

辐射制冷复合型光伏组件的季节性性能分析

毕 涛^{1,2}, 顾文波^{1,2}, 许多伟^{1,2}

(1. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830017; 2. 西北能源碳中和教育部工程研究中心, 乌鲁木齐 830017)

摘 要: 通过实验和仿真探讨不同季节下光伏组件不同位置附加辐射制冷膜对其热电性能的影响。结果表明,在正面附加辐射制冷膜可显著降温,但因透射率下降导致电性能损失近70%;而背面附加膜在夏季平均降温5.08℃,功率约提升2%,维持高光电转换效率的同时可有效降低组件温度,在热管理和发电效率的综合方面表现更为优越。夏季时背面贴膜具有良好的降温效果,而在冬季平均环境温度为-10℃的低温环境下,组件温差降低0.59℃,通过减小温差的方式可延长使用寿命。同时,辐射制冷效果受辐照度、环境温度及风速的影响,高温高辐照度下贴膜降温效果更突出,而增强对流会削弱其降温效果。

关键词: 辐射制冷; 光伏组件; 热管理; 热电性能; 光电转换效率; 降温效果

中图分类号: TK514

文献标志码: A

0 引 言

随着全球能源需求的增长和环境保护意识的提高,光伏发电技术作为一种可再生能源的代表得到越来越广泛的应用和研究,然而光伏组件在实际运行过程中会受到多种因素的影响^[1],其中温度对光伏组件的影响极为显著,光伏组件在工作时吸收的太阳辐照部分转化为电能,剩余能量以热能形式积聚在组件内使组件温度上升,而组件温度越高发电效率越低。对于晶硅组件来说,输出功率随温度的下降系数为0.35%~0.50%^[4]。光伏组件的冷却方式一般可分为主动和被动两种类型^[5],主动冷却系统较为复杂^[6]且需能量输入,而自然条件的被动冷却效果有限,因此辐射制冷作为一种环保的被动冷却技术而受到广泛关注。

根据玻尔兹曼定律,一切温度高于绝对零度的物体都会以电磁波的形式向外发射能量^[7]。对于地面上的物体,天空可看作是一个巨大冷库^[8]。利用辐射制冷的光谱选择性,在“大气窗口”8~13 μm波段内具有高发射率,辐射热量至外太空,实现制冷的效果。建筑和农业领域的运用已经证明了辐射制冷良好的降温效果。赵斌等^[9]提出一种太阳能光伏发电-辐射制冷建筑一体化装置,同时具有白天光伏发电和夜间辐射制冷2种功能,可节约建筑安装面积,使装置实现全天候工作;闵心喆等^[10]提出一种基于辐射制冷和太阳能制热的温度自适应双层薄膜,可随温度响应实现不同环境条件下制冷/制热模式的智能切换。部分研究已开始尝试将辐射制冷技术应用于实际的光伏冷却系统中。黄珂等^[11]在相邻两排

光伏组件之间安装辐射制冷模块,有效降低了光伏组件温度;陆可归等^[12]提出一种全光谱协同管理策略,通过提升光伏组件在中红外波段的发射率并选择性降低吸收率,从而实现光伏组件冷却;赵斌等^[13]提出并设计制作了一种二氧化硅微光栅光子制冷器,用于对光伏组件进行辐射制冷。部分研究团队在开发高效辐射制冷材料方面已取得了显著进展。殷少等有^[14]研究了辐射制冷膜的材料和排列方式对制冷性能的影响,并对其组成和结构进行了优化;张星星^[7]研究了SiO₂纳米颗粒掺杂、红外辐射性能调控及辐射制冷涂层应用;王珂等^[15]提出一种周期性金字塔结构的聚二甲基硅氧薄膜,用于商业光伏组件的辐射冷却。当光伏组件表面覆盖有周期性金字塔微结构透明薄膜时,其温度可下降17.6 K,光电转换效率提升近8%^[16];而分层多孔复合材料利用光散射空气孔隙实现具有介电对比度的大量界面,具有很高的反射率^[17]。

尽管上述研究已采用辐射制冷技术有效降低了光伏组件温度,但对于辐射制冷材料与光伏组件组合方式及应用场景方面的研究仍较少。在夏季高温高辐照度环境中,正面贴附辐射制冷膜可显著降温但会损失发电效率,贴附在背面时降温效果降低,发电效率却不受影响,同时夏季与冬季的环境差异对辐射制冷膜的需求不同,因此探究在不同季节下,辐射制冷膜作用于光伏组件不同位置的效果可进一步提升光伏组件的发电性能,延长使用寿命。光伏组件与辐射制冷膜不同组合方式的季节性差异鲜少有系统研究,因此,本文通过建立热电模型和户外实验来评估辐射制冷膜对其热性能和电性能的具体影响,实验部分将提供辐射制冷膜在实际

收稿日期: 2025-02-10

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项课题(2023A01005-2); 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2022D01C87)

通信作者: 顾文波(1992—), 男, 博士、副教授, 主要从事可再生能源和太阳电池热物理方面的研究。bobo1314@situ.edu.cn

工作条件下的效果数据,模型进一步探讨不同情况下的理论预测及验证。通过比较在不同季节以及在组件表面不同位置贴附辐射制冷膜,确定最合适的覆盖位置,同时探究不同季节时辐射制冷膜的作用。

1 热电耦合模型

光伏组件的热与电是相互作用的,将热电模型相耦合有助于准确评估辐射制冷膜作用于组件的效果。

1.1 热模型

光伏组件的基本结构如图1所示,从上到下依次为玻璃板、EVA、太阳能电池、EVA、玻璃板、辐射制冷膜。热量通过各层的温差传递到上表面或者下表面,然后通过对流或者辐射的方法进行能量耗散,为简化计算本文假设光伏组件水平方向上的温度均匀分布。

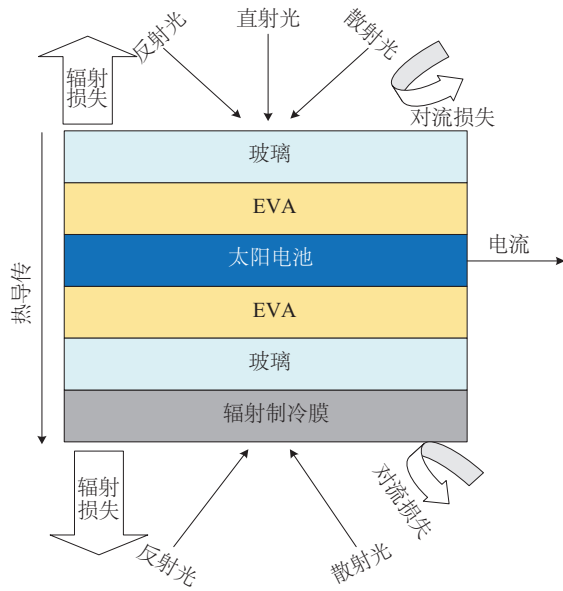


图1 热模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermal model

以光伏组件的各层结构为研究对象,建立各层的能量守恒方程^[18]。

玻璃:

$$c_{p,g} \delta_g \rho_g \frac{\Delta T_g}{\Delta t} = \alpha_g GA + \frac{T_{EVA1} - T_g}{R_{cond,EVA1-g} + R_{con1}} - \frac{T_g - T_a}{R_{conv,g-a}} - \frac{T_g - T_{sky}}{R_{rad,g-sky}} \quad (1)$$

式中:下标 g ——玻璃; c_p ——比热容, $J/(kg \cdot K)$; δ ——厚度, m ; ρ ——密度, kg/m^3 ; t ——时间, s ; α ——吸收率; T_{EVA1} ——上层EVA温度, K ; T_a ——环境温度, K ; T_{sky} ——天空温度, $T_{sky} = 0.0552T_a^{1.5}$, K ; R_{con1} ——EVA和玻璃之间的接触热阻, K/W ; $R_{cond,EVA1-g}$ ——上层EVA与玻璃之间的导热热阻, K/W ; $R_{conv,g-a}$ ——玻璃与环境的对流热阻, K/W ; $R_{rad,g-sky}$ ——玻璃与

环境的辐射热阻, K/W 。

上层EVA和下层EVA:

$$c_{p,EVA1(2)} \delta_{EVA1(2)} \rho_{EVA1(2)} \frac{\Delta T_g}{\Delta t} = \frac{T_{PV} - T_{EVA1(2)}}{R_{cond,PV-EVA1(2)} + R_{con2(3)}} - \frac{T_{PV} - T_{EVA1(2)}}{R_{cond,EVA1(2)-g} + R_{con3(4)}} \quad (2)$$

式中: T_{PV} ——光伏组件温度, K ; R_{con2} 、 R_{con3} ——光伏组件和上下两层EVA之间的接触热阻, K/W ; $R_{cond,PV-EVA1}$ 、 $R_{cond,PV-EVA2}$ ——PV和上下两层EVA之间的导热热阻, K/W ; R_{con4} ——EVA和下层玻璃之间的接触热阻, K/W 。

太阳能电池:

$$C_{p,PV} \delta_{PV} \rho_{PV} \frac{\Delta T_{PV}}{\Delta t} = (\tau_g GA - P_{mpp}) - \frac{T_{PV} - T_{EVA1}}{R_{cond,PV-EVA1} + R_{con2}} - \frac{T_{PV} - T_{EVA2}}{R_{conv,PV-EVA2} + R_{con3}} \quad (3)$$

式中:下标 PV ——太阳能电池; τ_g ——玻璃穿透率; P_{mpp} ——光伏在最大功率点时的发电功率, W 。

下方玻璃板:

$$c_{p,g} \delta_g \rho_g \frac{\Delta T_{g1}}{\Delta t} = \frac{T_{EVA2} - T_{g1}}{R_{cond,EVA2-g1} + R_{con4}} - \frac{T_{g1} - T_{radc}}{R_{cond,g1-radc} + R_{con5}} \quad (4)$$

式中:下标 $g1$ ——下方玻璃; T_{g1} ——下层玻璃背板的温度, K ; T_{radc} ——辐射制冷膜的温度, K ; $R_{cond,EVA2-g1}$ ——EVA和下层玻璃之间的导热热阻, K/W ; $R_{cond,g1-radc}$ ——下层玻璃和辐射制冷膜之间的导热热阻, K/W 。

辐射制冷膜:

$$C_{p,radc} \delta_{radc} \rho_{radc} \frac{\Delta T_{radc}}{\Delta t} = \alpha_{radc} GA + \frac{T_{g1} - T_{radc}}{R_{cond,g1-radc} + R_{con5}} - \frac{T_{radc} - T_a}{R_{conv,radc-a}} - \frac{T_{radc} - T_{sky}}{R_{rad,radc-sky}} \quad (5)$$

式中:下标 $radc$ ——辐射制冷膜; R_{con5} ——下层玻璃和辐射制冷膜之间的接触热阻, K/W ; $R_{conv,radc-a}$ ——辐射制冷膜与环境的对流热阻, K/W ; $R_{rad,radc-sky}$ ——辐射制冷膜与环境的辐射热阻, K/W 。

1.2 电模型

根据电学模型可计算出光伏组件的输出功率,本文采用星火太阳能公司生产的 SFM-50 W 光伏组件,标况下开路电压为 21.6 V,短路电流为 3.06 A,最大功率点电压为 18 V,最大功率点电流为 2.78 A,最大功率点功率为 50 W。标况下,光伏组件的电流与电压关系为^[19]:

$$I = I_{ph,ref} - I_{0,ref} \left[\exp \left(\frac{V + IR_{s,ref}}{N_s V_{t,ref}} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_{s,ref}}{R_{p,ref}} \quad (6)$$

下标“ref”表示标准状况下的相关参数,式(6)中有5个代求参数,求解方法如下^[19]。

标况下二极管热电压 $V_{t,ref}$:

$$V_{t,ref} = \frac{\beta T_{c,ref} - V_{oc,ref}}{\frac{N_s T_{c,ref} \alpha}{I_{ph,ref}} - 3N_s - \frac{q E_{g,ref} N_s}{KT_{c,ref}}} \quad (7)$$

标况下光生电流 $I_{ph,ref}$:

$$I_{ph,ref} \approx I_{sc,ref} \quad (8)$$

标况下二极管饱和电流 $I_{0,ref}$:

$$I_{0,ref} = I_{sc,ref} \exp\left(\frac{-V_{oc,ref}}{N_s V_{t,ref}}\right) \quad (9)$$

$$I_{mpp,ref} = I_{ph,ref} - I_{0,ref} \left[\exp\left(\frac{V_{mpp,ref} - R_{s,ref} I_{mpp,ref}}{N_s V_{t,ref}}\right) - 1 \right] - \frac{(V_{mpp,ref} + I_{mpp,ref} R_{s,ref}) \left[(V_{mpp,ref} - I_{mpp,ref} R_{s,ref}) (I_{sc,ref} - I_{mpp,ref}) - N_s V_{t,ref} I_{mpp,ref} \right]}{(V_{mpp,ref} - I_{mpp,ref} R_{s,ref}) (V_{mpp,ref} - N_s V_{t,ref})} \quad (10)$$

标况下串联电阻 $R_{s,ref}$:

$$R_{s,ref} = \frac{(V_{mpp,ref} - I_{mpp,ref} R_{s,ref})(V_{mpp,ref} - N_s V_{t,ref})}{(V_{mpp,ref} - I_{mpp,ref} R_{s,ref})(I_{sc,ref} - I_{mpp,ref}) - N_s V_{t,ref} I_{mpp,ref}} \quad (11)$$

图 2 所示为热电耦合模型的求解过程。首先,导入当天的天气数据以及光伏组件的特征参数,计算光伏组件在标准状况下的 PV 特性参数。接着,在模型中初始化光伏组件每一层材料的温度数据,计算组件产生的电和热。然后,根据热学模型计算每一层材料新的温度值,当该时间点的相关方程收敛时,停止迭代,进行下一个时间点温度的求解^[18],进而求得光伏组件的温度和功率输出状况。

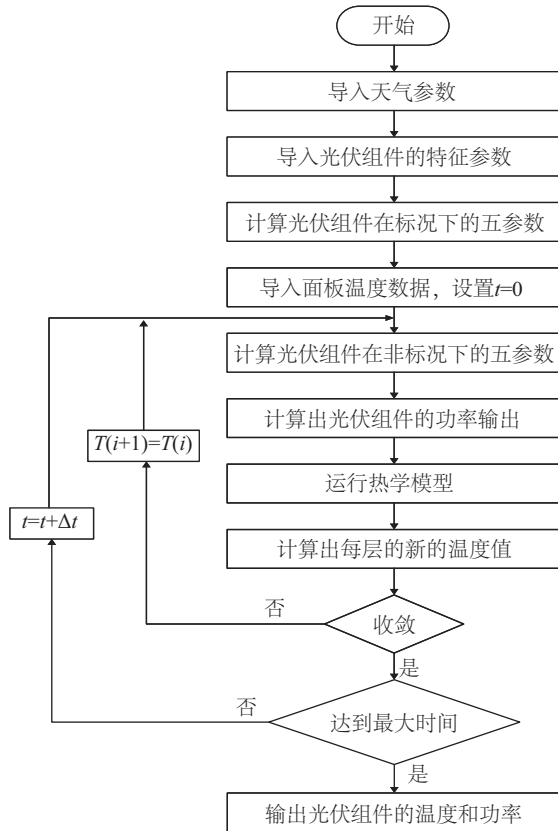


图 2 热电模型求解过程

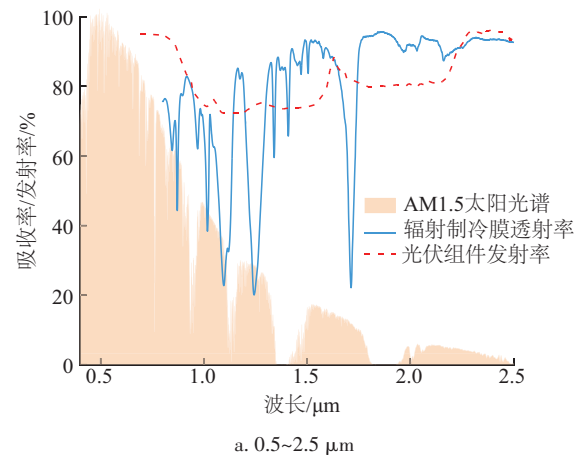
Fig. 2 Thermoelectric model solution process

2 实验与表征

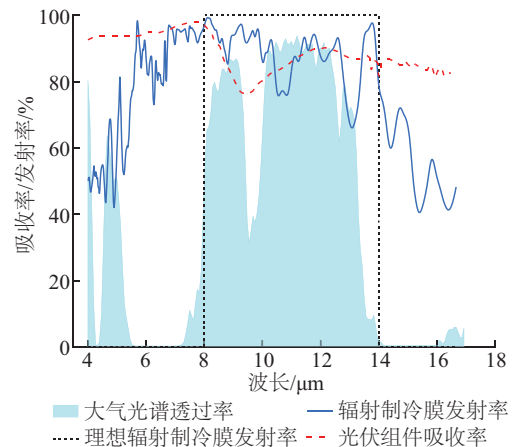
2.1 光谱表征

在实际环境测量光伏组件温度的实验中,本文同样采用 SFM-50W 型号的光伏组件。下文将用普通组件、正面辐射组件、背面辐射组件分别表示未贴附辐射制冷膜的光伏组件、正面和背面附加辐射制冷膜的光伏组件。为了评估光伏组

件和辐射制冷膜的具体性能,尤其是 500~2500 nm 波长范围内的吸收光谱,本文采用紫外、可见分光光度计进行测量,以 AM 1.5 的太阳光谱作为参考的同时表征辐射制冷膜的光谱透过率。在红外波段(4.0~16.5 μm),用傅里叶变换红外光谱仪(Thermo Scientific Nicolet iS20)测量光伏组件和辐射制冷膜的透射率和反射率,通过 MODTRAN 获得中纬度夏季地区的 1000 个标准大气压(atm)在天顶角下的的大气光谱透射率分布为参考^[20]。经过测量,光伏组件的光谱透过率在大多数波长范围内均接近于 0,可根据基尔霍夫定律计算发射率,测量结果如图 3 所示。由实验结果知,光伏组件在 0.5~1.1 μm 波长范围内展现出良好的太阳光吸收能力,平均吸收率高达



a. 0.5~2.5 μm



b. 4~16 μm

图 3 光伏组件与辐射制冷膜的光谱性能

Fig. 3 Spectral performance of solar cells and radiation cooling films

89.55%, 对应于晶硅光伏组件 1.122 eV 的带隙, 但在 1.1~2.5 μm 范围内, 组件也保持着较高的吸收率, 亚带隙的光子无法转化为电, 会以热量的形式留在光伏组件内部, 导致组件温度升高。辐射制冷膜的透射率在这一波长范围的波动较大, 平均透射率为 65.68%。光伏组件在 4~16 μm 的波段内均有较高的吸收率, 辐射制冷膜在 8~13 μm 范围内的平均发射率高达 88.29%, 具有良好的降温潜力。

2.2 室外实验

为研究辐射制冷膜在实际运行环境中的降温能力, 第一期实验于 2024 年 6 月 18 日进行, 实验地点为新疆大学某处开阔的空地, 实验设备如图 4 所示。实验过程中将光伏组件朝南摆放, 倾斜角度调整为 PV_{syst} 模拟得出的乌鲁木齐地区最佳倾角约为 35°, 整套装置安置在铺有高发射率的纸板作为地板的方桌上。

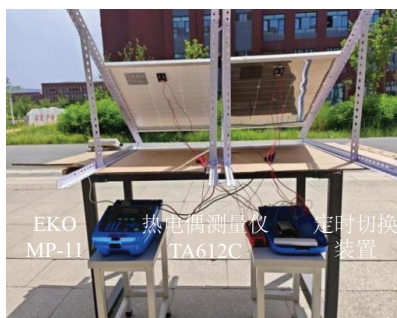


图 4 实验装置图

Fig. 4 Experimental setups

将 K 型热电偶紧贴在光伏组件背面的中心位置, 用于采集组件的温度数据, 热电偶的准确度为 $\pm 0.2\% + 0.7^\circ\text{C}$, 测量范围为 -200~1372 $^\circ\text{C}$ 。在辐射制冷膜的中心位置裁剪出一个半径约为 5 mm 的圆孔, 使热电偶可直接和组件的背板连接, 避免对热电偶造成隔热的影响, 同时采用 EKO MP-11 记录辐照度和组件的电学性能。

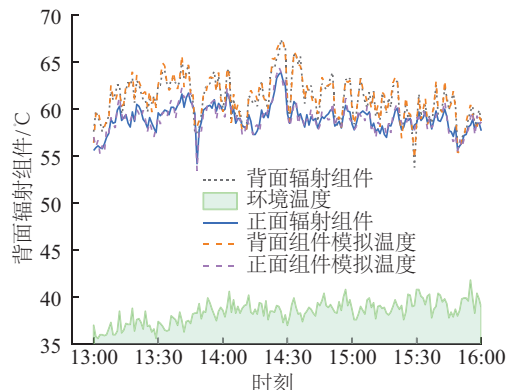
温度、辐照度和电学数据均是间隔时间为 1 min 的连续测量数据, 为了保证数据的准确性, 提前 10 min 进行测量, 仅通过这 10 组数据判断温度是否已达到动态平衡, 并不计入实验数据。

3 结果与讨论

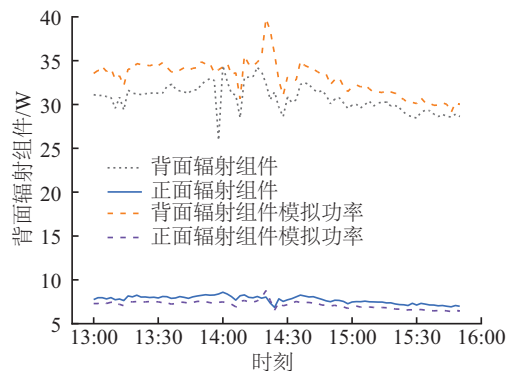
3.1 模型验证

采用实测数据作为环境温度的边界条件, 基于 Matlab 搭建热电偶模型, 分别计算正面和背面辐射组件的表面温度, 将实测数据作为变工况的条件, 分别计算正面辐射组件和背面辐射组件的最大输出功率, 即可计算出光伏组件在两种条件下的输出功率, 模拟结果与实验数据如图 5 所示。

为验证模型计算的合理性, 本文选择平均绝对百分比误差 (mean absolute percentage error, MAPE) 作为评价指标, MAPE 越小表示模型的预测结果与实际值之间的差异越小。本文



a. 实测温度与模拟数据



b. 实测功率与模拟数据

图 5 6月26日实测与模拟数据对比

Fig. 5 Comparison of actual and simulated data on June 26th

建立的热学模型在两种条件的 MAPE 分别为 0.0082 和 0.0085, 电学模型的 MAPE 分别为 0.0756 和 0.0785。比较仿真结果和实验数据可知, 本文建立的理论模型可以很好地模拟光伏组件中热传导和发电功率的效果, 产生的偏差可能是测量时间存在间隔 (辐照度和风速的瞬时波动会对温度和输出功率造成影响), 以及 K 型热电偶和 EKO MP11 存在的仪器误差, 但大多数数据的拟合效果较好。

3.2 不同放置方式的比较

在 6 月 18 日进行时长 5 h 的实验, 几组温度随时间的变化曲线如图 6 所示, 在当天的实测环境中, 背面辐射组件比普通组件的温度平均低 5.08 $^\circ\text{C}$, 可见辐射制冷膜对光伏组件有着较为明显的降温效果, 输出功率会出现约 2% 的提升。两光伏组件于 5 月 20 日放置于室外, 对比两组件的温度数据可发现, 在近 1 个月的户外环境下, 辐射制冷膜的降温效果未出现明显下降。

为对比辐射制冷膜不同放置方式产生的影响, 于 6 月 26 日再次进行实验, 探究正面组件和背面组件的热性能和电性能。从 13:00 开始, 连续记录 3 h, 测量时段内的平均太阳辐照度为 1180 W/m^2 , 峰值辐照度出现在 14:20, 为 1267 W/m^2 , 平均环境温度为 38.43 $^\circ\text{C}$, 最高温度出现在 15:55, 为 41.8 $^\circ\text{C}$, 测量结果如图 5 所示, 正面辐射组件和背面辐射组件的平均温度为

58.98、61.01 °C,在测试时间内,正面辐射组件的平均降温效果比背面辐射组件高 2.03 °C,可以看出正面辐射组件的降温效果优于背面辐射组件,并且在 14:30 达到最大降温幅度 6.01 °C。这是因为光伏组件在工作时正面直接接收到的直射辐照量较大,而且正面受到的天空的散射辐射更多,通过 PVsyst 模拟得出的辐照度的逐时数据,在 12:00 时,太阳直射辐照度占总辐照量的 74.12%,正面覆盖辐射制冷膜会阻挡部分直射光,还有一部分被反射回空气或环境中,减少了光伏组件正面接收到的直射辐照度,同时将多余的热量辐射出去。

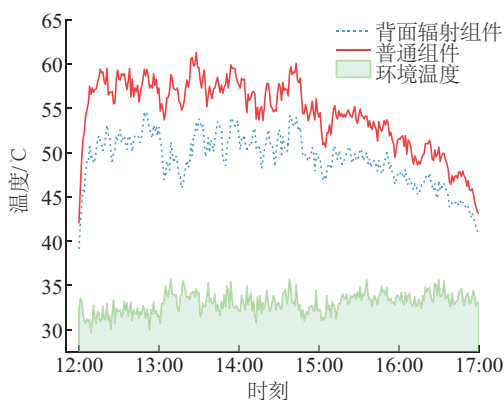


图6 6月18日测试温度数据图

Fig. 6 Test temperature data chart on June 18th

背面接收到的光源主要来自地面反射和散射辐射,以纸板为地面时,平均地面反照率为 5.12%,所受的辐照量远少于正面,辐射制冷膜主要通过辐射散热将正面传导过来的热量散发出去,以保持整体的温度平衡。而辐射制冷膜在 0.5~1.2 μm 波长范围内的透射率较低,温度降低的正向效应无法抵消透光率降低的负效应,最终整体功率显著下降,正面辐射组件的平均功率甚至低于背面辐射组件的 30%,因此贴附在组件背面的效果远好于覆盖在正面。

3.3 不同季节降温效果的比较

为验证辐射制冷膜在不同季节的降温效果,于 2024 年 12 月 12 日—20 日进行冬季实验,实验时长 160 min,如图 7 所示,当辐照度和环境温度逐渐下降时,辐射制冷膜的降温效果随之减弱,在 14:00 后,背面辐射组件的温度甚至高于普通组件。控制环境温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,风速为 1 m/s,如图 8 所示,随着辐照度的下降,背面辐射组件的温度与普通组件的温差 Δt_1 逐渐降低,在辐照度低于 400 W/m^2 时, Δt_1 变为负数,普通组件的温度低于背面辐射组件。而光伏组件的最佳工作温度为 $25\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$,实验数据表明,在低温环境下辐射制冷无法带来输出功率的提升。为了验证在低辐照度及低环境温度情况下 Δt_1 的变化情况,于 2025 年 1 月 20 日夜进行 3 h 的夜间实验,在实验时段内,背面辐射组件的大多数温度数据高于普通组件,尤其在光伏组件温度低于环境温度时更加显著。

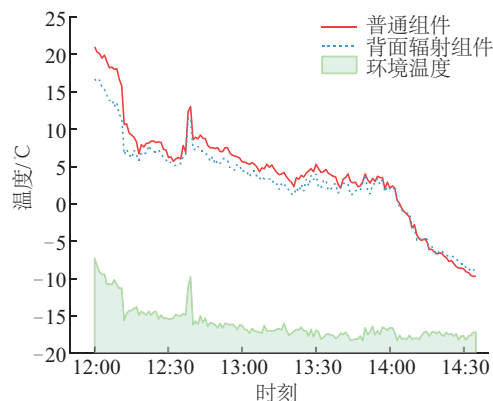


图7 12月20日测试温度数据图

Fig. 7 Test temperature data chart on December 20th

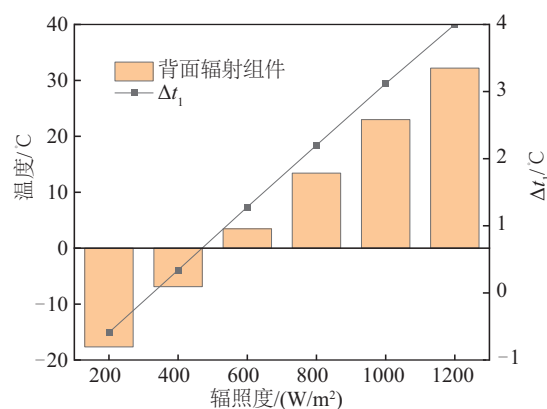


图8 低温环境下光伏组件的模拟温度

Fig. 8 Simulated temperature of solar cells in low-temperature environment

在低温环境下,空气密度变大,光伏组件的热传导和对流散热效果显著增强,普通组件通过自然对流和热传导散热,而辐射制冷膜本身具有一定热阻,导致热量不能快速传导到环境中且会对对流造成阻碍,从而导致辐射制冷的效果减弱。

当光伏组件温度低于环境温度时,非辐射传热会对辐射制冷造成不利的影响,环境会通过导热和对流的方式向组件传递热量,削弱辐射制冷的效果,使背面辐射组件的温度高于普通组件。因此,在冬季,辐射制冷膜可降低组件的最高温度,提升组件的最低温度,减小光伏组件的温差,有助于减缓光伏组件的老化过程。

3.4 关键影响因素分析

3.4.1 风速

由图 5 可得,在 6 月 26 日 13:45 与 15:30 的附近时间段内,背面辐射组件的温度与正面辐射组件的温差 Δt 十分细微,甚至出现了背面辐射组件温度更低的情况,从图 4 可以看出,两组件均朝南摆放,且背面辐射组件放置在东侧,正面辐射组件在西侧放置,测量时段内新疆大学的风向为东风,在风速较强时,背面辐射组件的表面产生强对流的同时阻挡

了正面辐射组件的对流。将辐照度设置为 1000 W/m^2 , 环境温度调整为 30°C , 如图 9, 随着风速从 0 m/s 增至 2.5 m/s , Δt 从 5.09°C 降为 2.12°C 。通过对比不同风速时背面辐射组件与普通组件的温度变化, 对流的增强可有效降低普通组件的温度, 提升光伏组件的发电效率, 辐射制冷膜在一定程度上会阻碍光伏组件的对流散热, 随着风速的增大, 普通组件的降温效果优于背面辐射组件, 因此风速的增大间接削弱了辐射制冷膜的降温效果。

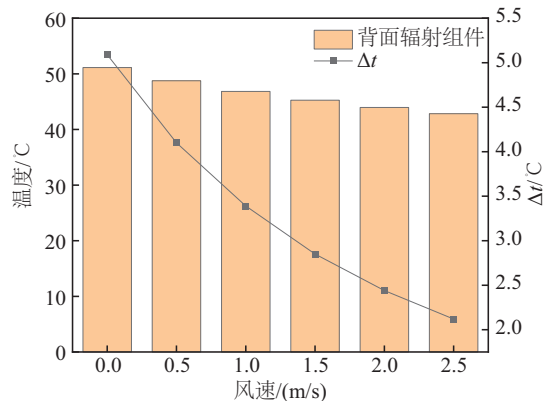


图9 风速对温度的影响

Fig. 9 Effect of wind speed on temperature

3.4.2 辐照度和环境温度

从图 8 可看出, 光伏组件的温度与辐照度呈正相关, 随着辐照度的增加, 光伏组件吸收更多的太阳能, 温度相应上升。图 10 所示为光伏组件的温度随太阳辐照度和环境温度的变化情况, 固定风速为 1 m/s 。当辐照度为 1000 W/m^2 时, 随着温度从 35.15°C 升至 46.83°C , Δt_1 从 3.23°C 增至 3.39°C , 当环境温度为 32°C 时, 辐照度从 600 W/m^2 变为 1200 W/m^2 , Δt_1 也从 1.24°C 增至 4.41°C , 因此辐照度地增加和环境温度的升高均能使光伏组件温度升高, 辐射制冷膜的降温效果随之越好。

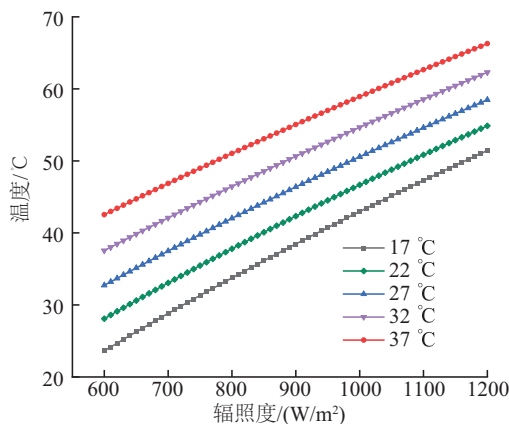


图10 辐照度和环境温度对背面辐射组件温度的影响

Fig. 10 Effect of irradiance and ambient temperature on temperature of back radiation module

4 结 论

本文建立光伏组件的热电耦合模型, 通过辐射制冷膜优化其光谱性能, 根据实验验证辐射制冷膜的降温效果, 同时讨论光伏组件与辐射制冷膜的不同组合方式以及实际环境因素对热电性能的影响, 得到如下结论:

1) 相比于普通组件, 正面辐射组件的输出功率有所下降, 背面辐射组件的配置在降温的同时保证了光伏组件正面的高效光电转换。未来可开发在 $0.5\sim 1.2 \mu\text{m}$ 的波段范围内具有高透射率以及在 $1.1\sim 2.5 \mu\text{m}$ 的波长范围内具有高反射率的辐射制冷膜, 将其放置在光伏组件正面以平衡降温与透光能力, 进一步提升光伏组件的综合性能。

2) 在冬季或低温低辐照度的情况下, 当环境温度为 -10°C , 辐照度为 200 W/m^2 时, 背面辐射组件的温度比普通组件高 0.59°C , 此时辐射制冷膜可降低光伏组件自身的温差, 有助于提高光伏组件的使用寿命。

3) 辐射制冷膜的降温效果会随辐照度的增加和环境温度的升高而增强, 环境温度为 32°C 时, 辐照度从 600 W/m^2 增至 1200 W/m^2 , Δt_1 随之升高 3.17°C 。在辐照度为 1000 W/m^2 , 环境温度为 30°C 的条件下, 风速从 0 m/s 增至 2.5 m/s , Δt 减少 2.97°C , 因此增强对流对降温效果有不利影响。

[参考文献]

- [1] BIWOLE P H, ECLACHE P, KUZNIK F. Phase-change materials to improve solar panel's performance[J]. Energy and buildings, 2013, 62: 59-67.
- [2] SHEN L, LI Z P, MA T. Analysis of the power loss and quantification of the energy distribution in PV module[J]. Applied energy, 2020, 260: 114333.
- [3] DUBEY S, SARVAIYA J N, SESHADRI B. Temperature dependent photovoltaic(PV) efficiency and its effect on PV production in the world: a review[J]. Energy procedia, 2013, 33: 311-321.
- [4] NIŽETIĆ S, GIAMA E, PAPADOPOULOS A M. Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part II : active cooling techniques [J]. Energy conversion and management, 2018, 155: 301-323.
- [5] KOŞAN M, DEMIRTAŞ M, AKTAŞ M, et al. Performance analyses of sustainable PV/T assisted heat pump drying system[J]. Solar energy, 2020, 199: 657-672.
- [6] RADZIEMSKA E. The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells [J]. Renewable energy, 2003, 28(1): 1-12.
- [7] 张星星. SiO_2 纳米颗粒掺杂、红外辐射性能调控及辐射

- 制冷涂层应用[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.
- ZHANG X X. Doping of SiO_2 nanoparticles, modulation of infrared radiation properties and their application in radiative cooling coatings [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2023.
- [8] 程子明. 仿生型日间辐射制冷涂层的理论设计及其制冷性能实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- CHENG Z M. Theoretical designation and experimental research on cooling performance of biomimetic daytime radiative cooling coating [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [9] 赵斌, 胡名科, 敖显泽, 等. 太阳能光伏发电-辐射制冷建筑一体化复合装置的性能分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(5): 1267-1275.
- ZHAO B, HU M K, AO X Z, et al. Performance analysis of building integrated composite apparatus for both solar photovoltaic and radiative cooling[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2019, 40(5): 1267-1275.
- [10] MIN X Z, WANG X Y, LI J L, et al. A smart thermal-gated bilayer membrane for temperature-adaptive radiative cooling and solar heating [J]. *Science bulletin*, 2023, 68(18): 2054-2062.
- [11] 黄珂, 张吉, 张卓奋, 等. 基于天空辐射冷却系统的光伏组件降温研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(2): 361-365.
- HUANG K, ZHANG J, ZHANG Z F, et al. Cooling performance study of photovoltaic modules with sky radiative cooling systems [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2023, 44(2): 361-365.
- [12] LU K G, ZHAO B, XU C F, et al. A full-spectrum synergetic management strategy for passive cooling of solar cells [J]. *Solar energy materials and solar cells*, 2022, 245: 111860.
- [13] ZHAO B, LU K G, HU M K, et al. Radiative cooling of solar cells with micro-grating photonic cooler [J]. *Renewable energy*, 2022, 191: 662-668.
- [14] 殷少有, 覃羽丰, 张宁. 辐射制冷膜的性能分析与优化设计[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 231-234.
- YIN S Y, QIN Y F, ZHANG N. Performance analysis and optimization design of radiation cooling film [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2021, 42(8): 231-234.
- [15] WANG K, LUO G L, GUO X W, et al. Radiative cooling of commercial silicon solar cells using a pyramid-textured PDMS film [J]. *Solar energy*, 2021, 225: 245-251.
- [16] ZHU L X, RAMAN A, WANG K X, et al. Radiative cooling of solar cells [J]. *Optica*, 2014, 1(1): 32-38.
- [17] AHMED S, LI S J, LI Z P, et al. Enhanced radiative cooling of solar cells by integration with heat pipe [J]. *Applied energy*, 2022, 308: 118363.
- [18] GU W B, MA T, SHEN L, et al. Coupled electrical-thermal modelling of photovoltaic modules under dynamic conditions [J]. *Energy*, 2019, 188: 116043.
- [19] MA T, GU W B, SHEN L, et al. An improved and comprehensive mathematical model for solar photovoltaic modules under real operating conditions [J]. *Solar energy*, 2019, 184: 292-304.
- [20] Spectral Sciences Inc. MODTRAN[EB/OL]. <https://modtran.spectral.com>.

SEASONAL PERFORMANCE ANALYSIS OF RADIATIVE COOLING COMPOSITE SOLAR CELLS

Bi Tao^{1,2}, Gu Wenbo^{1,2}, Xu Duwei^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

2. Engineering Research Center of Northwest Energy Carbon Neutrality, Ministry of Education, Urumqi 830017, China)

Abstract: This paper explores the effects of attaching radiative cooling films at different positions of solar cells in different seasons on their thermoelectric performance through experiments and simulations. The results show that attaching a radiative cooling film on the front side can significantly reduce temperature, but due to the decrease in transmittance, the electrical performance is lost by nearly 70%; while attaching a film on the back side can reduce the average temperature by 5.08 °C in summer, and the power is approximately increased by 2%, maintaining a high photoelectric conversion efficiency while effectively reducing the module temperature. In terms of the comprehensive performance of thermal management and power generation efficiency, it performs even better. In summer, the film on the back side has a good cooling effect, and in a low-temperature environment with an average ambient temperature of -10 °C in winter, the temperature difference of the module decreases by 0.59 °C. By reducing the temperature difference, the service life can be extended. At the same time, the radiative cooling effect is affected by irradiance, ambient temperature and wind speed. The cooling effect of attaching a film is more prominent under high temperature and high irradiance conditions, while enhancing convection will weaken its cooling effect.

Keywords: radiative cooling; photovoltaic modules; thermal management; thermoelectric performance; photoelectric conversion efficiency; cooling effect