建筑火灾中基于大涡模拟的场区复合数值模型及其应用*

杨 锐 蒋 勇 纪 杰 范维澄
中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室，合肥 230026

摘要 结合大涡模拟技术，采用体积守恒压力修正的区域模型发展了一种新的火灾过程场区模拟程序. 采用低 Mach 数近似下的三维可压缩 Navier-Stokes 方程，和有限差分法计算了滤波后的控制方程，对着火房间内的烟气运动过程进行有效的模拟. 对一个模型多室建筑以及一个真实尺寸多室建筑内的火灾烟气运动过程进行数值模拟，并将模拟结果与实验数据进行对比. 结果显示该方法能够较好地描述建筑火灾中的烟气运动规律. 其模拟结果能够为建筑消防安全的性能化设计提供参考.

关键词 建筑火灾 性能化设计 烟气运动 大涡模拟 场区模型

城市建筑火灾中人员死亡主要是由于吸入有毒烟气窒息所致. 对建筑火灾的烟气运动过程进行研究具有重要意义. 用数值方法对火灾现象进行研究具有代价低、周期短、信息完整等优点，得到广泛地应用. 另一方面，随着经济的发展，建筑空间越来越大、结构越来越复杂，对一个大型建筑的火灾烟气运动过程进行三维数值模拟将耗费巨大的计算资源与时间. 因此，迫切需要发展一种高效、准确、能对大规模建筑火灾烟气的运动进行数值模拟的方法.

近年来，大涡模拟技术在处理复杂湍流现象上已取得成功. 但是利用大涡模拟的方法对由燃烧驱动的火灾烟气运动过程进行模拟的工作还较少见. 本文采用低 Mach 数近似下的三维可压缩 Navier-Stokes 方程，结合 Smagorinsky 亚格子尺度模型对着火房间进行数值模拟，准确而有效地模拟热羽流驱动的烟气输运过程. 同时结合体积修正压力的区域模型，发展了一个新的场区模型. 对两个建筑中的火灾烟气运动过程进行了数值模拟，并分别与实验结果进行了对比. 结果表明该方法能高效地并且准确地模拟烟气运动的过程. 模拟结果对研究火灾烟气的运动规律以及消防安全性能设计与评估具有重要的指导意义.

1 数值模型

1.1 大涡模拟及 Smagorinsky 亚格子尺度模型

着火房间的烟气分层现象不明显，但伴随着燃烧、辐射等复杂现象. 本文采用 Smagorinsky 亚格子尺度模型[1]对着火房间进行三维流场(CFD)模拟，简化的基本方程如下[2]：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \boldsymbol{u} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho Y_l}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla \rho Y_l = -\rho Y_l \nabla \cdot \boldsymbol{u} + \nabla \cdot \rho D \nabla Y_l + \dot{W}''_l, \tag{2}$$

ρ 为密度，$\boldsymbol{u}$ 为速度矢量，Y_l 为组分 l 的质量分数，D 为扩散系数，$\dot{W}''_l$ 为单位体积内组分 l 的生成速率. 火灾烟气运动通常都是低 Mach 数流动. 为简化计算并提高计算效率，可以在这个条件下将压力分解为 3 个部分，分别为背景压力 p_0，静压项以及流

2002-11-25 收稿，2002-12-30 收修改稿
* 国家重点基础研究发展规划(批准号：2001CB409600)、国家自然科学基金(批准号：50276057)和安徽省教育厅重点科研(批准号：2002KJ332ZD)资助项目
E-mail：ray@mail.ustc.edu.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

动引起的压力扰动项 $\tilde{p}$，并用背景压力替换状态方程中的压力项：

$$p = p_0 - \rho_\infty \boldsymbol{g} z + \tilde{p}, \tag{3}$$

$$p_0(t) = \rho R T \sum_l \frac{Y_l}{M_l}, \tag{4}$$

ρ_∞为环境空气密度，$\boldsymbol{g}$ 为重力加速度，R 为通用气体常数，M_l为组分 l 的分子量.

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} - \boldsymbol{u} \times \boldsymbol{\omega} + \nabla H = \frac{1}{\rho}[(\rho - \rho_\infty) g + \boldsymbol{f} + \nabla \cdot \tau], \tag{5}$$

其中$\nabla H = \frac{1}{2}\nabla |\boldsymbol{u}|^2 + \frac{1}{\rho}\nabla \tilde{p}$，$\boldsymbol{\omega}$ 为涡量，$\boldsymbol{f}$ 为外力，τ 为粘性应力张量.

$$\nabla^2 H = -\frac{\partial(\nabla \cdot \boldsymbol{u})}{\partial t} + \nabla \cdot \left\{\boldsymbol{u} \times \boldsymbol{\omega} + \frac{1}{\rho}[(\rho - \rho_\infty) g + \boldsymbol{f} + \nabla \cdot \tau]\right\}, \tag{6}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = \frac{\gamma - 1}{\gamma p_0}\left(\dot{q}''' - \nabla \cdot \boldsymbol{q}_r + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_l c_{p,l} T \rho D \nabla Y_l - \frac{1}{\gamma - 1}\frac{\mathrm{d}p_0}{\mathrm{d}t}\right) \tag{7}$$

γ 为空气的比热比，$\dot{q}'''$ 为燃烧的热释放速率，$\boldsymbol{q}_r$ 为辐射热流向量. k 为热传导系数，$c_{p,l}$为组分 l 的定压比热.

$$\tau = \mu_{\mathrm{LES}}\left\{[\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^T] - \frac{2}{3}(\nabla \boldsymbol{u}) I)\right\}, \tag{8}$$

$$\mu_{\mathrm{LES}} = \rho (C_s \Delta)^2 \left[\frac{1}{2}(\nabla \boldsymbol{u} + \nabla \boldsymbol{u}^T) \cdot (\nabla \boldsymbol{u} + \nabla \boldsymbol{u}^T) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \boldsymbol{u})^2\right]^{\frac{1}{2}}, \tag{9}$$

其中 $\Delta = (\delta x \delta y \delta z)^{\frac{1}{3}}$，$C_s$为经验常数. 空间差分采用二阶中心差分，时间推进采用显式预估-校正格式对方程进行离散化.

1.2 区域模型

区域模型的基本思想是把研究区域分成上下两部分，每部分的物理量均匀分布. 根据质量、动量、能量、组分等守恒定律，可得到上下两部分区域内气体的质量、能量、组分的控制方程. 在火灾发生过程中，每个房间的气体总体积是个常量，以体积守恒作为压力校正的标准，能取得较好的结果. 区域模型详见文献[3].

2 模拟结果与分析

采用根据以上模型所编制的计算机程序 LFZ 对两个不同建筑内火灾烟气运动过程进行了数值模拟.

2.1 模型实验楼火灾烟气运动规律模拟

对中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室模型实验楼内的火灾烟气运动过程进行了数值模拟，并与文献[3]中部分模拟结果进行对比. 图 1 为该模型实验楼的一部分. 研究区域为一个模型房间及与其相邻的走廊. 模型房间为 1.6 m 宽、1.36 m 长、1.5 m 高. 火源放置于该房间的中央，大小为 0.1 m×0.1 m，强度为 9.6 kW. 该房间采用大涡模型模拟其烟气运动. 走廊宽 1.1 m、长 6.0 m、高 1.3 m，走廊内的烟气运动用区域模型模拟. 走廊共被均分为 A，B，C 3 部分. 两个门均为 0.58 m 宽、1.18 m 高，在整个过程中保持打开状态. 现有场区模型在场模拟与区域模拟接口处采用物理量在边界处梯度为零的边界条件，在强火源的条件下可能给出不正确的结果，本文场区接口处采用部分计算区域交叠的方法，较有效地解决了这个问题.

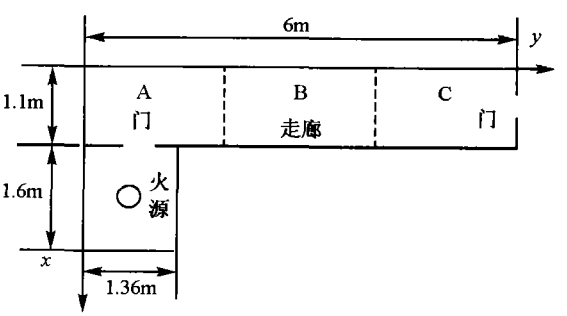

图 1 模型实验楼结构简图

图 2，3 是 LFZ 程序数值模拟的结果. 图 2 是着火房间大涡模拟结果，所示为 Y 方向中间位置的 XZ 平面上的温度场，图 2(a)，(b)分别对应 5 和 200 s 左右的时间平均温度场. 图 3(a)，(b)分别是走廊各段上层烟气厚度以及烟气层温度随时间变化的情况. 烟气厚度在离着火房间近的地方大，随距离的增加而减少.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

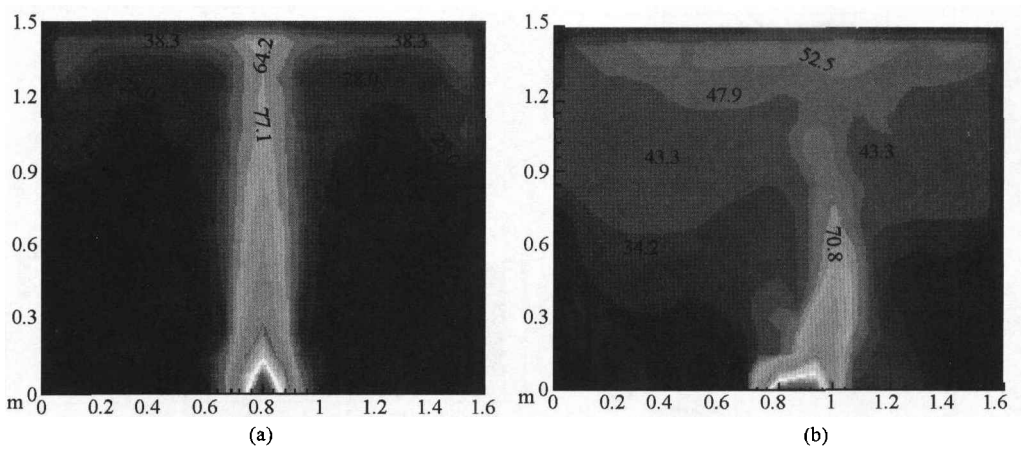

图 2 起火房间温度场的大涡模拟结果

(a)，(b)分别为着火 5 s 和 200 s 左右的温度分布/℃

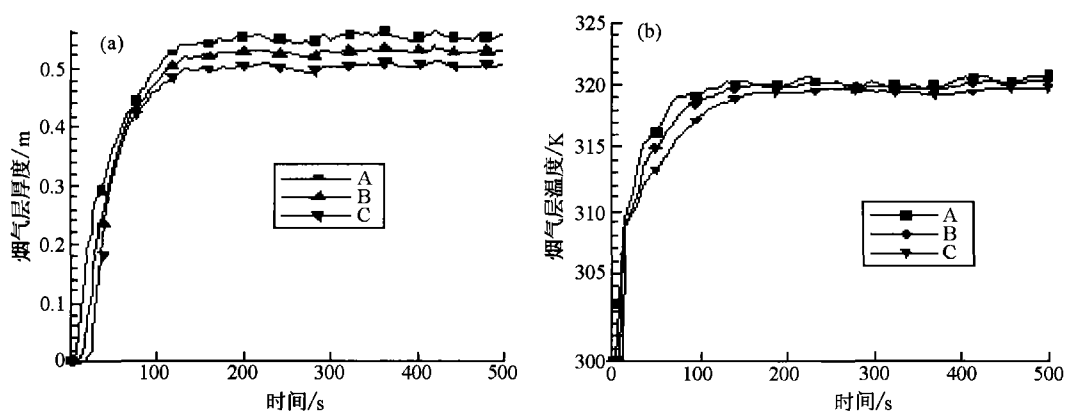

图 3 模型试验楼走廊烟气模拟结果

LFZ 程序对烟气变化的趋势的模拟较接近实验结果[3]：在前 100 s 左右内，走廊各段温度迅速升高，然后温度变化逐渐平缓. 文献[3]中的模型以及本程序都很好地模拟出了这种变化的趋势，但其对温度上升阶段的时间预测有一个明显的延迟，约 200 s 才达到变化平缓的阶段[3]. 通过对比我们可以看出，在对上层烟气发展过程的时间预测上，本文模型的模拟结果更加准确.

由于区域模拟的模型中忽略了烟气的热损失，因此模拟结果中烟气层的最高温度比实验结果高，同时也造成走廊各段之间的烟气层温度差别也比实验结果小. 若考虑区域模拟中的热损失等因素，并进一步改进区域模型，可以改进这个问题.

2.2 全尺寸多室建筑火灾烟气运动的场区模拟

对日本建筑研究所全尺寸火灾实验室的第三层的实验环境[4]进行数值模拟，共模拟其中的 3 种不同通风条件，见图 4. 研究在各种不同的建筑结构及通风条件下烟气蔓延的情况及其运动规律. 建筑物尺寸如下：起火室 7.9 m×3.3 m×2.7 m，采用大涡模拟. 走廊划分为 3 段，采用区域模拟. 每段走廊 2.6 m×1.6 m×2.7 m，起火室门 1.0 m×2.0 m. 图 4 中的 $T0 \sim T5$ 是实验中放置的热电偶树. 着火房间地板中央放置一个热源.

实验条件 1 中火源功率前 180 s 近似为 $Q = \alpha t^2$ 的函数，后期为近似直线的衰减. $\alpha = 0.0065$ kW/s^2. 图 5(a)，(b)所示分别为实验条件 1 下走廊各段烟气层高度和温度变化的实验以及软件 CFAST，BRI2 的模拟结果，图 6(a)，(b)所示为该实验条件下烟气层厚度、烟气层温度的 LFZ 程序模拟结果. 从火灾初期烟气层厚度的变化情况来看(图 5(a)，6(a))，LFZ 的模拟结果与 CFAST 以及 BRI2 的结果

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

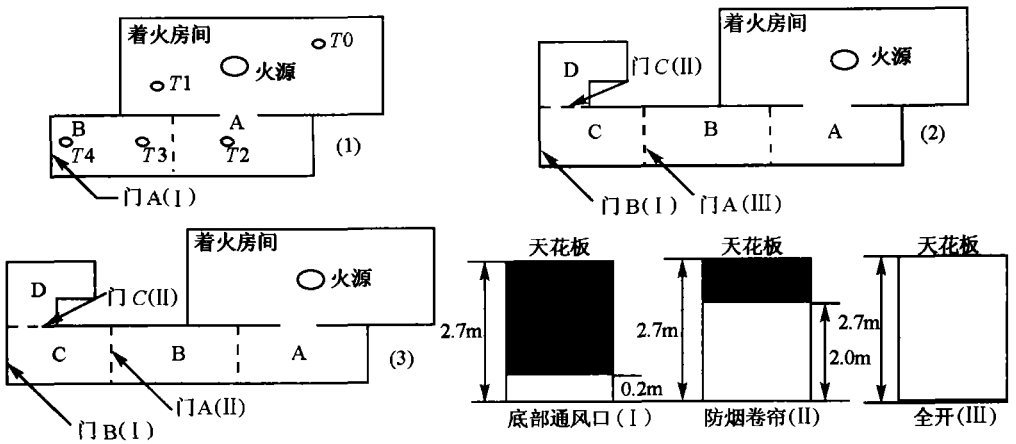

图4 建筑结构及走廊通风情况示意图

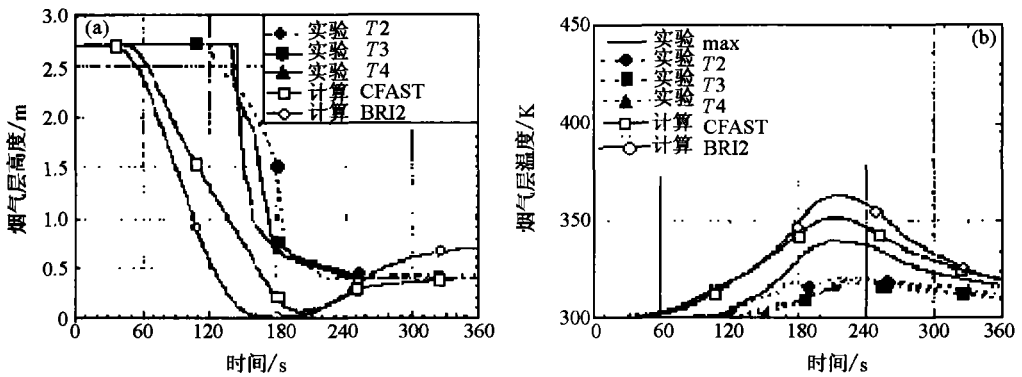

图5 实验条件1下实验以及CFAST, BRI2程序模拟结果

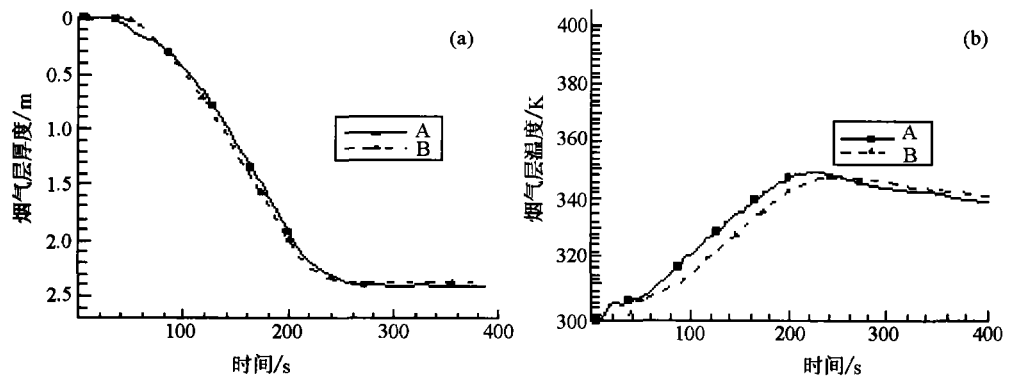

图6 实验条件1下LFZ程序的模拟结果

相似：烟气开始蔓延进走廊的时间比实验结果要快很多. 这是由于在区域模拟的计算中某房间只要有烟气流入，即认为该房间上层瞬时充满很薄的、均匀的烟气层. 而实验时烟气层厚度的确定需要光测或是利用Cooper的N百分比规则[5]等方法来处理，这使得区域模型的计算结果中烟气层出现的时间比实验结果早，但这时烟气层厚度非常小，不会影响到最终的火灾安全评估结论. 而对比火灾发展过程(着火一定时间后，烟气层达到一定厚度以后)的烟气厚度的模拟结果(见图5(a)，6(a)中相应曲线)，可以看到虽然CFAST和BRI2的结果也基本模拟出了实验中烟气的运动情况，但对于建筑消防安全性

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

能设计中的重要因素——火灾发展过程中烟气层厚度增加的趋势以及到达一定厚度的时间，LFZ的模拟结果更加接近实验结果，更加准确地模拟出了多室建筑火灾中烟气的运动情况.

为简化计算，对条件2与条件3的模拟采用了固定火源功率的方式，因而未与实验结果进行对比，而是比较同样火源功率下，不同通风状态下的烟气运动过程. 图7(a)，(b)所示分别为条件2、条件3下烟气层厚度的LFZ程序模拟结果. 从模拟结果中可以看到防烟卷帘对延缓烟气蔓延到下游房间(走廊段)所起的作用：如条件2中C区烟气厚度达到0.5 m需约130 s左右，由于在门A处增加了防烟卷帘，条件3中C区烟气达到同一厚度的时间推迟至160 s左右.

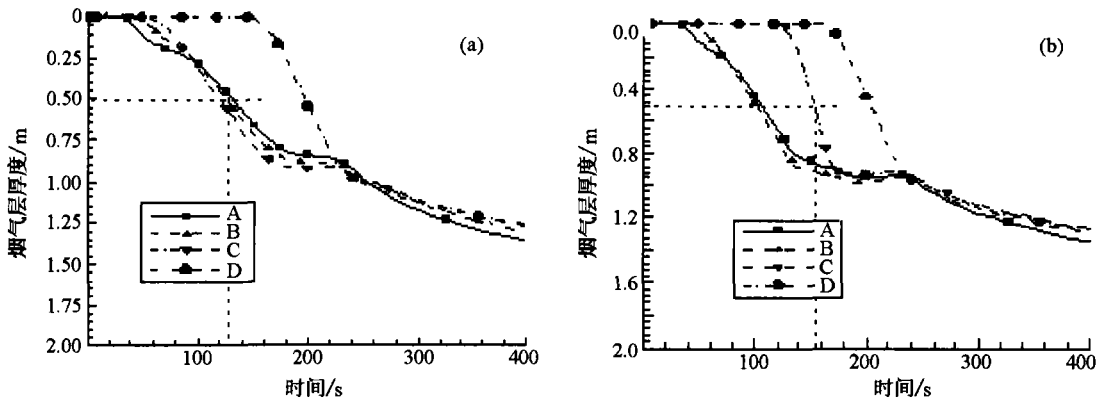

图7 LFZ程序对条件2、条件3下烟气层厚度发展的模拟结果

(a) 为对条件2的模拟；(b) 为对条件3的模拟

3 结论

本工作开发了一套完整的建筑火灾场区模拟程序LFZ：采用大涡模拟的方法对着火房间进行模拟，准确地预测了该房间的物理量分布. 采用体积守恒压力校正的区域模拟方法模拟与着火房间相连的各房间的烟气蔓延的情况；通过对实验现象的模拟和对比，表明该程序很好模拟出了建筑火灾中烟气的运动规律，能够为建筑的消防安全评估给出参考结果，为进一步进行建筑消防安全的性能化设计奠定了基础. 下一步的工作是将区域模拟中烟气的热损失考虑进去，以进一步完善这个模型.

参 考 文 献

1 Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment. Monthly Weather Review, 1963, 91: 99

2 Kevin B, et al. Fire Dynamics Simulator (Version 2)-Technical Reference Guide, NISTIR 6783, November, 2001

3 Yao J D, et al. Verification and application of field-zone-network model in building fire. Fire Safety Journal, 1999, 33(1): 35

4 Matsuyama K, et al. Systematic experiments of room and corridor smoke filling for use in calibration of zone and CFD fire models. Fifteenth Meeting of The UJNR Panel on Fire Research and Safety, 2000, 2: 321

5 Cooper L Y, et al. An experimental study of upper hot layer stratification in full-scale multiroom fire scenarios. Journal of Heat Transfer, 1982, 104: 741

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net