

# 太阳能烟囱-地埋管耦合系统连续 自然通风可靠性实验研究

郑迪萌, 龙天河, 叶 恺, 卢 军, 李永财

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 作为利用地热能和太阳能的两种典型技术, 土壤-空气换热器(EAHE)和太阳能烟囱(SC)已被深入研究和广泛应用. 将两者合理结合, 利用太阳能烟囱产生的热压, 可以取代风机为 EAHE 中空气的流动提供驱动力, 再将室外新鲜空气引入室内, 同时降低建筑能耗. 作为全被动式系统, SC-EAHE 系统性能取决于当地的土壤蓄放热能力和天气状况, 为了研究连续自然通风时, 不同天气条件下耦合系统的可靠性, 以及其对室内热环境的影响, 利用全尺寸实验台, 对 SC-EAHE 系统的相关性能参数及室内空气温度进行了为期一周的连续测试. 实验结果表明: 耦合系统在夏季可以维持可观的自然通风量和制冷量, 在太阳辐射充足时, 风量最大值为  $230\sim 280\text{ m}^3/\text{h}$ , 制冷量最大值为  $600\sim 800\text{ W}$ ; 在太阳辐射强度较低时, 风量和制冷量的峰值分别为  $170\sim 220\text{ m}^3/\text{h}$  和  $400\sim 600\text{ W}$ ; 地埋管出口空气温度为  $25.8\sim 27\text{ }^\circ\text{C}$ , 相对湿度为  $9.1\%\sim 84.1\%$ , 波动幅度比室外空气分别减小了  $93.48\%$  和  $53\%$ ; 实验房间平均温度对比房间降低  $2.5\text{ }^\circ\text{C}$ , 室温波动降低  $48.2\%$ ; 系统连续运行后土壤温度升高  $0.8\text{ }^\circ\text{C}$ , 在自然状态下需要 6 d 恢复到初始状态.

**关键词:** 太阳能烟囱; 土壤-空气换热器; 自然通风; 实验测试

中图分类号: TU-83

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)06-0819-09

## Experimental research on the reliability of continuous natural ventilation of SC-EAHE coupled system

ZHENG Dimeng, LONG Tianhe, YE Kai, LU Jun, LI Yongcai

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** As two typical techniques using geothermal and solar energy, earth-to-air heat exchanger (EAHE) and solar chimney (SC) have been deeply studied and widely used. If these techniques are put in combination reasonably, the buoyancy produced by solar chimney can drive air flow in EAHE, which will introduce fresh air into room and reduce building energy consumption. As a totally passive system, the performance of SC-EAHE coupled system depends on the heat storage and release capacity of local soil, and weather condition. In order to test the reliability of the coupled system under different weather condition during continuous natural ventilation and the influence of the coupled system on the indoor thermal environment, this study conducts a week-long continuous test of relevant parameters and indoor temperature through a full-scale experimental platform. The experiment results show that the coupled system can keep considerable ventilation air rate and cooling capacity in summer. When the solar radiation is sufficient, the maximum of air rate and cooling capacity is respectively  $230\sim 280\text{ m}^3/\text{h}$  and  $600\sim 800\text{ W}$ . When the solar radiation intensity is low, the peak values of air volume and cooling capacity are  $170\sim 220\text{ m}^3/\text{h}$  and  $400\sim 600\text{ W}$  respectively. The temperature and relative humidity of outlet air of the buried pipe is respectively  $25.8\sim 27\text{ }^\circ\text{C}$  and  $9.1\%\sim 84.1\%$ . The fluctuation range is respectively reduced by  $93.48\%$  and  $53\%$  compared with outdoor air. The average temperature of the test chamber is  $2.5\text{ }^\circ\text{C}$  lower than that of the reference chamber, and the fluctuation of the room temperature is reduced by  $48.2\%$ . The soil temperature rises by  $0.8\text{ }^\circ\text{C}$  after continuous operation of the system and it takes 6 days to recover to the initial state in the natural state.

**Key words:** solar chimney; earth-to-air heat exchanger; natural ventilation; experimental study

收稿日期: 2021-04-06

修改稿日期: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078075, 51708054)

第一作者: 郑迪萌(1997—), 女, 硕士生, 主要从事建筑通风方面的研究. E-mail: 1027217955@qq.com

通信作者: 李永财(1982—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事建筑通风、相变材料方面的研究. E-mail: yongcail85@163.com

随着经济的高速发展和人们生活水平的不断提高,建筑能耗在社会总能耗中所占的比重逐渐升高.据统计,建筑部门能耗占全球总能耗的30%,其二氧化碳排放量占28%<sup>[1]</sup>,截止2018年,我国建筑能耗占全国总能耗的21.7%,且呈上升趋势<sup>[2]</sup>.在建筑能耗中,用于暖通空调系统的能耗占比高达60%<sup>[3]</sup>,其中通风系统能耗占比20%~30%<sup>[4]</sup>.而目前所用能源大多是以化石燃料为代表的不可再生能源.因此,降低建筑中暖通空调系统能耗、利用可再生能源代替部分常规能源,是当前节能减排背景下的必然要求.

土壤-空气换热器(earth-to-air heat exchanger, EAHE)也称作地道风系统,其以空气为换热介质,利用深层土壤的热惯性,使空气在地埋管内与土壤换热,在夏季对空气进行预冷,冬季进行预热,从而减小房间冷热负荷,降低能耗<sup>[6-7]</sup>.太阳能烟囱(solar chimney, SC)是利用热压驱动空气流动的装置,其吸收太阳辐射,将热能转换为动能,为空气流动提供动力<sup>[8-10]</sup>.如果土壤-空气换热器与太阳能烟囱合理结合,形成SC-EAHE被动耦合系统.太阳能烟囱提供的浮升力取代风机驱动室外空气进入地埋管,在管内与土壤进行换热,之后由地埋管出口进入房间,将室内余热和污染物带出室外. M. Maerefat 与 A. P. Haghighi<sup>[11]</sup>通过理论分析指出 SC 可以为 EAHE 运行提供足够的热压动力, SC 和 EAHE 合理配合使用,即使在太阳辐射强度  $100 \text{ W/m}^2$  和空气温度高达  $50^\circ\text{C}$  的不利气候下仍能营造比较舒适的室内热环境. Y. Yu 与 H. Li 等<sup>[12-13]</sup>通过实测表明在 SC+EAHE 联合运行下,室内热环境适宜. Serageldin 等人<sup>[14-15]</sup>设计和数值研究了 SC+EAHE 系统,并观察到室内空气温度在夏季比室外空气温度低约  $9^\circ\text{C}$ . Li Y<sup>[16]</sup>等人对 SC-EAHE 耦合系统进行了日周期内的连续测试,实验结果表明,通过太阳能烟囱和建筑围护结构的合理配合,可使该耦合系统在夏季实现 24 h 连续自然通风,且通风效果良好.然而,上述文献缺乏对耦合系统多日连续运行的研究.作为全被动式系统,SC-EAHE 系统性能取决于当地的土壤蓄放热能力和天气状况,其中,太阳辐射强度对耦合系统运行性能有较大影响<sup>[17-18]</sup>.为了研究夏季连续自然通风时,不同天气条件下耦合系统的可靠性,以及该系统对室内热环境的影响,本文利用现有全尺寸 SC-EAHE 耦合系统实验台,对系统相关性能参数进行了为期一周的连续测试,探究在室外气象条件变化的情况下耦合系统多日连续运行自然通风稳定性、土壤温度的变化及恢复情况以及耦合系统对室内热环境的影响.

## 1 实验平台及测试内容

### 1.1 实验平台介绍

本文搭建的全尺寸实验平台位于安徽省铜陵市枞阳县,铜陵位于安徽省中南部,介于北纬  $30^\circ 45' \sim 31^\circ 09'$ 、东经  $117^\circ 35' \sim 118^\circ 09'$  之间,属于典型的夏热冬冷地区.该实验平台工作示意图如图 1 所示,主要包含被测试房间、土壤-空气换热器(地埋管)和太阳能烟囱.被测试房间分为实验房间和对比房间,两个房间的尺寸均为  $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),为西南朝向.对比房间不安装任何温度调控设备,实验房间与地埋管出口和太阳能集热器入口相连.房间围护结构热工参数如表 1 所示.

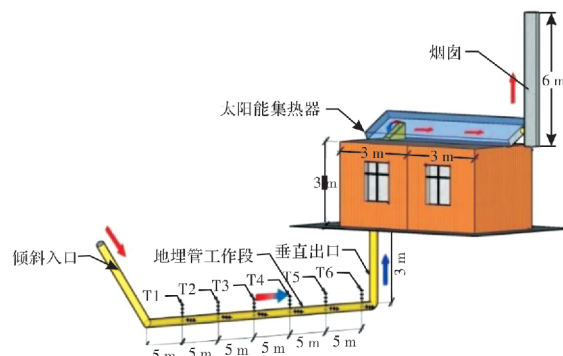


图1 实验台工作示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SC-EAHE system

地埋管为PVC管<sup>[19]</sup>,管径为 $0.3 \text{ m}$ <sup>[20]</sup>,由倾斜入口段、水平工作段和垂直出口段组成,倾斜入口段与水平面成 $45^\circ$ 倾角,以减少入口段局部压力损失;垂直设置的出口段可以使空气沿管径方向流动更均匀,同时,由于靠近地表的土壤受室外天气影响较大,将地埋管出口段用聚苯乙烯保温材料包裹,尽量减小垂直出口段土壤与管内空气的热交换.研究表明,土壤温度在地下 $2.5 \sim 3 \text{ m}$ 基本稳定<sup>[21]</sup>,故将 $30 \text{ m}$ 长的水平管段布置于地下 $3 \text{ m}$ .空气由倾斜入口段进入地埋管,经由水平工作段与土壤换热,再由垂直出口段进入房间.太阳能烟囱由太阳能集热器和垂直烟囱两部分构成.其中,太阳能集热器尺寸为 $7 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),为提高其对太阳能的吸收能力,将其按与水平面成 $30^\circ$ 倾角设置在屋顶上,通过 $0.9 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 的孔与实验房间相连,其集热板用高吸收率的吸热漆进行喷涂以提高其吸热能力,四个侧面和背面均用聚苯乙烯板做保温处理;用四块等面积的玻璃板作为集热器的上表面,太阳辐射通过玻璃板被集热板吸收.太阳能集热器的相关物性参数如表1所示.垂直烟囱高 $6 \text{ m}$ ,直径

0.3 m, 且做了隔热处理以减少热量损失. 地埋管入口和烟囱出口均安装防雨帽, 以防止雨水杂物进入, 并减小外界风压对测试的影响.

表 1 集热器物性参数

Tab. 1 Physical parameters of absorber

	厚度 /mm	透射率	吸收率	发射率	导热系数 /(W · (m <sup>-1</sup> · K) <sup>-1</sup> )
玻璃	8	0.9	0.06	0.1	/
集热板	1.5	/	0.99	0.01	/
保温棉	20	/	/	/	0.036

1.2 测试仪器选择及测点布置

为了分析 SC-EAHE 耦合系统夏季连续多日运行的自然通风特性, 以及其对室内温度和土壤温度的影响, 测试的主要参数包括: 地埋管进出口空气温湿度、地埋管中心空气温度、地埋管周围土壤温度、太阳能集热器表面温度、地埋管出口空气流速、室内空气温度、太阳辐射强度等.

使用 HOBO 温湿度自动记录仪测量地埋管进出口温湿度. 使用螺纹探头式 K 型热电偶测量地埋管中心空气温度和土壤温度, 在地埋管水平段共设置 6 组温度测点, 距水平管段入口 5 m 处记为 T1, 沿管内空气流动方向每隔 5 m 设置一组测点, 为 T2~T6, 每组温度测点包含 1 个空气温度测点和 6 个土壤温度测点. 空气温度测点设置于管道中心线, 为 1C~6C; 土壤温度测点分别设置在管道截面的水平与垂直方向, 距离外壁每隔 15 cm(0.5 倍管径)设置一处, 每个截面竖直和水平方向各设置 3 个, 分别为 3V-1~3V-3 和 3H-1~3H-3(以 T3 处为例). 使用球形 K 型自粘式热电偶测量集热器表面温度, 集热器内每隔 1.4 m 设置一组温度测点. 使用 Omega 工业用热线风速传感器测量地埋管出口风速, 风速测点按等圆环面积法均匀布置在地埋管出口截面处. 使用螺纹探头式 K 型热电偶测量室内空气温度, 实验房间和对比房间中心距地板 1.7 m 高度处各设置 1 个温度测点. 使用 RS-RA-I120-JT 太阳能辐射变送表测量太阳辐射, 变送表放在室外无遮挡的水平面上. 所有热电偶在安装前均用冰水混合物进行标定. 地埋管中心空气温度测点与土壤温度测点如图 2 所示. 集热器表面温度测点如图 3 所示. 风速测点布置如图 4 所示.

1.3 测试仪器精密度分析

实验不确定性分为内部不确定性和外部不确定性.

对于内部不确定度, 在统计分析的基础上计算为

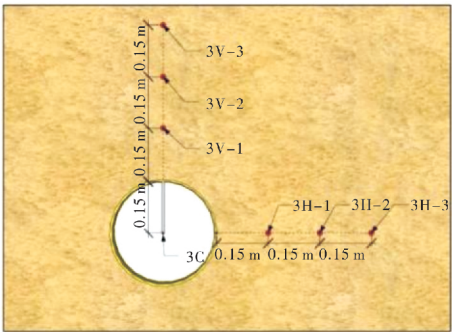


图 2 地埋管中心空气温度测点与土壤温度测点布置图 (以 T3 处为例)

Fig. 2 Sections of temperature sensors of air in the pipe and subsoil (e. g., T3)

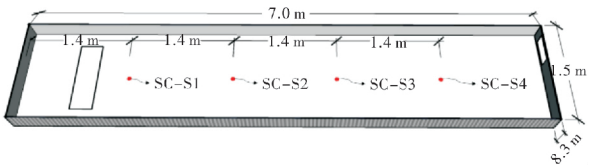


图 3 太阳能集热器表面温度测点布置图

Fig. 3 Sections of temperature sensors on the surface of solar collector

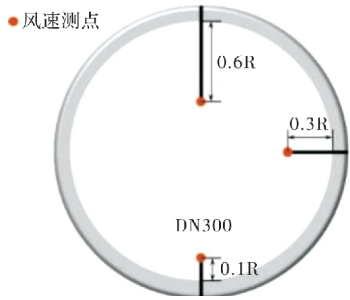


图 4 地埋管出口风速测点布置图

Fig. 4 Sections of air velocity sensors of EAHE outlet

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \tag{1}$$

式中:  $\sigma_i$  为内在的不确定性;  $x_i$  为单个测量值;  $\bar{x}$  为多次测量的平均值;  $n$  为测量的总数.

对于外部不确定度, 采用均匀分布计算, 即

$$\mu_i = \frac{e_i}{\sqrt{3}} \tag{2}$$

式中:  $\mu_i$  为外部不确定性;  $e_i$  为测量仪器的最大误差.

总的误差可以表示为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^p \sigma_i^2 + \sum_{i=1}^r \mu_i^2} \tag{3}$$

式中:  $\sigma$  为总不确定性;  $p$  为内部不确定性的数量;  $r$  为外部不确定性的数量.

本文中使用的所有设备的规格以及基于式(1)~(3)计算的最大误差容限(99%置信区间)见表 2.

表 2 测试仪器型号及精度

Tab. 2 Parameters of the instruments

仪器名称	型号	测量范围	精度	最大误差/%
Omega 球形 K 型自粘式热电偶	Omega SA3-K-120	-17~260 °C	±0.5 °C	2.29
螺纹探头式热电偶	WRNT-01	0~800 °C	±0.5 °C	2.65
温湿度传感器	HIOKI 3641-20	温度: -20.0~70.0 °C 相对湿度: 0.0%~100.0%	温度: ±0.5 °C 相对湿度: ±5%	2.77 6.86
热线风速仪	Omega FMA902A-MA	0~5.08 m/s	±2%	2.67
太阳辐射变送器	TBQ-2	0~2 000 W/m <sup>2</sup> 280~3 000 nm	<2%	2.36

## 2 相关参数计算

地埋管出口风量计算为

$$V_a = 3\,600 \cdot \pi d^2 v_a / 4 \quad (4)$$

式中:  $V_a$  为风量, m<sup>3</sup>/h;  $v_a$  为空气流速, m/s;  $d$  为地埋管直径, m.

地埋管制冷量计算为

$$Q_t = V_a \rho_a (h_i - h_o) \quad (5)$$

式中:  $Q_t$  为制冷量, W;  $h_i$ 、 $h_o$  为 EAHE 的进、出口空气焓值, J/kg;  $\rho_a$  为空气密度, 取值为 1.18 kg/m<sup>3</sup>.

空气焓值计算为

$$h = 1.01T + (2\,500 + 1.84T)\omega \quad (6)$$

式中:  $\omega$  为空气含湿量, g/kg;  $T$  为空气温度, °C.

空气含湿量计算为

$$\omega = 622\varphi \frac{P_s}{(P_0 - \varphi P_s)} \quad (7)$$

式中:  $\varphi$  为空气相对湿度, %;  $P_s$  为水蒸气分压力, Pa;  $P_0$  为当地大气压力, Pa.

其中,  $P_s$  与  $P_0$  满足下列方程.

$$\begin{aligned} \log P_s = & C_1 \left( \frac{373.15}{T} - 1 \right) + C_2 \log \left( \frac{373.15}{T} \right) + \\ & C_3 (10^{11.344(1 - \frac{373.15}{T})} - 1) + \\ & C_4 (10^{-3.49149(\frac{373.15}{T} - 1)} - 1) + \log P_0 \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $C_1 = -7.902\,98$ ,  $C_2 = 5.028\,08$ ,  $C_3 = -1.381\,6 \times 10^{-7}$ ,  $C_4 = 8.132\,8 \times 10^{-3}$ .

## 3 实验结果分析

### 3.1 太阳能集热器表面温度

图 5 所示为太阳能集热器不同位置的温度变化情况.

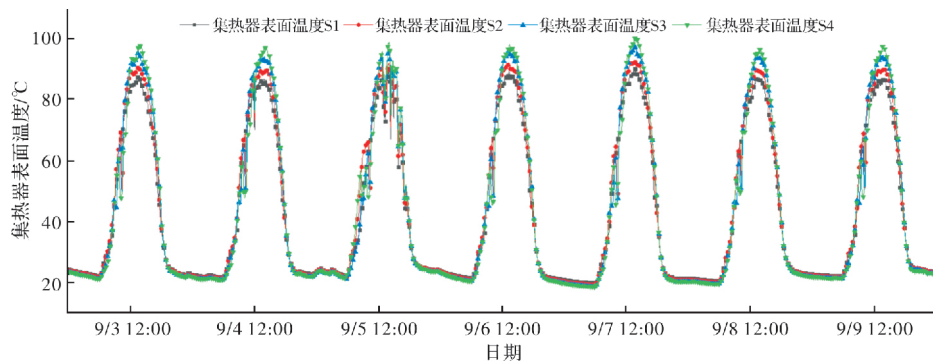


图 5 太阳能集热器表面温度变化图

Fig. 5 Variations of surface temperature of solar collector

由图可知, 白天集热器表面温度随太阳辐射强度变化呈周期性变化, 在太阳辐射较弱时, 集热器表面温度大约在 20 °C 左右轻微波动, 当太阳辐射强度变大, 集热器表面温度快速升高, 到 14:00 左右达到最大值约 100 °C, 然后逐渐下降, 最终稳定在 20 °C 左右. 这说明在测试期间, 太阳能集热器运行稳定, 可以为整个耦合系统的稳定运行提供基础条件.

### 3.2 地埋管出口风量

图 6 所示为地埋管出口风量变化. 风量的大小直接关系到耦合系统向室内输送冷/热量的多少,

是描述耦合系统运行性能的关键参数. 由前述理论分析可知, 地埋管出口风量呈周期性变化, 白天取决于太阳辐射强度, 夜晚取决于室内外温差. 由图可知, 风量的峰值比太阳辐射强度的峰值出现有一定的延迟, 这是由于太阳能集热器的升温需要一定时间. 最大通风量一般出现在每天下午 13:30 左右, 且其峰值在 230~280 m<sup>3</sup>/h 之间, 换气次数为 8.5~10.4 次/h. 夜晚由于室内外温差的存在, 风量仍能保持着 100~175 m<sup>3</sup>/h 左右. 在测试期间, 9 月 9 日天气为多云, 太阳辐射强度较低, 故系统风量在白天相较其他几日有所下降,

峰值为  $170 \sim 220 \text{ m}^3/\text{h}$ , 但仍能在全天保持自然通风过程, 换气次数为  $6.3 \sim 8.1$  次/h. 说明耦合系

统在太阳辐射不足的情况下仍能维持较好的通风效果.

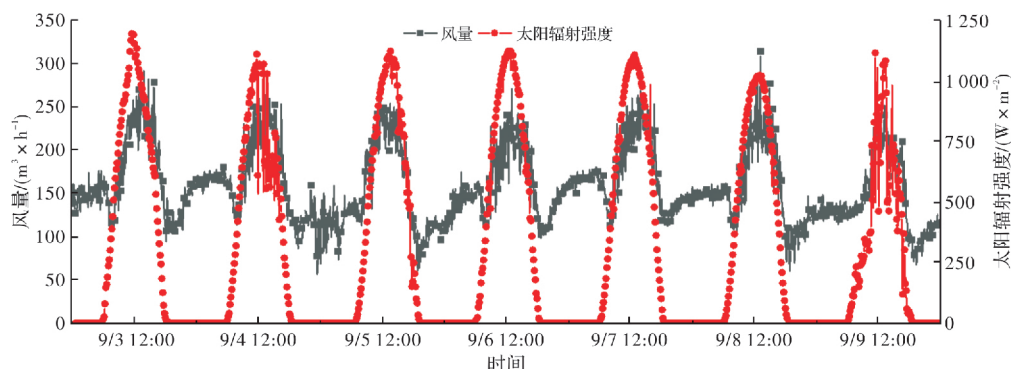


图6 地埋管出口风量与太阳辐射强度变化图

Fig. 6 Variations of air rate at EAHE outlet and solar radiation intensity

### 3.3 地埋管进出口温度

图7所示为测试期间地埋管进出口空气温度变化情况. 由图可知, 地埋管进出口温度均呈现周期性变化, 与地埋管进口相比, 其出口温度波动幅度明显减小. 在测试期间, 地埋管进口温度在  $18 \sim 36.4^\circ\text{C}$  波动, 波动幅度为  $18.4^\circ\text{C}$ , 而出口温度在  $25.8 \sim 27^\circ\text{C}$  之间波动, 波动幅度为  $1.2^\circ\text{C}$ ,

波动幅度比室外空气减小了  $93.48\%$ . 地埋管进口最高温度为  $36.4^\circ\text{C}$ , 出现在9月7日16:00左右, 此时对应的出口温度为  $27^\circ\text{C}$ , 温度降低  $9.4^\circ\text{C}$ ; 地埋管进口最低温度为  $18^\circ\text{C}$ , 出现在9月7日5:00左右, 对应出口温度为  $25.8^\circ\text{C}$ , 温度升高  $7.8^\circ\text{C}$ . 说明地埋管可以有效对室外空气进行冷却和加热, 从而维持出口空气温度稳定, 改善室内热环境.

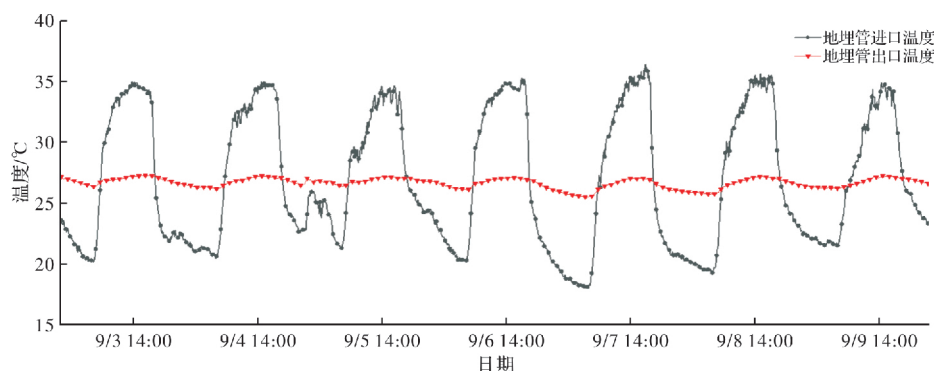


图7 地埋管进出口空气温度变化图

Fig. 7 Variations of air temperature at EAHE inlet and outlet

### 3.4 地埋管进出口相对湿度

图8所示为地埋管进出口空气相对湿度及进口空气温度变化情况. 地埋管进口空气的相对湿度在  $24.1\% \sim 98.6\%$  之间变化, 变化趋势与进口空气温度变化相反, 出口空气相对湿度波动明显较小, 变化范围为  $49.1\% \sim 84.1\%$ , 波动幅度比室外空气湿度减小了  $53\%$ . 这说明地埋管可以有效地将送入室内空气的相对湿度维持在一个比较稳定的范围.

### 3.5 制冷量

图9所示为地埋管制冷量与太阳辐射强度的变化情况, 由图可以看出, 随着太阳辐射强度变化, 制冷量变化较大. 在太阳辐射较强的几天, 即9月3日至9月8日, 制冷量峰值在  $600 \sim 800 \text{ W}$  波动; 9月9日天气为多云, 太阳辐射强度相对前几天较低且不稳定, 制冷量减少为  $400 \sim 600 \text{ W}$ , 降幅达

$33\%$ . 显然, 耦合系统制冷量随太阳辐射强度的增加而增加, 反之亦然. 此外, 如图8所示, 制冷量峰值的出现比太阳辐射强度峰值的出现滞后了约  $1 \sim 1.5 \text{ h}$ , 而我们在太阳辐射强度最大时可以达到最大制冷量. 故若能进一步对耦合系统进行优化设计, 减小太阳辐射强度与系统制冷量之间的时间延迟, 提升二者的匹配关系, 将会进一步提升耦合系统的性能.

### 3.6 室内温度

图10所示为实验房间和对比房间的室内空气温度变化情况. 由图可知, 在测试期间, 实验房间与对比房间温度变化趋势基本相同, 而实验房间空气温度要低于对比房间, 二者的温差在白天更为明显, 夜晚则相对较小. 对比房间室内温度在  $26.9 \sim 36.4^\circ\text{C}$  之间波动, 平均温差为  $5.6^\circ\text{C}$ ;

而实验房间的温度波动在  $26.5 \sim 29.9^{\circ}\text{C}$  之间, 平均温差为  $2.9^{\circ}\text{C}$ , 实验房间的温度波动对比房间降低  $48.2\%$ 。同时, 实验房间温度对比房间平

均降低了  $2.5^{\circ}\text{C}$ 。由此可见, 耦合系统在夏季可以有效降低室内温度并减小室温波动, 从而提高室内热环境水平。

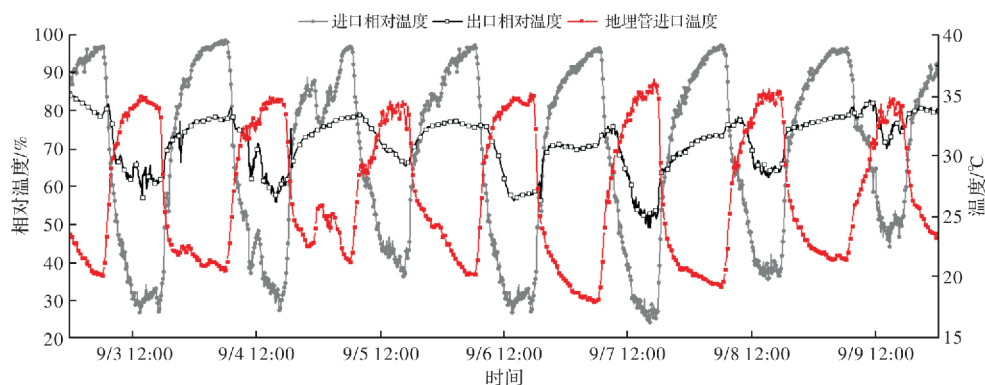


图8 地埋管进出口空气相对湿度与进口空气温度变化图

Fig. 8 Variations of air relative humidity at EAHE inlet and outlet

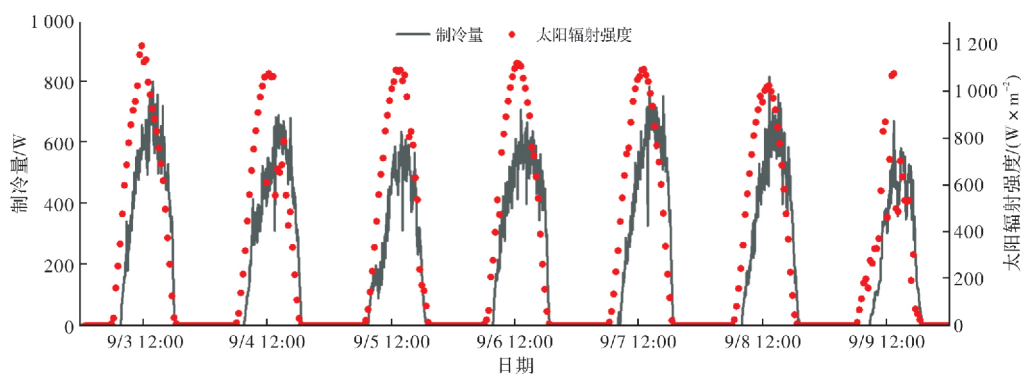


图9 制冷量与太阳辐射强度变化图

Fig. 9 Variations of cooling capacity and solar radiation intensity

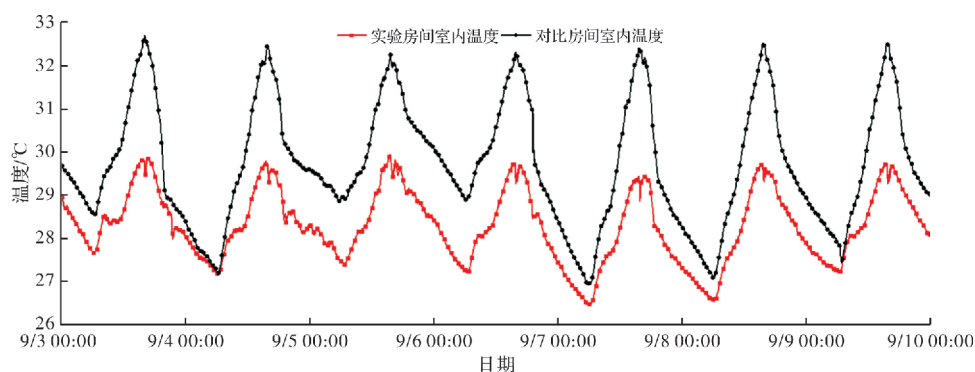


图10 实验房间与对比房间室内温度变化图

Fig. 10 Variations of air temperature in test and reference chamber

### 3.7 地埋管中心空气温度

图11所示为地埋管长度方向不同位置中心空气温度变化情况。由图可知, 在夏季白天, 地埋管对空气有显著的降温效果。在水平管段的前15 m, 即1C测点到3C测点(2C测点热电偶损坏造成数据缺失), 空气在这段管道中降温幅度较大, 1C测点空气平均温度为  $35.4^{\circ}\text{C}$ , 3C测点为  $28.2^{\circ}\text{C}$ , 温度降幅达  $7.2^{\circ}\text{C}$ 。相比于水平管段的前15 m, 管段后15 m(即4C~6C测点)降温幅度明显减小,

平均温降为  $1.6^{\circ}\text{C}$ 。这说明地埋管内空气与土壤的热交换主要发生在管段的前半部分。同时, 从图中可以看出, 在进口(1C)空气温度不同的情况下, 30 m处(6C)空气温度基本一致, 说明地下3 m、长30 m的地埋管对空气有充分的冷却作用, 并且在进口空气温度较高时降温效果更显著。夜晚空气温度变化规律与白天相同, 但过程相反, 由降温变为升温。

3.8 土壤温度

图 12 所示为 T1 组测点所在截面土壤水平方向的温度变化情况. 1H1、1H2、1H3 分别距离地埋管外壁 15 cm、30 cm、45 cm(即 0.5 倍、1 倍、1.5 倍管径). 由图可知, 实验开始时, 三个测点处的土壤温度基本相同, 约为 23.85 °C; 实验开始后, 由于和流经管内的空气发生热交换, 土壤温度开始波动, 呈现明显的周期性变化. 其变化规律与室外空气温度变化规律呈相似的趋势, 但与室

外空气温度相比, 存在峰值的衰减和时间的延迟. 从图 10 可以看出, 距离地埋管越近, 土壤温度越高, 测点 1H1 比 1H2 平均高 0.25 °C, 1H2 又比 1H3 高 0.11 °C, 这说明靠近地埋管的土壤与管内空气换热更多, 其受空气温度影响更大, 故升温更明显. 在系统连续运行期间, 1H1~1H3 测点的土壤温度相比实验开始时均呈现上升趋势, 各测点温度峰值如表 3 所示.

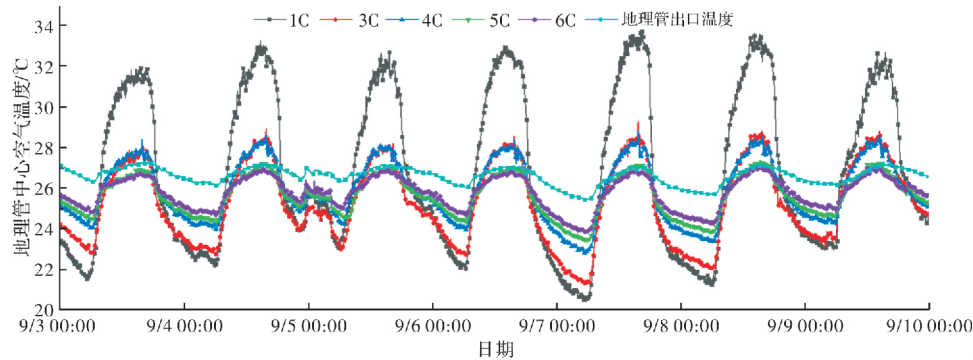


图 11 地埋管中心及出口温度变化

Fig. 11 Variations of air temperature at the center line and outlet of EAHE

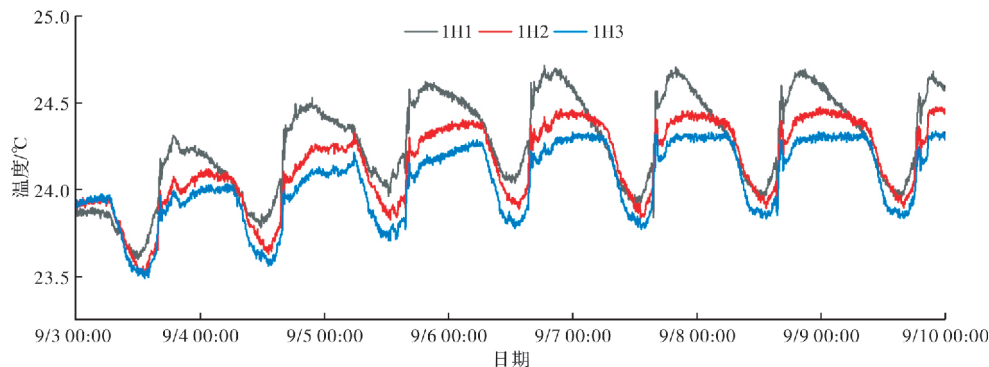


图 12 管道截面水平方向土壤温度变化

Fig. 12 Variations of soil temperature in horizontal direction of pipeline section

表 3 不同测点土壤温度峰值

Tab. 3 Soil temperature peaks at different measuring points

温度/°C	日期						
	9 月 3 日	9 月 4 日	9 月 5 日	9 月 6 日	9 月 7 日	9 月 8 日	9 月 9 日
1H1	24.23	24.47	24.60	24.67	24.68	24.69	24.69
1H2	24.10	24.28	24.39	24.44	24.45	24.46	24.46
1H3	24.02	24.16	24.27	24.31	24.32	24.33	24.33

由表 3 可知, 1H1 测点的升温幅度明显高于 1H2 和 1H3, 且随着系统运行时间的延长, 各点的升温幅度开始逐渐减小, 造成这一现象的原因有两点, 一是随着土壤温度的上升, 土壤与空气间的温差逐渐减小, 传热效果逐渐减弱; 二是夜晚室外空气温度较低, 冷空气进入地埋管与土壤换热, 使土壤被冷却, 从而与白天的温升抵消, 达到热平衡. 由此可知, 合理进行夜间通风, 充分利用夜晚冷空气对土壤的降温作用, 有利于土

壤温度的恢复, 从而增加耦合系统连续运行的稳定性.

图 13 所示为 T1 组测点所在截面土壤竖直方向的温度变化情况. 1V1、1V2、1V3 分别距离地埋管外壁 15 cm、30 cm、45 cm(即 0.5 倍、1 倍、1.5 倍管径). 与水平方向类似, 由于室外空气温度的影响, 竖直方向土壤温度呈周期性变化, 且相比室外空气存在峰值衰减和时间延迟. 在实验开始时, 由于埋深不同, 相邻测点间有约 0.5 °C 的

温差,埋深最深的 1V1 测点温度低,为  $24.4^{\circ}\text{C}$ ; 1V2 测点次之,为  $24.9^{\circ}\text{C}$ ; 埋深最浅的 1V3 测点温度最高,为  $25.3^{\circ}\text{C}$ . 1V2 和 1V3 测点变化规律与水平方向基本一致,在前 5 天每日约升温  $0.2^{\circ}\text{C}$ ,后两天趋于稳定. 1V1 测点变化规律却与其他测点有较大区别,其波动幅度更大,峰值持续时间更短,这是由于 1V1 测点靠近地埋管,受

室外空气温度影响更大.

土壤温度能否恢复是决定地埋管是否能稳定连续运行的关键因素. 图 14 所示为 1H1 测点土壤在系统工作期与恢复期的温度变化情况. 在系统连续运行一周结束后,马上将地埋管进出口用密封盖进行密封,然后对土壤温度变化进行观测,直到土壤温度恢复稳定.

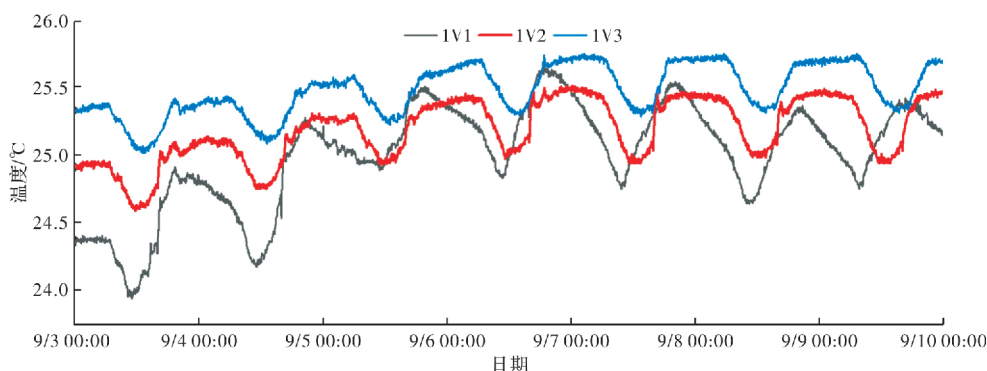


图 13 管道截面垂直方向土壤温度变化

Fig. 13 Variations of soil temperature in vertical direction of pipeline section

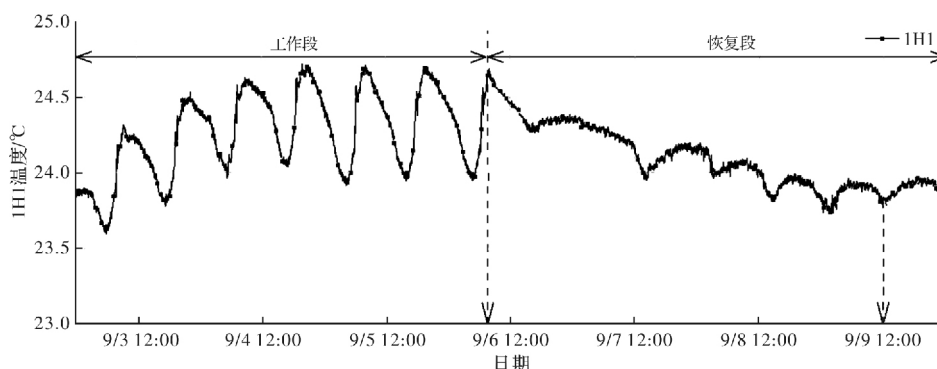


图 14 连续运行和恢复期间土壤温度的变化

Fig. 14 Variations of soil temperature during continuous operation and recovery periods

在系统连续运行期间, 1H1 测点由于位于地埋管进口附近, 故最先受到进口空气温度影响, 导致运行期间温度持续升高, 直到第六天温度才趋于稳定. 该测点土壤初始温度为  $23.9^{\circ}\text{C}$ , 系统连续运行一周后温度为  $24.7^{\circ}\text{C}$ , 升高了  $0.8^{\circ}\text{C}$ . 在恢复期内, 土壤温度逐渐降低, 在 9.10~9.12 期间土壤降温幅度较大, 之后降温速率减小, 最终在 9.16 恢复系统运行前的初始温度. 由此可见, 尽管土壤只有不到  $1^{\circ}\text{C}$  的温升, 在自然状态下却需要 6 d 才能恢复至初始状态. 由表 3 结论可知, 夜间室外冷空气对土壤有良好的降温效果, 因此, 充分利用夜间通风, 发挥夜间空气的自然冷源作用, 对土壤温度的恢复有积极作用.

## 4 结论

为研究 SC-EAHE 耦合系统在室外气象条件变化的情况下多日连续运行的可靠性, 以及其对室

内温度的影响, 本文利用全尺寸的实验平台, 对系统相关性能参数及室内温度进行了为期一周的连续测试, 得出以下结论:

(1) SC-EAHE 耦合系统在夏季连续运行中可以稳定提供风量, 其峰值在太阳辐射充足时可达  $230\sim 280\text{ m}^3/\text{h}$ , 在太阳辐射强度较低时, 峰值为  $170\sim 220\text{ m}^3/\text{h}$ , 可以为建筑提供全天自然通风.

(2) 系统制冷量随太阳辐射强度的增加而增加, 在太阳辐射充足时, 制冷量峰值达  $600\sim 800\text{ W}$ , 太阳辐射强度较低时峰值为  $400\sim 600\text{ W}$ .

(3) 地埋管在夏季可以减小室外空气温湿度波动, 出口温度波动范围为  $25.8\sim 27^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度波动范围为  $49.1\%\sim 84.1\%$ , 波动幅度相较入口分别降低了 93.48% 和 53%.

(4) EAHE-SC 耦合系统在夏季可以有效降低室内温度, 实验房间平均温度对比房间降低  $2.5^{\circ}\text{C}$ , 同时室温波动降低 48.2%, 说明耦合系

统在夏季可以改善室内热环境。

(5)系统连续运行一周后,土壤温度升高了 $0.8^{\circ}\text{C}$ ,在自然状态下需要大约6 d恢复至初始状态。若能合理进行夜间通风,充分利用夜间空气作为自然冷源对土壤进行冷却,将对土壤的温度恢复具有积极作用。

## 参考文献 References

- [1] 王有为. 谈“碳”——碳达峰与碳中和愿景下的中国建筑节能工作思考[J]. 建筑节能, 2021, 49(1): 1-9.  
WANG Youwei. China's building energy efficiency efforts to peaking carbon dioxide emission and achieving carbon neutrality[J]. Journal of Building Energy Efficiency, 2021, 49(1): 1-9.
- [2] 中国建筑节能协会. 中国建筑能耗研究报告(2020年)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.  
China Building Energy Conservation Association. China building energy research report [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.
- [3] LI Y, NIELSEN PV. CFD and ventilation research [J]. Indoor Air, 2011, 21(6): 442-453.
- [4] 史源源. 暖通空调制冷系统中的节能环保技术分析[J]. 应用能源技术, 2020(4): 34-38.  
SHI Yuanyuan. Analysis of energy saving and environmental protection technology in HVAC refrigeration system [J]. Applied Energy Technology, 2020 (4): 34-38
- [5] 新华社. 我国今年将制定2030年前碳排放达峰行动方案[EB/OL]. [http://www.gov.cn/zhengce/2021-03/06/content\\_5590830.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2021-03/06/content_5590830.htm).  
Xinhua, The country will draw up an action plan for peaking carbon emissions by 2030. [EB/OL]. [http://english.www.gov.cn/news/topnews/202103/06/content\\_WS6042dd85c6d0719374afa2ec.html](http://english.www.gov.cn/news/topnews/202103/06/content_WS6042dd85c6d0719374afa2ec.html)
- [6] 张静红, 谭洪卫, 王亮. 地道风系统的研究现状及进展[J]. 建筑热能通风空调, 2013, 32(1): 44-48, 99.  
ZHANG Jinghong, TAN Hongwei, WANG Liang. A review on earth to air heat exchanger (EAHE) [J]. Building Energy & Environment, 2013, 32(1): 44-48, 99.
- [7] PERETTI C, ZARRELLA A, DE CARLI M, et al. The design and environmental evaluation of earth-to-air heat exchangers (EAHE). A literature review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 28: 107-16.
- [8] 李安桂, 郝彩侠, 张海平. 太阳能烟囱强化自然通风实验研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(4): 460-464.  
LI Angui, HAO Caixing, ZHANG Haiping. Experimental study on solar chimney for natural ventilation [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2009, 30(4): 460-464
- [9] KHANAL R, LEI C. Solar chimney-A passive strategy for natural ventilation[J]. Energy Build, 2011, 43 (8): 1811-1819.
- [10] ARCE J, JIMENEZ M J, GUZMAN J D, et al. Experimental study for natural ventilation on a solar chimney[J]. Renewable Energy, 2009, 34(12): 2928-2934.
- [11] MAEREFAT M, HAGHIGHI A P. Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat exchanger and solar chimney [J]. Renewable Energy, 2010, 35(10): 2316-2324.
- [12] LI H, YU Y, NIU F, et al. Performance of a coupled cooling system with earth-to-air heat exchanger and solar chimney[J]. Renewable Energy, 2014, 62: 468-477.
- [13] YU Y, LI H, NIU F, et al. Investigation of a coupled geothermal cooling system with earth tube and solar chimney[J]. Applied Energy, 2014, 114: 209-217.
- [14] SERAGELDIN A A, ABDEEN A, AHMED M M S, et al. Solar chimney combined with earth to-air heat exchanger for passive cooling of residential buildings in hot areas[J]. Solar Energy, 2020, 206: 145-162.
- [15] SERAGELDIN A A, ABDEEN A, AHMED M M S, et al. Solar chimney combined with earth to-air heat exchanger for passive cooling of residential buildings in hot areas[J]. Solar Energy, 2020, 206: 145-162.
- [16] LI Y, LONG T, BAI X, et al. An experimental investigation on the passive ventilation and cooling performance of an integrated solar chimney and earth-air heat exchanger[J]. Renewable Energy, 2021, 175: 486-500.
- [17] MANCA O, NARDINI S, ROMANO P, et al. Numerical investigation of thermal and fluid dynamic behavior of solar chimney building systems[J]. Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 2014, 49 (1): 106-116.
- [18] 苏醒, 刘传聚, 苏季平. 太阳能烟囱的通风效应及应用研究[J]. 能源技术, 2005, (6): 245-247.  
SU Xing, LIU Chuanju, SU Jiping. Research on ventilation effect and application of solar chimney[J]. Energy technology, 2005(6): 245-247.
- [19] BOJIC M, PAPADAKIS G, KYRITSIS S. Energy from a two-pipe, earth-to-air heat exchanger[J]. Energy, 1999, 24(6): 519-523.
- [20] IEA, Early design guidance for low energy cooling technologies [R]. Energy Conservation in Buildings and Community System Program, Annexure 28, Low Energy Cooling, Subtask 2, Report 2. [s. i.]. International Energy Agency, 1999.
- [21] GAN G. Simulation of dynamic interactions of the earth-air heat exchanger with soil and atmosphere for preheating of ventilation air [J]. Applied Energy, 2015, 158: 118-132.

(编辑 吴海西 沈 波)