

光伏直热蓄热墙体特性实验研究

张启东, 于国清*, 曹博

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年8月16日; 录用日期: 2025年9月8日; 发布日期: 2025年9月16日

摘要

在“碳达峰、碳中和”目标驱动下, 降低建筑能耗成为关键任务。本文提出一种新型光伏直热蓄热墙体系统, 将光伏电力直接驱动电加热丝发热, 热量被墙体吸收后通过热对流/辐射向室内供暖, 实现蓄热与供暖终端一体化。通过实验研究了电加热丝底部横向排布方式下, 顶部保温封闭与顶部开孔两种工况的性能。结果表明: 1) 保温封闭工况下, 系统光伏发电量3525 Wh (转换率11.3%), 墙体蓄热量1731.23 Wh (蓄热率51%), 单位体积蓄热量6612.81 Wh/m³, 夜间放热持续10小时; 2) 开孔工况蓄热率降至43.3%, 放热时间缩短至6小时, 但白天室温提升更快。保温封闭工况在蓄热性能、夜间供暖持续性方面显著更优, 为建筑光伏蓄热系统提供了高效解决方案。

关键词

光伏直热蓄热墙体, 电加热丝, 供暖性能, 光储直柔, 碳达峰碳中和

Experimental Study on Thermal Characteristics of Photovoltaic Direct-Heating Thermal Storage Wall

Qidong Zhang, Guoqing Yu*, Bo Cao

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Aug. 16th, 2025; accepted: Sep. 8th, 2025; published: Sep. 16th, 2025

Abstract

Under the “Carbon Peak and Carbon Neutrality” targets, reducing building energy consumption is critical. This study proposes a novel photovoltaic direct-heating thermal storage wall system, where PV electricity drives electric heating elements to generate heat, absorbed by the wall and released

*通讯作者。

文章引用: 张启东, 于国清, 曹博. 光伏直热蓄热墙体特性实验研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(9): 172-184.

DOI: 10.12677/mos.2025.149594

indoors via convection/radiation, integrating thermal storage and heating terminal functions. Experiments evaluated two configurations with bottom-mounted horizontal heating elements: top-insulated sealed and top-opened. Key results show: 1) For the insulated case, PV generation reached 3525 Wh (conversion efficiency: 11.3%), wall heat storage was 1731.23 Wh (storage ratio: 51%), volumetric storage density hit 6612.81 Wh/m³, with 10-hour nighttime heat release; 2) The opened case had reduced storage ratio (43.3%) and shorter discharge duration (6 h), but faster daytime room temperature rise. The insulated configuration demonstrates superior heat retention and extended nighttime heating, providing an efficient solution for building-integrated PV thermal storage systems.

Keywords

Photovoltaic Thermal Storage Wall, Electric Heating Elements, Heating Performance, Thermal Characteristic Experiment, Carbon Peak and Carbon Neutrality

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

快速的社会经济发展导致碳排放量激增，加剧了气候变暖，使其成为全球最严峻的挑战之一。实现碳中和已成为世界各国未来发展规划的核心要素[1]。2024年，建筑领域占全球能源消耗的34%和二氧化碳排放量的37% [2]。在建筑中利用可再生能源已成为实现净零碳目标的关键步骤[3]。太阳能是最具前景的可再生能源，到达地球表面的太阳辐射每两小时就能满足全球一整年的能源需求[4]。因此提升光伏(PV)电力于建筑能源体系内的占比，无疑是达成可持续性发展目标的一条行之有效的路径[5] [6]。

在当前光伏发电系统中，采用电化学电池进行电力的储存和缓解光伏发电的波动已经成为主要方式[7] [8]。虽然电化学储能能够很好的缓解光伏波动对电网带来的影响，但是在实际的应用中，一些建筑物对能源的需求非常庞大，这使得我们在缓解波动时需要超大容量的电池，使光伏发电系统的成本大大增加，系统的经济性大大下降，投资回报周期变长[9]。因此，蓄热装置作为一种成本相较于电池更低的储能方案，被提议纳入建筑能源系统，用于配合光伏系统运行。

贺存祥等[10]构建太阳能光伏光热(PV/T)双源热泵供暖系统，并以北京冬奥会延庆赛区某转播技术机房为研究对象，对空气源、水源热泵供暖模式下系统耗电功率、发电功率、热泵机组制热性能系数及室内温度等进行实测。结果显示，PV/T双源热泵供暖系统无论采用空气源还是水源热泵供暖模式，均可满足室内温度需求，且水源热泵供暖模式的制热性能系数更高。González-Peña D等人[11]提出一种创新设计，将光伏和热(PV/T)技术与蓄热相结合。在该设计中，于光伏板背面增设相变材料(PCM)罐，通过在相变过程中调控PV电池温度，实现热能储存，并提升光伏板效率。同时，光伏板周边设黑色表面，增强热能吸收，热能经热管传至PCM罐背面。以月桂酸为PCM的原型，在两种不同配置下测试发现，通过控制白天PCM温度，可使整体日常效率提高50%。Zhong等人[12]提出了一种新型太阳能光伏光热一体化百叶幕墙，将光伏发电与光热技术相结合，该幕墙不仅能具有光伏发电功能，还能为建筑物创造良好的热环境，进一步降低建筑能耗，解决了光伏组件的输出效率随环境温度升高而降低的问题。

近期有研究指出，蓄热装置比电池更适用于配合光伏系统运行，常见的蓄热装置包括水箱、相变材料以及化学蓄热等[13]-[15]。不过，这些蓄热装置存在一个显著弊端，即其所需占用空间远远超出了建筑

物内部实际可提供的空间范围。特别是在城区建筑中，空间资源本就极为紧张，这一问题变得愈发突出[16]。从推广应用的角度来看，理想的建筑能源系统储能设备应当具备成本低廉、体积小且使用寿命长久的特性，建筑围护结构恰好能够满足上述各项要求。尽管上述研究在光伏光热一体化方面取得了显著进展，但仍存在蓄热装置占用空间大、与建筑结构集成度低等问题。特别是在城市建筑中，空间资源紧张，亟需开发结构紧凑、蓄热效率高、与建筑围护结构深度融合的新型蓄热系统。本文针对这一问题，提出一种光伏直热蓄热墙体系统，将电加热丝直接布置于墙体内部，实现光伏发电、蓄热与供暖的一体化，旨在提升蓄热效率、减少空间占用，并通过对两种不同工况(顶部保温封闭与开孔)的实验对比，评估其热性能与应用潜力。

2. 实验条件

本实验中，砖孔为竖直方向，上下层的砖孔相通，将电加热丝全部均匀地分布在放置在墙体的底部，如图1，对墙体进行加热，测量墙体的内外温度的变化以及相关电力数据，包括电压电流以及功率，进而分析其分别在墙体顶部带保温层和顶部不贴保温层两种工况下的蓄热放热性能，以及能量分布情况。



Figure 1. Real discharge of the bottom of the electric heating wire
图 1. 电加热丝底部排放实景图

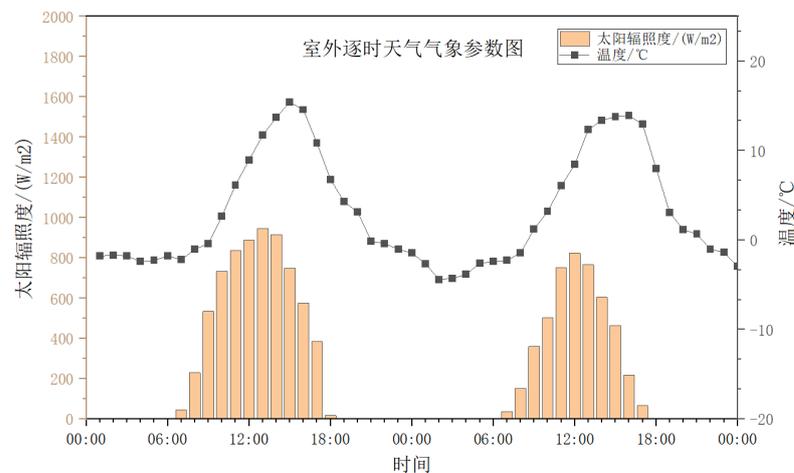


Figure 2. Outdoor hourly weather and meteorological parameters from February 8 to February 9
图 2. 2月8日~2月9日室外逐时天气气象参数图

实验时间为2月8日~2月9日，具体气温及太阳辐射度状况如图2，2月8日当天最高太阳辐射度为

947 W/m²，一天的太阳总辐照量为 23.5 MJ/m²，最高平均温度 15℃，最低温度为-4.2℃，2月9号天气当天最高太阳辐照度为 824 W/m²，一天的太阳总辐照量为 24 MJ/m²，最高温度 13℃，最低温度为-2.9℃。

实验过程中，温度测量采用 T 型热电偶，精度为±0.5℃，数据采集仪为 Agilent 34972A，采集间隔为 1 分钟。为减少环境因素(如风速突变)对实验结果的影响，实验在室内可控环境中进行。所有实验工况均重复三次，取平均值以减小随机误差。

3. 顶部用保温封闭工况分析

本节的墙体保温状态为如图 3，将 500 mm 长的保温棉分别贴在墙体的上表面和两个端面，在底部放置 550 mm 的泡沫板在底部已达到近乎绝热的效果，只让热量通过两侧的墙面与室内进行换热。



Figure 3. Real view of the heat storage wall sealed with thermal insulation at the top
图 3. 顶部用保温封堵的蓄热墙体实景图

3.1. 光伏发电、蓄电与用电

(1) 负载光伏电压

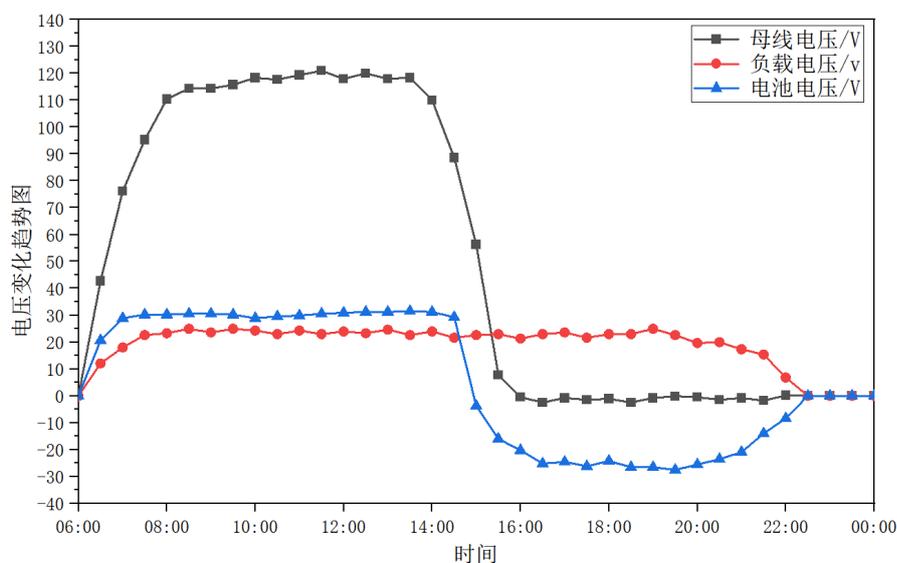


Figure 4. Voltage change trend chart
图 4. 电压变化趋势图

如图 4 所示, 为母线电压、负载电压、电池电压变化趋势图。整体来看, 该图表反映了一天內母线电压、负载电压和电池电压的变化情况。母线电压的波动幅度最大, 负载电压相对较为稳定, 电池电压在后期出现了负电压的情况。

(2) 负载与蓄电池充放电功率

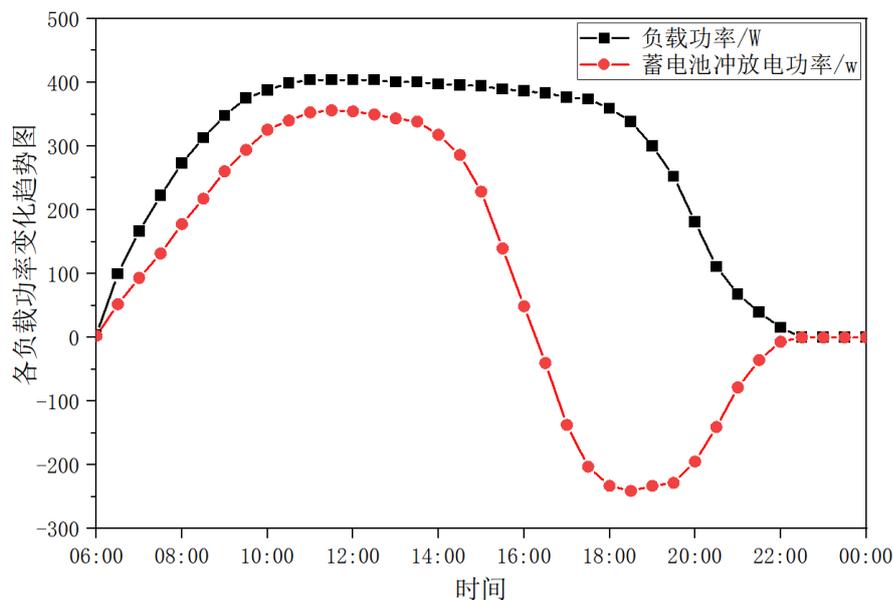


Figure 5. Trend chart of power change by load
图 5. 各负载功率变化趋势图

由上图 5 可以看出负载功率: 从早上 6:00 开始, 负载功率逐渐上升, 在大约 10:00 到 11:00 之间达到峰值, 约 400 W 左右, 并在中午 11:00 到下午 16:00 左右保持相对稳定的高功率状态, 由于太阳辐射强度下降, 负载由电加热丝开始供电, 随后从下午 16:00 开始逐渐下降, 由于蓄电池放电结束, 负载断电。由于到晚上 22:00 之后下降速度加快, 至 11:00 接近 0 W。

蓄电池冲放电功率: 从早上 6:00 开始, 太阳出来, 蓄电池开始进行充电模式, 功率逐渐上升, 在大约 11:00 到 12:00 之间达到峰值, 约 350 W 左右。然后开始下降, 由于太阳辐射度下降, 到下午 16:00 之后, 功率变为负值, 蓄电池开始进入放电模式, 在 18:00 到 19:00 左右达到最低点, 约 -270 W 左右, 说明此时蓄电池处于放电状态。之后放电功率绝对值逐渐减小, 到凌晨 22:00 左右接近 0 W。累积光伏发电量 3525 Wh, 光伏发电效率 11.3%, 电加热丝电热热量 3394.58 Wh, 电损 3.7%, 蓄电池充放电电量 1825.3 Wh。

3.2. 墙体内外温度分布及热量变化

(1) 墙体内外温度分布

由温度分布图 6 可看出, 6:30 左右太阳辐射度逐渐增强, 随着分布式光伏蓄热系统的启动, 各位置温度都出现了变化, 首先, 电加热丝温度变化 6:30~10:10 时间内由 9℃ 急剧升高到 10:00 左右达到最高温度 75.3℃, 温度升高速率约为 18.2℃/h, 在 10:10~14:40 左右温度开始急剧下降, 这是由于蓄电池电压不足, 太阳能控制器处于待机状态, 负载断电导致。

墙温度变化: 由于电热的温度上升, 通过热辐射热传导给墙体加热, 导致内墙温度上升, 但温度上升速率没有电加热丝的大, 从 6:30~12:20 温度由 6.3℃ 上升到 51.2℃, 上升速率为 7.7℃/h。外墙表面的

温度变化: 在 6:30~14:00 的时间内温度从 3.5℃ 升到 35.6℃, 上升速率为 4.1℃/h。16:00 以后墙体没有任何能量来源, 处于放热阶段, 温度开始逐步下降, 放热时段分为两个时段在放热时段 1 (前半夜 16:00~24:00), 由 35℃ 降到 13.5℃, 下降速率为 2.7℃/h, 为主要放热阶段; 在放热时段 2 (后半夜 24:00~次日 6:00), 由 13.5℃ 降到 6.7℃, 下降速率为 1.1℃/h, 下降至室内温度。

室内温度变化: 总体来看室内温度一直维持在 10℃~24℃ 左右的范围内, 在 6:00~13:30 时间内温度持续上升, 在 13:30 左右温度达到了最高值 24.2℃, 温度上升速率为 2.29℃/h。在 13:30 往后的时间段温度呈现缓慢下降趋势, 到 6:00 左右下降至 6℃。

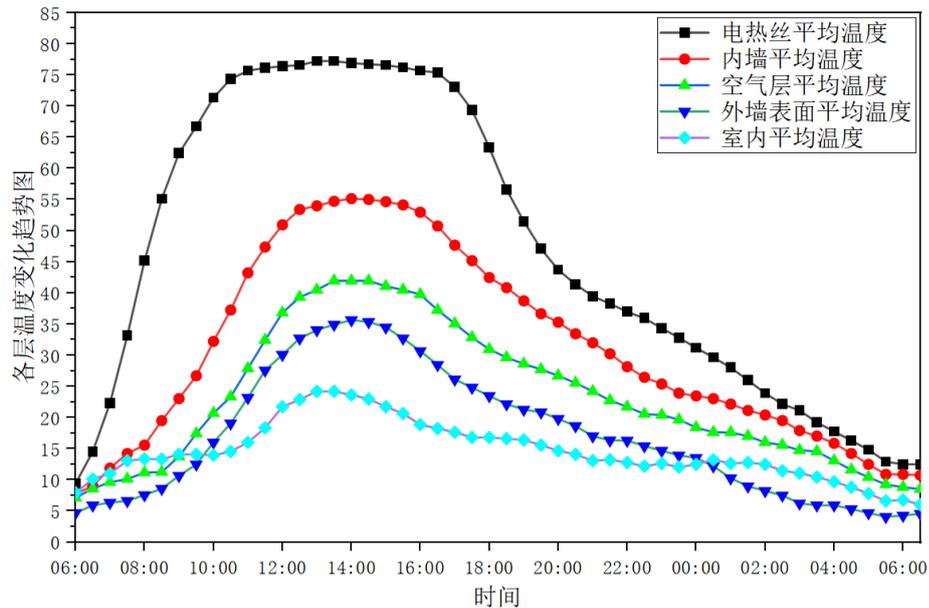


Figure 6. Trend of temperature change in each layer

图 6. 各层温度变化趋势图

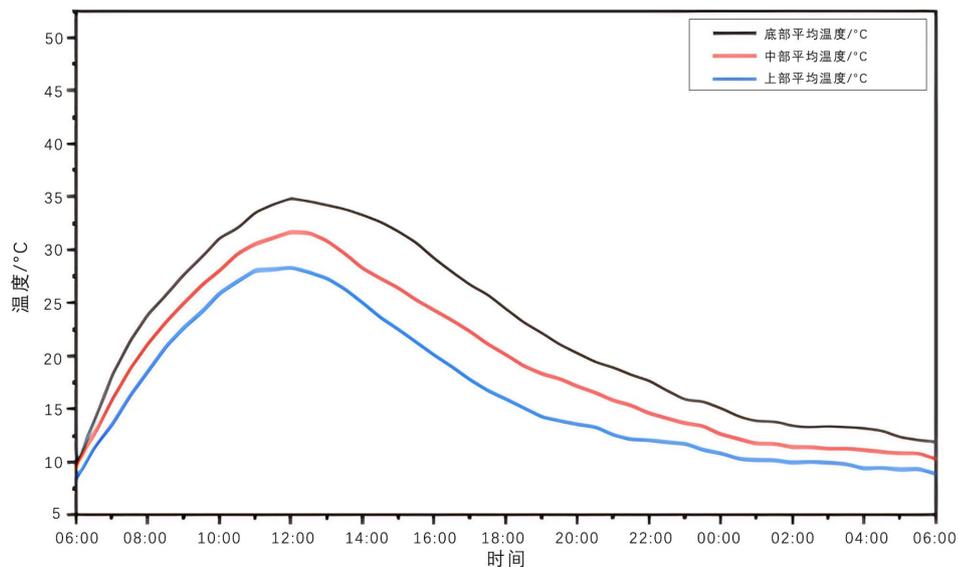


Figure 7. Vertical temperature distribution of the outer surface of the wall

图 7. 墙体外表面竖直温度分布图

图 7 展示了墙体纵向不同时刻的温度分布图，由此图可以看到在白天蓄热阶段 6:00~18:00，墙体的温度分布较为均匀，在 12:30 左右墙顶部与底部温差仅达到 7℃。温度分布为底部平均温度高于中部平均温度高于上部平均温度，这是由于电加热丝在底部排放，热量先通过电加热丝给底部墙体加热依次再向上传递。

(2) 墙体的逐时热量变化图

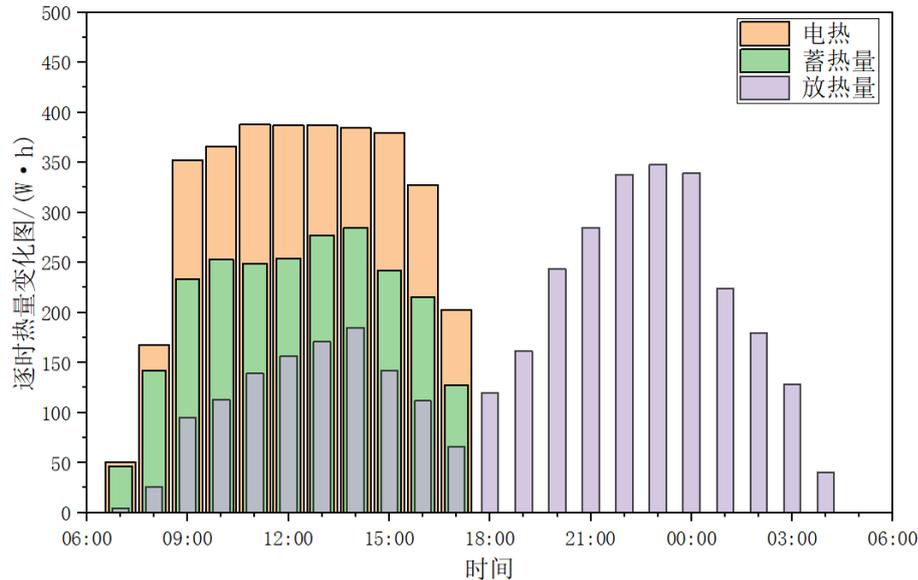


Figure 8. Hourly heat change graph
图 8. 逐时热量变化图

图 8 为逐时热量变化图，展示了不同时段电热(橙色)、蓄热量(绿色)及放热量(紫色)的变化情况纵轴单位为 Wh，横轴为时间(06:00~次日 06:00)。

在 06:00~17:00 蓄热时段，在 12 小时内，电加热丝产生的电热在 9:00~16:00 时刻稳定产生电热，系统刚开始时太阳辐照度较小，导致光伏电压过低，系统产生的热量大部分被墙体吸收，在 9:00 左右系统处于稳定状态，持续开始蓄热，同时墙体温度上升，放热量开始逐渐上升，在 13:00 左右系统放热量达到最高，这是由于墙体温度升高，换热温差增大所致。这一过程产生总电热 3349.57 Wh，蓄热量为 1731.23 Wh，蓄热率为 51%，白天散热量为 1731.23 Wh，占总热量的 49%。

进入 17:00~次日 06:00 放热时段，系统处于放热阶段，向外界释放墙体储存的热量。将放热时段分为两个时段进行分析，在放热时段 1 (前半夜 16:00~24:00)系统的放热量为 1250.12 Wh，占有有效蓄热的 72.21%，为主要放热阶段；在放热时段 2 (后半夜 24:00~次日 6:00)，放热量为 481.11 Wh，占据有效蓄热量的 27.79%，为次要放热阶段，且由于后半夜室内外温差加大导致蓄热墙体的放热速率加快，在大概凌晨 4:00 左右结束放热。

该墙体蓄热过程，全天光伏板实际光伏发电 3525 Wh，光电转换率达 11.3%，转换为电热部分达 3394.57 Wh，电热转换率为 96.3%，电热部分其中电损失达 130.42 Wh，系统的整体能源效率为 10.88%。单位面积蓄热量为 727.41 Wh/m²，单位体积蓄热量为 6612.81 Wh/m³。

(3) 墙体散热量变化

图 9 为电加热丝横向底部排放带保温层的墙体换热系数变化图，由图可以看出在 13:00 时刻墙体的换热系数达到最大值 6.45 W/(m²·K)，相比于电加热丝竖直纵向排放带保温层小了很多，这是由于在电加

热丝加热过程不与空气直接接触，电加热丝热量先传递给墙体，再通过墙体传递给室内，使其墙体温度分布较均匀，导致其换热系数明显变小，换热系数在 $3.5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})\sim 6.45 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 范围内波动，保温效果明显得到提升。

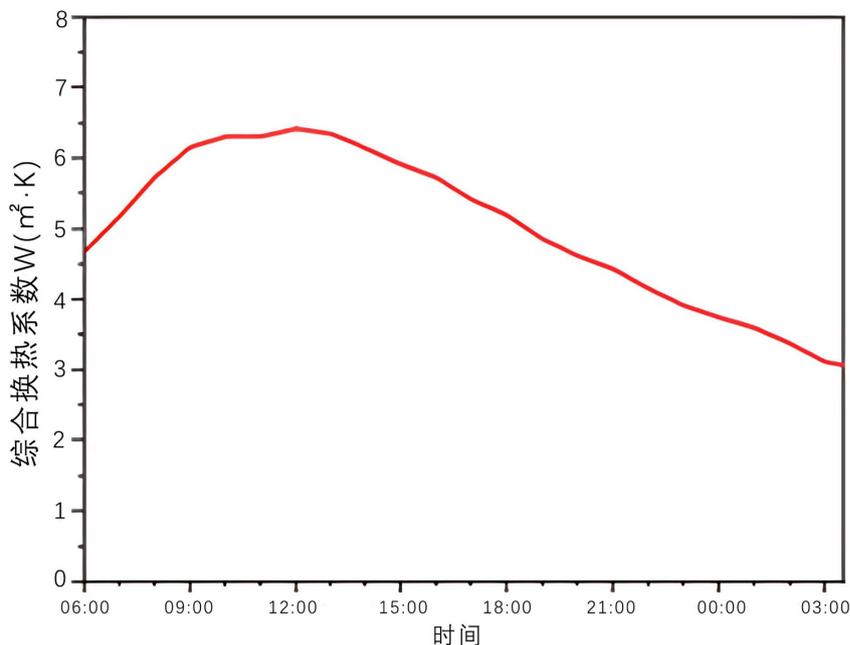


Figure 9. Change of heat transfer coefficient of wall discharge with insulation layer discharged at the bottom of the electric heating wire

图 9. 电加热丝横向底部排放带保温层的墙体换热系数变化图

4. 顶部开孔工况分析

本节的墙体不带保温状态为将图 3 墙体的上侧保温层去掉，使墙体孔洞内的空气层与室内直接接触，增强墙体与室内环境的换热强度。

4.1. 光伏发电、蓄电与用电

(1) 负载光伏电压

如图 10 为在该环境下反映了一天内母线电压、负载电压和电池电压的变化情况，从图中可以看出，母线电压：从早上 6:00 开始迅速上升，在大约 6:00~8:20 之间上升趋势非常迅速，随后在 8:00~14:10 左右总体保持在 $110 \text{ V}\sim 115 \text{ V}$ 的相对稳定状态，但在 10:15~10:30 左右突然下降到 87 V ，在 11:45~12:00 左右下降到 93 V ，这是由与太阳被云遮挡导致，但可以观察到负载电压保持稳定状态，这是由于太阳能控制和蓄电池的稳压作用。之后开始快速下降，到 16:00 太阳辐照度变弱，电压降至约 0 V ；负载电压：从早上 6:00 开始上升，在大约 6:00~7:00 之间上升到约 24 V 左右，随后在 7:00~14:00 左右母线电压虽有波动但保持相对稳定，波动较小。20:30 时降至接近 0 V ；电池电压：从早上 6:00 随着母线电压的上升，蓄电池开始进入充电状态，6:40 左右电压开始稳定在 30 V 上下，一直到 14:20 左右，随着母线电压的下降，为维持负载电压的稳定，蓄电池开始进入放电状态，放电电压为 35 V 左右，到大概 21:00 左右，蓄电池自放电结束，负载断电。整体来看，该图表母线电压的波动幅度最大，但负载电压相对较为稳定。

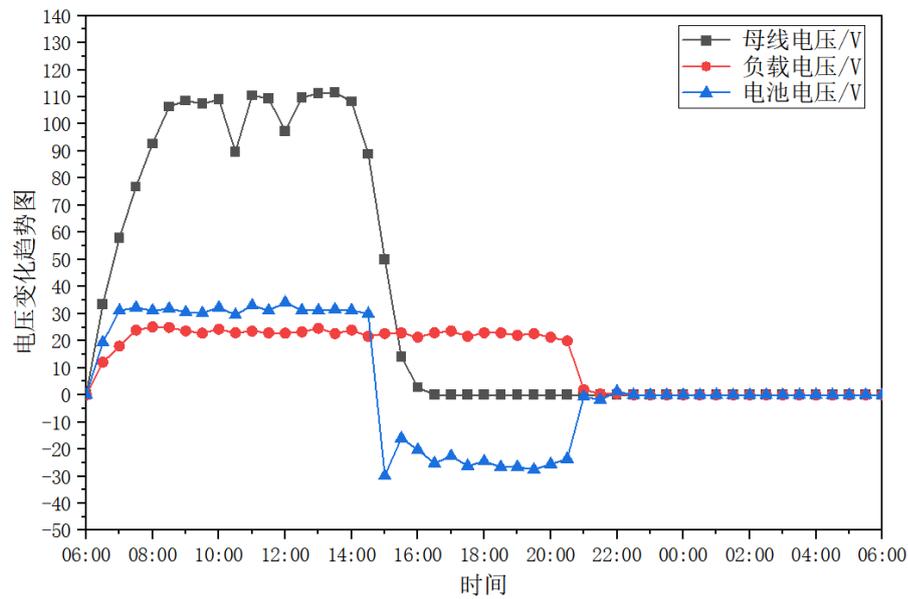


Figure 10. Voltage change trend chart
图 10. 电压变化趋势图

(2) 负载与蓄电池充放电功率

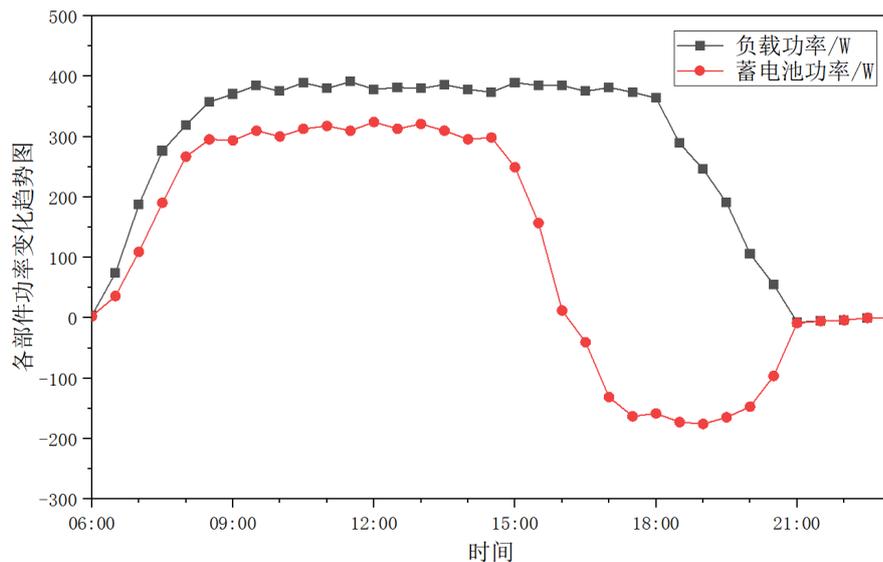


Figure 11. Trend chart of power change by load
图 11. 各负载功率变化趋势图

由上图 11 可以看出负载功率：从早上 6:00 开始，负载功率逐渐上升，在大约 10:00 到 11:00 之间达到峰值，约 400 W 左右，并在中午 11:00 到下午 16:00 左右保持相对稳定的高功率状态，由于太阳辐照强度下降，负载由电加热丝开始供电，随后从下午 16:00 开始逐渐下降，由于蓄电池放电结束，负载断电。由于到晚上 22:00 之后下降速度加快，至 11:00 接近 0 W。

蓄电池充放电功率：从早上 6:00 开始，太阳出来，蓄电池开始进行充电模式，功率逐渐上升，在大约 11:00 到 12:00 之间达到峰值，约 350 W 左右。然后开始下降，由于太阳辐照度下降，到下午 16:00 之

后, 功率变为负值, 蓄电池开始进入放电模式, 在 18:00 到 19:00 左右达到最低, 约-270 W 左右, 说明此时蓄电池处于放电状态。之后放电功率绝对值逐渐减小, 到 9:00 左右接近 0 W。光伏发电量达 3635 Wh, 光电转换率为 10.88%, 累积电热量为 6612.81 Wh, 电热转换率为 97.6%, 蓄电池充放电量 1550 Wh。

4.2. 墙体内外温度分布及热量变化

(1) 墙体内外温度分布

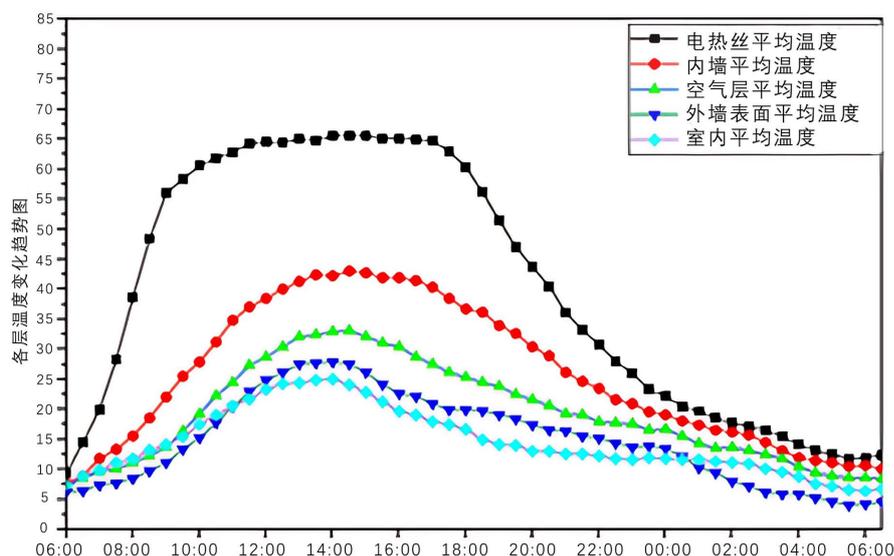


Figure 12. Trend of temperature change in each layer

图 12. 各层温度变化趋势图

由上温度分布图 12 可看出, 6:30 左右太阳辐照度逐渐增强, 随着分布式光伏蓄热系统的启动, 各位置温度都出现了变化, 首先, 电加热丝温度变化 6:30~10:10 时间内由 9°C 急剧升高到 10:00 左右达到最高温度 65.3°C, 温度升高速率约为 18.2°C/h, 在 10:10~14:40 左右温度开始急剧下降, 这是由于蓄电池电压不足, 太阳能控制器处于待机状态, 负载断电导致。

墙温度变化: 由于电热的温度上升, 通过热辐射热传导给墙体加热, 导致内墙温度上升, 但温度上升速率没有电加热丝的大, 从 6:30~12:20 温度由 6.3°C 上升到 42.3°C, 上升速率为 7.7°C/h。外墙表面的温度变化: 在 6:30~14:00 的时间内温度从 3.5°C 升到 26.3°C, 上升速率为 4.1°C/h。16:00 以后墙体没有任何能量来源, 处于放热阶段, 温度开始逐步下降, 放热时段分为两个时段在放热时段 1 (前半夜 16:00~24:00), 由 35°C 降到 13.5°C, 下降速率为 2.7°C/h, 为主要放热阶段; 在放热时段 2 (后半夜 24:00~次日 6:00), 由 13.5°C 降到 6.7°C, 下降速率为 1.1°C/h, 下降至室内温度。

室内温度变化: 总体来看室内温度一直维持在 10°C~24°C 左右的范围内, 在 6:00~13:30 时间内温度持续上升, 在 13:30 左右温度达到了最高值 24.2°C, 温度上升速率为 2.29°C/h。在 13:30 往后的时间段温度呈现缓慢下降趋势, 到 6:00 左右下降至 6°C。

(2) 墙体的逐时热量变化图

图由墙体逐时热量变化图 13 可以看出, 在 06:00~17:00 时段, 此阶段的放热量放热状态较为稳定, 只有小幅度的波动, 总电热量为 3547.76 Wh, 蓄热量 1537.24 Wh, 蓄热率为 43.33%, 散热量为 2010.52 Wh, 占总电热的 56.67%, 此阶段由于墙体没有保温层覆盖, 处于开口状态, 散热占据主导优势。进入 18:00~次日 06:00 放热时段, 系统处于放热阶段, 由于墙体顶部没有覆盖保温层, 墙体与房间的换热迅速,

24:00 放热结束，放热时间仅为 6 h，放出热量为 1537.24 Wh。

全天光伏板实际光伏发电达 3635 Wh，光伏能量转换率达 10%，转换为电热部分达 3547.6 Wh，电热转换率为 97.6%，其中电损失达 99.5 Wh，系统的整体能源效率为 10%。单位面积蓄热量为 645.8 Wh/m²，单位体积需热量为 5871.83 Wh/m³。

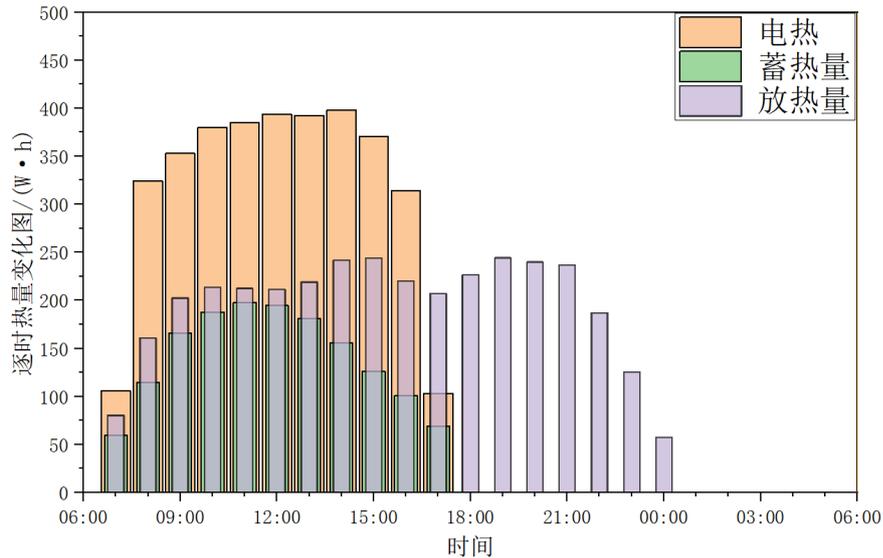


Figure 13. Hourly heat change graph

图 13. 逐时热量变化图

(3) 墙体散热量变化

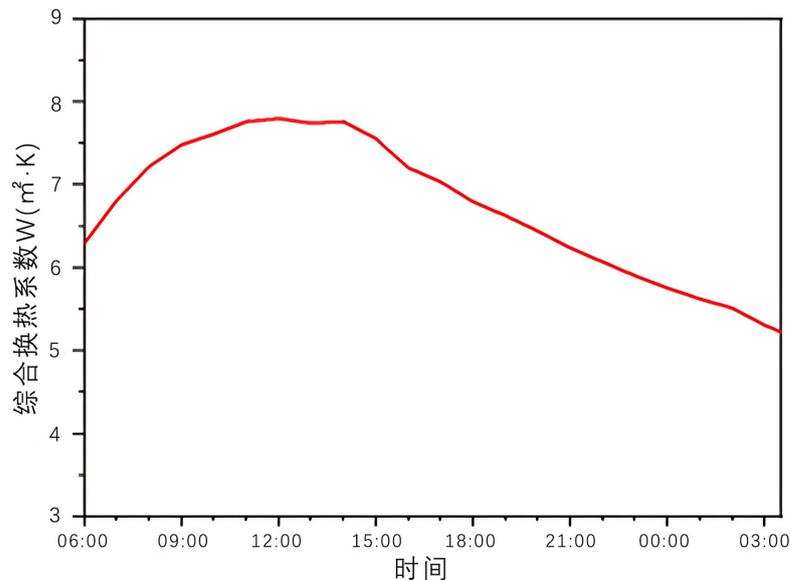


Figure 14. Change of heat transfer coefficient of the wall discharged without insulation layer at the bottom of the transverse bottom of the electric heating wire

图 14. 电加热丝横向底部排放不带保温层的墙体换热系数变化图

图 14 为电加热丝横向底部排放带保温层的墙体换热系数变化图，由图可以看出在 15:00 时刻墙体的

换热系数达到最大值 $7.85 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，相比于电加热丝竖直纵向排放不带保温层小的多，这是由于在电加热丝加热过程不与空气直接接触，电加热丝热量先传递给墙体，再通过墙体传递给室内，导致其换热系数明显变小，换热系数在 $5.35 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})\sim 7.85 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 范围内波动，波动较大，这是由于墙体不带保温层，使其与室内的换热接触面积变大，换热增强，受外界温度影响明显。

5. 结论

本文首先对光伏供暖系统以及光储直柔系统的发展进行了详细的介绍，对现存的问题进行思考，设计了一种光伏墙体蓄热系统。随后对系统的部件匹配、功能、设计思路进行了详细的阐述。然后搭建了光伏墙体蓄热系统，对这些系统的温度状况，蓄热性能以及综合换热系数进行评价。得出了以下结论：

1) 带蓄电池的分布式光伏墙体蓄热实验，砖孔竖向布置，各层对齐相通，研究了电加热丝底部水平横向排放，在顶部用保温层封闭砖孔和顶部开孔工况两种工况的发电、蓄热、散热性能，得出以下结果：

① 顶部保温封堵工况：系统的光伏发电量为 3525 Wh ，光电转换率为 11.3% ，墙体的总蓄热量达 1731.23 Wh ，蓄热率为 51% ，单位面积蓄热量为 $727.41 \text{ Wh}/\text{m}^2$ ，单位体积蓄热量为 $6612.81 \text{ Wh}/\text{m}^3$ ，墙体的内部平均温度峰值达到 51.2°C ，表面平均温度峰值达到 26.3°C ，换热系数在 $3.5\sim 6.45 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

② 顶部无保温开孔工况：系统的光伏发电量为 3635 Wh ，光电转换率为 10.25% ，墙体的总蓄热量达 1537.24 Wh ，蓄热率为 43.3% ，单位面积蓄热量为 $645.9 \text{ Wh}/\text{m}^2$ ，单位体积蓄热量为 $5871.83 \text{ Wh}/\text{m}^3$ ，墙体的内部平均温度峰值达到 42.3°C ，表面平均温度峰值达到 26.3°C ，换热系数在 $5.35\sim 7.85 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

2) 对光伏组件的电热特性与加热电阻的关系进行研究：

当电阻不变时，随着时间及相应的太阳辐照度的变化，光伏电压和发电功率均呈现出先上升、平稳、下降的三段式趋势。在太阳辐照度处于 $600\sim 1200 \text{ W}/\text{m}^2$ ，各电阻对应的电压和发电功率均趋于平稳，而且不同电阻对应的电压相差不大，而此段时间内电阻越小的阻值其发电功率越大。在相同太阳辐照度下，存在一个最佳电阻，此时发电功率最大；低于该最佳电阻时，随电阻的增大，发电功率增大；高于该最佳电阻时，随电阻的增大，发电功率减小。随着太阳辐照度的增大，发电功率也越大，最大功率点对应的最佳电阻值越小。因此要获得最大的发电量，需要根据太阳辐照度的变化，随时调整电阻的值。

3) 运行工况(顶部用保温层封闭和顶部开孔工况)性能差异：

顶部用保温层封闭：白天温度在 20°C 以上维持 8 小时左右，夜间放热时间最长达 10 小时左右。累积蓄热量达 $995.61 \text{ Wh}\sim 1731.23 \text{ Wh}$ ，单位面积蓄热量为 $418.32 \text{ Wh}/\text{m}^2\sim 727.4 \text{ Wh}/\text{m}^2$ ，单位体积蓄热量为 $3802.97 \text{ Wh}/\text{m}^3\sim 6612.81 \text{ Wh}/\text{m}^3$ ，蓄热率为 $30.25\%\sim 51.3\%$ ，显著提升夜间供暖能力，表明蓄热墙体对热量的保持能力较强，

顶部开孔工况：室内高温(20°C 以上)仅维持 4 h ，白天室内的温度明显比顶部用保温层的高，有 3 h 温度维持在 25°C 以上，夜间放热时间缩短至 4.5 h 。累积蓄热量达 $840.45 \text{ Wh}\sim 1537.24 \text{ Wh}$ ，单位面积蓄热量为 $352.13 \text{ Wh}/\text{m}^2\sim 645.9 \text{ Wh}/\text{m}^2$ ，单位体积蓄热量为 $3210.29 \text{ Wh}/\text{m}^3\sim 5871.83 \text{ Wh}/\text{m}^3$ ，蓄热率为 $28.3\%\sim 43.3\%$ ，墙体的蓄热性能明显下降，但在白天蓄热阶段其的室内温度比顶部用保温层的高。此模式只适用于房间温度较低，需要快速加热的情形。

由上可知，电加热丝底部排布且带保温层的工况在蓄热性能、与房间热交换方面表现更优，更利于分布式光伏墙体蓄热系统的高效运行。

本文实验虽在严格控制环境下进行，但仍存在一定局限性：1) 实验样本数量有限，后续可扩大实验规模，增加不同蓄热材料(如相变材料)的对比实验；2) 温度测量虽采用高精度传感器，但仍需进一步分析位置布置对结果的影响；3) 未来可研究不同控制策略对系统性能的优化效果。

参考文献

- [1] Hu, S., Zhang, Y., Yang, Z., Yan, D. and Jiang, Y. (2022) Challenges and Opportunities for Carbon Neutrality in China's Building Sector—Modelling and Data. *Building Simulation*, **15**, 1899-1921. <https://doi.org/10.1007/s12273-022-0912-1>
- [2] UNEP (2024) Global Status Report for Buildings and Construction. <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction>
- [3] Razmjoo, A., Gakenia Kaigutha, L., Vaziri Rad, M.A., Marzband, M., Davarpanah, A. and Denai, M. (2021) A Technical Analysis Investigating Energy Sustainability Utilizing Reliable Renewable Energy Sources to Reduce CO₂ Emissions in a High Potential Area. *Renewable Energy*, **164**, 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.042>
- [4] IEA (2019) Solar Energy: Mapping the Road Ahead. <https://www.iea.org/reports/solar-energy-mapping-the-road-ahead>
- [5] Farghaly, Y. and Hassan, F. (2019) A Simulated Study of Building Integrated Photovoltaics (BIPV) as an Approach for Energy Retrofit in Buildings. *Energies*, **12**, Article No. 3946. <https://doi.org/10.3390/en12203946>
- [6] Zhang, W., Gong, T., Ma, S., Zhou, J. and Zhao, Y. (2021) Study on the Influence of Mounting Dimensions of PV Array on Module Temperature in Open-Joint Photovoltaic Ventilated Double-Skin Façades. *Sustainability*, **13**, Article No. 5027. <https://doi.org/10.3390/su13095027>
- [7] 薛剑琦. 电化学储能发电侧的应用[J]. 现代盐化工, 2024, 51(2): 27-29.
- [8] 姚宗林. 光电建筑配置电化学储能的应用分析[J]. 节能, 2024, 43(12): 12-14.
- [9] Zou, B., Peng, J., Li, S., Li, Y., Yan, J. and Yang, H. (2022) Comparative Study of the Dynamic Programming-Based and Rule-Based Operation Strategies for Grid-Connected PV-Battery Systems of Office Buildings. *Applied Energy*, **305**, Article ID: 117875. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117875>
- [10] 贺存祥, 郝学军, 张梦. 集装箱房 PV/T 双源热泵供暖系统性能实测研究[J]. 煤气与热力, 2024, 44(11): 20-26.
- [11] González-Peña, D., Alonso-deMiguel, I., Diez-Mediavilla, M. and Alonso-Tristán, C. (2020) Experimental Analysis of a Novel PV/T Panel with PCM and Heat Pipes. *Sustainability*, **12**, Article No. 1710. <https://doi.org/10.3390/su12051710>
- [12] Zhong, Y.H., Zhang, W.J., Zhang, J.J. and Zhou, J.W. (2020) Research on a New Type of Solar Photovoltaic Solar Thermal Integrated Louver Curtain Wall. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **566**, Article ID: 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/566/1/012003>
- [13] Parameshwaran, R., Kalaiselvam, S., Harikrishnan, S. and Elayaperumal, A. (2012) Sustainable Thermal Energy Storage Technologies for Buildings: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 2394-2433. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.058>
- [14] Aftab, W., Usman, A., Shi, J., Yuan, K., Qin, M. and Zou, R. (2021) Phase Change Material-Integrated Latent Heat Storage Systems for Sustainable Energy Solutions. *Energy & Environmental Science*, **14**, 4268-4291. <https://doi.org/10.1039/d1ee00527h>
- [15] Aydin, D., Casey, S.P. and Riffat, S. (2015) The Latest Advancements on Thermochemical Heat Storage Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **41**, 356-367. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.054>
- [16] Navakrishnan, S., Vengadesan, E., Senthil, R. and Dhanalakshmi, S. (2021) An Experimental Study on Simultaneous Electricity and Heat Production from Solar PV with Thermal Energy Storage. *Energy Conversion and Management*, **245**, Article ID: 114614. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114614>