

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.

LiCl基封装型吸湿介质的太阳能电池冷却特性研究

常渊, 刘佳妮, 李浩然, 洪文鹏, 李艳

(东北电力大学能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 吸湿介质中的水蒸发过程可降低太阳能电池运行温度, 然而盐泄漏导致吸附量下降, 进而减小冷却温度且缩短冷却时间。本文将负载吸湿介质 LiCl 的碳毡封装在超疏水聚四氟乙烯膜中, 避免了 LiCl 的泄漏。在一倍标准光照强度下将太阳能电池的表面温度降低 10.7 °C、背板温度降低 11.8 °C, 功率提升 10.4 mW, 光电转换效率提高 7.8%。此外, 其在多云和晴天的户外条件下分别实现了 5.2 °C 和 7.1 °C 的平均温降。

关键词: 光伏发电; 被动冷却; 吸湿介质; 蒸发冷却; 发电效率

中图分类号: TK 123

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-07

Study on cooling characteristics of solar cells using LiCl-based encapsulated hygroscopic medium

CHANG Yuan, LIU Jiani, LI Haoran, HONG Wenpeng, LI Yan

(School of Energy and Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin, China)

Abstract: The evaporation of water in hygroscopic media can lower the operating temperature of solar cells. However, salt leakage results in a decrease in adsorption capacity, which in turn reduces the cooling temperature and shortens the cooling duration. In this study, LiCl-loaded carbon felt was encapsulated in a superhydrophobic polytetrafluoroethylene membrane. This configuration prevents the leakage of the hygroscopic medium. Under one-sun illumination, it reduces the surface temperature of the solar cell by 10.7 °C and the backsheet temperature by 11.8 °C. This increases the power output by 10.4 mW and improves the photoelectric conversion efficiency by 7.8%. Additionally, under outdoor conditions of cloudy and sunny days, it achieves an average temperature reduction of 5.2 and 7.1 °C, respectively.

Keywords: photovoltaic power generation; passive cooling; hygroscopic medium; evaporative cooling; power generation efficiency

引言

光伏发电作为一种高效低成本的太阳能高位转换方案, 已成为推动全球能源结构转型的主要技术之一^[1-3]。然而, 硅基半导体材料的固有带隙决

定了仅小部分波长的光子能被转化为电能, 剩余光子则转化为热能并使电池温度上升, 导致其工作效率降低^[4-6]。因此, 构建高效的热管理系统对于太阳能电池的稳定运行至关重要^[7-10]。太阳能电池的散

收稿日期: 2026-03-12 修回日期: 2026-04-27

通信作者: 李艳(1988—), 女, 博士, 讲师, liyan@neepu.edu.cn

第一作者: 常渊(2000—), 男, 博士研究生, 1779148835@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(52276148); 吉林省青年科技人才托举工程项目(QT202409)

引用本文: 常渊, 刘佳妮, 李浩然, 洪文鹏, 李艳. LiCl基封装型吸湿介质的太阳能电池冷却特性研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1-7

Citation: CHANG Yuan, LIU Jiani, LI Haoran, HONG Wenpeng, LI Yan. Study on cooling characteristics of solar cells using LiCl-based encapsulated hygroscopic medium[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1-7

热方式可分为主动冷却和被动冷却^[11-14]。主动冷却方法通过风扇、液冷循环系统等主动调控装置强制移除电池工作时产生的热量,其冷却效率较高,但需消耗额外能量驱动冷凝器和回流冷却剂^[15]。被动冷却技术则通过散热片、热管、辐射涂层等功能结构,通过热传导、热辐射等自然传热机制散出电池热量,无需消耗外部能量且结构简单^[16-17]。

常见的被动冷却方法包括相变冷却、辐射冷却、蒸发冷却等^[18-19]。相变冷却技术在多次循环后易出现潜热容量衰减现象^[20]。辐射冷却依赖特定大气窗口实现红外辐射散热,其效能受环境条件和材料性能的严格限制^[21]。传统蒸发冷却技术虽借助相变潜热实现高效降温,但受限于水源依赖或散热持续性不足等问题,未能形成普适性解决方案。基于吸湿介质的蒸发冷却技术通过自发捕获大气中的水分,随后借助太阳能电池产生的废热驱动水分蒸发,进而带走电池热量,使电池保持较低的工作温度^[22-24]。该方案为解决光伏热管理的无能耗、持续性、普适性难题提供了新思路。

盐基水凝胶作为主要吸湿介质,在大气集水领域表现出优异的吸湿性能。例如,Li等^[25]通过聚合物交联法制备的吸湿介质,在90%相对湿度下,4 h的吸附速率达 $1.19 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$,且通过加热可将80%的水分在10 min内迅速脱附。吸湿介质内部的水分在发生液-汽相变时,可借助自身极高的汽化潜热($\sim 2450 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$)实现显著的降温效果^[26-27]。基于此,Pu等^[28]利用富含锂和溴的吸湿介质的蒸发冷却效应提高电池工作效率,该过程依靠水分快速蒸发消散p-n结中载流子运输过程产生的废热。然而,在吸附-脱附循环过程中,吸湿盐易因盐溶液流动及材料结构破损而发生泄漏^[29]。由此引发的组分流失会削弱介质的持续吸湿能力,进而导致吸湿介质再生性能下降,影响太阳能电池的降温效果。

本文借助多孔基质与吸湿盐间的协同作用^[30],制备高吸湿性复合吸附介质。该材料通过将负载LiCl的碳毡封装于超疏水聚四氟乙烯膜中,有效解决了吸湿介质在吸附-脱附循环过程中的泄漏问题,显著提升了介质的吸湿性能与热管理效率。此外,该膜与太阳能电池的紧密封装设计可防止运行过程中热传递受阻;与此同时,借助太阳能电池工作时产生的热量驱动水分蒸发,通过解吸过程带走潜热,从而实现了对太阳能电池的冷却。

1 实验材料和方法

1.1 材料

碳纤维毡(ACF,昆山隆圣宝电子材料有限公司),聚四氟乙烯膜(PTFE,孔径 $5 \mu\text{m}$,晋纯环保科技有限公司),LiCl(合肥巴斯夫生物科技有限公司),太阳能电池($5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$,上海随赢光伏科技有限公司)。

1.2 吸湿性材料制备

通过真空浸渍法制备了吸湿性介质。首先,将长 \times 宽为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 的ACF放置于真空干燥箱(DZF,北京历辰科技有限公司)中,在 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 下处理8 h;其次,将其放入质量浓度为30%的LiCl溶液中,并在 -0.1 MPa 的真空环境中浸渍12 h。然后,置于 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 的环境中干燥8 h。最后将ACF自然冷却至室温,获得复合吸湿材料。

1.3 封装型冷却系统及其工作原理

首先采用热熔胶包裹太阳能电池焊点防止腐蚀,随后将预浸润处理后的吸湿材料贴附于太阳能电池背面,确保二者间无接触间隙。为实现吸湿介质的密封防护与高效热传导,使用超疏水PTFE薄膜对吸湿介质进行整体封装,确保其与太阳能电池贴合紧密,避免热传递界面出现空隙导致散热效能衰减;同时使用焊接剂对膜与太阳能电池的四边进行密封固定,进一步强化结构密封性与贴合度。最后,将载玻片垂直固定于平面亚克力板两侧,作为太阳能电池和吸湿介质的支撑结构。封装型冷却系统(Encapsulated cooling system, ECS)的工作原理如图1所示,其通过大气水分自发捕获与光伏废热资源化利用,构建夜间吸湿、日间蒸发冷却的无源循环机制。在夜间相对湿度较大时,封装于PTFE膜内的吸湿介质通过槽式冷却通道高效捕获大气中的水蒸气,完成水分储备;日间太阳辐射作用下,太阳能电池工作产生的废热通过热传导传递至吸湿介质,驱动吸附态水分发生液-汽相变并蒸发,过程中释放大量的汽化潜热,快速带走电池累积热量。

1.4 ECS实验装置及方法

为保证实验数据的准确性,所有操作过程都在室温 $25 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 及环境相对湿度 $15 \pm 5\%$ 的条件下完成。ECS实验台如图2所示。借助太阳模拟器(CEL-HXF300-T3,中教金源)发射太阳辐照光谱;使用标准太阳能电池(RCCN,中教金源)将太阳

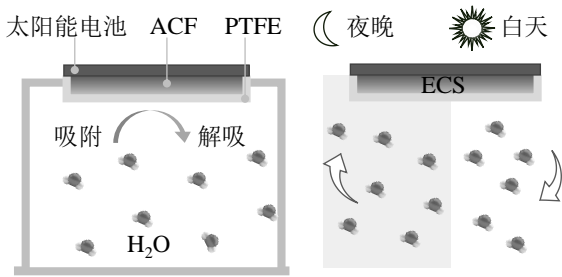


图1 ECS的结构与工作原理示意图

Fig. 1 Schematic showing the structure and working principle of the ECS

能模拟器输出到光伏电池上表面的光照强度校正为 $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$; 通过 T 型热电偶和数据采集仪 (34972A, Keysight) 联用监测背板温度数据; 利用电化学工作站 (PGSTAT302N, 瑞士万通) 的电压模块测量太阳能电池的输出电压; 同时使用红外热成像仪 (T250, 美国菲力尔) 测量太阳能电池表面温度。

2 实验结果与讨论

2.1 PTFE 膜性能表征

PTFE 膜作为复合吸湿介质的封装载体, 需同时具备足够力学强度以承载吸湿介质、抵御吸附 - 脱附循环中的体积变化, 以及优异疏水性以保障透湿

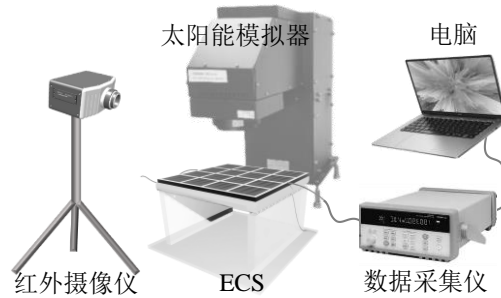


图2 实验装置示意图

Fig. 2 Diagram of the experimental set-up

性能。通过电子万能试验机 (WDW-100, 冠腾) 测试了 PTFE 膜的拉伸性能 (图 3a), 结果显示其最大应力达 128 MPa (图 3b)。该力学性能表明, PTFE 膜在太阳能电池长期运行及吸湿介质反复吸湿 - 脱附过程中, 可维持结构完整性与功能稳定性, 有效避免膜材破裂引发的吸湿盐泄漏问题, 为 ECS 的长效可靠运行提供结构保障。此外, 使用百欧林 Attension Theta 型接触角分析仪测量了 PTFE 膜的接触角为 150.8° (图 3c), 表明其具备良好的超疏水性, 可防止液态水浸润膜孔, 避免膜孔隙被堵塞而导致透气性下降, 确保大气中水蒸气能顺利渗透至内部吸湿介质, 同时阻碍吸湿盐溶液向外迁移, 进一步强化了防泄漏、高透气的功能。

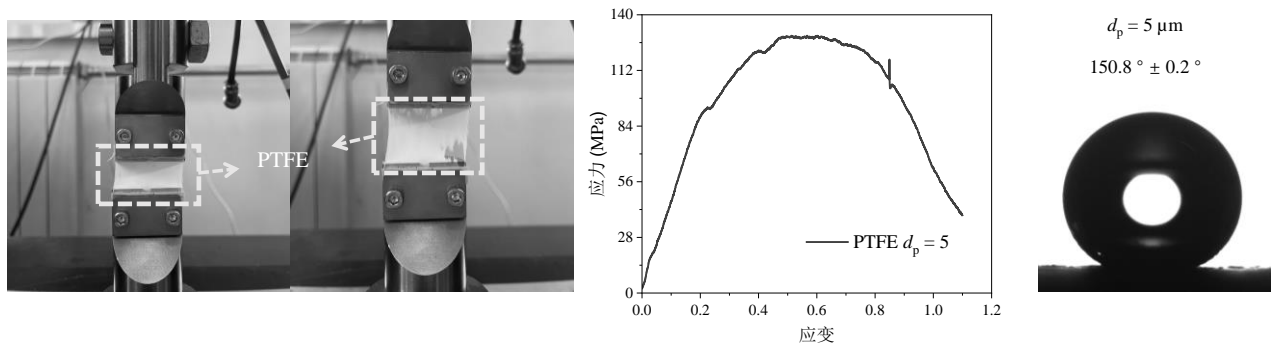


图3 PTFE膜性能测试

Fig. 3 Performance test of the PTFE membrane

注:(a)实验过程示意图 (b)应力 - 应变曲线 (c)静态接触角

2.2 ECS 的光电转换特性

为直接评估 ECS 的散热效能, 通过红外热成像与热电偶同步监测, 对比了有无冷却系统的太阳能电池温度变化规律。如图 4 所示, 在 $1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 光照强度下, 空白组太阳能电池表面温度在 30 min 内从 39.2°C 持续上升到 56.2°C , 并在 120 min 时上升到 59.7°C ; 而搭载 ECS 的太阳能电池表面温度上升缓慢, 120 min 时表面温度仅为 49.0°C 。相较于空白组

降温幅度达 10.7°C , 证明 ECS 能有效抑制光伏组件的热累积效应。考虑到太阳能电池正面受环境干扰较大, 背板温度更能反映电池内部热传导与累积特性, 进一步监测了背板温度及光电输出性能。如图 5 所示, 两组电池温度在前 15 min 均快速上升并逐渐趋于稳定, ECS 组最终稳定温度较空白组降低 11.8°C , 冷却效果更为显著。光电性能测试表明, 空白组与 ECS 组电池在运行 15 min 后均进入稳定输

出阶段,其中ECS组平均输出电压达5.39 V,相较空白组提升0.22 V,最大输出功率提升10.4 mW,光电转换效率相对提升7.8%。

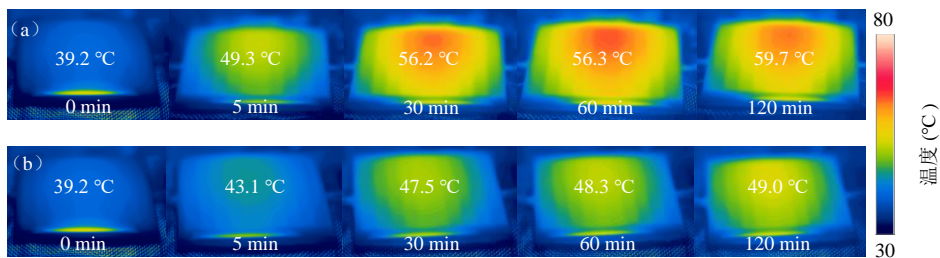


图4 空白组(a)和ECS组(b)太阳能电池表面红外温度图

Fig. 4 Infrared temperature images of solar cell surfaces in the control group (a) and ECS group (b)

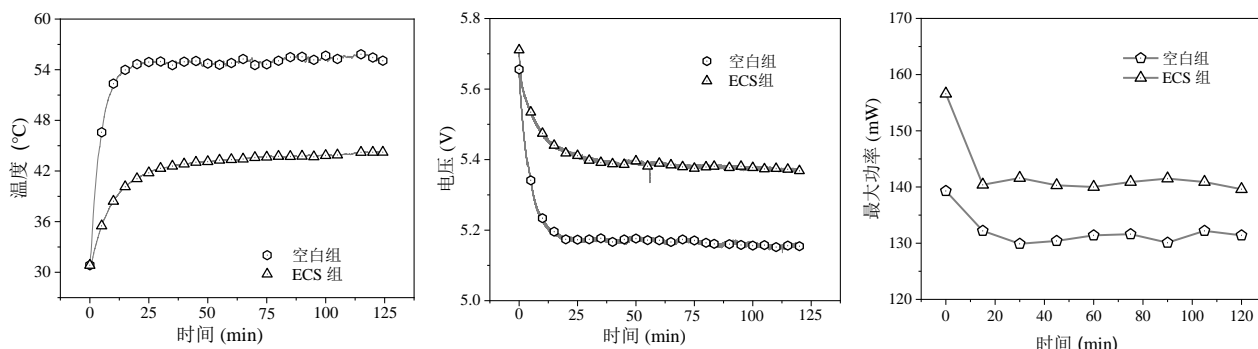


图5 太阳能电池输出性能对比

Fig. 5 Comparison of output performance of solar cells

注:(a)电池背板温度(b)输出电压(c)最大输出功率

进一步测试了2倍、4倍标准光照下的冷却效果。如图6a所示,在1倍光照下ECS运行120 min时表面温度为49.0 °C。当光照强度提升至2和4倍光时,ECS组电池运行30 min时表面温度分别可达64.9和78.9 °C,运行到120 min时进一步提升至67.6和87.7 °C。结合图6b的背板温度数据(1倍、2倍、4

倍光照下平均背板温度分别为43.2、55.0和73.9 °C)可知,光照强度越大,光伏废热产生速率越高,电池温度上升越显著,但ECS仍能通过水分蒸发相变持续带走热量,维持相对较低的工作温度,表明其在中高强度光照场景下仍具备一定冷却能力。

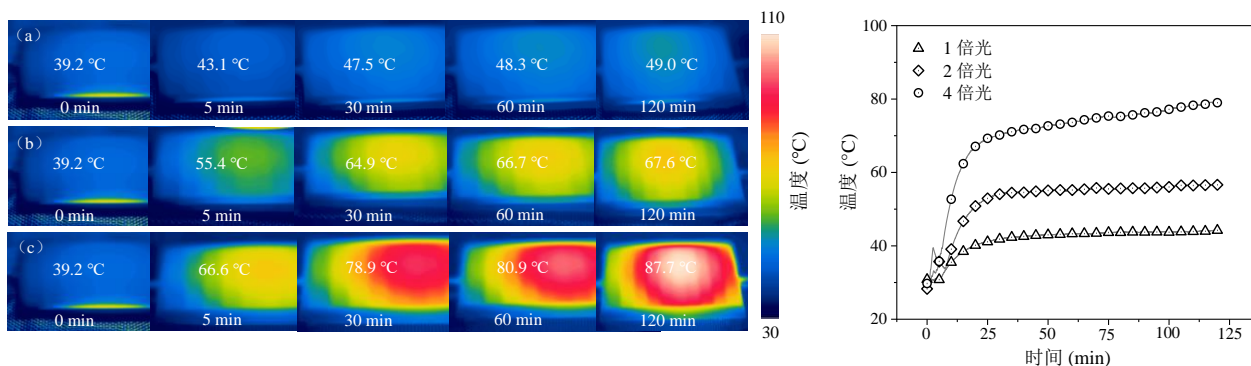


图6 ECS在不同光照强度下的温度变化

Fig. 6 Temperature variations of the ECS at different light intensities

注:(a)表面温度(b)背板温度

2.3 户外实验

为验证ECS在真实复杂环境中的应用潜力,在

东北电力大学(北纬43.49°、东经126.29°)开展户外实证实验。如图7所示,实验使用两个初始性能相

近的两组太阳能电池,分别作为ECS实验组与空白对照组。利用T型热电偶实时监测电池背板温度和环境温度,借助光功率计(Solar Survey 200R,北京思旺电子)捕获太阳辐照度动态变化,通过湿度计(TH20BL-EX,妙观科技)实时记录环境湿度波动。

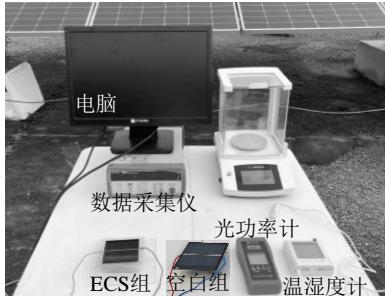
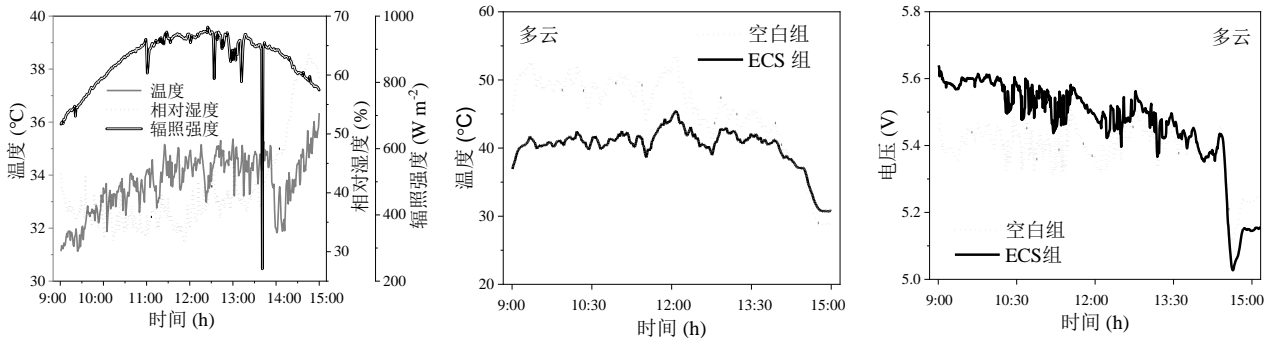


图7 户外实验装置

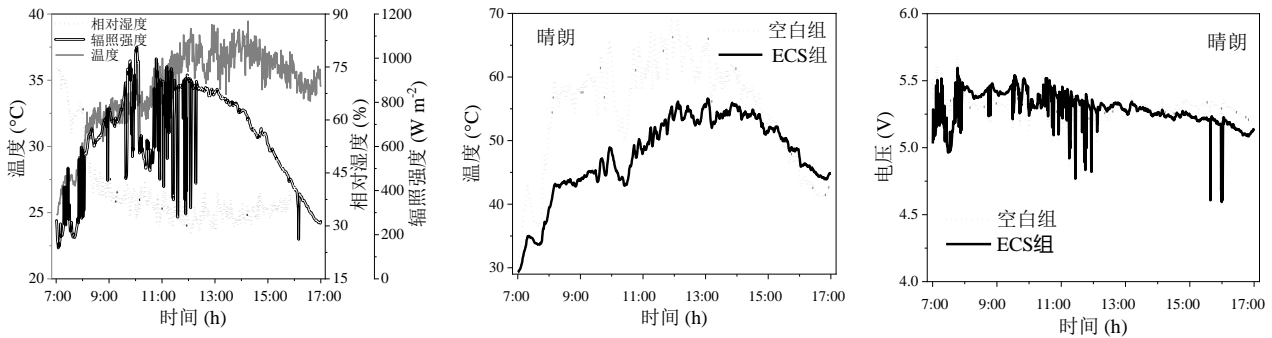
Fig. 7 Outdoor experiment set-up

真实环境下光照强度、温度、环境湿度等气象参数复杂且时刻变化。户外数据能精准反映吸湿介质在不同工况下的蒸发特性,以及冷却系统的实际运行效果。本研究分别于2024年7月12日(多

云)9:00 - 15:00和2024年7月16日(晴朗)7:00-17:00开展两次户外实验。如图8a所示,光照强度在12:26时达到 $967 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,之后逐渐下降,运行6 h内平均超过 $650 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,环境平均温度和湿度分别达到 $33.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 40.6% 。温度监测结果(图8b)显示,空白太阳能电池和ECS太阳能电池背板初始温度分别为 45.5 和 $36.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在运行前5 h内,空白太阳能电池背板温度均高于ECS电池背板温度,ECS太阳能电池背板平均温度为 $40.3 \text{ }^\circ\text{C}$,使太阳能电池降低了 $5.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。然而,在14:16之后由于ECS中吸湿介质吸附的水分已基本完成蒸发脱附,冷却驱动力减弱,剩余少部分水分蒸发吸收的热量小于空白太阳能电池通过空气散热带走的热量,因此出现ECS太阳能电池背板略高的现象。光电性能方面,空白太阳能电池和ECS太阳能电池初始电压分别为 5.48 和 5.64 V ,平均电压分别为 5.38 和 5.46 V (图8c),ECS太阳能电池输出电压提升 0.08 V ,证实多云天气下ECS仍能发挥稳定的冷却与性能优化作用。



(a) 阴天户外环境变化 (b) 阴天电池背板温度变化 (c) 阴天输出电压变化



(d) 晴天户外环境变化 (e) 晴天电池背板温度变化 (f) 晴天输出电压变化

图8 户外实验结果

Fig. 8 Outdoor experiment results

晴朗天气下实验期间最大光照强度和温度达到 $1050 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $39.5 \text{ }^\circ\text{C}$,平均光照强度和温度分别

为 $628.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $34.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。环境相对湿度在7:00最高,达到 74.5% ,随后随光照强度增强和环境温度升

高,环境相对湿度逐渐下降,太阳能电池运行过程中平均湿度为39.3%(图8d)。太阳能电池的发电效率与输出功率高度依赖于光照强度的变化,如图8e所示,随着光照强度增加,电池背板的温度逐渐升高,空白太阳能电池和ECS太阳能电池最高温度分别达到69.2和56.5℃,平均温度分别为54.9和47.8℃,ECS的使用可为太阳能电池提供7.1℃的温降。电性能测试表明,从7:58到13:08期间ECS受热蒸发带走背板热量,其输出电压均高于空白太阳能电池,因此ECS可为太阳能电池提供约5h的冷却(图8f)。

综合两次户外实验结果可知,ECS在多云与晴朗两种典型天气条件下均能有效降低太阳能电池温度,温降幅度分别达5.2和7.1℃,并同步提升电池输出电压,证实其具备较强的环境适应性。另一方面,晴朗天气下ECS的冷却效果更显著,这归因于充足的太阳辐照为水分蒸发提供了驱动力。

3 结 论

针对光伏热管理中吸湿介质的盐泄漏问题,设计了基于LiCl-碳毡-PTFE复合吸附介质的ECS,通过实验室性能测试与户外实证实验,探究了其冷却特性与应用潜力,主要结论如下:

(1)PTFE膜兼具优异力学性能与超疏水特性,其最大抗拉强度达128MPa,静态接触角为150.8°。

(2)在 $1\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 光照强度下,ECS可使太阳能电池表面和背面温度分别降低10.7和11.8℃,平均输出电压和功率分别提升0.22V和10.4mW,光电转换效率相对提升7.8%。

(3)ECS在多云与晴朗两种典型天气条件下均表现出良好的环境适应性,分别实现5.2和7.1℃的温降。

参 考 文 献

- [1] Kim S, Park J H, Lee J W, et al. Self-recovering passive cooling utilizing endothermic reaction of $\text{NH}_4\text{NO}_3/\text{H}_2\text{O}$ driven by water sorption for photovoltaic cell[J]. *Nature Communications*, 2023, **14**: 2374.
- [2] Huang L, Wang Y P, He R J, et al. Solar-driven co-generation of electricity and water by evaporation cooling[J]. *Desalination*, 2020, **488**: 114533.
- [3] 朱涛,李强,宣益民,等. 太阳能光伏/光热化学利用系统[J]. *工程热物理学报*, 2021, **42**(4): 999-1003.
Zhu T, Li Q, Xuan Y M, et al. A photovoltaic/thermochemical hybrid solar system[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, **42**(4): 999-1003.
- [4] Hamzat A K, Sahin A Z, Omisanya M I, et al. Advances in PV and PVT cooling technologies: a review[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, **47**: 101360.
- [5] Yang L P, Sun T Y, Tang J B, et al. Photovoltaic-multistage desalination of hypersaline waters for simultaneous electricity, water and salt harvesting via automatic rinsing[J]. *Nano Energy*, 2021, **87**: 106163.
- [6] Zhou Z W, Zhang Y T, Liu W J, et al. Photovoltaic cooling and atmospheric water harvesting using a hygroscopic hydrogel[J]. *Desalination*, 2024, **583**: 117685.
- [7] Mariam E, Ramasubramanian B, Sumedha Reddy V, et al. Emerging trends in cooling technologies for photovoltaic systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, **192**: 114203.
- [8] Lv S, Ren J W, Zhang Q L, et al. Design, fabrication and performance analysis of a cost-effective photovoltaic interface seawater desalination hybrid system for co-production of electricity and potable water[J]. *Applied Energy*, 2023, **336**: 120811.
- [9] Liu M X, Sun Y K, Shao K, et al. Synergistic solar-powered water-electricity generation: an integrated floating system on water[J]. *Nano Energy*, 2024, **119**: 109074.
- [10] Xu N, Zhu P C, Sheng Y, et al. Synergistic tandem solar electricity-water generators[J]. *Joule*, 2020, **4**(2): 347-358.
- [11] Lopez-Pascual D, Valiente-Blanco I, Fernandez-Munoz M, et al. Theoretical modelling and optimization of a geothermal cooling system for solar photovoltaics[J]. *Renewable Energy*, 2023, **206**: 357-366.
- [12] Gad R, Mahmoud H, Hassan H. Performance evaluation of direct and indirect thermal regulation of low concentrated (via compound parabolic collector) solar panel using phase change material-flat heat pipe cooling system[J]. *Energy*, 2023, **274**: 127323.
- [13] Firoozzadeh M, Shiravi A H, Hodaie S. An experimental approach on employing air flow through a porous medium as coolant of photovoltaic module: Thermodynamics assessment[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, **40**: 101799.
- [14] 王晓梦,董波. 太阳能光伏电池板降温技术研究进展[J]. *煤气与热力*, 2024, **44**(7): 后插33-后插38.
Wang X M, Dong B. Research progress in cooling technology for solar photovoltaic panels[J]. *Gas & Heat*, 2024, **44**(7): 后插33-后插38.
- [15] Dai Q H, Xiang P, Li B W, et al. Highly reliable anti-reflection radiative cooling glass applicable to thermal management of solar cells[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, **498**: 155768.
- [16] Shan K P, Luo Q Z, Yun P F, et al. All-day working photovoltaic cooling system for simultaneous generation of water and electricity by latent heat recycling[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, **457**: 141283.
- [17] 代宝民,张佳宁,曹羽,等. 天空辐射过冷 CO_2 制冷系统性能分析[J]. *工程热物理学报*, 2024, **45**(11): 3227-3232.
Dai B M, Zhang J N, Cao Y, et al. Performance analysis of radiative sky subcooling CO_2 refrigeration system[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2024, **45**(11): 3227-3232.
- [18] Liu X Y, Li P L, Huang X Y. Passive cooling materials for electronic and electrical equipment[J]. *Accounts of Materials Research*, 2025, **6**(9): 1065-1078.

- [19] Bukar A M, Almerbati A, Shuja S Z, et al. Enhancing solar PV panel performance through active and passive cooling techniques: a comprehensive review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, **216**: 115611.
- [20] 李凌瞳. 基于相变冷却的太阳能热电联产系统研究[D]. 上海: 上海电力大学, 2020.
Li L T. Research on solar heat and power cogeneration system based on phase-change cooling[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2020.
- [21] 崔洁, 黎子琦, 陈艳等. 辐射制冷-相变耦合调温材料的制备及热管理应用研究进展[J/OL]. *复合材料学报*, 2025:1-22.
Cui J, Li Z Q, Chen Y, et al. Research progress in preparation of radiation cooling-phase change-coupled thermoregulation materials and thermal management application[J/OL]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025: 1-22.
- [22] Entezari A, Lin H, Esan O C, et al. Continuous humidity pump and atmospheric water harvesting inspired by a tree-pumping system[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2023, **4**(2): 101278.
- [23] Shi S K, Lv P F, Valenzuela C, et al. Scalable bacterial cellulose-based radiative cooling materials with switchable transparency for thermal management and enhanced solar energy harvesting[J]. *Small*, 2023, **19**(39): 2301957.
- [24] Herrando M, Wang K, Huang G, et al. A review of solar hybrid photovoltaic-thermal (PV-T) collectors and systems[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2023, **97**: 101072.
- [25] Li S, Shao K, Wu X C, et al. Self-contained moisture management and evaporative cooling through 1D to 3D hygroscopic all-polymer composites[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, **34**(9): 2310020.
- [26] Wang W W, Chen J W, Zhang C Y, et al. Green thermal management of photovoltaic panels by the absorbent hydrogel evaporative (AHE) cooling jointly with 3D porous copper foam (CF) structure[J]. *Energy*, 2024, **293**: 130467.
- [27] Boon-in S, Theerasilp M, Crespy D. Temperature-responsive double-network cooling hydrogels[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, **5**(4): 2562-2574.
- [28] Pu S R, Fu J, Liao Y T, et al. Promoting energy efficiency via a self-adaptive evaporative cooling hydrogel[J]. *Advanced Materials*, 2020, **32**(17): 1907307.
- [29] Li H R, Liu J N, Kang J W, et al. Encapsulated high-salt but corrosion-resistant hygroscopic medium for long-term passive solar cell cooling[J]. *Small*, 2025, **21**(17): 2408912.
- [30] 王佳韵. 基于复合活性炭纤维材料的吸附式空气取水原理与系统[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
Wang J Y. Research on principle and system of atmosphere water harvesting unit based on active carbon fiber composite material [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.