

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-10
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260209001

集成辐射制冷膜的光伏组件性能评估与优化研究

许多伟^{1,2} 顾文波^{1,2} 毕涛^{1,2} 张若晖^{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 本文通过建立光伏组件-辐射制冷膜一体化组件的热电耦合模型并展开数值模拟仿真,系统研究了辐射制冷膜在光伏组件不同贴附位置及不同天气条件下的冷却效果与影响因素。研究表明,将制冷膜贴附于光伏组件背面时,虽降温幅度低于正面贴附,但避免了阻挡正面辐照带来的功率损失,综合电性能更优,平均降温4.55 °C,功率提升3.7%;但在理想条件下,若制冷膜在可见光波段高透射、近红外波段高反射,贴附于正面将实现更显著的降温(9.59 °C)与功率提升(7.83%);在不同天气条件下,辐射制冷膜在夏季晴天降温效果最佳,而在冬季阴天等低温低辐照条件下因热阻效应导致组件温度升高;辐照度、环境温度与冷却效果呈正相关,而风速呈负相关,其中辐照度对辐射制冷膜的降温增效影响最大。

关键词 辐射制冷;光伏组件;热管理;热电耦合

中图分类号: TK514;S214.4

文献标识码: A

Performance Evaluation and Optimization Study of Photovoltaic Modules Incorporating Radiative Cooling Films

Xu Duowei^{1,2} Gu Wenbo^{1,2} Bi Tao^{1,2} Zhang Ruohui^{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 study systematically investigated the cooling efficacy and influencing factors of radiative cooling films across different attachment positions on photovoltaic modules under varying weather conditions by establishing a thermoelectric coupling model for integrated photovoltaic module-radiative cooling film assemblies and conducting numerical simulations. These findings indicate that while attaching the cooling film to the rear surface of the PV module yields a slightly lower temperature reduction than the front-side attachment, it avoids power losses caused by obstructing front-side irradiation, resulting in superior overall electrical performance. This configuration achieves an average temperature reduction of 4.55 °C and a power increase of 3.7%. However, under ideal conditions, if the cooling film exhibits high transmittance in the visible spectrum and high reflectance in the near-infrared spectrum, front-side application achieves more pronounced cooling (9.59 °C) and power enhancement (7.83%). Under varying weather conditions, the radiative cooling film demonstrates optimal cooling performance during sunny summer days. Conversely, under low-temperature, low-irradiance conditions such as overcast winter days, the thermal resistance effect increases the module temperatures. Furthermore, irradiance and ambient temperature exhibit positive correlations with cooling efficiency, whereas wind speed shows a negative correlation. Among these factors, the irradiance exerts the most significant influence on the cooling performance of radiative cooling films.

Keywords radiative cooling; photovoltaic modules; thermal management; thermoelectric coupling

随着全球能源需求持续攀升与环境问题日益严峻,开发清洁高效的可再生能源已成为应对能源危机的关键。在众多可再生能源中,太阳能因其资源储量丰富、分布广泛且获取便捷等优势备受瞩目,如何实现太阳能的高效利用始终是研究领域的核心议题。光伏组件作为将太阳光直接转换为电能的核心

设备,一直是学术界和产业界关注的焦点。然而在实际运行中,光伏组件面临的主要问题是:仅有约20%的太阳能被有效转化为电能,剩余能量大部分以热能形式积聚在电池内部,导致组件温度急剧上升^[1]。研究表明,晶硅太阳能电池温度每升高1 °C,效率下降约0.45%,高温严重影响了光伏组件的性能

收稿日期:2026-02-09;修回日期:2026-03-06;录用日期:2026-03-20

责任编辑:王亚薇



移动阅读

和寿命^[2]。

针对该难题,研究者尝试过不少降温方法,如风冷、水冷、热管散热等^[3-5]。但这些主动冷却方法一般需要额外输入能量,不仅增加系统复杂性和成本,还很难兼顾环保和高效的要求。在该背景下,辐射制冷技术作为一种创新的被动冷却方式,凭借其无需外部能量输入、可直接将地表物体热量通过红外辐射传递至超低温外太空的独特优势,为光伏电池的高效冷却提供了新思路。任何温度高于绝对零度的物体都会持续以电磁波的形式释放能量,外太空相对于地球表面而言,是一个巨大的冷源^[6],热量总是自发地从温度较高的物体向温度较低的物体传递,利用辐射制冷的光谱选择性,在大气窗口(8~13 μm)波段具有高发射率,将热量辐射至外太空,从而实现地表物体的辐射冷却^[7]。

辐射制冷在针对面向天空的表面时降温显著,引发了研究者利用辐射制冷对光伏组件进行降温增效的关注。在结构设计上,Gao Kai等^[8]采用PDMS (polydimethylsiloxane)薄膜的随机倒金字塔结构,增强红外发射率和光捕获能力,结果显示光伏组件温度降低 17 °C,冷却功率提升 67 W/m²;S. Y. Heo等^[9]开发了一种光捕获辐射制冷器,结合二维光栅结构,应用于多节太阳能电池,户外实验显示电池温度降低 6.1 °C,效率显著提升;Fang Huangyu等^[10]设计了垂直安装的V形反射结构光伏板,利用双面辐射制冷,使光伏组件温度降低 10.6 °C,尤其适用于高纬度地区。在开发高效辐射制冷材料方面,Tu Yiteng等^[11]在PDMS薄膜中嵌入规则排列的SiO₂颗粒,优化可见光透射率和红外发射率,使电池温度降低 9.5 °C,输出功率提升 13.3%;Li Fuxiang等^[12]提出了一种结合辐射制冷与蒸发冷却的双功能水凝胶材料,用于光伏板被动降温,实现全天候降温,效率显著提升;He Jiajun等^[13]开发出一种湿度敏感的彩色薄膜,该薄膜通过湿度敏感的钴基络合物实现太阳光和红外波段的动态双波段光谱调节,在 25%~90%湿度范围内自适应提升制冷效率。

虽然上述研究利用辐射制冷技术有效降低了光伏组件的工作温度,但对于辐射制冷膜在光伏组件上的贴附位置及其在不同应用场景中的表现仍缺乏探讨。为此,本文通过建立光伏组件-辐射制冷膜一体化组件的热电耦合模型并进行数值模拟仿真,系统研究了辐射制冷膜在光伏组件不同贴附位置及不同天气条件下的冷却效果,分析了影响辐射制冷膜冷却性能的关键因素,并进行了敏感性分析。

1 热电耦合模型

光伏组件在工作中存在电与热之间的相互作用,通过构建热电耦合的数学模型,能够更精确地评估辐射制冷膜对光伏组件的冷却效果^[14]。该模型中,电学模型的输入参数包括太阳辐照度以及由热学模型计算得到的电池片温度,输出参数为光伏组件的输出功率。基于电学模型输出的功率结果,可进一步确定系统的内部热源,并将其与辐照度、风速、环境温度等参数共同作为热学模型的输入,从而实现电学与热学过程的闭环耦合求解。

1.1 热学模型

光伏组件集成辐射制冷膜的基本结构如图 1 所示,自上而下依次为玻璃盖板、EVA (ethylene-vinyl acetate copolymer)胶膜、光伏电池 EVA 胶膜、背板及辐射制冷膜。

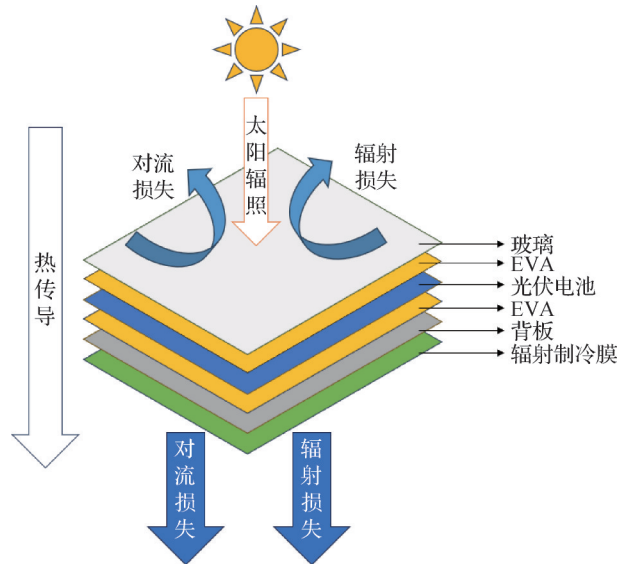


图 1 热模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of thermal model

以集成了辐射制冷膜的光伏组件中的各层结构为研究对象,建立各层结构的能量守恒方程如下:

玻璃:

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

式中: A 为面积, m^2 ; c_p 为比定压热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; δ 为厚度, m ; ρ 为密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; α 为吸收率; G 为太阳辐照度, W/m^2 ; T_{EVA1} 为上层EVA温度; T_a 为环境温度; T_{sky} 为天空温度,可表示为: $T_{sky} = 0.055 2T_a^{1.5}$; $R_{cond,EVA1-g}$ 为上层EVA与玻璃之间的传导热阻; $R_{conv,g-a}$ 为玻璃与环境的对流热阻; $R_{rad,g-sky}$ 为玻璃与环境的辐射热阻;下标 g 表示玻璃。文中所有温度单位均

为℃,热阻单位均为(m²·℃)/W。

上层EVA和下层EVA:

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

式中: T_{PV} 为光伏组件温度; $R_{cond,PV-EVA1}$ 和 $R_{cond,PV-EVA2}$ 为PV和上下2层EVA之间的传导热阻;下标EVA1表示上层,EVA2表示下层。

光伏电池:

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

式中: τ_g 为玻璃穿透率; P_{mpp} 为光伏在最大功率点时的发电功率,W;下标PV表示光伏电池。

背板:

$$c_{p,tcd} \delta_{ted} A \rho_{ted} \frac{\Delta T_{ted}}{\Delta t} = \frac{T_{EVA2} - T_{ted}}{R_{cond,EVA2-tcd}} - \frac{T_{ted} - T_{radc}}{R_{cond,tcd-radc}} \quad (4)$$

式中: T_{radc} 为辐射制冷膜的温度; $R_{cond,EVA2-tcd}$ 为EVA和背板之间的传导热阻; $R_{cond,tcd-radc}$ 为背板和辐射制冷膜之间的传导热阻;下标ted表示背板。

辐射制冷膜:

$$c_{p,radc} \delta_{radc} A \rho_{radc} \frac{\Delta T_{radc}}{\Delta t} = \frac{T_{ted} - T_{radc}}{R_{cond,tcd-radc}} - \frac{T_{radc} - T_a}{R_{conv,radc-a}} - \frac{T_{radc} - T_{grd}}{R_{rad,radc-grd}} \quad (5)$$

式中: $R_{conv,radc-a}$ 为辐射制冷膜与环境的对流热阻; T_{grd} 为地面环境温度; $R_{rad,radc-grd}$ 为辐射制冷膜与地面的辐射热阻;下标radc表示辐射制冷膜。

以上是将辐射制冷膜贴附在光伏组件背面时的热学模型,若将其贴附在光伏组件正面,以下各层的热学模型将发生改变。

辐射制冷膜:

$$c_{p,radc} \delta_{radc} A \rho_{radc} \frac{\Delta T_{radc}}{\Delta t} = \alpha_{radc} GA + \frac{T_g - T_{radc}}{R_{cond,g-radc}} - \frac{T_{radc} - T_a}{R_{conv,radc-a}} - \frac{T_{radc} - T_{sky}}{R_{rad,radc-sky}} \quad (6)$$

式中: $R_{cond,g-radc}$ 为辐射制冷膜与玻璃之间的传导热阻。

玻璃:

$$c_{p,g} \delta_g A \rho_g \frac{\Delta T_g}{\Delta t} = (1 - \alpha_{radc}) G \alpha_g A + \frac{T_{EVA1} - T_g}{R_{cond,EVA1-g}} - \frac{T_g - T_{radc}}{R_{cond,g-radc}} \quad (7)$$

光伏电池:

$$c_{p,PV} \delta_{PV} A \rho_{PV} \frac{\Delta T_{PV}}{\Delta t} = (\tau_g \tau_{radc} GA - P_{mpp}) - \frac{T_{PV} - T_{EVA1}}{R_{cond,PV-EVA1}} - \frac{T_{PV} - T_{EVA2}}{R_{conv,PV-EVA2}} \quad (8)$$

式中: τ_{radc} 为辐射制冷膜的透射率。

背板:

$$c_{p,tcd} \delta_{ted} A \rho_{ted} \frac{\Delta T_{ted}}{\Delta t} = \frac{T_{EVA2} - T_{ted}}{R_{cond,EVA2-tcd}} - \frac{T_{ted} - T_a}{R_{conv,tcd-a}} - \frac{T_{ted} - T_{grd}}{R_{rad,tcd-grd}} \quad (9)$$

式中: $R_{conv,tcd-a}$ 为背板与环境间的对流热阻; $R_{rad,tcd-grd}$ 为背板与地面间的辐射热阻。

热阻计算是太阳能晶硅组件温度分布求解过程中最关键的步骤。在光伏组件的热传递过程中有3种热阻,即辐射热阻、对流热阻、传导热阻。

玻璃、背板和辐射制冷膜的辐射热阻, $R_{rad,g(ted)(radc)-sky(grd)}$ 可表示为:

$$R_{rad,g(ted)(radc)-sky(grd)} = \frac{1}{\varepsilon_{g(ted)(radc)} \sigma A (T_{g(ted)(radc)}^2 + T_{sky(grd)}^2) (T_{g(ted)(radc)} + T_{sky(grd)})} \quad (10)$$

式中: ε 为发射率; σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数(5.67×10⁻⁸ W/(m²·K⁴))。

玻璃、背板和辐射制冷膜的对流热阻, $R_{conv,g(ted)(radc)-a}$ 可表示为:

$$R_{conv,g(ted)(radc)-a} = \frac{1}{h_{conv,g(ted)(radc)-a} A} \quad (11)$$

$$h_{conv,g(ted)(radc)-a} = 2.8 + 3.0u \quad (12)$$

式中: $h_{conv,g(ted)(radc)-a}$ 为玻璃、背板和辐射制冷膜的对流传热系数,W/(m²·℃); u 为风速,m/s。

热传导发生在光伏组件中相邻的层与层之间,导热热阻可计算为:

$$R_{i-j} = \frac{\delta_i}{2k_i A_i} + \frac{\delta_j}{2k_j A_j} \quad (13)$$

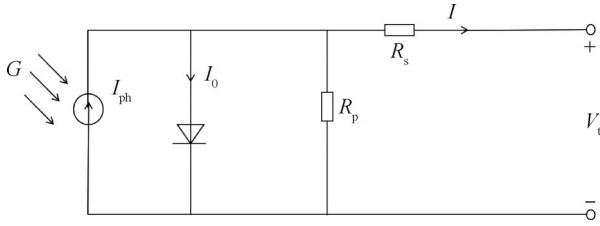
式中:下标*i*表示层*i*,*j*表示层*j*; R_{i-j} 为第*i*层和第*j*层之间的导热热阻; k 为热导率,W/(m·℃)。

1.2 电学模型

通过电学模型可对光伏组件的输出功率进行计算。本文采用广泛使用的五参数等效电路模型^[15],其结构如图2所示,该电路主要由电流源、二极管、并联电阻和串联电阻4个元件构成。

本文选用星火太阳能公司生产的SFM-50W型光伏组件作为研究对象,该组件标准测试条件(standard test conditions, STC)下开路电压 $V_{oc,ref}$ 为21.6 V,短路电流 $I_{sc,ref}$ 为3.06 A,最大功率点电压 $V_{mpp,ref}$ 为18 V,最大功率点电流 $I_{mpp,ref}$ 为2.78 A,最大功率点功率 $P_{mpp,ref}$ 为50 W。文中所有电阻单位为Ω。在STC下,该组件的电流与电压关系可由以下式表示:

$$I = I_{ph,ref} - I_{0,ref} \left[\exp \left(\frac{V + IR_{s,ref}}{N_s V_{t,ref}} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_{s,ref} I}{R_{p,ref}} \quad (14)$$



G 太阳辐照度; I_{ph} 光生电流; I_0 二极管饱和电流; R_p 并联电阻; R_s 串联电阻; V_t 二极管热电压。

图2 光伏组件等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagram of photovoltaic modules

下标 ref 表示该参数对应标准工况下的取值, 式中包含 5 个待求参数, 具体求解方法如下:

标准工况下二极管热电压 $V_{t,ref}$:

$$V_{t,ref} = \frac{\beta T_{c,ref} - V_{oc,ref}}{\frac{N_s T_{c,ref} \alpha}{I_{ph,ref}} - 3N_s - \frac{qE_{g,ref} N_s}{KT_{c,ref}}} \quad (15)$$

$$I_{mpp,ref} = I_{ph,ref} - I_{0,ref} \left[\exp\left(\frac{V_{mpp,ref} - R_{s,ref} I_{mpp,ref}}{N_s V_{t,ref}}\right) - 1 \right] - \frac{(V_{mpp,ref} + I_{mpp,ref} R_{s,ref}) [(V_{mpp,ref} - I_{mpp,ref} R_{s,ref})(I_{sc,ref} - I_{mpp,ref}) - N_s V_{t,ref} I_{mpp,ref}]}{(V_{mpp,ref} - I_{mpp,ref} R_{s,ref})(V_{mpp,ref} - N_s V_{t,ref})} \quad (19)$$

利用上述数学模型确定 STC 下的特征参数可以求解非标准状况下的特征参数。

由于光生电流 I_{ph} 受太阳辐照度和温度的影响, 其修正方程如下:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} I_{ph,ref} (1 + \alpha(T_c - T_{c,ref})) \quad (20)$$

由二极管饱和电流 I_0 仅取决于电池片温度, 其在实际状况下的计算表达式如下:

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)^3 \exp\left[\frac{q}{k} \left(\frac{E_{g,ref}}{T_{c,ref}} - \frac{E_g}{T_c}\right)\right] \quad (21)$$

研究表明, 串联电阻 R_s 与太阳辐射和温度无关^[16]。因此, R_s 的数值在本研究中保持恒定, 如下式所示:

$$R_s = R_{s,ref} \quad (22)$$

并联电阻 R_p 的大小与太阳辐照度成反比:

$$R_p = \frac{G_{ref}}{G} R_{p,ref} \quad (23)$$

由于二极管热电压 V_t 是温度的线性函数, 故热电压的修正方程可表示为:

$$V_t = \frac{T_c}{T_{c,ref}} V_{t,ref} \quad (24)$$

在获得实际工况下的 5 个特征参数后, 可以获得光伏电池在实际工况下的特征曲线, 此时在实际工况下输出的最大功率可计算为:

$$P_{mpp} = V_{mpp} I_{mpp} \quad (25)$$

式中: β 为开路电压温度系数, $V/^\circ C$; α 为短路电流的温度系数, $A/^\circ C$; N_s 为光伏电池串联数量; $E_{g,ref}$ 为能带带隙, 对于晶硅电池, 其数值为 1.125 eV; q 为电子电荷, $1.602 \times 10^{-19} C$; k 为玻耳兹曼常数, $1.381 \times 10^{-23} J/K$ 。

标准工况下光生电流 $I_{ph,ref}$:

$$I_{ph,ref} \approx I_{sc,ref} \quad (16)$$

标准工况下二极管饱和电流 $I_{0,ref}$:

$$I_{0,ref} = I_{sc,ref} \exp\left(\frac{-V_{oc,ref}}{N_s V_{t,ref}}\right) \quad (17)$$

标准工况下并联电阻 $R_{p,ref}$:

$$R_{p,ref} = \frac{(V_{mpp,ref} - I_{mpp,ref} R_{s,ref})(V_{mpp,ref} - N_s V_{t,ref})}{(V_{mpp,ref} - I_{mpp,ref} R_{s,ref})(I_{sc,ref} - I_{mpp,ref}) - N_s V_{t,ref} I_{mpp,ref}} \quad (18)$$

标准工况下串联电阻 $R_{s,ref}$:

1.3 热电耦合求解

热电耦合的求解过程如图 3 所示。

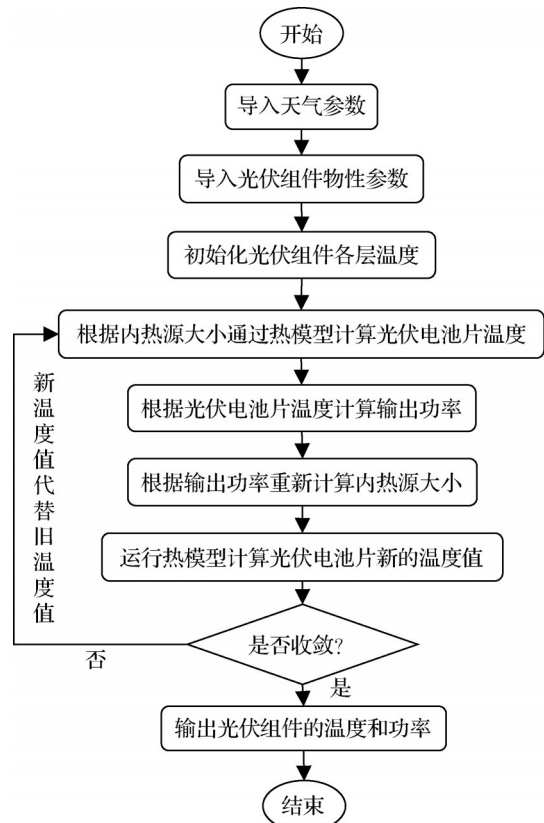


图3 热电耦合求解流程图

Fig.3 Thermoelectric coupling solution flowchart

迭代计算是一个动态耦合过程,电模型的输出影响热模型的输入,热模型的输出反过来影响电模型的各项参数。首先导入辐照、环境温度、风速及光伏组件自身特性参数,随后初始化光伏组件各层材料的温度至环境温度,同步计算其发电功率与温度。对于电模型:先通过内热源与热模型的计算更新光伏电池片的温度,从而计算功率;对于热模型:先根据实际功率确定内热源的大小,再计算导热热阻、对流热阻、辐射热阻,通过求解能量方程,不断迭代,计算温差小于残差收敛,若不收敛则重复迭代过程,最终输出温度和功率。

2 光谱表征与数值模拟

2.1 光谱表征

为了系统评估光伏组件及辐射制冷膜的性能,本文重点针对0.5~2.5 μm波长范围内的吸收光谱展开测量。使用紫外-可见分光光度计,以AM1.5太阳光谱为参考,测定了辐射制冷膜的透射率。在红外波段(4~16.5 μm),采用傅里叶变换红外光谱仪对辐射制冷膜的透射率及发射率进行了测量,并借助MODTRAN(MODERate Resolution Atmospheric Transmission)获取夏季乌鲁木齐、101 325 kPa大气水柱在天顶角条件下的大气光谱透射率分布作为参考基准,测量结果如图4所示。光伏电池吸收0.4~1.1 μm波段的有效光子进行能量转换,同时吸收1.1~4 μm的亚带隙光子产生废热,且4~16.5 μm波段的热辐射散热能力弱,导致废热积累;辐射制冷膜在此波段的透射率波动显著,平均值为65.68%;在4~16.5 μm范围内光伏组件普遍呈现高吸收特性,且辐射制冷膜在8~13 μm大气窗口波段内平均发射率达到88.29%,表明其有良好的冷却潜力。

2.2 几何模型的尺寸及物性参数

在数值模拟计算相关热学参数时,不同的物性参数数值会影响能量传递的情况,组件每层结构的热物理性质如表1所示。

表1 光伏组件各层物性参数

Tab.1 Physical property parameters of each layer of photovoltaic modules

结构	比热容/[J/(kg·°C)]	密度/(kg/m ³)	热导率/[W/(m·K)]	吸收率	反射率	透射率	发射率
玻璃	1 172	1 730	0.24	0.1	0.07	0.83	0.86
EVA	2 090	945	0.35	0	1	0	
光伏电池	850	2 450	145	0.97	0.03	0	
背板	1 275	1 350	0.275				0.8
辐射制冷膜	1 460	965	0.7	0.05	0.3	0.65	0.88

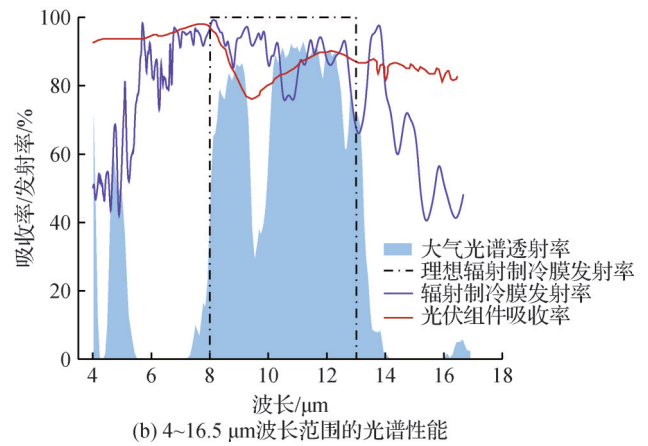
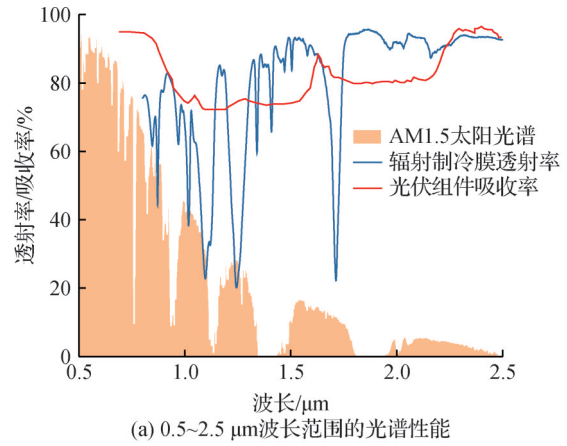


图4 光伏组件与辐射制冷膜的光谱性能

Fig.4 Spectral performance of photovoltaic modules and radiative cooling films

2.3 假设与边界条件

在本研究中,为了简化数值模拟,采用以下假设:固体部件的热物理特性,即光伏组件中各层的特性,均与温度无关;光伏组件中不同固体组件间的接触电阻可忽略不计;假设光伏组件为完全水平面放置;天空温度被假设为黑体温度,实际天空有效发射率受水汽含量和云量影响显著,忽略此变化可能导致在多云或高湿度条件下的长波辐射散热量被高估,带来一定的模拟误差;入射太阳辐射被假定为均匀分布;假设EVA层的透射率为100%;光伏电池的发热率设定为等于吸收的太阳辐射量;层与层之间

热量通过导热的形式传递,光伏组件的4个侧壁面是绝热的,组件的上表面与下表面通过辐射和对流2种方式与环境换热。

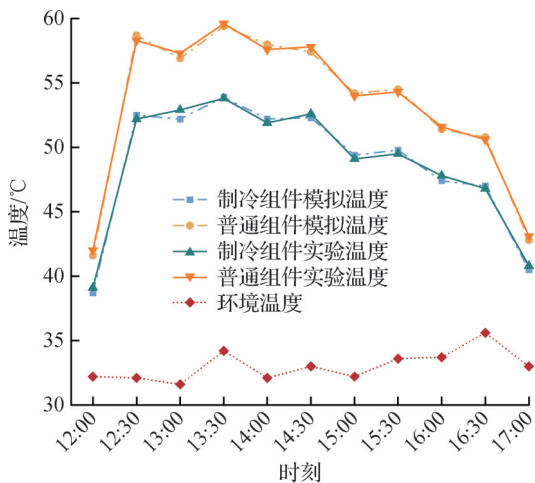
3 结果与讨论

3.1 模型验证

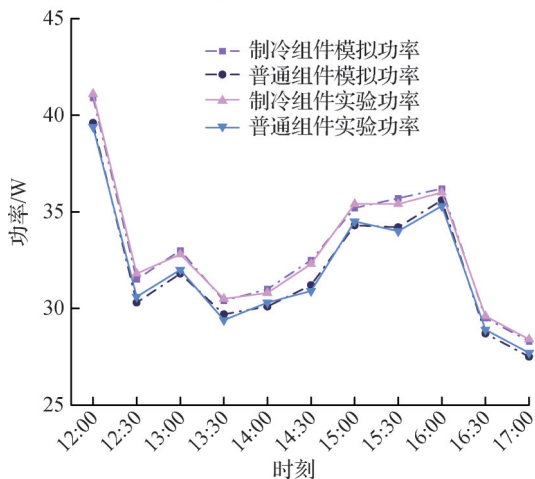
为了验证数值模拟结果,与文献[17]的实验研究进行了对比。选取光伏电池温度和输出功率作为评估参数,结果如图5所示。光伏电池温度模拟结果与实验结果之间的平均绝对百分比误差为2.1%,光伏组件输出功率的模拟结果与实验结果之间的平均绝对百分比误差为1.3%。偏差可能源于测量时间间隔,而辐照度和风速的瞬时波动会对温度和输出功率造成影响,但大多数数据的拟合程度均较高,基于以上结果,热电耦合模型具有良好的准确性和可靠性,并能保证后续模拟结果准确可靠。

3.2 不同贴附位置下复合组件性能对比

为了研究辐射制冷膜不同贴附位置对光伏组件



(a) 光伏电池温度验证



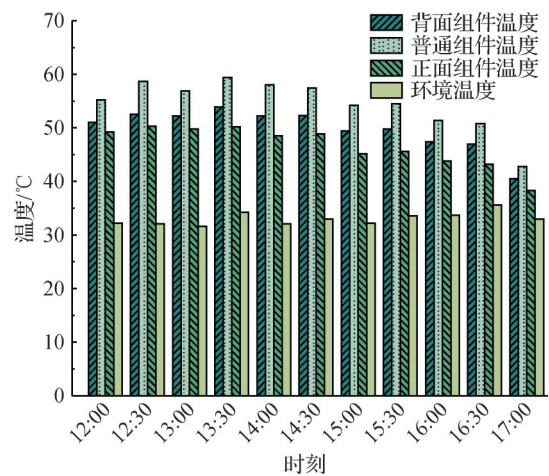
(b) 光伏组件输出功率验证

图5 模拟与实验研究结果对比

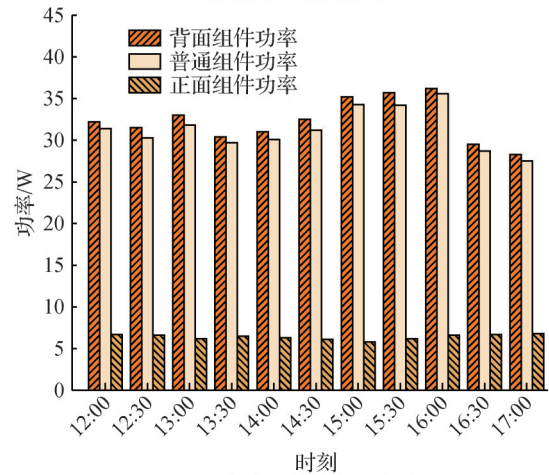
Fig.5 Comparison of simulation and experimental results

性能的影响,通过修改仿真模型,将辐射制冷膜分别置于组件的正面和背面,并在相同工况下进行数值模拟仿真,对比普通组件与复合组件的性能差异。

实际工况下的模拟结果如图6所示,正面组件和背面组件相较于普通组件均具有明显的降温效果,背面组件相较于普通组件平均降温4.55℃,组件功率平均提升3.7%,正面组件相较于普通组件平均降温7.21℃,组件功率平均降低25.6W。这是因为光伏组件在工作时,正面直接接收的直射辐照量较大,且正面接收的天空辐射散射也更多,正面覆盖辐射制冷膜会阻挡部分直射光,并将另一部分反射回环境。



(a) 复合组件温度对比



(b) 复合组件输出功率对比

图6 实际工况下不同组件的性能对比

Fig.6 Performance comparison of different components under actual operating conditions

而辐射制冷膜在0.5~1.2 μm波段的透射率较低,降温的正效应无法抵消透光率降低的负效应,导致输出功率显著下降。因此将辐射制冷膜贴附在光伏组件背面的效果更佳。

在理想条件下^[18],辐射制冷膜在0.4~1.1 μm波段具有高透射率以保证有效光子到达电池表面,在

1. 1~4 μm 波段具有高反射率以减少废热产生,并且在 8~13 μm 大气窗口波段具有高发射率以将热量辐射至太空,模拟结果如图 7 所示。

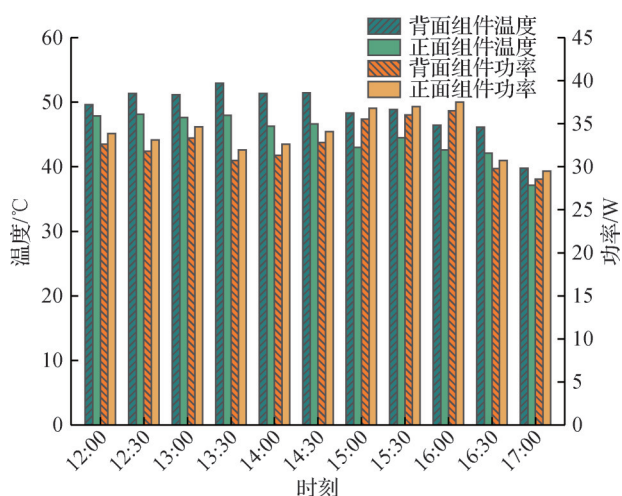


图 7 理想条件下不同组件的性能对比

Fig.7 Performance comparison of different components under ideal conditions

正面组件的降温效果最为显著,相较于普通组件平均降温 9.59 $^{\circ}\text{C}$,功率平均提升 7.83%;因此,开发在 0.4~1.1 μm 的波段具有高透射率、在 1.1~4 μm 的波长具有高反射率的辐射制冷膜贴附在光伏组件正面,对于平衡降温与透光能力尤为重要。

3.3 不同典型天气下复合组件性能对比

为研究辐射制冷膜在不同典型天气下的降温效果,分别研究了在夏季晴天、夏季阴天、冬季晴天、冬季阴天 4 个不同的典型天气下复合组件的性能,并评估辐射制冷膜在不同天气下的降温潜力。 ΔT 为普通组件与制冷组件的温度差, ΔP 为制冷组件与普通组件的功率差。模拟结果如图 8 所示,在夏季晴天时,辐照度与环境温度均较高,辐射制冷膜的制冷效果最好,平均降温 4.5 $^{\circ}\text{C}$,功率平均提升 2.94%;

在夏季阴天时,随着辐照度的下降,辐射制冷膜的制冷效果也随之下降,平均降温 1.31 $^{\circ}\text{C}$,功率平均提升 1.66%;

在冬季晴天时,随着环境温度降低,辐射制冷膜的制冷效果也随之下降;在 12:00—15:00 时,辐照度较高时,辐射制冷膜依然保持着降温作用,平均降温 1.96 $^{\circ}\text{C}$,功率平均提升 0.39%,然而在 15:30 之后,辐照度与环境温度均较低,制冷组件的温度甚至高于普通组件,辐射制冷膜无法进行制冷与带来组件功率上的提升。

这是因为在低温环境下,空气密度较大,光伏组件的热传导与对流散热效果显著增强,此时辐射制

冷膜作为热阻,阻碍了光伏组件的导热与散热,从而导致组件温度升高;在冬季阴天时,辐照度与环境温度均较低,模拟结果如图 10(g)~(h),辐射制冷膜也未能产生降温增效的作用。

3.4 影响因素分析

为了探究影响辐射制冷膜降温效果的关键影响因素,分别从辐照度、风速、环境温度 3 个重点影响因素展开研究,通过控制变量法,逐个研究降温效果随影响因素的变化规律。

模拟结果如图 9 所示,随着辐照度从 200 W/m^2 升至 1200 W/m^2 , ΔT 从 0.41 $^{\circ}\text{C}$ 升至 6.13 $^{\circ}\text{C}$, ΔP 从 0.04 W 升至 1.26 W ,辐照度越高,辐射制冷效果越好;随着风速从 0 m/s 升至 3 m/s , ΔT 从 5.02 $^{\circ}\text{C}$ 降至 1.88 $^{\circ}\text{C}$, ΔP 从 0.89 W 降至 0.38 W ,风速越高,辐射制冷效果越差;随着环境温度从 -10 $^{\circ}\text{C}$ 升至 40 $^{\circ}\text{C}$, ΔT 从 0.58 $^{\circ}\text{C}$ 升至 5.02 $^{\circ}\text{C}$, ΔP 从 0.09 W 升至 1.18 W ,环境温度越高,辐射制冷效果越好。

这是因为随着辐照度升高,光伏组件接收到的太阳能越高,组件温度及与环境温差增大,显著增强了辐射散热驱动力;因辐射制冷膜阻碍对流并增加热阻,风速升高反而削弱了其相对降温效果;在高温环境下,组件发电功率下降,但制冷组件随环境升温扩大了与太空的温差,使其辐射散热性能更为显著。

3.5 敏感性分析

为量化影响因素变化对降温效果与功率提升效果的影响,进行了敏感性分析,在标准工况下,3 个影响参数分别增加和减少 50%,并评估它们对降温效率与功率提升效率的影响,结果如图 10 所示。

通过该分析总结了 3.3 节的结果,并观察对组件性能影响最大的参数,影响因素对降温增效的影响可用灵敏度系数 S 表示,其中 S_T 为温度灵敏度系数, S_P 为功率灵敏度系数,计算如下:

$$S_T = \frac{\Delta T - \Delta T_{\text{STC}}}{T_{\text{STC}}} \quad (26)$$

$$S_P = \frac{\Delta P - \Delta P_{\text{STC}}}{P_{\text{STC}}} \quad (27)$$

式中: ΔT_{STC} 为标准工况下的温差, $^{\circ}\text{C}$; T_{STC} 为标准工况下普通组件的温度, $^{\circ}\text{C}$; ΔP_{STC} 为标准工况下的功率差, W ; P_{STC} 为标准工况下普通组件的功率, W 。

辐照度对辐射制冷膜降温增效的影响最大,其次是环境温度;而风速降低对提升辐射制冷膜降温增效的影响较小,但风速增大对削弱辐射制冷膜降温增效的影响较大。这是因为在高辐照度下,组件温度越高,辐射制冷膜通过热辐射带走的热量就越多,因此其带来的降温幅度和功率提升最为明显;而

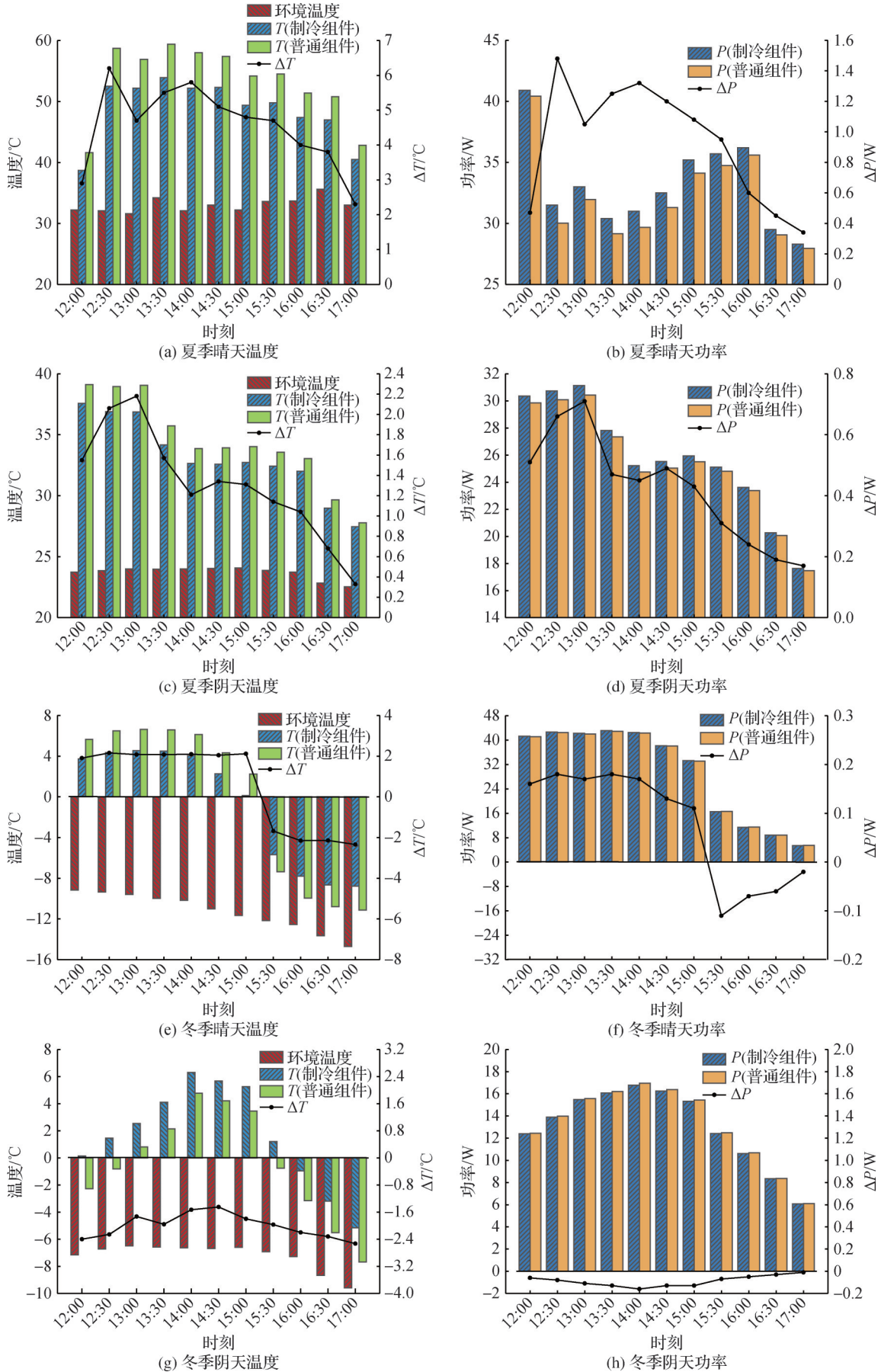


图8 不同典型天气下组件的性能对比

Fig.8 Performance comparison of components under different typical weather conditions

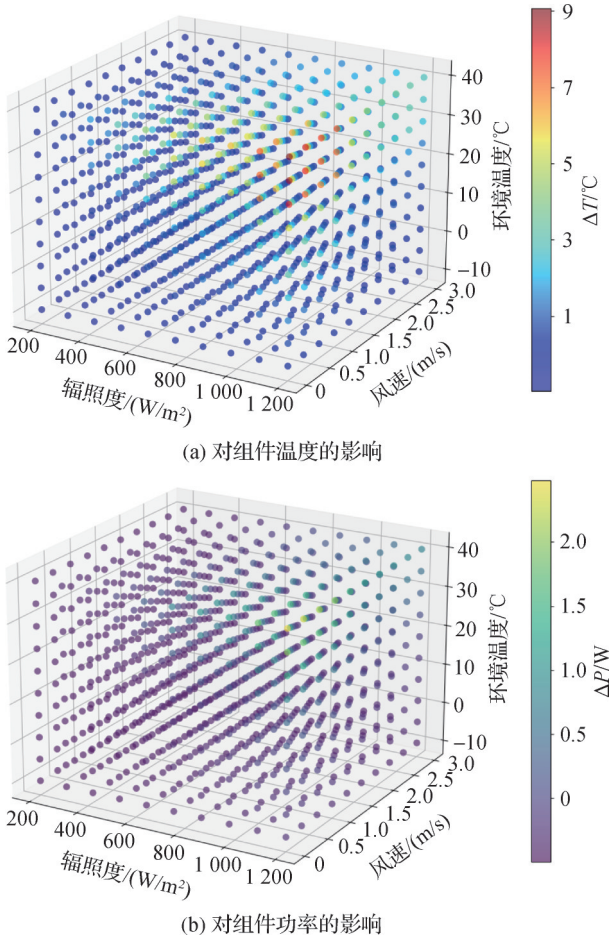


图9 影响因素对组件性能的影响

Fig.9 Impact of influencing factors on component performance

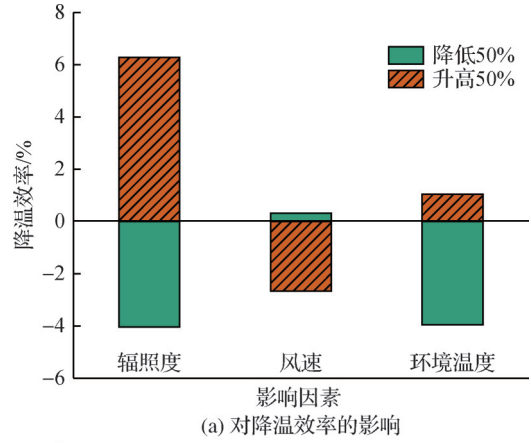
环境温度通过改变组件的绝对温度来影响辐射传热效率,其影响幅度略小于直接决定能量输入的辐照度;在风速较大时,辐射制冷膜的存在反而增加了热阻,在一定程度上阻碍了原本高效的对流散热。

4 结论

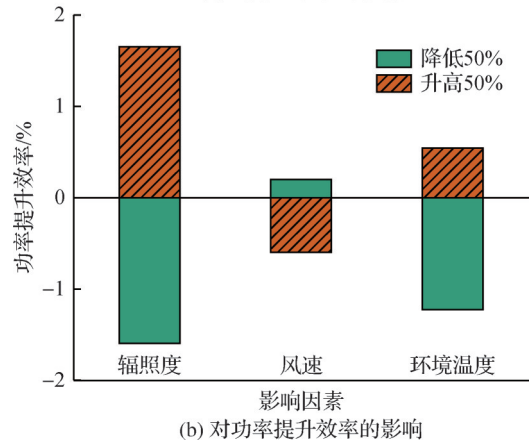
本文通过建立复合组件的热电耦合模型,结合辐射制冷膜在8~13 μm大气窗口波段内具有高发射率的特性,系统模拟并分析了辐射制冷膜作用于光伏组件的热管理效果及其在不同环境条件下的性能表现,得到如下结论:

1)将本研究中的辐射制冷膜贴附于光伏组件背面相较于正面贴附更为适宜,虽然正面贴附可实现更显著的降温效果,平均降温7.21 °C,但其在可见光波段的低透射率导致入射光损失,发电功率下降明显;而背面贴附在实现平均降温4.55 °C的同时,提升了组件输出功率约3.7%,综合性能更优。

2)在理想工况下,将辐射制冷膜贴附在光伏组件正面更为合适,理想的辐射制冷膜需在0.4~



(a) 对降温效率的影响



(b) 对功率提升效率的影响

图10 影响因素对组件性能的影响
Fig.10 Impact of influencing factors on component performance

1.1 μm 波段高透射以保证有效光子到达电池,同时在1.1~4 μm 波段高反射以减少废热产生,在8~13 μm 大气窗口波段高发射以将热量辐射至太空,从而优化热平衡。

3)辐射制冷膜的冷却效果受天气条件影响显著,在夏季晴天高辐照、高温环境下,其降温与增效作用最为明显,平均降温4.5 °C,功率平均提升2.94%;而在冬季阴天低温低辐照条件下,辐射制冷膜反而会因增加热阻而阻碍组件散热,导致组件温度升高。

4)随着辐照度升高,辐射制冷膜的冷却效果增强;风速增加会增强对流散热,从而削弱辐射制冷能力,降温效果随之减弱;在高温环境中,光伏组件与太空之间的温差增大,辐射传热增强,冷却效果更为显著;辐照度对辐射制冷膜降温增效的影响最大,高辐照情况下,降温效率提升6.3%,光伏组件发电效率提升1.65%,其次是环境温度,而风速对辐射制冷膜降温增效的影响较小。

综上所述,辐射制冷膜在光伏组件热管理中具有应用潜力,未来的研究可以开发在0.4~1.1 μm 波段内具有高透射率以及在1.1~4 μm 波段内具有高反射

率的辐射制冷膜,并将其置于光伏组件正面,以平衡降温与透光能力,进一步提升光伏组件的综合性能。

本文受“天山英才”培养计划—青年托举人才项目(2024TSYCQNTJ0018)和新疆维吾尔自治区重大科技专项课题(2025A01006-2)资助。(The project was supported by Youth Support Project of Tianshan Talents Training Program of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2024TSYCQNTJ0018) and Major Science and Technology Projects of Xinjiang Uygur Autonomous Region through the Grant (No. 2025A01006-2).)

参考文献

- [1] Ugochukwu A A, Ahmad F, Khalid M, et al. Recent enhancement in photovoltaic cell efficiency performance, stability, and cost reduction: a review[J]. *Solar Energy*, 2025, 300: 113853.
- [2] Wu Tingting, Mo Lianjian, Hu Yanxin, et al. The thermal improvement of cascade phase change thermal management module for photovoltaic cells [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 273: 126486.
- [3] Okulu D, Selimefendigil F, Öztöp H F, et al. A review study for the application of heat pipe and nano-enhanced PCM cooling methods on solar concentrated photovoltaic panels: State-of-the-art designs, outcomes and future trends [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 66: 104052.
- [4] Ibrahim T, Faraj J, Kisswani K, et al. Cooling photovoltaic panels with air convection-Parametric environmental and economic analysis with case studies[J]. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2025, 12: 101020.
- [5] Bin Abdul Rahim M S, Naim bin Tajuddin M F, Saad M S, et al. Experimental investigation on improving photovoltaic module efficiency using adaptive fuzzy-PID water cooling[J]. *Solar Energy*, 2025, 300: 113828.
- [6] 郭晨玥, 潘浩丹, 徐琪皓, 等. 天空辐射制冷技术发展现状与展望[J]. *制冷学报*, 2022, 43(3): 1-14. (Guo Chenyue, Pan Haodan, Xu Qihao, et al. Current status and future perspectives of radiative sky cooling[J]. *Journal of Refrigeration*, 2022, 43(3): 1-14.)
- [7] 王晨曦, 邓芳芳, 邹豪, 等. 用于温室降温的透明辐射薄膜研究[J]. *制冷学报*, 2024, 45(1): 63-69. (Wang Chenxi, Deng Fangfang, Zou Hao, et al. Investigating transparent radiative film for greenhouse cooling [J]. *Journal of Refrigeration*, 2024, 45(1): 63-69.)
- [8] Gao Kai, Shen Honglie, Liu Youwen, et al. Random inverted pyramid textured polydimethylsiloxane radiative cooling emitter for the heat dissipation of silicon solar cells [J]. *Solar Energy*, 2022, 236: 703-711.
- [9] Heo S Y, Kim D H, Song Y M, et al. Determining the effectiveness of radiative cooler-integrated solar cells [J]. *Advanced Energy Materials*, 2022, 12(10): 2103258.
- [10] Fang Huangyu, Zhou Lyu, Xu Lujia, et al. Radiative cooling for vertical solar panels [J]. *iScience*, 2024, 27(2): 108806.
- [11] Tu Yiteng, Tan Xinyu, Yang Xiongbo, et al. Antireflection and radiative cooling difunctional coating design for silicon solar cells[J]. *Optics Express*, 2023, 31(14): 22296.
- [12] Li Fuxiang, Sui Yunren, Lin Haosheng, et al. Self-adaptive interfacial evaporation for high-efficiency photovoltaic panel cooling[J]. *Device*, 2025, 3(2): 100569.
- [13] He Jiajun, Chen Yu, Guo Rui, et al. Bioinspired colored films with humidity-induced dynamic reflectivity and emissivity for self-adaptive, efficient radiative cooling[J]. *ACS Nano*, 2025, 19(33): 30361-30370.
- [14] Gu Wenbo, Ma Tao, Shen Lu, et al. Coupled electrical-thermal modelling of photovoltaic modules under dynamic conditions[J]. *Energy*, 2019, 188: 116043.
- [15] 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): 169-175. (Ma Tao, Shen Lu. Analysis of energy distribution of photovoltaic module under non-standard test conditions [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(2): 169-175.)
- [16] Wu Runze, Ma Chao, Liu Zhao, et al. Thermal characteristics evaluation of floating photovoltaic modules based on an improved dynamic coupled thermal-electrical model[J]. *Renewable Energy*, 2025, 248: 123061.
- [17] 毕涛, 顾文波, 许多伟. 辐射制冷复合型光伏组件的季节性性能分析[J/OL]. *太阳能学报*, 2026. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2025-0210>. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2025-0210. (Bi Tao, Gu Wenbo, Xu Duwei. Seasonal Performance Analysis of Radiative Cooling Composite Photovoltaic Modules[J/OL]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2026. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2025-0210>. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2025-0210.)
- [18] Wei Jia, Chen Hao, Liu Jingchong, et al. Radiative cooling technologies toward enhanced energy efficiency of solar cells: Materials, systems, and perspectives [J]. *Nano Energy*, 2025, 136: 110680.

通信作者简介

顾文波,男,副教授,新疆大学电气工程学院, E-mail: bobo1314@sju.edu.cn。研究方向:可再生能源和太阳能电池热物理。

About the corresponding author

Gu Wenbo, male, associate professor, School of Electrical Engineering, Xinjiang University, E-mail: bobo1314@sju.edu.cn. Research fields: renewable energy and thermal physics of solar cells.