

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0020

颗粒群冲击诱导光伏电池性能衰减的特性与机理*

王易航^{1,2,3}, 吴先前³, 黄晨光^{1,2,3}

(1. 中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031;

3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 光伏电池由于具有较高的光电转化效率, 在沙漠等太阳能充足的地方被广泛应用。但在沙尘长期冲击的环境下, 光伏电池内部结构易出现累积损伤, 使光电转化效率大幅降低。因此, 研究颗粒群冲击条件下光伏电池的力-电行为具有重要意义。基于分离式霍普金森压杆, 发展了一种驱动较大尺寸颗粒群高速冲击的实验方法, 并系统测量了不同冲击条件下, 多晶硅光伏电池的损伤行为与光电转化性能衰减规律。研究结果表明, 随着颗粒直径、冲击速度和数密度的增加, 光伏电池的光电转换效率快速降低; 颗粒冲击后光伏电池表现出三种典型的损伤模式, 并给出了对应的应力阈值条件。基于实验测试结果, 发展了多晶硅光伏电池颗粒群冲击损伤诱导光电转化性能退化模型, 为沙漠冲击环境下光伏电池光电性能衰减规律提供了有效的预测方法。

关键词: 光伏电池; 颗粒群冲击; 光电转化效率; 转化效率退化模型

中图分类号: O341

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

Performance deterioration behavior of photovoltaic cells subjected to massive-particles impact environment

WANG Yihang^{1,2,3}, WU Xianqian³, HUANG Chenguang^{1,2,3}

(1. School of Environmental Science and Optoelectronic Technology,

University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

2. Heifei Institute of Physical Sciences, China Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Photovoltaic cells have been widely used in desert areas and other solar-rich environments due to the relatively high solar energy to electricity conversion efficiency. Under the long-term dust impact condition in the desert dust environment, the internal structures of photovoltaic cells are prone to damage, resulting in a significant deterioration of photoelectric conversion efficiency. Therefore, it is of great significance to understand the photoelectric response of photovoltaic cells subjected to massive particles impact. Firstly, a millimeter-scale high-speed particle impact experimental method was developed based on split Hopkinson pressure bar (SHPB) facility. The experimental results showed that the damage of the photovoltaic cell was mainly caused by the first impact, leading to the damage characteristics including shear microcracking, brittle fracture and delamination. Then, the critical stresses corresponding to the three failure modes were analyzed in terms of the initial impact kinetic energy. The first failure mode assumes that high-speed particles behave as fluids, so impulsive compressive stresses are used in the model. The damage in the second failure mode comes from high contact stresses on the impacted surface. The damage in the third mode of failure comes from bending stresses. The photovoltaic performance degradation of the

* 收稿日期: 2023-01-28; 修回日期: 2023-09-04

第一作者: 王易航(1997—), 男, 硕士, wychang@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 吴先前(1982—), 男, 博士, 副研究员, wuxianqian@imech.ac.cn

photovoltaic cells after impact under different particle velocities, diameters, and number densities were investigated, showing that the photoelectric conversion efficiency of the photovoltaic cells decreased significantly with the increase of the particle size, the impact velocity, and the number density. Finally, a damage-induced photovoltaic performance degradation (DPPD) model under sand and gravel impact conditions is established to quantitatively describe the influence of impact parameters on the photovoltaic conversion efficiency, in which the two-dimensional damage factor D is proposed to represent the average damage level of the damaged area. The results of the DPPD model are in agreement with the experimental results, validating the applicability of the model for predicting accurately the photovoltaic cell photovoltaic performance under massive sand and gravel impact environment.

Keywords: photovoltaic cell; massive-particle impact; photoelectric conversion efficiency; conversion efficiency degradation model

光伏电池是一种经济、可再生、无污染的发电方式,具有能量转换环节少、转换效率高等优势。光伏电池主要由晶体硅制成,包括多晶硅光伏电池、单晶硅光伏电池以及非晶硅薄膜光伏电池^[1]。多晶硅光伏电池光电转换效率为 17%~19%,略低于单晶硅光伏电池,但因其制造成本低而被广泛应用^[2-3]。通常,多晶硅光伏电池主要分布在日照条件充足的地方,包括一些沙漠区域。在极端恶劣环境下,如强沙尘环境等,多晶硅光伏电池会受到气溶胶消光效应、沙质沉积和沙砾冲击等环境因素的影响,大幅降低其发电的稳定性与持续性^[4-5]。

在强沙尘环境下,一方面,沙质沉积引起局部遮光效应而降低光伏电池的输出效率^[6-10];另一方面,由于大量沙砾的长期冲击,使光伏电池产生累积损伤,从而极大降低了光伏电池的光电转换效率^[11-12]。沙尘环境下,沙砾最大直径可达 10 mm,相对冲击速度可高达 120 m/s^[13],极大影响光伏电池板的正常工作。大量颗粒的长期冲击,会在光伏电池内部产生高幅值的残余应力,使电池的整体结构发生弯曲,从而影响光电转化效率^[14]。Xiao 等^[15]建立了一种基于拉曼光谱的薄膜光伏电池受冲击后的残余应力分析方法,发现经过大量微米直径颗粒冲击后,光伏电池的最大残余应变约为 0.3%,残余应力高达数百兆帕,光伏电池的光电转换性能和寿命显著降低。另外,在微颗粒的长期冲击下,逐渐萌生脆性断裂微裂纹,并逐渐演化为宏观断裂,从而产生永久性的光电转化效率衰减。Xiao 等^[16]基于激光驱动微米尺寸颗粒高速冲击,发展了一种室内模拟风沙环境对光伏电池板冲蚀行为的实验方法^[17],发现随着微颗粒冲击速度的增加,光伏电池的光电转化效率急剧下降,并采用力学模型给出了不同条件下光伏电池的失效强度^[18-21]。但是,由于激光能量的限制,目前难以实现毫米直径颗粒群对光伏电池的高速冲击条件。

为此,本文中基于分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB),发展一种可控的毫米直径颗粒群高速冲击实验方法;基于该方法,研究不同颗粒速度、直径、数密度条件下,光伏电池的冲击损伤特征及光电转化衰减规律,并建立颗粒群冲击损伤诱导光电转换效率退化(damage-induced photovoltaic performance degradation, DPPD)模型,定量描述无量纲损伤程度和影响面积对光电转换效率的影响规律,为极端环境下光伏电池的性能预测方法提供参考。

1 实验方法

1.1 多晶硅光伏电池

实验中多晶硅光伏电池样品面内尺寸为 41 mm×39 mm,厚度为 0.18 mm,开路电压为 2.4 V,短路电流为 190 mA。电池结构示意图如图 1 所示,表层为厚 0.78 mm 的环氧树脂封装层,为芯层硅电池片提供物理防护;底层基板厚度为 0.84 mm,可有效减缓残余应力导致的弯曲效应。在标准测试条件(100 mW/cm², AM1.5, $T=25$ °C)下,多晶硅光伏电池最大输出功率为 0.304 W,最佳工作电压为 1.75 V,最佳工作电流为 174 mA,光电转化效率为 19.0%。

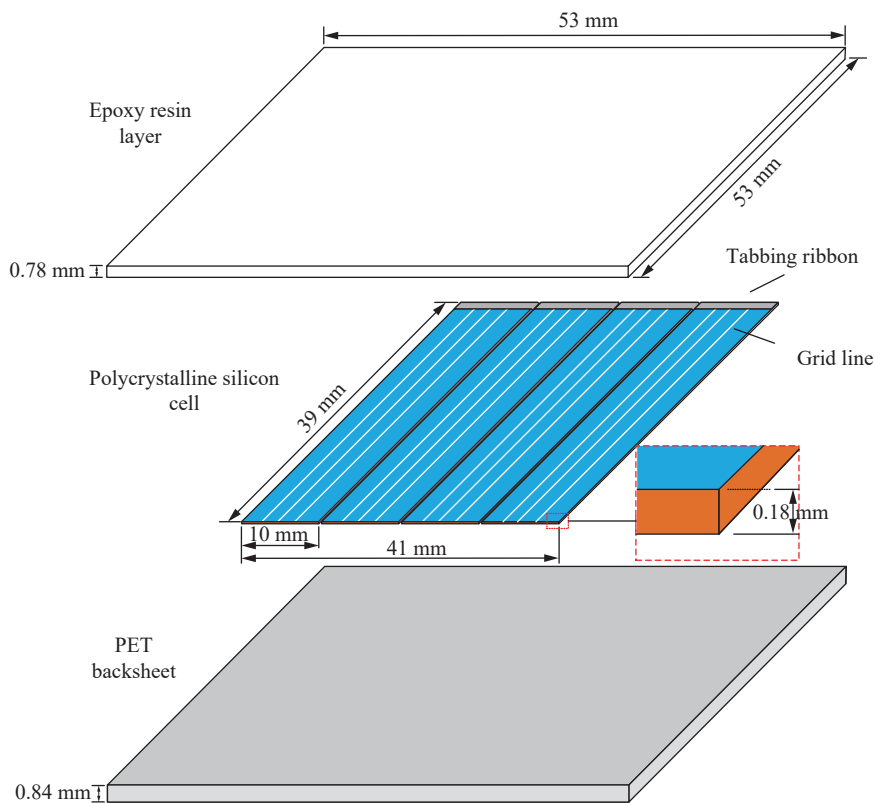


图 1 多晶硅光伏电池结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a polysilicon photovoltaic cell

1.2 SHPB 驱动颗粒群冲击实验方法

考虑到叠加效应, 设计了颗粒群短期高速冲击实验, 来获得光伏电池的光电效率退化行为, 为后续建立与长期低速冲击损伤之间的关联打下基础。采用 SHPB^[22-23] 驱动较大尺寸颗粒群高速冲击光伏电池, 如图 2 所示。通过高压气枪驱动 $\varnothing 24 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的 7075 铝合金子弹撞击 $\varnothing 24 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ 的 7075 铝合金入射杆的左端, 产生压缩波并向右传播, 在到达入射杆的右端后反射形成拉伸波。实验前, 大尺寸颗粒群采用硅脂轻微附着在入射杆的右侧端面上。在拉伸波作用下, 附着的颗粒与入射杆分离, 以较高的速度冲击光伏电池靶板, 并发生反弹。由于入射杆端面平整, 颗粒的速度可认为呈均匀分布。采用不锈钢挡板阻挡入射杆的刚体运动。实验中为了获得较高的冲击速度, 铝合金子弹及入射杆会部分发

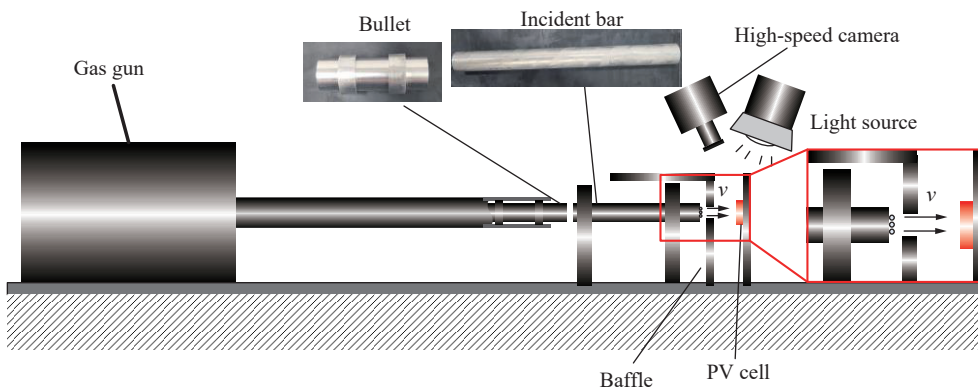


图 2 颗粒群冲击实验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of massive-particles impacting photovoltaic cells

生塑性变形, 每次实验更换子弹及入射杆。整个冲击过程采用高速摄影进行捕捉, 采样频率为 18000 s^{-1} , 由此获得颗粒群冲击前后的速度, 分析颗粒群的能量损失。为模拟沙尘环境, 实验选用粒径分别为 1、2 和 3 mm 的球形 SiO_2 颗粒^[24]。通过调节气枪装置的气压调控颗粒群的冲击速度, 通过改变端面的颗粒数来改变颗粒群的数密度。

2 实验结果与分析

2.1 微颗粒冲击实验与表征

图 3 为典型的颗粒群对光伏电池的冲击过程。初始时刻颗粒以几乎相同的速度高速冲击光伏电池后反弹, 且反弹速度相近, 表明该次冲击过程中颗粒的能量损失几乎相等, 每个颗粒的冲击效果相近。反弹的颗粒与入射杆右端再次撞击反弹, 对光伏电池形成二次冲击。由于入射杆端反弹的颗粒速度较低, 且对光伏电池的撞击角度不一致, 导致二次撞击后颗粒反弹的速度及角度差别较大。因此, 认为光伏电池的冲击损伤主要由第一次冲击导致的。实验中颗粒群的冲击速度 $30 \sim 128 \text{ m/s}$, 颗粒直径 $1 \sim 3 \text{ mm}$, 颗粒数目 $1 \sim 100$, 每组冲击工况重复 3 次实验。

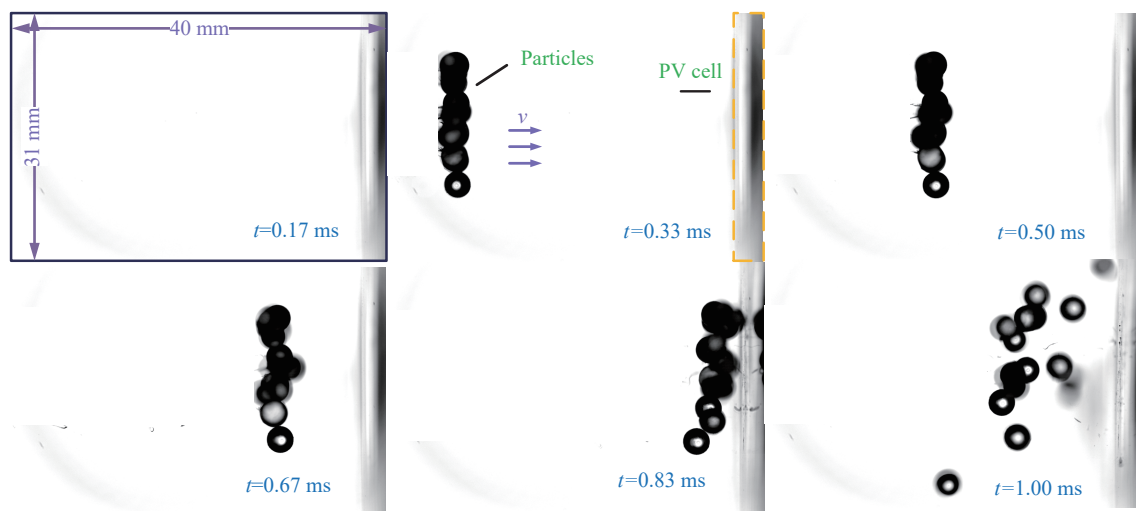
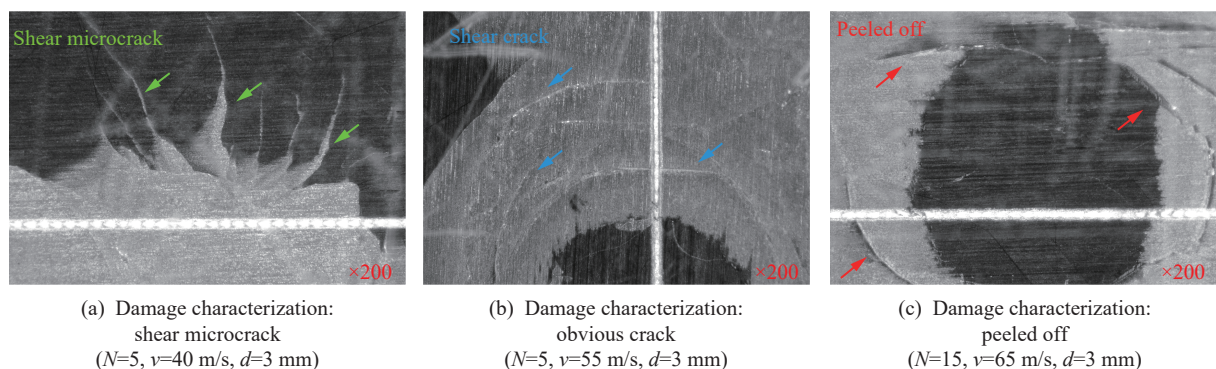


图 3 颗粒冲击光伏电池过程(颗粒数 $N=15$, 冲击速度 $v=65 \text{ m/s}$, 粒径 $d=3 \text{ mm}$)

Fig. 3 Impact history of particles on the photovoltaic cell ($N=15$, $v=65 \text{ m/s}$, $d=3 \text{ mm}$)

图 4 为光学显微镜观察到的不同工况下多晶硅光伏电池的损伤形貌。图 4(a) 为 $N=5$ 、 $v=40 \text{ m/s}$ 、 $d=3 \text{ mm}$ 冲击下的形貌。可以看到冲击区域边缘有延伸而出的剪切微裂纹。图 4(b) 为 $N=5$ 、 $v=55 \text{ m/s}$ 、



(a) Damage characterization:
shear microcrack
($N=5$, $v=40 \text{ m/s}$, $d=3 \text{ mm}$)

(b) Damage characterization:
obvious crack
($N=5$, $v=55 \text{ m/s}$, $d=3 \text{ mm}$)

(c) Damage characterization:
peeled off
($N=15$, $v=65 \text{ m/s}$, $d=3 \text{ mm}$)

图 4 光伏电池损伤表征

Fig. 4 Damage characterization of photovoltaic cells

$d=3$ mm 冲击条件下的形貌, 冲击中心周边存在脆性剪切裂纹。图 4(c) 为 $N=15$ 、 $v=65$ m/s、 $d=3$ mm 冲击下的失效特征, 随着冲击速度的提高, 光伏电池的损伤更加严重, 有明显分层损伤特征。颗粒高速冲击过程中, 表层环氧树脂封装材料表现出黏弹性变形行为, 而中间的芯层产生局部脆性碎裂失效。冲击后封装材料的变形逐渐恢复, 使部分失效芯层剥离^[25-27], 破坏了电池的结构, 严重降低了光伏电池的光电转化性能。

2.2 光伏电池损伤模式

光伏电池的性能退化是由于颗粒群冲击引起的力学损伤导致的。因此, 需要定量描述颗粒群冲击诱导光伏电池的损伤模式和阈值条件, 为不同冲击条件下的损伤评估提供参考。基于实验观察, 颗粒群冲击环境下, 光伏电池的损伤模式可以分为以下三种。

第一种破坏模式(模式 I)的主要损伤特征如图 4(a) 所示。冲击载荷造成变形区域边缘形成大量的微裂纹。模式 I 的单位面积损伤动能均小于单位面积的损伤动能阈值 η ($1.57 \sim 1.61$ J/mm²), 且处于模式 I 光伏电池的光电转化效率无明显衰减。假设在高速冲击条件下, 微颗粒表现为流体性质^[28], 此时模式 I 的冲击应力 σ_I 为:

$$\sigma_I = \rho_p v_i^2 / 2 \quad (1)$$

式中: ρ_p 为微颗粒密度, v_i 为颗粒的冲击速度。实验中颗粒密度为 2650 kg/m³, 颗粒冲击速度为 $0 \sim 65$ m/s。由此可以确定模式 I 的损伤应力小于 6 MPa。光伏电池的失效过程由模式 I 开始。

第二种破坏模式(模式 II)为光伏电池的脆性断裂, 如图 4(b) 所示。模式 II 单位面积的损伤动能为 $1.57 \sim 3.00$ J/mm²。光伏电池的损伤来自冲击表面的高接触应力。根据一维应力波理论^[29], 接触时光伏电池内产生的压应力 σ_{II} 和环向拉应力 σ_{φ} 约为^[30]:

$$\sigma_{r=0} = \sigma_{II} = -v_i [\rho_p c_p \rho_c c_c / (\rho_p c_p + \rho_c c_c)] \quad (2)$$

$$\sigma_{\varphi} = -v_c \sigma_{II} \quad (3)$$

式中: ρ_c 为光伏电池的密度, v_c 为光伏电池的泊松比。 c_p 和 c_c 分别为颗粒和光伏电池的纵波速度:

$$c_p = \sqrt{E_p / \rho_p}, \quad c_c = \sqrt{E_c / \rho_c} \quad (4)$$

式中: E_p 和 E_c 分别为颗粒和光伏电池的弹性模量。 $c_p=2340$ m/s, $c_c=750$ m/s。 $v_i=55$ m/s 时, 压应力 $\sigma_{II}=175$ MPa, 环向拉应力 $\sigma_{\varphi}=67$ MPa; $v_i=87$ m/s 时, 压应力 $\sigma_{II}=277$ MPa, 环向拉应力 $\sigma_{\varphi}=97$ MPa。

第三种破坏模式(模式 III)为冲击弯曲诱导的界面分层破坏, 如图 4(c) 所示。模式 III 单位面积的损伤动能为 $3.00 \sim 12.47$ J/mm²。光伏电池冲击区域的弯曲正应力可以通过两端固支梁的弯曲理论来估计。冲击位置的集中力 $F = p\pi r_p^2$ ^[31], 其中动压 $p = \rho_p v_i^2 / 2$, r_p 为损伤区域的半径, 认为与颗粒的半径相同。

$$\sigma_{\max} = 400 p r_p^2 (3 - 2r_p / R) / (6H_{PV}^2) \quad (5)$$

式中: R 为光伏电池的等效半径, H_{PV} 为光伏电池的厚度。在 $r_p=1$ mm, $v_i=122$ m/s 时, $F=62$ N, $\sigma_{III}=\sigma_{\max}=355$ MPa。而 $r_p=1.5$ mm, $v_i=98$ m/s 时, $F=90$ N, $\sigma_{III}=515$ MPa。

2.3 受损电池光电性能测试

实验采用如图 5 所示的 $I-V$ 测试方法, 虽然其准确性略低于外量子效率和 SolTrace tools^[32], 但由于该方法易实现, 且测试成本较低, 因此在工程上应用广泛。光伏电池受冲击前后的典型电输出曲线如图 6 所示, 光电测试结果如表 1 所示。在标准测试环境 (100 mW/cm², AM1.5, $T=25$ °C) 下, 工作电流保持稳流特性, 直至工作电压达到 1.75 V, 输出功率达到最大值 $P_m=0.304$ W, 光电转化效率为 19.0% , 此时的工作电压和工作电流称为最佳工作电压和最佳工作电流, 分别记为 U_m 和 I_m 。从图 6 可以发现, P_m 、 U_m 和 I_m 衰减均较快, 而 $I-U$ 曲线拐点偏移表明光伏电池稳流特性下降。对于 $\varnothing 3$ mm 颗粒, 光伏电池冲击的损伤阈值速度为 30 m/s。当 $N=15$ 、 $v=65$ m/s 时, 光伏电池输出功率衰减 30% , 光电转化效率降至 13.3% ; 对于 $\varnothing 2$ mm 颗粒, 冲击损伤阈值速度为 65 m/s, 当 $N=15$ 、 $v=128$ m/s 时, 光伏电池输出功率衰减

36%, 光电转化效率降至 12.2%; 对于 $\varnothing 1 \text{ mm}$ 颗粒, 在实验测试最大冲击速度 128 m/s 下未表现出明显损伤, 光伏电池的光电转化效率保持在 19.0%。此外, 考虑到砂砾冲击粒径分布不均的情况, 采用 $\varnothing 3 \text{ mm}$ 和 $\varnothing 2 \text{ mm}$ 颗粒群进行先后冲击。在 $N=5, v=45 \text{ m/s}, d=3 \text{ mm}$ 与 $N=10, v=87 \text{ m/s}, d=2 \text{ mm}$ 的冲击工况下, 光伏电池输出功率衰减 12.5%, 光电转化效率降至 13.3%。在不同参数冲击下, 光伏电池呈现出微裂纹、明显脆性断裂和芯层脱落三种典型损伤模式^[33-36]。

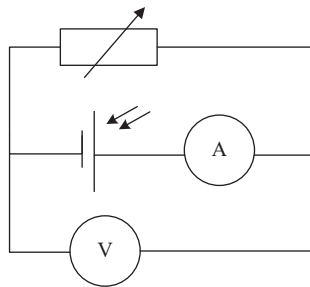


图 5 I-V 光电测试电路图
Fig. 5 I-V test circuit diagram

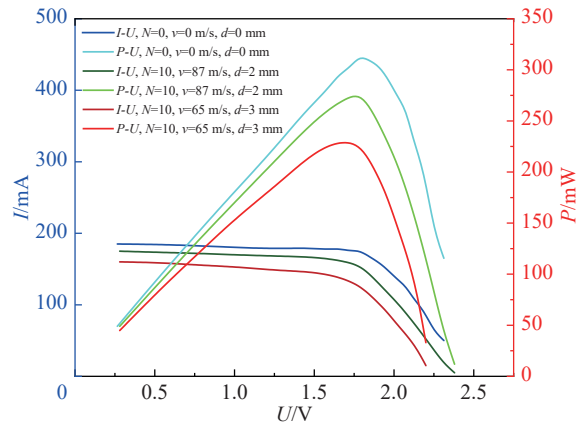


图 6 光伏电池受冲击前后的典型电输出曲线
Fig. 6 Typical electrical output curves of photovoltaic cells before and after impact by massive particles

表 1 光伏电池冲击前后光电测试结果

Table 1 Light-electricity conversion performance of the photovoltaic cells before and after impact

测试编号	颗粒直径/mm	冲击速度/m/s	颗粒数	输出功率变化/%	光电转化效率/%	损伤特征
1	3	0	0	0	19.0	完好
2	3	30	5	0	19.0	完好
3	3	40	5	-0.8	18.8	微裂纹
4	3	45	5	-3.2	18.4	微裂纹
5	3	55	5	-6.1	17.8	明显断裂
6	3	45	1	-0.8	18.8	微裂纹
7	3	55	1	-1.4	18.7	明显断裂
8	3	65	1	-2.2	18.6	分层脱胶
9	3	65	10	-22.2	14.7	分层脱胶
10	3	65	15	-30.0	13.3	分层脱胶
11	2	65	10	-0.1	19.0	微裂纹
12	2	87	10	-9.9	17.2	明显断裂
13	2	122	10	-27.0	13.9	分层脱胶
14	2	84	15	-12.3	16.7	明显断裂
15	2	128	15	-36.0	12.3	分层脱胶
16	1	128	100	-2.3	19.0	完好
17	3	45	5	-12.5	16.6	明显断裂
18	2	87	10	-23.0	14.6	分层脱胶

2.4 DPPD 模型

为了建立冲击参数对光伏电池光电转化性能的定量关系, 考虑颗粒的密度、数密度、直径以及冲击速度对光伏电池的影响, 建立了损伤诱导光电性能退化 (DPPD) 模型^[16]。光伏电池冲击损伤后的光电转换效率可以认为是完好区域和受损区域两部分光电转化效率的总和:

$$\begin{aligned} E_{PV} &= E_{PV0} \left[1 - (NS_{\text{damaged}}/S_{\text{all}}) \right] + E_{PV1} (NS_{\text{damaged}}/S_{\text{all}}) \\ &= E_{PV0} \left[1 - (NS_{\text{damaged}}/S_{\text{all}}) \right] + E_{PV0} (1 - D) (NS_{\text{damaged}}/S_{\text{all}}) \\ &= E_{PV0} \left[1 - D (NS_{\text{damaged}}/S_{\text{all}}) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

式中: E_{PV0} 为完好光伏电池的光电转化效率, E_{PV} 为冲击后光伏电池的光电转化效率, E_{PV1} 为光伏电池受损区域的效率, S_{all} 为光伏电池的感光区域总面积, S_{damaged} 代表单颗粒冲击下的受损面积, N 为颗粒数, 无量纲参数 D 取值范围为 $0 \sim 1$, 表示受损区域的平均损伤程度。 D 可由单位面积下损伤动能与冲击动能阈值的比值来表示。当 $\eta < E_k/S_{\text{damaged}} < \zeta$ 时,

$$D = \alpha (E_k/S_{\text{damaged}} - \eta) / \eta \quad (7)$$

$$S_{\text{damaged}} = \beta \pi d \times 1 = \beta \pi d \quad (8)$$

式中: α 为无量纲常数, E_k/S_{damaged} 为单位面积 (mm^2) 微颗粒冲击动能, η 为光伏电池单位面积的损伤动能阈值, ζ 为单位面积的失效动能阈值。由于电池样品存在一定差异 (如封装厚度、硅片缺陷), 且冲击位置 (如冲击区域是否存在焊带) 不同会导致不同的损伤特性, η 与 ζ 存在一定误差。为此, 取不同冲击工况下得到的 η 与 ζ 的平均值进行计算。式 (8) 中 β 为无量纲常数, d 为微颗粒直径。将式 (7)~(8) 代入式 (6), 可得:

$$E_{PV} = E_{PV0} \left[1 - N (Av^2d^3 - Bd) \right] \quad (9)$$

式中: $A = \alpha \beta \pi \rho_p / 12 \eta$, $B = \alpha \beta \pi / S_{\text{all}}$ 。 ρ_p 为微粒密度。 $E_k/S_{\text{damaged}} \leq \eta$ 与 $E_k/S_{\text{damaged}} \geq \zeta$ 分别为未损伤与完全失效, 故 D 分别取 0 和 1。因此:

$$E_{PV} = \begin{cases} E_{PV0} & E_k/S_{\text{damaged}} \leq \eta \\ E_{PV0} \left[1 - N (Av^2d^3 - Bd) \right] & \eta < E_k/S_{\text{damaged}} < \zeta \\ E_{PV0} (1 - \pi \beta N d / S_{\text{all}}) & E_k/S_{\text{damaged}} \geq \zeta \end{cases} \quad (10)$$

图 7(a) 和 (b) 为 $\varnothing 3 \text{ mm}$ 颗粒分别在颗粒数目 $N=15$ 和 $N=5$ 的情况下, 冲击诱导光电转换效率的衰减与颗粒冲击速度的关系。完好的光伏电池的转换效率为 19.0%。冲击速度从 23 m/s 增加到 65 m/s 时, 光电转换效率分别下降至 15.2%、17.3%。根据式 (10) 对多组实验数据进行拟合, 得到 $A = 2.33 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{J} \cdot \text{mm})$, $B = 3.51 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-2}$ 。由此可以得出该光伏电池在 $\varnothing 3 \text{ mm}$ 颗粒群冲击下的损伤阈值速度 $v_T \approx 40 \text{ m/s}$ 。低于该临界冲击速度时, 光伏电池的光电转化效率衰减可以忽略不计。根据图 7(a) 所示的拟合结果, $\varnothing 3 \text{ mm}$ 颗粒群的极限速度 $v_{\text{limit}} \approx 128 \text{ m/s}$ 。单位面积冲击动能 E_k/S_{damaged} 超过单位面积动能损伤阈值 η 时, 光伏电池受损区域将发生结构破坏而完全失效。在 v_T 和 v_{limit} 之间, 随着冲击速度的增大, 光伏电池的光电转化效率迅速下降。

图 7(c) 为 $\varnothing 2 \text{ mm}$ 颗粒、颗粒数目 $N=10$ 的冲击参数下, 冲击诱导光电转换效率的衰减与颗粒冲击速度的关系。当冲击速度从 36 m/s 增加到 112 m/s 时, 光电转换效率从 19.0% 下降到 16.1%。在相同的参数 A 、 B 取值条件下, 根据式 (10) 对实验数据进行拟合, 可得该光伏电池在 $\varnothing 2 \text{ mm}$ 微粒冲击下的损伤阈值速度 $v_T \approx 65 \text{ m/s}$, 极限速度 $v_{\text{limit}} \approx 198 \text{ m/s}$ 。此外, 还拟合了多粒径冲击工况下的预测模型。如图 7(d) 所示, 在 $\varnothing 2 \text{ mm}$ 及 $\varnothing 3 \text{ mm}$ 混合颗粒、颗粒数目 $N=10$ 的冲击参数下, 当冲击速度从 23 m/s 增加到 70 m/s 时, 光电转换效率从 19.0% 下降到 16.3%。混合颗粒群冲击下的损伤阈值速度 $v_T \approx 40 \text{ m/s}$, 极限速度 $v_{\text{limit}} \approx 100 \text{ m/s}$ 。该 DPPD 模型预测的结果与实验测量结果相符, 验证了模型的适用性, 为极端环境下沙砾对光伏电池的冲击损伤与光电转化性能衰减行为提供了有效的预测方法。

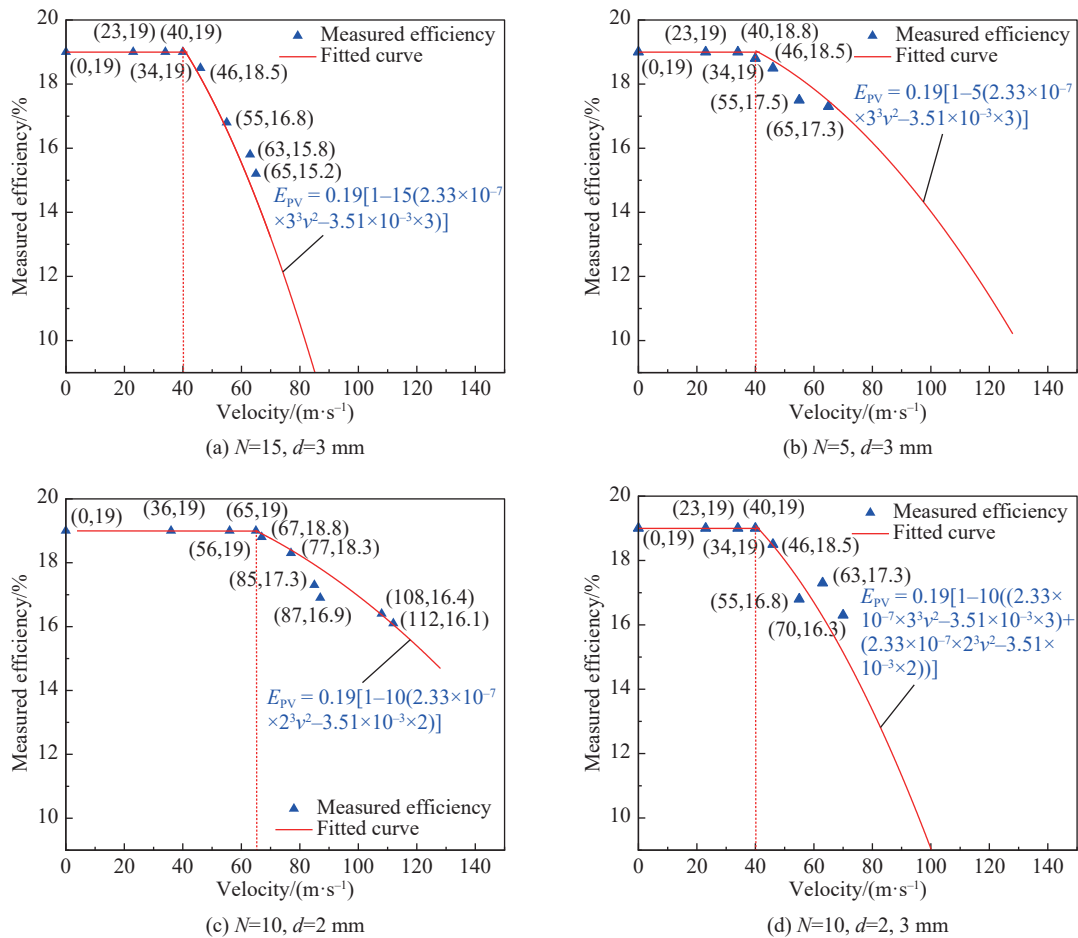


图 7 光电转化效率衰减与小颗粒冲击速度关系(实验数据、DPPD 模型拟合结果)

Fig. 7 Photovoltaic cell damage characterization versus particle impact velocity (experimental data and DPPD model fitting results)

3 结 论

(1) 基于霍普金森压杆装置, 发展了毫米直径颗粒群冲击诱导光伏电池损伤与性能退化的实验方法, 该方法能够有效模拟极端风沙环境下光伏电池的损伤与性能衰减特性。

(2) 获得了不同冲击参数下, 多晶硅光伏电池的冲击损伤形貌特征、光电转化效率的衰减特性以及冲击损伤的临界阈值速度。发现随着颗粒直径、冲击速度和颗粒群数密度的增加, 光伏电池的光电转换效率快速降低。

(3) 单位面积的冲击动能决定光伏电池的失效模式。随着单位面积冲击动能的提高, 光伏电池分别展现出冲击区边缘微裂纹、冲击区域剪切破坏、冲击区界面分层三种典型失效模式。基于不同的力学机制, 给出了三种失效模式对应的应力阈值条件。

(4) 考虑颗粒群参数和冲击参数的影响, 建立了颗粒群冲击诱导光伏电池光电性能衰减的物理模型, 并通过实验结果验证了模型的适用性, 为极端风沙环境下光伏电池的光电转化性能预测提供了一种有效的方法。

参考文献:

[1] 李靖琳. 硅晶体光伏电池输出特性的建模与仿真研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018: 34-45.
 LI J L. Modeling and simulation of output characteristics of silicon crystal photovoltaic cells [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018: 34-45.

- [2] 黄仕相. 光面晶体硅表面质量对其光生伏特效应的研究 [D]. 福建泉州: 华侨大学, 2021: 2–9.
HUANG S X. Study on the influence of the surface quality of smooth crystalline silicon on its photovoltaic effect [D]. Quanzhou, Fujian: Huaqiao University, 2021: 2–9.
- [3] YUAN Y C, WU C W. Thermal analysis of film photovoltaic cell subjected to dual laser beam irradiation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 88: 410–417. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.01.054.
- [4] 张彦, 马梓焱, 袁成清, 等. 环境因素对光伏组件表面的损伤及其防护技术的研究现状 [J]. *腐蚀与防护*, 2020, 41(6): 7–13. DOI: 10.11973/fsyfh-202006002.
ZHANG Y, MA Z Y, YUAN C Q, et al. Research progress of environmental factors on surface damage of PV modules and their protection technology [J]. *Corrosion & Protection*, 2020, 41(6): 7–13. DOI: 10.11973/fsyfh-202006002.
- [5] 赵明智, 苗一鸣, 张旭, 等. 沙漠沙尘粒径对太阳电池输出特性影响的实验研究 [J]. *太阳能学报*, 2019, 40(5): 1247–1252. DOI: 10.19912/j.0254-0096.2019.05.009.
ZHAO M Z, MIAO Y M, ZHANG X, et al. Experimental study on influence of different dust particle size on output characteristics of solar panel [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 40(5): 1247–1252. DOI: 10.19912/j.0254-0096.2019.05.009.
- [6] ALNASER N W, AL OTHMAN M J, DAKHEL A A, et al. Comparison between performance of man-made and naturally cleaned PV panels in a middle of a desert [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 1048–1055. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.058.
- [7] FIGGIS B, AHMED E, AHZI S, et al. Review of PV soiling particle mechanics in desert environments [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 872–881. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.100.
- [8] MASSI P A, MELLIT A, DE PIERI D, et al. A comparison between BNN and regression polynomial methods for the evaluation of the effect of soiling in large scale photovoltaic plants [J]. *Applied Energy*, 2013, 108: 392–401. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.03.023.
- [9] JAVED W, WUBULIKASIMU Y, FIGGIS B, et al. Characterization of dust accumulated on photovoltaic panels in Doha, Qatar [J]. *Solar Energy*, 2017, 142: 123–135. DOI: 10.1016/j.solener.2016.11.053.
- [10] CHEN J X, PAN G B, OUYANG J, et al. Study on impacts of dust accumulation and rainfall on PV power reduction in East China [J]. *Energy*, 2020, 194: 116915. DOI: 10.1016/j.energy.2020.116915.
- [11] MEMICHE M, BOUZIAN C, BENZAHIA A, et al. Effects of dust, soiling, aging, and weather conditions on photovoltaic system performances in a Saharan environment—case study in Algeria [J]. *Global Energy Interconnection*, 2020, 3(1): 60–67. DOI: 10.1016/j.gloi.2020.03.004.
- [12] GHOLAMI A, KHAZAEI I, KHAZAEI S, et al. Experimental investigation of dust deposition effects on photo-voltaic output performance [J]. *Solar Energy*, 2018, 159: 346–352. DOI: 10.1016/j.solener.2017.11.010.
- [13] HACHICHA A A, AL-SAWAFTA I, SAID Z. Impact of dust on the performance of solar photovoltaic (PV) systems under united Arab emirates weather conditions [J]. *Renewable Energy*, 2019, 141: 287–297. DOI: 10.1016/j.renene.2019.04.004.
- [14] TIPPABHOTLA S K, RADCHENKO I, SONG W J R, et al. From cells to laminate: probing and modeling residual stress evolution in thin silicon photovoltaic modules using synchrotron X-ray micro-diffraction experiments and finite element simulations [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2017, 25(9): 791–809. DOI: 10.1002/pip.2891.
- [15] XIAO K L, WU X Q, WU C W, et al. Residual stress analysis of thin film photovoltaic cells subjected to massive micro-particle impact [J]. *RSC Advances*, 2020, 10(23): 13470–13479. DOI: 10.1039/C9RA10082B.
- [16] XIAO K L, WU X Q, SONG X, et al. Study on performance degradation and damage modes of thin-film photovoltaic cell subjected to particle impact [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 782. DOI: 10.1038/S41598-020-80879-W.
- [17] HASSANI-GANGARAJ M, VEYSSET D, NELSON K A, et al. Melt-driven erosion in microparticle impact [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 5077. DOI: 10.1038/s41467-018-07509-y.
- [18] WIESE S, KRAEMER F, BETZL N, et al. Interconnection technologies for photovoltaic modules—analysis of technological and mechanical problems [C]//Proceedings of the 2010 11th International Thermal, Mechanical & Multi-Physics Simulation, and Experiments in Microelectronics and Microsystems. Bordeaux: IEEE, 2010: 1–6. DOI: 10.1109/ESIME.2010.5464518.
- [19] FRAGA M M, DE OLIVEIRA CAMPOS B L, DE ALMEIDA T B, et al. Analysis of the soiling effect on the performance of photovoltaic modules on a soccer stadium in Minas Gerais, Brazil [J]. *Solar Energy*, 2018, 163: 387–397. DOI: 10.1016/j.solener.2018.02.025.

- [20] DE MOURA M F S F, MARQUES A T. Prediction of low velocity impact damage in carbon-epoxy laminates [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2002, 33(3): 361–368. DOI: 10.1016/S1359-835X(01)00119-1.
- [21] LIAO B B, LIU P F. Finite element analysis of dynamic progressive failure properties of GLARE hybrid laminates under low-velocity impact [J]. *Journal of Composite Materials*, 2018, 52(10): 1317–1330. DOI: 10.1177/0021998317724216.
- [22] WU X Q, YIN Q Y, WEI Y P, et al. Effects of imperfect experimental conditions on stress waves in SHPB experiments [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2015, 31(6): 827–836. DOI: 10.1007/s10409-015-0439-0.
- [23] WU X Q, WANG X, WEI Y P, et al. An experimental method to measure dynamic stress-strain relationship of materials at high strain rates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 69: 149–156. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.02.016.
- [24] ZARMAI M T, EKERE N N, ODUOZA C F, et al. Evaluation of thermo-mechanical damage and fatigue life of solar cell solder interconnections [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, 47: 37–43. DOI: 10.1016/j.rcim.2016.12.008.
- [25] ESFAHANI S N, ASGHARI S, RASHID-NADIMI S. A numerical model for soldering process in silicon solar cells [J]. *Solar Energy*, 2017, 148: 49–56. DOI: 10.1016/j.solener.2017.03.065.
- [26] KOISSIN V, SKVORTSOV V, SHIPSHA A. Stability of the face layer of sandwich beams with sub-interface damage in the foam core [J]. *Composite Structures*, 2007, 78(4): 507–518. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.11.012.
- [27] PAPARGYRI L, THERISTIS M, KUBICEK B, et al. Modelling and experimental investigations of microcracks in crystalline silicon photovoltaics: a review [J]. *Renewable Energy*, 2020, 145: 2387–2408. DOI: 10.1016/j.renene.2019.07.138.
- [28] TORENBEEK E, WITTENBERG H. Flight physics: essentials of aeronautical disciplines and technology, with historical notes [M]. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2009.
- [29] BOEDONI P G. Stress waves in solids [M]. Courier Corporation, 1963.
- [30] WU Z L, WU C W, CHEN G N, et al. On a novel method of impact by a front-end-coated bullet to evaluate the interface adhesion between film and substrate [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2010, 68(1/2): 19–22. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2009.07.013.
- [31] TIMOSHENKO S, WOINOWSKY-KRIEGER S. Theory of plates and shells [M]. New York: McGraw-Hill, 1959.
- [32] NYARKO F K A, TAKYI G, EFFAH F B. Impact of the constitutive behaviour of the encapsulant on thermo-mechanical damage in (c-Si) solar PV modules under thermal cycling [J]. *Scientific African*, 2021, 12: E00767. DOI: 10.1016/j.sciaf.2021.e00767.
- [33] 袁锦龙. 多晶硅的破碎机理及破碎装置的设计 [D]. 湖南株洲: 湖南工业大学, 2020: 34–35.
YUAN J L. Crushing mechanism of polysilicon and design of crushing device [D]. Zhuzhou, Hunan: Hunan University of Technology, 2020: 34–35.
- [34] 张行. 断裂与损伤力学 [M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009: 45–50.
ZHANG X. Mechanics of fracture and damage [M]. 2nd ed. Beijing: Beihang University Press, 2009: 45–50.
- [35] 周越松, 梁森, 王得盼, 等. 阻尼材料/纤维层合板复合靶板抗冲击性能研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(1): 243–248. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.01.038.
ZHOU Y S, LIANG S, WANG D P, et al. Impact resistance behavior of damping material/fiber laminate composite target [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(1): 243–248. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.01.038.
- [36] 季晨. 基于非局部理论的复合材料层合板损伤演化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 24.
JI C. Research on damage evolution of laminates based on nonlocal theory [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 24.

(责任编辑 曾月蓉)