



具有上部侧墙开口的大空间建筑室内热环境特性研究^{*}

上海理工大学 黄 晨[☆] 王 昕 杨建刚 黄武刚

摘要 采用前期 CFD 模拟与现场实测的研究结果,针对具有上部侧墙开口的大空间建筑,在侧喷送风的条件下,模拟分析了不同喷口形式和上部开口高度、上下开口面积、上部开口进风风速、室内发热量时的室内热环境特性。

关键词 大空间建筑 上部开口 室内热环境 数值模拟

Research on indoor thermal environment characteristics in the large space building with upper-side openings

By Huang Chen[★], Wang Xin, Yang Jian'gang and Huang Wugang

Abstract Using the results of previous CFD simulation and site measurement, analyses the indoor thermal environment characteristics in different nozzle modes and upper opening height, upper and lower opening areas, supply air velocity through upper openings and indoor heat gain under upper-side supply conditions.

Keywords large space building, upper opening, indoor thermal environment, numerical simulation

★ Shanghai University of Technology, Shanghai, China

①

0 引言

由于通风和结构等要求,几乎所有大空间建筑上部均设有开口。采用分层空调时,在热源和自然通风等因素的作用下,室内垂直方向上温度分层现象突出,为满足室内新风要求,空调系统送风量往往大于回风量,因此,上部开口在风压较小时往往起排风作用。从全年变化的室外气温看,冬季上部开口排风会增加室内负荷,而夏季大部分时间可利用上部开口处的高温排风带走室内部分负荷,在过渡季节,常常关闭空调系统仅靠建筑上下开口的自然通风排走室内负荷,因此上部开口对全年节能有利有弊。有效利用上部开口便成为大空间建筑节能工作的一个方向,而研究大空间建筑分层空调时上部开口等诸因素对室内热环境特性的影响就显得尤为重要。

本文在大空间建筑室内温度场和速度场数值模拟研究的基础上^[1],继大空间建筑上部顶部开口热

工特性研究之后^[2],对具有上部侧墙开口的大空间建筑在侧喷送风方式的条件下,选择具有代表性的计算工况,数值模拟并讨论夏季分层空调在喷口形式、上部开口高度、上下开口面积、迎风面上部开口处室外进风风速、室内发热量不同时的室内热环境特性,为获得有效利用上部开口的方法提供理论依据。

1 模拟条件

1.1 建筑模型

图 1 和图 2 为数值模拟用某体育馆建筑结构及室内各送回风口和上下开口布置图。建筑柱型部分直径 68 m,高 18 m,屋顶呈扁球体,净高为 8 m,左右两侧为阶梯型观众席,采用中侧喷口送风,由 38 个 Ø550 喷口组成环形对中喷射,其中 28 个短程喷口向下倾斜 12°布置,向观众席送风,10

①☆ 黄晨,女,1958 年 5 月生,工学博士,教授,系主任
200093 上海理工大学建筑环境与设备工程系
(021) 65679144

E-mail: hcyhy@public3.sta.net.cn

收稿日期:2003-09-01

修回日期:2004-02-16

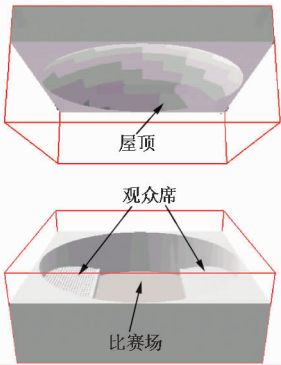


图 1 模拟用建筑结构
个长程喷口水平布置，向比赛场内送风。回风则采用以台阶均匀回风为主、侧墙回风为辅的方式。数值模拟的主要参数见表 1(人员活动主要集中在比赛场内)。模拟时上部结构开口及排风扇看作上部侧墙开口，观众席入室大门及渗透缝隙看作下部开口。

个长程喷口水平布置，向比赛场内送风。回风则采用以台阶均匀回风为主、侧墙回风为辅的方式。数值模拟的主要参数见表 1(人员活动主要集中在比赛场内)。模拟时上部结构开口及排风扇看作上部侧墙开口，观众席入室大门及渗透缝隙看作下部开口。

尔兹曼常量, $W/(m^2 \cdot K^4)$; G_{ij} 为表面 i 对表面 j 的 Gebhart 吸收系数; G_{Ui} , G_{Di} 分别为平面辐射热源上、下表面对 i 表面的 Gebhart 吸收系数; Q_U , Q_D 分别为室内空中照明平面向上辐射分量和向下辐射分量, W ; q_{ki} 为 i 表面导热散热量, W/m^2 。

热平衡方程组中视悬挂的照明辐射源为平面辐射源, 并假定因灯罩影响上下辐射量不同。数值模拟时认为人体负荷和照明的对流负荷均匀分布于比赛场中, 分别以 $56\text{ m} \times 32\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 和 $56\text{ m} \times 32\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 的内热源设置在 0 m 和 12 m 的高度上。模拟网格数为 $85 \times 51 \times 87$ 。

1.3 模拟工况与室内热环境参数

上部侧墙开口影响室内热环境的主要参数有送风喷口高度、上部开口面积及其高度、下部开口面积等几何结构参数, 以及室内负荷、迎风面上部开口进风速度等运行参数。表 2 列出了各模拟工况的参数。通过模拟计算对室内垂直温度分布、空调区温度、上部开口排风温度、上部开口排风量、室内通风排热量 5 个热环境参数进行分析。其中室内垂直温度分布以比赛场为讨论对象; 空调区温度为比赛场垂直方向上的空气平均温度, 一般随高度增加空气温度升高, 因此定义温度不偏离垂直方向平均温度的 1% 的区间为等温空调区; 排风温度为上部开口排向室外的空气温度, 它基本反映了排风口处室内周边的空气温度状况; 室内通风排热量为室内因上下开口引起的总通风排热量, 定义通风排热为正, 得热为负。室内通风排热量是衡量建筑在开口作用下室内自然通风总排热的状况, 它不仅反映了上部开口排热量的大小, 也反映了下部开口进风带入室内热量的大小。无论开口结构形式如何变化, 建筑开口所引起的室内通风排热量越大越好, 它是开口节能性的一个标志。

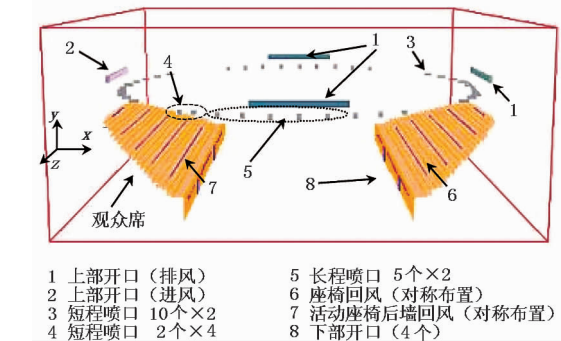


图 2 室内各模拟送回风口、上下开口布置图

表 1 夏季现场实测日工况^[3]

送风量/(kg/s): 34.57	回风量/(kg/s): 31.31	送风温度/℃: 16.5
室外气温/℃: 36.5	环形外走廊平均温度/℃: 32.0	下开口进风温度/℃: 28.0
日射得热量/(W/m ²): 767	人体负荷/kW: 18.1	照明负荷/kW: 45
传热系数/(W/(m ² · K)): 屋顶 2.75 外墙 2.48 内墙 2.59 楼板 2.21		

1.2 数学模型及其边界条件

选用 Lam-Bremhorst 低雷诺数 $K-\epsilon$ 模型^[4], 并采用第一类边界条件。边界条件以热平衡为基础, 利用 Gebhart 吸收系数, 借助现场实测数据, 通过建立表面 i 的热平衡方程组求解^[5]:

$$h_i(\bar{T}_i - \theta_i) - 4T_m^3 \epsilon_i \sigma \sum_{j=1}^N G_{ij}(\theta_i - \theta_j) + G_{Ui} \frac{Q_U}{S_i} + G_{Di} \frac{Q_D}{S_i} + q_{ki} = 0 \quad (1)$$

式中 h_i 为 i 表面的表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; T_m 为室内各表面面积加权平均温度, K , $T_m = \sum_{j=1}^N S_j T_j / \sum_{j=1}^N S_j$; S_i , S_j 分别为 i , j 表面的面积, m^2 ; $\bar{T}_i$ 为 i 表面空气温度 T_{ai} 与 T_m 之差, K , $\bar{T}_i = T_{ai} - T_m$; θ_i , θ_j 分别为 i , j 表面内侧壁温与 T_m 之差, K , $\theta_i = T_i - T_m$, $\theta_j = T_j - T_m$; T_i , T_j 分别为表面 i , j 的内侧壁温, K ; ϵ_i 为 i 表面的发射率; σ 为斯忒藩-玻

表 2 模拟计算工况

变化参数	参数计算工况	记号
喷口高度/m	13, 15	N13, N15
上部开口高度/m	15, 17, 19	IN15, IN17, IN19
下部开口面积/m ²	0, 0.93, 1.86, 3.72	0F, 1F, 2F, 4F
上部开口面积 ¹⁾ /m ²	56, 10.45	SO, WO
上开口进风风速/(m/s)	0, 0.863, 1.5, 2.25, 3	ALLEXH, UPIN08, UPIN15, UPIN23, UPIN30
室内发热量/kW	63.1, 157.75, 315.5, 631	1Q, 2.5Q, 5Q, 10Q

1) 上部开口的进、排风面积之比为 1:3。

2 计算结果与分析

2.1 垂直温度分布

图 3 为上部开口结构参数、室内热环境运行参数不同时的室内垂直温度分布。图 3 中各垂直温

度分布曲线具有显著的相似性。空调区温度基本呈等温特性,空调区高度接近喷口安装高度,室内空调分层效果良好,非空调区温度从分层面始先急剧上升,后缓慢攀升,室内垂直温度分布特征基本

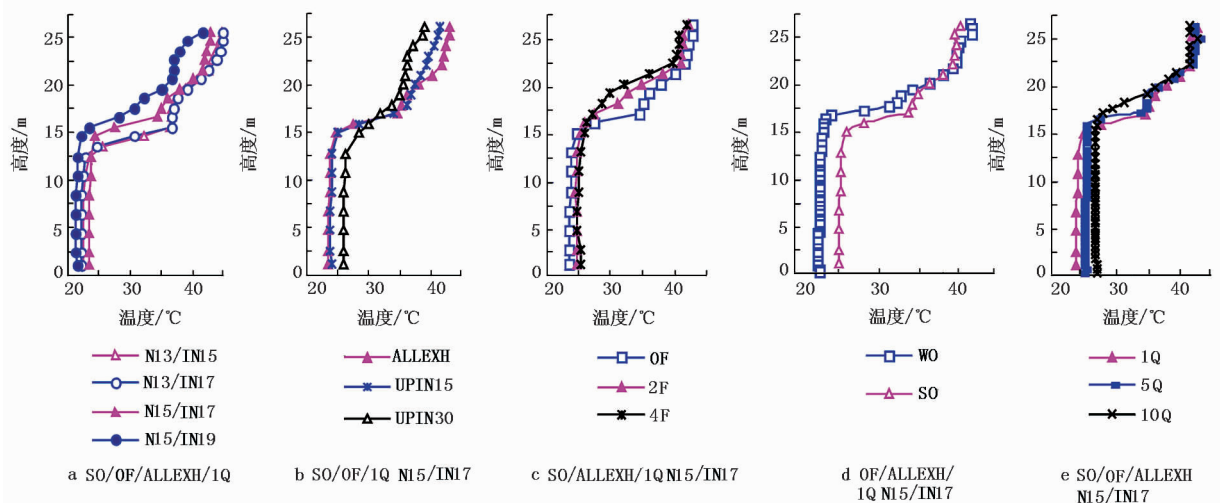


图 3 不同开口结构参数和室内运行参数时的垂直温度分布

符合大空间建筑的三区分层模型^[6]。由图 3 各曲线可以看出,对等温空调区影响较大的是上部开口面积,上部开口面积越大,等温空调区温度越高;其次,增加室内热源,等温空调区域温度也将提高;此外,室外风速较大、喷口安装高度较高时,提高上部开口高度会使等温空调区温度增加,而下部开口进风温度为 28℃ 时,其面积在计算范围内对等温空调区温度影响不大。对非空调区域温度影响较大的是上部开口迎风面进风速度,进风速度越大,非空调区域温度越低;其次,当喷口高度较高(15 m)时,随着上部开口高度增加,非空调区域温度下降较多;上下部开口面积、热源的大小对顶部非空调区温度影响不太显著。对室内上下温差影响较大的是上部开口面积和迎风面进风速度,上部开口面积较大、上部开口处进风速度较大时,都会减小上下空气温差。

2.2 空调区平均温度及上部开口排风温度

图 4 分别为不同组合工况下空调区温度 t_n 和上部开口排风温度 t_p 随开口高度、下开口面积、上部开口迎风面进风风速以及室内发热量的变化曲线。分析图中各曲线可以看出,空调区温度随下开口面积、上开口面积、喷口高度、迎风面进风风速、室内发热量增加而增加,且随室内发热量增加接近线性变化,下开口面积增加很大时,空调区温度趋

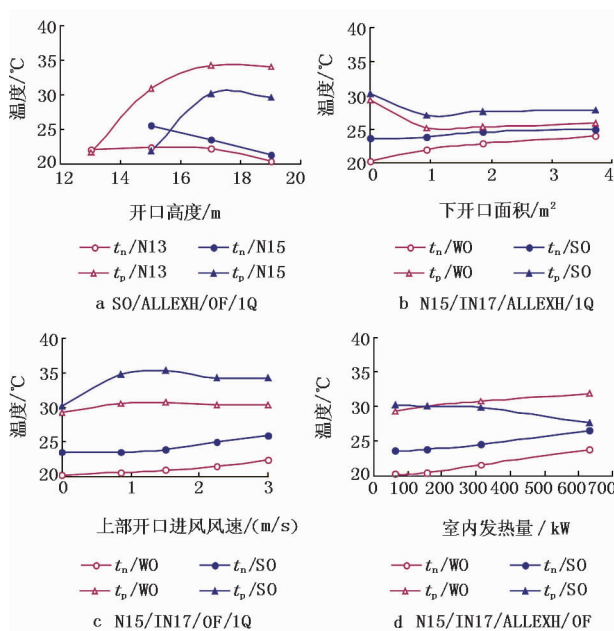


图 4 不同开口结构参数及运行参数时的空调区温度及上部开口排风温度变化曲线

于稳定;而上开口高度增加空调区温度有所降低。对排风温度影响较大的是上部开口高度,特别是在送风喷口高度以上 2 m 的范围内,开口高度平均每提高 1 m,排风温度增加近 5℃,并在上部开口高度接近 17 m 时达到最大值。当开口与送风喷口布置在同一高度时,由计算结果可以看出,排风温度低于空调区温度,此时室内能量利用较差。下

部开口面积、上部迎风面进风风速增加到一定值时,排风温度趋于稳定;上部开口面积不同时,随室内发热量增加排风温度有着不同的变化规律,上部开口面积较小时,室内发热量增加,排风温度增加,而上部开口面积较大时,其结果相反。

2.3 上部开口排风量及其室内排热量

图 5 为不同组合工况下上部开口排风量 G_p 和

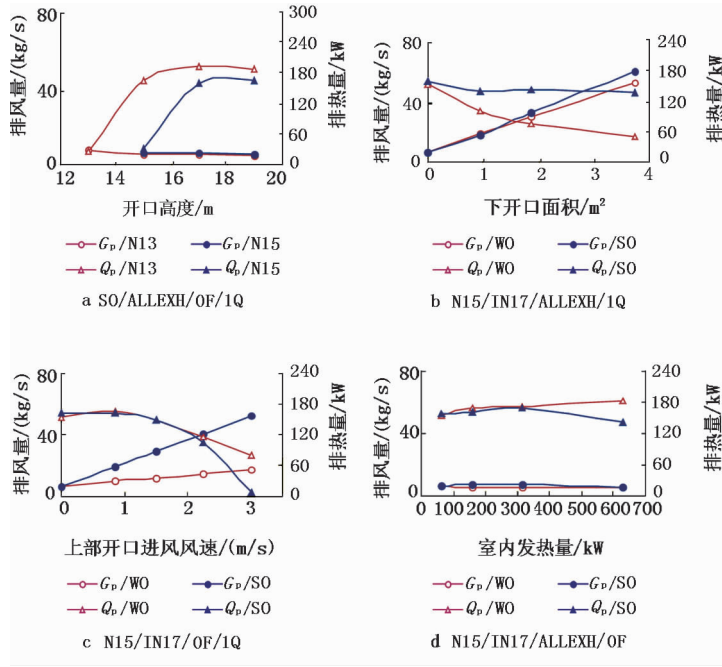


图 5 不同工况下的上部开口排风量与室内通风排热量变化曲线

室内通风排热量 Q_p 随开口高度、下开口面积、上部开口迎风面进风风速以及室内发热量的变化曲线。由图中各曲线可以看出,上部开口排风量随下部开口面积、上部迎风面开口进风速度的增加呈线性增加,而开口高度、室内发热量对排风量几乎没有影响。室内通风排热量随上部开口高度的变化规律与排风温度基本相似,即在送风喷口高度以上 2 m 的范围内,通风排热量增加较大,开口高度平均每提高 1m,通风排热量增加 60~70 kW,并在上部开口高度 17 m 时通风排热量达到最大。此外,随下开口面积增加,上部迎风面进风风速增加,通风排热量呈下降趋势,且上部迎风面进风风速变化时下降比较显著,而室内发热量变化时,其变化趋势接近排风温度的变化规律,它与上部开口面积的大小有关,较小的上部开口面积,通风排热量随室内发热量的变化呈增加趋势,较大的开口面积其结

果则相反。

3 结论

3.1 室内垂直温度分布特征基本符合大空间建筑的三分层模型,对室内上下空气温差影响较大的因素是上部迎风面开口处的进风风速,进风风速越大,上下空气温差就越小;其次,上部开口面积及其高度、室内发热量等对垂直温度分布均有不同程度的影响。

3.2 送风喷口与上部开口的高差对排风温度及通风排热量影响较大,高差为 2 m 时开口高度每提高 1 m,排风温度增加近 5 °C,排热量则增加 60~70 kW。

3.3 当下部开口进风温度为 28 °C 时,下部开口面积增加,排风量呈线性递增,空调区域温度、排风温度变化缓慢,通风排热量呈下降趋势。

3.4 上部迎风面开口进风风速增加,排风量呈线性递增,空调区温度呈增加趋势,排热量则呈下降趋势,排风温度趋于稳定。

3.5 室内发热量增加,空调区温度呈上升趋势,而排风温度和排热量变化规律与上部开口面积大小有关,较小的上部开口面积则呈增加趋势,较大的开口面积其结果则相反,排风量几乎不受室内发热量的影响。

参考文献

- 黄晨,李美玲,左涛,等.采用第一类边界条件数值模拟具有开口的大空间建筑室内速度场与温度场.制冷学报,2002,23(2):20-24
- Huang Chen, Li Meiling, Zuo Tao. CFD analysis of airflow and temperature fields in a large space with openings. 4th International Conference on IAEECB, Changsha, 2001. 269-276
- 黄晨,李美玲,邹志军,等.大空间建筑室内热环境现场实测及能耗分析.暖通空调,2000,30(6):52-55
- Lam C K G, Bremhorst K. A modified form of the k-ε model for predicting wall turbulence. ASME J Fluids Eng, 1981,103:456-460
- 黄晨,李美玲.大空间建筑室内表面温度对流耦合换热计算.上海理工大学学报,2001,23(4):322-326
- 黄晨,李美玲,左涛,等.大空间建筑室内垂直温度分布的计算方法.制冷学报,1999,20(3):25-30