

文章编号:1673-2049(2007)02-0080-06

## 热源面积对室内热压自然通风的影响

隋学敏<sup>1</sup>, 官燕玲<sup>2</sup>, 李安桂<sup>3</sup>, 张旭<sup>1</sup>

(1. 同济大学 暖通空调及燃气研究所, 上海 200092; 2. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054;  
3. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**针对具有内热源的民用建筑,采用计算流体力学(CFD)方法,通过改变热源面积对热压自然通风流场进行数值模拟分析,得出了不同热源面积下的通风量、排风温度及其变化规律,分析了不同工况下的温度场和速度场,得出了中和面高度和有效热量系数随热源面积的变化规律。结果表明:热源面积的变化主要影响房间下部的温度场,对通风量和排风温度的影响不大,对中和面高度和有效热量系数均有一定的影响。该结论为民用建筑自然通风系统的设计提供了理论依据。

**关键词:**热源面积;热压自然通风;流场;中和面;有效热量系数;计算流体力学

中图分类号:TU834.1

文献标志码:A

## Influence of Heating Source Area on Thermal Pressure Natural Ventilation in Room

SUI Xue-min<sup>1</sup>, GUAN Yan-ling<sup>2</sup>, LI An-gui<sup>3</sup>, ZHANG Xu<sup>1</sup>

(1. Institute of Heating, Ventilation, Air Conditioning and Gas, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;  
3. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and  
Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

**Abstract:** Aimed at the civil building with inside heating source, using the method of computational fluid dynamics (CFD), changing the heating source area, and simulating the fluid field of the thermal pressure natural ventilation, authors presented the quantity of air ventilation, the temperature of air flowing out and its changing rule in different heating source area; analysed the temperature field and velocity field in different conditions; gave the variation rule of the height of neutral surface and the effective heating coefficient. The result shows that the variations of heating source area mainly influence the temperature field of bottom area in room, and influence the quantity of air ventilation and the temperature of air flowing out in some sort, and produce some influence on the height of neutral surface and the effective heating coefficient to a certain extent. All these conclusions provide theory foundation for the design of the natural ventilation system in civil building.

**Key words:** heating source area; thermal pressure natural ventilation; fluid field; neutral surface; effective heating coefficient; computational fluid dynamics

收稿日期:2007-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(50278075)

作者简介:隋学敏(1981-),女,山东东营人,工学博士研究生,E-mail:suisui20021@sina.com。

# 0 引 言

自然通风作为被动降温方法,有助于减少建筑的能耗,近年来引起了各国暖通空调界的高度重视<sup>[1-2]</sup>。自然通风的动力来自于风压和热压。由于风压变化较大,而且逐时不稳定,根据中国目前的暖通空调设计规范(GB 50019—2003)中规定<sup>[3-4]</sup>,对于自然通风的设计,仅考虑热压作用,主要用于有余热的工业厂房的通风降温。由于照明、计算机以及人体本身的散热等,有余热的民用建筑普遍存在,故有利用热压自然通风改善室内温度环境的条件。研究民用建筑热压自然通风的影响因素,对民用建筑自然通风系统的设计具有重要的指导意义。

对于有一定内热源的建筑,热压自然通风主要受热源的集中程度、热源布置情况及建筑物的几何因素的影响<sup>[5-10]</sup>。热源面积反映了热源的集中程度和热源布置情况,因此研究热源面积对室内热压自然通风的影响具有重要意义。笔者采用计算流体力学方法,改变热源面积,对具有一般几何特征的民用建筑的热压自然通风流场进行了数值模拟,分析了不同工况下的室内流场分布,得出了热压自然通风中的各种参数随着热源面积的变化规律,为民用建筑自然通风系统的设计提供了理论依据。

## 1 热压自然通风原理

热压是由室内外空气的密度差引起的。如果室内温度高于室外,建筑物上部将存在较高的压力,而建筑物下部存在较低的压力。当这些位置存在孔口时,空气通过较低的开口进入,从上部开口流出(图 1)。如果室内温度低于室外温度,则气流方向相反。热压的大小取决于建筑物 2 个开口处中心的高度差和室内外空气密度差。在建筑物内部,由于人体、灯光、设备、太阳辐射等产生大量的热,当室外空气温度低于室内温度时,可利用热压的作用将室外空气引入室内。

## 2 物理模型与数值计算方法

### 2.1 物理模型

本文中选择的几何尺寸具有代表性的民用建筑(4 m×3 m×3 m),如图 2 所示。对于热压作用下的房间自然通风问题,由于通风口的风速和风向是无法预定的,数值计算时的边界处理成为一大难点,因此对通风口采用多孔跳跃内部边界条件,同时将计算区域扩大到无限远,考虑到计算量太大,笔者对

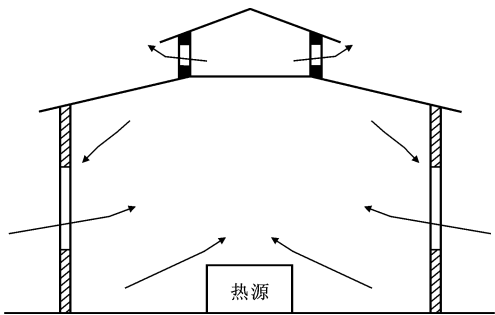


图 1 热压自然通风

Fig. 1 Thermal Pressure Natural Ventilation

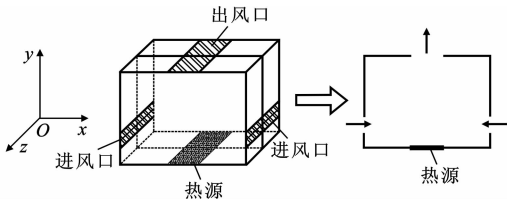


图 2 物理模型

Fig. 2 Physical Model

三维模型做了简化。三维模型  $z$  方向的中间断面是房间对称面,因此计算模型可简化为二维模型,将该房间的对称面作为研究对象。室外环境温度为 290 K,室外环境压力为  $1.013\times10^5$  Pa。

### 2.2 数值计算方法

本文中所研究的流场属于自然对流紊流流场,笔者通过大量的试算和对模拟结果进行对比分析,选用 RNG  $k-\epsilon$  紊流模型与标准壁面函数方法和 Boussinesq 假设<sup>[11]</sup>。

计算区域的大小将影响模拟结果的准确性和计算量的多少。笔者通过大量的试算,确定计算区域的长度和高度分别为房间长度、高度的 30 倍和 50 倍,形成无限远边界。采用非均匀网格,热源、出风口、进风口网格划分的较密集,房间内网格稍稀疏,房间周围计算区域的网格随着相对于房间的距离的增大逐渐变稀,这种网格划分方法可以减少节点、节省计算时间。

## 3 计算结果与分析

在房间几何尺寸及室内余热量不变的情况下,研究热源面积的变化对室内自然通风的影响。室内余热量  $q$  为 500 J,进风口高度为 0.5 m,出风口宽度为 1.0 m,进出风口中心高度差为 2.25 m,改变热源面积(热源宽度)对热压自然通风流场进行数值模拟,得到的主要参数值见表 1。由表 1 可以看出,随着热源面积的增大,通风量逐渐增大,但相对来说变

表 1 不同热源面积下的数值模拟结果

Tab.1 Numerical Simulation Result with Different Heating Source Areas

热源宽度 $a/\text{m}$	热源与地板面积比 $\gamma$	通风量 $G/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	排风口气流平均温度 $T_p/\text{K}$	进风口气流平均温度 $T_o/\text{K}$	工作区平均温度 $T_n/\text{K}$
0.2	0.050	0.272 7	291.849	290.031	291.081
0.5	0.125	0.274 9	291.841	290.046	291.086
0.8	0.200	0.276 2	291.894	290.033	291.086
1.0	0.250	0.276 7	291.903	290.032	291.294
1.5	0.375	0.276 9	291.826	290.030	291.667
2.0	0.500	0.281 3	291.799	290.024	291.715
2.5	0.625	0.284 4	291.762	290.026	291.732
3.0	0.750	0.290 3	291.721	290.023	291.792
3.5	0.875	0.294 2	291.754	290.028	291.928
4.0	1.000	0.302 3	291.672	290.038	292.311

化率较小;排风温度具有减小的趋势,但温度变化幅度并不大;工作区平均温度随着热源面积的增大而逐渐升高。

3.1 速度场分布

图 3 为不同热源面积下的室内速度场分布。由图 3 可以看出:

(1)热源上方有一股上升气流,这是由室内空气的密度差造成的。靠近热源表面附近的空气层被加热而膨胀,其密度比周围空气密度小,所以热空气以自然对流的形式向上升,形成羽流,即受限对流热射流。羽流在浮升力的作用下,不断地上升。羽流可分为 3 个阶段。第 1 阶段,周围空气流向热源表面,这是羽流的形成阶段,主要是热源对流换热过程;第 2 阶段,羽流运动加强,同时羽流断面逐步收缩,形成收缩断面,这是羽流的收缩段;第 3 阶段,由于热上升气流不断卷吸周围的空气,羽流断面不断扩大。当羽流运动到顶棚附近时,一部分空气由排风口排出,另一部分空气受限沿顶棚两侧被迫下降,空气在下降过程中又被羽流所卷吸。

(2)随着热源面积的增大,热源上方上升气流的速度变小,而进风速度、排风速度却逐渐增大。对于面积较大的热源,其热表面中心有上升气流,两侧受进风口的影响并无上升气流。

(3)不管热源集中于地面中心( $a=0.2\text{ m}$ ),还是均匀分布于地面( $a=3.5\text{ m}$ ),进风口下部墙角处有 2 个小涡流,热源集中时,涡流的强度较小,热源面积增大,涡流的强度也将随之增大。

(4)随着热源面积的增大,同一高度上羽流的水平断面尺寸有所增加,即扩散面积增大。

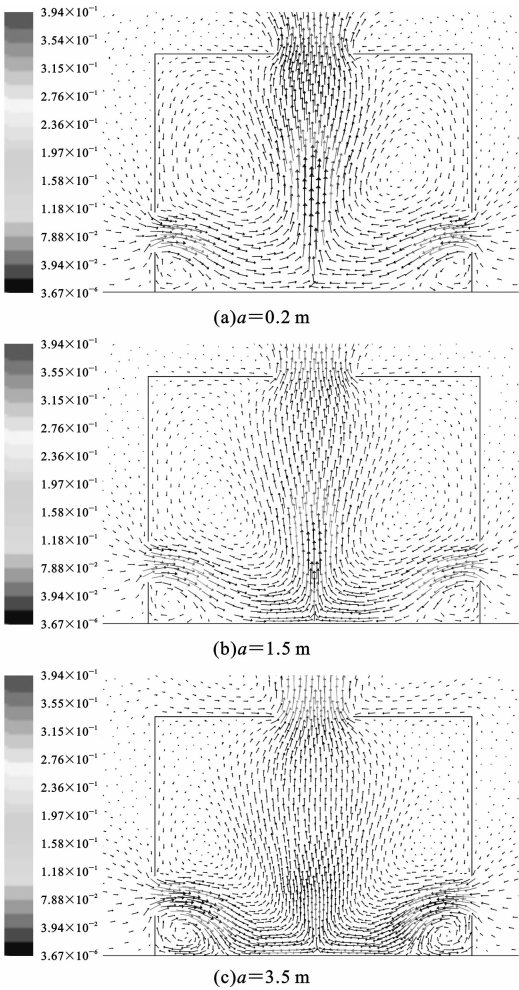


图 3 不同热源面积下的室内速度场分布(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig.3 Distribution of Velocity Field in Room with Different Heating Source Areas (Unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(5)随着热源面积的增大,室内上部空间形成的回流区越来越小。由于浮升力的作用,热气流上升,同时卷吸周围室内空气一起上升,当气流上升到顶棚时,具有一定的垂直速度,受到墙壁的阻碍,这部分动能转化为静压  $\rho v^2$  ( $\rho$  为气流密度,  $v$  为气流速度);当  $\rho v^2$  大于浮升力时,一部分上部热空气会推动室内空气向下流动,直到其动量消耗为 0,然后沿水平方向移动,形成回流区。热源面积增大时,室内空气的密度梯度减小,上升气流的速度减小,气流上升到顶棚时,形成的静压较小,只能使一小部分室内空气向下流动,形成较小的回流区。

3.2 温度场分布

图 4 为不同热源面积下的室内温度场分布。由图 4 可以看出:

(1)不论室内热源面积大小,各计算工况温度场具有相同的温度变化规律,室内温度场存在明显的分层现象,下部区域温度变化较大,上部区域温度较

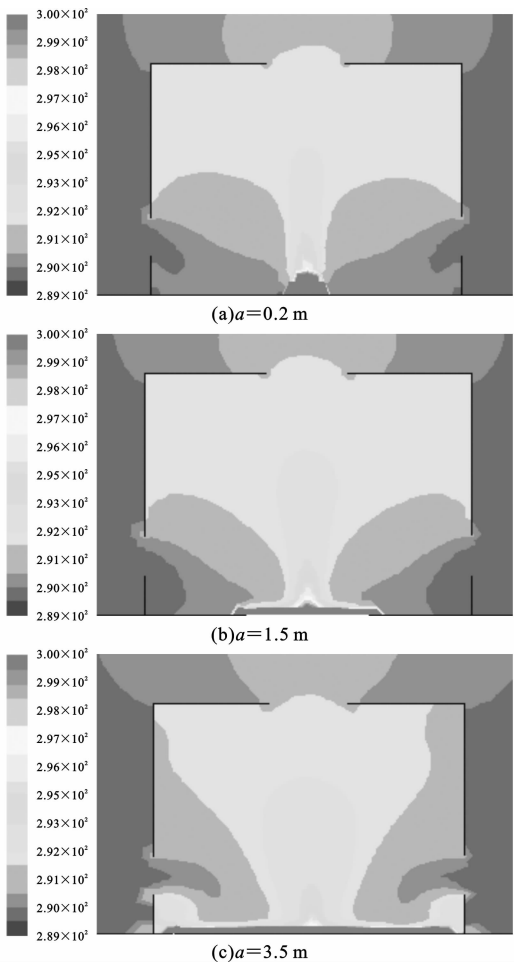


图 4 不同热源面积下的室内温度场分布(单位:K)  
Fig. 4 Distribution of Temperature Field in Room with Different Heating Source Areas (Unit:K)

稳定。

(2)随着热源面积的增大,室内下部空间的温度增高,温度梯度增大,说明热源面积增大时,热源对房间下部空间的温度场影响变大。

(3)随着热源面积的增大,进风口附近形成的低温区变小。这是由于热源面积的扩大,使得进风气流未到达热源中心前就过早地与热源上方的热空气发生对流换热,从而使由于进风气流影响而形成的低温区减小。

图 5 为不同热源面积下  $x=0.5\text{ m}$ 、 $x=1.0\text{ m}$  断面沿高度方向的温度变化规律。由图 5 可以看出:

(1)在房间下部区域 2 个位置的温度高低较明显, $x=1.0\text{ m}$  处的温度高于  $x=0.5\text{ m}$  处;温度随着高度的增加而变化,当高度达到  $1.5\text{ m}$  时,2 个位置的温度趋于一致。室内温度存在明显的分层现象,下层温度梯度大,上层温度梯度小,温度分布趋于均

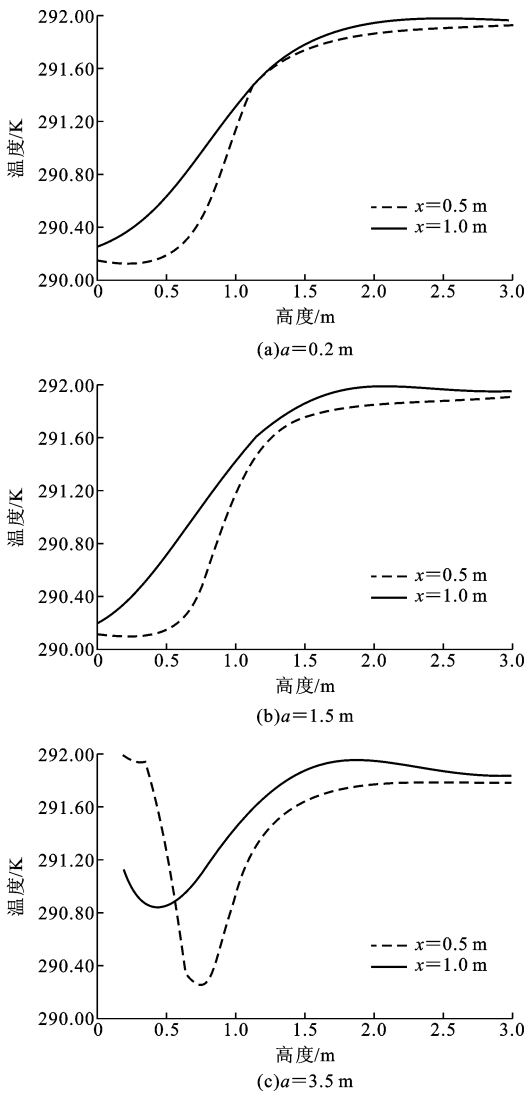


图 5 不同热源面积下  $x=0.5\text{ m}$ 、 $x=1.0\text{ m}$  断面沿高度方向的温度变化规律  
Fig. 5 Changing Rule of Temperature at  $x=0.5\text{ m}$  and  $x=1.0\text{ m}$  Section Along Direction of Height with Different Heating Source Areas

匀。从速度场可以看出,由于进风气流参与了热羽流的形成,并逐步向上补充羽流体积流量,从而使离地面较近的区域内温度变化较小;在热分层高度附近,下部进风气流与上部返回的气流掺混,因而出现一个温度剧烈变化的区间。随着高度的增加,处于房间底部的热源对房间内空气的影响逐渐减小,温度分布趋于均匀。

(2)不论热源面积大小, $x=0.5\text{ m}$  断面  $1.5\text{ m}$  高度以上温度变化不大,趋于一致, $x=1.0\text{ m}$  断面  $1.5\text{ m}$  高度以上温度梯度稍有增大,但相对来说,变化较小。

图 6 为不同热源面积下水平断面平均温度随高

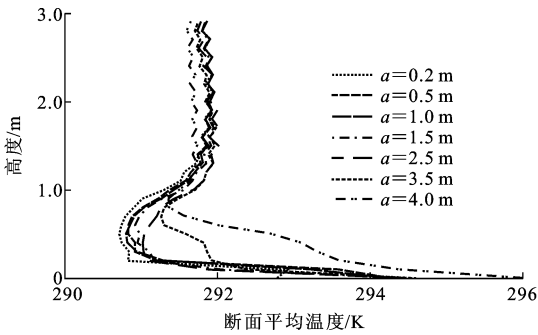


图 6 不同热源面积下水平断面  
平均温度随高度的变化规律

Fig. 6 Changing Rule of Average Temperature vs Height of  
Horizontal Section with Different Heating Source Areas

度的变化规律。由图 6 可以看出：

(1)对于每一个计算工况而言,断面平均温度先下降后上升,每个计算工况都存在 1 个最低平均温度断面。随着热源面积的增大,最低平均温度的断面高度增大。 $a=0.2\text{ m}$ 时,最低平均温度断面的高度为 $0.5\text{ m}$ ;  $a=4.0\text{ m}$ 时,最低平均温度断面的高度为 $0.9\text{ m}$ 。

(2)热源面积的增大对房间下部空间 $1.3\text{ m}$ 以下区域影响较大,随着热源面积的增大,各计算工况同一高度断面平均温度会增大。

(3)热源面积的增大对房间上部空间断面的平均温度影响不大。对于每一计算工况而言,不同高度上各断面平均温度趋于一致。热源面积的增大,会使同一高度各计算工况断面平均温度降低。

3.3 中和面高度

中和面是热压自然通风中的一个重要指标。中和面是余压为 0 的面,位于中和面上的开口既无空气流入也无空气流出。中和面的高度影响室内热压自然通风的流场。

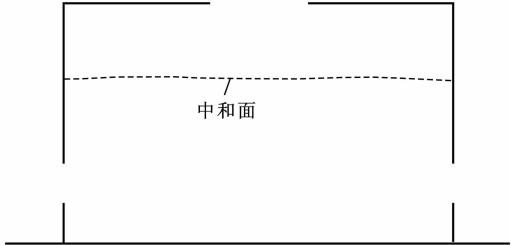
本文中室外环境大气压力为  $1.013\times10^5\text{ Pa}$ ,数值模拟时的操作压力也为  $1.013\times10^5\text{ Pa}$ ,根据中和面的定义,可知本文中和面即静压为 0 的面。FLUENT 软件可以提供房间内速度场、压力场、温度场的详细信息,也能找出具有一定量特征参数的面。利用 FLUENT 软件提供的自处理功能,定义一静压为 0 的面,即为中和面,并利用 DISPLAY 命令将中和面在房间中的位置显示出来。

图 7(a)为热源宽度  $a=1.0\text{ m}$  时的压力场。由图 7(a)中可以看出,房间上部有明显的水平压力分层,图 7(b)为对应的中和面位置。

同理,可以找出不同热源面积下的中和面高度值,得出其随热源面积的变化规律,如图 8 所示。



(a)压力场(单位:Pa)



(b)中和面位置

图 7  $a=1.0\text{ m}$  时的压力场及中和面位置

Fig. 7 Pressure Field and Neutral Surface  
Location with  $a=1.0\text{ m}$

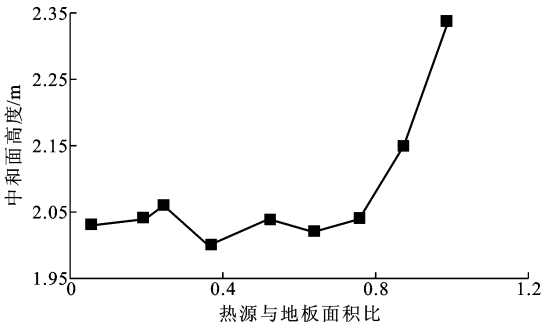


图 8 中和面高度随热源面积的变化规律

Fig. 8 Changing Rule of Neutral Surface Height vs  
Heating Source Area

由图 8 可以看出:当热源与地板的面积比  $\gamma\leq 0.8$  时,中和面高度保持在 $2.025\text{ m}$ 左右;当  $0.8<\gamma\leq 1.0$  时,中和面高度呈上升趋势;当  $\gamma=1.0$  时,中和面高度达到最大值,但总的来说,中和面高度增加的幅度不大。由此可见,热源面积的变化对中和面的高度影响不大。

3.4 有效热量系数

有效热量系数  $m$  是热压自然通风设计中的重要参数,表示直接散入工作区的那部分热量占室内总散热量的多少,计算公式为

$$m=\frac{T_n-T_o}{T_p-T_o} \tag{1}$$

根据表 1 的模拟结果,由式(1)可计算出不同热源面积下的有效热量系数  $m$  的值,并得出其变化规律如图 9 所示。

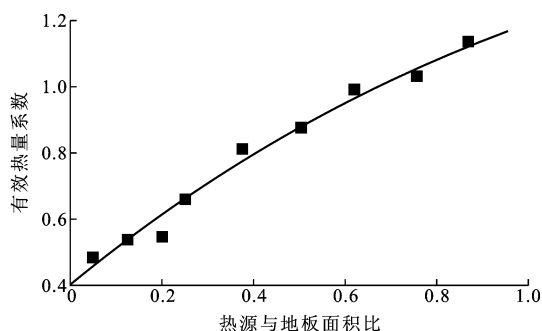


图9 有效热量系数随热源面积的变化规律

Fig. 9 Changing Rule of Effective Thermal Coefficient vs Heating Source Area

由图9可看出:热源面积越大,有效热量系数越大,说明热源面积越大,散入工作区的热量越多,因而排风效果也就越差。

## 4 结 语

随着热源面积与地板面积比的增大,排风量逐渐增大,排风温度逐渐减小,但变化的幅度很小;热源面积的变化对房间上部空间的温度分布影响不大,对房间下部空间的温度影响明显。热源面积增大时,室内下部空间的温度增高,温度梯度增大,房间水平方向的温度分布均匀度降低。热源面积的变化对中和面的高度影响不大。热源面积与地板面积比越大,有效热量系数越大,有效热量系数随着热源面积与地板面积比的增加呈二次递增趋势。

## 参考文献:

## References:

- [1] 朱 唯,狄育慧,王万江,等.室内环境与自然通风[J].建筑科学与工程学报,2006,23(1):90-94.  
ZHU Wei, DI Yu-hui, WANG Wan-jiang, et al. Indoor Environment and Natural Ventilation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1): 90-94.
- [2] 刘 静,俞炳丰,高振生.低温送风系统的研究进展[J].建筑科学与工程学报,2005,22(3):70-74.  
LIU Jing, YU Bing-feng, GAO Zhen-sheng. Study Progress of Cold Air Distribution Systems[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 70-74.
- [3] GB 50019—2003,采暖通风与空气调节设计规范[S].  
GB 50019—2003, Code for Design of Heating, Ventilation and Air Conditioning[S].
- [4] 暖通规范管理组.暖通空调设计规范专题说明选编

[M].北京:中国计划出版社,1990.

Management Organization of Code for Heating, Ventilation and Air Conditioning. Special Subject Explanation Selected Works to Code for Design of Heating, Ventilation and Air Conditioning[M]. Beijing: China Planning Press, 1990.

- [5] 孙一坚.工业通风[M].北京:中国建筑工业出版社,1994.  
SUN Yi-jian. Industrial Ventilation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1994.
- [6] 霍小平,葛翠玉.建筑室内热环境测试与分析[J].建筑科学与工程学报,2005,22(1):75-78.  
HUO Xiao-ping, GE Cui-yu. Analysis and Test of Thermal Environment Data in Buildings[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 75-78.
- [7] 张 莉,郑庆红.地板送风对流热转移[J].建筑科学与工程学报,2006,23(2):86-89.  
ZHANG Li, ZHENG Qing-hong. Convection Heat Transfer with Floor Board Air Supply[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(2): 86-89.
- [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 Guo-hua, CHEN Jing. Coupling Method by Numerical Simulation of Building Indoor Environment[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(4): 79-83.
- [9] 郑爱平,顾 娟,宋 慧,等.太阳能吸附式转轮制冷机研究[J].建筑科学与工程学报,2006,23(1):85-89.  
ZHENG Ai-ping, GU Juan, SONG Hui, et al. Research on Solar Energy Adsorption Rotary Refrigerator[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1): 85-89.
- [10] 郑爱平,李建霞,顾 娟.太阳能固体吸附式转轮制冷机性能分析[J].建筑科学与工程学报,2006,23(3):76-80.  
ZHENG Ai-ping, LI Jian-xia, GU Juan. Performance Analysis of Solar Energy Solid Adsorption Rotary Refrigerator[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(3): 76-80.
- [11] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社,2001.  
TAO Wen-quan. Numerical Heat Transfer [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.