

高层建筑加压送风系统设计的实验研究

冯 瑞, 霍 然, 王冰凌, 张靖岩

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

[摘要] 讨论了风机置于建筑上部的多点加压送风系统的设计, 通过数值拟合的方法得出送风管道中的风速分布, 证明风速与加压风机的流量、送风管道的截面积以及管道的高度有关, 这对高层建筑加压送风系统的设计有着重要的意义。

[关键词] 高层建筑; 加压送风; 上部送风系统; 临界风速; 模拟计算

[中图分类号] TU998.4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)04-0079-07

1 前言

烟气被认为是火灾中最主要的杀手, 人员死亡大多由于烟气窒息或中毒而造成的^[1]。烟气通常由着火区域向建筑物的其他区域蔓延, 威胁人的生命及财产安全。楼梯井和电梯井经常被烟气充塞, 从而给人员安全疏散以及救援带来很大的困难。加压送风防烟方式是向防烟楼梯及其前室, 消防电梯前室或合用前室加压送风以造成一定的压力差, 从而防止烟气侵入这些疏散道。加压送风系统的设计包括最小允许压差、最大允许压差、加压送风防烟系统的风量、加压系统的送风方式、送风管道、加压送风风机的选型及安装位置等方面。

早在二战期间, 一些国家曾利用机械加压送风的方法来防止敌人投放的化学毒气和细菌侵入要害房间。战后和平时期, 有人利用机械加压送风的方法设计洁净厂房和无菌室。近几十年, 机械加压送风系统也被应用于建筑火灾中烟气蔓延的控制。美国国家防火协会(NFPA)^[2]和美国采暖制冷与空调工程师学会(ASHRAE)^[3]都对机械风机加压送风系统作为烟气控制系统进行过一些研究。其中 Tamura^[4,5]研究过一个工程设计, 该设计用一个可

调风速的旁通风机对楼梯间进行加压, 并且通过风机对着火层进行排烟。其研究得到美国采暖制冷与空调工程师学会的赞助支持。后来许多年, 这些系统得到进一步的发展, 一些基本的概念得到深入的讨论, 但是均未涉加压送风系统的有效区域。

作者通过实验以及模拟计算对加压送风系统进行评估, 找出影响加压送风系统有效区域的一些因素, 诸如风机的流量, 送风管道的横截面积等, 并将实验结果与模拟计算结果进行对比, 二者能较好相符。

2 实验分析

2.1 临界速度

Thomas (1970)^[6]曾经做过一些小尺寸的实验, 用以估计在走廊火灾条件下阻止烟气向上流动所需的气流。Heeled (1978)^[7]对隧道内相似流进行过研究。Riling^[8]研究了通过开启的门的烟气控制机械装置和条件。Tamura (1991)^[9]做了一系列的全尺寸火灾实验用以确定在一个楼梯井门开启条件下阻止烟气回流所需的气流速度。

为了说明火灾环境下供氧气流的问题, Thomas^[10]给出以下关系式:

[收稿日期] 2005-03-11

[基金项目] 国家重点基础研究专项经费资助项目(2001CB409604)

[作者简介] 冯 瑞(1982-), 男, 安徽颍上县人, 中国科学技术大学硕士研究生

$$V_k = K_v \left(\frac{E}{W} \right)^{1/3} \quad (1)$$

其中, V_k 为阻止烟气回流的临界速度, 单位为 m/s ; E 为释放到走廊的能量释放速率, 单位为 W ; W 为走廊宽度, 单位为 m ; K_v 为系数, 为 0.0292 。

这一关系式可以被用在当火灾发生在走廊内, 或者当烟气通过敞开的门、换气窗或者其他的开口进入走廊的情况。式中的临界速度可以表示不同大小的火灾情况下阻止烟气回流所需的气流速度。

由于在每一楼层的空气输入点的气流速度比较便于测量, 因此选择测量风速用以描述加压送风系统的效用。

2.2 实验设计及结果

安徽省合肥市某高层建筑共 29 层, 采用多点送风加压系统。在此系统中, 每一楼层有一个送风口。加压送风管道的横截面积为 $1 m^2$, 加压风机被安装在第 29 层, 风机风量为 $5.56 m^3/s$ 。一旦建筑的某一楼层发生火灾, 则发生火灾的楼层、及其上、下各一层, 共 3 个送风口被打开, 风机开始工作。因此实验的设计如下: a. 每次只有 3 个楼层的送风口被打开并进行测量。b. 所有送风口均被打开进行测量。实验结果如图 1 和图 2 所示。

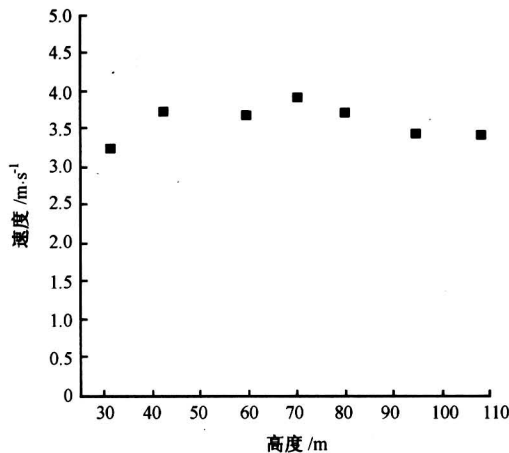


图 1 相邻三层的送风口打开时不同位置的平均风速分布

Fig.1 Average velocity distribution on difference location when air injection points work every 3 stories each experiments

从图 1 可以看出, 当火灾被控制在某一楼层时, 只有相邻 3 层送风口被打开, 加压风机开始工

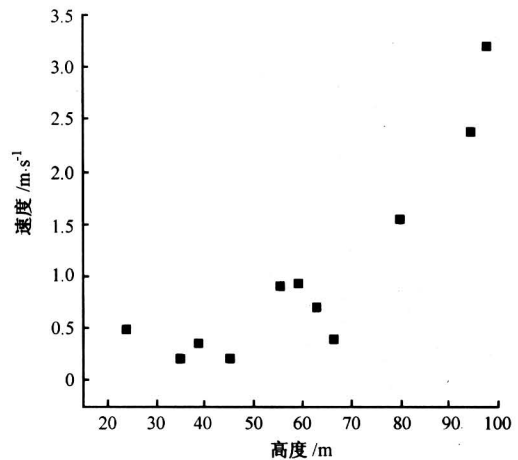


图 2 所有送风口同时打开时不同位置的平均风速分布

Fig.2 Average velocity distributions on difference location when all air injection points work at one time

作, 此时风速足够大, 可以获得足够的正压。图 2 显示当火灾蔓延速度比较快或者不同楼层同时发生火灾时, 所有送风口同时被打开, 此时远离加压风机的送风口处风速很小, 已经不能够获得足够的正压阻止烟气的蔓延。

2.3 实验结果分析

产生图 2 所示结果有如下原因:

- 1) 加压风机的风量不足。
- 2) 送风管道的泄漏损失。假定每米的空气泄漏损失速率为 c , 可得:

$$\theta = \left(\frac{cL}{Q'} \right)^2 = k_1 L^2 \quad (2)$$

其中, θ 为长度为 L 时的动压泄漏损失率; k_1 为常数, 即为 $(c/Q')^2$; L 为送风管道的高度, 单位为 m ; Q' 为送风井内特定截面上的空气流速, 单位为 m^3/s 。

- 3) 送风管道壁面的粘滞力。式 (3) 被用来计算粘滞力^[11]。

$$P_s = \lambda l l Q'^2 / S^3 \quad (3)$$

其中, P_s 为粘滞力, 单位为 Pa ; λ 为粘滞力常数; l 为送风管道周长; S 为送风管道截面积。因此, 可得到动压损失率为:

$$\begin{aligned} \phi &= P_s / P_d = (\lambda l l Q'^2 / S^3) / \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) \\ &= 2 \lambda l l / \rho S = k_2 L \end{aligned} \quad (4)$$

其中, ϕ 为动压损失率; P_d 为加压空气的动压; v

为加压空气的速度； k_2 为一常数，即为 $2\lambda l / \rho S$ 。

由式 (2) 和式 (4) 可以得出，动压损失率受粘滞力的影响，并且泄漏损失随着送风管道长度的增加而增大。

3 加压送风系统设计

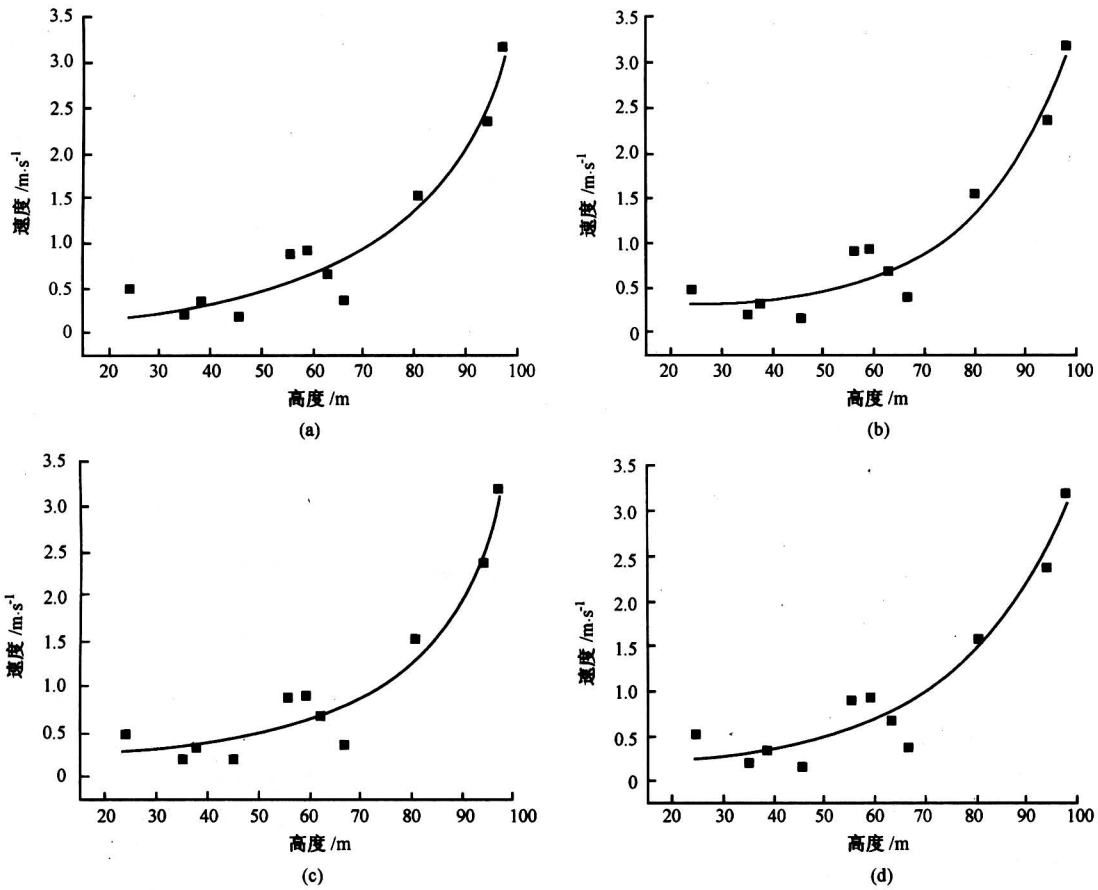
如前所述，动压损失随着离加压风机的距离加大而变大。如果距离超过某一特定值，那么动压将不能达到临界值，此时加压送风系统失效。影响动

压和风速的因素是什么呢？这些因素起到什么样的作用？先采用数值拟合的方法解决这些问题。

3.1 实验数据的数值拟合^[12,13]

使用了4种拟合方法。图3给出了这些方法的结果。通过相关系数及标准方差的比较，选择一种最好的拟合方法，结果如表1所示。

从表1可以看出，指数拟合的相关系数为最大，且其标准方差最小。根据误差理论，标准方差和相关系数两方面决定误差的大小，权衡这2个方面，最终选择指数拟合为最好的拟合方法。



(a) 双曲线拟合; (b) 指数拟合; (c) 乘幂拟合; (d) 三次多项式拟合

图3 实验结果的各种数值拟合方法的比较

Fig.3 Composition of four numerical value approach methods of tests

3.2 数值拟合的量纲分析^[14]

量纲分析的方法可以用于找到物理规律。在指数拟合的公式当中0.014 98和0.264 07的量纲是 m/s 和18.741 93的量纲为 m ，与它们相关的因素是 Q 和 S 。这里， Q 为加压风机的风量，因此有：

$$0.014\ 98[m/s] = c_1 [Q]^{a_1} [S]^{\beta_1} = c_1 [m^3/s]^{a_1} [m^2]^{\beta_1} \quad (5)$$

$$0.264\ 07[m/s] = c_2 [Q]^{a_2} [S]^{\beta_2} = c_2 [m^3/s]^{a_2} [m^2]^{\beta_2} \quad (6)$$

$$18.741\ 93[m] = c_3 [Q]^{a_3} [S]^{\beta_3} = c_3 [m^3/s]^{a_3} [m^2]^{\beta_3} \quad (7)$$

其中， $c_1, c_2, c_3, a_1, \beta_1, a_2, \beta_2, a_3, \beta_3$ 为待定系数。

表 1 实验结果的 4 种拟合方法的比较

Table 1 comparison of four approach methods of tests

拟合方法	公式	相关系数 (R^2)	标准方差 (Δ^2)
双曲线拟合	$v = \frac{0.005\ 39L}{1 - 0.008\ 64L}$	0.939 32	0.072 76
指数拟合	$v = 0.014\ 98e^{\left(\frac{L}{18.741\ 93}\right)} + 0.264\ 07$	0.939 40	0.072 2
乘幂拟合	$v = 0.348\ 09 + 9.177\ 9E - 10L^{4.75\ 384}$	0.937 99	0.073 88
三次多项式拟合	$v = (6.600\ 5E - 6)L^3 - 0.000\ 52L^2 + 0.017\ 84L + 0.033\ 39$	0.932 56	0.091 84

比较式 (5) 的左右两边, 可得:

$$\begin{cases} 3\alpha_1 + 2\beta_1 = 1 \\ \alpha_1 = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha_1 = 1 \\ \beta_1 = -1 \end{cases} \quad (8)$$

对式 (6), 式 (7) 式做同样处理, 可得待定系数计算如下:

$$\begin{cases} 3\alpha_2 + 2\beta_2 = 1 \\ \alpha_2 = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha_2 = 1 \\ \beta_2 = -1 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} 3\alpha_3 + 2\beta_3 = 1 \\ \alpha_3 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha_3 = 0 \\ \beta_3 = \frac{1}{2} \end{cases} \quad (10)$$

前面已知 Q 和 S 分别为 $5.56\ \text{m}^3/\text{s}$ 和 $1\ \text{m}^2$, 因此, c_1, c_2, c_3 计算得:

$$\begin{cases} c_1 = 0.002\ 69 \\ c_2 = 0.047\ 49 \\ c_3 = 18.741\ 93 \end{cases} \quad (11)$$

最终可得, 风速与送风管道位置的关系式:

$$v = \frac{0.002\ 69Q}{S} \left(e^{\left(\frac{L}{18.741\ 93S^{1/2}}\right)} + 17.654\ 28 \right) \quad (12)$$

3.3 加压送风系统的合理设计

式 (12) 表示加压风机的风量 (Q), 加压送风管道的截面积 (S) 和送风管道的高度 (L) 之间的关系。加压风机的风量增加, 则风速增加, 送风管道的截面积增大风速减小。因此当有效距离被设定为 L 时, Q 和 S 应该被合理的设定。反之, 如果 Q 和 S 由建筑的结构确定, 那么可计算有效距离 L , 并在建筑物的相应位置安装加压风机以保证送风系统的有效性。影响加压送风系统的因素很多, 其中建筑物的尺寸, 建筑物的气密性以及火灾发生的部位和建筑物内外温差、外部风力、风向、环境条件等对正压送风系统的效能都有很大的影响。必须综合考虑各方面的因素, 才能够对加压送风系统进行合理的设计。

4 数值模拟

4.1 数值模拟的计算模型

数值计算模拟就是在描述火灾过程的各种数学模型的基础之上, 分析研究火灾的发生、发展, 烟气的蔓延规律以及火灾对周围环境的作用。它可以大大节省研究和测试费用, 同时可通过设定多种火灾场景进行重复的模拟和演算。其关键在于建立可以准确描述火灾现象及其发展过程的数学模型, 常被称为“火灾模型”^[15]。现在常用的火灾模型有 2 种: 区域模型 (zone model) 和场模型 (field model, 也称为 CFD 模型)。

区域模型把所研究的受限空间划分为不同的控制容积 (即区域), 并且假定各个控制容积内的参数 (如温度、压力、密度等) 是均匀的, 在每个区域内分别运用质量、能量和动量守恒的原理, 用数学分析方法描述火灾过程。场模拟又称计算流体力学模型 (CFD), 它主要利用质量守恒方程、动量方程和能量方程, 将空间划分为一系列网格, 在每个网格内求解方程, 得到速度、温度、烟气各组份浓度等火灾参数在空间的分布及随时间的变化。场模型能较准确地分析空间各处的火灾状态及随时间的变化。但其控制方程复杂, 网格划分细密, 对计算机要求较高, 并需大量的计算时间, 有时在工程上并不很实用。作者主要采用美国 NIST 开发的 FDS (Fire Dynamic Simulator) 程序^[16,17] 进行模拟计算。

采用 FDS3 对送风井内流场进行全尺寸模拟计算, 模拟条件与实验条件相吻合, 所有送风口均打开。通过 FDS3 模拟计算得出每一层送风口处风速。

4.2 FDS3 模拟计算的结果

通过对 FDS 模拟计算的结果进行数据处理可得速度与高度曲线关系 (图 4)。

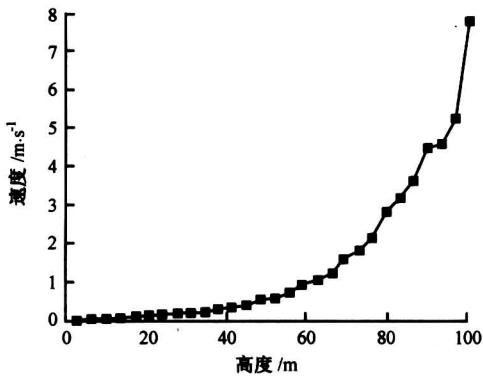


图4 所有送风口同时打开时不同位置的平均速度分布

Fig.4 Average velocity distributions on difference location when all air injection points work at one time

4.3 模拟结果的数值拟合

与实验数据处理相同，使用了4种拟合方法。图5给出了这些方法的结果。横轴表示送风口速度为 v 处对应加压送风管道的高度，纵轴表示加压送风管道高度为 L 时对应的送风口处风速。

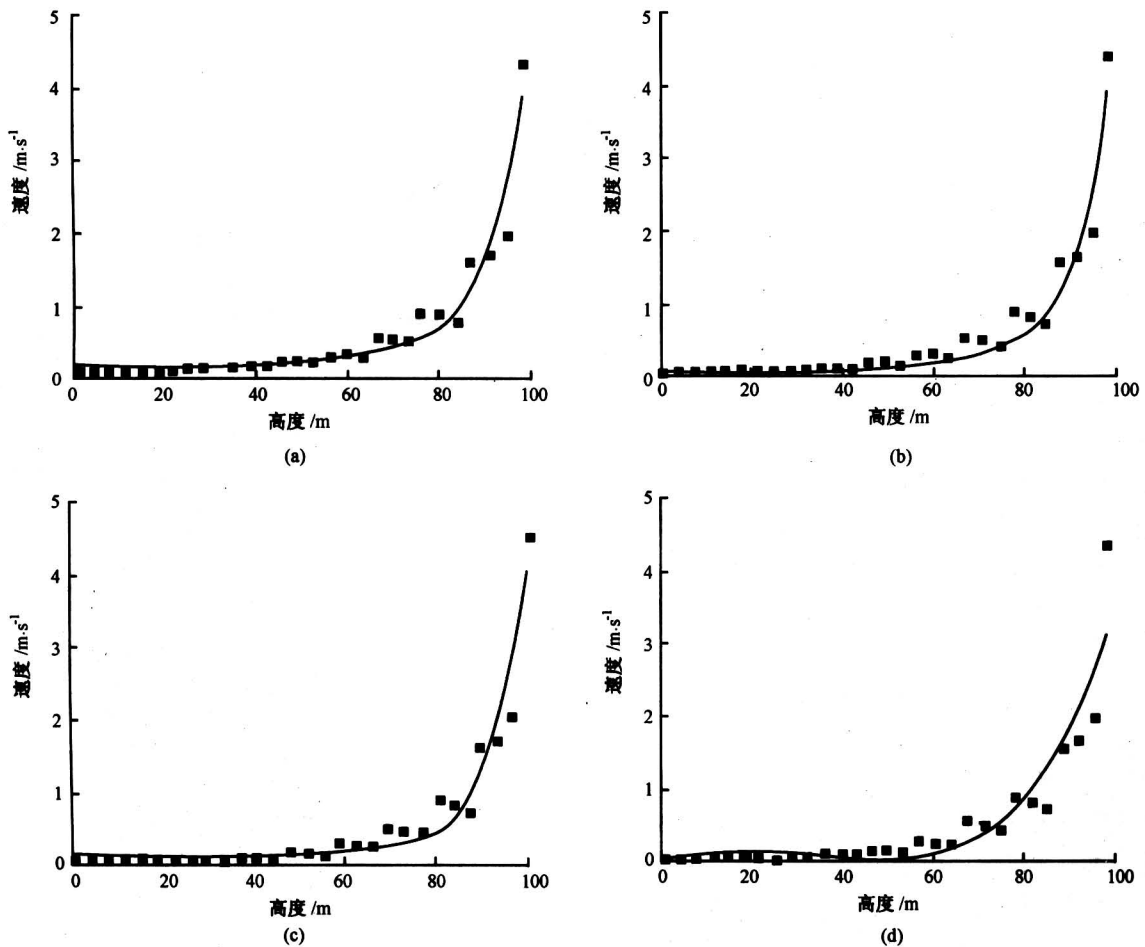
通过相关系数及标准方差的比较，选择一种最好的拟合方法，结果如表2所示

从表2可以看出，指数拟合的相关系数最大，并且指数拟合的标准方差最小。因此最终确定指数拟合为最好的拟合方法。

4.4 数值拟合的量纲分析

在指数拟合的公式当中0.051 96和0.029 22的量纲都是 m/s ，与它们相关的因素是 Q 和 S 。这里， Q 为加压风机的风量， S 为送风管道截面积。

同实验数据处理方法一样，可得风速与送风管



(a) 双曲线拟合; (b) 指数拟合; (c) 乘幂拟合; (d) 三次多项式拟合

图5 模拟结果的各种数值拟合方法的比较

Fig.5 Composition of four numerical value approach methods of simulation

表 2 模拟结果的 4 种拟合方法的比较

Table 2 Comparison of four approach methods of simulation

拟合方法	公式	相关系数 (R^2)	标准方差 (Δ^2)
双曲线拟合	$v = \frac{0.009\ 08L}{1 - 0.008\ 66L}$	0.981 64	0.072 85
指数拟合	$v = 0.051\ 96e^{\frac{L}{20.625\ 47}} - 0.029\ 22$	0.985 97	0.057 8
乘幂拟合	$v = 0.150\ 5 + 1.238\ 1E - 8L^{4.354\ 73}$	0.983 15	0.069 44
三次多项式拟合	$v = -0.275\ 86 + 0.046\ 84L - 0.001\ 48L^2 + 0.000\ 02L^3$	0.981 79	0.078 02

道位置的关系式:

$$v = \frac{0.009\ 35Q}{S} \left(\frac{1}{e^{20.625\ 47S^{1/2}}} - 0.562\ 57 \right) \quad (13)$$

5 实验与数值模拟的比较

由实验数据 (图 2) 与模拟数据 (图 4) 比较、数据拟合曲线 (图 3) 的 a 和 (图 5) 的 b 相比较及实验结果 (式 (12)) 与模拟结果 (式 (13)) 的比较可知: 实验数据和模拟数据拟合得出的均为指数曲线。另外实验所测得的速度中最大值约为 3.5 m/s, 而模拟结果中的速度最大值约为 4 m/s, 实验结果与模拟结果相比普遍降低了一些, 这说明了实验数据受一些不确定因素的影响造成速度损失, 而模拟情况下排除了这些影响, 速度损失较小。并且模拟结果得出的数据较好的符合拟合曲线。总的来说实验数据和模拟数据的总体趋势是一致的, 二者能较好的相符, 都是随着高度的下降速度很快的衰减。根据这两个方面的比较, 在设计风机置于建筑上部的加压送风系统的时候, 应考虑到速度随着高度的降低而快速的降低, 可以考虑增加风机的风量, 或者在不同楼层设置多部风机。

6 结论

通过实验测量和模拟计算并用数学的方法对多点上部送风系统进行了研究, 得出影响加压送风系统的因素以及它们所起到的作用。并对实验结果和模拟计算结果进行比较, 得出了风速随高度变化的一般规律。该研究可用于指导高层建筑的加压送风系统的安装及应用。

多点中部送风系统作者没有进行介绍。从式 (2) 和式 (4) 可以知动压损失率受粘滞力的影响, 并且泄漏损失随着送风管道长度的增加而增大。在同样的初始总动压下, 中部送风系统中的向上和向下的动压分别等于上部送风系统动压的 1/4, 因此

中部送风系统的有效距离要小于上部送风系统。同样, 不建议使用下部送风系统, 因为其动压的增长受地球引力的影响。

在火灾情况下, 为了使加压送风系统更加有效, 加压送风系统必须在需要的方向产生压差。火灾时由于热烟气的浮力作用, 建筑物内不同位置的压强不同, 受大气压力的变化, 风, 开门、关门和系统控制等因素的影响。加压系统在非火灾的情况下进行测量, 因此, 应考虑建筑物内的烟囱效应、风及门的状态等产生的影响。

参考文献

- [1] 霍然, 胡源, 李元洲. 建筑火灾安全工程导论 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999
- [2] NFPA. NFPA 92A, Recommended practice for smoke control systems [N]. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 1993
- [3] Klote J H. Design of smoke control systems for areas of refuge[J]. ASHRAE Transactions[J], 1993, 99(2): 793 ~ 807
- [4] Tamura G T. Fire tower tests of stair pressurization systems with overpressure relief[J]. ASHRAE Transactions, 1990, 96(2): 373 ~ 383
- [5] Tamura G T. Fire tower tests of stair pressurization systems with mechanical venting of the fire floor[N]. ASHRAE Transactions, 1990, 96(2): 384 ~ 392
- [6] Thomas P H. Movement of smoke in horizontal corridors against an air flow [J]. Institute of Fire Engineers Quarterly, 1970, 30(77): 45 ~ 53
- [7] Heselden A J M. Studies of fire and smoke behavior relevant to tunnels[A]. Borehamwood Herts UK: Building Research Establishment, 1978
- [8] Rilling J. Mechanism and conditions of smoke control through a door opening[A]. Champs Sur Maine France: Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB), 1980

- [9] Tamura G T. Determination of critical air velocities to prevent smoke backflow at a stair door opening on the fire floor[N]. ASHRAE Transactions, 1991, 97(2): 627 ~ 633
- [10] Thomas P H. Movement of smoke in horizontal corridors against an air flow [J]. Institute of Fire Engineers Quarterly, 1970, 30(77): 45 ~ 53
- [11] 过增元. 热流体力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1992, 42 ~ 86
- [12] 王德人, 杨忠华. 数值逼近理论[M]. 北京:高等教育出版社, 1990
- [13] 黄友谦, 李岳生. 数值逼近[M]. 北京:高等教育出版社, 1987
- [14] 霍 然. 工程燃烧概论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2001
- [15] 范维澄, 王清安, 姜冯辉, 等. 火灾学简明教程[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1995
- [16] Yin R, Chow W K. building fire simulation with a field model based on large eddy simulation[J]. Architectural Science Review, 2002, 45(2):145 ~ 153
- [17] McGrattan K B, Baum H R, Rehm R G, Hamins A, Forney G P. Fire dynamics simulator-technical reference guide. NISIR 6467[M], Gaithersburg, Maryland, USA: National Institute of Standards and Technology. 2000

Experimental Study on Design for Pressurization System in Tall Buildings

Feng Rui, Huo Ran, Wang Bingling, Zhang Jingyan

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

[Abstract] By experimental and computer simulation study, a design for pressurization system in a multiple injection system with upper injection is discussed and the velocity in duct is found by approach method. This velocity has a relation with volume flux from pressurization fan, section area of pressurization duct and height of duct. In factual situation, there is an important assistant meaning on researching the design of pressurization system in tall buildings.

[Key words] tall buildings; pressurization; upper injection system; critical velocity; simulation

(cont. from p.78)

Study on Natural Smoke Evacuation System Performance of Laoshan Bicycle Racing Centre

Zhang Heping, Zhang Qingwen, Yao Bin, Zhuang Lei, Wang Wei, Zhu Wuba

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

[Abstract] In this paper, performance-based fire safety design concept was adopted to analyze the fire safety objective that the smoke evacuation system of Laoshan bicycle racing centre should achieve, fire scenarios were designed and the performance of natural smoke evacuation system was studied by using CFD techniques. The velocity and temperature distributions during the fire was obtained by using numerical simulation method, the fact that people in the centre could be evacuated safely was proved and the building's fire safety objective was satisfied.

[Key words] bicycle racing centre; natural smoke evacuation; performance-based