

文章编号:0254-0096(2020)06-0293-06

# 沙漠沙尘对光伏组件温度性能影响实验研究

赵明智<sup>1</sup>, 王 帅<sup>1</sup>, 张志明<sup>2</sup>, 张 丹<sup>1</sup>, 吴丽玲<sup>1</sup>

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 赤峰经济转型开发试验区规划建设局, 赤峰 024076)

**摘 要:** 通过选取不同积沙密度和沙尘粒径分别沉积在光伏组件表面,对光伏组件温度性能影响展开研究。结果表明:清洁光伏组件的背板温度高于积沙光伏组件的背板温度。当光伏组件表面的积沙密度不断增大时,光伏组件的温度呈现先下降后上升的趋势;当光伏组件表面的积沙密度小于等于  $35 \text{ g/m}^2$  时,影响温度的主要因素是遮挡而造成吸收辐射能的减小;当光伏组件表面的积沙密度增大至  $35 \text{ g/m}^2$  时,由遮挡而影响的温度降低幅度达到最大值,当组件表面积沙密度大于  $35 \text{ g/m}^2$ ,表面积沙使组件的散热性能降低,热阻增大,背板温度上升;当组件表面的沙尘完全遮挡住太阳辐射时,组件的温度不会上升,此时组件温度与环境温度相接近;当光伏组件表面积沙粒径增大时,光伏组件的温度整体呈现先下降后上升的趋势,且在粒径为  $0.04\sim 0.06 \text{ mm}$  时光伏组件的温度最低,与清洁组件相比其温度降低的最大值为  $6.62 \text{ }^\circ\text{C}$ ,在沙尘粒径为  $0.3\sim 0.4 \text{ mm}$  时光伏组件的温度是积沙组件中温度最高的,与清洁组件相比其温度降低的最大值仅为  $2.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,温度降低的最小值仅为  $0.85 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

**关键词:** 光伏组件; 沙尘; 积沙密度; 粒径; 温度

**中图分类号:** TM615

**文献标志码:** A

## 0 引言

中国沙漠和荒漠戈壁区域广阔,尤其西北地区,风沙流活跃,沙尘暴频繁发生,但同时这些地区又有着最为丰富的太阳能辐射资源,非常有利于太阳能资源的大规模开发利用,因此,光伏发电产业在中国西北地区得到迅速发展<sup>[1]</sup>。但多风多沙的天气条件会使风中携带的沙尘在光伏组件表面发生沉降等行为,这会对组件温度产生影响,从而影响其发电率,有学者研究表明当光伏组件的温度每上升  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,其发电量就降低  $0.5\%$ <sup>[2]</sup>。

国内外学者对光伏组件的温度进行了研究,如张宇等<sup>[3]</sup>研究灰尘对光伏组件的热性能的影响,研究表明在灰尘刚开始累积时,对光伏组件的温度影响不明显,对光伏组件的输出功率影响较明显;中国科学院的程序等<sup>[4]</sup>提出一种光伏组件温度预测方法,并考虑影响组件温度的因素,研究表明此方法准确性较高;牛海霞等<sup>[5]</sup>对光伏组件表面的温度进行模拟仿真,得出对输出功率的影响规律,当光伏组件在工作时的温度越高,所损失的

发电量就越高;国外 Akhmatov 等<sup>[6]</sup>研究的结果表明,在当地时间  $09:00\sim 15:00$  之间光伏组件的输出功率并未随着太阳辐照度的增加而出现上升的趋势,反而出现了下降的趋势,最大下降的程度约为  $40\%$ ,出现这种现象的原因就是因为太阳辐照度的不断增加,造成光伏组件温度在不断增加,从而导致输出功率呈现出下降的趋势。

通过文献调研可知目前关于光伏组件温度的研究较多,但沙漠沙尘对光伏组件温度性能的影响研究较少。因此,本文通过对沙尘定量化,研究分析不同积沙密度和不同沙尘粒径对光伏组件温度的影响。

## 1 实验布置

沙漠环境多变,光伏组件表面上沙尘的沉降量易被环境因素影响,在实际情况下光伏组件表面上沙尘的密度和粒径存在着不确定性,因此本文在实验室进行实验,以期定量分析沙尘(密度、粒径)对光伏组件温度性能的影响。

### 1.1 实验设备

实验使用的光伏组件为多晶硅光伏组件,额定功率

收稿日期: 2019-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(51466011); 2017内蒙古自治区科技创新引导奖励资金项目; 内蒙古科技计划(2017); 内蒙古自然科学基金(2019LH05033)

通信作者: 赵明智(1976—), 男, 博士、教授, 主要从事太阳能利用技术方面的研究。zhaomingzhi2020@163.com

为 10 W,具体参数见表 1。为更好地了解沙尘对光伏组件温度性能的影响规律,利用 TP700 多路数据记录仪(误差  $< \pm 0.2\% F \cdot S$ )和 Pt100 温度传感器(精度为  $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ )对光伏组件积沙时的温度变化情况进行记录。

表 1 光伏组件参数

Table 1 PV component parameters

工作参数	数值
最大工作功率/W	10.00
最大功率工作点电压/V	19.89
最大功率工作点电流/A	0.5
开路电压/V	22.69
短路电流/A	0.58
最大系统电压/V	1000
尺寸(L×W×D)/mm	375×255×3

## 1.2 实验用沙的来源

为了更加贴近自然情况,开展积沙密度对光伏组件温度影响实验所用沙均来自库布齐某沙漠电站内光伏组件表面上的沙尘。开展沙尘粒径对光伏组件温度影响实验所用沙均来自沙漠电站光伏组件地表附近。

## 1.3 实验方法

研究积沙密度对光伏组件温度性能时,使用型号相同的光伏组件,在沙漠某电站内的光伏组件上收集沙尘,利用电子天平(精度为 0.01)分别称取积沙密度为 0、5、10、15、20、30 和 40  $\text{g}/\text{m}^2$  的质量,然后依次均匀铺设在光伏组件表面(如图 1 所示),安装倾角为  $41^\circ$ ,使用多路数据记录仪记录光伏组件的温度,取 3 个 Pt100 温度传感器的平均值为光伏组件背板温度,每隔 30 s 记录一次数据,气象数据每隔 1 min 记录一次。



图 1 不同积沙密度的光伏组件

Fig. 1 Photovoltaic modules with different sediment density

研究沙尘粒径对光伏组件温度性能影响时,首先使用德国新帕泰克 helos 型号的粒度分析仪(准确度为  $\pm 1\%$ )对沙漠地表沙尘进行粒径分析,其结果如表 2 所示,从表 2 中可看出库布齐沙漠沙尘的粒径主要在 0.05~0.30 mm 之间,因此本文选取 0 mm、0.04~0.06 mm、0.06~0.08 mm、0.08~0.10 mm、0.10~0.20 mm、0.20~0.30 mm、0.30~0.40 mm 共 7 种粒径进行实验,然后采用筛分法对沙尘进行筛分,用清洁孔径的筛分仪器进行筛分,每种粒径均称取相同的质量,依次均匀铺设在光伏组件表面(如图 2),安装角度和仪器设置与积沙密度对温度影响的实验一致。

表 2 沙尘样品粒度参数

Table 2 Particle size parameters of sand and dust samples

粒径/mm	百分比/%	粒径/mm	百分比/%
0.00~0.02	0	0.40~0.50	0.02
0.02~0.04	0.05	0.50~0.60	0.02
0.04~0.06	0.36	0.60~0.70	0.02
0.06~0.08	1.01	0.70~0.80	0.02
0.08~0.10	13.90	0.80~0.90	0.01
0.10~0.20	82.51	0.9~1.0	0.01
0.20~0.30	1.92	> 1.0	0
0.30~0.40	0.15	—	—



图 2 不同沙尘粒径的光伏组件

Fig. 2 Photovoltaic modules with different sand and dust particle sizes

## 2 实验结果分析与讨论

### 2.1 不同积沙密度对光伏组件温度性能的影响

图 3 是不同积沙密度实验时的风速散点图,实验时风速较小,通过国外学者 Bagnold<sup>[7]</sup>的研究表明,该风速下未达到沙尘的起动风速,故沙尘不能被吹起。

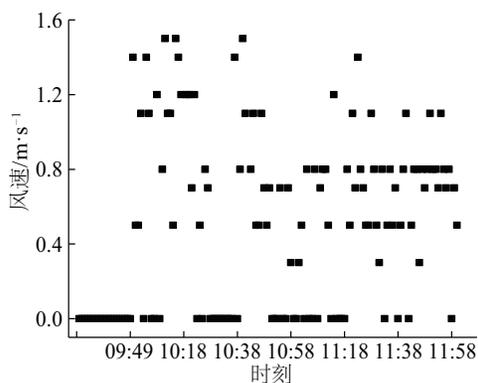


图3 不同积沙密度实验时风速散点图

Fig. 3 Scatter plots of wind speeds during different sediment density experiments

图4 为在不同积沙密度时光伏组件的温度变化情况。

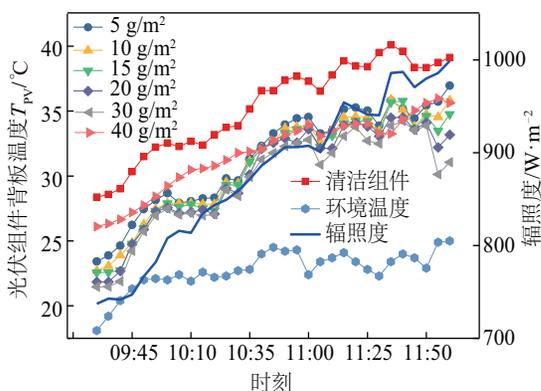


图4 积沙密度和光伏组件背板温度变化关系

Fig. 4 Variation of sediment density and photovoltaic module temperature

根据能量守恒定律<sup>[8]</sup>来进行分析,则有:

$$Q_{tot} = Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{sto} + Q_{out} \quad (1)$$

式中,  $Q_{tot}$  ——照射到光伏组件表面的辐射能, J;  $Q_{rad}$  ——光伏组件辐射损失能, J;  $Q_{conv}$  ——光伏组件对流损失能, J;  $Q_{out}$  ——光伏组件所输出的能量, J;  $Q_{sto}$  ——光伏组件蓄存的能量, J。  $Q_{sto}$  直接决定了光伏组件的温度。当光伏组件表面出现沙尘时,一方面它可以使光伏组件表面钢化玻璃的透光率降低,造成组件所吸收的辐射能降低,也就是  $Q_{tot}$  减小,从而使光伏组件的温度降低;另一方面是沙漠中的沙尘的主要成分是石英,石英的导热性能较弱,导热率小,沙物质自身的热容量较小,消除层次之间温差的能力较弱,当光伏组件表面有积沙时,沙尘所吸收的热量向外传递较慢,造成光伏组件的热阻增大,还会使光伏组件的散热性能降低,

从而使光伏组件的温度升高。光伏组件表面积沙会使光伏组件的背板温度升高或降低,影响温度变化的原因是这2种方式相互作用决定的。

从图4中可知光伏组件的背板温度与环境温度和辐照度呈现出正相关的关系,还能很清楚看出清洁光伏组件(表面无沙尘)的背板温度高于积沙光伏组件的背板温度。由图5可知,当光伏组件表面的积沙密度不断增大时,光伏组件的温度呈现出先下降后上升的趋势。

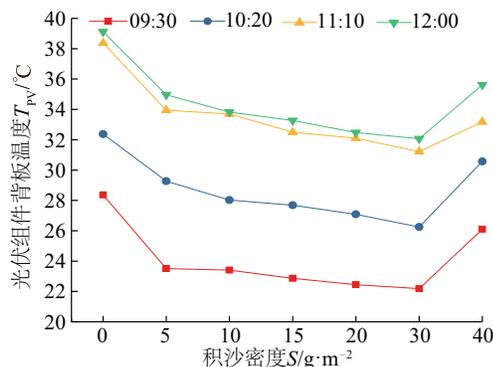


图5 某一时间积沙密度和光伏组件温度变化关系

Fig. 5 Relationship between sand sediment density and photovoltaic module temperature at certain time

从光伏组件背板温度和积沙密度的拟合曲线可看出(图6),光伏组件背板温度随组件表面积沙密度的增大(0~30 g/m<sup>2</sup>)呈现出对数下降的趋势,拟合公式为  $T_{pv} = 35.74616 + 1.90696 \ln(S - 1.48566)$ , 对应的  $R^2$  (拟合度)为 0.98322,  $S$  代表组件表面积沙密度。在组件表面积沙密度大于 30 g/m<sup>2</sup> 小于 40 g/m<sup>2</sup> 时背板温度开始上升,为了更好地确定积沙密度对光伏组件背板温度的影响,所以又进行了组件表面积沙密度为 31~39 g/m<sup>2</sup> 对其温度性能影响实验(图7)。

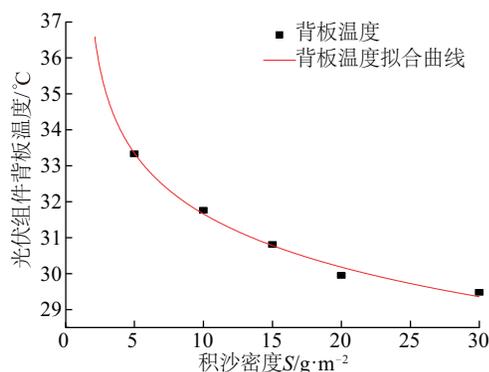


图6 积沙密度和光伏组件背板温度变化关系

Fig. 6 Relationship between sediment density and temperature of backplane of photovoltaic module

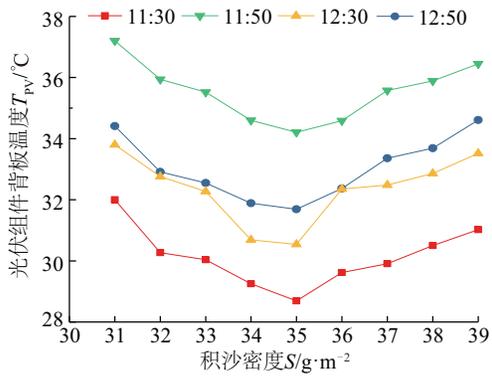


图7 某一时刻积沙密度和光伏组件温度变化关系

Fig. 7 Relationship between density of sand and temperature of photovoltaic modules at certain time

根据式(1)及上述结果进行分析,可知光伏组件表面积沙会使其背板温度降低,且当组件表面积沙密度不断增大时,光伏组件背板温度会减小,当辐射强度降低时,光伏组件的背板温度和不同积沙密度光伏组件之间的温度差也会随之降低。因此积沙对光伏组件的散热性能的影响要远远小于积沙对光伏组件所吸收能量的影响。为更好地分析积沙对光伏组件温度的影响,引入一个无量纲量——光伏组件的相对透光率  $\gamma$ ,即积沙光伏组件的透光率和清洁组件的透光率的比值。实验方法是将与光伏组件相同大小的钢化玻璃安装在实验台架上,与光伏组件的安装倾角相同,然后依次铺设不同积沙密度的沙尘,将2个辐照仪(精度为  $0.1 W/m^2$ )分别放置在积沙和清洁的钢化玻璃板后面,分别记录积沙钢化玻璃板和清洁钢化玻璃板的透光率,多次测量求其平均值。

当光伏组件表面的积沙密度由  $0 g/m^2$  增至  $35 g/m^2$  时,光伏组件的相对透光率降低了 39%,温度也一直在下降,所以在积沙密度小于等于  $35 g/m^2$  时,积沙对光伏组件背板温度的影响主要是因为遮挡而造成吸收辐射能的减小,从而使光伏组件的背板温度出现降低的趋势。

当光伏组件表面积沙密度大于  $35 g/m^2$  时,光伏组件的背板温度会随积沙密度的增大而增大,这是因为沙尘对光伏组件表面钢化玻璃的透光率影响到一定程度时,透光率变化会很小,组件表面积沙密度为  $40 g/m^2$  时光伏组件的相对透光率与积沙密度为  $35 g/m^2$  时的相对透光率相比仅仅降低了 0.8%,也就是说对光伏组件所吸收的辐射能影响的波动变得很小,这时组件温度上升的原因是由于沙尘的导热性能较弱,导热率小,沙物质

自身的热容量较小,消除层次之间温差的能力也是较弱,因此会使组件的散热性能降低,增大其热阻,此时这一因素占据主导地位,所以光伏组件的背板温度会升高。当光伏组件表面的沙尘完全遮挡住太阳辐射时,其温度不会再上升,这是因为热阻虽然在增大,但光伏组件不再接收辐射了,只有散热,此时光伏组件的温度会慢慢下降到环境温度。

## 2.2 不同沙尘粒径对光伏组件温度性能的影响

图8是不同沙尘粒径实验时的风速散点图,该风速下未达到沙尘的起动风速,故沙尘不能被吹起。

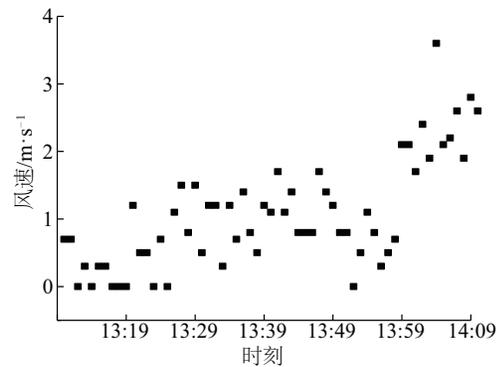


图8 不同沙尘粒径实验时风速散点图

Fig. 8 Scatter plots of wind speed in experiments with different sand and dust particle sizes

图9、图10是相同质量不同沙尘粒径时光伏组件温度的变化情况,从图中可看出光伏组件表面无沙尘时温度最高,当光伏组件表面积沙粒径增大( $0 \sim 0.10 mm$ )时,光伏组件的温度呈现出先下降后上升的趋势,且在粒径为  $0.04 \sim 0.06 mm$  区间时光伏组件的温度最低,其温度降低的最大值为  $6.62^{\circ}C$ ,这是由于相同质量的沙尘,粒径越小,其沙尘的颗粒越多,颗粒之间的间隙也就越小,对光伏组件透光率的影响越大,此时的相对透光率下降了 26.7%,使光伏组件吸收的辐射能减少,当太阳光照射到沙尘上,还会发生散射以及沙尘会吸收一小部分太阳光,故此时光伏组件的温度最低,在粒径为  $0.06 \sim 0.10 mm$  时出现上升的趋势是因为粒径逐渐变大,颗粒之间的间隙越大,对光伏组件的透光率影响逐渐变小,此时组件的相对透光率比粒径为  $0.04 \sim 0.06 mm$  时组件的相对透光率提高了 11.7%,故呈现上升的趋势。

当光伏组件表面的沙尘粒径在  $0.10 \sim 0.40 mm$  时,光伏组件的温度呈现出先降后升的趋势。在沙尘粒径为  $0.10 \sim 0.30 mm$  时光伏组件的温度出现下降的趋势,

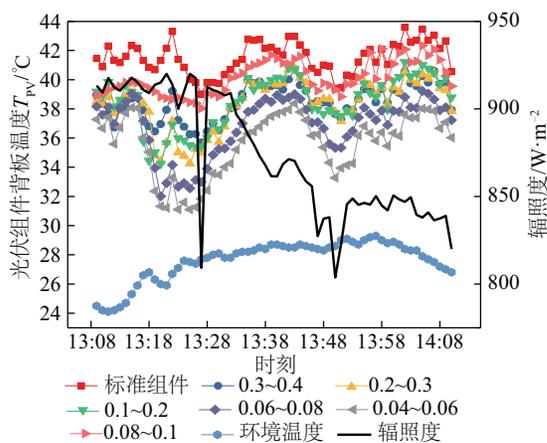


图9 沙尘粒径和光伏组件温度变化关系

Fig. 9 Relationship between sand particle size and photovoltaic module temperature

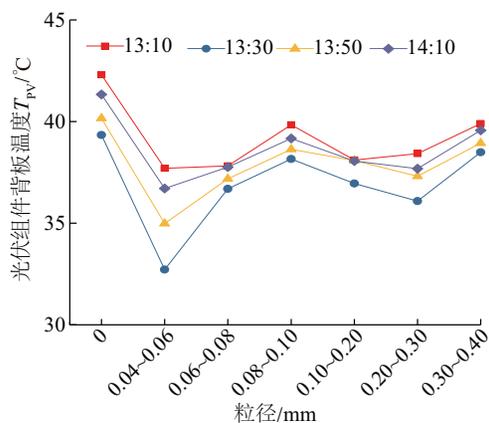


图10 某一时刻沙尘粒径和光伏组件温度变化关系

Fig. 10 Relationship between sand particle size and temperature of photovoltaic modules at certain time

这是因为沙尘的粒径较大,其颗粒数量较少,颗粒之间的间隙越来越大,从而对光伏组件的透射率影响越来越小,此时组件的相对透光率与清洁组件的相对透光率相比仅降低了4.1%且光伏组件的散热性能逐渐变大。在沙尘粒径为0.30~0.40 mm时光伏组件的温度出现上升的趋势,大粒径的沙尘在光伏组件的表面的数量很少,且由于粒径较大,自身的重力较大,很难在组件上表面停留,多数都停留在光伏组件的下表面,因此在此粒径下光伏组件的背板温度是最接近清洁组件的背板温度,故温度呈现上升的趋势,其温度降低的最大值仅为2.3℃,温度降低的最小值仅为0.85℃。

### 3 结论

1) 光伏组件的背板温度与环境温度和辐照度呈现出正相关的关系,清洁光伏组件(表面无沙尘)的背板温

度是高于积沙光伏组件的背板温度,说明光伏组件表面积沙会造成光伏组件温度的降低。

2) 当光伏组件表面的积沙密度不断增大时,光伏组件的温度呈现出先下降后上升的趋势,当光伏组件表面的积沙密度小于等于 $35 \text{ g/m}^2$ 时,光伏组件的背板温度出现降低的趋势,此时影响温度的主要因素是因为遮挡而造成吸收辐射能的减小;当光伏组件表面的积沙密度大于 $35 \text{ g/m}^2$ 时,光伏组件的背板温度出现上升的趋势,是由于光伏组件表面积沙会使组件的散热性能降低,会增大其热阻,此时这一因素占据主导地位;当光伏组件表面的沙尘完全遮挡住太阳辐射时,组件的温度不会上升,此时组件温度和环境温度相接近。

3) 当光伏组件表面积沙粒径增大时,光伏组件的温度整体呈现出先下降后上升的趋势,且在粒径为0.04~0.06 mm这个区间时光伏组件的温度是最低的,其温度降低的最大值为6.62℃,在沙尘粒径为0.30~0.40 mm时光伏组件的温度是积沙组件中温度最高的,与清洁组件相比其温度降低的最大值仅为2.3℃,温度降低的最小值仅为0.85℃。

### [参考文献]

- [1] 周青,徐林波,周艳红. 占地集约化光伏阵列布置方式研究[J]. 建筑电气, 2016, 35(9): 53-56.  
ZHOU Q, XU L B, ZHOU Y H. A study on the layout mode of land-intensive photovoltaic arrays [J]. Building electricity, 2016, 35(9): 53-56.
- [2] 赵春江,崔容强. 太阳能建材技术的研究与开发—光伏屋顶热性能的调查[J]. 太阳能学报, 2003, 24(3): 352-356.  
ZHAO C J, CUI R Q. Research and development of solar building materials technology—Investigation on thermal performance of photovoltaic roofs [J]. Acta energiae solaris sinica, 2003, 24(3): 352-356.
- [3] 张宇,白建波,曹阳. 积灰对屋顶光伏电站性能的影响[J]. 可再生能源, 2013, 31(11): 9-12.  
ZHANG Y, BAI J B, CAO Y. Effect of ash accumulation on the performance of roofing photovoltaic power plant [J]. Renewable energy, 2013, 31(11): 9-12.
- [4] 程序,谭志萍. 一种光伏电池组件的温度预测方法[J]. 物联网技术, 2013, 3(11): 32-33.  
CHENG X, TAN Z P. A Method for Predicting the Temperature of Photovoltaic Cell Modules [J]. Internet of things technology, 2013, 3(11): 32-33.
- [5] 牛海霞,王京,董正茂. 光伏组件表面灰尘和温度对

- 其发电量预测实验研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2018 (4): 82-83.
- NIU H X, WANG J, DONG Z M. Experimental study on prediction of power generation by photovoltaic module surface dust and temperature[J]. Inner Mongolia science technology and economy, 2018 (4): 82-83.
- [6] AKHMATO V, GALSTER G, LARSEN E. Questionable effects of antireflective coatings on inefficiently cooled solar cell[J]. Solar energy materials and solar cells, 1998, 56(1): 17-28.
- [7] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes[M]. New York: William Morrow & Company, 1941: 264.
- [8] 官燕玲, 张豪, 闫旭洲, 等. 灰尘覆盖对光伏组件性能影响的原位实验研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37 (8): 1944-1950.
- GUAN Y L, ZHANG H, YAN X Z, et al. In-situ experimental study on the effect of dust coverage on the performance of photovoltaic modules [J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37 (8): 1944-1950.

## EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECT OF DESERT SAND ON TEMPERATURE PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC MODULES

Zhao Mingzhi<sup>1</sup>, Wang Shuai<sup>1</sup>, Zhang Zhiming<sup>2</sup>, Zhang Dan<sup>1</sup>, Wu Liling<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Planning and Construction Bureau of Chifeng Economic Transformation Development Pilot Zone, Chifeng 024076, China)

**Abstract:** This paper studies the influence on the temperature performance of photovoltaic modules by analyzing dust with different sediment density and sand particle size that deposited on the surface of photovoltaic modules. The results show that the backsheet temperature of the clean photovoltaic module is higher than that of the sedimentary photovoltaic module. When the density of the sand on the surface of the photovoltaic module is continuously increasing, the temperature of the photovoltaic module first decreases and then rises. When the surface sand density is less than or equal to  $35 \text{ g/m}^2$ , the main factor affecting the temperature is the reduction of the absorbed radiant energy due to shielding. When the sand density on the surface of the photovoltaic module increases to  $35 \text{ g/m}^2$ , it is affected by the shielding. The temperature reduction reaches the maximum value. When the sand accumulation density is greater than  $35 \text{ g/m}^2$ , the surface area of the sand reduces the heat dissipation performance of the module, the thermal resistance increases, and the temperature of the backplane increases. When the dust on the surface of the module completely shields the solar radiation, the temperature of the module will not rise. Due to heat dissipation, the temperature of the module will slowly drop to the ambient temperature. When the surface area of deposited dust on the photovoltaic module increases the overall temperature of the photovoltaic module. It shows a trend of falling first and then rising. The temperature of the photovoltaic module is the lowest when the particle diameter is in the range of 0.04-0.06 mm. Compared with the clean module, the maximum temperature decrease is  $6.62 \text{ }^\circ\text{C}$ . When the sand particle diameter is in the range of 0.3-0.4 mm, the temperature of the photovoltaic module is the highest among the sandy modules. In comparison to the clean module, the maximum and the minimum temperature reduction is only  $2.3 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $0.85 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectively.

**Keywords:** photovoltaic module; dust; density of sand; particle size; temperature