

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.02.002

工业建筑室内多元通风送风口位置 对通风效果的影响研究

赵福云, 刘科君, 申 广, 徐 颖

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 合理的送风口位置不仅使建筑室内获得良好的通风效果, 同时间接地降低空调能耗。采用计算流体动力学(CFD)的方法, 对热压通风和机械送风耦合的多元通风作用下的工业厂房室内空气环境进行了模拟, 探讨不同机械送风压力和送风口位置对热源厂房通风效果的影响和空气分布特征。研究表明: 送风压力越大不一定能获得良好的通风效果, 机械送风口位置对通风效果有较大的影响; 在多数工况下, 送风口位置的 $H_s/H=0.6$ 时, 通风效果优于 $H_s/H=0.3$ 、 $H_s/H=0.9$ 下的。这可以为建筑室内气流组织设计和送风口位置设计提供一定的参考。

关键词: 多元通风; 送风口位置; 数值模拟; 温度分布

中图分类号: TU834

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2019)02-0006-06

引文格式: 赵福云, 刘科君, 申 广, 等. 工业建筑室内多元通风送风口位置对通风效果的影响研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(2): 6-11.

Study on the Ventilation Effect of Multiple Ventilation Location in Industrial Buildings

ZHAO Fuyun, LIU Kejun, SHEN Guang, XU Ying

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A reasonable air inlet location not only provides a good ventilation in the building, but also reduces air-conditioning energy consumption at the same time. By adopting the computational fluid dynamics (CFD) method, a simulation test has been carried out of the indoor air environment of industrial buildings under the combined action of thermal ventilation and mechanical ventilation, followed by a tentative inquiry into the influence of different mechanical air supply pressure and position of air supply outlet on the ventilation effect of heat source workshop and air distribution characteristics. Studies have shown that the intensity of the supply pressure is not necessarily proportional to the significance of the ventilation effect. However, the location of the mechanical air inlets has a great influence on the ventilation effect. Under most conditions, the ventilation effect with $H_s/H=0.6$ is better than that with $H_s/H=0.3$ and $H_s/H=0.9$, which research findings help to provide a certain reference for the design of airflow in the buildings and the design of the air inlet location as well.

Keywords: hybrid ventilation; ventilation location; numerical simulation; temperature distribution

收稿日期: 2018-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778504, 51208192), 湖南省杰出青年基金资助项目(14JJ1002), 湖南省自然科学基金省市联合研究基金资助项目(2018JJ4064)

作者简介: 赵福云(1977-), 男, 湖南茶陵人, 湖南工业大学教授, 博士生导师, 主要从事建筑通风和建筑节能方面的教学与研究, E-mail: zfyfdnet@163.com

0 引言

多元通风是集自然通风和机械通风于一身的通风方式, 因同时具有两种通风方式的优点而受到人们的广泛青睐。但又由于自身受到多种参数的影响, 流动情况复杂多变, 因而对于多元通风的研究还处于基础阶段, 多元通风基本模式或典型模式还尚不清楚。

Leung H.^[1]探讨了自然通风下拥有3个通风口的房间, 在中部设置通风口对通风效果的影响; 并对机械通风和自然通风耦合的多元通风量计算公式进行了推导。段双平^[2]分析了热压通风和机械通风共同作用下的两种类型的大开口复合通风模式室内, 复合通风量受机械通风和热压通风的影响。王怡等^[3]研究了不同排风速度和热源强度下, 温度效率和排污效率的变化规律。郭娟等^[4]研究了6种多元通风系统的通风方式, 并对气流参数分布做了分析预测。

到目前为止, 国内学者对不同气流组织房间的通风效果已做了大量的研究^[5-8]; 但对拥有集中热源的厂房采用机械通风耦合自然通风的这种多元通风方式进行通风换气的研究还很少见。因此本文在以前研究工作的基础上, 继续探讨机械通风口位置对多元通风流动的影响。针对多元通风系统中, 机械通风口的位置、机械风压、不同热源强度等参数对通风效果的影响进行研究。

1 数学物理模型

1.1 物理模型

本文将工业厂房简化为二维问题, 采用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 的方法对多元通风厂房进行研究。根据文献 [9] 建立模型厂房尺寸, 如图 1 所示。

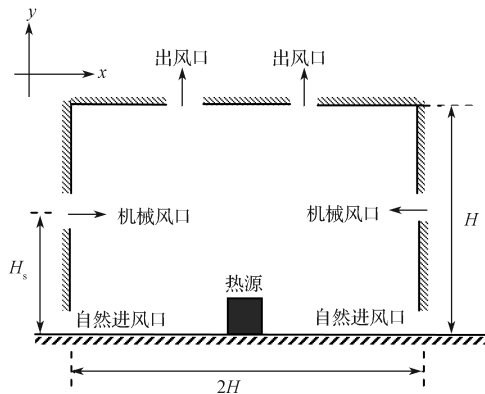


图 1 送风厂房模型示意图

Fig. 1 A schematic diagram of an industrial plant

厂房长 $2H$, 高 H , 自然进风口宽 $0.15H$, 出风口宽 $0.05H$, 机械风口宽 $0.03H$ 。将厂房内人员、灯光、

设备所散发的热处理成集中热源, 位于厂房的中心位置, 尺寸为 $0.1H \times 0.1H$ 。空气由底部进风口进入, 由顶部出风口排出的气流组织形式, 并在厂房中部安排机械送风。其中 H_s 为机械送风口中心距地面的高度; H_s/H 为机械送风口高度与厂房高度的比; 热源位于厂房中部, 出风口沿屋顶均匀布置。

机械送风口的位置对整个厂房的通风效果影响很大, 合理的风口不仅可以营造良好的室内通风效果, 同时良好的风路可以降低风机能耗, 节约能源。基于此, 本文在前期研究工作的基础上, 继续探讨不同机械通风口位置对热源厂房通风效果的影响。根据厂房通风需求 (换气次数), 探讨不同工况下的气流组织特性, 工况如表 1 所示。

表 1 各工况参数

Table 1 Working condition parameters

参 数	取 值
送风压力 /Pa	1, 2, ..., 10
H_s/H	0.3, 0.6, 0.9
热源强度 /k	500, 1 000

1.2 数学模型

本文采用计算流体力学商用软件 Fluent 对模型进行模拟计算。流体假定为不可压缩的等温理想气体。采用重整化群 (renormalization group, RNG) 两方程模型, 并用标准的壁面函数法处理壁面。控制方程包括连续性方程、能量方程、动量方程、紊动能方程及耗散率方程。控制方程如下:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_j)}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_i\bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \bar{\rho}\beta(T - T_0)g_i. \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_j\bar{T})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}k\bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} + u_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho\varepsilon - \beta g_i \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial t}{\partial x_j}. \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\varepsilon\bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (5)$$

式 (1) ~ (5) 中: ρ 为流体密度, $\bar{\rho}$ 为平均密度;

u 为速度, \bar{u} 为平均速度;
 $i, j = 1, 2, 3$ 为张量下角标;
 p 为压力, \bar{p} 为平均压力;
 μ 为动力黏度;
 下标 t 表示该量由湍流脉动引起;
 β 为容积膨胀系数;
 T 为温度, T_0 为参考温度, \bar{T} 为平均温度;
 g 为重力加速度;
 Pr 为普朗特数;
 $\sigma_t=0.7, \sigma_\epsilon=0.7, \sigma_k=0.7$;
 k 为湍流脉动动能;
 ϵ 为湍流脉动能耗散率;
 c_1, c_2 为常数。

利用 SIMPLC 算法迭代求解压力 - 速度耦合方程。为了降低数值解的震荡, 从而获得较精确的解, 对流项全部采用二阶迎风格式计算, 各项收敛残差不高于 10^{-4} 。温度采用 Boussinesq 假设, $Pr=0.7$ 。压力采用 Body Force Weighted 离散格式, 考虑到周围环境对厂房的影响, 计算采用扩展域^[10-11]的形式。将厂房模型向外拓展 3 倍厂房高度的距离。

厂房外部气温为 290 K, 密度 $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$ 。将热源表面处理成定温、定压壁面, 厂房壁面处理成绝热墙面。扩展域边界采用定温定压以及 Symmetry 边界条件。计算域采用非均匀网格, 网格在进风口、排风口及热源处进行加密处理。网格划分如图 2 所示。

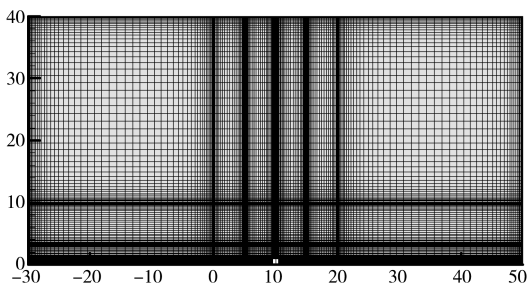


图 2 网格划分图
 Fig. 2 Mesh partition maps

2 结果及分析

在厂房尺寸、通风口大小不变的情况下, 采用控制变量法改变室内热源强度进行了模拟, 将模拟计算的通风量与文献[12]理论计算的通风量进行对比, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 模拟计算的结果比理论计算结果高出 10%~15%, 误差在可接受的范围内, 表明模拟计算结果可信。因此, 可以根据此模拟方法分析不同工况下的温度分布、流场分布、通风量, 并得出热源强度、

排风强度对多元通风厂房内气流流动特性的影响。

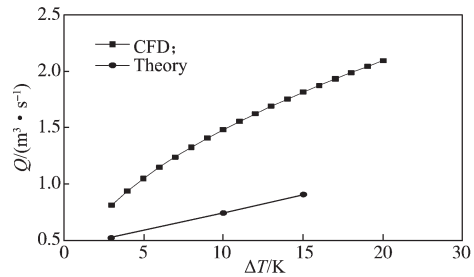
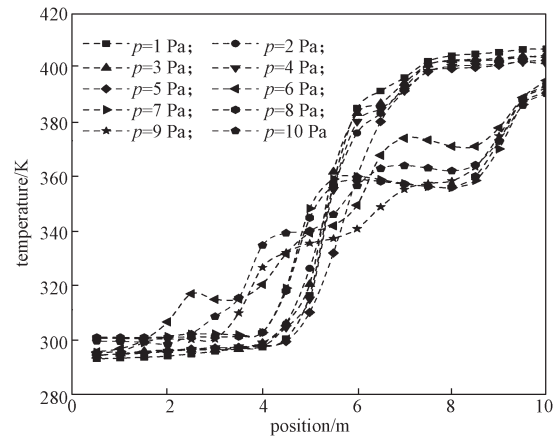


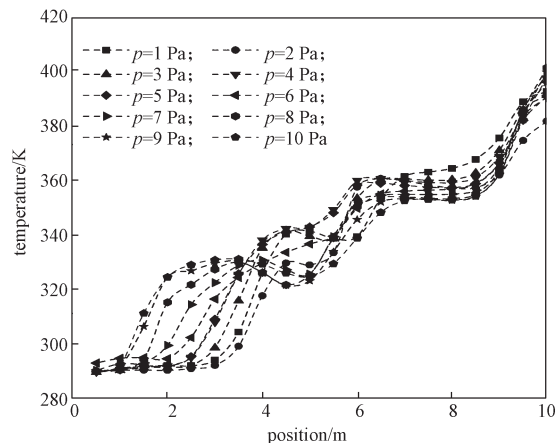
图 3 通风量的理论计算结果与 CFD 模拟计算结果对比
 Fig. 3 Comparison between theoretical calculation results of ventilation volume and CFD simulation results

2.1 热源强度为 500 k 不同送风压力下的温度分布

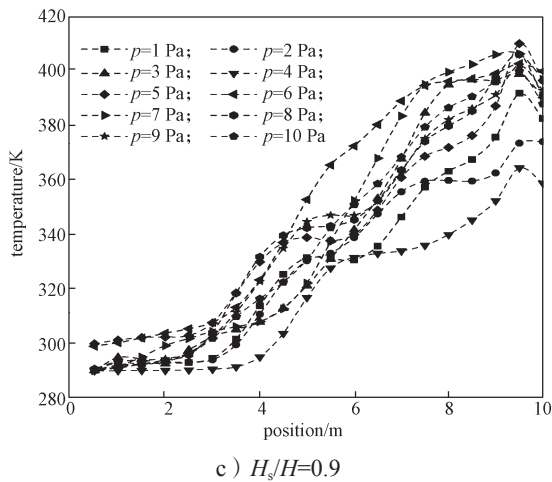
当机械送风口高度在 $H_s/H=0.3$, 热源强度为 500 k, 送风压力从 1 Pa 到 10 Pa 时, 在 $x=5 \text{ m}$ 处的竖直方向上的温度分布如图 4a 所示; 当送风口高度在 $H_s/H=0.6$, 热源强度为 500 k, 送风压力从 1 Pa 到 10 Pa 时, 在 $x=5 \text{ m}$ 处竖直方向上的温度分布如图 4b 所示; 当送风口高度在 $H_s/H=0.9$, 热源强度为 500 k, 送风压力从 1 Pa 到 10 Pa 时, 在 $x=5 \text{ m}$ 处竖直方向上的温度分布见图 4c。



a) $H_s/H=0.3$



b) $H_s/H=0.6$



c) $H_s/H=0.9$
 图4 热源强度为 500 k 时不同工况下 $x=5$ m 处竖直方向上的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution with various pressure and position of inlet under the strength of heat 500 k with $x=5$ m

从图 4a 可以看出：当送风压力不超过 5 Pa 时，室内温度出现明显的分层现象，在 0~5 m 的高度区间内温度基本相同；在 7~10 m 的高度区间内温度也基本相同。5~7 m 区间，随着高度的增加，温度基本上随之升高。当送风压力超过 5 Pa 时，室内空气温度分布变得紊乱，温度基本上随对应高度的增加而升高，最终温度基本相同。

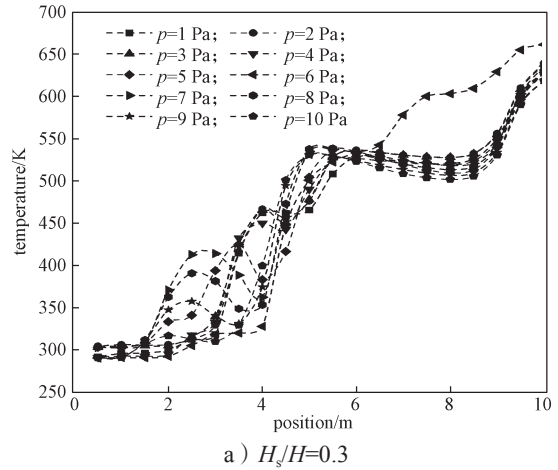
从图 4b 可以看出：在 1~6 m 区间内，各送风压力下的温度分布比较紊乱；超过 6 m 的高度，各种送风压力下的温度变化趋势比较一致，且温差基本较小；各点温度随着高度的增加，呈折叠上升趋势。

从图 4c 可以看出：随着高度的增加温度升高，最后都有一个下降的趋势。在送风压力为 4 Pa 时，各点的温度最低；在 0~3 m 和 5~7 m 的区间里，送风压力为 6 Pa 时各点的温度最高。

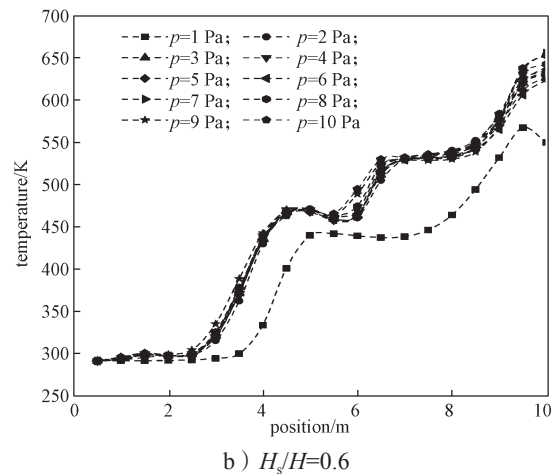
2.2 热源强度为 1 000 k 不同送风压力下的温度分布

当送风口高度在 $H_s/H=0.3$ ，热源强度为 1 000 k，送风压力从 1 Pa 至 10 Pa 时，在 $x=5$ m 处垂直高度上的温度分布如图 5a 所示；当送风口高度在 $H_s/H=0.6$ ，热源强度为 1 000 k，送风压力从 1 Pa 至 10 Pa 时，在 $x=5$ m 处垂直高度上的温度分布如图 5b 所示；当送风口高度在 $H_s/H=0.9$ ，热源强度为 1 000 k，送风压力从 1 Pa 至 10 Pa 时，在 $x=5$ m 处垂直高度上的温度分布如图 5c 所示。

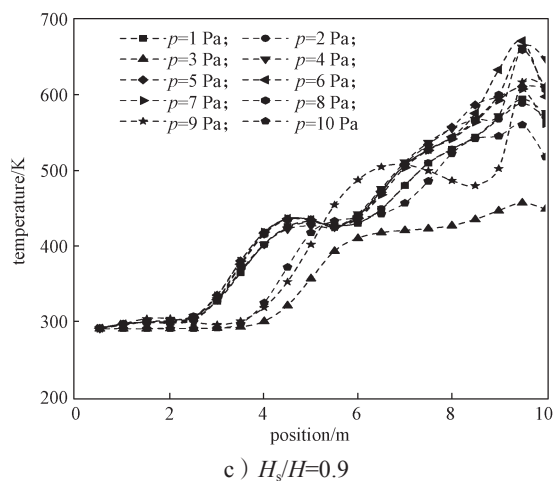
从图 5a 可以看出：温度随竖直高度的升高而升高。在 1.5~4.0 m 的区间内，送风压力小于 7 Pa 时，各点的温度随送风压力的不同变化较大。在 6 m 以上的区间里，除了在送风压力为 6 Pa 时各点温度最高外，各送风压力下各点的温度变化比较一致。



a) $H_s/H=0.3$



b) $H_s/H=0.6$



c) $H_s/H=0.9$

图5 热源强度为 1 000 k 时不同工况下 $x=5$ m 处竖直方向上的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution with various pressure and position of inlet under the strength of heat 1 000 k with $x=5$ m

从图 5b 可以看出：当送风压力为 1 Pa 时，各点的温度较其他送风压力下相应各点的温度低；温度随高度的升高而升高，最后有一个下降的趋势。当送风压力在 2~10 Pa 区间时，各点温度随着高度的升高呈折叠地升高，变化基本一致；各送风压力下的相应各点的温度比较接近。

从图 5c 可以看出：随着高度的上升，各点的温度先升高后降低。在 0~3 m 的区间内，送风压力为 3, 9, 10 Pa 时，温度基本相同且温度较其他送风强度下的温度低。在 3.5~10.0 m 的区间内，送风强度在 3 Pa 下的温度最低。

2.3 工作区平均温度比较分析

取地面上 2 m 以内的区域为工作区。当热源强度为 500 k，不同送风位置下，工作区域平均温度与送风压力的关系见图 6。

由图 6 可以看出：当送风压力小于 7 Pa，送风口位置在 $H_s/H=0.6$ 时，工作区温度最低；当送风压力超过 7 Pa，送风口位置在 $H_s/H=0.9$ 时，工作区温度最低。当送风口位置在 $H_s/H=0.3$ 时，工作区温度随着送风压力的增大先升高后降低；当送风口位置在 $H_s/H=0.6$ 时，工作区的温度随着送风压力的增大而升高；当送风口位置在 $H_s/H=0.9$ 时，工作区温度先升高后降低，再升至最高后降低。

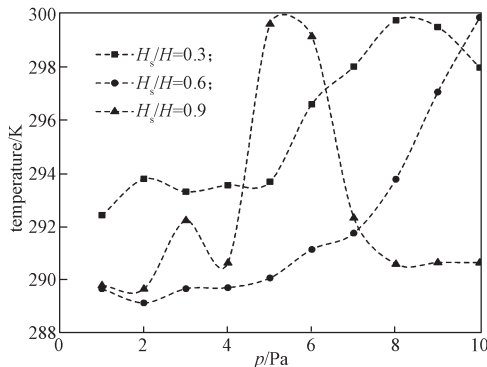


图 6 热源强度为 500 k 时工作区平均温度与送风压力关系图

Fig. 6 Average temperature-pressure relationship in working area with a heat intensity of 500 k

当热源强度为 1 000 k，不同送风位置下，工作区平均温度与送风压力的关系见图 7。

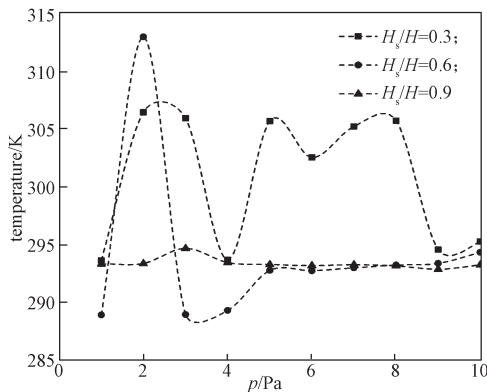


图 7 热源强度为 1 000 k 时工作区平均温度与送风压力关系图

Fig. 7 Average temperature-pressure relationship in working area with a heat intensity of 1 000 k

由图 7 可以看出：当送风口位置在 $H_s/H=0.3$ 时，工作区的温度随着送风压力的增大，类似正弦曲线波动，即先升高后降低再升高再降低一直持续到最后，但是各升高和下降的幅度基本不同。当送风口位置为 $H_s/H=0.6$ 时，工作区温度随着送风压力的增大先升高后降低，再略微升高最后趋于平稳。当送风口位置为 $H_s/H=0.9$ 时，工作区温度随着送风压力的增大小幅度波动，最后也趋于平稳。

不同送风口位置以及送风压力对工作区平均温度的影响，呈现出复杂多变的形态，见图 7。当送风口位置在 $H_s/H=0.3$ 时，工作区平均温度在不同送风压力下呈无序变化；各送风压力下工作区平均温度比其他两个送风口位置的高。当送风口位置在 $H_s/H=0.6$ 时，除送风压力为 2, 9, 10 Pa 外，其余送风压力下的工作区平均温度最低。当送风压力不低于 5 Pa，送风口位置在 $H_s/H=0.6$ 和 $H_s/H=0.9$ 时，工作区平均温度变化趋势基本相同，且温差相对较小。

3 结论

不同机械送风口位置、不同热源强度和不同送风压力下，厂房内气流组织呈现出不同的流动特性。

1) 采用机械送风，能在一定程度上改善室内空气环境，但不是送风强度越大获得的室内通风效果越好，有时会获得相反的通风效果。

2) 送风口位置对通风效果有较大的影响。当送风口位置在 $H_s/H=0.6$ 时，获得的通风效果优于送风口位置在 $H_s/H=0.3$ 和 $H_s/H=0.9$ 下的通风效果。

3) 为建筑物设计通风口时，应该根据建筑的结构特征和周围的环境合理设计。如果条件允许，可在建筑物的不同位置高度上设计多个送风口，使用时根据通风需要和室内外环境采用不同的送风口或多个风口组合进行通风换气。

4) 采用机械风机辅助建筑室内通风时，应该根据通风需求采用合理的送风强度。

参考文献:

- [1] LEUNG H. Analysis of Natural Ventilation in Simple Building[D]. Hong Kong: The University of Hong Kong, 2003.
 - [2] 段双平. 大开口建筑复合通风研究[J]. 制冷空调与电力机械, 2011, 32(4): 11-13, 24.
- DUAN Shuangping. Study on Hybrid Ventilation of Buildings with Large Openings[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2011,

- 32(4): 11-13, 24.
- [3] 王 怡, 邢 骁, 孟晓静, 等. 工业厂房复合通风系统临界排风速度实验研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2016, 48(5): 745-750.
WANG Yi, XING Xiao, MENG Xiaojing, et al. Experimental Study on the Critical Exhaust Velocity of Hybrid Ventilation System in Industrial Workplace[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology(Natural Science Edition), 2016, 48(5): 745-750.
- [4] 郭 娟, 王汉青. 基于 Fluent 的多元通风系统数值模拟分析 [J]. 流体机械, 2013, 41(5): 29-33.
GUO Juan, WANG Hanqing. Numerical Simulation and Analysis of Hybrid Ventilation System Based on Fluent[J]. Fluid Machinery, 2013, 41(5): 29-33.
- [5] 陈思林, 秋 实, 胡 昊, 等. 3 种置换通风方式下舱室内流场数值分析 [J]. 流体机械, 2014, 42(9): 81-85.
CHEN Silin, QIU Shi, HU Hao, et al. Numerical Analysis on the Cabin Internal Flow Field Under Three Kinds of Displacement Ventilation Modes[J]. Fluid Machinery, 2014, 42(9): 81-85.
- [6] 胡平放, 蔡 芬. 气流组织形式对室内空气环境影响的数值模拟 [J]. 华中科技大学学报 (城市科学版), 2006, 23(2): 28-31.
HU Pingfang, CAI Fen. Numerical Simulation of Several Air Distribution Forms on Indoor Air Environment[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Urban Science Edition), 2006, 23(2): 28-31.
- [7] 袁东升, 田慧玲, 高建成, 等. 气流组织对空调房间空气环境影响的数值模拟 [J]. 建筑节能, 2008, 36(9): 9-13.
YUAN Dongsheng, TIAN Huiling, GAO Jiancheng, et al. Numerical Simulation to the Effect of Airflow Distribution on Air Environment of Air-Conditioning Room[J]. Construction Conserves Energy, 2008, 36(9): 9-13.
- [8] 谭良才, 陈沛霖. 高大空间恒温空调气流组织设计方法研究 [J]. 暖通空调, 2002, 32(2): 1-4.
TAN Liangcai, CHEN Peilin. Design Method of Air Distribution of Constant Temperature Air Conditioning Systems in High and Large Spaces[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2002, 32(2): 1-4.
- [9] 赵福云, 刘科君, 申 广, 等. 大空间热压通风与局部机械通风耦合换气研究 [J]. 建筑热能通风空调, 2017, 36(10): 10-14.
ZHAO Fuyun, LIU Kejun, SHEN Guang, et al. Industrial Hall Air Movements Jointly Driven by Mechanical Supplying Fan and Buoyancy-Driven Natural Ventilation[J]. Building Energy & Environment, 2017, 36(10): 10-14.
- [10] 赵福云, 肖 婷, 李 林, 等. 汞蒸气在参差建筑街区中沉积过程模拟 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(6): 1690-1696.
ZHAO Fuyun, XIAO Ting, LI Lin, et al. Numerical Modeling of Mercury Vapour Dispersion and Sedimentation Within the Urban Building Street Canyons Composed by Diverse Building Heights[J]. China Environmental Science, 2016, 36(6): 1690-1696.
- [11] COOK M J, LOMAS K J. Buoyancy-Driven Displacement Ventilation Flows: Evaluation of Two Eddy Viscosity Turbulence Models for Prediction[J]. Building Services Engineering Research and Technology, 1998, 19(1): 15-21.
- [12] LI Y G. Buoyancy-Driven Natural Ventilation in a Thermally Stratified One-Zone Building[J]. Building and Environment, 2000, 35(3): 207-214.

(责任编辑: 邓光辉)