

薄膜电池封装膜弯曲疲劳寿命检测仪的研制

孙权, 鹿业波, 徐晓斌, 施正浩
(嘉兴学院 机电工程学院, 浙江 嘉兴 314001)

摘要: **目的** 为了可靠地检测薄膜电池封装膜弯曲疲劳寿命, 设计并制备一台封装膜弯曲疲劳寿命检测仪。**方法** 仪器主要由机械运动机构、运动控制系统、固定保护机构等组成, 使用此仪器对薄膜电池封装膜进行试验, 研究循环弯曲对其的影响; 利用有限元仿真, 分析薄膜电池弯曲时封装膜内部的应力变化情况。**结果** 随着弯曲角度的增大, 封装膜所受的弯曲应力不断增大; 在弯曲循环测试中, 随着循环次数的增加, 封装膜表面会产生疲劳裂纹, 破坏了透明电极的胶合状态, 影响了电池的光电性能; 获得了封装膜在不同弯曲角度下的疲劳寿命曲线。**结论** 该检测仪操作方便, 基于此仪器进行弯曲疲劳寿命检测可有效提高薄膜电池封装的可靠性。

关键词: 薄膜电池; 弯曲角度; 弯曲次数; 疲劳

中图分类号: TB383 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)21-0222-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.21.033

Development of Bending Fatigue Life Measurement Instrument for Packaging Film of Thin Film Battery

SUN Quan, LU Ye-bo, XU Xiao-bin, SHI Zheng-hao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China)

ABSTRACT: The work aims to design and develop a bending fatigue life measurement instrument of packaging film, in order to reliably measure the bending fatigue life of the thin film battery packaging film. Mainly composed of mechanical movement components, motion control system and fixed protection components, etc., the instrument was used to test the thin film battery packaging film and study the effects of cyclic bending on the packaging film. The finite element simulation was used to analyze the internal stress changes of packaging film when the thin film battery was bent. With the increase of bending angle, the bending stress on the packaging film increased continuously. In the bending cycle test, with the increase of cycle times, fatigue cracks would occur on the surface of the packaging film, which would destroy the bonding state of the transparent electrode and affect the photoelectric performance of the battery. The fatigue life curves of packaging films under different bending angles were obtained. The instrument is featured by easy operation. The bending fatigue life testing based on the instrument can effectively improve the reliability of thin film battery packaging.

KEY WORDS: thin film battery; bending angles; bending times; fatigue

收稿日期: 2018-11-19

基金项目: 浙江省基础公益研究计划 (LGG18F040001); 嘉兴市科技计划 (2017AY13012); 国家级大学生创新训练项目 (201710354022)

作者简介: 孙权 (1987—), 男, 博士, 嘉兴学院讲师, 主要研究方向为柔性电子力学分析。

通信作者: 鹿业波 (1983—), 男, 博士, 嘉兴学院副教授, 主要研究方向为柔性电子可靠性。

太阳能电池产业发展迅速,在取代传统化石能源方面具有重要意义,如何提高太阳能电池的效率和可靠性已成为研究热点之一^[1—3]。其中以柔性材料为衬底所制作的薄膜电池具有质量轻、厚度薄、可弯曲、运输方便等特点,在汽车、建筑等领域具有独特优势^[4—6]。为提高薄膜电池的光电转换效率和工作可靠性,目前针对薄膜电池封装的力学性能、材料特性等影响因素已开展了较多研究。如周南等^[7]通过拉伸试验对受力状态下的薄膜电池进行了光电性能检测,结果表明在拉应力作用影响下,薄膜电池的输出电压逐渐减少直至发生失效;聂建峰^[8]通过不同波长的光照试验,对薄膜电池表面的光电特性进行了检测研究,结果表明,波长为 436 nm 光波的能量更容易被薄膜电池表面吸收;雷青松^[9]等分析了薄膜电池封装界面处理的影响,结果表明,经 P/I 界面处理,可以提高薄膜电池的光伏特性。薄膜电池通常以卷曲的方式存放,在使用过程中也经常处于弯曲状态。当薄膜太阳电池在发生大角度弯曲以及重复弯曲时,表层的封装膜易产生疲劳裂纹,影响其与透明电极材料的粘合度,弱化了电池的防水性以及透光性,从而削弱了电池的光电性能。目前关于薄膜电池表层封装膜的弯曲疲劳研究较少,主要原因在于缺乏相应的弯曲疲劳检测设备。如 Jason 等^[10]针对柔性电子中的铜导线进行了弯曲疲劳测试,结果表明,随弯曲次数和角度的增长,器件的导电性能显著下降。然而,整个测试过程中全部通过手工操作完成,耗时长,无法实现在线实时检测且精度低。王璐薇和张方辉^[11]研制了 OLED 光电性能

综合测试系统,虽实现了电流、电压、光谱和温度等参数的自动测量,但没有涉及弯曲角度控制测量系统,不利于开展弯曲疲劳寿命测试。综合性大型弯曲疲劳寿命检测仪器价格昂贵、操作复杂,限制了该领域研究的进一步开展,因此设计及制作一台操作简单、成本低廉、运行高效的薄膜电池封装膜弯曲疲劳寿命检测仪,并基于此仪器开展薄膜电池封装膜弯曲疲劳寿命的研究具有重要意义。结合实际要求和应用前景,文中研制一台薄膜电池封装膜弯曲疲劳寿命检测仪,通过机械运动机构和自主开发的控制软件实现高精度弯曲运动,并可实时采集测试时间、弯曲角度、弯曲次数和输出电压等参数。使用此仪器对薄膜电池进行弯曲疲劳寿命检测,可分析弯曲角度与循环次数对薄膜电池输出电压的影响。通过有限元仿真分析,建立薄膜电池封装膜在不同弯曲角度下的疲劳寿命曲线。该检测仪的研制和应用对提高薄膜电池的可靠性具有重要意义,可直接应用于柔性电池产品的质量检测。

1 封装膜弯曲疲劳寿命检测仪的研制

薄膜电池封装膜弯曲疲劳寿命在线检测仪包括机械运动机构、固定装置、自动控制系统、万用表和模拟光源等部分,见图 1。在弯曲试验过程中通过真空吸附和夹具固定的方式,保证试样始终固定在样品台上;开发数据实时采集软件,实时记录万用表检测的输出电压值。

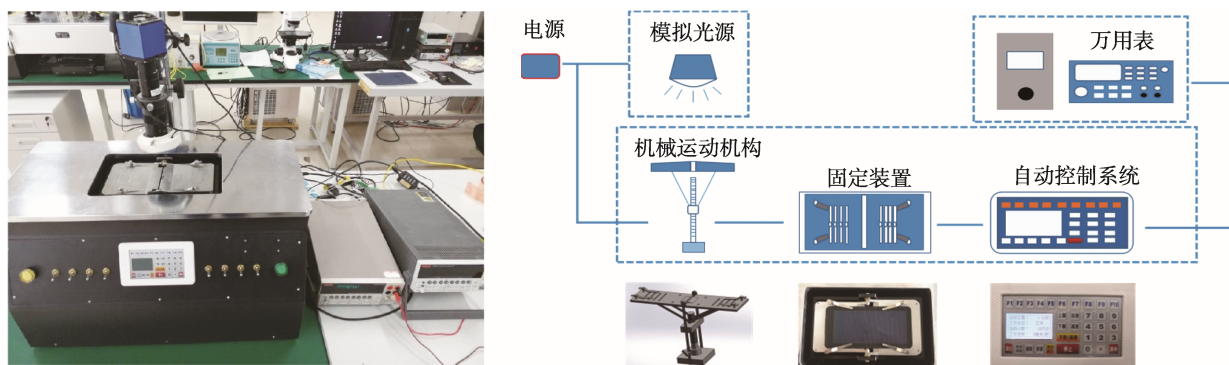


图 1 封装膜弯曲疲劳寿命在线检测仪

Fig.1 Online measurement instrument of bending fatigue life of packaging film

采用机械连杆运动机构实现测试台的弯曲,建立薄膜电池弯曲角度和丝杆行程位移之间的数学计算模型,见式(1)。式(1)中 l 为丝杆行程位移; α 为薄膜电池弯曲角度。通过 Stoney 公式(见式(2)),可以看出在弹性范围内,薄膜电池发生弯曲时薄膜应力的变化关系。式(2)中 σ_f 为薄膜应力值(MPa); E_s 为金属基底的弹性模数(GPa); h_s 为金属基底的厚

度(mm); R 为弯曲基片的曲率半径(mm); ν_s 为金属基底的泊松比; t_f 为薄膜厚度(mm)。目前薄膜电池通常使用不锈钢材料作为基底,由于封装膜与不锈钢基底在弯曲时紧密结合,运动状态保持一致,且封装膜的屈服强度远小于不锈钢基片^[12],因此计算不锈钢基底在不同弯曲角度下所受的弯曲拉应力作为封装膜与不锈钢基底共同承受的弯曲应力。基于式

(1), 建立弯曲角度与丝杆行程位移之间的数学关系, 试验中对应角度下所需行程位移见表 1。

$$\alpha = 180 - 2 \arccos \frac{(50+l)^2 - 2500}{12000 + 240l} \quad (1)$$

$$\sigma_f = \frac{E_s h_s^2}{6(1-\nu_s) R t_f} \quad (2)$$

表 1 运动参数
Tab.1 Motion parameter

弯曲角度/(°)	行程位移/mm	备注
0	0	
15	18.06	
30	39.92	
45	63.82	
60	88.11	
75	111.58	
90	133.35	
105	152.74	
120	169.25	

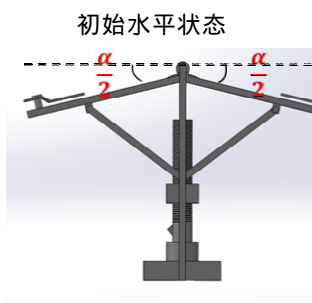


表 1 中的行程位移是通过电机驱动丝杆来实现的, 如: 当 $\alpha=90^\circ$ 时, 行程位移 133.35 mm 表示丝杆从 0 刻度向下移动 133.35 mm, 同时导杆拉动合页台实现 90° 弯曲。开发自动控制系统, 通过 PLC 程序, 可精确控制定位弯曲角度, 可设置弯曲次数, 实现 $0^\circ \sim 120^\circ$ 范围内的弯曲循环试验。可设的参数变量为位移差值(包括正转和反转)、运行速度、循环次数、停顿时间。在 90° 弯曲条件下, 循环 30 次的运行程序为例, 运行程序见表 2。研制的薄膜电池耐弯曲性在线检测仪各项性能参数包括仪器基本尺寸、弯曲角度精度、重复定位精度和测试试样尺寸范围等, 见表 3。

表 2 弯曲循环程序运行
Tab.2 Running of cyclic bending program

编号	运行程序
1	设置丝杆行程速度为 10 mm/s
2	电机正转, 丝杆行程位移为 -133.35 mm
3	输出, 设置停留时间为 4 s
4	电机反转, 丝杆行程位移为 133.35 mm
5	输出, 设置停留时间为 4 s
6	循环, 设置循环次数为 30
7	计数, 累加循环次数
8	重复循环以上程序 30 次

表 3 检测仪性能参数

Tab.3 Parameters of measurement instrument properties

名称	仪器基本参数
弯曲角度精度	通过电机带动活页转动至不同角度, 精度误差小于 1°
重复定位精度	$< 3^\circ$
测试试样尺寸范围	长为 20~245 mm, 宽为 0~100 mm
承载质量	< 50 kg
设备尺寸	650 mm×480 mm×380 mm (长×宽×高)
最大运行速度	20 mm/s
最大复位速度	5 mm/s
活页弯曲范围	$0^\circ \sim 135^\circ$

2 封装膜弯曲疲劳寿命检测试验

利用研制的薄膜电池封装膜弯曲疲劳寿命在线检测仪对试样进行试验。在暗室中使用 3 台 50 W 的卤钨灯, 从不同角度入射, 模拟太阳光, 避免入射面积变化对试验结果的影响, 利用数字源表(型号为 Keithley 2700, USA), 观测在不同弯曲角度下, 随着弯曲次数增加, 薄膜电池输出电压的变化曲线。以弯曲试验后的电压输出特性与初始值进行对比, 由此表征弯曲疲劳对薄膜电池光电性能的影响, 例如弯曲角度为 90° 时, 薄膜电池的输出电压变化曲线见图 2。薄膜电池在 90° 弯曲条件下, 循环 10 000 次前后的微观形貌对比见图 3。试验中选取电压曲线中电压值为 0 的点为疲劳失效点。试验选用的薄膜电池是以 304 不锈钢为衬底, 以乙烯-四氟乙烯共聚物(EFTE)为表层封装膜的太阳电池(Warmospace Ltd, China), 外形尺寸为 190 mm×95 mm×0.5 mm(长×宽×厚), 开路电压为 2.0 V。

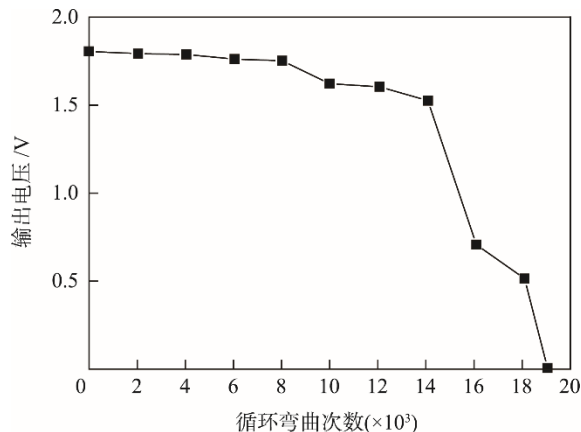


图 2 90° 条件下输出电压与循环弯曲次数的关系

Fig.2 Relationship between output voltage and cyclic bending number

在弯曲循环疲劳试验中, 弯曲角度分别设为 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° , 105° 和 120° , 见图 4。当弯曲角度小于 60° 时, 由于形变较少, 源表输出

的电压曲线趋势平稳, 薄膜电池的弯曲循环次数超过 50 000 次, 因此只记录薄膜电池在 60° , 75° , 90° , 105° 和 120° 弯曲条件下的弯曲疲劳失效次数, 见图 5。

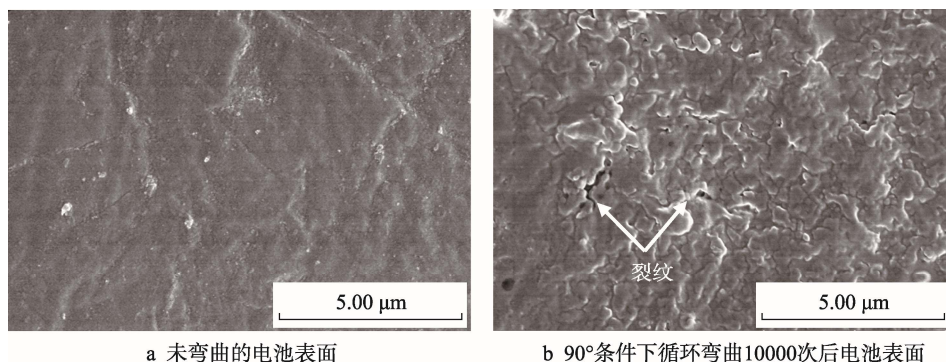


图 3 电弯曲测试前后表面形貌

Fig.3 Surface morphology before and after electric bending test

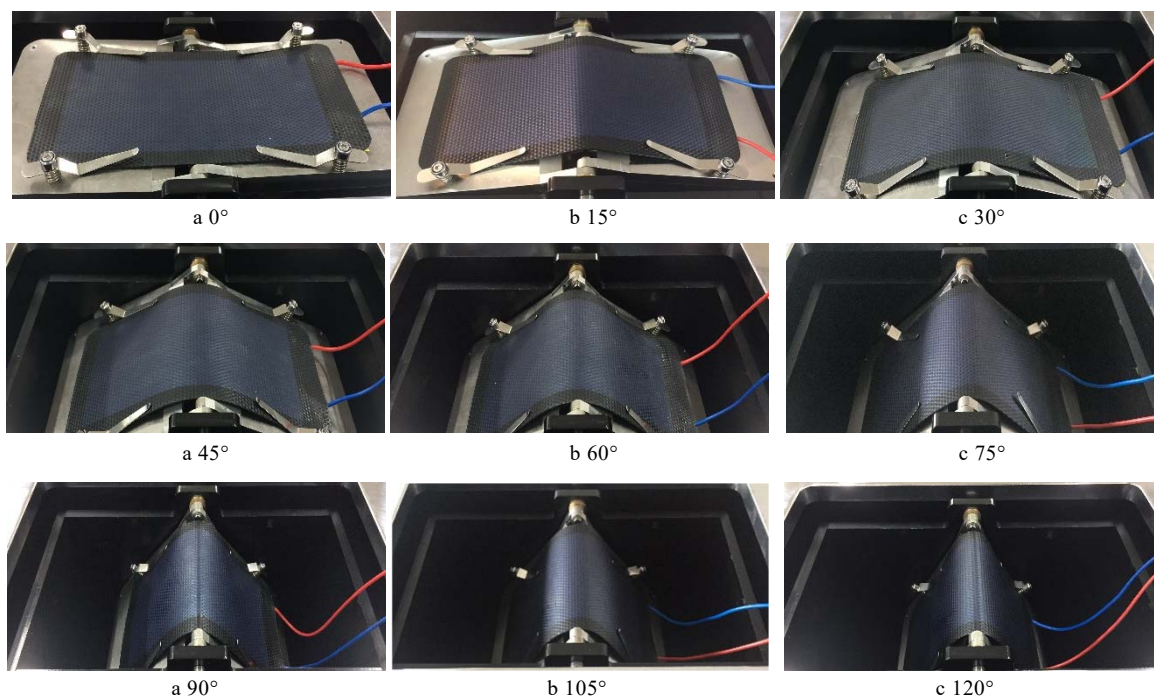


图 4 不同弯曲角度试验

Fig.4 Test of different bending angles

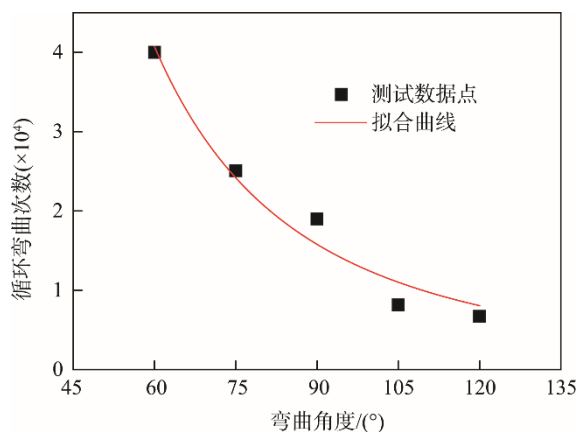


图 5 疲劳失效次数与弯曲循环角度

Fig.5 Fatigue failure number and cyclic bending angles

3 弯曲疲劳失效机理分析

由于试验中薄膜电池的曲率半径很难进行测量和理论测算, 不能直接通过理论公式计算薄膜所受应力大小, 因此采用有限元仿真对薄膜电池在弯曲过程中受到的弯曲应力进行估算。文中利用 Abaqus 分析软件, 对薄膜太阳能电池的弯曲运动进行建模仿真。以封装膜和不锈钢基底作为整体进行计算分析, 薄膜太阳能电池发生弯曲的部分是在合页折中处, 且合页两块间距为 3 mm。由于不锈钢基底的受力只在弯曲位置有明显变化, 因此有限元模型中只选取弯曲位置附近的 6 mm 区域进行分析, 合页定义为刚体, 基片两

边长度均为 1.5 mm,与两边合页通过定义 tie 约束实现装夹。基片采用 C3D8 单元类型进行网格划分。通过定义合页的约束条件为旋转角度,实现不同弯曲角度的加载,如图 6a 为弯曲 60°的运算结果。在 0°~120°范围内每间隔 15°的弯曲位置上最大弯曲应力的变化趋势见图 6b。结果表明,在循环弯曲状态下,封装膜承受较大的交变应力,当循环弯曲次数达到一定值后,会导致封装膜表面开始出现疲劳裂纹,见图 3;当弯曲角度进一步增大时,弯曲应力随之增大,破坏性裂纹将永久性存在,致使薄膜失去弹性弯曲变形的能力^[13—15]。封装膜表面的疲劳裂纹随着弯曲循环次数增大,裂纹进一步扩展,最终致使封装膜发生疲劳失效,破坏了透明电极的胶合状态和透光能力。该机理解释了图 5 中的疲劳寿命曲线。

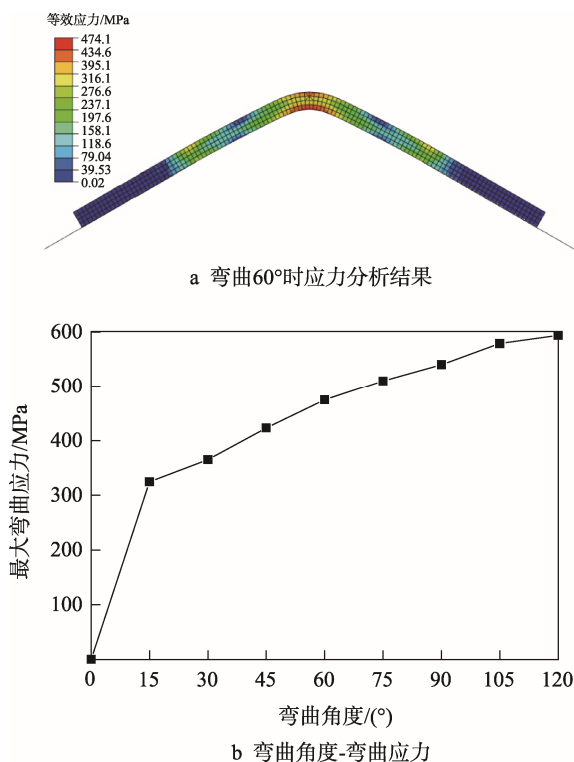


图 6 弯曲 60°时的应力分析结果与弯曲角度-弯曲应力
Fig.6 Analysis results of bending stress at 60° and bending angle-bending stress

4 结语

文中设计并制作了一台薄膜电池封装膜弯曲疲劳寿命检测仪,此检测仪能够实现 0°~120°的弯曲,同时也可达到较大基数的弯曲循环。基于该仪器进行了封装膜弯曲疲劳寿命检测,试验结果表明随着弯曲循环次数的增加,当弯曲循环次数达到一定值时会导致薄膜出现疲劳裂纹,破坏透明电极的胶合状态和透光能力,导致薄膜电池封装膜发生疲劳失效。利用有限元仿真,阐述了弯曲时薄膜电池封装膜内部应力的

变化情况,并对试验结果进行了理论分析。结合试验数据绘制了薄膜电池封装膜的弯曲循环疲劳寿命曲线,为太阳电池在弯曲条件下的应用提供了参考。该仪器可直接应用于柔性电池产品封装膜的质量检测,有利于提高薄膜电池的使用可靠性。

参考文献:

- [1] 孔凡太,戴松元.我国太阳能光伏产业现状及未来展望[J].中国工程科学,2016,18(4):51—54.
KONG Fan-tai, DAI Song-yuan. The Current State and Prospects of the Solar Photovoltaic Industry in China[J]. Engineering Science, 2016, 18(4): 51—54.
- [2] 魏世源,孙伟海,陈志坚,等.太阳能电池效率分析[J].科学通报,2016,61(16):1748—1753.
WEI Shi-yuan, SUN Wei-hai, CHEN Zhi-jian, et al. The Analysis of the Efficiency of Solar Cells[J]. Science China Press, 2016, 61(16): 1748—1753.
- [3] 白宇冰,王秋莹,吕瑞涛,等.钙钛矿太阳能电池研究进展[J].科学通报:自然科学版,2016,61(4/5):489—500.
BAI Yu-bing, WANG Qiu-ying, LYU Rui-tao, et al. Progress on Perovskite-based Solar Cells[J]. Science China Press, 2016, 61: 489—500.
- [4] 李东栋.柔性薄膜太阳能电池[J].世界科学,2013(9):54—55.
LI Dong-dong. Flexible Thin Solar Cell[J]. World Science, 2013(9): 54—55.
- [5] 李旺,朱登华,刘石勇,等.PI衬底柔性透明硅薄膜太阳能电池的制备及性能[J].电子元件与材料,2015(8):34—37.
LI Wang, ZHU Deng-hua, LIU Shi-yong, et al. Fabrication and Properties of Flexible Transparent Amorphous Silicon Thin Film Solar Cells on PI Substrates[J]. Electronic Components and Materials, 2015(8): 34—37.
- [6] 贾树明,魏大鹏,焦天鹏,等.石墨烯/CdTe肖特基结柔性薄膜太阳能电池研究[J].电子元件与材料,2015(6):19—22.
JIA Shu-ming, WEI Da-peng, JIAO Tian-peng, et al. Flexible Thin-film Solar Cells Based on Graphene/CdTe Schottky Junction[J]. Electronic Components and Materials, 2015(6): 19—22.
- [7] 周南,罗尧治.柔性薄膜太阳能电池的机电参数测试[J].实验力学,2010,25(6):717—722.
ZHOU Nan, LUO Yao-zhi. Mechanical and Electrical Parameters Test for Flexible Thin-film Solar Cell[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(6): 717—722.
- [8] 聂建峰,翁子丰,柳博伟,等.不同波长的光对柔性太阳能电池特性的影响[J].物理通报,2015(3):118—121.

- NIE Jian-feng, WENG Zi-feng, LIU Bo-wei, et al. The Influence of Different Wavelength Light on the Characteristics of Flexible Solar Cells[J]. Physics Bulletin, 2015(3): 118—121.
- [9] 雷青松, 徐火希, 王晓晶, 等. P/I 界面处理对 a-Si:H 柔性太阳能电池性能的影响[J]. 人工晶体学报, 2008, 37(5): 1187—1190.
- LEI Qing-song, XU Huo-xi, WANG Xiao-jing, et al. Influence of the P/I Interface Treatment on the Properties of a-Si: H Solar Cells[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2008, 37(5): 1187—1190.
- [10] JASON N N, SHEN W, CHENG W. Copper Nanowires as Conductive Ink for Low-cost Draw-on Electronics[J]. Acs Plid Materials & Interfaces, 2015, 7(30): 16760—16766 .
- [11] 王璐薇, 张方辉. 采用 LabVIEW 编程的 OLED 光电性能综合测试系统[J]. 微型机与应用, 2016, 35(24): 8—11.
- WANG Lu-wei, ZHANG Fang-hui. Integrated Testing System for OLED Photoelectric Properties Based on LabVIEW[J]. Microcomputer and Its Applications, 2016, 35(24): 8—11.
- [12] 吴明儿, 刘建明, 张其林. ETFE 薄膜气枕模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(6): 126—131.
- WU Ming-er, LIU Jian-ming, ZHANG Qi-lin. Experimental Study on ETFE Foilcushion[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(6): 126—131.
- [13] 杨小攀, 梅军. 非晶硅薄膜光伏组件力学性能分析[J]. 绿色建筑, 2015(4): 70—75.
- YANG Xiao-pan, MEI Jun. Analysis on Mechanical Properties of Amorphous Silicon Thin Film Photovoltaic System[J]. Green Building, 2015(4): 70—75.
- [14] 丁天怀, 王鹏, 徐峰. 在柔性衬底上制备的非晶硅薄膜力学性能研究[J]. 半导体学报, 2003, 24(3): 284—289.
- DING Tian-huai, WANG Peng, XU Feng. Fabrication Method and Mechanics Behaviors of a Novel Flexible Amorphous Hydrogenated Silicon Film[J]. Chines Journal of Semiconductors, 2003, 24(3): 284—289.
- [15] MATEO C, HERNANDEZ F M A, MONTERO Á, et al. Analysis of Initial Stabilization of Cell Efficiency in Amorphous Silicon Photovoltaic Modules under Real Outdoor Conditions[J]. Renewable Energy, 2018, 120: 114—125.