

中庭火灾烟气流动的大涡模拟

天津滨海快速交通发展有限公司 李烈[☆] 孙建军
公安部天津消防研究所 智会强[△] 路世昌

摘要 采用大涡模拟的方法,对中庭火灾烟气的流动过程进行了模拟,了解了中庭烟气的蔓延过程,得到了烟气的速度场和温度场、顶棚射流的速度和温度的详细结果。模拟结果表明,大涡模拟能比较准确地预测中庭内烟气的流动状态,可用于指导中庭建筑的防火设计。

关键词 中庭 火灾 烟气 大涡模拟 速度 温度 顶棚射流

Large eddy simulation of smoke movement in atrium fire

By Li Lie[★], Sun Jianjun, Zhi Huiqiang and Lu Shichang

Abstract Simulates the smoke movement in atrium fire by using large eddy simulation. Obtains some details of the smoke spreading, the smoke velocity field and temperature field, and the ceiling jet velocity and temperature. The results indicate that large eddy simulation can accurately predict smoke movement, and be used as a reference for the fire protection design of buildings with atria.

Keywords atrium, fire, smoke, large eddy simulation, velocity, temperature, ceiling jet

★ Tianjin Binhai Mass Transit Co., Ltd., Tianjin, China

①

0 引言

由于中庭是上下贯通的大空间,并且具有中庭的建筑一般是大型公共建筑,其火灾特性与普通建筑存在较大差异。由于中庭内部难以实现防火、防烟分隔,火灾烟气一旦进入,会很快蔓延到与中庭相通的各个楼层。另外,此类建筑通常都是人员密集场所,烟气的迅速蔓延对人员的安全疏散会造成很大的威胁^[1]。因此,研究中庭内烟气的流动过程具有重要意义。

目前,火灾模拟的数值模型主要有:经验模型、区域模型、场模型和网络模型^[2]。近年来,随着计算机技术的发展,场模型得到了广泛的应用。场模型模拟方法主要有:直接数值模拟(DNS, direct numerical simulation)、RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes)方程模拟和大涡模拟(LES, large eddy simulation)。

直接数值模拟是通过直接求解湍流的精确控制方程,对流场、温度场及污染物浓度场的所有时间尺度和空间尺度进行精确描述。但此种方法计算量巨大,在目前的条件下,只能用于对层流及较

低雷诺数湍流流动的求解^[3]。

RANS 方程模拟求解的是描述流体力学参量平均值的质量、动量和能量守恒方程,它需要对湍流流动及燃烧作正确的模化。该方法对网格大小的划分要求不高,因此计算量相对较小,可以用于复杂场景的模拟。但此方法只能得到流场的平均值而不能反映流体的瞬时特性^[4]。

大涡模拟是近年来发展最为迅速的方法。大涡模拟直接求解表征流体流动特性的含能大涡,对随机性较强的小涡则用亚网格模型进行模拟。大涡模拟是介于直接数值模拟和 RANS 方程模拟之间的一种方法,可以通过相对较粗的网格划分来减少计算量,又可反映流体的瞬时特性^[4]。因此,大涡模拟在科学研究和工程实践中越来越受到重视。

①☆ 李烈,男,1972 年 10 月生,大学,工程师

△ 300381 天津市南开区卫津南路 110 号公安部天津消防研究所
(022) 23387238

E-mail: zhihuiqiang@tfri.com.cn

收稿日期:2006-03-08

一次修回:2006-06-20

二次修回:2006-10-31

本文采用大涡模拟的方法,对中庭火灾烟气的流动过程进行了研究,研究表明大涡模拟可以有效地模拟中庭烟气的流动状况,模拟结果符合实际,对中庭建筑的防火设计具有一定的指导意义。

1 大涡模拟的基本思想

大涡模拟把包括脉动在内的湍流瞬时运动通过某种滤波方法分解成大尺度运动和小尺度运动两部分,大尺度运动通过求解微分方程直接计算出来,小尺度运动对大尺度运动的影响通过建立亚网格模型来模拟,这样就大大简化了计算工作量和对计算机内存的要求^[5]。

2 大涡模拟的数学模型

2.1 控制方程^[2,6-7]

1) 质量守恒方程

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{u}) = \frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p - \nabla \cdot \mathbf{q}_r + \nabla \cdot (k \nabla T) + \sum_i \nabla \cdot (h_i \rho D_i \nabla Y_i) \quad (4)$$

式中 h 为比焓, J/kg; k 为导热系数, W/(m · K); T 为热力学温度, K; \mathbf{q}_r 为辐射热通量, W/m²。

5) 状态方程

$$p_0 = \rho TR \sum_i \frac{Y_i}{M_i} \quad (5)$$

式中 p_0 为背景压力, Pa; R 为气体常数, J/(mol · K); M_i 为第 i 种组分摩尔质量, kg/mol。

2.2 湍流模型

当采用大涡模拟时,大尺度涡流可以直接计算得到,因此只需对随机小涡流建立湍流模型,本文计算时,采用 Smagorinsky 亚网格模型,流体的黏度 μ_L 可表示为

$$\mu_L = \rho (C_s \Delta)^2 \left[2 \text{def} \mathbf{u} \cdot \text{def} \mathbf{u} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中 C_s 为 Smagorinsky 常数; Δ 为滤波宽度, m; $\text{def} \mathbf{u}$ 表示速度矢量的变形张量,由下式表示:

$$\text{def} \mathbf{u} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中 ρ 为密度, kg/m³; t 为时间, s; \mathbf{u} 为速度矢量, m/s。

2) 组分守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho Y_i \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) + \dot{m}_i \quad (2)$$

式中 Y_i 为第 i 种组分的质量分数; D_i 为第 i 种组分的扩散系数, m²/s; \dot{m}_i 为单位体积内第 i 种组分的质量生成率, kg/(m³ · s)。

3) 动量守恒方程

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

式中 p 为压力, Pa; \mathbf{g} 为自由落体加速度, m/s²; \mathbf{f} 为作用于流体上的外力(除重力外), N; $\boldsymbol{\tau}$ 为黏性力张量, N。

4) 能量守恒方程

式中 u, v, w 分别为 \mathbf{u} 在 x, y, z 方向的分量。

相应的导热系数和扩散系数分别表示为

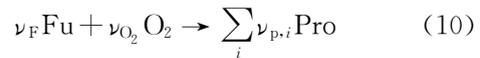
$$k_L = \frac{\mu_L c_p}{Pr} \quad (8)$$

$$D_L = \frac{\mu_L}{\rho_L Sc} \quad (9)$$

式(8),(9)中 c_p 为比定压热容, J/(kg · K); Pr 为普朗特数; Sc 为施密特数。

2.3 燃烧模型

在进行大涡模拟时,采用混合分率燃烧模型,此模型的燃烧反应可简单表示为



式中 ν 为当量反应系数; Fu 为燃料; Pro 为燃烧产物。

2.4 辐射传热模型

辐射是火灾中重要的传热方式,对整个系统参数的影响体现在能量平衡方程中代表辐射传热的源项之中。根据辐射传热方程中物体辐射照度对立体角依赖关系的简化程度,可以把辐射传热数学模型分为通量模型、辐射离散传热模型和离散坐标模型;根据实际物体辐射照度对波长和温度的依赖关系,可分为灰体辐射模型、窄带辐射模型和宽带辐射模型^[8]。本文采用了离散坐标窄带辐射模型,它可以在不增加计算量的前提下,提高辐射传热计

算的准确度。

3 中庭火灾烟气流动的大涡模拟

3.1 物理模型

图1是天津泰达市民广场某酒店中庭的简化模型,该中庭贯穿酒店的1~6层,其中2~6层均有夹层,中庭总高39 m,酒店第1层层高为6 m,其余层层高均为6.6 m,中庭横截面积为450 m²。在中庭底部设有2个送风口,风速为0.4 m/s,顶部设有3个排烟口,排烟速度为10 m/s,送风口和排烟口尺寸均为0.5 m×0.5 m。模拟时,火灾功率设为3 MW,火源位置如图1所示。

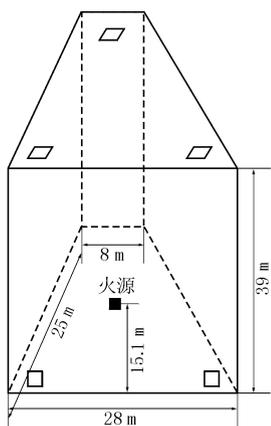


图1 中庭模型示意图

3.2 模拟结果与讨论

利用前文所述的大涡模拟基本方程,对中庭的火灾烟气进行了模拟,得到了烟气蔓延情况及温度场、速度场、顶棚射流等的详细数据。具体分析如下。

图2显示了烟气的蔓延过程。从图中可以明显地看出烟气的扩散过程,10 s时火羽流几乎达到中庭顶部,15 s时已形成明显的顶棚射流,烟气在

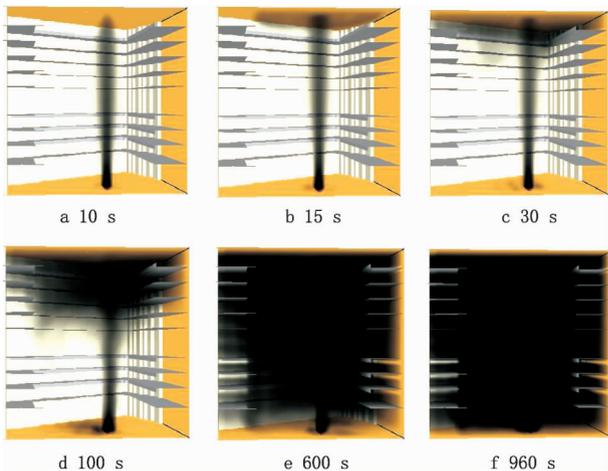


图2 烟气蔓延过程

撞击到右侧墙壁后向下蔓延,然后在最顶层形成回流。从图2c~2f中可以明显地看到烟气的沉降过程,在960 s时,烟气充满整个中庭。

图3给出了火羽流中心的温度曲线。可以看到,火羽流中心的温度先升高再降低,升高阶段表明是火焰区域,因为火焰的外焰温度最高,温度降低区域是烟气羽流区,表明烟气在上升过程中是不断被冷却的。1200 s时烟气羽流中心的温度要低于600 s时的温度,表明烟气温度在慢慢降低。10 s时中庭顶棚的温度接近20℃,表明烟气还未完全到达顶棚,这一点也可以从图1中看出。

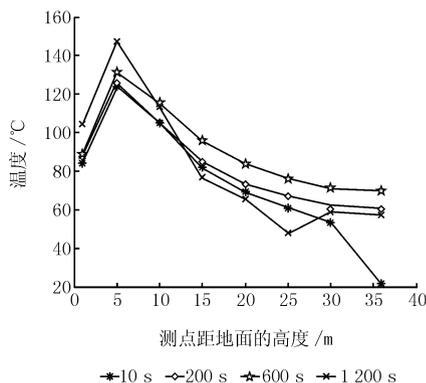


图3 火羽流中心在不同时刻的温度曲线

图4是15 s和1200 s时的流场图,从图中可以明确地看到顶棚射流的发展过程。图5给出了顶棚射流在不同时刻的温度曲线,可以看到,顶棚射流的温度随着离开烟羽流中心距离的增大而降低,在距离烟羽流中心较远处温度下降较快,较远处变化比较平稳。

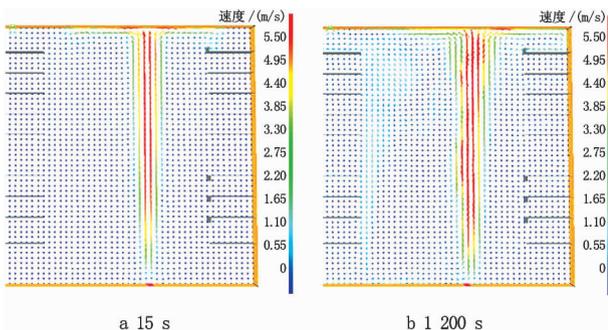


图4 15 s和1200 s时的流场

图6给出了顶棚射流的速度曲线。10 s时速度基本为零,说明顶棚射流还没发展,这一点从图2中也可以看到。各个时刻的顶棚射流速度曲线走向基本一致,速度随着离开烟羽流中心距离的增大而减小。顶棚射流发展初期,由于烟气没有任何

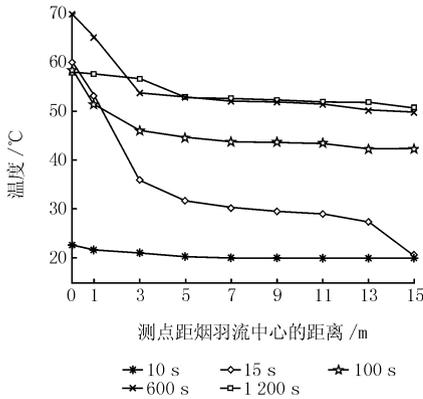


图5 顶棚射流在不同时刻的温度曲线

阻挡,因此,速度较大,但随着烟气的增多,顶棚射流的速度必然会受到回流烟气的影响,因此,速度会降低。烟气的回流从图4中可以明显地看到。当回流达到稳定后,顶棚射流的速度将会基本稳定,图6中600 s时的曲线和1200 s时的曲线基本上是重合的,正好说明了这一现象。

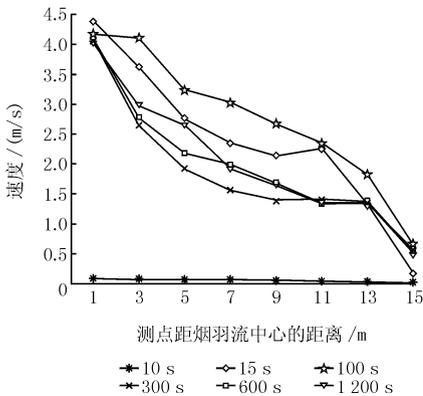


图6 顶棚射流在不同时刻的速度曲线

4 大涡模拟在中庭建筑防火设计中的应用

由以上分析可以看到,大涡模拟可以清楚地反映中庭内烟气的实际流动状况。因此,可以用其指导中庭建筑的性能化防火设计。比如,判定中庭烟控系统的设计是否能满足要求时,常以下式为判定准则:

$$t_R < t_A \quad (11)$$

式中 t_R 为人员安全疏散所需要的时间, s; t_A 为危险来临时间, s。该式的含义就是:火灾发生时,中庭烟控系统要保证人员在危险来临之前疏散到安全区域。 t_R 可以通过计算公式或软件模拟得到^[9], t_A 可以由大涡模拟来预测。

一般认为当中庭内的火灾条件达到下面三个条件之一时,便达到了人的耐受极限,即到了危险

来临时刻。

- 1) 2 m 以上空间内的烟气温度升高到 180 °C;
- 2) 2 m 以下空间内的烟气温度升高到 50 °C 且能见度小于 10 m;
- 3) 2 m 以下空间内 CO 的体积分数升高到 500×10^{-6} 。

大涡模拟可以比较准确预测烟气的流动状态、温度场及各组分的浓度,而能见度可以通过组分浓度等计算得到^[10]。

在进行具体设计时,可以利用比较成熟的 CFD 软件进行大涡模拟来预测 t_A , 比如利用 FDS^[10], 目前,该软件已经在国内外的建筑防火设计中得到了广泛应用。因此,大涡模拟对中庭建筑的防火设计具有较大的指导意义。

5 结论

通过对中庭火灾烟气运动的大涡模拟分析可以看到,大涡模拟描述了烟气湍流运动的瞬时状态。利用大涡模拟,可以模拟中庭烟气的蔓延过程、烟层沉降过程、烟气速度场和温度场、火羽流的特点、顶棚射流现象等,所得结果能够反映烟气运动的实际状况,能对中庭建筑防火设计提供指导。

参考文献

- [1] 吴华,吴红华. 中庭烟气管理系统的分析[J]. 煤气与热力,2003,23(7):440-443
- [2] 范维澄,孙金华,陆守香,等. 火灾风险评估方法学[M]. 北京:科学出版社,2004:437-488
- [3] Janssen M L. Evaluating computer fire model[J]. Fire Protection Engineering, 2002(14):19-24
- [4] Mingde S. Comparison of different subgrid-scale models of large eddy simulation for indoor airflow modeling[J]. ASME, 2001, 13(5): 628-639
- [5] 庄达民,孟宪海. 室内气流分布的大涡模拟[J]. 空气动力学学报,2002,20(3):332-338
- [6] 高学平. 高等流体力学[M]. 天津:天津大学出版社,2005:70-89
- [7] 李万平. 计算流体力学[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2004: 66-86
- [8] Fiveland W A. Discrete-ordinate solution of the radiative transport equation for rectangular enclosure [J]. Journal of Heat Transfer,1994,106(2):699-706
- [9] 霍然,袁宏永. 性能化建筑防火分析与设计[M]. 合肥:安徽科学技术出版社,2003
- [10] McGrattan K, Forney G. Fire dynamics simulators [M]. Washington:Government Printing Office, 2004