

建筑物内火旋风中心飘移的探讨与研究

陈长坤, 姚 斌, 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] 火旋风是火灾中一种较为特殊的火行为, 是火灾安全研究的一个重要内容。针对建筑物内火旋风的火行为进行研究, 提出了一种用于描述和表征建筑物内火旋风中心飘移的分析方法。结合此方法, 应用大涡模拟技术对火旋风中心飘移现象进行了数值模拟研究, 得到了火旋风中心飘移的平均角速度、温度峰值、高温中心位置等重要参数。

[关键词] 火旋风; 中心飘移; 大涡模拟; 建筑

[中图分类号] TU998.12 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)10-0063-06

1 引言

火旋风实质上是一种有化学反应的有旋流动, 一旦发生将加大火灾的释热速率, 对建筑结构、建筑物内的物品和人员所构成的威胁也进一步升级。因此它是火灾安全研究的一个重要内容。但由于强烈的非线性与随机性, 同时也受到测量技术的限制, 目前国内外在这方面的实验研究主要局限于实验室条件下的小尺寸研究^[1~3]。其中最早是由 Emmons 和 Ying^[1]开展的实验研究, 他们将一个燃烧的丙酮池放置于一旋转的圆筒中心而获得这个现象的。此后, Soma 与 Saito^[2]对火旋风试验的相似性准则进行了研究。Satoh 和 Yang^[3]通过4块合围板, 并在各棱边角上留有垂直狭缝的方式获得旋转火焰。与实验研究相比数值模拟是一种比较经济而有效的研究方法。Satoh 和 Yang^[4]在其实验的基础上开展了初步的数值模拟研究, Battaglia 等^[5]利用大涡模拟技术对旋转火焰进行了模拟研究。

过去的研究主要着眼于旋转火焰的实验重现及对火焰本身的模拟, 且对周围条件的假设过于理想化。实际中, 火旋风在火灾中的行为与单纯的旋转

火焰有很大的区别, 科学地认识这些行为对性能化防火分析与设计具有重要的意义。

作者分析了建筑物内火旋风现象的特点, 提出了一种描述和表征建筑物内火旋风中心飘移的分析方法。通过大涡模拟方法分析研究建筑物内火旋风高温中心的飘移现象, 从而获得火旋风飘移的平均旋转速度, 半径以及中心温度等重要特征参数, 为进一步实验研究提供参考。

2 建筑物内火旋风现象的特点

处于外部风流场中的建筑, 尤其是高层建筑, 由于风速、风向和周围气流的变化, 各个面都受到不同的压力, 结合不同的通风开口, 在建筑物内部诱导出多种形式的流场。这些流场与火灾相互作用, 极有可能在建筑物内形成火旋风现象。

与森林或城市火灾中的火旋风不同, 建筑物内的火旋风现象是一种受限空间内的火行为。由于受到限制, 其规模比较小, 但却对建筑结构与人员的逃生构成了极大的威胁。由于受到建筑物内不对称边界条件的影响, 火旋风中心是不断移动的。与在开放空间中的情况不同, 其活动范围只能被限制在

[收稿日期] 2003-04-14

[基金项目] 国家自然科学基金重大国际合作研究资助项目(2003-50320120156)、教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

[作者简介] 陈长坤(1977-), 男, 福建福安市人, 中国科技大学博士研究生

一定的空间内,使处于这个空间内的物体或人员受到了威胁。

这些不对称条件主要包括建筑物本身复杂的几何边界、流场及火源等,它们导致了建筑物火灾中火旋风中心的飘移性,增加了对其进行研究的困

难,特别是实验测量。但是,这一现象在建筑物火灾安全中却是非常重要的,它将扩大建筑物内的过火面积,破坏建筑构件,增加周围物体被点燃的可能性,使建筑内的人员逃生更加困难。图1是建筑物内火旋风的形成及其影响的示意框图。

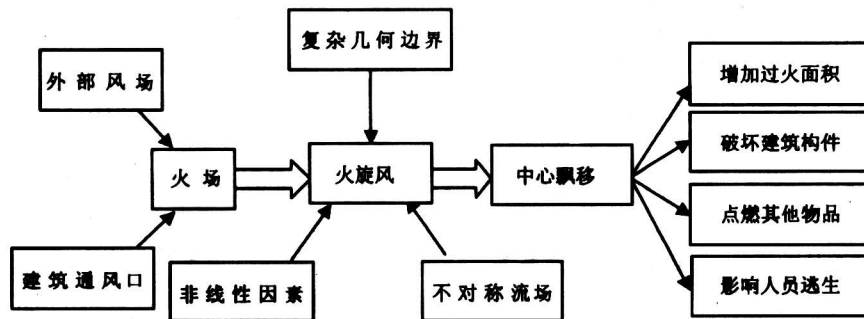


图1 建筑内火旋风中心飘移及其影响示意框图

Fig.1 Frame scheme of center shift of building fire-whirl and its effect

3 火旋风中心飘移现象的表征与分析方法

对于火旋风飘移现象的描述难度很大,它与前一时刻的边界条件、速度场、温度场、燃料燃烧,以及火焰本身的旋转角速度等相关。

为了对建筑物内火旋风行为进行研究,作者提出了一种用于描述建筑内火旋风飘移现象的方法。截面上某一径向位置 r 与时间 t 构成的平面中,以温度 T 为函数值,则平面上出现的波峰为火旋风的高温中心,在每个特定时间内最多为一个波峰。

$$T = T(r, t). \quad (1)$$

对应于 t 轴,两个相邻波峰间的距离即为火旋风中心飘移旋转一周所用的时间,于是

$$\bar{\omega}_t = 2\pi / (t_{\text{now}} - t_{\text{last}}), \quad (2)$$

t_{now} 表示当前出现波峰的位置, t_{last} 表示前一次波峰出现的时间。波峰对应的 R 值即为火旋风中心出现的位置(这里假设火旋风中心的飘移绕过房间的轴位置,其他情况只要做相应调整即可)。在窄的波峰之间为宽的带状低谷,这些低谷表示火旋风中心正处于其他区域。波峰表示分析区域处于热态,而波谷表示分析区域处于冷态。通过以上方法,可以对建筑物内的火旋风中心飘移现象进行数学上的描述和表征,进而可以对它进行更深入的研究。

为了过滤信息,以上方法的另一种改进形式是

将 $T(r, t)$ 平面图分成 $T-t$ 与 $T-r$ 两组曲线形式。即先分析 $T(r_m, t)$, r_m 可选分析区域内的部分点,确定峰值时间 t_n ,再由 $T(r, t_n)$ 曲线获得温度峰值 T_n 与位置 R_n 。

在建筑空间的截平面内按图2所示方式布置热电偶,通过计算机,适时采集数据。所选的分析区域如图2所示。也可根据不同情况选择不同的或多个分析区域,相应的分析只要做适当调整即可。

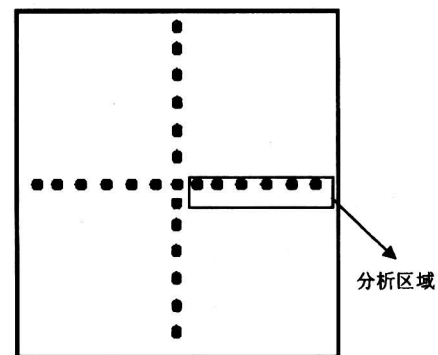


图2 热电偶分布示意图

Fig.2 Scheme of thermocouples distribution

任何时刻火旋风高温中心经过分析区域时,此区域内的温度值将出现一个波峰。前后两次波峰所对应的时间差 Δt , 即为中心飘移过相应区域的周期,由此可以计算出对应时间段内火旋风中心飘移的平均角速度:

$$\bar{\omega} = 2\pi / \Delta t. \quad (3)$$

图 3 上半部分给出了区域内热电偶的 $T-t$ 曲线示意图，曲线上峰值所对应的时间即为高温中心经过的时间。记录这些峰值所对应的时刻 t_i 。

通过图 3 的下半部分所示的各 t_i 时刻线段上的温度分布曲线 $T-r$ ，便可获取区域内火旋风中心位置与温度信息，曲线上的峰值即为火旋风在截面区域的最高温度，所对应的位置 r_i 即为高温中

心的位置。图 4 是分析流程图。

通过分析 $T-t$ 与 $T-r$ 关系曲线，便可以获得火旋风飘移至相应区域内的时间、最高温度 T_h 、高温中心的位置 x'_i 以及飘移的平均角速度 ω_i 等重要参数。这些参数对于了解建筑物内火旋风的行为具有重要的意义。

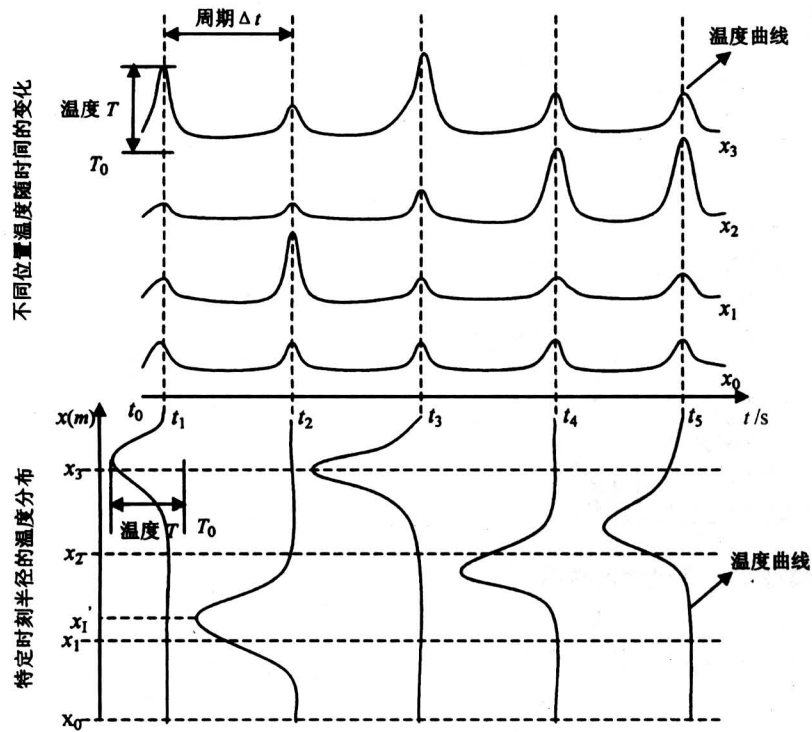


图 3 建筑内火旋风飘移现象分析方法示意图

Fig.3 Scheme of analytical method for center shift of building fire-whirl

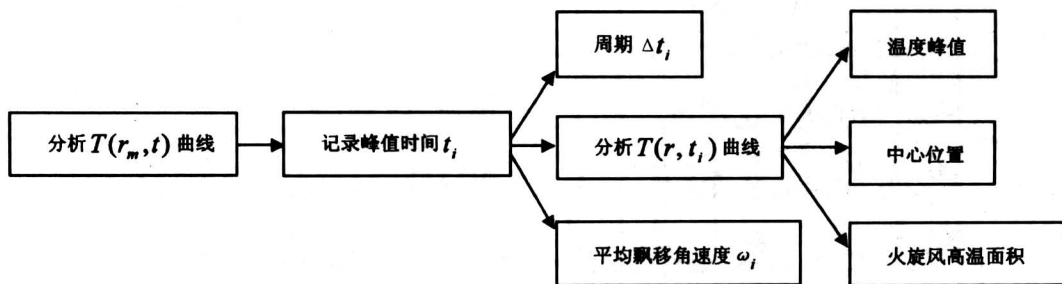


图 4 火旋风飘移现象分析流程图

Fig.4 Flow chart of analytical method for center shift of building fire-whirl

4 火旋风中心飘移的大涡模拟

结合以上分析方法，作者采用目前在火灾科学研究领域较为成熟的、由美国国家标准技术研究院 (NIST) 发布的火灾动力学模拟软件 FDS (fire

dynamics simulation)^[5-7]，利用大涡模拟技术，对火旋风中心飘移行为进行了初步模拟研究。

笔者首先对实际研究对象构建如图 5 所示的简化模型。这是一个 3 层楼高的建筑中庭结构，尺寸为 5 m×5 m×8 m，房间前后各有一个门，左右有

4个内部窗(其中1,3关闭,2,4开口),门与窗的尺寸分别为 $1.2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 和 $1\text{ m}\times 1.2\text{ m}$;中庭顶部有一 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的自然排烟口。房间底部中央放置 $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 的油盘,油面高 0.5 m ,燃料为煤油,其燃烧热为 43.2 MJ/kg ,蒸发潜热为 270 kJ/kg 。点火 8 s 后,两个门自动打开,并吹入一定速度的风 Wind1 和 Wind2。两风速均选为 3 m/s 。通过数值模拟研究,对结果进行分析讨论。

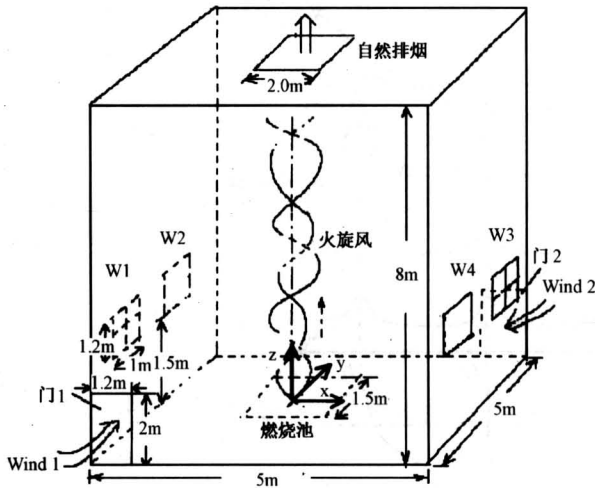


图5 建筑模型结构及尺寸示意图

Fig.5 Scheme of structure and dimension of atrium-building model

5 结果与分析

为了减少初始流场变化的影响,主要对 $60\sim 120\text{ s}$ 这段时间内的数据进行分析。基于前面的分析方法,笔者对通过中心的整条线段 x (即 $\pm r$)进行分析。图6给出了在 $y=2.5\text{ m}$, $z=2\text{ m}$ 处不同的 x 值所在点的温度随时间的变化即 $T-t$ 曲线,由图6可以看出,曲线在 $60\sim 94\text{ s}$ 的时间段主要由狭窄的波峰与宽的波谷组成。在 $94\sim 120\text{ s}$,火旋风高温中心处于建筑中心线附近,飘移幅度比较小,高温飘移旋绕中心与火旋风自旋中心接近。在这个时间段,火旋风中心发生飘移, $T-t$ 曲线的波峰与波谷交替出现,在 $0\sim 1.5\text{ m}$ 处与 $-1.5\sim 0\text{ m}$ 的位置基本上是相对应的。从图6中可以看出峰值编号 $I=1$ 时,高温中心处于 x 的正半轴处,此时波峰主要出现在线段的 -1.0 m , -0.5 m , 0 m 位置,而当 $I=2$ 时高温中心在线段的中心偏向负轴方向,所以在 -1.0 m , -0.5 m , 0 m , 0.5 m 位置出现波峰,而其他位置出现波谷。对于 $I=3,5,7,9$ 时刻火旋风中心在正轴方向;对于 $I=4,6,8,10$ 所对应的时刻,波峰出现在负轴方向。从各个点的值大小,可以大致判断火旋风中心的位置。图6中相应波峰与波谷的时间列于表1。

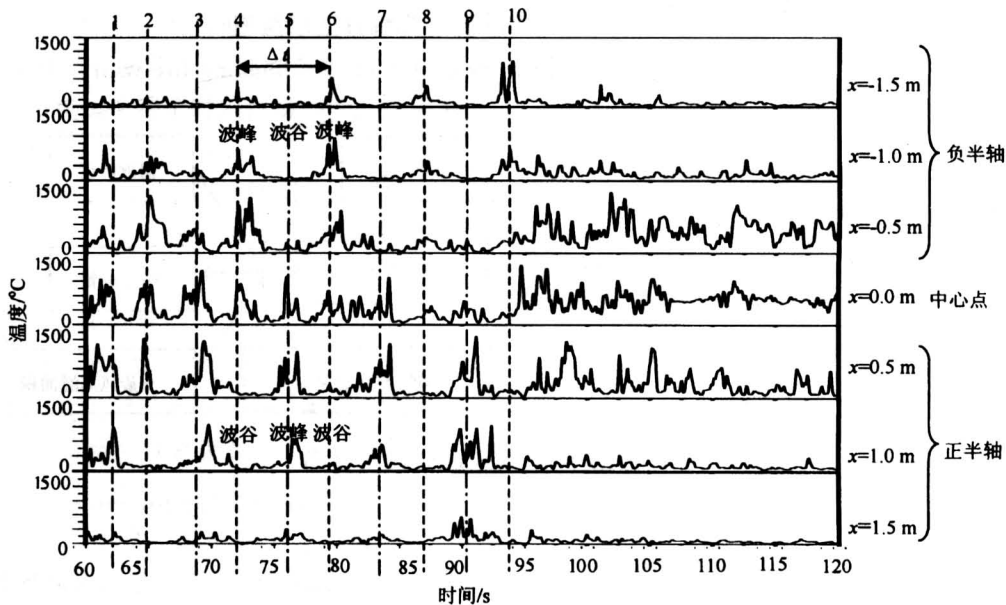


图6 $y=2.5\text{ m}$, $z=2.0\text{ m}$ 线段上 x_1 位置的 $T-t$ 曲线

Fig.6 $T-t$ profile of x_1 location on the line segment $y=2.5\text{ m}$, $z=2.0\text{ m}$

表 1 火旋风高温中心处于 $y = 2.5 \text{ m}$, $z = 2.0 \text{ m}$ 线段上的时间

Table 1 Times when the fire-whirl centre on the line segment $y = 2.5 \text{ m}$, $z = 2.0 \text{ m}$

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
时间/s	62.2	65.2	69.9	72.2	76.9	79.8	83.5	87.2	91.1	93.7

对表 1 以时间 t_I 为横坐标, 以 $p(t_I) = I_t \times \pi$ 为纵坐标绘制关系点图。取函数 $q(t) = \bar{\omega} \times (t - t_0)$, $\bar{\omega}$ 为飘移的平均角速度, $q(t)$ 表示从参考点 t_0 时刻起到 t 时刻, 火旋风中心飘移的弧度总值。其中参考点 t_0 可取 $I_{t_0} = 0$ 所对应的时刻。于是 $p(t_I)$ 为 $q(t)$ 线段上的离散点。对 $[p(t_I), t_I]$ 离散点进行最小二乘法拟合, 可得到如图 7 所示的 $q(t) - t$ 关系曲线, 拟合线的斜率即为火旋风飘移的平均角速度 $\bar{\omega}$ 。

图 7 中 $[p(t_I), t_I]$ 拟合线的表达式为: $q(t) = 0.879t - 51.4$, 所以可以得到在 62.2 s 到 93.7 s 的时间内火旋风中心飘移的平均角速度为 $\bar{\omega} = 0.879 \text{ s}^{-1}$, 平均周期为 $\Delta t = 7.15 \text{ s}$ 。

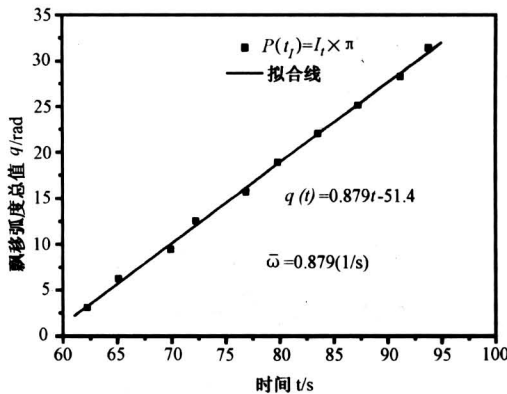


图 7 火旋风飘移平均角速度求解图

Fig. 7 Solution profile of average angular velocity of fire-whirl shift

图 8 给出了表 1 中 $I = 1, 2, 3, 4$ 对应时刻的整条线上热电偶的曲线 $T - x$ (相当于 $T - \pm r$ 曲线)。从图中可以看出不同时刻线段 x 的温度分布, 当 $I = 1, 3$ 时, 火旋风中心在线段的右半区域, 此时高温中心位置 $x'_{1,3} > 0$, 而对于左半区域 $x < 0$ 处, 温度值都比较低。当 $I = 2, 4$ 时, 火旋风中心飘移到线段的左半区域, 于是高温中心所在

的位置 $x'_{2,4} < 0$ 。根据不同时刻线段上温度的分布, 可以确定温度峰值、高温中心位置及火旋风在此截面上的半径值。

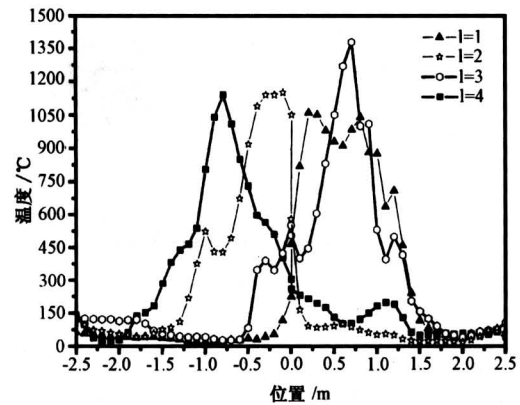


图 8 t_I 时刻的 $T - x$ 曲线

Fig. 8 $T - x$ profile at moment of t_I

图 9 给出了 62.2 s, 65.2 s (即表 1 中的 $I = 1, 2$) 时刻 $z = 2 \text{ m}$ 与 $y = 2.5 \text{ m}$ 平面的温度与速度场图, 其中箭头表示速度的方向。可以清楚地看到在这半周期内, 火旋风中心由 x 轴正向进入负向。高温中心飘移的同时, 火焰本身也在自转。由垂直面图 a_2, b_2 可以看到火焰的纵向发展, 由其流场可以看出火焰本身以螺旋形式向上发展。

6 结论

笔者提出了一种研究建筑内火旋风中心飘移现象的分析方法。结合此方法, 应用大涡模拟技术对建筑内火旋风中心飘移现象进行了数值模拟研究, 得到了火旋风中心飘移的平均角速度、温度峰值、高温中心位置等重要参数。研究表明, 由于受到建筑内各种不对称条件的影响, 受到建筑空间的限制, 使其行为主要表现为高温中心在建筑受限空间内的飘移与火焰本身的自旋。火旋风是一种具有强大破坏力的火灾行为, 其高温中心的飘移增大了建筑内的过火面积, 破坏建筑构件, 增加了周围物体被点燃的可能性, 影响人员逃生。因此, 建筑内火旋风行为的研究对认识建筑火灾与建筑的性能化防火分析与设计具有重要的意义。

致谢: 本文有关研究得到国家自然科学基金重大国际合作研究项目与教育部留学回国人员科研启动基金资助。

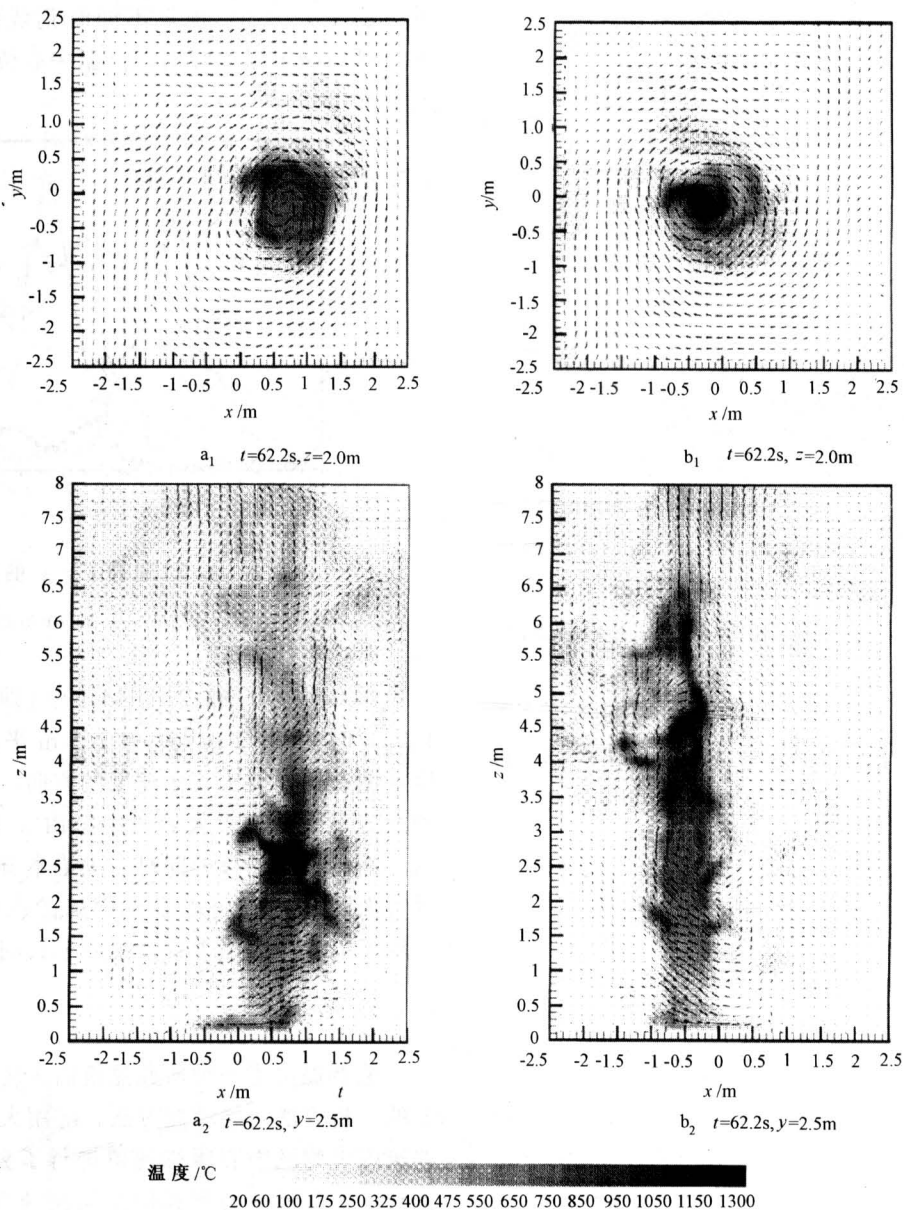


图9 不同时刻建筑截面的温度与速度分布图

Fig.9 Temperature and velocity distribution field of building section at different moments

参考文献

- [1] Emmons H W, Ying S J. The fire whirl, [A]. Eleventh Symposium (International on Combustion) [C]. Pittsburgh, PA: combustion Institute, 1967. 475 ~488
- [2] Soma S, Satio K. Reconstruction of fire whirls using scale models [J]. Combustion and Flame, 1991, 86 (3): 269~284
- [3] Satoh K, Yang K T. Experimental observations of swirling fires[J]. ASME HTD, 1996, 335(4): 393~400
- [4] Satoh K, Yang K T. Simulations of swirling fires controlled by channeled self-generated entrainment flows [A]. Fire Safety Science-Proceedings of the Fifth International Symposium [C]. Melbourne, Australia, International Association for Fire Safety, 1997. 201~212
- [5] Battaglia F, McGrattan K B, Rehm R G. et al. Simulating fire-whirls, Combust. Theory Modeling [J], 2000, 4(2): 123~138

(下转第 87 页)

Numerical Investigation of the Pressure Exponent in Gas Turbine Combustor Efficiency Similitude Study

Yang Rui¹, Wang Yingshi²

(1. State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230026, China;

2. Institute of Engineering Thermophysic, CAS, Beijing 100080, China)

[Abstract] The effect of combustion process on the pressure exponent N in gas turbine combustor efficiency similitude study is investigated by numerical simulation. It is suggested that for hydrocarbon fuel, the pressure exponent N may be selected as 1.6 ~ 2.0 when the combustion process is reaction-controlled. When the combustion process is diffusion controlled it may be selected as 1.0 ~ 1.4. The result of this paper would be useful for the modeling test of gas turbine combustor.

[Key words] combustor efficiency similitude study; pressure exponent; numerical simulation

(上接第 68 页)

[6] McGrattan K B, Forney G P, Foyd J E, et al. Fire Dynamics Simulator (Version 3), User's Guide. NISTIR 6784, [M]. 2002 Edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2002

Dynamics Simulator (Version 3), Technical Reference Guide. Technical Report NISTIR 6783 [M], 2002 Edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2002.

[7] McGrattan K B, Forney G P, Foyd J E, et al. Fire

[8] 高层民用建筑设计防火规范(GB50045—95)[S]. 2001. 34~42

A Discussion and Study on the Center Shift Phenomena of a Building Fire-whirl

Chen Changkun, Yao Bin, Fan Weicheng

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and
Technology of China, Hefei 230026, China)

[Abstract] Fire-whirl is a specific fire behavior, and has been taken as one important research area of fire safety. The earlier relative studies are mainly focused on the experimental reproduction of swirled flame and numerical simulation for the flame itself. However the behavior of fire-whirl is much different from the pure swirled flame. It is constructive to conduct performance-based fire protection analysis and design to understand these behaviors scientifically. In this paper, the behavior of building fire-whirl is studied, and an analytical method to describe and express the center shift phenomena of the building fire-whirl is presented. Combined with such method, the large eddy simulation (LES) technology is employed for numerical simulation of the center shift of fire whirl, and the important parameters such as average angular velocity, peak of temperature, location of the high-temperature center are obtained.

[Key words] fire-whirl; center shift; large eddy simulation; building