

三点、四点法机械性能测试建模及其在太阳电池中的应用

何仁 李英叶 陈敬欣 赵学玲 汤欢 张丽娜 沈艳娇 李锋 杨琳 韦德远

Three-point and four-point mechanical bending test modeling and application in solar cells

He Ren Li Ying-Ye Chen Jing-Xin Zhao Xue-Ling Tang Huan Zhang Li-Na Shen Yan-Jiao Li Feng Yang Lin Wei De-Yuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 208801 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190597

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190597>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

辐照导致硼硅酸盐玻璃机械性能变化

Irradiation-induced modifications in the mechanical properties of borosilicate glass

物理学报. 2017, 66(2): 026101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.026101>

色散效应对聚光多结太阳电池性能的影响及优化

Effect of chromatic aberration on performance of concentrated multi-junction solar cells and their optimization

物理学报. 2017, 66(14): 148801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.148801>

硒化锑薄膜太阳电池的模拟与结构优化研究

Simulation and optimal design of antimony selenide thin film solar cells

物理学报. 2018, 67(24): 247301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181745>

FeMnP_{1-x}T_x (T=Si, Ga, Ge) 系列化合物机械性能的第一性原理研究

First principles study of mechanical properties of FeMnP_{1-x}T_x (T=Si, Ga, Ge) compounds

物理学报. 2017, 66(12): 126301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.126301>

硅异质结太阳电池的物理机制和优化设计

Physical mechanism and optimal design of silicon heterojunction solar cells

物理学报. 2017, 66(10): 108801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.108801>

载流子选择性接触:高效硅太阳电池的选择

Carrier selective contacts:a selection of high efficiency silicon solar cells

物理学报. 2017, 66(15): 158801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.158801>

三点、四点法机械性能测试建模及其在太阳能电池中的应用*

何仁¹⁾ 李英叶²⁾ 陈敬欣²⁾ 赵学玲²⁾ 汤欢²⁾ 张丽娜²⁾
沈艳娇²⁾ 李锋²⁾ 杨琳¹⁾ 韦德远^{1)†}

1) (河北大学物理科学与技术学院, 光电信息与材料重点实验室, 保定 071002)

2) (英利新能源股份有限公司, 保定 071051)

(2019年4月23日收到; 2019年7月30日收到修改稿)

用三点弯曲和四点弯曲测试方法分别测试了单晶硅片和双面电池两种不同样片的机械性能, 通过建立模型, 探讨了不同的弯曲测试方法对样片的最大弯曲位移、最大载荷和断裂强度的影响. 研究表明: 三点弯曲和四点弯曲测试测量的最大弯曲位移相差不大, 但对单晶硅片而言, 三点弯曲测试方法测量结果离散度较大, 四点弯曲测试方法测量结果离散度较小. 然而不论是单晶硅片还是双面电池, 四点弯曲测试方法均能通过分散载荷的方式而增加样片的承载能力, 四点弯曲测试方法计算得出的断裂强度较小于三点弯曲测试的结果.

关键词: 三点弯曲, 四点弯曲, 机械性能, 建模

PACS: 88.40.jj, 85.30.-z, 72.40.+w, 81.70.Bt

DOI: 10.7498/aps.68.20190597

1 引言

由于硅材料具有优良的半导体性能和丰富的来源, 硅太阳能电池占据着 90% 的市场份额^[1]. 硅作为一种脆性材料, 不易发生塑性形变, 在制造加工和运输的过程中如果承受的外界应力超过其最大的承受限度会发生断裂导致失效^[2]; 硅片的断裂限制了太阳能电池的性能和寿命, 同时也造成了产量的显著损失^[3,4]. 因此, 晶硅光伏在追求高效率 and 低成本的同时, 必须将晶体硅的机械性能作为一个重要指标进行研究.

硅片的机械性能可以通过弯曲实验进行测试, 弯曲实验是测定材料承受弯曲载荷时的力学特性的实验. 弯曲实验在万能材料机上进行, 有 3 点弯曲和 4 点弯曲两种加载荷方式, 通常对圆形或矩形

的横截面试样施加压力, 当试样受到与其本身横截面垂直的外力作用时, 试样会逐渐弯曲直至断裂, 试样断裂瞬间的极限抵抗能力称为断裂强度, 也叫抗弯强度. 关于硅材料的机械性能, 无论是产线上金刚线切割的原始晶体硅片, 还是生产后的成品电池, 以及高效的光伏组件, 诸多学者进行了大量的研究和报道 (详见表 1), 其测试方法主要集中在 3 点弯曲和 4 点弯曲两种方式. 采用 3 点弯曲测试方法, 科克大学廷德尔国立研究所进行不同厚度硅片的弯曲测试实验, 通过建立威布尔和对数正态分布模型, 分析了不同厚度硅片在断裂时所能承受的最大应力值^[3]; 弗劳恩霍夫材料力学研究所分析了薄硅片的制备工艺对其机械性能的影响, 为薄硅片进一步的电池设计和生产过程提供了机械性能方面的数据支持^[5]; 日本国家先进工业科学技术研究所分析了金刚线切割时产生的应力损伤层对单晶硅

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 61704045) 和国家自然科学基金 (批准号: 11604072) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: deyuan.wei@hotmail.com

片机械性能的影响^[6]; 我国浙江大学的研究组提出单晶硅片背电极花样对硅片的机械性能有明显的影响^[7], 以及铸锭多晶硅中锗掺杂有利于提高多晶硅片的机械强度和性能^[8]; 新加坡科技设计大学针对太阳能电池组件进行了机械性能测试, 研究了组件中封装材料对组件可靠性的影响^[9]. 采用四点弯曲测试方法, 法国的太阳力股份有限公司的技术人员分析了带状生产多晶硅片的工艺条件对其机械性能的影响^[10]; 新南威尔士大学研究了多晶硅片边缘缺陷对其断裂强度的影响^[2]; 西班牙机械工程建模中心比较了单晶硅片、多晶硅片、类单晶硅片的机械强度差异^[11]; 弗莱贝格工业大学实验物理

研究所分析了太阳能电池制备过程中的损伤腐蚀对其力学性能的影响^[4]; 德国蔚山国家科学技术研究院研究了硅片不同制绒工艺造成不同表面形貌的机械性能的差异^[12]; 弗劳恩霍夫硅光电中心研究了制备太阳能电池过程中的激光钻孔工艺对其机械性能的影响^[13]; 三菱电力公司对生产线常用的金刚线切割硅片技术对多晶硅片弯曲强度的影响进行了研究^[14]; 德国哈梅林太阳能研究所研究了太阳光伏组件在受压情况下的裂纹分布情况^[15].

不难看出, 国内外的研究人员利用三点弯曲或四点弯曲测试方法, 对硅片、电池片和组件的机械性能进行了分析. 但是, 仍然存在一个问题: 既然

表 1 三点弯曲和四点弯曲测试的比较
Table 1. Comparison of three point bending and four point bending tests.

单位	国家	样片	厚度	测试方法	研究内容	年份	参考文献
TNI-UCC	爱尔兰	单晶硅片	50—525 μm	三点弯曲	用统计方法建立了不同厚度单晶硅材料断裂强度的模型	2006	[3]
Fraunhofer -IMM	德国	单晶硅片	48—200 μm	三点弯曲	分析了磨削、抛光、蚀刻工艺对薄硅试样机械强度的影响	2007	[5]
RERC-FREI-AIST	日本	单晶硅片	200—250 μm	三点弯曲	金刚线切割时产生的应力损伤层对单晶硅片机械性能的影响	2008	[6]
浙江大学	中国	单晶硅电池	200 μm	三点弯曲	背电极花样对单晶硅电池的机械强度有明显影响	2011	[7]
浙江大学	中国	多晶硅片	220 μm	三点弯曲	铸锭多晶硅中, 锗掺杂能增强多晶硅片的机械强度	2011	[8]
SUTD	新加坡	光伏组件	—	三点弯曲	封装材料对太阳能光伏组件的可靠性影响	2016	[9]
Solarforce S.A.	法国	多晶硅片	60—140 μm	四点弯曲	研究了带状生长多晶硅的弯曲强度随不同工艺条件的变化	2015	[10]
UNSW	澳大利亚	多晶硅片	200 μm	四点弯曲	硅片的边缘缺陷对多晶硅片断裂强度的影响	2009	[2]
CMME	西班牙	多晶、单晶、类单晶	200 μm	四点弯曲	对相同厚度的多晶、单晶、类单晶的晶体硅片的机械强度进行了比较	2014	[11]
IEP-TUBF	德国	多晶硅片	250—300 μm	四点弯曲	研究了损伤腐蚀对太阳能硅片力学性能的影响	2009	[4]
UNIST	韩国	单晶硅片	50 μm	四点弯曲	同制绒工艺改变硅片表面形貌对晶体硅机械性能的影响	2017	[12]
Fraunhofer -CSP	德国	多晶硅片	—	四点弯曲	激光钻孔对机械性能的影响	2012	[13]
MEC	日本	多晶硅片	200—300 μm	四点弯曲	金刚线切割多晶硅片的弯曲强度, 并对不同强度值产生的原因进行了分析	2011	[14]
ISFH	德国	光伏组件	—	四点弯曲	标准尺寸太阳能光伏组件在受压情况下的裂纹分布情况	2016	[15]

注: TNI-UCC, Tyndall National Institute, University College Cork (科克大学, 廷德尔国立研究所); Fraunhofer-IMM, Fraunhofer-Institute for Mechanics of Materials (弗劳恩霍夫材料力学研究所); RERC-FREI-AIST, Renewable Energy Research Center, Fukushima Renewable Energy Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (国家先进工业科学技术研究所, 福岛可再生能源研究所, 可再生能源研究中心); SUTD, Singapore University of Technology and Design (新加坡科技设计大学); UNSW, University of New South Wales (新南威尔士大学); IEP-TUBF, Institute of Experimental Physics, TU Bergakademie Freiberg (弗莱贝格工业大学, 实验物理研究所); MEC, Mitsubishi Electric Corporation (三菱电力公司); Fraunhofer-CSP, Fraunhofer Center for Silicon Photovoltaics (弗劳恩霍夫硅光电中心); CMME, Centre for Modelling in Mechanical Engineering (机械工程建模中心); Solarforce S.A., 太阳力股份有限公司; ISFH, Institute for Solar Energy Research Hamelin (哈梅林太阳能研究所); UNIST, Ulsan National Institute of Science and Technology (蔚山国家科学技术研究院).

三点弯曲和四点弯曲测试方法都可以用来表征硅片、电池及组件的机械性能,那么这两种测试方法的测试原理及测试结果有什么差别,哪一种测试方法更普遍适用于太阳光伏产业呢?目前针对此问题,国内外尚无明确的定论.

本文主要从实验出发,用三点弯曲和四点弯曲两种测试方法,测试了相同条件下 n 型单晶硅片和 n 型双面电池的机械性能,分别比较了弯曲位移、最大载荷和断裂强度的差异.然后从理论上追根溯源,通过建立梁的模型,分析了梁的不同承载能力对测试样片弯矩产生的变化及断裂强度的变化,解释了三点和四点弯曲测试方法测量结果存在差异的原因.

2 实验

随机选取同一硅锭切割的 n 型单晶姊妹硅片作为实验样片,电阻率为 0.8—5.0 Ω·cm,尺寸为 156.25 mm × 156.25 mm,厚度为 200 μm,共计 230 片.抽取其中 100 片硅片,利用浓度为 3% 的氢氧化钾 (KOH) 溶液进行湿法刻蚀,去除硅片表面的金刚线损伤层,用于硅片的机械性能测试,剩余 130 片用于制备双面电池.双面电池的制备工艺如下:利用浓度为 3% 的 KOH 溶液进行双面制绒同时去除硅片表面的金刚线损伤层;在硅片一面用三氯氧磷 (POCl₃) 作为扩散源进行管式扩散,经 RENA 产线湿法刻蚀去除磷硅玻璃 (PSG),然后在另一面采用三溴化硼 (BBr₃) 作为扩散源进行管式扩散制备发射极;经湿化学刻蚀去除硼硅玻璃 (BSG);利用等离子体增强化学气相沉积法 (PECVD) 在双面制备氮化硅 (SiN_x) 钝化减反层;后经丝网印刷工艺制备双面电极,最后共烧结形成双面电池.双面电池的结构如图 1 所示.制备好的 130 片双面电池随机抽取 100 片,用于电池的机械性能测试.100 片硅片编号为组 1,依次进行交叉打乱,各取 50 片,分别进行三点弯曲和四点弯曲测试.同理,100 片电池编号为组 2,依次进行交叉打乱,各取 50 片,分别进行三点弯曲和四点弯曲测试.由于所有的硅片都取自同一个硅锭的姊妹片,可认为其物理性能基本一致,不影响后续的实验结果.弯曲测试所使用的仪器为深圳市瑞格尔仪器公司型号为 RGM-3010 的数字拉力机,测试的速度为 100 mm/min.

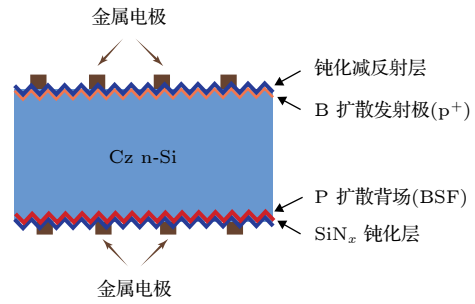


图 1 双面电池结构示意图

Fig. 1. The schematic diagram of the structure of bifacial solar cell.

三点弯曲和四点弯曲测试样片受力情况及参数如图 2 所示.通过弯曲强度测试仪测得载荷与位移的关系曲线,计算出样片的断裂强度,

$$\sigma = 3FL / (2bh^2), \quad (1)$$

$$\sigma = 3FL / (4bh^2), \quad (2)$$

式中, σ 为断裂强度,单位为 MPa; L 为跨距, $L = 104$ mm; F 为样片断裂时的破碎载荷,单位为 N; b 为样片的宽度, $b = 156.25$ mm; h 为样片的厚度,单位为 mm. (1) 式对应三点弯曲测试法 [3], (2) 式对应四点弯曲测试法 [16].

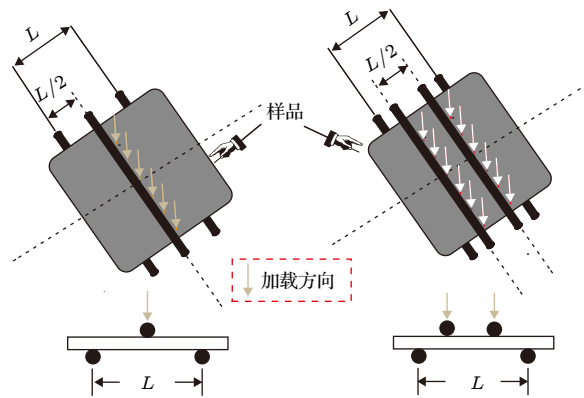


图 2 测试参数示意图 (a) 三点弯曲; (b) 四点弯曲

Fig. 2. The schematic of test parameter: (a) Three point bending; (b) four point bending.

3 结果与讨论

在相同测试条件下利用三点弯曲和四点弯曲测试法分别测试了组 1 两部分样片的机械性能,弯曲载荷与弯曲位移的变化曲线如图 3(a) 所示.从图 3(a) 中可以看出四点弯曲测试法所得弯曲载荷与弯曲位移的变化曲线的斜率和伸展幅度都高于三点弯曲测试法.虽然两种测试法所得的破碎载荷和最大弯曲位移相差不大,均在 6.87 N 和 34.76 mm

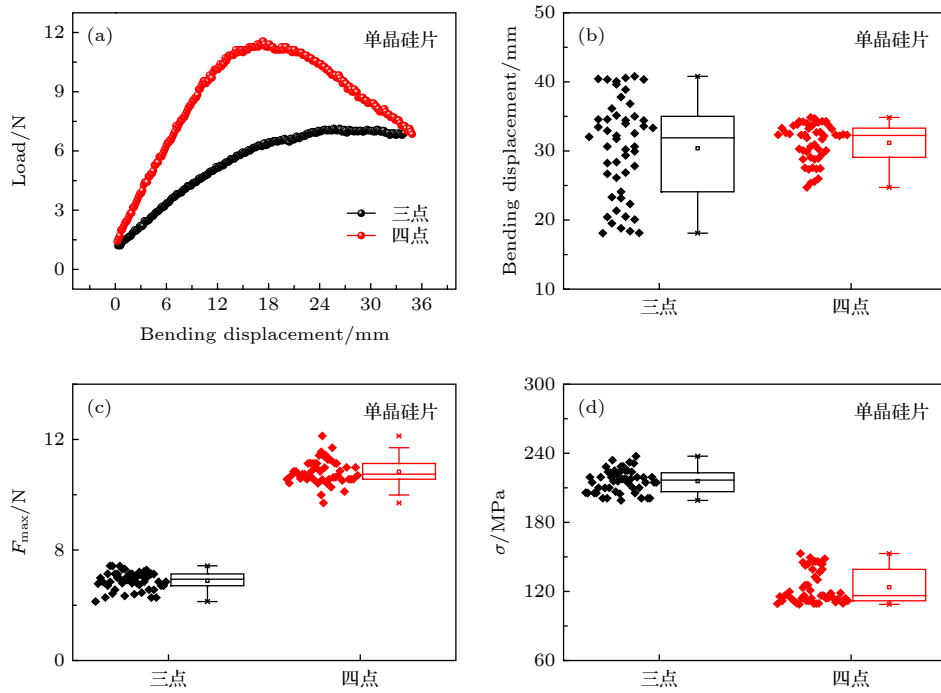


图 3 硅片三点和四点弯曲测试数据对比 (a) 载荷与位移的变化曲线; (b) 最大弯曲位移; (c) 最大载荷; (d) 断裂强度

Fig. 3. Parameter comparison of silicon wafer test of three point and four point bending test: (a) Force as function of the bending value; (b) maximum bending displacement; (c) maximum force; (d) fracture strength.

附近, 但四点弯曲测试法所得的单晶硅片承受的最大载荷为 11.55 N, 高于三点弯曲测试的最大载荷 6.87 N. 为了减少单个样片测量结果具有的随机性, 我们将样片数量扩展到 50 片. 样片的最大弯曲位移及最大载荷统计如图 3(b) 和图 3(c) 所示, 计算所得断裂强度如图 3(d) 所示. 通过图 3(b) 可以看出, 三点弯曲测试法测试样片的最大弯曲位移均值为 30.28 mm, 与四点弯曲测试法测得的最大弯曲位移均值 30.95 mm 相差不大. 但三点弯曲测试法测得的结果分布区间为 [18 mm, 41 mm], 表明其离散程度大; 四点弯曲测试法测得结果较为集中 [24.7 mm, 34.9 mm], 表明其离散程度小. 通过图 3(c) 可以看出, 三点弯曲测试法测得的最大载荷均值为 6.83 N, 四点弯曲测试的最大载荷均值为 10.80 N, 后者是前者的 1.58 倍. 通过计算所得的断裂强度如图 3(d) 所示, 三点测试法断裂强度均值是 215.28 MPa, 四点弯曲测试法断裂强度均值是 122.88 MPa, 后者是前者的 0.57 倍.

由于选取的是同一硅锭切割的硅片, 并且在去除金刚线后做了依次交叉分组处理, 因此可以忽略由于硅片本身晶界和杂质含量不同以及金刚线切割产生的硅片内部损伤层对机械性能的影响^[17-20], 只考虑由测试方法不同而产生的测量结果的差异.

根据以上测试结果, 我们可以得出结论: 对于同种样片, 三点弯曲和四点弯曲测试最大弯曲位移值相差不大, 但四点弯曲测试法测量的最大弯曲位移重复性好, 误差小. 四点弯曲测试所得最大载荷均值是三点弯曲测试的 1.58 倍, 说明在四点弯曲测试条件下, 硅片的相对承载能力得到大幅度提升. 三点弯曲测试计算所得的断裂强度数值明显高于四点弯曲测试的计算结果. 同种硅片的最大载荷和断裂强度相差较大的原因将在后面详细进行解释说明.

为了探究三点弯曲和四点弯曲测试方法对太阳能电池测量结果产生差异的原因, 我们在相同测试条件下继续测试了组 2 样片的机械性能. 载荷与弯曲位移的变化曲线如图 4(a) 所示, 组 2 样片的载荷与弯曲位移曲线和组 1 样品的曲线略有不同, 这是由于组 2 样片在双面电池制备过程中存在高温烧结及丝网印刷前后电极等过程, 这会相应地改变样片的机械性能. 三点弯曲测试法测得的双面电池最大载荷和破碎载荷一致, 均为 6.46 N, 最大弯曲位移为 17.9 mm, 而四点弯曲测试法测得的最大载荷为 10.85 N, 破碎载荷为 10.24 N, 最大弯曲位移是 22.24 mm, 两种测试方法测得的结果存在较大的差异. 为了减少单个样片测量结果具有的随机

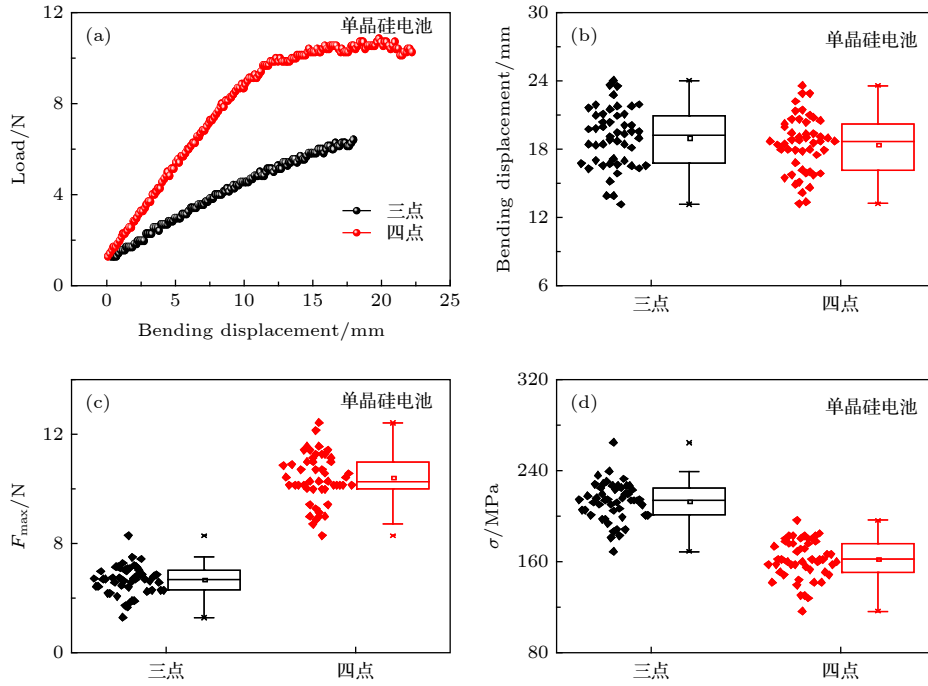


图 4 双面电池三点和四点弯曲测试数据对比 (a) 载荷与位移的变化曲线; (b) 最大弯曲位移; (c) 最大载荷; (d) 断裂强度
 Fig. 4. Parameter comparison of bifacial solar cells test of three point and four point bending test: (a) Force as function of the bending value; (b) maximum bending displacement; (c) maximum force; (d) fracture strength.

性, 我们将样片数量扩展到 50 片. 样片的最大弯曲位移及最大载荷统计如图 4(b) 和图 4(c) 所示, 计算所得断裂强度如图 4(d) 所示. 从图 4(b) 可以看出三点弯曲测试的 50 个样片的最大弯曲位移均值为 18.98 mm, 四点弯曲测试的最大弯曲位移均值是 18.40 mm, 后者是前者的 0.96 倍, 两种测试方法所得结果的离散度基本相同. 所以对于电池片, 三点弯曲测试和四点弯曲测试在最大弯曲位移方面具有相似的结果及均匀性. 从图 4(c) 可以看出三点弯曲测试的 50 个样片的最大载荷均值为 6.64 N, 四点弯曲的最大载荷均值为 10.34 N, 后者是前者的 1.56 倍, 说明在四点弯曲测试条件下, 电池片承载载荷的能力更强, 这与组 1 硅片的测试结果相一致. 通过计算所得的断裂强度如图 4(d) 所示, 三点测试法断裂强度均值是 211.62 MPa, 四点弯曲测试法断裂强度均值是 160.80 MPa, 后者是前者的 0.76 倍. 断裂强度的差异与组 1 硅片的计算结果 (0.57 倍) 相比较, 差距有所减小.

为了探究三点弯曲和四点弯曲测试对样片测试结果存在差异的原因, 我们从力学角度将其简化为梁的模型. 假设梁是由无数层纵向硅原子层组成, 当其受力弯曲变形后, 靠近凹入的一侧受到压应力, 纵向硅原子层缩短; 靠近凸出的一侧受到拉应力, 纵向硅原子层伸长. 由于变形的连续性, 由

凸入侧原子层的缩短连续改变为凸出侧原子层的伸长, 中间必有一层硅原子层的长度不变, 这一层称为中性层. 中性层与横截面的交线称为该横截面的中性轴. 梁弯曲时横截面绕中性轴转动. 只要梁有一个纵向的对称面, 且测试时载荷作用在纵向对称面内, 即满足对称弯曲的条件. 此时, 横截面上断裂强度的表达式为^[21]

$$\sigma = My_{max}/I_z = M/W_z, \quad (3)$$

其中 M 是载荷作用下的弯矩值, y_{max} 为离中性轴最远点的坐标, I_z 表示对中性轴的惯性矩, $W_z = I_z/y_{max}$ 为弯曲截面系数, 它仅与截面的几何形状有关.

从断裂强度条件来看, 提高梁的承载能力可以从两个方面加以考虑: 一方面是采用合理的截面形状, 提高弯曲截面系数; 另一方面是合理安排梁的受力情况, 以降低最大的弯矩值.

三点弯曲和四点弯曲测试在测试同一类型的硅片或电池时, 其截面都可简化为高为 h , 宽度为 b 的矩形截面, 此时 W_z 为^[21]

$$W_z = \frac{I_z}{y_{max}} = \frac{bh^3/12}{h/2} = \frac{1}{6}bh^2. \quad (4)$$

三点弯曲和四点弯曲测试硅片或电池时梁的支撑方式相同, 样片尺寸也相同, 唯一影响断裂强度的

因素就是载荷的作用点数目和作用位置. 为了进一步简化三点和四点弯曲测试模型, 以跨距为 L 的梁来进行说明, 三点和四点弯曲测试的作用力和弯矩分布如图 5 所示.

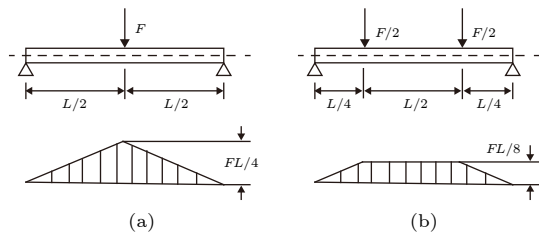


图 5 作用力和弯矩图 (a) 三点弯曲; (b) 四点弯曲

Fig. 5. The model diagram of force and bending moment: (a) Three point bending test; (b) four point bending test.

从图 5(a) 中可以看出, 三点弯曲测试时集中力 F 作用于梁中面时, 最大的弯矩是 $FL/4$. 在四点弯曲测试的情况下, 弯矩会发生变化, 如图 5(b) 所示, 两个分散集中力作用下, 最大弯矩降低为 $FL/8$, 是三点弯曲测试最大弯矩的一半. 如果按同样截面的梁来考虑, 理论上相同样片的最大承受载荷在四点弯曲测试时会增加一倍, 这与 Schoenfelder 等^[5]报道的结果相近似. 当四点弯曲测试和三点弯曲测试在同样大小作用力下, 四点弯曲测试中两个作用力点很好地分配了载荷, 降低了 M_{\max} 的值, 从而降低了计算后的断裂强度值. 同理, 当测试时支座加入载荷的位置如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 四点弯曲测试由于在跨距内有两个作用力点, 能很好地分散集中载荷, 所以与三点弯曲测试比较, 四点弯曲测试时的最大弯矩值较小, 导致计算的断裂强度值较小. 同样, 对于同种材料而言, 四点弯曲测试由于载荷作用点的分散, 要达到相同的最大弯矩, 必须施加更大的作用载荷, 因此四点弯曲测试能相对增强材料的承载能力, 这就解释了图 3(c) 和图 4(c) 中无论是裸硅片还是完成生产的电池片, 四点弯曲测试的最大载荷数值均比三点弯曲测试数值大的原因. 所以在结构允许的条件下应尽可能把集中力转变为分散的较小集中力, 这样有利于提高测试样片的承载能力.

4 结 论

本文分别用三点弯曲和四点弯曲测试方法测量了单晶硅片和双面电池的机械性能. 实验结果表明, 对于单晶硅片, 四点弯曲测试与三点测试相比, 最大弯曲位移离散度较小, 硅片所承受的最大载荷

较大, 相对增强了硅片的承载能力; 对于双面电池, 由于存在金属电极栅线, 两种测试方式下的最大弯曲位移测量结果离散程度相差不大, 但四点弯曲测试方法同样增强了电池片的承载能力. 因此, 四点弯曲测试相对于三点弯曲测试方法来说, 结果较为精确, 重复性更高.

参考文献

- [1] Battaglia C, Cuevas A, de Wolf S 2016 *Energ. Environ. Sci.* **9** 1552
- [2] Borrerolopez O, Vodenitcharova T, Hoffman M, Leo A J 2009 *J. Am. Ceram. Soc.* **92** 2713
- [3] Paul I, Majeed B, Razeeb K M, Barton J 2006 *Acta Mater.* **54** 3991
- [4] Funke C, Wolf S, Stoyan D 2009 *J. Sol. Energy Eng.* **131** 011012
- [5] Schoenfelder S, Ebert M, Landesberger C, Bock K, Bagdahn J 2007 *Microelectron. Reliab.* **47** 168
- [6] Sekhar H, Fukuda T, Tanahashi K 2018 *Jpn. J. Appl. Phys.* **57** 08RB08
- [7] Li Z L, Wang L, Yang D R, Zhu X, Shi Y Z, Jiang W L 2011 *Acta Energiae Solaris Sinica* **32** 225
- [8] Wang P, Yu X G, Li Z L, Yang D R 2011 *J. Cryst. Growth* **318** 230
- [9] Rengarajan K N, Radchenko I, Illya G, Handara V, Kunz M, Tamura N, Budiman A S 2016 *8th International Conference on Materials for Advanced Technologies* Singapore, 28 June–3 July, 2015 p76
- [10] Heilbronn B, de Moro F, Jolivet E, Tupin E, Chau B, Varrot R, Drevet B, Bailly S, Rey D, Lignier H, Xi Y H, Mangelinck N, Reinhart G, Regula G 2015 *Cryst. Res. Technol.* **50** 101
- [11] Barredo J, Parra V, Guerrero I, Fraile A, Hermanns L 2013 *Prog. Photovoltaics* **22** 1204
- [12] Woo J, Kim Y, Kim S, Jang J, Han H N, Choi K J, Kim I, Kim J 2017 *Scripta Mater.* **140** 1
- [13] Oswald M, Loewenstein T, Schubert G, Schoenfelder S 2012 *6th International Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells* Aixles-bains France, October 8–11, 2012
- [14] Echizenya D, Sakamoto H, Sasaki K 2011 *Procedia Engineering* **10** 1440
- [15] Haase F, Kasewieter J, Köntges M 2016 *6th International Conference on Silicon Photovoltaics* Chambéry France, March 7–9, 2016 p554
- [16] Popovich V A 2014 *Microstructure and Mechanical Aspects of Multicrystalline Silicon Solar Cells* (Netherlands: Delft University of Technology) p115
- [17] Mansfield B R, Armstrong D E, Wilshaw P R, Murphy J D 2009 *Solid State Phenomena* **156–158** p55
- [18] Cotterell B, Chen Z, Han J, Tan N 2003 *J. Electron. Packaging* **125** 114
- [19] Sekhar H, Fukuda T, Tanahashi K, Shirasawa K, Takato H, Ohkubo K, Ono H, Sampei Y, Kobayashi T 2018 *Jpn. J. Appl. Phys.* **57** 095501
- [20] Kaule F, Kohler B, Hirsch J, Schoenfelders S, Lauscha D 2018 *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* **185** 511
- [21] Gou W X 2010 *Mechanics of Materials* (Beijing: Science Press) p152

Three-point and four-point mechanical bending test modeling and application in solar cells*

He Ren¹⁾ Li Ying-Ye²⁾ Chen Jing-Xin²⁾ Zhao Xue-Ling²⁾ Tang Huan²⁾
 Zhang Li-Na²⁾ Shen Yan-Jiao²⁾ Li Feng²⁾ Yang Lin¹⁾ Wei De-Yuan^{1)†}

1) (*Key Laboratory of Optic-electronic Information and Materials, Institute of Physical*

Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China)

2) (*Yingli Green Energy Holding Co., Ltd., Baoding 071051, China*)

(Received 23 April 2019; revised manuscript received 30 July 2019)

Abstract

Silicon (Si)-wafer-based solar cells have dominated the global market with a share exceeding 90% due to their abundant source material and well-known physical and chemical properties. The brittleness of silicon material limits its further applications. It is necessary to investigate the material strength properties of Si wafer and/or Si solar cells, which can guide the fabrication process of Si solar cells to avoid breaking the Si wafers. The Si material strength properties have been extensively investigated by the methods of three-point bending test and four-point bending test. However, the difference between these two methods has not been studied so far.

In this work, the mechanical strength properties of monocrystalline silicon (c-Si) wafer and bifacial c-Si solar cells are measured by three-point bending test and four-point bending test respectively. The average value of the maximum bending displacements has a little discrepancy between the results of the three-point bending test and four-point bending test methods. It is worth noting that the degree of dispersion of the Si wafer test results of the three-point bending test is larger than those of the four-point bending test. And the results of the dispersion of the Si bifacial solar cells, obtained from the two bending test methods, show no difference between them due to the existence of metalized electrodes. Whether the measured sample is Si wafer or Si solar cell, the average value of the maximum load, obtained from the four-point bending test, is higher than that from the three point-bending test method, and the average value of the fracture strength, obtained from the four-point bending test, is lower than that from the three-point bending test method. By establishing the models of different beams, the applied load gets dispersed through two bars of the four-point bending test method, whereas the applied load is directly applied to the sample through one bar of the three-point bending test method, which can explain the relatively large difference between these two test methods.

Keywords: three point bending test, four point bending test, mechanical property, modeling

PACS: 88.40.jj, 85.30.-z, 72.40.+w, 81.70.Bt

DOI: 10.7498/aps.68.20190597

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61704045) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11604072).

† Corresponding author. E-mail: deyuan.wei@hotmail.com