

某奥运体育场馆排烟系统和补风系统性能化设计

付 强, 张和平, 朱五八, 谢启源

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027)

[摘要] 采用 NFPA92B 所提供的烟气控制计算公式对某奥运体育场馆的排烟量进行计算, 并利用 CFD 数值模拟软件对排烟系统及补风系统进行优化设计, 研究在该体育场馆内机械排烟, 机械补风, 自然补风三者之间的内在联系以及机械补风量对某馆排烟系统的影响。对该奥运体育场馆排烟系统以及补风系统的优化设计提供了理论依据。

[关键词] 体育馆; 排烟系统; 补风系统; 性能化

[中图分类号] TK121 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)12-0021-05

前言

为了迎接 2008 年奥运会, 北京开始修建了各种比赛场馆。由于奥运会是全人类的盛会, 因此, 奥运场馆的安全问题显得尤为突出和重要。由于没有体育场馆的相关防火规范作参考, 因此普遍采用性能化防火设计方法对其烟控系统进行设计。补风系统是大空间机械排烟系统的重要组成部分, 它能直接影响机械排烟系统的效率。机械补风的大小、位置及分布都可能使烟气的稀释和排出受到影响, 所以在性能化防火设计中不仅要对其排烟量的大小进行优化, 而且还要对补风系统进行优化。作者在确定机械补风口的位置以及对称分布的情况下, 通过 FDS4.06 软件模拟计算结果对该体育场馆的机械排烟与机械补风、自然补风的相互作用进行了初步的探讨。并通过模拟计算结果的对比, 分析了该体育馆机械补风量对机械排烟的影响。

1 工程概况及场景设计

该奥运场馆总建筑面积 26 900 m², 固定看台 5 357 座, 活动看台 2 200 座, 体育馆主体建造地上 1 层, 附属看台 3 层, 局部 4 层。建筑檐口高度

21.5 m, 建筑屋脊高度 28.1 m。

火源对体育场馆烟气控制系统有重要影响, 因为火源的状况决定着烟气的产生量、状态参数及其流动的驱动力, 从而对烟气的流动和蔓延产生决定性的影响。在火灾场景设计中, 一般有 2 种火源模型可供选择, 即定常火源和非定常火源。定常火源是一种理想化的考虑, 实际火灾的火源功率总是随时间变化的。通常有多种方法描述火源功率的增长过程, 其中时间平方增长火是工程上应用较多的一种, 其火源功率随时间变化可由式 1 描述。

$$Q_t = \alpha t^2 \quad (1)$$

式中 α —增长系数(kW/s), 一般分为 4 种, 慢火 0.002 931 kW/s, 中速火 0.011 27 kW/s, 快速火 0.046 89 kW/s 和超快速火 0.187 8 kW/s; t —燃料燃烧时间(s)。

火源面积和火源功率(热释放速率)是火源的两个特征参数。在工程应用中, 英国标准规定最小火源面积为 9.3 m², 对于火灾荷载为 500 kW/m² 的中庭间, 最小火灾规模是 4.6 MW, 对于火灾荷载 250 kW/m² 的商业空间, 最小火灾规模是 2.1 MW^[1]。针对该体育场馆, 考虑用作商业活动演出时, 火灾发生于比赛大厅的场芯。主要的可燃

[收稿日期] 2007-01-06

[基金项目] 国家科技支撑计划资助项目(2006BAK06B02-3); 国家重点基础研究专项经费资助项目(2001CB409603); 国家自然科学基金重点资助项目(50323005)

[作者简介] 付 强(1982-), 男, 湖北广水市人, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室博士研究生

物为舞台灯光、音响设施、布景、道具、服装等。因此选取时间平方增长-稳定火模型,最大火源功率 5 MW, $\alpha = 0.04689 \text{ kW/s}$ 作为该场景火灾规模的设计值。图 1 给出了火源功率的增长曲线。

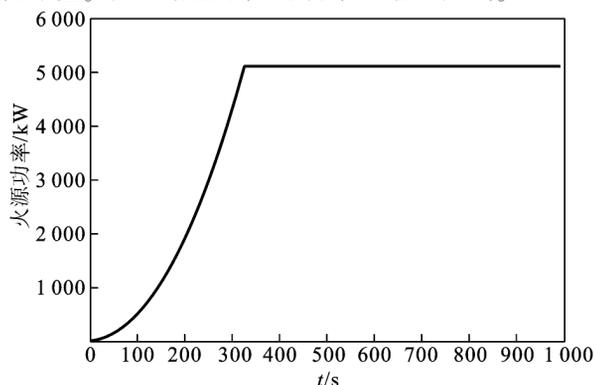


图 1 火源功率随时间的变化曲线

Fig. 1 Curve of heat release rate

可燃物的烟粒子生成率的大小直接影响数值模拟能见度值。假设可燃物由 50% 质量分数的纤维材料(木材、纸张、纸板等)和 50% 质量分数的合成材料(如塑料、橡胶、纺织品、聚亚胺酯泡沫)组成,确定烟气质量生成率为 0.05。

2 排烟系统和补风系统设计

机械排烟是常用的一种烟气控制方法。多年来,人们对机械排烟进行了一些研究。在理论上,多数分析基于烟气-空气双区模型^[2,3]。而在区域模拟方法中,认为烟气和空气在界面处不发生质量和能量交换,其交换只是通过羽流进行^[4]。当着火建筑体积较小时,烟气温度较高,烟气浮力较大,与冷空气之间的分层比较明显。若在建筑物顶棚安装排烟风机,底部开有补风口,空气补充与烟气排出是一个置换过程^[5,6]。

根据工程实际需求,该体育场馆烟控系统应在所规定的疏散时间内,能保持疏散通道中一定的安全环境以便于人员撤退。作者重点研究了补风对排烟效果的影响。

2.1 排烟量的计算

在进行体育场馆排烟系统设计的过程中,需要确定机械排烟系统的排烟量。中庭排烟性能化设计中,排烟量的确定一般可考虑以下三种情况^[7,8]:

- a. 排烟量大于火灾时产生的烟气量;
- b. 排烟量等于火灾时产生的烟气量,且烟气层的高度要大于一个临界高度,即保证人员安全疏散的高度;
- c. 排烟量小于火灾时产生的烟气量,但是烟气层的高度下

降到临界高度时,人员已经疏散完毕。

作者设计的机械排烟量将考虑第二种情况,即机械排烟只排除烟气层的部分烟气,以使烟气层始终保持在临界高度以上而维持底层空间一定的清晰度。为此,首先需要确定烟气层临界高度,一般选择有人活动的地面之上 2 m 的位置作为排烟设计的烟层临界高度。体育馆看台最高点为 16.5 m,因此选取 $Z = 18.5 \text{ m}$ 作为临界高度。按照 NFPA92B 所提供的烟气控制计算公式进行排烟量的计算(见式 2~式 4)^[4]

$$Q_c = 0.7Q \quad (2)$$

式中, Q —热释放速率(kW); Q_c —热释放速率的对流部分(kW)。

可认为排烟风机从烟气层排出的烟气流量等于烟羽流入烟气层的流量,而烟羽流的质量流量可以按 NFPA92B 推荐的方程计算(见式 3):

$$m_{pl} = 0.071 Q_c^{1/3} Z^{5/3} + 0.0018 Q_c \quad (3)$$

其中, m_{pl} —羽流的质量流率(kg/s); Z —距离燃烧表面之上的高度。

烟羽流的体积流量可以用公式(4)表示

$$V = \frac{m_{pl}}{\rho_0 T_0} \left[T_0 + \frac{Q_c}{7 m_{pl} c_p} \right] \quad (4)$$

其中: V —羽流的体积流量(m^3/s); m_{pl} —羽流的质量流率(kg/s); ρ_0 —环境空气的密度(kg/m^3); T_0 —环境温度(K); Q_c —对流热释放速率(kW); c_p —空气的比定压热容($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

由式(3)和式(4)可计算得出烟层临界高度 18.5 m 处的烟气体积流量约为 $201\ 600 \text{ m}^3/\text{h}$ 。假设有效排烟量等于烟气流入量,则有效排烟量应为 $201\ 600 \text{ m}^3/\text{h}$ 。假设排烟系统的排烟效率为 0.7,则排烟风机的容量约为 $288\ 000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。因此,该体育馆选用的风机流量为 $288\ 000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

2.2 体育场馆烟气运动的场模拟

场模拟能细致地描述火灾中的燃烧、流动和传热过程,是研究火灾过程的重要方法。FDS (Fire Dynamics Simulator) 是 NIST 开发的一种燃烧过程中流体流动的场模拟软件,主要用于分析火灾中烟气与热的运动过程。针对设定的一个火灾场景和确定的排烟量,采用 FDS4.06 软件对体育场馆的烟气流动进行数值模拟。

场模拟首先要细化整个计算空间,由于体育场馆的空间非常大,而着火区域相对来说很小,计算时既要考虑到运算时间不能太长,又要真实地反映出着火

区域的状态,为此采取了如下的网格划分方式:网格划分为每边 0.5 m 的立方体网格,在火源附近加密划分为每边 0.25 m 的立方体网格。总网格数量为 1 826 696 个。在建立模型时考虑主要对外出口作为自然补风口,次要出口基于保守考虑都视作封闭,并对一些出口进行了合理的简化。另外考虑到人员疏散时身体会占据出口空间下方,身体上方出口空间才能作为自然补风口。人的平均身高为 170 cm。每个出口宽度为 3 m,高为 2.5 m,所以每个出口处自然补风口的有效面积为 $3\text{m} \times (2.5\text{m} - 1.7\text{m}) = 2.4\text{m}^2$ 。机械补风口设在场芯四周,共八个,均匀布置。考虑了机械补风量分别为排烟量的 50%,20% 和 0 的三种情况。机械排烟和机械补风在发生火灾后 120 s 同时启动。图 2 给出了火灾场景示意。

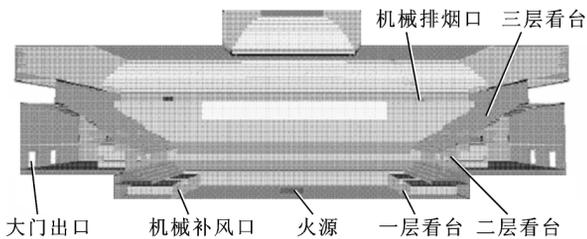


图 2 火灾场景示意图

Fig. 2 Sketch map of fire scenarios

场模拟中烟气层的边界没有统一的标准定义,针对大空间建筑, Ray Sinclair 建议使用能见度 7.6 m 来定义烟气层边界。选用能见度为 10 m 作为判断烟气层边界的标准更保守些。图 3 ~ 图 5 分别给出了不同机械补风情况下体育馆纵剖面方向上 900 s 时能见度分布情况。

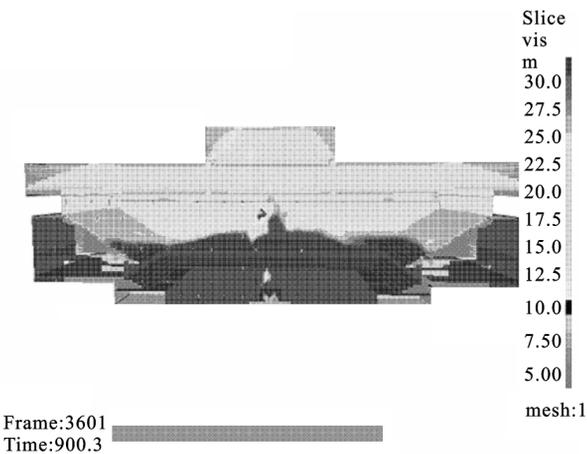


图 3 机械补风量为 $14.4 \times 10^4\text{m}^3/\text{h}$ 时纵剖面能见度图

Fig. 3 Profile of visibility on the longitudinal surface at the mechanical ventilation of $14.4 \times 10^4\text{m}^3/\text{h}$

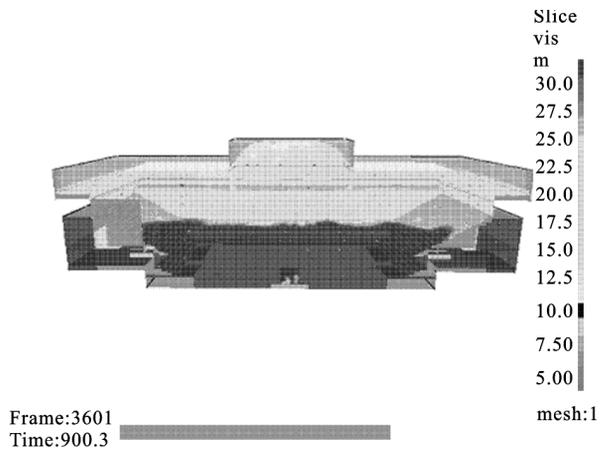


图 4 机械补风量为 $5.76 \times 10^4\text{m}^3/\text{h}$ 时纵剖面能见度图
Fig. 4 Profile of visibility on the longitudinal surface at the mechanical ventilation of $5.76 \times 10^4\text{m}^3/\text{h}$

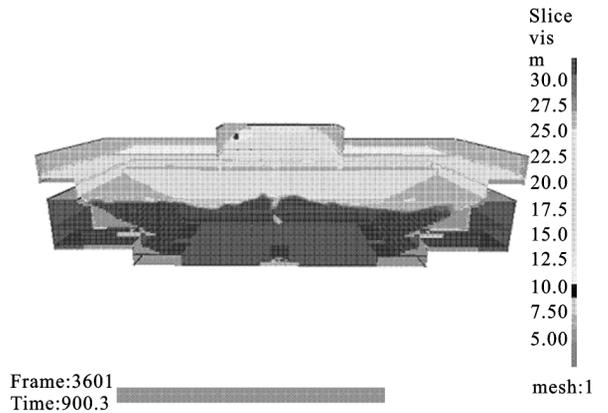


图 5 机械补风量为 0 时纵剖面能见度图
Fig. 5 Profile of visibility on the longitudinal surface at no mechanical ventilation

2.3 自然补风口风速模拟

在 FDS 模拟中在每个看台出口处的设置 THCP 探针的方式测量模型在各个自然补风口处的风速,然后各层看台风速取平均值。空气流速大于 0 说明馆外空气流向馆内,小于 0 说明馆内空气流向馆外。图 6,图 7,图 8 分别为机械补风量为排烟量的 50% ($144\,000\text{m}^3/\text{h}$),20% ($57\,600\text{m}^3/\text{h}$) 及无机械补风的情况下各层看台出口处新鲜空气进入体育馆内平均流速。

从图 6,图 7,图 8 可以看出在 120 s 以前风机未启动时,一层看台自然补风口空气流速较小,室内空气先通过一层看台流向室外,后又流向室内;二、三层看台馆内空气一直以小流速流向室外。可以这样

解释这种现象:在风机未启动时,馆内空气被火源加热,馆内空气膨胀必然导致空气流向室外,另一方面一层看台出口附近处空气还受到火羽流的卷吸作用迫使空气流向火源下方。当一层看台出口处内外空

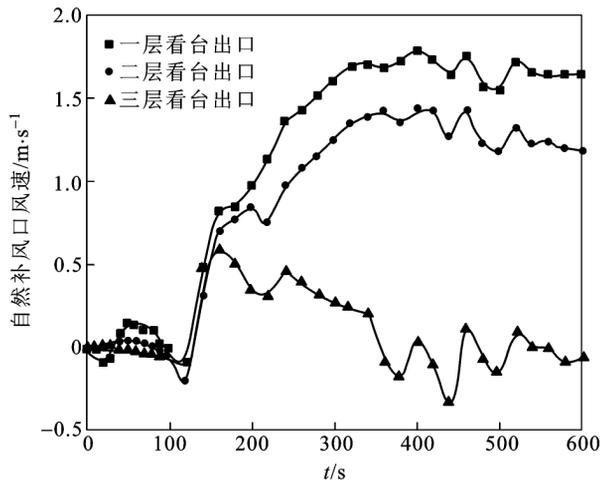


图6 机械补风量为 $14.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 时自然补风口风速
Fig. 6 The velocity on the air – supplement at the mechanical ventilation of $14.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$

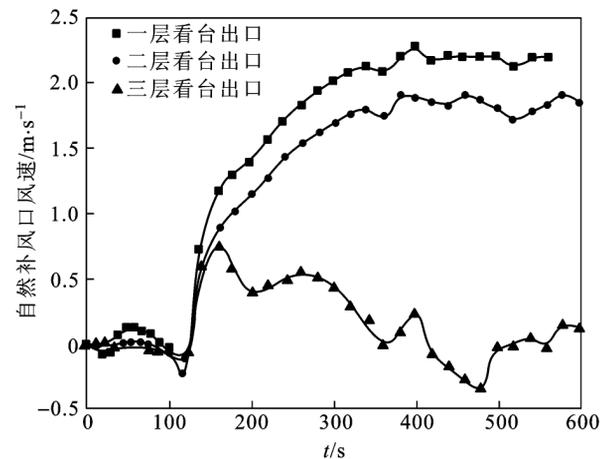


图7 机械补风量为 $5.76 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 时自然补风口风速
Fig. 7 The velocity on the air – supplement at the mechanical ventilation of $5.76 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$

气压差大于火羽流的卷吸作用在一层看台出口处造成的负压时,空气通过一层看台流向馆外,反之则由馆外流向馆内。二、三层看台出口处空气所受到的火羽流的卷吸作用较小,所以馆内在 $0 \sim 120 \text{ s}$ 这段时间内都是流向室外或者基本上没有流动。从图7可以看出一层各个看台出口空气平均流速在

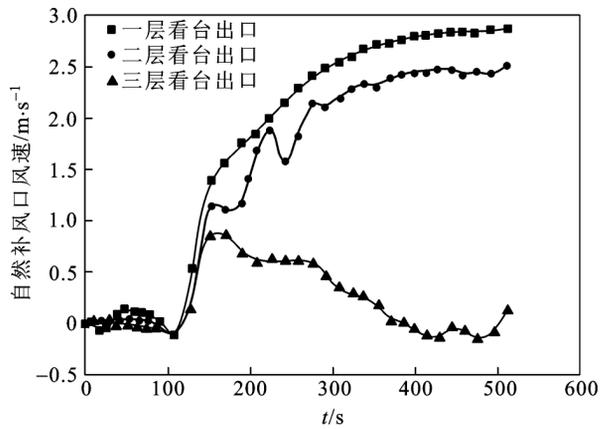


图8 机械补风量为 0 时补风口风速
Fig. 8 The velocity on the air – supplement at no mechanical ventilation

$2 \sim 2.5 \text{ m/s}$ 之间达到稳定;二层各个看台出口空气平均流速在 $1.5 \sim 2.0 \text{ m/s}$ 之间达到稳定,自然补风口速度平均比图6增加了 0.5 m/s ;三层看台出口最高补风速度不超过 0.8 m/s ,比图6略高,这些都是机械补风量降低强化了自然补风的结果。从图8可以看出:一层各个看台出口空气平均流速在 $2.5 \sim 3.0 \text{ m/s}$ 之间达到稳定,二层各个看台出口空气平均流速在 $2.0 \sim 2.5 \text{ m/s}$ 之间达到稳定,三层看台出口最高补风速度不超过 0.9 m/s ,之后下降,在 400 s 时补风速度为0,以后补风速度在 $-0.2 \sim 0.2 \text{ m/s}$ 之间波动。在没有机械补风的条件下补风口平均速度只比有 50% 机械补风情况下增加了 1 m/s 。

2.4 讨论与分析

关于大型体育馆排烟量的计算,我国没有明确的规定,如果排烟量按照中庭排烟的4次换气计算,该体育场馆空间约为 $102\,400 \text{ m}^3$ 相对应的排烟量为 $409\,600 \text{ m}^3/\text{h}$ 。而采用性能化方法对排烟量进行分析计算,得出的排烟量为 $288\,000 \text{ m}^3/\text{h}$,仅为规范要求的 $2/3$ 。通过性能化设计方法得出的排烟量仍能保证体育馆内的消防安全,同时也节约了成本。

通过对比在 $288\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 机械排烟量的前提下, 50% 机械补风、 20% 机械补风、无机械补风三种情况烟气层高度,可以看出烟气层高度差别不大,都能够保证在火灾 900 s 后不会对人员疏散造成威胁。

在一、二、三层看台出口中,一层看台出口补风速度最大,效果较好;其次是二层看台出口;三层看台出口效果较差。主要原因是排烟风机以及火羽流在一层看台造成的负压起到了协同效应,强化了补

风,同时三层看台由于需要通过楼梯连接到室外,通风路径较长以及烟气沉降的原因造成补风困难。

3 结论和建议

1) 工程应用表明体育场馆烟气管理系统采用性能化设计方法既能满足体育场馆消防安全需求,又可以合理地优化烟控系统。因此在大空间场所人员疏散设计中应用性能化设计思想,可以使安全性与经济性都得到保障。

2) 该体育场馆中,机械补风对该体育馆烟气运动影响不是很大,起主导作用的是自然补风。因此可以取消机械补风,同时在保证看台出口宽度的条件下可以适当增加一、二层看台出口的高度,以增加自然补风口面积获得更理想的自然补风效果。

参考文献

[1] 霍然,胡源,李元洲. 建筑火灾安全工程导论[D]. 合肥:中国科学技术大学,1999

- [2] Tanaka T, Yamana T. Smoke control in large scale spaces 2 Part 1 & 2 [J]. Fire Science & Technology, 1985, 5(1):31~54
- [3] Lougheed G D, Hajisophocieous G V. Investigation of atriumsmoke exhaust effectiveness [J]. ASHRAE Transactions: Symposia, 1997, 103(Part2): 519~533
- [4] 范维澄,王清安,等. 火灾科学导论[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,1993
- [5] Yuan Xiaoxiong, Chen Qingyan, Glicksman L R. A critical review of displacement ventilation [J]. ASHRAE Transactions: Research, 1998, 10⁴(Part1A):78~90
- [6] Hunt G R, Linden P F. The fluid mechanics of natural ventilation 2 displacement ventilation by buoyancy 2 driven flow assisted by wind [J]. Building and Environment, 1999, 34:707~720
- [7] 易亮. 中庭式建筑中火灾烟气的流动与管理研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2005
- [8] 李元洲,易亮,等. 大空间内机械排烟效果的实验研究[J]. 自然灾害学报,2004,13(4):151~155
- [9] NFPA92B. Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas[S]. 2000

The Performance-based Design of the Smoke Evacuation and Ventilation System in an Olympic Gymnasium

Fu Qiang, Zhang Heping, Zhu Wuba, Xie Qiyuan

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

[Abstract] This paper makes a calculation of the smoke evacuation volume in a certain Olympic gymnasium by using the smoke control formula from NFPA92B, and makes an optimization design of the smoke evacuation and ventilation system by using the Computational Fluid Dynamics (CFD) stimulation software. It also discusses the inner relationship among the mechanical smoke evacuation, the mechanical ventilation and natural ventilation as well as the influence of the mechanical ventilation volume on the smoke evacuation system in the Olympic gymnasium, which provides the theoretical basis for the optimization design of the smoke evacuation and ventilation system in the Olympic gymnasium.

[Key words] gymnasium; smoke evacuation system; ventilation system; performance-based