

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.09.006

引用格式:叶恺,李永财,龙天河,等.利用太阳能烟囱耦合地埋管自然通风改善室内热环境研究[J].重庆大学学报,2025,48(9):57-65.



# 利用太阳能烟囱耦合地埋管自然通风 改善室内热环境研究

叶 恺,李永财,龙天河,郑迪萌,张纾瑀

(重庆大学 土木工程学院,重庆 400045)

**摘要:**土壤-空气换热器是一种浅层地热利用技术(earth-to-air heat exchanger, EAHE),可以显著降低建筑能耗。当与太阳能烟囱(solar chimney, SC)耦合时,利用太阳能烟囱制造的热压将新鲜空气引入室内环境的同时,还可以消除房间的部分负荷。文中研究了夏热冬冷地区 SC-EAHE 系统改善建筑室内热环境的效果。结果表明,夏季工况下,配置 SC-EAHE 系统的测试房间相比对比房间夏季室内温度最高能降低 3.2 °C,与室外空气相比最大温降为 5.9 °C,换气次数在 2.2~10.1 次/h;冬季最大升温 1.6 °C,与室外空气相比最大温升为 15.5 °C,换气次数在 3.4~13.5 次/h。建筑得热量最大的外表面是屋顶和南墙,与没有 EAHE 的对比房间相比,在夏季工况下,南墙内表面平均温度降低约 1.1 °C,屋顶内表面温度几乎保持一致;冬季工况下,南墙内表面平均温度升高 1.5 °C,屋顶内表面平均温度升高 1.7 °C。

**关键词:**太阳能烟囱;土壤空气换热器;自然通风;热环境;围护结构

中图分类号:TU831.8

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)09-057-09

## Experimental study on natural ventilation using an earth-to-air heat exchanger combined with a solar chimney and its impact on the indoor thermal environment

YE Kai, LI Yongcai, LONG Tianhe, ZHENG Dimeng, ZHANG Shuyu

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** The earth-to-air heat exchanger (EAHE) is a shallow geothermal energy technology capable of significantly reducing building energy consumption. When combined with a solar chimney (SC), a novel passive ventilation and cooling system is established in which fresh air is cooled and naturally drawn into the indoor space. This study investigates the effect of SC-EAHE system on the indoor thermal environment in regions characterized by hot summers and cold winters, and compares the building envelope performance with and without the system. Experimental results show that, compared to a reference chamber, the EAHE reduces air temperature by 3.2 °C in summer and increases it by 1.6 °C in winter, with corresponding air change rates ranging

收稿日期:2024-12-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078075, 51708054)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (52078075, 51708054).

作者简介:叶恺(1997—),男,硕士研究生,主要从事自然通风研究,(E-mail)1029088632@qq.com。

通信作者:李永财,男,博士,副教授,博士生导师,(E-mail)yongcail85@163.com。

from 2.2ACH (air changes per hour) to 10.1 ACH in summer and 3.4ACH to 13.5ACH in winter. Relative to the ambient air, the indoor air temperature shows a maximum decrease of 5.9 °C in summer and a maximum increase of 15.5 °C in winter. The south-facing exterior wall and the roof receive the highest solar irradiation among all envelop surfaces. In summer, the average temperature of the interior surface of the southern wall is reduced by about 1.1 °C, while the roof temperature remains unchanged. In winter, the average interior temperatures of the southern wall and roof increase by 1.5 °C and 1.7 °C, respectively.

**Keywords:** solar chimney; earth-to-air heat exchanger; natural ventilation; thermal environment; building envelop

目前,中国建筑能耗占全国总能耗的 21.7%,仍呈现快速增长趋势<sup>[1]</sup>。空调系统的能耗占建筑能耗的比例很大。据统计,在所有建筑总能耗中,暖通空调系统的能耗为 1/2 以上,其中用于通风的能耗又占 20%~30%<sup>[2]</sup>。地热能作为新兴清洁能源被广泛应用于地热发电及供冷/热领域,土壤-空气换热器 (earth-to-air heat exchanger, EAHE),称为地下空气管或土壤-空气管通风系统,因其结构简单和维护操作性低而受到广泛关注<sup>[3]</sup>。由于土壤的高热惯性,地下土壤温度变化滞后于室外空气温度,在足够深度处(一般为 3 m)的土壤温度几乎保持不变,EAHE 使用地下土壤作为热源/散热器,空气在进入建筑物内部空间之前,通过 EAHE 在夏季进行预冷,在冬季进行预热,可以降低建筑物的冷热负荷,进而降低耗电量<sup>[4]</sup>。Li 等<sup>[5]</sup>的研究表明,该耦合系统在夏季工况下可以实现 24 h 自然通风,地埋管出口温度降幅达 12.5 °C。文中通过将太阳能烟囱 (solar chimney, SC) 和土壤-空气换热器结合,通过 SC 吸收太阳辐射来加热烟囱内的空气,为建筑物自然通风提供热压,再利用烟囱的空气进出口高度差产生热浮升力,将太阳能转化成空气动能,为空气流动提供动力<sup>[6]</sup>。在夜间没有太阳提供动力的情况下,可以利用建筑本身的蓄热能力进行通风。相关研究分析了影响夜间通风的性能指标<sup>[7]</sup>,指出外部气候条件和通风模式对通风能力有较大影响。Artmann 等<sup>[8]</sup>利用全尺寸试验台研究了夜间混合通风和置换通风条件下房间内表面的换热过程,得出通风量较大时混合通风效果更好,通风量较小时置换通风更有效。文中主要通过分析夏冬季典型工况下,通风房间与非通风房间的热环境以及围护结构的温度变化,研究 SC-EAHE 系统自然通风以及建筑围护结构蓄、放热对室内热环境的共同影响,为后续优化系统结构参数改善室内热环境奠定基础。

## 1 实验平台与测点布置

### 1.1 实验平台介绍

实验平台如图 1 所示,主要由 EAHE、太阳能烟囱、1 间测试房间和 1 间对比房间组成,房间窗口朝向西

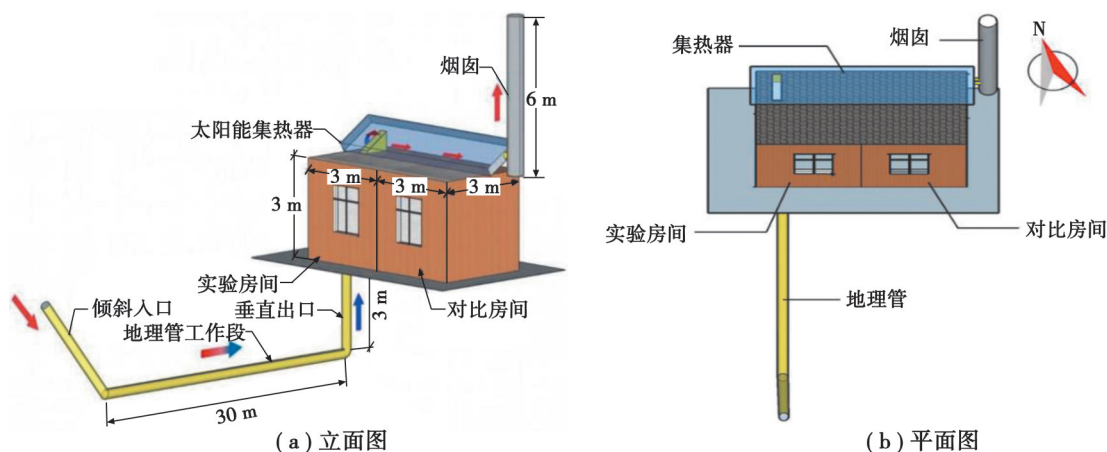


图 1 实验台立面图及平面图

Fig. 1 Schematic view (left) and planar graph (right) of SC-EAHE system

南。EAHE埋管管径为 0.3 m,由入口段、出口段和水平工作段组成。其入口段设计为与水平方向成倾斜 45°,以减小由弯头引起的局部压力损失。而出口段设置为与垂直出口以利于形成沿管径的均匀空气速度分布。由于土壤的巨大热惯性,在日周期和年周期的热扩散过程中,土壤温度在地表 3 m 以下变化不大<sup>[9]</sup>。所以,长 30 m 的工作段水平埋在地下 3 m 的深处,并分别连接到 EAHE 入口段和出口段。室外空气由入口段进入 EAHE,并在水平工作段与埋管周围土壤进行换热和冷却。

为了定量评估 SC-EAHE 耦合系统对室内热环境的影响,实验平台包括 2 个房间,一个为实验房间,另一个作为对比房间。实验房间和对比房间尺寸均为 3 m×3 m×3 m(长×宽×高),朝向西南。EAHE 管道的出口段连接到实验房间,而对比房间则无任何主被动环境调控设备。太阳能烟囱由 2 部分组成:水平太阳能集热器和垂直烟囱。太阳能集热器主要功能是加热由测试房间进入集热器空气通道的空气,形成温度差;垂直烟囱提供驱动烟囱效应的高度差。水平太阳能集热器长 7 m、宽 1.5 m、高 0.3 m。水平太阳能集热器设置在屋顶上,这样设置可以将房间的高度(3 m)纳入耦合系统,从而充分利用由建筑蓄热体制造的热压浮升力。用具有高吸收率的吸热漆对不锈钢集热板进行喷涂增强集热板吸收太阳辐射的能力,太阳能集热器的 4 个侧面和背面均用聚苯乙烯板做保温处理。4 块等尺寸的玻璃板用作太阳能集热器的上表面,与集热板共同形成空气通道,太阳辐射穿过玻璃被集热板吸收。在测试房间屋顶开 1 个 0.9 m×0.3 m 孔用于连接房间与太阳能集热器,集热器一端连接测试房间出口,另一端连接垂直烟囱进口。垂直烟囱的高度和直径分别为 6 m 和 0.3 m,进行了隔热处理以减少热量损失。太阳能收集器与水平面成 30°倾斜,以便在白天最大程度地吸收太阳能。垂直烟囱出口和 EAHE 入口均配有防雨帽,以防止雨水渗入并减少风压不必要的影响。墙体的材料的物性参数如表 1 所示。

表 1 围护结构热工参数  
Table 1 Thermal parameters of building envelope

围护结构	类型	厚度/ mm	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	导热系数/ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	比热/ (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
外墙	水泥砂浆	20	1 648	0.719	920
	聚苯乙烯	20	30	0.043	—
	多孔空心砖	200	1 300	0.500	837
屋顶	水泥砂浆	20	1 648	0.719	920
	聚苯乙烯	20	30	0.043	—
	混凝土板	150	2 243	1.731	840

1.2 测点布置与仪器介绍

为了确定 SC-EAHE 耦合系统的对室内热环境的影响,对实验房间和对比房间的围护结构内外表面和室内空气温度进行测量。实验主要测点分为 3 个部分,第 1 部分是室内温度的测点布置,第 2 部分是围护结构内外表面的温度分布,第 3 部分是埋管换热能力的测量。每面墙由 3 个插入反射铝屏蔽层的铠式热电偶分别沿中心线等距分布在外表面和内表面。在实验房间中心距地板 1.1 m、1.7 m、3 m 的高度设置 3 个热电偶,对照房间中心距地板 1.1 m、1.7 m 处设置 2 个热电偶,以测量房间空气温度,风速测点按照等圆环面积法均匀布置在埋管出口截面处,所有温度、风速数据都是使用数据采集仪(Agilent 34980A)自动收集并记录在计算机上,数据记录器的工作间隔为 60 s,并在埋管出口设置温湿度自动记录仪测试房间送风空气温湿度。最后,用 RS-RA-II20-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,主要测点布置

如图 2 和图 3 所示。测试仪器的精度范围如表 2 所示。

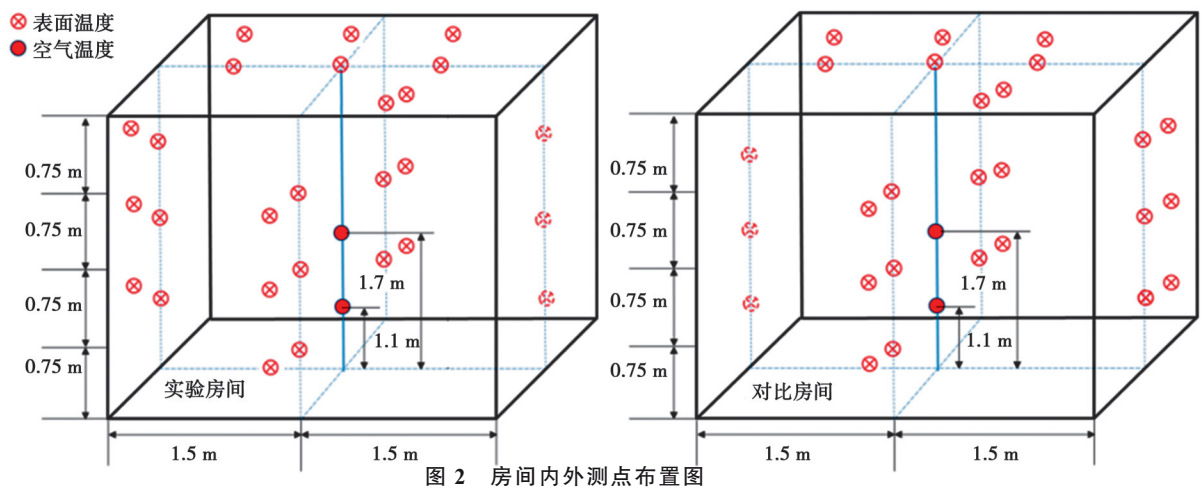


图 2 Locations of thermocouples on chamber surfaces and inside chambers

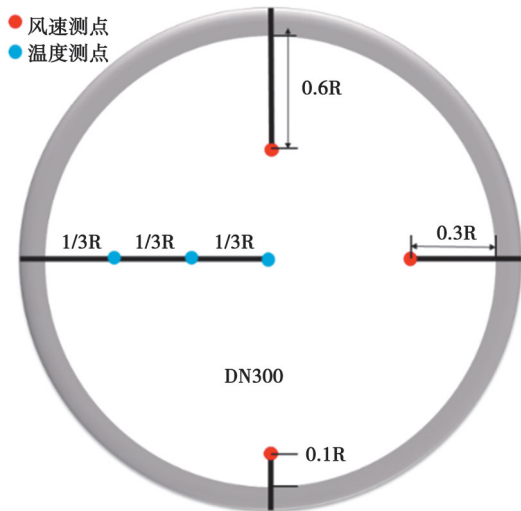


图 3 埋管出口风速、温度测点布置图  
Fig. 3 Locations of air velocity sensors and temperature sensors at EAHE outlets

表 2 测试仪器型号及精度  
Table 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 型自黏式热电偶	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	温度: ±0.5°C	2.77
		相对湿度: 0.0%~100.0%	相对湿度: ±5%	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>	< 2%	2.36
		280~3 000 nm		

## 2 影响热环境参数计算

### 2.1 SC-EAHE 传热性能计算

风量计算:

$$V_a = 3\,600 \cdot \pi d^2 v_a / 4, \quad (1)$$

式中:  $V_a$  为风量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $v_a$  为空气流速,  $\text{m/s}$ ;  $d$  为地埋管直径,  $\text{m}$ 。

制冷/热量计算:

$$Q_t = V_a \rho_a (h_i - h_o), \quad (2)$$

式中:  $Q_t$  为制冷量,  $\text{W}$ ;  $h_i$ 、 $h_o$  为 EAHE 的进、出口空气焓值,  $\text{J/kg}$ ;  $\rho_a$  为空气密度, 取值为  $1.18 \text{ kg/m}^3$ 。

空气焓值可用下式计算<sup>[10]</sup>:

$$h = 1.01T + (2\,500 + 1.84T)\omega, \quad (3)$$

其中, EAHE 进出口的空气含湿量  $\omega$  可用下式计算<sup>[5]</sup>:

$$\omega = 622\varphi \frac{P_s}{(P_0 - \varphi P_s)} \quad (4)$$

饱和水蒸气分压力,  $P_s$  可由下式计算得到<sup>[11]</sup>:

$$\log P_s = C_1 \left( \frac{373.15}{T} - 1 \right) + C_2 \log \left( \frac{373.15}{T} \right) + C_3 \left( 10^{11.344 \left( 1 - \frac{373.15}{T} \right)} - 1 \right) + C_4 \left( 10^{-3.49149 \left( \frac{373.15}{T} - 1 \right)} - 1 \right) + \log P_0, \quad (5)$$

式中:  $\omega$  为空气含湿量,  $\text{g/kg}$ ;  $T$  为空气温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\varphi$  为空气相对湿度, %;  $P_s$  为饱和水蒸气分压力,  $\text{Pa}$ ;  $P_0$  为当地大气压力,  $\text{Pa}$ ;  $C_1 = -7.902\,98$ ,  $C_2 = 5.028\,08$ ,  $C_3 = -1.381\,6 \times 10^{-7}$ ,  $C_4 = 8.132\,8 \times 10^{-3}$ 。

## 3 实验结果分析

为了研究 EAHE 在夏热冬冷地区运行时, 对室内热环境的影响, 分别于 2020 年 9 月 8 日 0:00—2020 年 9 月 8 日 24:00, 2021 年 1 月 11 日 0:00—2021 年 1 月 11 日 24:00 进行了 24 h 的预冷和预热实验。在测试期间, EAHE 系统全天自然通风。分析了 EAHE 出口温度和房间温度的变化, 以及室内空气和外墙/内墙表面的温度延迟规律。

### 3.1 系统换热性能及室内热环境分析

图 4 为冬夏季地埋管进出口温度的变化情况, 可以看出地埋管在夏季和冬季均有良好的换热性能。夏季室外温度在  $19.2 \sim 35.6^{\circ}\text{C}$  范围内波动时, 埋管出口温度可以有效控制在  $25.7 \sim 27.2^{\circ}\text{C}$ , 最大温降达到  $7.6^{\circ}\text{C}$ , 出口波动幅度为  $1.5^{\circ}\text{C}$ , 平均温度  $26.5^{\circ}\text{C}$ ; 冬季室外温度波动比夏季更为明显, 最低  $-5.8^{\circ}\text{C}$ , 最高  $15.3^{\circ}\text{C}$ , 变化幅度达到  $21.1^{\circ}\text{C}$ , 但是经过地埋管的调控之后, 温度稳定在  $9.5 \sim 12.3^{\circ}\text{C}$ , 出口平均温度为  $10.5^{\circ}\text{C}$ , 经过地

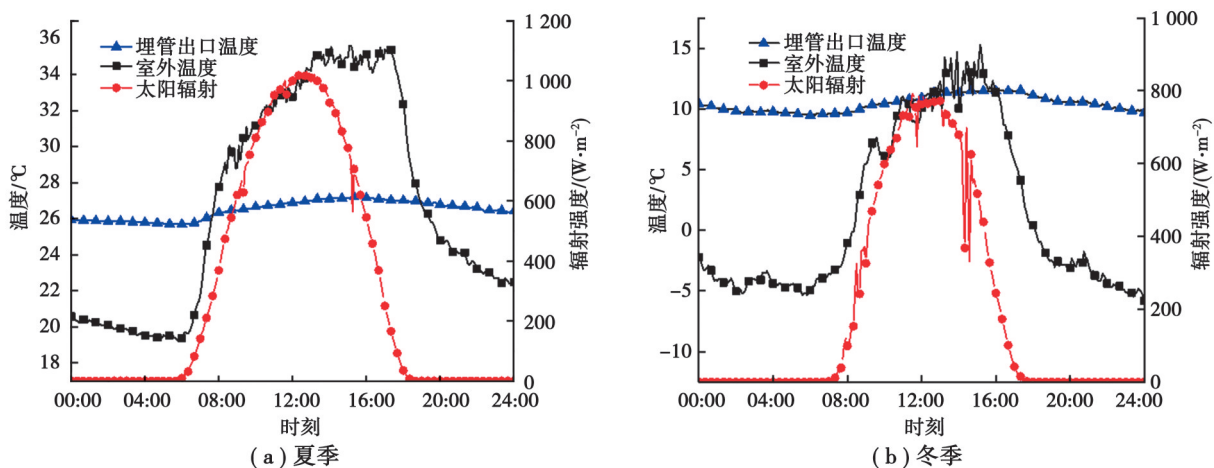


图4 室外气象参数与地埋管出口温度变化

Fig. 4 Variation of the outlet air of EAHE and outdoor temperature parameters during the operation period



埋管处理后的温度在大部分时间均高于室外温度,即使在夜间也能达到最高  $15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度提升。针对夏季夜间工况,室外温度低于埋管出口温度的时候可以适当采取开窗自然通风的方式提高夜间降温效果。可以得出,EAHE系统在2个典型的空调季节里,一方面可以有效地送入建筑内部具有稳定温度的空气,另一方面也可以在夏季预冷,冬季辅助预热,降低空调能耗。

图5为夏、冬季不同工况下埋管的工作性能。可以发现,在这2种工况下SC-EAHE系统均能实现24 h的自然通风。夏季工况下,通风量在  $60\sim 273\text{ m}^3/\text{h}$  波动,制冷量与太阳辐射呈正比例关系,最高点出现在中午12:30,约为  $763\text{ W}$ 。冬季工况下,系统通风量明显高于夏季,最低  $91\text{ m}^3/\text{h}$ ,最高  $365\text{ m}^3/\text{h}$ ,其原因是冬季室内外温差较大,为系统通风提供了更大的热压动力,从而增大了风量。与夏季不同的是,白天系统运行的风量增大,制热量反而最低,并出现了制冷工况,这是由于白天太阳辐射最大的时候室外空气温度比较高,土壤温度低于室外空气温度导致室外空气流经埋管被冷却,制热量出现负值;到了夜间室外空气温度低于土壤温度,所以EAHE系统主要在夜间起到明显的制热作用,运行期间制热量最高达到  $1\,300\text{ W}$ 。

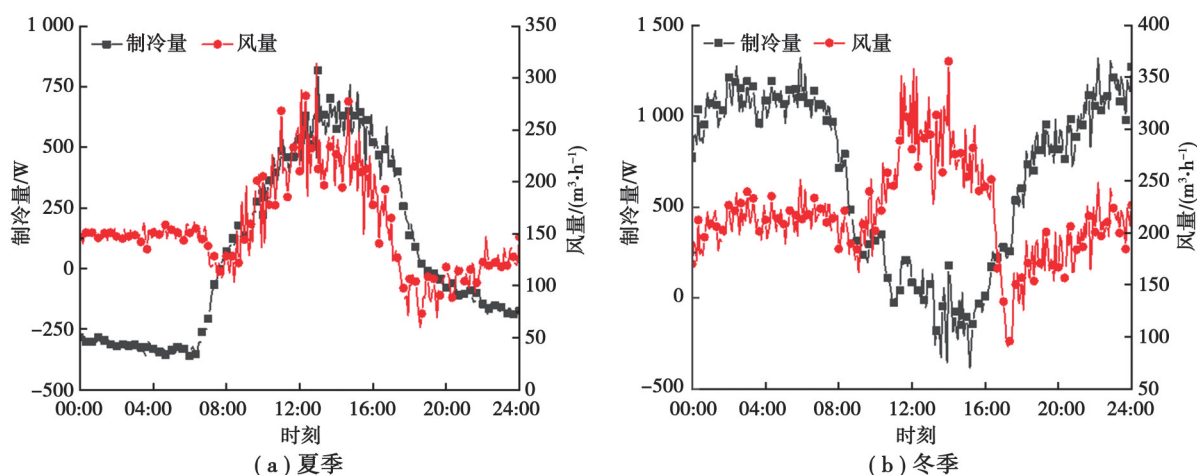


图5 不同工况下埋管工作性能分析

Fig. 5 Variation of the airflow rate and cooling capacity of EAHE during the operation period

图6所示表明,SC-EAHE系统在夏季和冬季对于室内温度都有一定的改善效果。在夏季工况下,凌晨6:00之前,实验房间和对比房间的温度差异并不明显,同一高度下,实验房间对比房间平均低  $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。太阳升起之后,2个房间受到太阳辐射影响开始升温,由于SC-EAHE系统的存在,实验房间升温速度明显低于对

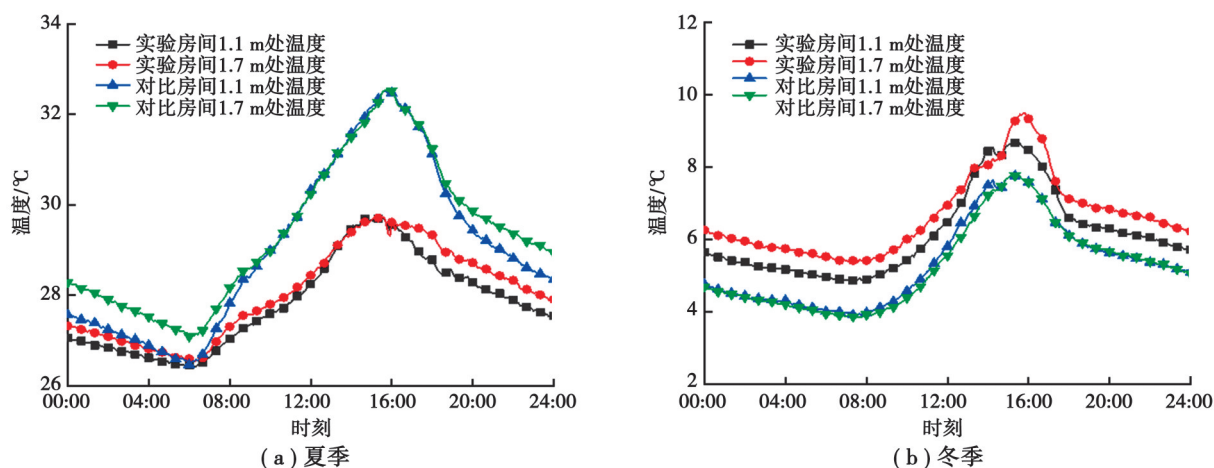


图6 实验房间和对比房间不同高度温度变化

Fig. 6 Temperature variations of indoor air inside reference chamber and test chamber with EAHE during the operation period

比房间,在15:00时,实验房间室内温度先达到峰值29.7℃,16:00后对比房间室内温度达到32.5℃。其中,在1.7 m位置处实验房间最高温度29.6℃,对比房间最高温度32.8℃,最大温降3.2℃。冬季工况下,对比房间不同高度处温度基本相同;实验房间在夜间会出现轻微的温度分层现象,1.7 m处温度比1.1 m处平均高0.2℃。还可以发现,2个房间的温度规律相似,温度拐点与峰值点基本出现在同一时刻,其中实验房间的温度在5.6~9.1℃波动(1.7 m),相比室外温度最大提升了15.5℃。对比房间在3.9~7.7℃波动(1.7 m),这个温度虽然不能满足人体热舒适性要求<sup>[12]</sup>,但是能显著提高新风进入室内的温度,为建筑通风提供良好的预热效果。

### 3.2 围护结构温度变化分析

图7为冬夏季不同朝向外围护结构24 h温度的变化。夏季测试工况下,在没有太阳辐射的时间段(0:00–6:00、19:00–24:00),所有的墙壁外表面温度都保持相似和稳定,屋顶外表面的温度最低。北墙、天花板、南墙和西墙的外表面温度峰值分别为43℃(8:15)、56.3℃(14:00)、60.8℃(13:00)和51℃(16:30)。屋顶的温度波动范围为19.6~56.2℃,最大温差为35.6℃;南墙外表面温度的波动范围为19.5~60.1℃,最大温差为40.6℃。另外,由于房间朝向西南,上午太阳光照在北外墙,北外墙温度在8:15时达到最高温度43℃。

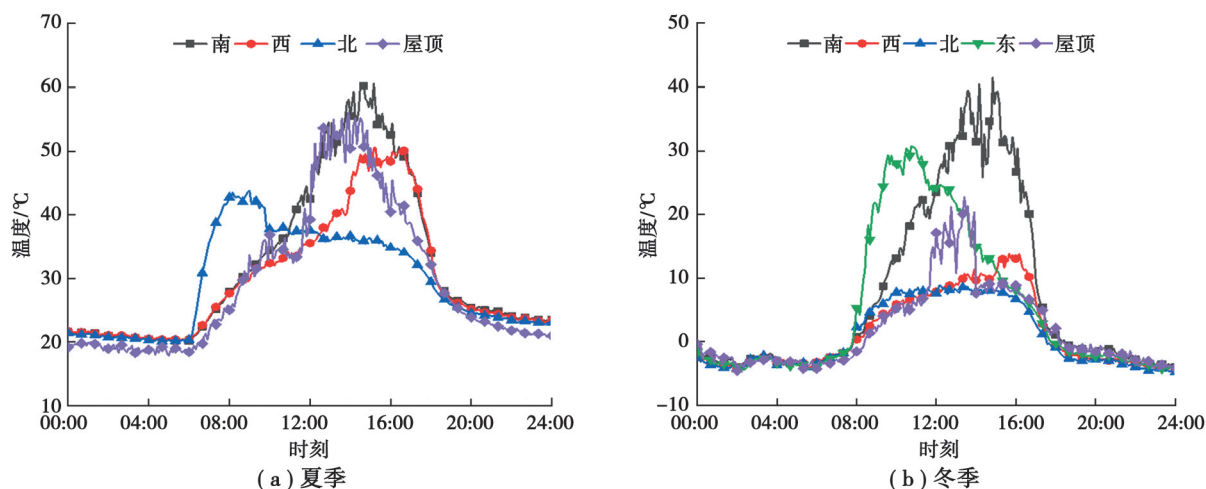


图7 不同季节外墙表面温度变化趋势图

Fig. 7 Variation of the temperature at the exterior surfaces of the building envelope in different orientations

冬季测试时,墙体外表面温度总体在-5.3~41.7℃波动,其中西墙与北墙外表面的温度变化曲线基本重合,在-5.1~41.7℃波动。东墙与南墙外表面温度分别在11:00(31.2℃)和15:00(41.7℃)达到峰值。夜间各个朝向的墙体温度变化趋势类似,与室外空气温度接近。

图8为夏季有无EAHE建筑不同朝向围护结构的内表面温度变化情况,可以发现不管有无EAHE,墙体内部表面的温度都按照正弦规律变化,波动幅度以及波峰出现时间存在差异。针对有EAHE的房间,所有的内墙温度在26.8~31.2℃波动,除了东墙之外,其余朝向的墙体在0:00–8:00的温度变化趋势相同,屋顶由于受到天空长波辐射的影响内表面的温度下降幅度最大,其次是南墙、西墙、北墙。在太阳升起2 h后(8:00),各朝向墙体内部表面的温度开始逐步上升,天花板、南墙、北墙、西墙分别在17:30(31.1℃)、19:30(30.2℃)、16:00(29.0℃)、20:00(29.1℃)到达峰值,随后缓慢下降。

由图可知,屋顶内外表面最大温差为24.9℃,南墙和北墙内外表面最大温差为30.3℃和14.7℃。可以发现,室内温度的峰值出现在15:00,并且20:00之后所有墙体的内表面温度均高于室内温度,二者之间相互换热,为夜间通风创造条件。

对比无EAHE的房间,墙体内部表面温度在27.5~31.8℃波动,其中,南墙与天花板内表面温度变化几乎一

致,波动范围在 $27.7\sim 31.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,南北墙内外表面的最大温差为 $29.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $13.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对比2个房间墙体的内表面温度可以发现,EAHE系统可以降低内表面平均温度,也可以降低墙体表面的温度变化幅度。

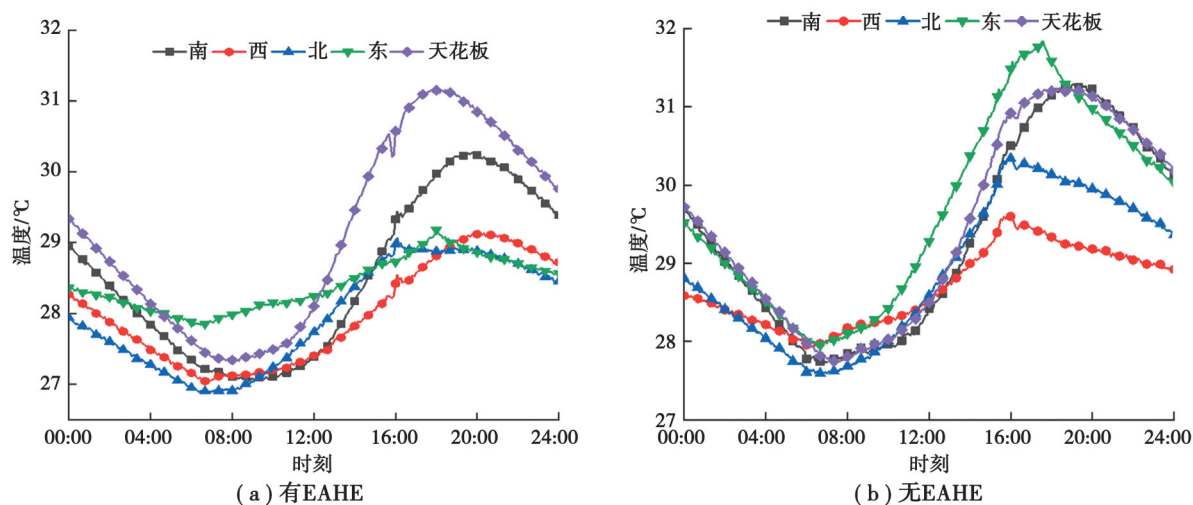


图8 夏季建筑不同朝向围护结构内表面温度变化

Fig. 8 Variation of the temperatures at the interior surfaces of the building envelop in different orientations in summer

图9为冬季有无EAHE建筑不同朝向围护结构的内表面温度变化情况,有EAHE的房间围护结构内表面空气在 $3.1\sim 8.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围波动,西墙与北墙内表面温度变化基本一致,都在 $4.0\sim 6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内;天花板与南墙内表面的温度分别在 $3.1\sim 6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $4.7\sim 8.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内波动,与夏季工况相比,内表面温度峰值出现的时间都提前了1 h。对比房间(EAHE)内表面温度在 $3.1\sim 6.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围波动。

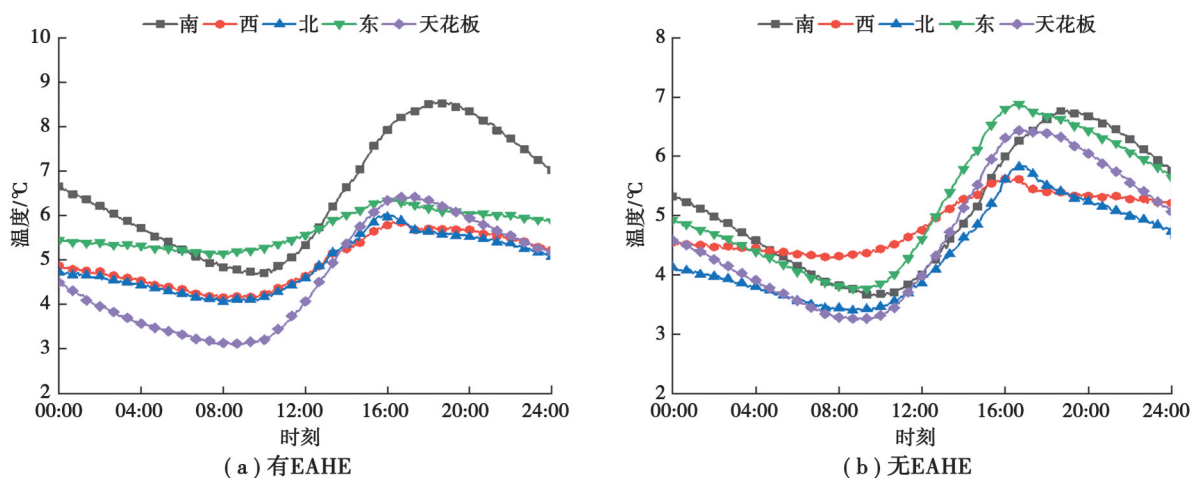


图9 冬季建筑不同朝向围护结构内表面温度变化

Fig. 9 Variation of the temperatures at the interior surfaces of the building envelop in different orientations in winter

## 4 结 论

为研究夏热冬冷地区利用SC-EAHE系统改善建筑室内热环境的可行性,对全尺寸实验台进行冬夏季的性能测试,可得出以下结论。

1) SC-EAHE系统在冬夏季均能实现24 h热压驱动自然通风。夏季出口温度平均 $26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,风量在 $60\sim 273\text{ m}^3/\text{h}$ 波动;冬季出口温度平均 $10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,风量在 $91\sim 365\text{ m}^3/\text{h}$ 内变化。



2) 地埋管在实验夏季工况下可以将室内空气温度维持在 $26.4\sim 29.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。EAHE的制冷量在太阳辐射强度为 $900\text{ W/m}^2$ 时的制冷量可以达到 $763\text{ W}$ ,室内换气次数在 $2.2\sim 10.1\text{ 次/h}$ 。

3) 冬季寒冷的地区单纯使用SC-EAHE耦合系统自然通风只能将室内温度维持在 $5.6\sim 9.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,换气次数在 $3.4\sim 13.5\text{ 次/h}$ ,太阳辐射最大的时候制热量最低,很难使室内环境达到热舒适水平,但是对通风有着明显的预热效果,最大可以提升 $15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4) 建筑最热的外表面是屋顶和南墙,夏季建筑室内空气获得的大部分热量通过上述外墙传递。与没有EAHE的对比房间相比,在夏季工况下,南墙内表面平均温度降低约 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,屋顶几乎保持一致;冬季工况下,南墙内表面平均温度升高 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,屋顶内表面平均温度升高 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

总之,SC-EAHE耦合系统可以实现 $24\text{ h}$ 自然通风,持续为建筑提供预冷/预热的新鲜空气。作为纯被动系统,其预冷预热能力与太阳能烟囱和地埋管尺寸密切相关。因此,该系统更适用低密度的农村建筑,地埋管覆土后不影响地表耕种。

## 参考文献

- [1] 中国建筑节能协会. 中国建筑能耗研究报告(2020年)[R]. 北京: 中国建筑节能协会, 2020.  
China Association of Building Energy Efficiency. China Building Energy Consumption Annual Report 2020[R]. Beijing: China Association of Building Energy Efficiency, 2020. (in Chinese)
- [2] 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 Y Y. Analysis of energy saving and environmental protection technology in HVAC refrigeration system[J]. Applied Energy Technology, 2020(4): 34-38. (in Chinese)
- [3] Brum R S, Ramalho J V A, Rodrigues M K, et al. Design evaluation of earth-air heat exchangers with multiple ducts[J]. Renewable Energy, 2019, 135: 1371-1385.
- [4] Menhoudj S, Mokhtari A M, Benzaama M H, et al. Study of the energy performance of an earth: air heat exchanger for refreshing buildings in Algeria[J]. Energy and Buildings, 2018, 158: 1602-1612.
- [5] Li Y C, Long T H, 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.
- [6] Li H R, Yu Y B, Niu F X, et al. Performance of a coupled cooling system with earth-to-air heat exchanger and solar chimney[J]. Renewable Energy, 2014, 62: 468-477.
- [7] Guo R, Hu Y, Liu M Z, 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.
- [8] 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.
- [9] Mathur A, Surana A K, Verma P, et al. Investigation of soil thermal saturation and recovery under intermittent and continuous operation of EATHE[J]. Energy and Buildings, 2015, 109: 291-303.
- [10] Long T H, Li Y C, Li W Y, et al. Investigation on the cooling performance of a buoyancy driven earth-air heat exchanger system and the impact on indoor thermal environment[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 207: 118148.
- [11] Goff J A, Gratch S. Low-pressure Properties of Water from  $-160$  to  $212\text{ F}$ , the 52nd Annual Meeting of the American Society of Heating and Ventilating Engineers[D]. New York: 1946, 95-122.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范 附条文说明: GB 50736—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB 50736—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)