

文章编号: 1671-6612 (2022) 06-813-06

# 送风参数对竖壁贴附射流夜间通风 降温效果的影响

李亚军 季文慧 袁艳平

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘要】** 针对成都地区湿热的气候特征,采用竖壁贴附射流夜间通风的方式冷却墙体内壁面。选取夏季典型日气象参数进行数值模拟并分析降温效果。研究了不同送风速度和夜间通风时段下该夜间通风系统的降温效率。研究表明,送风速度为4m/s,夜间通风开启时间为23:00,壁面温度效率较高,垂直向壁面的对流换热系数为 $18\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ ;继续增大风速,温度效率和换热系数不会有明显改变。

**【关键词】** 竖壁贴附射流; 夜间通风; 参数研究; 降温效率

中图分类号 TU834.3 文献标识码 A

## The Influence of the Supply Air Parameters on Cooling Effect of the Wall-mounted Attached Night Ventilation

Li Yajun Ji Wenhui Yuan Yanping

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** In view of the humid and hot climatic characteristics of Chengdu, the wall inner surface is cooled by means of wall-mounted attached night ventilation (WANV). Typical daily meteorological parameters in summer are selected for numerical simulation and the cooling effect is analyzed. The cooling efficiency of the WANV system was studied under different supply air velocities and night ventilation periods. The results show that the supply air velocity is 4m/s, the night ventilation opening time is 23:00, the wall temperature efficiency is high, and the convective heat transfer coefficient of the vertical wall is  $18\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ . Continue to increase the supply air velocity, temperature efficiency and heat transfer coefficient will not change significantly.

**【Keywords】** Wall-mounted attached; Night ventilation; Parametrical study; Cooling efficiency

## 0 引言

我国住房总面积超过600亿平方米,建筑承载了大量能源消耗活动<sup>[1]</sup>。据统计,截止到2020年底,建筑能耗达到37%左右,建筑节能刻不容缓<sup>[2]</sup>。夜间通风技术引入夏季夜晚室外温度较低的冷空气,降低室内温度并带走室内蓄存的热量,是利用可再生资源,降低建筑能耗的节能措施<sup>[3,4]</sup>。夜间通风的降温效果与换气次数<sup>[5,6]</sup>、内部蓄热体<sup>[7,8]</sup>和围护结构内表面对流换热系数<sup>[9,10]</sup>相关。

周军莉等人<sup>[11]</sup>通过数值分析的方法提出了自

然通风结合建筑蓄热的室内工程分析模型,当夜间通风换气次数超过20次/h,室内温度峰值基本不会发生变化。魏晓真等人<sup>[12]</sup>用DEST软件对济南地区某办公楼进行全年建筑负荷模拟并给出了夜间通风的最佳换气次数和通风时间段。Stefano等人<sup>[13]</sup>研究了夜间通风耦合空心板结构对降低室内冷负荷的效果。结果表明,该夜间通风和蓄热的耦合可以让办公建筑在70%的使用期间内温度低于 $28^{\circ}\text{C}$ 。Givoni<sup>[14]</sup>通过监测多栋不同质量水平的建筑,评估了建筑物的质量对降低白天室内最高温度的效果。

作者简介: 李亚军 (1997-), 男, 硕士研究生, E-mail: 1561194362@qq.com

通讯作者: 袁艳平 (1973-), 男, 博士后, 教授, E-mail: ypyuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2022-05-07

结果表明,夜间通风可以有效降低高质量建筑的室内最高温度。Artmann 等人<sup>[15]</sup>的研究表明,对于不同的通风气流组织模式,建筑物内表面的对流换热系数不同,在低风速下的工况下,置换通风具有更高的温度效率。杨柳等人<sup>[16]</sup>基于气象站监测数据,采用气候降温潜力 (CCP) 对我国多个城市进行降温潜力分析。结果表明,我国北方大部分地区的 CCP 在 30 到 180 之间,具有较好的降温潜力,但是中部和东部地区的 CCP 值在 10 到 60 之间,夜间通风降温潜力较低。龙展图<sup>[17]</sup>对上海、武汉、南京等几个典型的夏热冬冷城市在夏季和过渡季节进行夜间通风模拟,分析这些地区夜间通风的降温潜力。研究表明,在夏热冬冷地区运用夜间通风技术降温潜力较小,但是在过度季节仍有一定潜力。在北方地区应用夜间混合通风和夜间置换通风方式可以满足降温需求<sup>[18]</sup>。但是,夏热冬冷地区夏季的昼夜温差小,现有夜间通风方式的降温效率较低<sup>[19]</sup>。

本文针对成都地区夏季西墙温度较高的特点,采用竖壁贴附射流冲刷墙体内壁面的方式进行夜间通风<sup>[20-22]</sup>,增强送风气流与墙体内壁面的对流换热强度,从而高效带走墙体蓄热,以期减少空调能耗。

### 1 竖壁贴附射流夜间通风模式

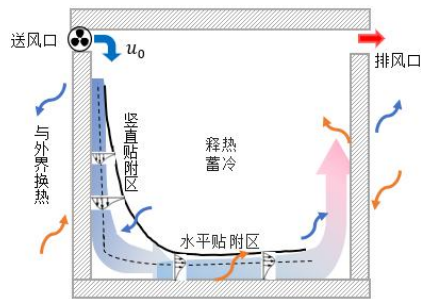


图 1 竖壁贴附射流夜间通风系统原理  
Fig.1 Principle of the WANV system

竖壁贴附射流夜间通风是在竖壁贴附射流送风的基础上,将夏季送风温度恒定的冷风改为送风温度随时间变化的室外空气<sup>[21]</sup>,其基本原理如图 1 所示。房间白天接受太阳辐射和室内热源散热,墙体温度和室内空气温度升高的同时墙体内部会蓄存部分热量;夜晚,一方面墙体外壁面和天空进行辐射换热,外壁面温度降低,另一方面风机引入室外冷空气通过贴附射流冲刷墙体内壁面,强化内壁

面对流换热,在降低墙体内壁面温度的同时带走白天蓄存在墙体中的热量。

## 2 数值计算模型的建立及验证

### 2.1 物理模型的建立

根据重庆大学重点实验室某围护结构小室的构造<sup>[22]</sup>,如图 2 所示,建立几何模型。条缝型风口尺寸 2700mm×40mm;排风口尺寸 400mm×400mm。送风口相对位置  $s/b = (d+b)/2 = 2$ 。s 为条缝型送风口中轴线距贴附墙体的距离 (mm); b 为条缝型风口宽度 (mm); d 为条缝型风口内侧距贴附墙体的距离 (mm)。

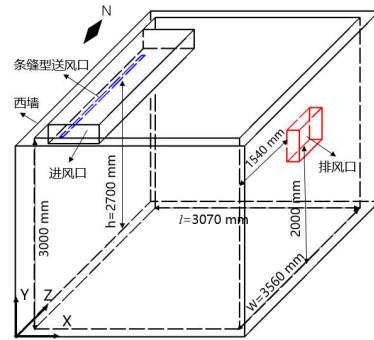
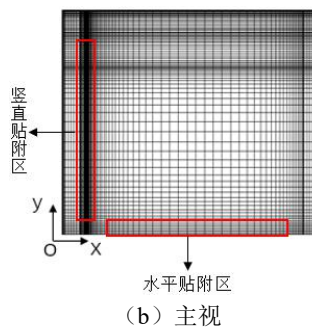
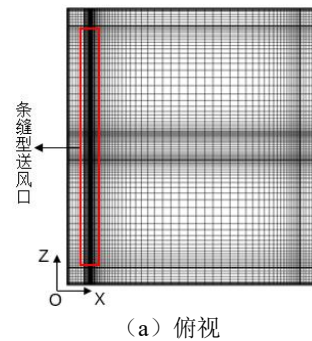
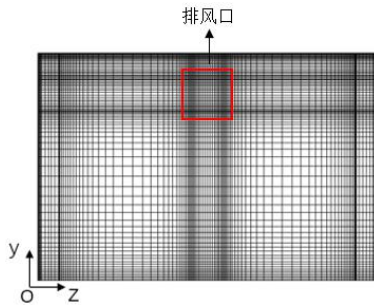


图 2 竖壁贴附射流夜间通风小室简图<sup>[23]</sup>  
Fig.2 Schematic diagram of the WANV

计算域网格划分如图 3 所示,对条缝型送风口、排风口、竖直贴附区和水平贴附区的网格进行加密。经过网格独立性验证<sup>[23]</sup>后,采用 842337 数量的网格进行后续研究。





(c) 侧视

图 3 计算域网格划分示意图

Fig.3 Mesh configurations in the computational domain

2.2 边界条件设置及求解

(1) 典型日气象参数

选取成都地区夏季典型气象日参数进行模拟。该气象日内, 室外空气温度范围在 23~33.5℃, 相对湿度在 45%~83%之间, 东向和西向的太阳辐射强度最大值为 570 和 780W/m<sup>2</sup>。

(2) 进、出口边界

选择速度入口 (Velocity-inlet), 采用用户自定义函数 (UDF) 输入。送风温度为室外空气温度, 送风速度为 2m/s~4m/s。出口设置为自由出流 (Outflow)。

(3) 围护结构边界

地面设置为绝热边界; 屋顶和墙体的外壁面边界设置为对流边界 (Convection), 并引入室外空气综合温度<sup>[24]</sup>, 计算式如下:

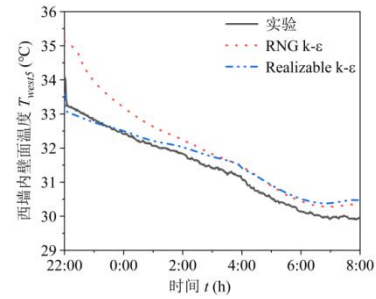
$$T_z = T_{air} + \frac{a \times I_s}{\alpha_{out}} + \frac{Q_{lw}}{\alpha_{out}} \quad (1)$$

式中:  $T_z$  为室外空气综合温度, °C;  $T_{air}$  为室外空气温度, °C;  $a$  为围护结构外表面面对太阳辐射的吸收率;  $I_s$  为太阳辐射强度, W/m<sup>2</sup>;  $\alpha_{out}$  为围护结构外表面面对流换热系数, W/(m<sup>2</sup>·°C);  $Q_{lw}$  为围护结构外表面与环境的长波辐射换热量, W/m<sup>2</sup>。围护结构外表面面对流换热系数  $\alpha_{out}$ , 根据规范<sup>[25]</sup>取 19W/(m<sup>2</sup>·°C)。

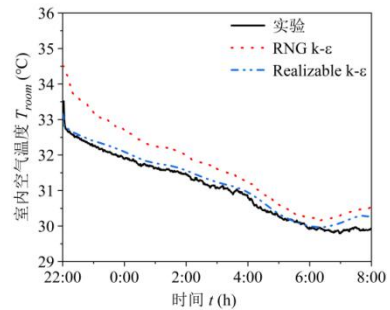
(4) 求解设置

求解器选用基于压力 (Pressure-Based) 的隐式 (Implicit) 格式; 流体密度随温度的变化采用 Boussinesq 假设; 压力速度耦合方式为 SIMPLE 算法; 对流项离散格式为二阶迎风格式 (Second Order Upwind)。计算采用非稳态求解, 经过时间步长无关性验证<sup>[23]</sup>后设定时间步长为 30s。

2.3 计算模型验证<sup>[23]</sup>



(a) 西墙内壁面温度



(b) 室内空气温度

图 4 模拟结果与实验结果对比

Fig.4 Comparisons between simulation results with experimental data

采用课题组前期的实验数据对典型工况的数值模拟进行验证<sup>[20]</sup>。由图 4 可知, 对比实验和模拟得到的西墙内壁面温度和室内空气温度, 应用 Realizable k-epsilon 湍流模型得到的模拟结果与实验结果的偏差较小, 最大误差在 5%以内, 后续将用此湍流模型开展模拟。

3 计算结果及分析

3.1 夜间通风降温效果评价指标

为评估竖壁贴附射流夜间通风的降温效率, 引入房间温度效率  $\epsilon_r$  和壁面温度效率  $\epsilon_w$ <sup>[15]</sup>。

$$\epsilon_r = \frac{T_{out,air} - T_{in,air}}{T_{room} - T_{in,air}} \quad (2)$$

$$\epsilon_w = \frac{T_{out,air} - T_{in,air}}{T_{west5} - T_{in,air}} \quad (3)$$

式中:  $T_{out,air}$  为排风温度, °C;  $T_{in,air}$  为送风温度, °C;  $T_{room}$  为室内空气温度, °C;  $T_{west5}$  为西墙内壁面温度, °C。

3.2 送风速度的影响

3.2.1 西墙内壁面温度

图 5 为不同风速下在通风结束时刻西墙内壁

面温度分布。由图可知，送风速度越大，在通风结束时刻西墙内壁面温度越低。由于在墙体上部分射流的轴线速度较大，射流对墙体的冲刷效果显著，竖向贴附射流与西墙的对流换热剧烈，因此西墙上部的壁面温度较低。随着送风速度增大，射流在贴附墙体流动的过程中主体性保持更好，射流轴线速度衰减缓慢，射流和贴附壁面的对流换热进一步增强，可以将白天蓄存在墙体中的热量释放出来，西墙内壁面温度逐渐降低并趋于均匀。在 4m/s 和 5m/s 的风速下，射流在贴附冲刷墙体的过程中轴线速度更大，通风结束时刻西墙内壁面温度分布基本一致。这说明，在该工况下，4m/s 的风速对墙体的降温冷却性能较好，继续增大送风速度，降温效果没有显著改善。

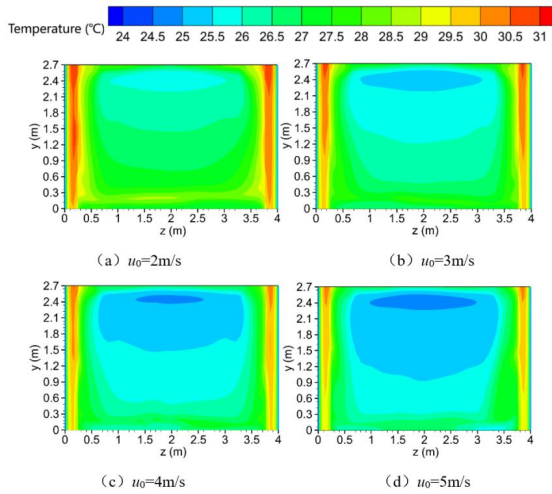


图 5 不同送风速度下西墙内壁面温度

Fig.5 West wall inner surface temperature under different supply air velocities

### 3.2.2 温度效率

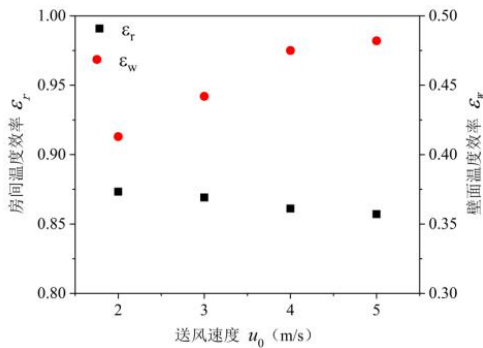


图 6 不同送风速度下温度效率

Fig.6 Temperature efficiency under different supply air velocities

图 6 为不同送风速度下在通风结束时刻的温度效率。由图可知，不同送风速度下房间的温度效率较高，均在 0.85 以上，这说明竖壁贴附射流夜间通风系统可以在房间内形成较为稳定的温度场。射流对西墙内壁面的降温效率差异显著，送风速度为 2m/s 时，射流轴线速度较小，射流对西墙的冲刷冷却效果有限，射流与西墙内壁面对流换热效果较差，西墙内壁面温度效率较低。增大送风速度，贴附射流的轴线速度增大，射流在冲刷壁面的过程中可以移除更多蓄存在墙体中的热量，西墙内壁面温度降低，内壁面温度效率提升。但是送风速度增大至 4m/s 后，继续增大风速则壁面温度效率不会有显著提升。

### 3.2.3 竖直向壁面对流换热强度

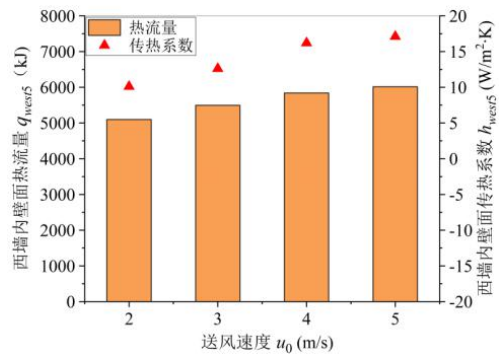


图 7 不同送风速度下西墙内壁面热流量和对流换热系数

Fig.7 Heat flow and convective heat transfer coefficient of the west wall inner surface under different supply air velocities

图 7 给出了不同送风速度下西墙内壁面热流量和对流换热系数。由图可知，随着送风速度增大，射流对西墙的冲刷效果增强，西墙内壁面热流量增大，内壁面对流换热系数增加。送风速度从 2m/s~4m/s 时，射流和西墙的对流换热增强，在相同的夜间通风时间段内射流从墙体中移除的热量持续增加，西墙内壁面热流量和换热系数增长趋势较快。但是进一步增大风速，射流对墙体的冷却效果没有显著提升。4m/s 和 5m/s 两种风速下西墙内壁面对流换热系数均为 18W/m<sup>2</sup>·K。这说明 4m/s 的风速可以将白天蓄存在围护结构中的热量释放完全，射流对墙体的冷却效果较好。

### 3.3 通风时段的影响

夜间室外空气温度时刻在变化，夜间通风开启时间段不同，送风温度也不同。当夜间通风关闭时

刻相同时, 通风开启时间越早, 室外空气温度较高, 甚至高于室内空气温度, 但是通风时间长, 带走的热量更多; 夜间通风开启时间越晚, 室外空气温度越低, 但是通风时间过短可能无法将墙体内部热量移除完毕。因此, 合理的夜间通风时间段有待研究。

设定送风速度为 4m/s, 夜间通风开启时刻为 22:00、23:00、00:00、01:00、02:00 和通风关闭时间为 07:00 不变。

### 3.3.1 空气温度

图 8 为送风速度为 4m/s 时, 室外空气温度和不同夜间通风时段下的室内空气温度。由图可知, 在不同的通风开启时刻下, 通风结束后房间的温度均在 25°C, 系统对房间的降温效果相近。但是在 23:00 以前, 未开启夜间通风时, 室外空气温度高于室内空气温度, 随后室外空气温度逐渐降低并低

于室内空气温度。因此, 通风开启时间过早, 室外温度较高, 夜间通风可能会带来多余的室外热量, 在 23:00 以后开启夜间通风较为合适。

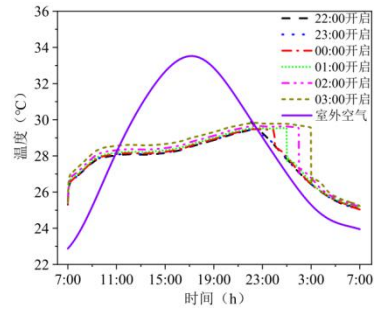


图 8 不同夜间通风时间段下空气温度 ( $u_0=4m/s$ )

Fig.8 Air temperature under different ventilation periods ( $u_0=4m/s$ )

### 3.3.2 内壁面温度

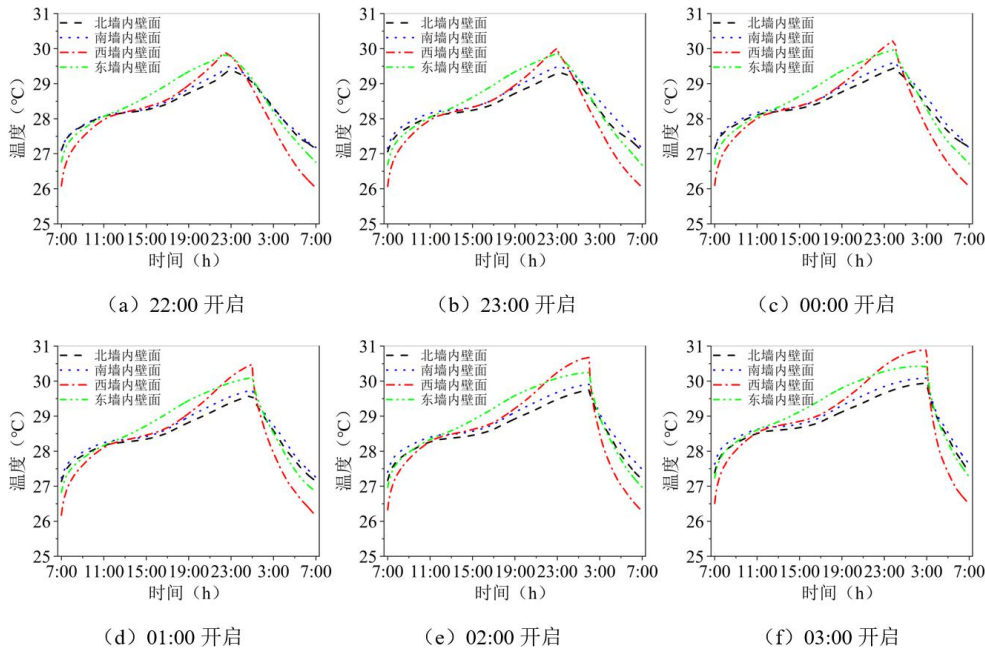


图 9 不同夜间通风时间段下墙体内部壁面温度 ( $u_0=4m/s$ )

Fig.9 Wall inner surface temperature under different ventilation periods ( $u_0=4m/s$ )

图 9 为送风速度 4m/s, 不同通风开启时刻下的墙体内部壁面温度。由图 (a) 和图 (b) 对比可知, 不同夜间通风时间段下墙体内部壁面温度变化趋势一致, 内壁面最高温度不同。随着通风开启时间的延迟, 垂直向贴附区射流对壁面的贴附冲刷时间变短, 并且室内外温差逐渐减小, 射流对墙体的冷却效果变差, 墙体内部的热量无法移除完毕, 内壁面温度较高。同 22:00 和 23:00 开启通风的工况相比, 在 03:00 开启通风的情况下, 墙体在夜间无法充分

预冷, 白天期间西墙内壁面温度的上升趋势较快, 壁面温度的最大值和通风结束时壁面温度的最小值均升高了 0.5°C。

### 3.3.3 温度效率

图 10 为送风速度为 4m/s 时, 不同夜间通风开启时刻下在通风结束时的温度效率。由图可知, 不同的夜间通风时段下房间的温度效率较高, 在 0.85 左右。这说明改变通风时间段对房间的降温效率无显著影响, 但是壁面温度效率差异较大。不同通风

时间段内室外温度的变化范围不同,通风时间开启越迟,室外温差的变化范围越小,射流和墙体的对流换热效果较差,在相同的送风速度下射流从墙体中移除的热量减少,降温效率越低。甚至通风时间过短,墙体内热量可能无法及时移除完毕,墙体内温度相对较高。送风速度为4m/s时,在适宜的夜间通风时间段内射流对壁面的冷却降温效果接近饱和,结合空气温度变化和温度效率,在23:00左右开启夜间通风效果较好。

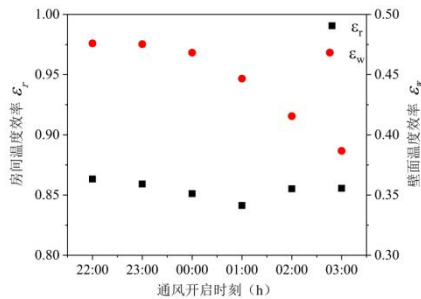


图10 不同夜间通风时间段下温度效率 ( $u_0=4\text{m/s}$ )

Fig.10 Temperature efficiency under different night ventilation periods ( $u_0=4\text{m/s}$ )

#### 4 结论

本文主要研究了不同送风速度和夜间通风时间段对竖壁贴附射流夜间通风降温效果的影响并得到以下结论:

(1) 不同送风速度下竖壁贴附射流夜间通风系统对墙体的冷却效率不同,对于一般的办公建筑房间,层高  $h \leq 4\text{m}$ , 长高比  $l/h \leq 2$ , 4m/s 的风速下射流对墙体的降温效率较高,垂直向贴附壁面的对流换热系数为  $18\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ; 继续增大送风速度,两者没有显著改变。

(2) 不同夜间通风时段下内壁面温度效率有所差异。当送风速度为4m/s,通风关闭时刻为07:00不变,通风开启时刻在23:00时,壁面温度效率较高。

#### 参考文献:

[1] 袁丽梅,魏燕萍.小议各阶段建筑的节能措施[J].制冷与空调,2020,34(4):507-509.  
[2] 清华大学建筑节能研究中心.中国建筑能耗研究报告2020[J].建筑节能(中英文),2021,49(2):1-6.  
[3] 朱新荣,杨柳,刘加平.建筑夜间通风降温研究进展[J].暖通空调,2010,40(6):111-116.

[4] Solgi E, Hamedani Z, Fernando R, et al. A literature review of night ventilation strategies in buildings[J]. Energy and Buildings, 2018,173:337-352.  
[5] 朱新荣,杨雯,杨柳,等.夜间通风建筑关键设计参数优化分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2016,48(3):401-405.  
[6] 朱新荣,杨柳,刘加平,等.夜间通风空调办公建筑降温参数分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2009,41(6):846-850.  
[7] 朱新荣,白鲁建,杨柳,等.办公建筑蓄热和夜间通风的实验研究[J].太阳能学报,2015,36(6):1337-1343.  
[8] Guo R, Hu Y, Liu M, et al. Influence of design parameters on the night ventilation performance in office buildings based on sensitivity analysis[J]. Sustainable Cities and Society, 2019,50:101661.  
[9] Le Dréau J, Heiselberg P, Jensen R L. Experimental investigation of convective heat transfer during night cooling with different ventilation systems and surface emissivities[J]. Energy and Buildings, 2013,61:308-317.  
[10] Goethals K, Breesch H, Janssens A. Sensitivity analysis of predicted night cooling performance to internal convective heat transfer modelling[J]. Energy and Buildings, 2011,43(9):2429-2441.  
[11] 周军莉,彭畅,童宝龙,等.夜间通风计算方法及影响因素分析[J].重庆大学学报,2011(S1):21-25.  
[12] 魏晓真,曲云霞,黄峰.不同通风方案对建筑能耗影响的模拟分析[J].建筑节能,2010,38(6):13-16.  
[13] Corgnati S, Kindinis A. Thermal mass activation by hollow core slab coupled with night ventilation to reduce summer cooling loads[J]. Building and Environment, 2007,42(9):3285-3297.  
[14] Givoni B. Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures. Part I: 1993 experimental periods[J]. Energy and Buildings, 1998,28(1):25-32.  
[15] Artmann N, Jensen R L, Manz H, et al. Experimental investigation of heat transfer during night-time ventilation[J]. Energy and Buildings, 2010,42(3):366-374.  
[16] 杨柳,杨晶晶,宋冰,等.被动式超低能耗建筑设计基础与应用[J].科学通报,2015,60(18):1698-1710.  
[17] 龙展图.夏热冬冷地区夜间通风降温特性及优化控制方法研究[D].长沙:湖南大学,2016。(下转第842页)