

基于太阳能光伏光热的污水处理系统

颜鲁薪¹, 甄箫斐^{2*}, 雒苗², 李尚娥², 张旭², 崔丽萍²

(1. 武威职业学院, 甘肃 武威 733000; 2. 兰州交通大学 新能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 西北农村地区水资源匮乏且处理污水困难, 严重制约当地居民生活水平的提高, 结合西北地区丰富的太阳能资源, 设计了一套基于太阳能光伏光热的污水处理系统。该系统主要利用热管式 PV/T 和闪蒸冷凝技术实现农村污水处理, 以兰州 1 家 4 口生活污水为研究对象, 对该系统进行实验研究, 结果表明: 系统可实现兰州农村地区 1 家 4 口的污水处理, 且系统理论年发电量为 2251.4 kW·h, 二十年内可节约标准煤约 13.5 t, 减少 CO₂ 排放量约 44.95 t, SO₂ 排放量约 1350.8 kg, 氮氧化物排放量约 675.42 kg。

关键词: 太阳能; 热管; 闪蒸冷凝; 污水处理

中图分类号: S216.4; TM615; X703 文献标志码: B 文章编号: 1000-1166(2023)02-0065-11

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023020065

Sewage Treatment System Based on Solar Photovoltaic Photothermal / YAN Luxin¹, ZHEN Xiaofei^{2*}, LUO Miao², LI Shange², ZHANG Xu², CUI Liping² / (1. Wuwei Vocational College, Wuwei 733000, China; 2. Lanzhou Jiaotong University, School of New Energy and Power Engineering, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The lack of water resources and the difficulty of sewage treatment in the rural areas of the northwest have seriously restricted the improvement of the living standards of local residents. Combined with the abundant solar energy resources in the northwest region, this paper designs a sewage treatment system based on solar photovoltaics. The system mainly uses heat pipe PV/T and flash condensation technology to realize rural sewage treatment. Taking the domestic sewage of a family of four in Lanzhou as the research object, the system is experimentally studied. The results show that the system can achieve a family of four in Lanzhou rural areas. The theoretical annual power generation of the system is 2251.4 kW·h, which can save about 13.5 tons of standard coal, reduce CO₂ emissions by about 44.95 tons, reduce SO₂ emissions by about 1350.8 kg, and reduce nitrogen oxide emissions by about 675.42 kg within 20 years.

Key words: solar energy; heat pipes; flash condensation; sewage treatment

社会快速发展的同时伴随着大量化石能源的使用, 能源枯竭及其带来的环境污染问题备受关注, 开发清洁、无污染的新型能源来代替传统化石能源是当前能源发展的主要趋势。

我国西北地区水资源匮乏, 且农村地区生活污水问题严重, 并呈现分布不集中、污染物浓度变化大、水质差异大等特点。传统农村生活污水处理工艺主要有人工湿地、稳定塘技术以及沼气池技术。其中, 人工湿地和稳定塘技术易受季节变化制约, 更适用于南方农村地区; 沼气池占地面积小、对环境友好, 其推行时间较长且接受度较高, 但存在出水水质较差、处理后的污水难以循环使用等问题。Tatiane Benvenuti^[1] 等将大型植物香蒲人工漂浮湿地应用于

巴西西南部某城市污水处理厂的原污水处理, 对 12 个月的平均有机物去除率进行分析, 得到化学需氧量 COD、5 天生化需氧量 BOD₅ 和总悬浮物 TSS 去除率分别为 55%、56% 和 78%; 李旭东^[2] 等利用高效藻类塘对太湖地区的农村生活污水进行处理, 结果表明, 水溶性 COD 平均去除率达到 70%、氨氮平均去除率达 93%、总磷则达到 50%, 综合分析系统的整体运行效果较佳。

Meysam Moradgholi^[3] 等提出了光伏/热混合系统(PV/T), 其基础是选择热管来吸收光伏电池中的过剩热量, 研究表明在春季, 该混合系统比单纯光伏系统平均多输出 5.67% 的电力, 平均热效率提高 16.35%, 夏季该系统比单纯光伏系统平均多产生

收稿日期: 2022-08-07 修回日期: 2022-10-14

项目来源: 甘肃省高等学校青年博士基金项目(2022QB-069); 甘肃省青年科技基金计划(20JR10RA258)。

作者简介: 颜鲁薪(1984-)男, 甘肃天祝县人, 硕士, 主要从事光伏技术研究等工作, E-mail: 115927925@qq.com

通信作者: 甄箫斐, E-mail: zxf283386515@163.com

7.7% 的电力,热效率提高约 45.14%;任玉杰^[4]等研究发现对于热管式 PV/T 系统而言,无空气夹层的 PV/T 系统相较于有空气夹层的系统更利于电池冷却,进而更有利于光电输出,空气层的存在让系统具有更高的光热效率。

针对西北农村地区所面临的水污染问题,并考虑充分利用西北地区丰富的土地资源和光伏资源,本文设计了一种物耗小、二次污染最低、环保无害的污水处理工艺,并以我国西北地区兰州某新农村用户为研究对象,对该污水处理系统进行实验验证,分析系统全工况性能,探讨该系统在我国西北农村的适用性。

1 系统构建

污水处理系统以太阳能为主要能量来源驱动其

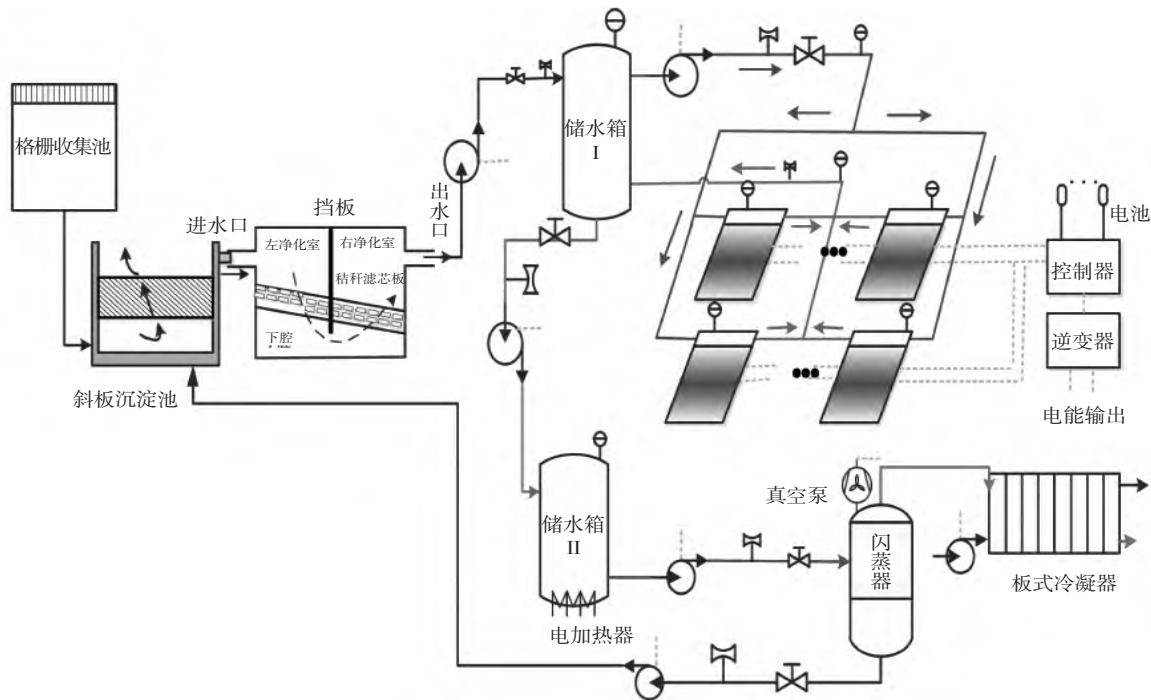


图 1 基于太阳能光伏光热的污水处理系统

2 系统结构设计

污水预处理系统主要由斜板/管沉淀池、净化池组成;热管式 PV/T 系统主要由热管式 PV/T 集热器、控制器、逆变器、蓄电池、水路管道及阀门等设备组成;污水蒸发冷凝系统主要由闪蒸器、冷凝器、真空泵等组成。

2.1 污水预处理系统

污水预处理是保证污水进入后续处理流程之前

正常运行,结构如图 1 所示,该系统主要包括污水预处理系统、热管式 PV/T 系统以及污水闪蒸冷凝系统 3 部分。

农村生活污水经过预处理后进行集中收集,当系统开始运行时,光伏板吸收部分光照并将其转换为电能和热能,电能供给系统运行,而热能使得光伏组件表面温度不断升高,通过在光伏组件背面敷设热管让其成为污水管路的方式带走光伏组件表面部分热量后回流至储水箱,饱和蒸汽再进入冷凝器后换热冷凝,可收集到中水质的处理水,而未汽化的低压饱和水在增压泵作用下回流至储水箱 I 再次循环处理,得到的中水质处理水可用来洗车、浇灌、冲厕等,当系统结束工作后阀门打开,将其注入到沼气池,完成污水处理循环。

对其含有的悬浮固体、漂浮物和泥沙等进行一级处理,主要包括格栅、斜板/管沉淀池、净化池等设备。如图 2 所示。

净化池工作时,污水从进水口进入到左净化室,通过秸秆滤芯板进行第一次过滤,随后进入下腔经重力沉淀处理,同时污水秸秆滤芯板时刻对下腔部分的污水进行吸附净化,简单处理的污水再经水流推动又进入至右净化室,在此过程中完成第二次过滤作用,并通过溢流的方式由出水口流出^[5]。

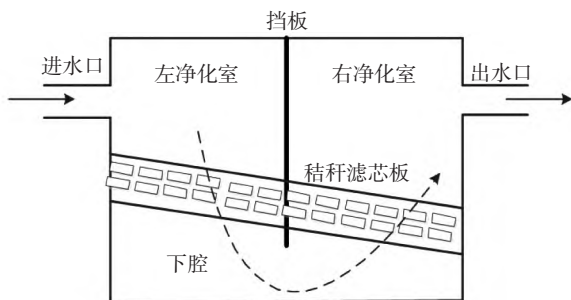


图2 污水净化池结构图

2.2 热管式 PV/T 系统

2.2.1 热管式太阳能 PV/T 集热器设计

太阳能是驱动该系统运行的主要来源,而热管式 PV/T 集热器作为吸收太阳能发电、集热的主要装置,设计合理规范的安装方案至关重要。

该系统预定在兰州新农村地区某农户家庭开展实验,选取周围环境遮挡物最少的场地进行光伏组件的安装,光伏组件选择直埋式地面的固定式安装方式,光伏方阵支架选用性能较稳定的钢结构支架,其承载力高、制造工艺成熟、安装简便,得到大众广泛认可^[6]。此外应该选取组件倾斜面接收到最大辐射量所对应的角度作为组件安装的最佳倾角。

PVSYST 是一款光伏系统设计的辅助软件,可对光伏系统进行较为合理的设计以及系统发电量模拟等^[7]。本文借助 PVSYST 软件对光伏组件选型及设计模拟结果如图 3。

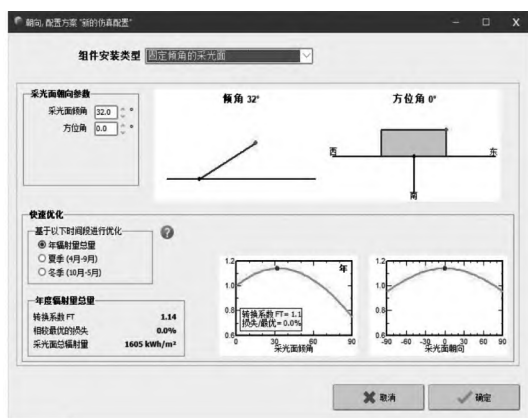


图3 光伏组件最佳倾角选取图

首先在 Meteonorm 中调取兰州地理位置参数并根据该参数在 PVSYST 中得知其组件最佳安装倾角为 32°,且一般朝南安装,对光伏组件选型结果如图 4。

由图 4 所示,选取 Zebra Energy 公司 220 W 功率的单晶硅光伏组件,对应选取 1.5 kW 逆变器,且

光伏组件总面积为 13 m²,且其容配信息如图 5 所示。



图4 光伏组件选型

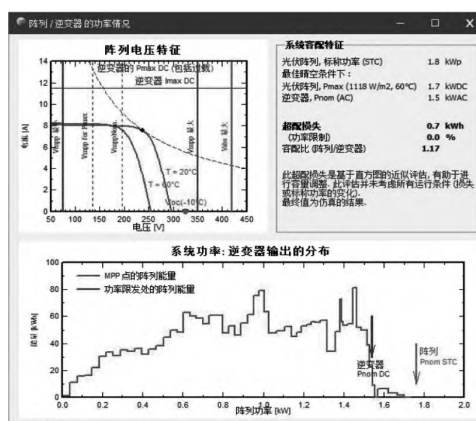


图5 光伏组件容配信息

结合 PVSYST 软件模拟以及实际情况的考虑,最终确定光伏组件型号参数如表 1 所示。

表1 光伏组件相关参数

项目名称	参数
短路电流 / A	8.12
开路电压 / V	36.3
最大功率点电流 / A	7.41
最大功率点电压 / V	29.7
单块组件尺寸 / mm	1650 × 990 × 40 (1.634 m ²)

2.2.2 热管式 PV/T 集热器水路系统设计

预处理后的生活污水经循环泵强制循环至光伏板背部的流道换热器,光伏板接收光照后,部分热量经铝基板、基板等传递到热管蒸发段,热管内低沸点工质通过吸热相变将热量传递给冷凝段,最后将冷凝段热量交换给流道换热器内的低温流体(预处理后的污水),热管内工质冷凝回流至原蒸发段,完成

一次循环^[8]。通过对流换热方式来提高污水温度并降低光伏板背板温度,换热后的污水流出至储水箱 I 中。

张远巍^[9]进行相关实验测试,设定系统环境温度 25.4℃、(31±0.5)℃ 进口恒温水浴、太阳辐照度 (960±20) W·m⁻² 的条件下,综合考虑水泵电耗和 PV/T 系统输出能量,确定工质流量为 320 L·h⁻¹。结合实际情况,确定该系统集热器最佳运行参数,如表 2 所示。

表 2 PV/T 系统集热器最佳运行参数表

项目	参数
集热管	导热率较高的金属材料铜
热管蒸发段 / mm	Φ8 × 0.7 × 800
热管冷凝段 / mm	Φ24 × 1 × 90
热管间距 / m	0.09
流道换热器集管 / mm	直径为 38, 厚度为 1
铜套管 / mm	直径为 26, 厚度为 1
换热器集热管流量 / (L·h ⁻¹)	体积流量为 320
集热器安装角度 / °	32

如图 6 和图 7 所示,已知集热管直径 38 mm,内径 36 mm,热管冷凝器直径 d = 24 mm, T₃ = 34.5℃, T₄ = 42℃。由于热管导热性能好,假定整个热管蒸发段温度相等,在此基础上,可得电池基板沿热管轴向方向的温度也相等,因此,该方向的导热可忽略^[10]。假定电池背板温度为 50℃,忽略热管内相变传热过程的热损失,故热管壁表面平均温度为 50℃。

根据集热管流体体积流量可得流体流速为 0.0873 m·s⁻¹。流道换热器内流体平均温度为 38.25℃,以此为定性温度,查饱和水的热物理性质表^[11],并用插值法计算得雷诺数为 3058.7,即可得

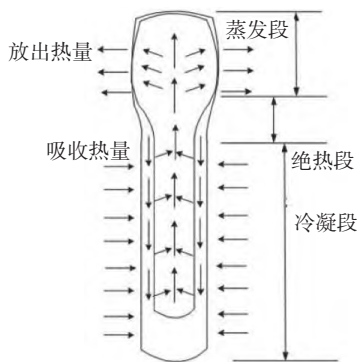


图 6 热管内部结构示意图

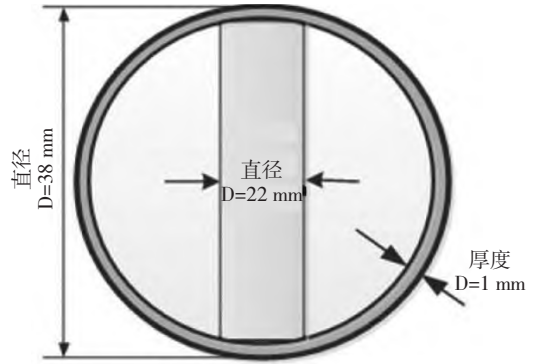


图 7 热管截面示意图

知流道换热器内热管换热面积为 0.399 m²,热管数为 84 根;本文采用搪瓷内胆承压保温水箱来储存循环污水,其保温效果良好,使用寿命可长达 20 年以上^[12]。已知本设计中该家庭污水需处理量为 40 L·d⁻¹,考虑 3 天阴雨天气,考虑一定余量后选择容积为 130 L 的储水箱。

2.2.3 热管式 PV/T 电路系统及辅助热源设计

如图 8 所示为热管式 PV/T 电路系统的框图。光伏组件接收光照后,部分电能经控制器和逆变器作用,将直流电转换为交流电供系统使用,并将多余直流电储存于储能装置。温度传感器使用 T 型热电偶传感器,可对储水箱内水温、储水箱进出口温度以及环境温度等测量^[13];逆变器选择 QY4000W 型号太阳能逆变器;选择型号为 SN24100 的光伏控制器。

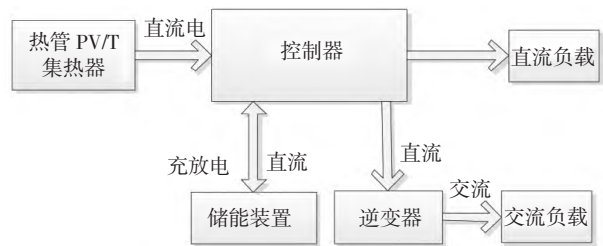


图 8 热管式 PV/T 电路系统简图

阴雨天需要加装辅助热源作为备用热源使用,电加热器由于体积小、能源稳定等优点,是辅助热源的最佳选择^[14]。

2.3 污水闪蒸冷凝系统

闪蒸器的主要组成部分有:壳体、进水装置、汽水分离装置、入孔以及接管和支座等^[15],闪蒸器主要提供低压环境,主要工作介质为水和蒸汽,且必须要有足够大的内部空间及高效的气液分离装置,以保证更好的工作效果^[16],其结构如图 9 所示。

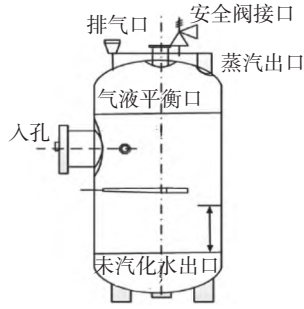


图9 闪蒸器结构示意图

本系统采用强制闪蒸的方式降低闪蒸器内部压力;冷凝器可将气体或蒸汽的热量带走(传递),并将其转变成液体,将多种换热冷凝器进行对比分析后发现,翅片式换热器厚度薄、成本低且热效率更高^[17],故本文选择板翅式冷凝器以供研究使用;要保证闪蒸器内达到所需低压,选择力拓型号为XZ-1.5C的单级旋片抽气真空泵。

3 系统理论分析

3.1 系统发电量计算

系统发电量一般和当地太阳辐照量、光伏组件面积以及电池组件转换效率等息息相关,其理论计算公式为:

$$P = HA\eta K \quad (1)$$

式中: P 为光伏方阵年发电量, $\text{kWh} \cdot \text{h}$; H 为当地年总辐射能, $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$,由 Meteororm 气象数据可知兰州年总辐射能为 $1605 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$; A 为光伏组件总面积,即 13 m^2 ; η 为电池组件转换效率,单晶硅组件取 $14\% \sim 15\%$,多晶硅组件取 $13\% \sim 14\%$ ^[18]; K 为修正系数, $K = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5$; K_1 为太阳能电池长期运行性能衰减系数,取 0.8 ; K_2 为灰尘遮挡玻璃及温度升高造成组件功率下降修正系数,取 0.82 ; K_3 为线路损耗修正系数,取 0.95 ; K_4 为逆变器效率,取 0.85 ; K_5 为光伏方阵朝向及倾斜角修正系数,取 0.97 ^[4]。

3.2 污水与光伏板对流换热量计算

储水箱内流体要与热管式 PV/T 集热器进行换热,故 PV/T 系统中集热器上方的流道换热器内流体温度应低于 50°C ,因此夏季时设定其水箱平均临界温度为 40°C ,流道换热器出口温度 $T_4 = 42^\circ\text{C}$,其储水箱换热模型如图 10 所示。

结合能量守恒定律得到,储水箱输出所存储的热量应该等于通过光伏组件背部流道换热器内对流换热所得热量,见公式(2):

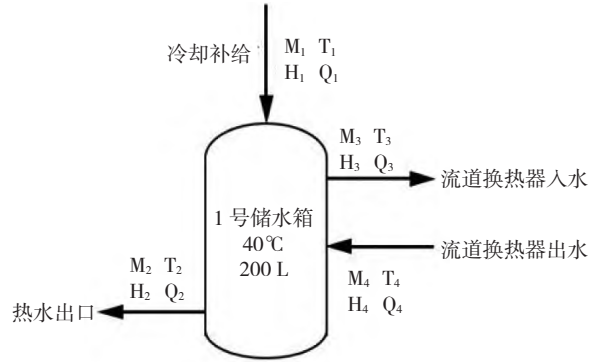


图10 储水箱换热模型结构示意图

$$Q_1 + Q_4 = Q_2 + Q_3 \quad (2)$$

由于水箱体积不变,同时储水箱的排气孔保证了储水箱与大气相通,故水箱内压力恒定,当其内部水流呈稳定流动,可得 $Q = H$ 。

$$H_1 + H_4 = H_2 + H_3 \quad (3)$$

$$H_4 - H_3 = H_2 - H_1 \quad (4)$$

$$M_1 C_w (T_2 - T_1) = M_2 C_w (T_4 - T_3) \quad (5)$$

流道换热器出口温差为:

$$VT = \frac{M_1 C_w (T_2 - T_1)}{M_2 C_w} = \frac{Q_x}{M_2 C_w} \quad (6)$$

流道换热器进口温度: $T_3 = T_4 - \Delta T = 34.5^\circ\text{C}$ 。

式中: M_1 为冷却流体补给的污水(温度达到设定值的热度)质量流量, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$; M_2 为流道换热器内进出口流体质量流量; q_{v2} 为流道换热器内流体体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; C_w 为污水比热容,由于预处理后的生活污水污染程度不高,水占比大,故设定其 $C_w = 4.18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}$; T_1 为预处理污水作为冷却流体补给的初始水温,本设计内为 20°C ; T_2 为系统储水箱内设定的恒定平均水温 40°C ; T_3, T_4 为流道换热器的进出口水温; ΔT 为流道换热器进出口温差; Q_x 为流道换热器内每小时对流换热热量。

3.3 污水处理量及闪蒸中水量计算

为提高蒸汽率,增加蒸汽量,将其进入闪蒸器的热水加热至焓值为 $184.24 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、温度为 44°C 的热水,为了保证蒸汽冷凝率,一般要保持蒸汽与冷凝器内冷却流体 5°C 及以上的传热温差,故设定闪蒸器产生 25°C 的蒸汽,查饱和水与饱和水蒸汽的热力性质表可知该温度对应的饱和压力为 3.17 kPa ,该压力温度下的饱和水的焓值为 $104.77 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,同时可知,该闪蒸压力下,饱和水产生蒸汽所需的汽化潜热为 $2441.55 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。假定蒸汽产生率为 X ,同时忽略装置的相关内部能量损耗,则闪蒸器内满足

能量守恒原则, 可得其热平衡方程:

$$h_m = (1 - X) + X(h_n + \gamma) = h_n + \gamma \quad (7)$$

由上式的闪蒸气化率:

$$X = \frac{h_m - h_n}{\gamma} \quad (8)$$

计算得蒸汽产水率为 3.255%, 由于进入闪蒸器的热水温度低于饱和温度 51℃, 故过冷度为 51℃, 所以蒸汽产生率相对较低。根据进入闪蒸器的热水流量, 可计算得其每小时产生蒸汽量:

晴天状况下, 闪蒸器内可产生蒸汽量 M_5 :

$$M_5 = X \times M_3 = 0.03255 \times 120 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} = 3.906 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \quad (9)$$

阴雨天气下, 闪蒸器可产生蒸汽量 M_6 :

$$M_6 = X \times M_4 = 0.03255 \times 19.44 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \approx 0.633 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \quad (10)$$

式中: h_m 为大气压下 44℃ 未饱和热水的焓值; h_n 为闪蒸压力、温度下的饱和水的焓值; γ 为闪蒸压力下饱和水产生蒸汽所需汽化潜热; X 为闪蒸气化率, 即蒸汽产生率。

假定冷凝器所吸收热量全部是该低压饱和水蒸气所释放的冷凝潜热, 晴天饱和蒸汽在冷凝器中热负荷:

$$Q_5 = \gamma \times M_5 = 2441.55 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \times 3.906 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} = 9536.69 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1} \quad (11)$$

阴天饱和蒸汽在冷凝器中的热负荷:

$$Q_6 = \gamma \times M_6 = 2441.55 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \times 0.633 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} = 1545.5 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1} \quad (12)$$

蒸汽释放出蕴含的潜热, 完成完全冷凝后凝结与蒸汽同等质量的冷凝水, 故该系统在设定工况下, 晴天处理产出 3.906 $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 中水, 阴雨天产出 0.633 $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 中水。在夏季工况下每日污水排放量 40 L, 按照系统处理工作 5 h, 可计算得系统每日处理所得中水量。晴天系统每日处理所得中水的量为 3.906 $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1} \times 5 \text{ h} = 19.53 \text{ kg}$; 阴雨天系统每日处理所得中水的量为 0.633 $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1} \times 5 \text{ h} = 3.165 \text{ kg}$; 计算可得晴天污水处理率达到 58.59%, 阴雨天处理率为 7.913%。

4 实验研究与分析

4.1 实验实施

4.1.1 实验所在地气象条件

Meteonorm 是一款气象数据查询软件, 其气象数据主要包括当地全球辐射量、直接辐射量、环境温度、降水量以及风速等^[19]。

在 Meteonorm 软件中定位甘肃省兰州市, 其气象条件见图 11 ~ 图 13。

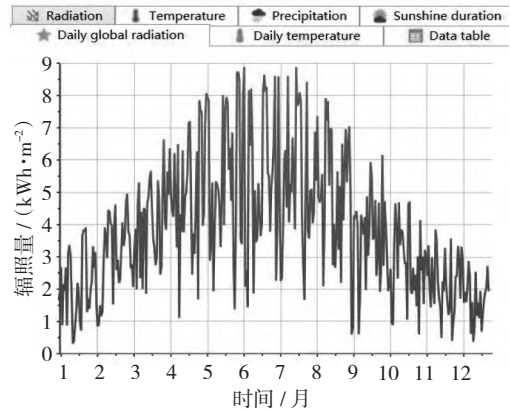


图 11 兰州全年总辐射量

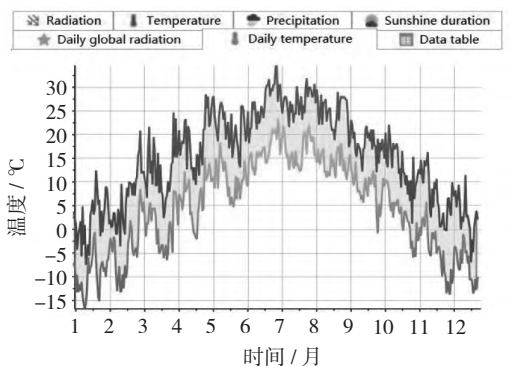


图 12 每日环境温度

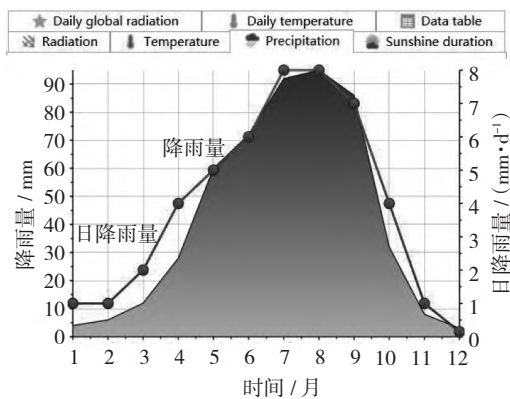


图 13 兰州全年降雨量

图 11 显示 6 月 ~ 8 月是兰州地区太阳辐射量最强的时间段, 且最大值接近 9 $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$; 图 12 给出了每日环境温度, 由图中可以看到, 全年最高温在 7 月份前后, 且最高温可高达 40℃, 1 月份温度最低 -15℃ 以下; 图 13 显示了兰州地区全年降雨量情况, 西北地区普遍比较干旱, 降雨量相对来说较少, 从图中可以看出 7 ~ 8 月份降雨量最多, 达到 8 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 年均降雨量为 1400 mm; 图 14 和图 15 给出了水平面太阳辐射度与时间的对应关系, 可以看出, 1 月份

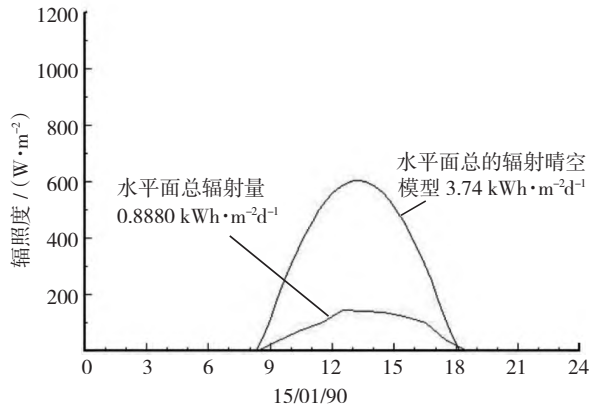


图 14 1 月份水平面总辐照度

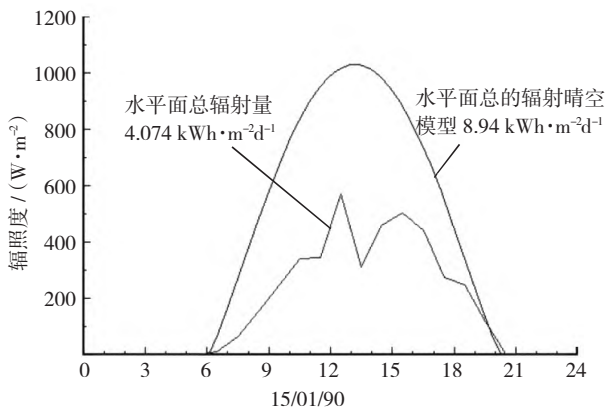


图 15 7 月份水平面总辐照度

日照时间较 7 月份短将近 2 h, 1 月份和 7 月份太阳光照强度均在 10:00 ~ 15:00 最强。

4.1.2 实验实施方案设计

实验计划在兰州地区进行,兰州位于北纬 34°,东经 103°40',海拔高度 1500 米,年日照时数为 2800 ~ 3300 h,日平均峰值日照时数 4.4 h,连续阴雨天数 4 天,年平均降水量 1400 mm。夏季平均环境温度 25℃左右,冬季平均环境温度 10℃左右,日均用水量每人每天 40 L,拟为兰州地区 1 家 4 口的用户实现污水资源化利用,故每天理想可用污水量为 160 L,但考虑到实际情况下,西北地区污水排放设施并不是特别完善,因此实际可利用的污水量仅为用水量的 50% 左右,即实际可用污水量为 80 L,同时设定该系统每天运行 5 h。

由气象条件模拟知,兰州地区太阳辐照强度最高值在 10:00 ~ 15:00,因此,本实验于每天 10:00 开始进行,测试时间为每天 10:00 ~ 14:00,数据采集时间间隔为 2 min。

4.2 测试参数及所用仪器

本次试验测试参数主要有兰州地区太阳辐照

量、室内外环境温度、水温、环境风速、热管式 PV/T 集热器表面温度、污水进出口流量以及光伏组件 I-V 曲线测试等。

室内外环境温度采用 PT100 铂电阻数显一体化温度传感器进行测量,其精度为 ±2%;自来水温度以及储水箱内部水温采用 JLGK 品牌 DTM/WST-491 型号高精度数字水温表;环境风速采用天穹品牌的 TQ-WQX5 型号高精度便携式超声波风速风向测量仪;热管式 PV/T 集热器表面温度采用 LIHUA-DA 品牌 DM6801A 型号热电偶表面接触式固体测量温度计;污水进出口流量采用四氟衬里数显一体化电磁流量计,测量范围为 3 ~ 12 m³·h⁻¹;光伏组件的 I-V 曲线测试 PROVA 型号太阳能电池板 I-V 曲线测试仪。

4.3 测试方案(测点布置)

4.3.1 热管式 PV/T 温度传感器测点布置

将经过预处理后的生活污水收集至储水箱,且由于生活污水水温一般在 30℃左右,而在晴天太阳光照很强的环境下,光伏组件表面温度最高在 70℃左右^[20],加之其背板处较表面通风环境差一些,故其背面温度更高,循环泵强制循环使得生活污水流经热管式 PV/T 背板处的热管,循环带走组件背板热量,达到降低组件表面温度从而提升其发电效率的目的,热管式 PV/T 结构示意图见图 16。综合考虑实际情况,最后将温度测点布置见图 17 所示的位置。

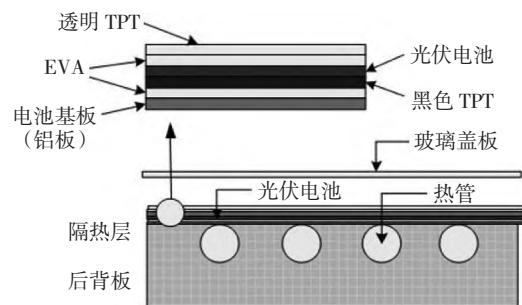


图 16 热管式 PV/T 结构示意图

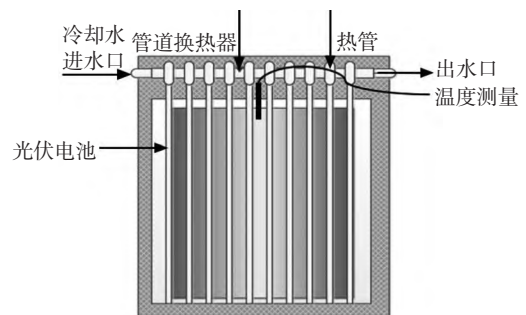


图 17 热管式 PV/T 背板敷设温度计示意图

4.3.2 储水箱温度传感器测点布置

储水箱用于储存预处理后的生活污水以及经热管式 PV/T 加热后的生活污水,需根据储水箱内水的温度控制循环泵的工作,即当储水箱内水的温度达到实验设定值时,停止循环泵循环,并进行后续闪蒸冷凝工作。为此,需进行储水箱温度测试点的布置,如图 18 所示。

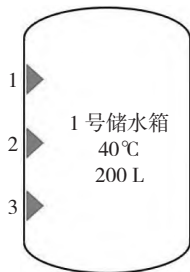


图 18 储水箱换热模型及温度测点布置示意图

图 18 是对储水箱的温度测点布置示意图,由于储水箱中的水在循环加热过程存在冷热水分层现象,因此在测量储水箱内的水温时,应该综合考虑储水箱上、中、下位置的水温,对应于图中 1、2、3 位置,且最终储水箱内水温取三者平均值。

4.3.3 环境风速测速仪

太阳能发电技术和集热技术都与辐照强度、降水、环境温度、尘沙以及环境风速等因素有直接联系,其光电转换效率与光热转换效率会受到这些因素的直接影响^[21]。因此,在本研究中考虑到环境风速对系统产生的影响,对比分析风速测速仪类型,最终选取天穹品牌的 TQ-WQX5 型号高精度便携式超声波风速风速测量仪。

4.4 实验结果分析

4.4.1 系统处理污水量

通过查阅文献,将传统污水处理方式特点进行总结并与热管式 PV/T 污水处理方式对比分析^[22],具体如表 3 所示。

表 3 污水处理方式总结对比

名称	人工湿地	土地处理	生物处理 (厌氧、好氧)	热管式 PV/T 污水处理装置
占地面积	大	大	大	小
二次污染程度	较轻	大	较轻	较轻、生产达标中水循环利用
处理污水量	多	多	较少	较多
成本	高	低	低	较高

由表 3 可知,传统农村污水处理方式占地面积普遍比较大,其中,人工湿地相对于土地处理和稳定塘的二次污染程度较轻一些,但其成本偏高;土地处理方式处理污水量较多,成本也比较低,但二次污染程度大;稳定塘处理方式虽然成本偏低,但这种方式的处理污水量较少,且存在富营养化处理效果差的问题。此外,以上污水处理方式的规模偏大,对于处理规模较小的农村用户而言,投资和运行费用相较于污水处理技术而言较大;生物处理法技术成熟、工艺简单且易处理,但其占地面积大、对水质要求较高,对温度要求较为平稳,其发酵处理时间也比较长,且出水水质达不到排放标准。

热管式 PV/T 污水处理装置占地面积小,二次污染程度较轻,在处理污水的同时还能产出达标中水供用户洗车、冲厕、浇灌等循环使用,虽然整套系统成本偏高,但是由于 PV/T 技术的投入使用,使得光伏组件表面温度降低,有效提升了光伏发电效率,即可延长光伏组件寿命,有效缩短系统回收期。

此外,在一定的温度条件下,人工湿地、土地处理以及生物处理法(厌氧、好氧)的污水处理量相对而言较少,而热管式 PV/T 污水处理装置对于每天 40 L 的污水产出量,其污水处理率可达 58.59%,产中水量 24.436 kg。

4.4.2 电池组件光电转换效率及寿命

太阳能电池组件在受到光照时,其内部电荷分布状态发生变化而产生电动势和电流,即部分太阳辐射被转换为电能,但同时会有部分太阳辐射转换为热能,从而致使光伏组件表面温度不断升高。事实上,电池组件的温度越高,组件的工作效率越低,随着组件温度的上升,工作电压下降,光伏组件温度每升高 1 °C,光伏组件的发电效率会下降 0.35% ~ 0.5%,最大功率点也随之下降^[23]。

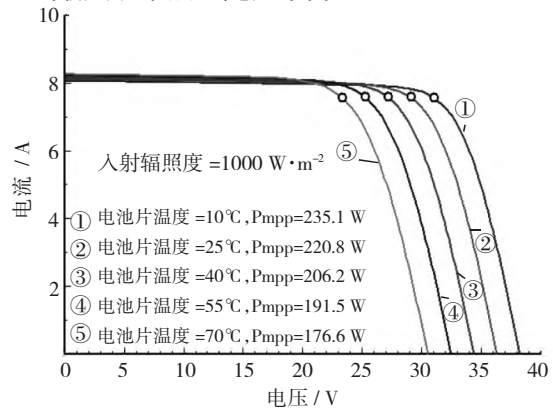


图 19 I-V 对应关系

图为 PVSYST 对所选光伏组件 I-V 曲线、入射总辐照度与组件效率关系曲线的相关模拟图。由图 19 可知,当入射辐照度一定时,随着组件温度的升高,其电压和最大功率点会随之下降;图 20 显示,随着入射总辐照度的升高,组件在 P_{\max} 时的效率随之提升,而随着电池组件温度的升高, P_{\max} 时的组件效率反之会下降。

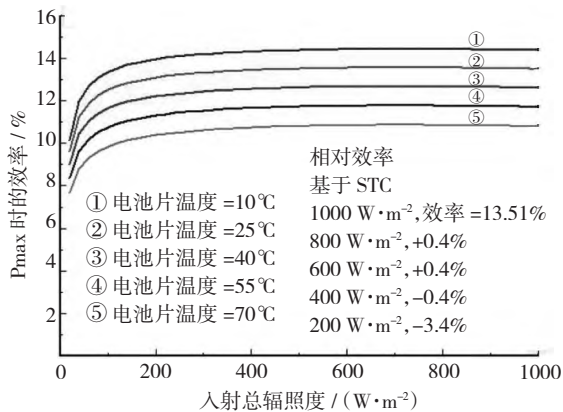


图 20 入射总辐照度与 P_{\max} 时的效率关系

综上所述,电池组件发电效率与电池表面温度成明显反比关系,温度严重影响组件性能,温度升高,组件开路电压和工作电压都会下降,电池组件表面温度升高并且不能对其进行及时降温处理是造成电池组件光电转换效率过低的主要因素。

本研究所提到的系统以低温生活污水作为热管式 PV/T 流道换热器内的换热介质,强制循环生活污水流经热管式 PV/T 背板敷设的热管,结合前文对热管工作原理的描述,可知通过该方式可以对流换热将电池板背板热量换热至流道中的污水,从而降低光伏组件自身温度,以达到提高光伏组件的发电效率,进一步增长组件使用寿命的效果和目的。

5 系统性能分析

5.1 经济效益分析

由于该系统中光伏和光热相关技术设备的投入使用,初期投资成本预计可达 4000 元,对于西北农村用户而言价格略贵,但是热管式太阳能光伏光热一体化完美结合了光伏与光热技术,且在太阳能发电过程中不消耗任何燃料和机械传动部件,从而减少了支出,可直接开始收益,回收期仅需要 3~4 年。主要体现在以下几点:

(1) 光伏组件的光电转换效率得到有效提升,其使用寿命也随之增加,同时节约了整个光伏发电系统中电池板的背板及支撑结构的材料;

(2) 就电池本身而言,通过相应的降温延长了使用年限,简单来说减少了硅电池的衰变期,提高了其经济性能;

(3) 在太阳光照强度非常好的情况下,仅靠光伏发电就可驱动系统正常运行,加之产生可循环使用的达标中水,使得系统回收期缩短;

(3) 由于循环水路系统并没有直接流经集热器的内部,故而有效规避了循环污水中杂质对集热器电池基板的划损及腐蚀,节省了相应的维护费用。

5.2 环境效益分析

该系统占地面积不是很大且不存在二次污染问题,污水处理方式可分离出一定浓度污水中的纯水,处理后所得水具有品质高,可循环利用且用途广泛等特点,实现对废水资源再利用,降低环境污染,具有很高的环境效益。同时该系统使用太阳能作为动力来源,太阳能是一种清洁环保、绿色无污染的可再生的能源,在其产量丰富的西北地区有着极大的开发利用价值,该特点也与当代社会积极推动绿色发展的举措不谋而合。

太阳能电池输出一千瓦时电相当于消耗 300 g 标准煤,因此该系统也避免了燃烧标准煤产生的二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物及烟尘等的排放。已知系统每年发电量为 2251.4 $kW \cdot h$,由于系统中热管作用,其运行寿命可延长为 20 年,减少的标准煤消耗量及污染物排放量计算分析如下:

(1) 标准煤减排量,每度电耗煤按 2019 年全国平均供电煤耗约 0.3 $kg \cdot kWh^{-1}$ 计算,该系统在 20 年内节约标准煤 13.5 t。

(2) 二氧化碳减排量,该系统在 20 年内 CO_2 减排量 44.95 t。

(3) 二氧化硫减排量,该系统在 20 年内 SO_2 减排量 1350.8 kg。

(4) 氮氧化物减排量,该系统在 20 年内 NO_x 减排量 675.42 kg。

综上所述,该系统采用光伏发电,可提高大气环境质量,改善生态环境,优化能源战略结构,环境效

益较高。

5.3 系统社会效益分析

该系统利用太阳能发电供能,绿色环保,且利用热管集热器,可适应西北地区季节气候,抗冻能力强。同时合理应对了农村污水分散度高、产出量不规律的特点,减少污水汇集运输的费用,降低废弃物处理费用,因此非常适合西北地区农村的日常家庭使用。

该系统工艺一定程度上缓解了水资源短缺的压力,增加水资源的可利用率,从而增强西北地区水资源对经济、社会、生态的保障作用,为经济、社会、生态的可持续发展拓展空间。

该系统利用西北地区丰富的太阳能资源去解决西部水资源短缺问题及农村水污染问题,充分发挥西部地区自身优势。在西部大开发、乡村振兴战略的进一步推广以及全社会低碳环保、节能减排的大形势下,该系统提高了水资源的利用率,缓解水资源危机。同时积极响应国家提出开展改善农村人居环境整治提升行动政策,推动新能源在西部地区的发展,大大加快了我国新农村的建设,推进西部大开发进程,具有相对较高的政策合理性和社会效益。

6 结论

本文设计了一种热管式 PV/T 技术与闪蒸冷凝技术相结合的污水处理系统,经过理论计算和软件模拟相结合的方法对系统进行了初步研究,并得出该系统能实现最大程度资源化、减量化、无害化的污水处理的初步结果。

(1) 基于热管式 PV/T 的污水处理系统可实现 1 家 4 口的污水处理,且基本不存在二次污染问题,此外,在处理污水的同时还能产生符合标准的中水供用户洗车、浇灌、冲厕等使用;

(2) 热管式 PV/T 技术的利用,能够有效降低光伏板表面温度,提高光伏组件发电效率,进一步增加光伏组件寿命;

(3) 将热管式 PV/T 技术有效运用在处理农村生活污水之上,既实现了污水治理,又使得西北地区丰富的太阳能资源得到充分利用,达到资源最大化利用。

参考文献:

- [1] Benvenuti T, Hamerski F, Giacobbo A, et al. Constructed floating wetland for the treatment of domestic sewage: a real-scale study [J]. *Journal of environmental chemical engineering*, 2018, 6(5): 5706–5711.
- [2] 李旭东,周琪,黄翔峰,等. 高效藻类塘系统处理太湖地区农村生活污水 [J]. *水处理技术*, 2006, 32(6): 61–64.
- [3] Moradgholi M, Nowee S M, Abrishamchi I. Application of heat pipe in an experimental investigation on a novel photovoltaic/thermal (PV/T) system [J]. *Solar Energy*, 2014, 107: 82–88.
- [4] 任玉杰,杨洪兴,吕建,等. 热管间距及空气层对 PV/T 系统性能的模拟研究 [J]. *太阳能学报*, 2018, 39(4): 965–971.
- [5] 甄箫斐,李笑卉,张学民,等. 一种净化池及生活污水净化系统 [P]. CN206955780U, 2018–02–02.
- [6] 李忠实. 太阳能光伏发电系统设计施工与应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
- [7] Behera D D, Das S S, Mishra S P, et al. Simulation of solar operated grass cutting machine using PVSYST software [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 62(P6).
- [8] 刘时安,石东来,刘勇兵,等. 不同加热功率下充液率对无芯环路热管性能的影响 [J]. *热科学与技术*, 2020, 19(3): 226–232.
- [9] 张远巍. 热管式太阳能光伏光热综合利用实验研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2018.
- [10] 符慧德. 热管式光伏光热综合利用系统的理论和实验研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- [11] 肖国俊. 定量分析双背压凝汽器冷却水管结垢对机组经济性的影响 [J]. *电站辅机*, 2006, 27(4): 22–27.
- [12] 李康,文强,胡晓花. 新型环保便捷式采暖装置的设计与开发 [J]. *河南科技*, 2015(21): 16.
- [13] 丁永洁,柳建华,张良,等. R404A 在水平内螺纹管中的冷凝换热研究 [J]. *热能动力工程*, 2020, 35(12): 141–147+168.
- [14] 熊小萍,李航,李宁. 基于分布式电源模块化互联的多边交易电价机制设计 [J]. *电网技术*, 2020, 44(07): 2572–2582.
- [15] 王周君. 热泵能效分析技术的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [16] 袁志鹏,张淞源,葛众,等. 基于分液冷凝有机闪蒸循

- 环分液干度分析及优化[J]. 热科学与技术, 2022, 21(01): 67-75.
- [17] 刘景成, 张树有, 周智勇. 板翅换热器流道结构改进与流体流动性能分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(18): 167-176.
- [18] 邵国键. 提高太阳能电池转换效率的研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [19] Jahangiri M, Rezaei M, Mostafaeipour A, et al. Prioritization of solar electricity and hydrogen co-production stations considering PV losses and different types of solar trackers: A TOPSIS approach [J]. *Renewable Energy*, 2022. DOI: 10.1016/j.renene.2022.01.045.
- [20] 马涛, 申璐. 光伏组件在非标准测试条件下的能量分布[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 169.
- [21] 王敏. 环境因素对平板型太阳能集热器热性能的影响研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [22] 田原. 典型城市农村污水处理适应性技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [23] 崔杨, 成驰, 陈正洪. 基于数值天气预报的光伏组件温度预测研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 201-208.