

文章编号: 1671-6612 (2021) 01-051-07

建筑临墙开窗对室内热压通风的模拟研究

彭兆晨¹ 狄育慧¹ 郝振东²

(1. 西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710048;
2. 西安工程大学柯桥纺织产业创新研究院 绍兴 312030)

【摘要】 根据进风口在墙壁上开口位置的不同, 建筑开窗形式分为对墙开窗、临墙开窗、单侧墙开窗。运用 airpak 软件针对建筑进风口形式为临墙开窗形式下的单热源室内热压通风进行了模拟研究。通过改变进出风口中心高度差及进出风口面积比来分析中和面高度、有效热量系数、通风量、速度场及温度场的变化。结果展示了临墙开窗形式在上述两种情况下对应的各项参数的变化状况, 并分析了进出风口中心高度差变化情况下工作面高度处速度场及温度场的变化。研究结果为临墙开窗形式下的热压通风提供了参考。

【关键词】 临墙开窗; 中和面; 有效热量系数; 通风量; 热压通风
中图分类号 TU834.1 文献标识码 A

Simulation Study on the Indoor Thermal Pressure Ventilation by two Windows Open Near the Wall of the Building

Peng Zhaochen¹ Di Yuhui¹ Hao Zhendong²

(1. School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048;
2. Keqiao Textile Industry Innovation Institute, Xi'an Polytechnic University, Shaoxing, 312030)

【Abstract】 According to the different opening positions of the air inlet on the wall, the form of building windows is divided into two windows opening in opposite walls, two windows opening in near walls and one window opening in one wall. A simulation study has been made by Airpak of the indoor thermal pressure ventilation of buildings with single heat source in the form of two windows opening in near walls. the changes of neutral plane height, effective heat coefficient, ventilation rate, velocity field and temperature field are analyzed by changing the central height difference of the air inlet and outlet and the area ratio of the air inlet and outlet. The results show the changes of the corresponding parameters of the form of two windows opening in near walls under the above two conditions, and analyze the changes of the velocity field and temperature field at the height of the working plane under the change of the central height difference of the inlet and outlet. The result provides a reference for the thermal pressure ventilation under the form of two windows opening in near walls.

【Keywords】 two windows opening in near walls; neutral plane; effective heat coefficient; ventilation rate; thermal pressure ventilation

基金项目: 西安工程大学(柯桥)研究生学院产学研协同创新项目(19KQZD05)

作者简介: 彭兆晨(1996-), 男, 在读研究生, E-mail: 1161195875@qq.com

通信作者: 狄育慧(1964-), 女, 教授, E-mail: yuhui_di@163.com

收稿日期: 2020-07-10

0 引言

针对日益增长的建筑能耗需求, 人们从建筑设

计之初的结构节能设计^[1,2]到建筑建成之后的节能改造优化^[3,4]等方面开始全方位注重建筑能耗的改

善。自然通风作为一种节能环保的建筑通风方式，是当今生态建筑所普遍采取的比较容易接受且廉价的技术措施^[5]。随着灯光、计算机、电视等科技产品带给人们便利的同时，也给民用建筑带来了相应的热量，对于这些内部有热源的建筑来说，可以通过热源自身引起的热压来配合室外风进行通风。目前，已有大量文献对这种室内具有热源建筑的孔口面积^[6,7]、进风窗标高^[8]、热源面积及高度^[9,10]、双热源^[11,12]、辐射与对流^[13]等影响热压的因素进行了研究，然而这些研究大多是在建筑进风口形式为对墙开窗及单侧墙开窗情况下，对于临墙开窗形式^[14]下室内热压通风的研究较少，因此本文在进风口形式为临墙开窗形式下研究进风口中心高度差及进风口面积比对室内热压的影响。

1 物理模型及模拟方法

1.1 物理模型

模型以某一民用建筑机房为原型，并在其基础上进行了相应简化。该模型尺寸为 $6\text{m} \times 5\text{m} \times 3.5\text{m}$ 。如图1所示，两个进风窗分别设置在相邻的墙壁上，进风窗尺寸为 $3\text{m} \times 1\text{m}$ ，距地面 1.5m ，设置其为压力进口；排风窗为顶部天窗，尺寸为 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ ，设置其为压力出口。热源位于模型中心位置，其尺寸为 $4\text{m} \times 2\text{m} \times 0.8\text{m}$ ，热源功率为 1200W 。忽略墙体散热并设置为绝热边界。室外环境温度为 30°C ，压强为标准大气压 101325Pa 。工作面高度设置为距地面 1.2m 处。

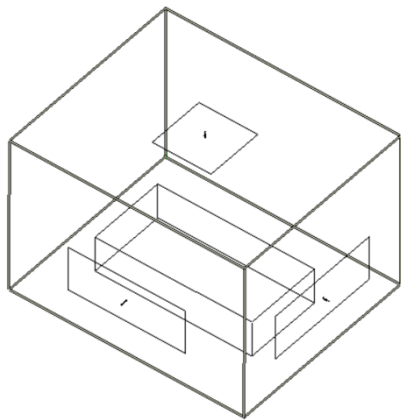


图1 物理模型

Fig.1 Physical model

1.2 数值模拟方法

Airpak 用于模拟室内温度及气流组织分布具有较好的模拟效果^[15]。本文采用 FLUENT 公司推

出的 Airpak3.0，计算模型选用 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型，接近壁面处采用壁面函数法^[16,17]，由于存在有热浮升力的热压问题，采用 Boussinesq 假设^[18]。离散格式采用有限体积法，压力项采用加权体积法离散，其它项离散采用一阶迎风格式。

计算区域网格划分采用非结构六面体网格，其中各轴向方向节点间的距离不大于最大尺寸的 $1/20$ 。对热源、进出风口、近壁面处进行局部加密，保证结果具有一定的准确性。

1.3 网格独立性检验

采用网格数 3.1 万，12.8 万，26 万进行独立性检验。在其他条件不变情况下分别计算出三种网格下房间的通风量为： 1.687kg/s ， 1.702kg/s ， 1.699kg/s ，最大值和最小值相差 3%。综合考虑计算时间与计算精度，选取 12.8 万网格进行模拟计算。

1.4 计算模型验证

运用上述的模型建立方法建立了与文献[19]实验装置相同的模型，模拟结果如图 2 所示，以此来验证上述模拟方法的准确性。

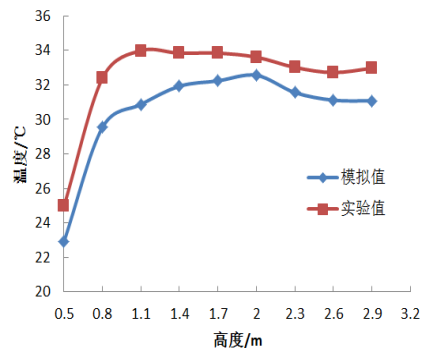


图2 模拟值与实验值对比

Fig.2 Comparison between simulated value and experimental value

通过不同高度的模拟值和文献[19]中的实验值的对比可得出模拟温度变化规律基本与实验值一致，其中最大误差为 9.2%，最小误差为 3.1%，平均误差为 5.4%。误差属于可接受范围，因此本文模拟方法是比较可靠的。

2 模拟结果分析

2.1 模拟结果

对于进出风口中心高度差的变化，分别设置两个进风口尺寸均为 $3\text{m} \times 1\text{m}$ ，出风口 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 保持不变，依次改变进风口高度位置来改变进风

口中心高度差。改变进风口中心高度差 (m) 依次为 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5, 2.75。

对于进风口面积比的变化, 设置进风口中心高度差为 1.75m, 进风口中心距地面 1.75m, 保持排风口面积不变, 增大进风口面积的情况下依次设定进风口面积比为: 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6。

表 1 和表 2 分别汇总出了两种情况下各自的模拟值。

表 1 进风口中心高度差变化情况下的模拟值

Table 1 Simulation value under the condition of the change of the center height difference of the air inlet and outlet

进风口中心高度差 H (m)	排风口气流平均温度 T (K)	进风口气流平均温度 T (K)	工作区气流平均温度 T (K)
0.5	304.487	303.736	304.432
0.75	304.455	303.719	304.428
1	304.444	303.723	304.346
1.25	304.426	303.720	304.306
1.5	304.411	303.713	304.137
1.75	304.392	303.706	303.893
2	304.377	303.698	303.822
2.25	304.366	303.689	303.812
2.5	304.358	303.684	303.906
2.75	303.350	303.679	304.019

表 2 进风口面积比变化情况下的模拟值

Table 2 Simulation value of the change of the area ratio of the air inlet and outlet

进风口面积比	排风口气流平均温度 T (K)	进风口气流平均温度 T (K)	工作区气流平均温度 T (K)
0.5	305.384	303.209	304.951
1	304.981	303.197	304.453
1.5	304.846	303.373	304.252
2	304.721	303.580	304.054
2.5	304.543	303.588	303.851
3	304.441	303.598	303.752
4	304.285	303.569	303.654
5	304.179	303.525	303.551
6	304.063	303.442	303.452

由表一及表二可以看出, 随着进风口中心高

度差的增大, 排风口气流平均温度、进风口气流平均温度、工作区气流平均温度均逐渐降低; 随着进风口面积比的增大, 排风口气流平均温度及工作区气流平均温度逐渐降低, 而进风口气流平均温度无明显变化规律, 呈现波动趋势。

2.2 中和面变化情况

在室内外压力相等时, 即室内外压差为 0 时的面称为中和面。中和面对室内气流组织有着较大的影响, 同时也是评价自然通风的一项重要指标。

2.2.1 进风口中心高度差变化

根据《通风工程》^[20]中计算中和面公式:

$$h = h_1 + \frac{H}{1 + \left(\frac{\mu_B F_B}{\mu_A F_A}\right)^2 \frac{T_i}{T_o}}$$

式中: H 为进出孔口中心高度差; h 、 h_1 为中和面高度、下部孔口中心与地面高度差; μ_A 、 μ_B 为上部和下部孔口流量系数; F_A 、 F_B 为上部和下部孔口面积; T_i 、 T_o 为室内外空气的热力学温度。

对于本问题来说, 根据模拟结果 $T_i \approx T_o$, 假设下部与上部采用相同的进风口形式, 则 $\mu_A = \mu_B$, 故上式结果可简化为:

$$h = h_1 + \frac{H}{1 + \left(\frac{F_B}{F_A}\right)^2 \frac{T_i}{T_o}} \approx h_1 + \frac{H}{1 + \left(\frac{F_B}{F_A}\right)^2}$$

当改变进风口中心高度差时, 进风口面积比值为一定值, 且当出风口位于屋顶时, h_1+H 为房间高度 Z , 则上式可化为:

$$h_1 + \frac{H}{1 + \left(\frac{F_B}{F_A}\right)^2} = Z - H + \frac{H}{1 + \left(\frac{F_B}{F_A}\right)^2} = \frac{\left(\frac{F_B}{F_A}\right)^2}{1 + \left(\frac{F_B}{F_A}\right)^2} H + \frac{Z + Z \left(\frac{F_B}{F_A}\right)^2}{1 + \left(\frac{F_B}{F_A}\right)^2} = AH + B$$

由上式可以看出中和面高度为关于 H 的斜率 A 截距 B 的一次函数。将 $F_B=4m^2$ 、 $F_A=2.25m^2$ 、 $Z=3.5m$ 带入上式可得:

$$h = -0.76H + 3.5$$

同时, 进一步将模拟模型中所得中和面高度与公式理论值进行对比:

观察图 3 可知理论值与模拟值变化趋势相同, 中和面高度与进风口中心高度差呈线性关系, 中和面高度随着进风口中心高度差的增加而减小。由公式可以看出直线斜率 A 由进风口面积比值确定, 其影响了随着中心高度差变化时中和面的下降速率。截距 B 由房间高度及进风口面积比值共

同确定，其影响了中和面的最大值与最小值。由公式可知中和面最大值为 3.5m，最小值为 0.84m。

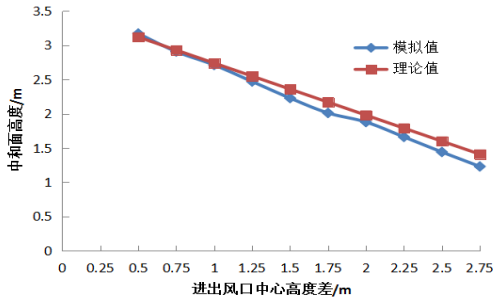


图3 进出风口中心高度差变化时中和面模拟值与理论值对比

Fig.3 Comparison of the simulated and theoretical values of the neutral plane with the change of the central height difference of the air inlet and outlet

2.2.2 进出风口面积比变化

由上述简化的中和面计算公式可知，当进出风口中心高度差确定时，中和面高度由进出风口面积比确定，因此固定进出风口中心高度差为 1.75m。改变进出风口面积比来研究中和面变化情况。保持排风口面积不变，增大进风口面积使得进出风口面积比依次为：0.5，1，1.5，2，2.5，3，4，5，6。将 $h_1=1.75$ ， $H=1.75$ 带入公式得：

$$h = h_1 + \frac{H}{1 + \left(\frac{F_B}{F_A}\right)^2} = 1.75 + \frac{1.75}{1 + \left(\frac{F_B}{F_A}\right)^2}$$

进一步将所得模拟值与理论值进行对比：

由图 4 可知，模拟值与理论值变化趋势相同，在进风口与出风口面积比小于 2 时，中和面随着进出风口面积比的增大而显著减少；当进出风口面积大于 2 时，中和面随着进出风口面积比的增大而基本保持在 2m 左右。这说明了中和面的高度与进出风口面积比有着密切关系，当进出风口面积比小于 2 时，需考虑进出风口面积比变化时中和面的改变

当进出风口面积比大于 2 时，可忽略进出风口面积比变化时中和面的改变。这与文献[6]得出的结论是一致的，这同时也说明临墙开窗与对墙开窗在中和面随着进出风口面积比的变化上有着相同的规律。

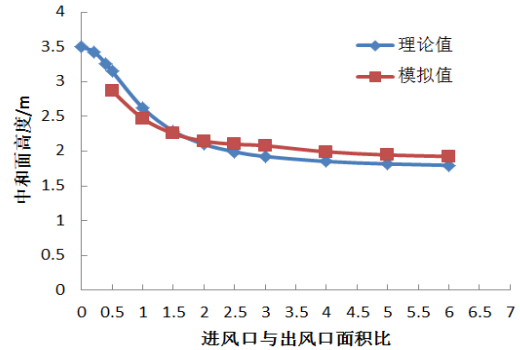


图4 进出风口面积比变化时中和面模拟值与理论值对比

Fig.4 Comparison of the simulated and theoretical values of the neutral plane with the change of the area ratio of the inlet and outlet

2.3 有效热量系数变化情况

有效热量系数 m 是反映散入作业地带的有效余热量大小，其直接影响到了工作区温度。有效热量系数越小，散入工作区的有效余热量越少，工作区域温度越低。 m 计算公式为：

$$m = \frac{t_n - t_w}{t_p - t_w}$$

式中： m 为有效热量系数； t_n 为工作区温度，即指工作地点所在地面上 2m 以内的温度； t_p 为房间上部排风温度； t_w 为室外温度。

图 5 根据模拟结果分别计算并绘制出了进出风口中心高度差变化情况下及进出风口面积比变化情况下有效热量系数的改变。

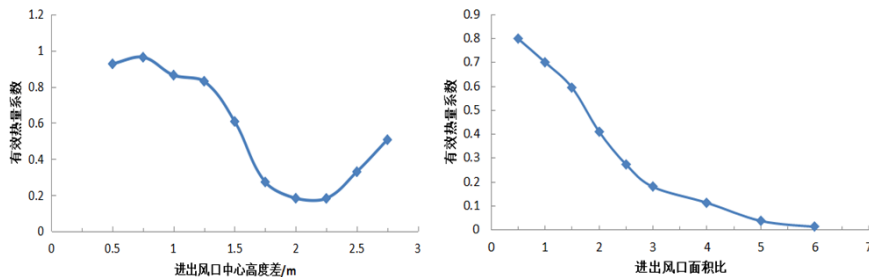


图5 进出风口中心高度差及进出风口面积比变化情况下有效热量系数的改变

Fig.5 The change of effective heat coefficient under the change of the center height difference and area ratio of air inlet and outlet

当改变进出风口中心高度差时,有效热量系数在 $0.5 < H < 2.1\text{m}$ 时逐渐减小,当 $H > 2.1\text{m}$ 时,有效热量系数开始逐渐增大。其中在 $H=2.1\text{m}$ 处,有效热量系数取最小值。这说明在 $H=2.1\text{m}$ 处,散入工作区的有效余热越来越少。

当改变进出风口面积比时,随着进出风口面积

比的增大,有效热量系数逐渐减少。这说明随着进出风口面积比的增大,散入工作区的有效余热越来越少。

2.4 通风量变化

下图绘制出了两种情况下通风量的变化。

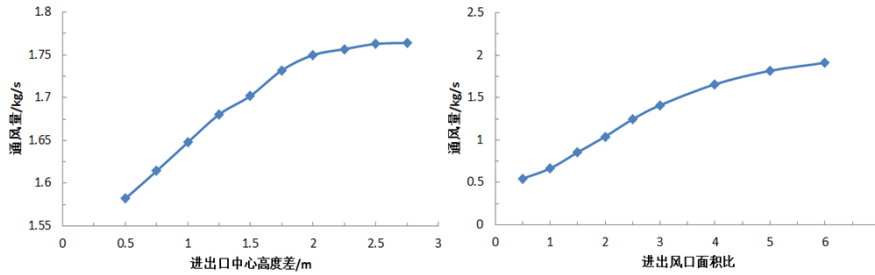


图 6 进出口中心高度差及进出口面积比变化情况下通风量的变化

Fig.6 The change of ventilation rate under the change of the center height difference and area ratio of air inlet and outlet

由上图可以看出通风量随着进出口中心高度差及进风口面积比的增大而增加。对于改变进出口中心高度差来说,在高度差小于 2m 时,通风增加量较为均匀,当高度差大于 2m 时,通风增加量开始逐渐降低。当改变进出口面积比时通风增加量逐渐减缓。

2.5 进出口中心高度差变化时速度场及温度场的改变

选择工作面高度即距离地面 1.2m 处为研究对象,分析速度场及温度场在进出口中心高度差改变情况下对工作面区域的影响。

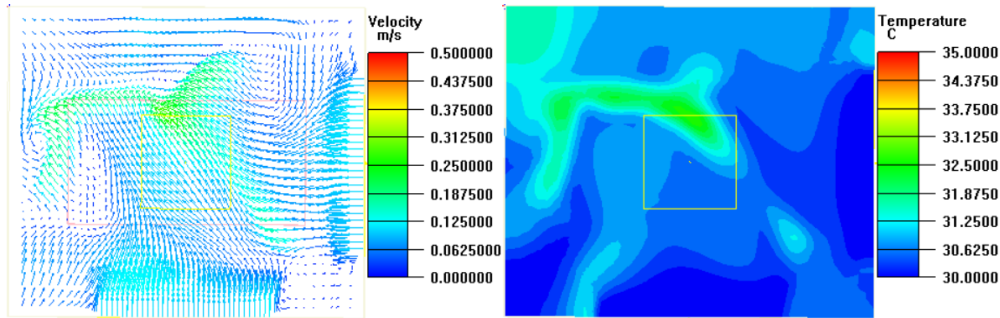


图 7 进出口中心高差 1.75m 时工作面速度场及温度场

Fig.7 Velocity field and temperature field of working plane when the central height difference of the air inlet and outlet is 1.75m

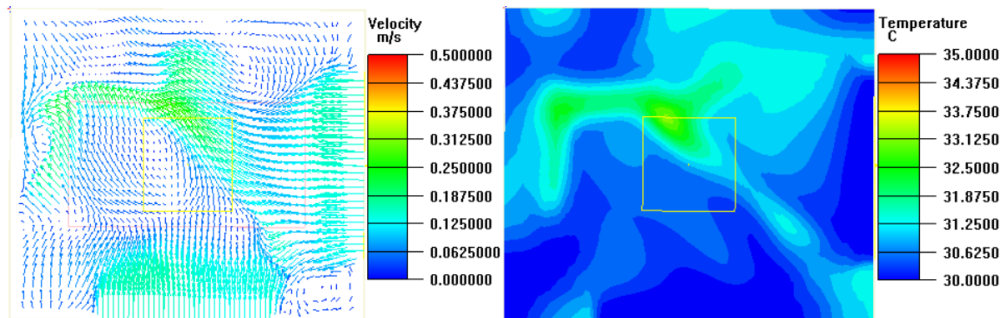


图 8 进出口中心高差 2m 时工作面速度场及温度场

Fig.8 Velocity field and temperature field of working plane when the central height difference of the air inlet and outlet is 2m

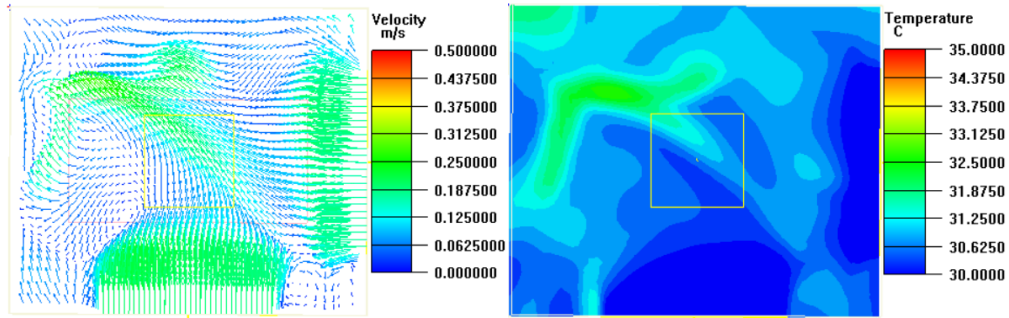


图9 进出口中心高差 2.5m 工作面速度场及温度场

Fig.9 Velocity field and temperature field of working plane when the central height difference of the air inlet and outlet is 2.5m

图7~图9为进出口中心高差不同情况下工作面的速度场及温度场，由图7-图9可以看出：

(1) 室外风由进风口进入室内后会先向热源处汇聚，在汇聚过程中两股气流相互干扰，同时两股气流在流动过程中，接近热源的周围空气被加热膨胀，因为密度的差异导致其以自然热对流形式上升，并卷吸带动周围空气，最终大部分空气沿着房间对角线方向在热源斜上方处形成一股向上的羽流。温度场变化与速度场一致，总体来看房间温度分布不均匀，在两侧窗口处温度低，热气流上升及远离窗口部位温度高。

(2) 随着进出口中心高度差的增大，两侧进风口风速均逐渐增加，对比 $H=1.75\text{m}$ 与 $H=2\text{m}$ 时的速度场可发现：由于风速的增加，上升气流速度增加，上升气流卷吸量也随之增大。这本质是由于进出口中心高度差的增大，导致了室内热压的增大。对比 $H=2\text{m}$ 与 $H=2.5$ 时的速度场可发现：随着风速继续增加，上升气流速度及卷吸范围增加的同时，大部分上升气流沿着对角线方向偏移到了热源斜上方，这是由于热源条件和进风速度共同影响所致，热源的表面积较大且具有一定高度，热压增大会加快进风速度，但在风速增加的同时也会吹散热源周围空气，使气流沿着进风合力方向移动，同时也增加了其余地方产生涡流的可能。进一步从温度场中可以发现，随着进出口中心高度差的增大，进风口处速度逐渐增加，由此导致了进风口温度的降低，但同时受到热源及房间结构等的影响，在热源周围温度的不均匀性也随之变大。因此增大进出口中心高度差是能够保证进风口风速增加及进风口处温度的降低，但要考虑到整体房间温度的均匀性还应综合考虑房间热源结构、房屋结构等因素。

3 结论

热压通风作为自然通风的驱动力之一在生活中发挥着重要的作用。本文通过对临墙开窗热压通风的模拟研究，得出了以下结论：

(1) 当进风口面积比增大时，通风量不断增加，但增加量逐渐变缓。随着进风口面积比的增大，中和面逐渐降低，但在进风口面积比小于2时，变化较快，在进风口面积比大于2时，可近似忽略进风口面积比变化时中和面的改变。有效热量系数随着进风口面积比的增加逐渐降低，这说明随着进风口面积比的增大，散入工作区的有效余热量越来越少。

(2) 随着进风口中心高度差的增加，通风量在 $H<2\text{m}$ 时增加较快， $H>2\text{m}$ 时增加变缓。中和面与进风口中心高度差呈现线性关系，其直线斜率由进风口面积比确定，截距由房间高度及进风口面积比确定。有效热量系数与进风口中心高度差之间没有明显的变化规律，随着进风口中心高度差的增加，有效热量系数先降低后增大，在 $H=2.1\text{m}$ 处，有效热量系数达到最小值。随着进风口中心高度差的增加，热压随之增强，相邻两侧进风口处风速增加，温度降低，受热源及房间结构的影响，大部分上升气流向斜上方偏移，热源周围温度的不均匀性也随之增大，因此考虑到整体房间温度的均匀性，还应综合考虑热源及房间结构对临墙开窗房间气流及温度的影响。

参考文献：

[1] Ran W, Shi L L, Wei F. Impact of adjustment strategies on building design procession different climates oriented by multiple performance[J]. Applied Energy, 2020,266.

- [2] Thanyalak S, Kyosuke H. Balancing of natural ventilation, daylight, thermal effect for a building with double-skin perforated facade (DSPF)[J]. *Energy & Buildings*, 2020,210.
- [3] 缪智昕. 高大空间展览温室自然通风数值模拟与开窗优化[J]. *制冷与空调*,2020,34(1):29-38.
- [4] 高波, 徐斌斌, 倪吉, 张红. 自然通风在建筑节能改造中的应用分析[J]. *制冷与空调*,2015,29(4):427-430.
- [5] 李曾. 自然通风对建筑节能和热舒适度影响的探讨[J]. *建筑工程技术与设计*,2016.
- [6] 朱尚斌, 李灿, 陈泉. 孔口面积及热源位置对热压通风影响的模拟研究[J]. *湖南工业大学学报*,2017,31(5):39-44.
- [7] 折倩娜, 孟晓静, 王怡. 单侧进风口面积对工业厂房热压通风量的影响[J]. *暖通空调*,2018,48(11):14-17.
- [8] 邹声华, 张登春, 李孔清. 自然通风改善半封闭热源厂房热环境的研究[J]. *矿冶工程*,2005,(2):81-84.
- [9] 隋学敏, 官燕玲, 李安桂, 等. 热源面积对室内热压自然通风的影响[J]. *建筑科学与工程学报*,2007,(2):80-85.
- [10] 隋学敏, 官燕玲, 李安桂, 等. 内部热源高度对热压自然通风流场的影响[J]. *煤气与热力*,2008,(2):14-17.
- [11] 隋学敏, 官燕玲, 李安桂, 等. 双热源热压自然通风流场数值模拟研究[J]. *建筑科学*,2007,(10):13-17.
- [12] 倪波. 双热源置换通风系统的实验研究[J]. *暖通空调*,2002,(5):19-21.
- [13] Wang Y, Meng X J, Yang X N, et al. Influence of convection and radiation on the thermal environment in an industrial building with buoyancy-driven natural ventilation[J]. *Energy & Buildings*, 2014,75.
- [14] 孟晓静, 杜高, 王怡. 进风口形式对高大厂房热压通风的影响研究[J]. *工业安全与环保*,2013,39(12):34-36.
- [15] Fang T, Feng H, Wu B. Indoor Ventilation Simulation in Green Building Based on Airpak[C]. *International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*, IEEE Computer Society, 2011,848-851.
- [16] 王怡, 刘国华, 陈靖. 建筑室内环境数值模拟中的耦合方法[J]. *建筑科学与工程学报*,2006,(4):79-83.
- [17] AIRPAK Tutorial Guide Help[M]. *Fluent Company, USA*, 2001.
- [18] 李念平, 张敏慧, 侯素娟, 等. 高层住宅中庭结构特性对其自然通风影响研究[J]. *广州大学学报(自然科学版)*,2010,9(3):60-65.
- [19] 陈雨, 许志浩, 马国川. 关于自然通风 CFD 算法几点探讨[J]. *制冷与空调*,2011,25(1):78-81.
- [20] 王汉青. *通风工程*[M]. 北京:机械工业出版社,2005.