

文章编号: 1671-6612 (2025) 05-652-08

新型建筑集成光伏/热墙体性能研究

卜素贝 苏 华

(西华大学 成都 610039)

【摘 要】 建筑集成光伏/热 (BIPV/T) 技术为建筑围护结构提供了一种有前景的方法, 可以提高美观性和能源可持续性。传统的 BIPV/T 系统采用开式冷却水循环系统运行, 依赖泵进行循环, 限制了灵活性。提出了一种新型的基于闭式冷却水循环的 BIPV/T 系统, 并开发了该系统的瞬态模型。以成都为例, 探索设计参数 (包括水层厚度、管径和给水流量) 对该 BIPV/T 系统的影响。经过模拟分析, 确定该系统的最佳水厚为 8mm, 给水流量为 5kg/h, 管径为 2cm。研究表明新型 BIPV/T 系统在适当环境中提高能源效率的巨大潜力。

【关键词】 建筑集成光伏; 建筑围护结构; 热电联产

中图分类号 TU83 文献标志码 A

Research on the Performance of Novel Building Integrated Photovoltaic/Thermal Wall

Bu Subei Su Hua

(Xihua University, Chengdu, 610039)

【Abstract】 Building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) technologies offer a promising approach for building envelopes to enhance aesthetic appeal and energy sustainability. Traditional BIPV/T systems operate with open-loop cooling water systems relying on pumps for circulation, which limits flexibility. This study proposed a novel circulating-based BIPV/T system, with closed-loop cooling water systems, and a transient model was developed. This model was implemented in Chengdu to explore the impact of design parameters (including water layer thickness, pipe diameter and flow rate of feedwater) on the system. After parameter analysis, the optimal water thickness of 8 mm, feedwater flow rate of 5 kg/h, and pipe diameter of 2 cm were identified. This study highlights the promising potential for the novel BIPV/T systems to enhance energy efficiency in suitable environments.

【Keywords】 Building-integrated photovoltaic; Building envelope; Combined heat and power

0 引言

随着城市化的快速发展, 建筑数量的增加导致了更高的能源需求。建筑运营的能源, 包括供暖、制冷、照明和其他用途, 主要来自释放温室气体的化石燃料, 加剧了全球变暖的趋势。在全球范围内, 建筑占社会能源使用的 34%和碳排放的 37%^[1]。面对碳中和的紧迫任务, 建筑的可再生能源整合变得越来越重要。建筑集成光伏 (BIPV) 技术将太阳能电池板无缝集成到建筑围护结构中, 具有发电和

实现结构或隔热功能的双重目的^[2]。在过去的几十年里, 由于全球对可持续和节能建筑的推动, 建筑集成光伏技术, 特别是 BIPV 建筑围护结构, 得到了越来越多的应用。

主流的 BIPV 建筑围护结构包括半透明的建筑集成光伏窗户、建筑集成光伏墙壁和建筑集成光伏屋顶^[3-5]。这些技术的战略设计和优化利用可以有效地解决建筑的一部分能耗问题。Sabrina 等人^[6]研究表明, 建筑集成光伏双层外墙可以有效降低建

筑暖通空调能耗的15%~30%。Alrashidi等人^[7]研究发现,在建筑立面上安装集成碲化镉太阳能电池可以实现约20%的建筑节能。与传统的建筑围护结构相比,BIPV建筑围护结构节能18%~59%^[8]。另一方面,光伏组件作为太阳能集热器工作,对于传统的太阳能电池,只有10%~20%的太阳辐射可以转化为电能,其他太阳辐射会转化为热量^[9]。因此,对建筑集成光伏系统进行热调节是必要的,这不仅可以提高发电效率,还可以避免光伏组件向室内环境的二次热传递^[10]。

建筑集成光伏系统的主流热管理包括空气冷却、水冷却和相变材料(PCM)冷却^[11]。PCM是BIPV建筑围护结构的被动热调节策略,显示出较高的热调节性能,并且不需要大量的体积^[12]。然而,PCM面临封装问题^[13],并且它们不能有针对性地利用收集到的热量。非晶硅双层通风光伏窗(PV-DSF)是BIPV外墙使用最广泛的空气冷却方法,它利用沿PV-DSF高度方向产生的热压,有效地在双层外墙之间的空腔内诱导自然通风,增加气流速度,从而增强对流传热^[9]。然而,由于空气没有很强的热交换能力,PV-DSF自然通风通常不能产生高于 $30\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 的对流传热系数^[14]。添加通风装置,如风扇,可以增强对流传热,但是会增加系统的复杂性和成本。水的热交换能力比空气高得多,此外,热水可以收集起来用于生活用水。一般来说,温度高于 40°C 的热水可用作生活清洁用水, $20\sim 40^\circ\text{C}$ 的热水可用于预热^[15]。因此,使用水带走光伏组件热量的建筑集成光伏/热(BIPV/T)系统得到了广泛的发展。BIPV/T水冷技术需要大容量的储水装置或水泵来循环冷却水^[16],这导致了复杂的系统成本和运营维护困难。

在上述BIPV建筑围护结构的三种热调节策略中,水冷却收集太阳能最有效,能够实现热电联产。此外,建筑围护结构中的水可以有效地增强建筑的隔热和隔音性能。然而,在水冷建筑集成光伏系统中,由于其固有的复杂性,对循环泵的需求大大降低了系统的灵活性。因此,开发用于BIPV建筑围护结构的被动式水循环系统十分必要。S Chen等人^[17]已经证明,水温变化会引起密度变化,从而有效地推动水的自然循环。因此,具有循环回路的充满水的窗已被开发用于太阳能热能收集。

理论上,光伏板在整个太阳光谱上具有高吸收

率,可以高动力触发水的自然循环。然而,这种被动水循环在BIPV水冷却系统的应用还没有得到很好的发展。为了有效地从太阳辐射中收集能量,本文提出了一种具有闭环水回路的新颖热电联产建筑集成光伏/热系统,根据热水和冷水的密度差循环水回路,并开发了一个瞬态模型来探索其能量收集性能。进而基于成都的小时气象数据,研究不同参数对系统性能的影响,进而确定最佳系统设计参数。

1 系统描述

图1显示了热电联产建筑集成光伏/热系统,该系统由四层和循环回路组成。图中展示了四层结构的示意图,其中第一层是透明玻璃,对整个太阳光谱($0.3\sim 2.5\mu\text{m}$)高度透明;第二层是一个流动的水层,用于收集光伏层产生的热能;第三层是光伏(PV)层;第四层为砖墙,其中PV模块无缝地附着在砖层上。在墙的顶部和底部有两根水管,连接流动的水层。当墙壁收集太阳能时,它会将热能传递到水层,然后水的温度升高导致水密度降低,从而促使热水上浮。水回路顶部的热交换器主要用生活用水冷却水回路内的水,最终导致生活用水温度升高,回路中的水温度降低。因此,冷却水在右侧管道内流动,其密度高于左侧的热水。墙壁中的水层和管道中的水之间的密度差可以产生自然循环,从而不断地从水层收集热量。PV模块一部分用于太阳能发电,将太阳能转化为电能,一部分用于加热前面的水。

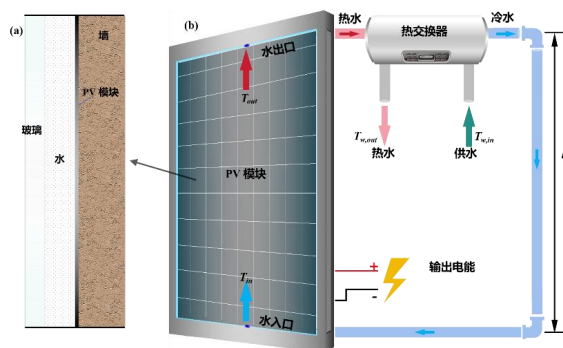


图1 建筑集成光伏/热系统示意图

Fig.1 Schematic illustration of the BIPV/T system

2 模型开发

为了研究建筑集成光伏/热系统的特性,本文

开发了一个瞬态模型,图2描述了模型中的能量平衡。该模型考虑了以下假设:

(1) 晴天,假定太阳辐射的光谱功率分布 (SPD) 与总太阳辐射成正比,是太阳高度角的函数;

(2) 由于水和光伏材料的指标没有显著差异,因此忽略了水层和光伏板之间的界面反射率;

(3) 忽略阴影的影响;

(4) 忽略玻璃在垂直面上的温差;

(5) 假定漫射太阳辐射的入射角是各向同性。

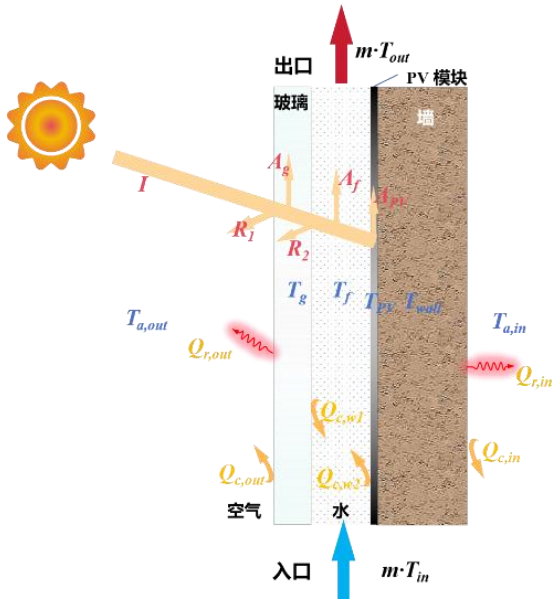


图2 瞬态模型中的能量平衡

Fig.2 Energy balance considered in the transient model

2.1 光学模型

(1) 太阳辐射

太阳辐射照度 $I(\lambda)$ 由式 (1) 计算。

$$I(\lambda) = \Phi(\lambda) \cdot T_R(\lambda) \cdot T_O(\lambda) \cdot T_N(\lambda) \cdot T_G(\lambda) \cdot T_W(\lambda) \cdot T_A(\lambda) \quad (1)$$

式中: $\Phi(\lambda)$ 为大气外的太阳辐射光谱, $W/(m^2 \cdot nm)$; T_R 、 T_O 、 T_N 、 T_G 、 T_W 和 T_A 分别为瑞利散射、 O_2 吸收、 N_2 吸收、稀有气体、水蒸气吸收和气溶胶消光的光谱透射率。

对于南立面,直射太阳辐射的入射角通过式 (2) 计算。

$$\theta = \arccos[\cos(A_s) \cdot \cos(h_s)] \quad (2)$$

式中: θ 为入射角; A_s 和 h_s 为太阳方位角和高度角。

(2) 吸光度和反射率

当光束入射到具有不同折射率的两个表面上时,界面反射率通过式 (3) 计算。

$$\rho(\theta) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{n_1 \cos(\theta_1) - n_2 \cos(\theta_2)}{n_1 \cos(\theta_1) + n_2 \cos(\theta_2)} \right)^2 + \left(\frac{n_1 \cos(\theta_2) - n_2 \cos(\theta_1)}{n_1 \cos(\theta_2) + n_2 \cos(\theta_1)} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中: n_1 和 n_2 为两种不同介质的折射率; θ_1 和 θ_2 为不同界面处光束与法线之间的角度,通过式 (4) 计算。

$$\theta_2 = \arcsin \left[\frac{n_1}{n_2} \sin(\theta_1) \right] \quad (4)$$

假设 A_g 为零,模型中透明玻璃 R_1 和 R_2 的反射率通过式 (5) 和式 (6) 计算。

$$R_1(\theta) = \rho_1(\theta) \quad (5)$$

$$R_2(\theta) = \rho_2(\theta) + \rho_2(\theta) \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \rho_1^i(\theta) \cdot \rho_2^i(\theta) = \rho_2(\theta) + \frac{\rho_2(\theta) \cdot \rho_2^2(\theta)}{1 - \rho_1(\theta) \cdot \rho_2(\theta)} \quad (6)$$

到达腔内流动水的太阳辐射通过式 (7) 计算。

$$I_f(\theta) = I \cdot (1 - R_1 - R_2) \quad (7)$$

流动水吸收的太阳辐射通过式 (8)、式 (9) 和式 (10) 计算。

$$A_f = a_f \cdot I_f \quad (8)$$

$$a_f = 1 - e^{-k \cdot S} \quad (9)$$

$$S = \frac{d}{\cos(\theta_f)} \quad (10)$$

式中: a_f 为流动水的吸收率; k 为水的吸收系数; S 为光程长度, m ; θ_f 为光束与流体介质中法线的角度。

到达光伏板表面的总太阳辐射通过式 (11) 计算。

$$I_{PV} = A_{PV} = I_f - A_f \quad (11)$$

2.2 电气模型

建筑集成光伏墙的发电量由光伏组件吸收的太阳辐射和太阳能电池的电效率决定,通过式 (12)、式 (13) 和式 (14) 计算。

$$Q_E = \eta \cdot I_{PV} \quad (12)$$

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{I_e} \quad (13)$$

$$I_{sc} = \int_{300}^{2500} \Phi(\lambda, \theta) \cdot A_{PV}(\theta) \cdot EQE_{PV}(\lambda) d\lambda \quad (14)$$

式中: A_{PV} 为光伏组件的太阳能部分; E_{PV} 为光伏电池的量子效率, A/W 。

开路电压 V_{oc} 通过式 (15) 计算。

$$V_{oc} = \frac{n \cdot k_b \cdot T_{PV}}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \cdot [1 - \beta \cdot (T_{PV} - T_{ref})] \quad (15)$$

式中: $n=1.2$, 二极管系数; k_b 为玻尔兹曼常数, J/K; e 为电子电荷; β 为温度系数, 0.0045K^{-1} ; T_{ref} 为光伏电池的参考温度 (25°C); I_0 (A) 通过式 (16) 计算。

$$I_0 = K \cdot T_{PV}^{3/n} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{m \cdot k_b \cdot T_{PV}}\right) \quad (16)$$

式中: m 和 n 为经验常数; E_g 为光伏电池的带隙, eV。

填充系数 FF 可通过式 (17) 计算。

$$FF = \frac{V_m}{V_0} \cdot \left[1 - \frac{\exp\left(\frac{eV_m}{k_b T}\right) - 1}{\exp\left(\frac{eV_{oc}}{k_b T}\right) - 1} \right] \quad (17)$$

$$V_m = k \cdot V_{oc} \quad (18)$$

式中: V_m 为 IV 曲线最大功率点处的电压, V; k 为常数值, 通常在 0.7~0.8 之间。

2.3 热模型

(1) 玻璃的热平衡

$$m_g c_g \frac{dT_g}{dt} = I_{ga1} - \frac{1}{\frac{1}{h_{c,out}} + \frac{\sigma_g}{2\lambda_g}} (T_g - T_{a,out}) - \frac{1}{\frac{1}{h_{c,f}} + \frac{\sigma_g}{2\lambda_g}} (T_g - T_f) - Q_{r,out} \quad (19)$$

$$\frac{1}{\frac{1}{h_{c,f}} + \frac{\sigma_g}{2\lambda_g}} (T_g - T_f) - Q_{r,out}$$

玻璃和空气之间的对流传热系数计算如式 (20) 所示。

$$h_{c,out} = \begin{cases} 2.8 + 3 \cdot v_a, & \text{if } v_a < 5\text{m/s} \\ 6.15 \cdot v_a^{0.8}, & \text{if } v_a > 5\text{m/s} \end{cases} \quad (20)$$

玻璃和水之间的对流传热系数计算如式 (21)、式 (22) 所示。

$$h_{c,f} = \frac{Nu_f \cdot \lambda_f}{\sigma_f} \quad (21)$$

$$Nu_f = 7.54 + \frac{0.03 \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{D}{l}}{1 + 0.016 \cdot (\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{D}{l})^{\frac{2}{3}}} \quad (22)$$

从玻璃到室外环境的辐射热传递计算如式 (23) 所示。

$$Q_{r,out} = \alpha \cdot \varepsilon_g \cdot \delta (T_g^4 - T_{sky}^4) \quad (23)$$

式中: ε_g 为玻璃的发射率, 0.8; δ 为 Stefan

Boltzmann 常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$, α 为辐射传热的角度因子, T_{sky} 为天空温度, 计算公式如式 (24) 所示。

$$T_{sky} = 0.0552 \cdot T_a^{1.5} \quad (24)$$

(2) 腔内流动水的热平衡

$$m_f c_f \frac{dT_f}{dt} = A_f - \frac{1}{\frac{1}{h_{c,f}} + \frac{\sigma_g}{2\lambda_g}} \cdot (T_f - T_g) - \quad (25)$$

$$h_{c,f} \cdot (T_f - T_{PV}) + \dot{m}_f \cdot (T_{in} - T_{out})$$

(3) 光伏板热平衡

$$m_{PV} c_{PV} \frac{dT_{PV}}{dt} = A_{PV} - Q_E - h_{c,f} (T_{PV} - T_f) - \frac{1}{\frac{\sigma_{PV}}{\lambda_{PV}} + \frac{\sigma_{wall}}{\lambda_{wall}} + \frac{1}{h_{c,in}}} (T_{PV} - T_{in}) \quad (26)$$

式中: σ_g 为厚度, m; λ 为热导率, W/(m·K)。

(4) 水流动力学模型

流体通过冷热两侧之间的流体重力差循环, 流速可以通过式 (27) 和式 (28) 计算。

$$g \cdot h \cdot (\rho_{hot} - \rho_{cold}) = \sum f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho \cdot u_f^2}{2g} + \sum \xi \cdot \frac{\rho \cdot u_f^2}{2g} \quad (27)$$

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (28)$$

(5) 热水收集

封闭的流体循环在顶部位置连接一个热交换器, 从顶部流出的热流体被生活用水冷却。生活用水中收集的热能通过式 (29) 计算。

$$Q_{har} = \varepsilon \cdot c \cdot \dot{m}_f \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (29)$$

式中: ε 为换热器的传热效率, 通过式 (30) 和式 (31) 计算。

$$NTU = \frac{UA}{\dot{m}_f c_f} \quad (30)$$

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU(1 - \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_w})}}{1 - \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_w} \cdot e^{-NTU(1 - \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_w})}} \quad (31)$$

式中: U 为传热系数, W/m²·K; A 为热交换器的热交换面积, m²。

本研究利用成都的小时气象数据, 探讨了 HW-EP 热电联产建筑集成光伏系统的性能。使用 MATLAB 编程, 首先输入气象数据, 模拟中使用的气象数据来源于文献[18]; 从 0 时刻开始模拟计

算, 设置时间步长为 10s, 模拟计算时长为 1 年。通过上述公式模拟计算太阳角度、SPDs 的入射辐射、界面发射率、水的光谱吸光度、水过滤后 SPDs 的辐射和光伏板的光谱吸光度。接着一方面计算光热转换从而得到该系统收集的热量, 另一方面计算电效率进而得到发电量。其中热量计算时对于出水温度小于 20℃ 回流到生活用水入口, 20~40℃ 作为预热水输出, 大于 40℃ 作为清洁水输出。本研究侧重于设计参数, 如流体层的厚度、管道的直径和生活用水的流量对最终能源收益的影响, 并分析给出系统实现最大收益的最佳参数。

3 结果和分析

在图 1 所示的建筑集成光伏/热系统中, 水层的厚度控制着到达 PV 层的太阳辐射的 SPD, 从而影响发电; 管径决定了水回路内的摩擦损失, 直接影响水流速度, 进而影响散热效率; 给水流量在决定换热器的传热效率方面起着关键作用, 直接影响热能收集。因此, 本节利用成都小时气象数据, 深入分析该系统在不同水层厚度、水管直径和给水流量下的性能。

3.1 不同水层厚度下 BIPV/T 系统的性能

当比较具有不同水层厚度的建筑集成光伏/热系统的性能时, 管径设置为 2cm, 给水流量设置为 5kg/h。图 3 (a) 显示了建筑集成光伏/热系统收集的热能和电量, 随着水层厚度从 3mm 增加到 2.5cm, 收集到的热能保持相对稳定, 在 0.66~0.68GJ/(年·m²) 之间波动, 主要源于水层厚度对水的储热能力和壁内水阻的影响。与热能收集变化相反, 随着水层厚度从 3mm 增加到 2.5cm, 收集的电能从 0.74GJ/(年·m²) 减少到 0.61GJ/(年·m²)。这种下降归因于水的吸收效应, 水会阻挡波长大于 900nm 的太阳辐射。

图 3 (b) 显示了建筑集成光伏/热系统的室内热增益, 其定义为从四层结构到室内环境的热传递。水循环有效地冷却了建筑集成光伏/热系统中的墙体, 导致室内负热量增加。这表明, 在过去的一年里, 建筑将通过该系统释放热量用于加热生活用水, 有效地解决了传统建筑集成光伏墙壁中的二次太阳能热增益问题。室内热增量范围为 -7.6~-5.6MJ/(年·m²), 明显低于收集的热能和发电量, 展示了该系统出色的隔热性能。

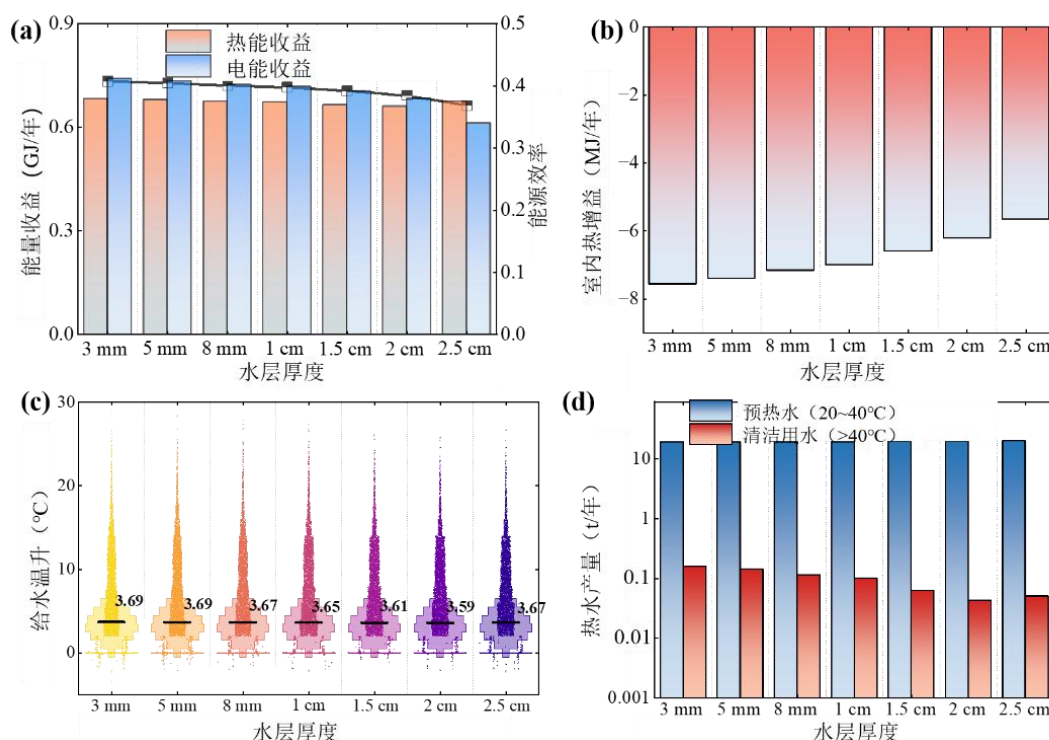


图 3 不同水层厚度下系统的(a)能量收益和能源效率; (b)室内热增益; (c)给水温升; (d)热水产量

Fig.3 (a) Thermal and electricity harvesting and energy efficiency, (b) indoor heat gain, (c) temperature rise of feedwater and (d) hot water production of the system at different water layer thickness

图 3 (c) 比较了换热器中给水的温升。当回路中的水将热能传递给给水时, 给水温度升高。由于高温水具有更大的有效能, 因此需要更高的给水温升。厚度对给水温升的影响较小, 随着水层厚度增加, 年平均给水温升约 3.6°C 。

40°C 以上的热水可用于生活清洁用水, 预热水的温度范围为 $20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ [15]。图 3 (d) 显示了系统的热水量, 随着水层厚度的增加, 全年的预热水产量保持在约 19 吨, 而清洁水产量仅为 $0.05\sim 0.16$ 吨。由于水层的储热降低了循环水的峰值温度, 较厚的水层导致清洁水产量降低, 从而影响了换热器中的水温。

综上所述, 水层越薄, 能量收集效率越高。然而, 薄水层可能会导致更高的流动压力和一些堵塞问题。因此, 在这项研究中, 建议使用 8mm 厚的水层来解决权衡问题。

3.2 不同管径下 BIPV/T 系统的性能

在建筑集成光伏/热系统中, 在 8mm 厚的水层和 5kg/h 的给水流量下, 研究了水回路不同管径下

的性能。图 4 (a) 描述了能量收集和能量效率。管径越小, 水回路中的摩擦损失越高, 这不利于水的自然循环。随着管径的增加, 建筑集成光伏/热系统收集的热能增加。随着水回路管径从 2mm 增加到 2.5cm , 总发电量从 $0.699\text{GJ}/(\text{年}\cdot\text{m}^2)$ 增加到 $0.723\text{GJ}/(\text{年}\cdot\text{m}^2)$, 发电量增加了 3.4% , 主要归因于水回路对 PV 板的冷却效果。

水回路管径的增加也会导致室内热增益的减少 (见图 4 (b)), 给水温升增大 (见图 4 (c)), 产水量增加 (见图 4 (d))。虽然随着水回路管径从 2mm 增加到 2cm 系统的性能显著提高, 但将管径从 2cm 进一步扩大到 2.5cm , 并不会带来额外的性能提升。 2cm 和 2.5cm 管道的总能效、室内热增益、年给水温升、预热水产量和清洁水产量几乎相同, 分别为 $0.401\text{MJ}/(\text{年}\cdot\text{m}^2)$ 、 $-7.16\text{MJ}/(\text{年}\cdot\text{m}^2)$ 、 3.47°C 、 19.26 吨和 0.12 吨。

因此, 建议建筑集成光伏/热系统在水回路中使用直径为 2cm 的管道。

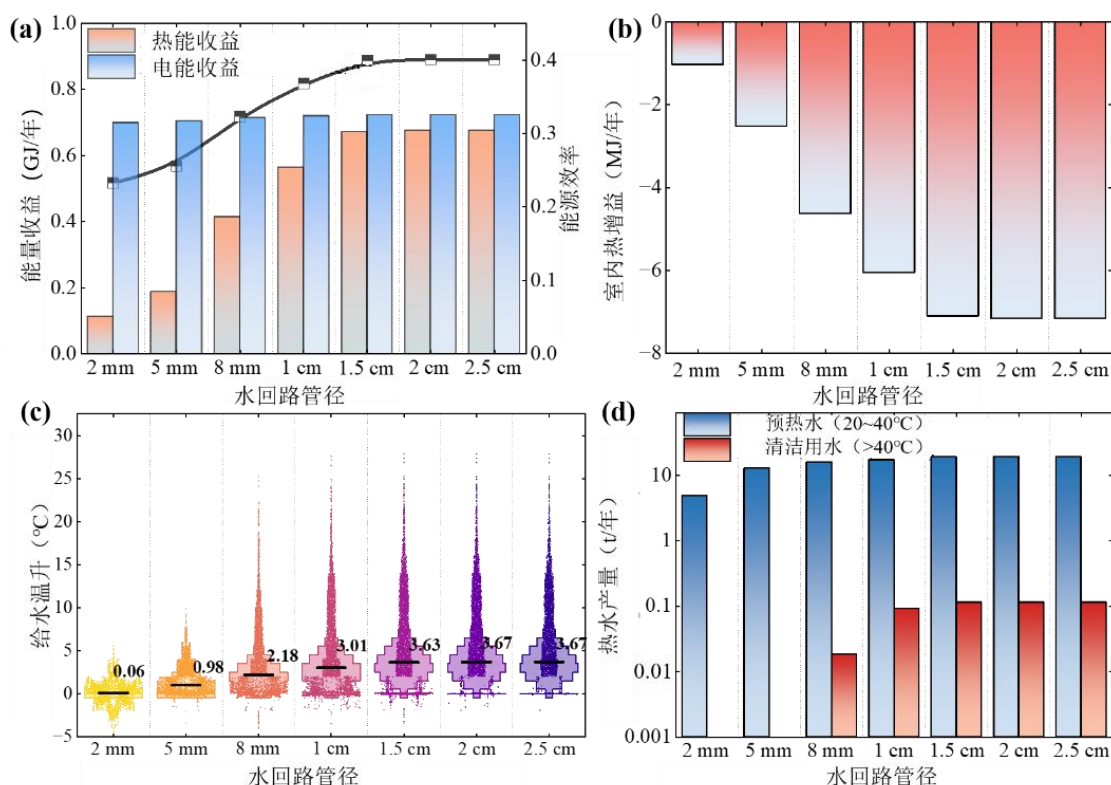


图 4 不同水回路管径下系统的(a)能量收益和能源效率; (b)室内热增益; (c)给水温升; (d)热水产量

Fig.4 (a) Thermal and electricity harvesting and energy efficiency, (b) indoor heat gain, (c) temperature rise of feedwater and (d) hot water production of the system with different water pipe diameter

3.3 不同给水流量下 BIPV/T 系统的性能

在 2cm 的水回路管径和 8mm 的水层厚度条件下, 研究给水流量对建筑集成光伏/热系统性能的影响。给水流量的增加提高了换热器的效率, 从而提高了系统的热效率。如图 5 (a) 所示, 较高的给水流量可提高系统的热量产出。当给水流量从

2kg/h 增加到 20kg/h 时, 热能产出从 0.34GJ/(年·m²) 增大到 1.12GJ/(年·m²), 整体能效从 0.30 提高到 0.54。此外, 热效率的提高能更好地冷却墙体, 从而减少了室内热量的增加。如图 5 (b) 所示, 随着给水流量从 2kg/h 增加到 20kg/h, 室内热增益从 -4.05MJ/(年·m²) 下降到 -11.13MJ/(年·m²)。

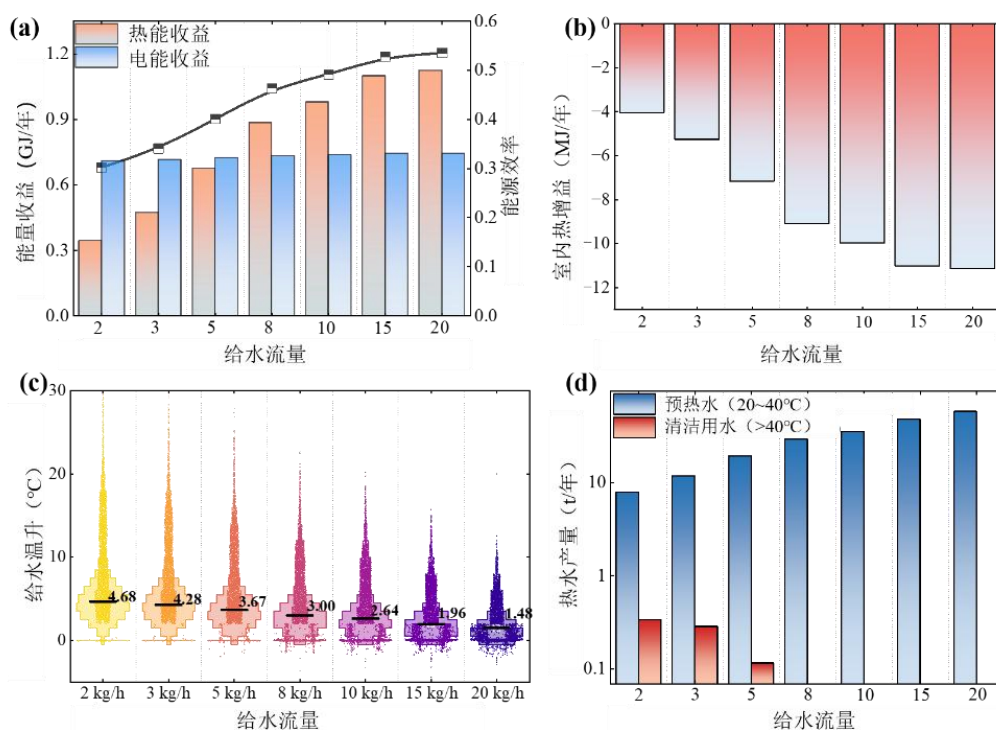


图 5 不同给水流量下系统的(a)能量收益和能源效率; (b)室内热增益; (c)给水温升; (d)热水产量

Fig.5 (a) Thermal and electricity harvesting and energy efficiency, (b) indoor heat gain, (c) temperature rise of feedwater and (d) hot water production of the system with different flow rate of feedwater

然而, 较高的给水流速会导致给水的温升较低。如图 5 (c) 所示, 当给水流量从 2kg/h 增加到 20kg/h 时, 年平均温升从约 4.68℃降低到 1.48℃。此外, 当给水流速超过 5kg/h, 系统无法产生温度超过 40℃的清洁用水, 如图 5 (d) 所示。为了平衡给水温升和能源效率, 建议使用 5kg/h 的给水流量。

综上所述, 确定该建筑集成光伏/热系统的最佳性能参数为 8mm 的水层厚度、2cm 的水回路管径和 5kg/h 的给水流量。

4 结论

将 PV/T 系统无缝集成到墙体中是一种有前景的方法, 可以增强建筑的美学吸引力并促进可持续

性。传统的建筑集成光伏/热系统通常通过开式循环系统连接冷却水, 需要泵来提供动力, 限制了系统的灵活性。本研究提出了一种具有闭环水回路的建筑集成光伏/热系统, 该系统根据热水和冷水之间的密度差循环水回路。同时开发了一个瞬态模型, 以成都为例, 评估其不同设计参数下的性能。主要结论为: 8mm 的水厚度、5kg/h 的给水流量和 2cm 的管径为建筑集成光伏/热系统的最佳参数, 该设计参数在成都实现了 0.401 的能源效率、0.676GJ/(年·m²) 的热能收益和 0.723GJ/(年·m²) 的发电量。

参考文献:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate. Climate Change

- 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge University Press, Cambridge, 2023:923-1054.
- [2] AS Abdelrazik, B Shboul, M Elwardany, et al. The recent advancements in the building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) systems: An updated review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022,170:112988.
- [3] Y Hu, Q Xue, H Wang, et al. Experimental investigation on indoor daylight environment of building with Cadmium Telluride photovoltaic window[J]. *Energy and Built Environment*, 2024,5(3):404-413.
- [4] ED Rounis, AK Athienitis, T Stathopoulos. BIPV/T curtain wall systems: Design, development and testing[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021,42:103019.
- [5] WMPU Wijeratne, TI Samarasinghalage, RJ Yang, et al. Multi-objective optimisation for building integrated photovoltaics (BIPV) roof projects in early design phase[J]. *Applied Energy*, 2022,309:118476.
- [6] S Barbosa, J Carlo, K Ip. Energy performance of PV integrated office buildings with fan-assisted double skin façades under tropical climates[J]. *International Journal of Green Energy*, 2019,16(13):1061-1072.
- [7] H Alrashidi, W Issa, N Sellami, et al. Performance assessment of cadmium telluride-based semi-transparent glazing for power saving in façade buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2020,215:109585.
- [8] L Olivieri, E Caamaño-Martín, FJ Moralejo-Vázquez, et al. Energy saving potential of semi-transparent photovoltaic elements for building integration[J]. *Energy*, 2014,76:572-583.
- [9] X Liu, C Shen, J Wang, et al. Static and dynamic regulations of photovoltaic double skin facades towards building sustainability: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023,183:113458.
- [10] X Liu, X Shi, C Shen, et al. Coupling parameter analysis of photovoltaic double skin facade targeting photovoltaic etching ratio and cavity depth[J]. *Renewable Energy*, 2024,232:121134.
- [11] N Ziasistani, F Fazelpour. Comparative study of DSF, PV-DSF and PV-DSF/PCM building energy performance considering multiple parameters[J]. *Solar Energy*, 2019,187:115-128.
- [12] RX Wang, QF Wang, C Wei, et al. A Thermo-Hydraulic couplings model for residential heating system based on Demand-side Regulation: Development and calibration[J]. *Energy and Buildings*, 2022,256,111667: 1-14.
- [13] A Castro-Vizcaíno, K Babul, MS Romero-Cano, et al. Effects of the inclination angle of planar encapsulated PCM in freezing and melting kinetics[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2025,236:126272.
- [14] J Ahmadi, M Mahdavinjad, O Kalyanova Larsen, et al. Naturally ventilated folded double-skin façade (DSF) for PV integration - Geometry evaluation via thermal performance investigation[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023,45:102136.
- [15] K Wang, AM Pantaleo, M Herrando, et al. Spectral-splitting hybrid PV-thermal (PVT) systems for combined heat and power provision to dairy farms[J]. *Renewable Energy*, 2020,159:1047-1065.
- [16] C Zhang, C Shen, Y Zhang, et al. Feasibility investigation of spectral splitting photovoltaic /thermal systems for domestic space heating[J]. *Renewable Energy*, 2022,192:231-242.
- [17] S Chen, Y Lyu, C Li, et al. Liquid flow glazing contributes to energy-efficient buildings: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024,191:114087.
- [18] H Hersbach, B Bell, P Berrisford, et al. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present, Copernicus climate change service (c3s) climate data store (cds) [EB/OL]. 2018,10(10):24381.