4 个入口进入门厅,再通过各自门厅的 2 个内置门进入观众席. 体育馆的设计考虑了火灾发生时烟气的排放控制,顶棚中央可以打开,另外顶棚中央安装了 8 个风机,体育馆使用时用来交换空气,使馆内空气流通,火灾时则可以用来排放烟气,达到控制烟气的

目的. 目前大多数体育馆设计与此馆相似,因此对清华大学综合体育馆的火灾烟气输运研究较具典型性.

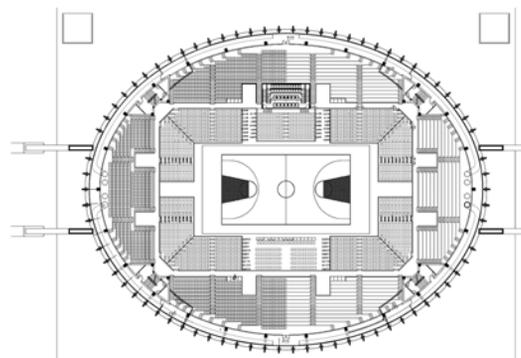
在进行清华体育馆模拟前,通过对有实验结果的大空间建筑火灾的数值模拟,充分验证了本研究的物理模型和数值方法能用来准确进行火灾发生时流场、温度场和组分场的预测^[7].

本研究计算了清华体育馆的不同工况下的火灾烟气输运情况,其中 2 个工况及其相互之间的对比使我们发现了 2 种对烟气输运有重要影响的现象. 第 1 种工况为自然排烟情况,即打开顶棚中央的 2 m × 2 m 的方形开口;第 2 种工况为机械排烟,风机速率为 10.0 m/s. 两种工况下模型火源均布置在馆内中央,假定为 4 m × 4 m 的油池燃烧,单位面积释热率为 1.0 MW/m²,总释热率为 16.0 MW. 本研究中 2 个工况的物理计算时间均为 600 s,100 s 以后,流动达到准定常状态,烟气层高度已无明显变化.

() 工况一:自然排烟. 图 2(a)为自然通风下 180 s 时的温度等值线分布,(b)为烟气体积百分比浓度分布. 可以看出,在自然通风状态下,热烟气大部分被通风口带出,观众席位置温度为 30 左右,自然通风对降低馆内温度有很好的效果. 图 3 为自然排烟下中截面 180 s 时的速度矢量图分布,从中截面的流场矢量图结果可以发现火灾时场馆内流场十分不规则,因为火灾发生时,由于烟气的排出,位于第 2 层的观众席入口为补充新鲜空气的进口. 补充空气形成的气流对上升的烟气羽流及整个流场有极大的湍流扰动作用,称这种效应为门效应. 从图 2(b)的烟气体积百分比等值线分布中可以发现,在补充空气流的冲击下,烟气羽流发生水平方向的摆动,并有部分烟气沿地面水平蔓延,门效应使得烟气并不能通过



(a)



(b)

图 1 清华大学体育馆的全景图(a)和俯视图(b)

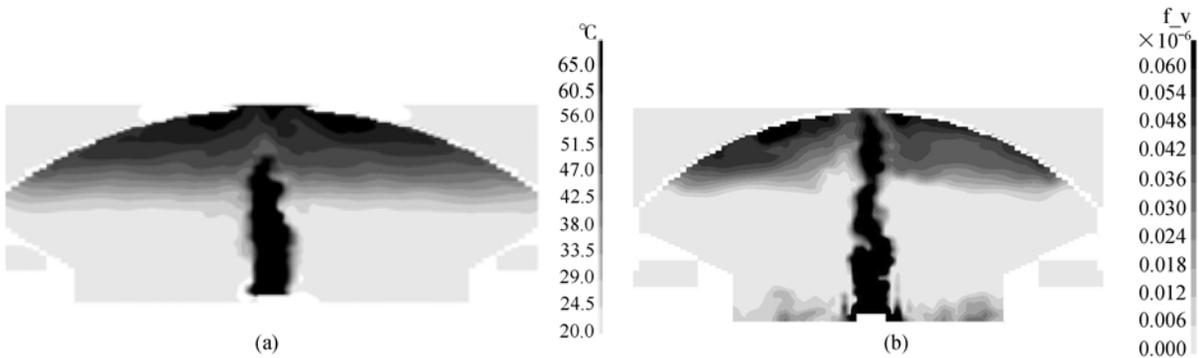


图 2 自然通风下中截面温度等值线和烟气体积百分比浓度等值线图

(a) 自然通风中截面温度等值线; (b) 中截面烟气体积百分比浓度等值线图. 时间为 180 s, 火源总释热率为 16.0 MW

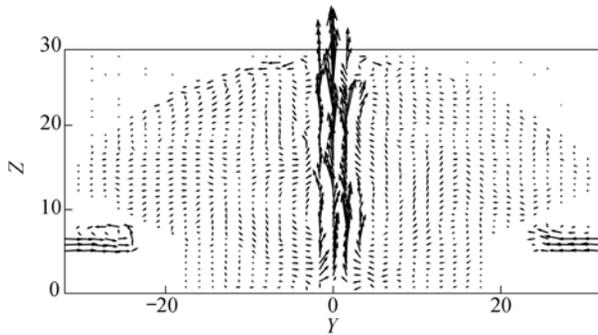


图 3 自然通风下中截面速度矢量图

时间 180 s, 火源总释热率 16.0 MW

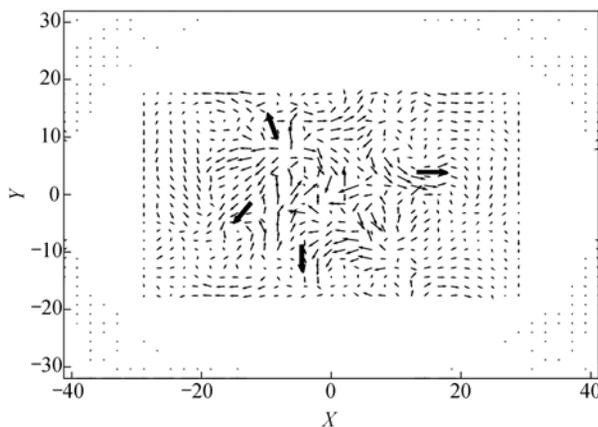


图 4 自然通风下水平截面高度 $h = 0.725$ m 的速度矢量图

时间 180 s, 火源总释热率 16.0 MW

自然排烟被有效排出. 图 4 的 0.725 m 高度截面的速度矢量图和也能较好的反映这种现象. 火源四周流体并不是全部向火源处补充, 呈现火源向四周流动的趋势. 烟气的水平蔓延对火灾时的人员疏散及救

援是极为不利的, 通过对数值计算结果的讨论可以发现, 门效应的存在其主要原因是由于补风口位置高于火源位置. 而当与火源高度相当的补风口开放时, 门效应可以得到一定的缓解. 在清华体育馆中, 底层的工作人员和运动员入口的门均为自动门, 在整个场馆运行过程中一般处于关闭状态, 如在火灾时能够及时打开, 是非常有利于自然通风式的烟气排放的.

() 工况二: 机械通风. 研究机械通风对排放烟气的效率, 把顶棚风机简化成一个 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的排风口. 排风速率为 10 m/s , 此速率为自然通风时通风口速率的 2 倍. 图 5(a) 为机械通风下 180 s 时的中截面温度等值线分布, 可以看出, 在机械通风状态下, 观众席位置温度为 30 左右, 与自然通风的温度分布近似. 从图 5(b) 的烟气体积百分比浓度分布图中可以看出, 工况一中的门效应在此种工况下仍然存在. 工况二排烟速率为工况一的 2 倍, 而从图 3(b) 和图 5(b) 的烟气浓度分布对比可以看出, 达到准定常状态时工况二烟气层高度比工况一更低, 几乎达到观众席上端. 这与预想的结果完全相反. 通常认为机械强制通风可以形成更大的排风量, 烟气应该能更有效的被排走, 但在大多数体育馆之类的大空间建筑火灾中, 过于集中的机械通风排烟造成的效果往往是把大量刚刚补入的新鲜空气直接排放了出去, 形成所谓流通“短路”, 而烟气反而出现堵塞. 图 6 的中截面速度矢量图也能很好的说明这个问题, 从补风口进入的新鲜空气并没有从底部卷入火源, 而是直接流向顶部排风口. 这种现象在建筑火灾性能化设计中必须引起足够重视. 防止烟气堵塞现象发生的可能办法是在使用多个排风量相对较小的风机, 使满足通风需

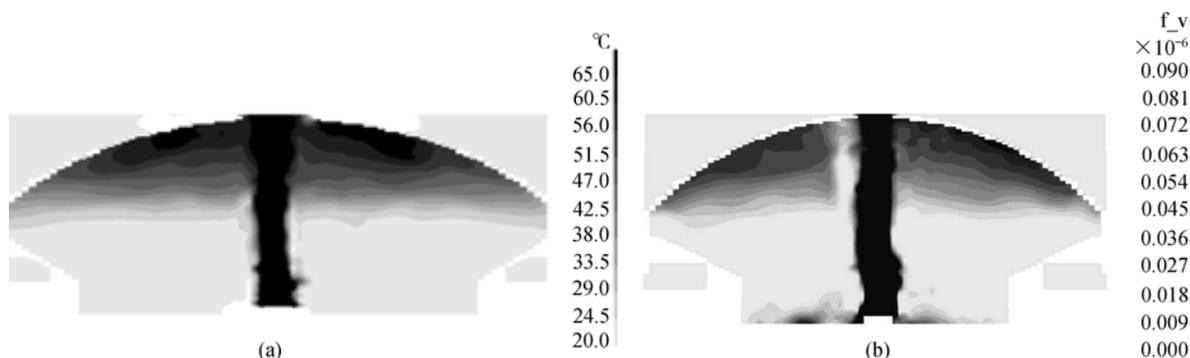


图5 机械通风下的中截面温度等值线和烟气体积百分比浓度等值线图

(a) 机械通风中截面温度等值线; (b) 中截面烟气体积百分比浓度等值线图. 时间 180 s, 火源总释热率 16.0 MW

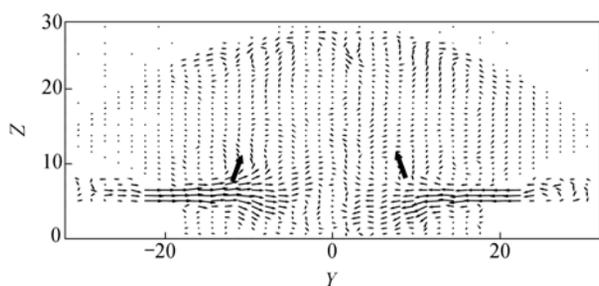


图6 机械通风下门截面速度矢量图

时间 180 s, 火源总释热率 16.0 MW

求的总排风量分散布置在顶棚上, 避免对补充空气形成过强的吸引.

3 结论

利用 CFD 模型对清华大学综合体育馆进行了假想火灾的数值模拟, 对于自然通风和机械通风两种工况, 得到各个时刻的馆内流场, 温度场和组分场的分布情况. 再现了门效应和烟气堵塞这两种体育馆火灾时经常发生的现象. 本研究分析了 2 种现象产生的原因, 并给出了如何加以克服的建议. 在进行建筑火灾的性能化设计时, 应谨慎考虑这 2 个现象的存在对排烟效率的影响. 今后的工作将进一步对本文提出的克服这两种现象的措施进行数值模拟, 验证这些措施能否、或如何更好地发挥作用.

致谢 感谢清华大学建筑设计研究院庄维敏教授提供的清华大学综合体育馆的详细建筑图纸. 本工作为国家重点基础研究发展规划资助项目(批准号: 2001CB409604).

参 考 文 献

- 1 霍然, 袁宏永. 性能化建筑防火分析与设计. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2003
- 2 Cox G, Kumar S. Field modeling of fire in forced-ventilation enclosure. *Comb Sci Technol*, 1987, 52: 7~23
- 3 McGrattan K B, Baum H R, Rehm R G, et al. Fire dynamics simulator-technical reference guide. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2000
- 4 McGrattan K B, Hamins A, Stroup D. Sprinkler, smoke & heat vent, draft curtain interaction-large scale experiments and model development. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1998
- 5 McGrattan K B, Baum H R, Rehm R G. Large eddy simulations of smoke movement. *Fire Safety J*, 1998, 30: 161~178[DOI]
- 6 Smagorinsky J. General circulation experiments with primitive equations. . The Basic Experiment. *Monthly Weather Review*, 1963, 91: 99~164
- 7 Chen J G, Chen H X, Fu S. Numerical investigation of the fire smoke transport in a sports centre. Heyrothsberge: Scientific Sino-German Seminar on Fire Research, 2003

(2005-03-01 收稿, 2005-06-21 收修改稿)