

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.05.007

孔口面积及热源位置对热压通风影响的模拟研究

朱尚斌, 李 灿, 陈 泉

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 利用流体力学计算软件 Airpak 对单热源民用建筑房间的热压通风进行了模拟。给定热源体总热量, 在改变上下部孔口面积比例的情况下, 分析各模拟情况下室内热压通风的中和面高度、有效热量系数、通风量及排出余热量等特征参数的变化规律; 在孔口大小固定的情况下, 研究热源体水平位置同孔口间距改变时热压通风的室内温度场、流场、热源表面温度等参数的变化规律。研究表明: 上下部孔口开口面积相差不大时, 房间内的热压通风效率最佳; 下部孔口面积略大于上部孔口面积时, 有效热量系数 m 处于较低的范围, 且增大某一孔口面积, 中和面会朝着该孔口方向移动; 热源体越靠近下部孔口, 越有利于热源散热。

关键词: 热压通风; 中和面; 有效热量系数; 热源体温度

中图分类号: TU834.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2017)05-0039-06

Simulation Study of the Influence of Orifice Areas and Heat Source Position on Thermal Pressure Ventilation

ZHU Shangbin, LI Can, CHEN Quan

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

Abstract: A simulation study has been made by CFD software Airpak of the thermal pressure ventilation of civil buildings with single heat source. With the total calories of the heat source given, and with the area ratio of the upper and lower orifices changing, a thorough analysis has been made of the variation law of such parameters as the height of the neutral surface, the coefficient of effective heat, ventilation rate and residual heat of the thermal pressure ventilation. With the orifice size fixed, a study has been made of the variation of temperature field, flow field, heat source, surface temperature and other parameters of hot pressing ventilation when the horizontal position of heat source changes with the distance between the orifices. Results show that when the top and bottom orifice open areas are similar, the room will have the best thermal pressure ventilation efficiency; when the bottom open area is greater than the top one, the effective heat coefficient m will change at a low range, and with an increase in the area of an orifice, the neutral plane will move toward the greater area orifice. The closer the heat source to the lower orifice, the higher the heat dissipation efficiency will be.

Keywords: thermal pressure ventilation; neutral plane; effective heat coefficient; temperature of the heat source

收稿日期: 2017-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51246008), 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ4005), 湖南省教育厅科研基金资助项目(10C0612)

作者简介: 朱尚斌(1992-), 男, 河南漯河人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为建筑节能,
E-mail: 1547343533@qq.com

通信作者: 李 灿(1968-), 女, 湖南株洲人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事室内空气品质及建筑节能技术方面的教学与研究, E-mail: lc19992@126.com

0 引言

自然通风是一种不消耗机械动力且经济有效的通风方式。它在一般的居住建筑、办公楼以及工业厂房（尤其是高温车间）中有着广泛的应用，能经济有效地满足室内人员的空气品质要求和生产工艺的一般要求^[1]，特别是对于内部有热源的房间，通过有效地利用热源自身驱动的热压效应进行通风，更具有节能意义。然而，一般的热压通风会受到建筑结构形式、室内热源布置、通风开口面积以及其它机械通风设备等诸多因素的影响，并不是一种能够有效控制的通风方式。

较多学者对于单纯热压通风效果的影响因素（如热源表面温度^[2]、热源面积^[3]、内部热源高度^[4-5]以及双热源^[6]等）进行了大量的模拟实验研究。这些研究主要围绕内部热源的变化进行讨论，但是建筑结构形式的不同，特别是建筑通风孔口面积以及内部热源距孔口位置的不同，对形成良好的热压通风效果同样具有重要的作用。因此，本文以内部具有单热源的民用建筑为研究对象，利用数值模拟的方法，给定内部热源总量，一方面通过改变进出孔口的面积比例，研究室内中和面高度、有效热量系数、余热量等标量的变化规律；另一方面，通过改变热源体在室内的水平位置，研究室内温度场、流场、热源表面温度等参数的变化规律。并通过对以上模拟实验获得的特征参数进行分析，得出孔口面积和热源位置的变化对热压通风效果的影响规律，为民用建筑的设计提供一定的理论参考。

1 物理模型及数值模拟方法

1.1 物理模型

本文以某一典型民用建筑作为研究对象，其模型如图1所示。

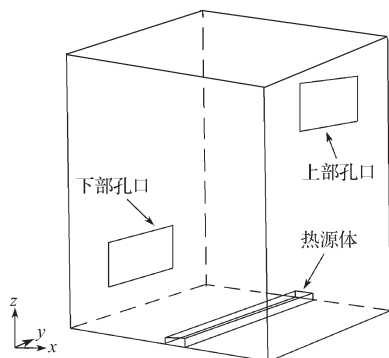


图1 物理模型三维图

Fig. 1 Three-dimensional figure of physical models

图1所示单热源民用建筑的模型尺寸为4 m ×

4 m × 3 m，下部孔口中心高度为0.35 m，上部孔口中心高度为3.85 m，热源尺寸为0.4 m × 0.1 m × 3.0 m，热源功率为1 100 W，热源体布置在房间底部。其中，下部孔口设为热压边界的 pressure-inlet 类型，上部孔口为热压边界的 pressure-out 类型，热源体设为内部实心的 block，忽略墙体换热并设为绝热边界。之所以采用如上设定，是因为相关文献^[7]表明，对于热压通风问题，上下孔口均设置为压力边界条件能更准确地描述问题。

1.2 数值模拟方法

本文采用计算流体力学软件 Airpak 进行计算，且近壁面处采用壁面函数法进行计算，其它区域采用有限体积法进行计算；数学模型采用 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型^[8-9]。对于热压通风问题，考虑到热浮升力的存在，故采用 Boussinesq 假设^[10]，热膨胀系数按照等压计算，计算精度保证各流动项残差小于 10^{-3} ，能量项残差小于 10^{-6} 。

计算区域的网格划分采用结构化网格，为了加快计算速度，并且保证计算结果具有一定的准确性，本研究中对孔口处网格进行加密处理，以保证重力方向上网格节点数不少于6个。其他区域的网格相对稀疏，但是应保证各轴向方向节点间的距离不大于最大尺寸的1/20。

2 孔口面积变化下的热压通风

该模拟工况下，热源体位于房间地板面中心位置处，依次改变上下孔口的面积比例，从1/10增大到10/1，设置上下孔口面积之比分别为1/10, 2/10, 3/10, 4/10, 5/10, 6/10, 7/10, 8/10, 9/10, 10/10, 10/9, 10/8, 10/7, 10/6, 10/5, 10/4, 10/3, 10/2, 10/1。分别模拟以上不同情况，分析比较中和面高度、有效热量系数、通风量及排出余热量等特征参数的变化规律。

2.1 中和面高度

中和面是室内余压值为零的面，是评价热压通风的重要指标之一。当室内有热源存在时，室内温度高于室外温度，此时中和面以上为正压区、以下为负压区。室外空气会由处于负压区的下部孔口流入室内，并从上部孔口流出。根据质量守恒定律，流经上下孔口的空气质量相等。

由孔口流量 q 的计算公式和质量守恒定律可以得出如下关系式^[11]：

$$q_{\text{下}} = \mu_{\text{下}} F_{\text{下}} \sqrt{2\Delta p_{\text{下}} \rho_{\text{外}}} = q_{\text{上}} = \mu_{\text{上}} F_{\text{上}} \sqrt{2\Delta p_{\text{上}} \rho_{\text{内}}},$$

$$\Delta p_{\text{下}} = h_{\text{下}} (\rho_{\text{外}} - \rho_{\text{内}}) g = K_s h_{\text{下}} \left(\frac{1}{T_{\text{外}}} - \frac{1}{T_{\text{内}}} \right),$$

$$\Delta p_{上} = h_{上} (\rho_{外} - \rho_{内}) g = K_s h_{上} \left(\frac{1}{T_{外}} - \frac{1}{T_{内}} \right)$$

式中: $F_{上}$ 、 $F_{下}$ 为上、下部孔口面积, m^3 ;
 $\mu_{上}$ 、 $\mu_{下}$ 为上、下部孔口流量系数;
 $\Delta p_{上}$ 、 $\Delta p_{下}$ 为上、下部孔口压力差, Pa;
 $\rho_{内}$ 、 $\rho_{外}$ 为室内、外空气密度, kg/m^3 ;
 $h_{上}$ 、 $h_{下}$ 为上、下部孔口中心与中和面高度差, m;
 $T_{内}$ 、 $T_{外}$ 为室内、外热力学温度, K;
 K_s 为与当地大气压有关的系数, 标准大气压时,
 $K_s=3\ 460$ (Pa·K/m)。

根据以上关系式可以得到中和面高度 h 同上下部孔口面积比的关系如下:

$$h = h_{下} + \frac{H}{1 + \left(\frac{\mu_{下} F_{下}}{\mu_{上} F_{上}} \right)^2 \frac{T_{内}}{T_{外}}}$$

式中 H 为上下孔口中心高差。

在本文的算例中, $h_{下} = 0.35$ m, $H=3.5$ m; 为忽略其它因素的影响, 假设 $\mu_{上} = \mu_{下}$, 其中 $T_{外} = 298$ K, $T_{内} = 299.6$ K, 故可认为 $T_{内}/T_{外} \approx 1$, 此处设 $x = F_{下}/F_{上}$, 可以得到中和面高度 h 同 x 的关系式为

$$h = 0.35 + \frac{3.5}{1 + x^2}$$

图2所示为中和面高度 h 随上下部孔口面积比 x 变化的曲线, 其中, 线型曲线代表根据上述理论公式推导得出的理论值, 点线型曲线代表根据数值模拟计算得到的模拟值。

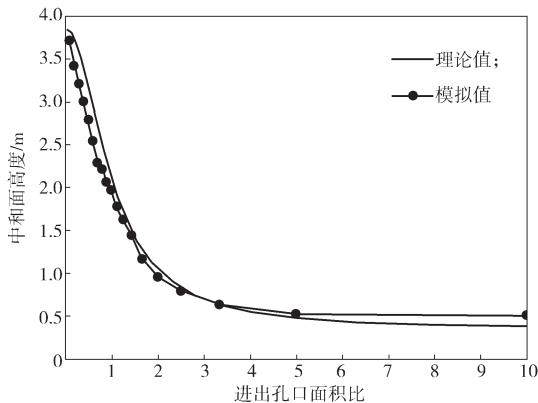


图2 中和面高度随进出孔口面积比变化曲线

Fig. 2 Change curves of the neutral plane height with inlet and outlet of the orifice area

观察图2中的理论值曲线与模拟值曲线可以得知, 两条曲线的变化趋势基本相同, 两者间的误差范围较小, 因而可以认为两者具有一致性。通过观察还可发现: 1) 当 $0 < x < 2$ 时, 中和面高度基本在1 m以上, 并且变化趋势比较陡峭, 说明下上部孔口面积比

例的变动会显著影响室内的中和面高度, 并且上部或下部孔口面积增大时, 中和面会朝着面积增大的孔口移动; 2) 当 $2 < x < 10$ 时, 中和面高度基本在0.5 m左右, 且变化趋于缓慢, 维持在室内的中下部, 最低高度仍然高于下部孔口中心高度, 这表明当房间上部没有开口时, 进风口兼具有排风口的作用, 此时孔口上部排风、下部进风。

2.2 有效热量系数

在自然通风的设计中, 有效热量系数 $m^{[12]}$ 是一个重要的特征参数。它用于表征上升热射流中返回工作地带的余热比例, 散入作业地带的余热越大, m 值越大, 则工作区的温度越高。关于 m 值的计算公式为

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

式中: t_n 为工作区的温度, 即工作地点所在地面上2 m以内的温度;

t_p 为房间上部的温度;

t_w 为室外温度。

根据模拟计算得出有效热量系数 m 随 x 的变化规律, 如表1所示。

表1 不同进出孔口面积比例的有效热量系数

Table 1 Effective heat coefficients at different inlet and outlet orifice area ratios

进出孔口面积比例	有效热量系数	进出孔口面积比例	有效热量系数
1/10	1.470	10/9	0.888
2/10	1.125	10/8	0.888
3/10	1.154	10/7	0.888
4/10	1.250	10/6	0.888
5/10	1.273	10/5	0.902
6/10	1.300	10/4	0.818
7/10	1.201	10/3	0.818
8/10	1.044	10/2	0.917
9/10	0.889	10/1	0.999
10/10	0.889		

分析表1中的数据可以得知, 当进出孔口面积比例 x 从最小值1/10逐渐增大到10/9的过程中, m 值总体上呈现出下降的变化趋势; 当 x 从10/6增大到10/1时, m 值总体呈增大的变化趋势; 当 $10/9 < x < 10/6$ 时, m 处在一个低值范围内, 而此时上下部孔口的面积相差不大, 下部孔口面积略大, 此时随热羽流上升并返回散入工作地带的余热最少。

2.3 通风量与热源温度

通风开口面积的大小直接影响着室内通风量的变化。当室内有固定的热源存在时, 通风开口面积的

大小对冷却内热源、排出室内余热量等也起着重要的作用。为此,本课题组成员通过多次模拟计算和统计分析,汇总出上下部孔口面积比不同时室内通风量、热源温度以及排出余热量的变化情况,所得具体数据见表2。

表2 不同进出孔口面积比例的热源温度、排出热量和通风量数据

Table 2 Data of heat source temperature, heat output and ventilation volume at different inlet and outlet orifice area ratios

进出孔口面积比例	热源体温度 / $^{\circ}\text{C}$	排出余热量 / W	通风量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
1/10	89.94	400.2	0.15
2/10	89.42	537.6	0.27
3/10	87.81	670.2	0.40
4/10	84.67	773.9	0.52
5/10	84.17	837.5	0.61
6/10	83.39	897.9	0.69
7/10	82.95	944.4	0.76
8/10	82.52	981.2	0.81
9/10	81.93	1 003.0	0.86
10/10	82.38	1 018.0	0.90
10/9	82.95	963.2	0.84
10/8	83.68	895.5	0.77
10/7	84.44	822.6	0.69
10/6	85.32	741.7	0.62
10/5	86.44	650.5	0.53
10/4	87.61	554.1	0.43
10/3	88.84	451.4	0.33
10/2	89.96	341.6	0.28
10/1	90.66	205.1	0.12

通过分析表2中的数据变化情况,不难发现,通风量和排出余热量随着进出孔口面积比例 x 的变化具有相似的变化规律,当 $8/10 < x < 10/9$ 时,室内通风量和排出余热量都较大,这表明上下孔口面积相差较大时,房间内的热压通风效果较好,通风效率较高;且当 $8/10 < x < 1$ 时,热源体表面温度较低,通风量较大,此时有利于室内热源的冷却。

3 热源位置变化下的热压通风

本研究设定工况下,上下孔口的面积大小固定,且下部孔口尺寸确定为 $0.25 \text{ m} \times 3.00 \text{ m}$,上部孔口尺寸确定为 $0.3 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$,移动热源体在地板面的水平位置,以热源体中心到排风口的距离为参考标准,依次从 0.2 m 增大到 3.6 m ,每次扩大 0.4 m 的间距,研究每种情况下房间内的流场变化、不同截面高度处的温度以及有效热量系数等特征参数的变化规律,以确定较佳的热源位置。

3.1 流场、不同高度截面处温度场分布

图3所示为选取的热源中心面和上部孔口间距 L 分别为 $3.8, 2.0, 0.2 \text{ m}$ 时,房间内 z 轴中心截面上的流场变化示意图。

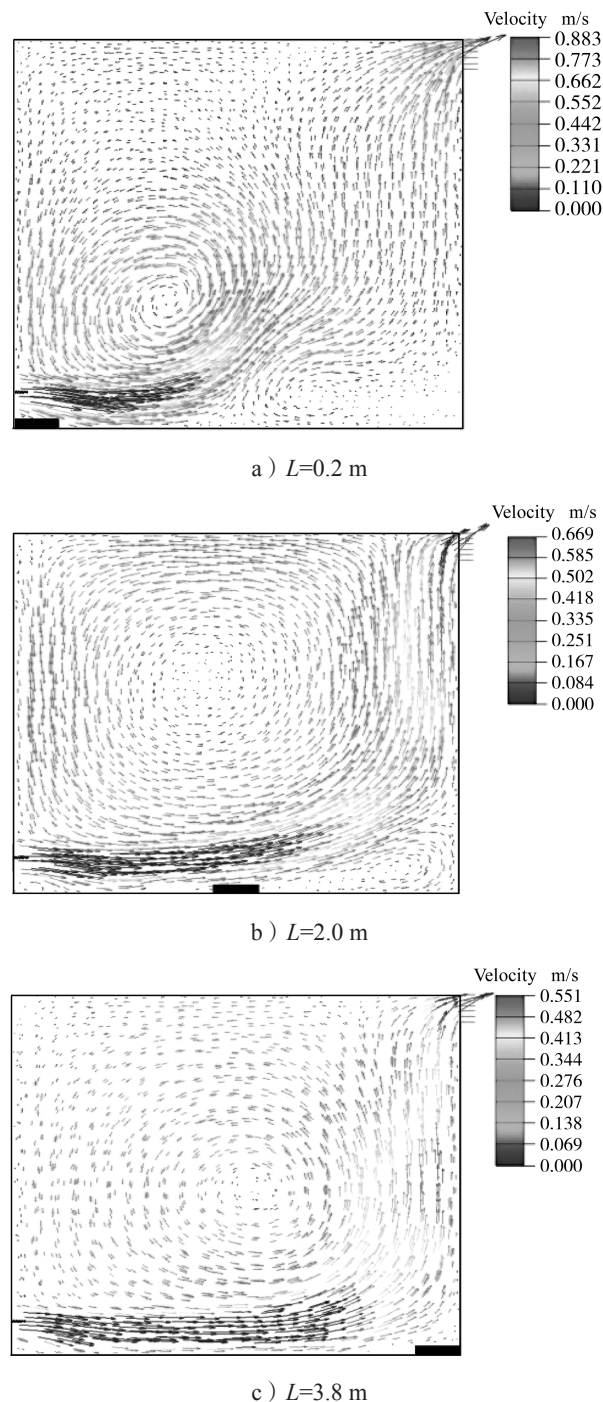


图3 L 不同时房间内 z 轴中心截面上流场变化示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the flow field at the center section of z axis under different L

观察图3不难发现,当室外冷空气进入房间后,其在高温热源体表面经过对流换热,形成上升的热羽流,且热羽流在上升过程中会不断卷吸周围的冷空气,导致热羽流温度逐渐下降;当热羽流到达房间顶

部后, 经过上部孔口排出室外。但不是全部的热羽流都由上部孔口排出, 一部分射流会沿反向形成后向回流, 在房间内形成一个大的回流涡旋, 并重新返回至工作地带。

不同热源中心面的截面流场变化存在一定的差异, 如图 3a, 当热源体靠近下部孔口时 ($x=0.2\text{ m}$), 经热源体换热上升的热羽流中, 其中一部分被房间远场的冷空气冷却卷吸没有到达房间顶部, 从而形成向前的回流。通过对比 3 幅图的变化, 发现热源体向房间内部移动的过程中, 房间内远场空气逐步被加热, 热羽流上升过程中热量损失减少, 向前的回流逐渐变小直至消失, 相反的是到达房间顶部形成的向后回流的范围越来越大。

通过观察图 3 右侧 Velocity 等值标签, 在热源体向房间内部移动的过程中, 速度线值整体上是减小的, 说明热羽流强度整体上逐渐减弱。这是由于热源体越靠近进风口, 越处于上风侧, 流经工作区的空气温度越高, 上下部温差变大, 进而造成热压驱动力增强, 上升的热羽流流速加大。

3.2 有效热量系数、中和面及热源表面温度变化特征

经过统计, 得出热源体不同水平位置下房间内不同断面高度截面处的平均温度值, 如图 4 所示。为便于观察变化, 本图倒置变量绘制。

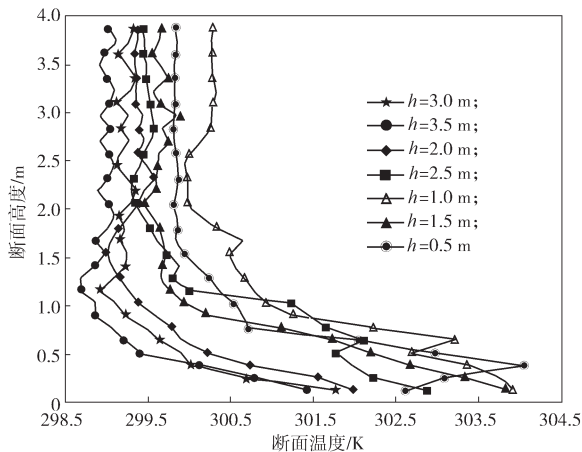


图 4 热源体不同水平位置时房间内不同高度截面处的平均温度

Fig. 4 Average temperature at different heights of cross-section for different horizontal position of heat source

由于热源体在房间的底部, 在热源体周围热源主要以辐射的方式对外散热, 导致工作地带 1 m 以下不同高度截面处平均温度明显高于房间上部; 通过对比热源体不同水平位置下的某一断面温度, 发现越靠近下部孔口, 室内的平均温度越高, 说明热源热量在

室内扩散得越多, 同时越靠近下部孔口, 室内上部和下部的温差也越大, 由此形成的热压效应强度越强, 室内通风效率越高; 当热源体靠近上部排风孔口时, 情况相反, 房间内通风效率下降, 散入工作地带的余热量减少, 工作区平均温度较低, 热源体的冷却效率降低。

4 结论

热压通风在生产生活中的应用非常广泛, 其中热压的影响因素很多, 通过研究分析掌握其特点将有利于生产工艺的提高。本文通过模拟研究单热源下通风开口面积改变以及热源体水平位置改变下的热压通风, 得出房间内热压通风特征参数的变化规律, 可得出以下结论:

1) 当热源体位置固定时, 通过改变上下部孔口面积, 其中下上部孔口面积比在 $0 < x < 2$ 时, 中和面高度变化比较显著, 且增大某一孔口面积, 中和面会朝着该孔口方向移动; 当 $8/10 < x < 10/8$ 时, 上下部孔口开口面积相差不大, 此时房间内热压通风效率最佳, 对冷却热源体以及稀释室内热空气的效果最好; 当 $10/9 < x < 10/6$, 即下部孔口面积略大于上部孔口面积时, 有效热量系数 m 值处于较低的范围, 此时随热羽流上升并返回散入工作地带的余热量较少。

2) 当上下部孔口面积固定, 热源体处于靠近下部孔口的位置时, 房间内通风效率较好, 对热源体的冷却有利, 热源余热量在工作地带散布较多; 当热源体靠近上部排风口时, 房间内通风效率下降, 散入工作地带的余热量减少, 工作区平均温度较低, 热源体的冷却效率降低。

参考文献:

- [1] 王汉青. 通风工程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 41-42.
WANG Hanqing. Ventilation Engineering [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 41-42.
- [2] 王松, 钟珂, 丁淑红. 热源表面温度对热压通风效果的影响研究 [J]. 建筑热能通风空调, 2015, 34(4): 18-21.
WANG Song, ZHONG Ke, DING Shuhong. Influence of Heat Source Surface Temperature on Thermal Ventilation Effect [J]. Building Energy & Environment, 2015, 34(4): 18-21.
- [3] 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, 24(2): 80-85.

- SUI Xuemin, GUAN Yanling, LI Angui, et al. Influence of Heating Source Area on Thermal Pressure Natural Ventilation in Room[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(2): 80-85.
- [4] 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, 28(2): A14-A17.
- SUI Xuemin, GUAN Yanling, LI Angui, et al. Influence of Internal Heat Source Height on Thermal Pressure Natural Ventilation Flow Field[J]. Gas & Heat, 2008, 28(2): A14-A17.
- [5] 李林, 肖婷, 廖婉婷, 等. 双开口室内热压自然对流模拟及热源分析[J]. 湖南工业大学学报, 2016, 30(2): 1-7.
- LI Lin, XIAO Ting, LIAO Wanting, et al. Simulation of Indoor Heat Press Natural Convection with Double Openings and Thermal Source Analysis[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2016, 30(2): 1-7.
- [6] 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, 23(10): 13-17.
- SUI Xuemin, GUAN Yanling, LI Angui, et al. Numerical Simulation Study on Flow Field of Thermal Natural Ventilation with Double Heating Sources[J]. Building Science, 2007, 23(10): 13-17.
- [7] 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.
- CHEN Yu, XU Zhihao, MA Guochuan. The Study About CFD Algorithms of Natural Ventilation[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2011, 25(1): 78-81.
- [8] 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, 23(4): 79-83.
- WANG Yi, LIU Guohua, CHEN Jing. Coupling Method by Numerical Simulation of Building Indoor Environment[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(4): 79-83.
- [9] 王志勇, 杨顺富. 内置遮阳百叶外循环双层通风幕墙传热与流动特性研究[J]. 湖南工业大学学报, 2016, 30(5): 6-11.
- WANG Zhiyong, YANG Shunfu. Research on Heat Transfer and Flow Properties of External DSF with Built-in Shading Shutters[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2016, 30(5): 6-11.
- [10] 刘远禄. 热压作用下高大工业厂房地道自然通风的实测分析及数值模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- LIU Yuanlu. The Measurement and Numerical Simulation of Tall Industrial Plant in Hot Authentic Tunnel Ventilation[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [11] 黄晨. 建筑环境学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 96-98.
- HUANG Chen. Building Environment[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 96-98.
- [12] 王江龙. 热车间局部排风时机械送风量计算的探讨[J]. 有色金属设计, 2011, 38(3): 49-51, 55.
- WANG Jianglong. Probe into Calculating Mechanical Ventilation with Local Air-Exchange in Workshop[J]. Nonferrous Metals Design, 2011, 38(3): 49-51, 55.

(责任编辑: 廖友媛)