

压块固定式光伏组件抗风揭性能及影响因素研究

伞冰冰, 黄荣亮, 邱 冶, 任高科

(河海大学土木与交通学院, 南京 210098)

摘 要: 为研究刚性支撑压块固定式光伏组件的抗风揭性能与破坏模式, 考虑组件固定压块间距和边框高度的影响, 开展不同参数组合的光伏组件抗风揭试验, 进行光伏组件在模拟风荷载作用下的全过程加载, 通过试验测得光伏组件及其固定压块的荷载-位移以及荷载-应变曲线, 分析光伏组件的损伤变形特征及其失效模式。采用有限元分析软件 ABAQUS 建立光伏组件数值分析模型, 进一步研究影响光伏组件抗风揭性能的主要因素。研究结果表明: 光伏组件的风揭失效模式为固定压块与组件边框的咬合失效破坏, 进而导致光伏组件整片掀落; 提出光伏组件的风揭破坏准则, 即当压块与光伏组件之间的相对滑移量超过压块对光伏组件边框的原约束面截面长度的 2/3 时, 认定其破坏; 减小光伏组件的长度与宽度、增加光伏组件的边框高度与固定压块间距均能有效提升光伏组件的抗风揭性能, 其中减小组件宽度的提升效果最显著。

关键词: 光伏组件; 抗风揭性能; 数值模拟; 抗风揭试验; 失效模式; 组件压块

中图分类号: TU312⁺.1; TM615

文献标志码: A

0 引 言

在中国“双碳”目标战略背景下, 光伏能源逐渐发展成为主流可再生能源, 且在中国能源结构中的份额不断增大^[1-2]。光伏组件是光伏系统的核心部件, 其作用是将太阳能转换为电能。光伏组件的正常运行高度依赖环境条件, 尤其在极端天气事件(如台风、飓风、龙卷风等)下, 极易发生风揭破坏^[3-4]。因此, 提高光伏组件在强风作用下的安全性, 对光伏产业的发展具有重要意义。大型光伏电站的光伏组件具有面积大、连接节点薄弱、风敏感性强等特点, 因此风荷载被认为是光伏系统设计的主要控制荷载^[5]。Abiola-Ogedengbe 等^[6]发现对于正向风(风向角为 0°和 180°), 光伏组件表面风压关于中轴线近似对称, 但随着风向角的偏移, 风压分布呈显著不对称性; Agarwal 等^[7]通过数值模拟风荷载对独立安装光伏组件的影响, 发现光伏组件在不同风向下皆会受到显著的升力和阻力作用; 马文勇等^[8]通过风洞试验研究了风向角、组件倾角、间距比和安装位置等参数对光伏组件风荷载的影响; 郭涛等^[9]通过数值模拟分析了柔性及刚性支撑体系下光伏组件的振动特性, 发现刚性支撑以横向摆动为主, 而柔性支撑以竖向摆动为主, 且振幅大于刚性支撑; 杜航等^[10]通过风洞试验, 获得了大跨度柔性光伏组件表面的平均风压和脉动风压分布, 并通过风振响应分析提出风振系数取值建议。

以往研究大多集中于探究光伏组件的风荷载与风振响

应特性以及影响因素等。但在强风作用下, 光伏系统的损坏通常表现为光伏组件风揭破坏, 通过调研 2024 年中国海南登录的台风“摩羯”对该区域光伏系统的破坏情况, 发现其中部分光伏系统破坏主要因连接处失效导致光伏组件脱落, 而暴露的支架结构较少出现严重的屈服变形。韦媛^[11]调研了 2015 年台风“彩虹”引发的大型光伏电站灾损, 发现致灾原因归结于极端气候条件下的强风荷载超过了光伏组件抗风设计标准值, 连接节点失效, 从而导致光伏组件被风掀起; 吴函恒等^[12]通过开展“光伏组件-压型钢板-支座系统-檩条”子结构模型足尺试件的抗拔试验, 揭示了光伏与压型钢板一体化屋面系统的风揭破坏机理; 张亮等^[13]针对光伏组件连接节点中的压块, 利用有限元模拟进行了压块承载力及影响因素研究, 结果表明增大压块底板厚度能显著提升其承载力; 买发军等^[14]通过有限元模拟对比了 U 型、 π 型、TT 型 3 种常用的固定压块的承载力, 结果发现 TT 型压块承载能力最高。

综上, 国内外学者已对光伏组件的风荷载特性、风振响应特性以及风荷载下节点承载力等问题开展了研究, 但若有效解决光伏系统的抗风揭问题, 仍需对组件抗风揭性能和破坏机理进行深入和系统的研究。因此, 本文针对大型地面光伏系统常用的刚性支撑压块固定式光伏组件, 采用试验与有限元模拟相结合的方法对其抗风揭性能开展研究, 探讨抗风揭薄弱环节的损伤发生、发展与失效模式, 揭示影响光伏

收稿日期: 2025-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(51808194)

通信作者: 邱 冶(1985—), 男, 博士、副教授, 主要从事新能源结构防灾减灾方面的研究。qiuye@hhu.edu.cn

组件抗风揭性能的主要因素, 以期为此类光伏系统的抗风揭设计提供参考。

1 压块固定式光伏组件抗风揭试验

1.1 连接构造与风荷载体型系数取值

刚性支撑光伏系统因其建设成本及维护成本较低, 在国内外大型光伏电站中得到了广泛应用, 其组成包括上部光伏组件及下部支架结构, 如图 1 所示。图 2 展示了光伏组件常见的两种安装固定形式(螺栓固定与压块固定)。前者需在组件边框底部制备孔洞, 并通过螺栓实现光伏组件与支架的固定, 其在风荷载作用下易在开孔处造成撕裂破坏, 且调整安装位置较为困难; 而压块固定不削弱组件强度, 安装位置灵活, 可根据需要改变安装间距, 使用范围更广。因此, 本文针对压块固定式的光伏组件开展抗风揭性能研究。



图1 刚性光伏系统示意图

Fig. 1 Rigid photovoltaic structures

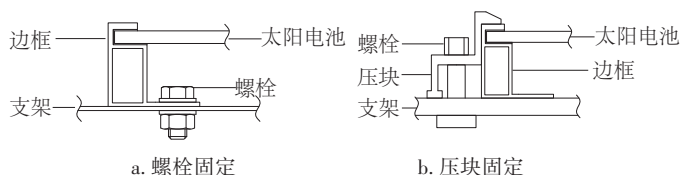


图2 光伏组件固定方式示意图

Fig. 2 Fixed methods of photovoltaic modules

为获得光伏组件的最不利风荷载体型系数, 针对某实际工程光伏系统, 开展刚性模型风洞测压试验, 如图 3 所示。试验模型的尺寸(长宽厚)为 2750 mm×365 mm×8 mm, 几何



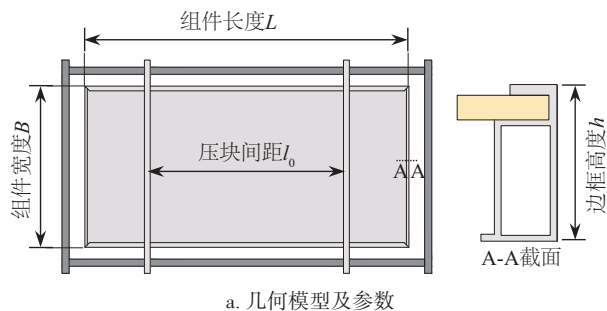
图3 风洞试验照片

Fig. 3 Wind tunnel test photo

缩尺比为 1:10, 支架倾角为 5°, 风向角为 0°~180°, 间隔 15°。通过风洞试验结果分析, 确定光伏组件在全风向范围内的最不利风荷载体型系数为-1.33, 位于 15°斜风向下组件迎风前缘角部。根据 GB 5009—2012《建筑结构荷载规范》^[15], A 类地貌 5 m 高度以下 50 a 一遇的设计风荷载取值为 1 kPa。

1.2 试验模型

以国产 JAM72S30-545/MR 型号光伏组件为研究对象开展抗风揭试验, 其尺寸(长宽)为 2278 mm×1134 mm。由于不利风荷载为风吸力, 为便于加载, 将光伏组件倒置, 正面朝下通过压块安装在支撑架上, 如图 4 所示。通过改变压块间距与边框高度共设计 3 个试验工况, 具体工况参数如表 1 所示, 其中压块间距 l_0 取为 0.4L 和 0.6L。



a. 几何模型及参数



b. 现场安装照片

图4 试件模型参数及安装示意图

Fig. 4 Parameters and installation schematic of specimens

表1 试验工况

Table 1 Experimental conditions

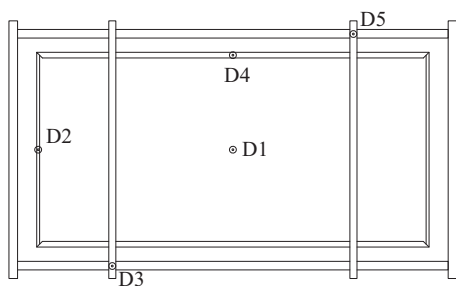
试验工况	压块间距 l_0 /mm	边框高度 h /mm
1	940	30
2	1400	30
3	1400	35

1.3 试验加载与测试方案

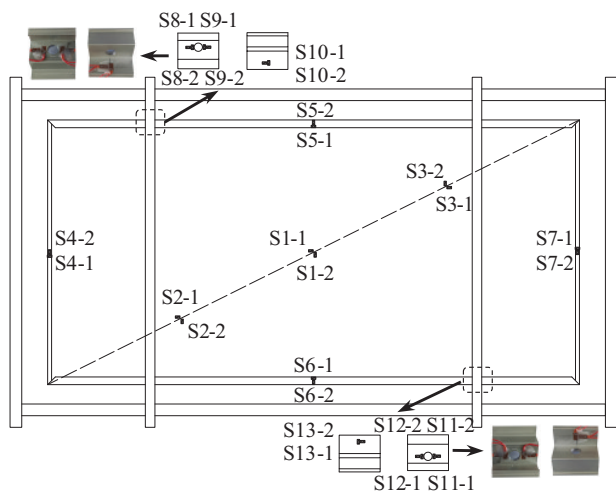
将沙袋均匀布置在光伏组件上实现逐级加载, 每级加载时长控制在 1 min, 并保持该级负载 1 h, 待各监测点的数值稳定后再进行下一级加载, 直至试件破坏。每级加载 8 个沙袋, 每个沙袋重 8.25 kg, 即每级加载 0.25 kPa, 各沙袋之间保持合理距离, 加载时应做到每袋沙个尽量同步, 避免不均匀受荷。

试验过程中测量光伏组件在荷载作用下各关键部位的位移以及应变,监测点布置考虑试验模型的对称性。各位移监测点的布置情况如图 5a 所示。在组件中点以及长、短边中点各布置一个位移计,用于测量竖向位移,在檩条与下部支撑架固定位置处对称布置两个位移计(D3、D5),用于测量下部支撑架的变形对试验的影响。

每个应变监测点测量该点的双向应变,监测点布置如图 5b 所示。其中在光伏组件正面沿对角线连线每 1/3 距离处布置一个应变监测点,在组件长、短边中点处各对称布置一个应变监测点。在对称的两个压块上各布置 3 个应变监测点(S8~S13,具体位置给出实拍图对照),其中 S_{x-1} 为沿长边方向应变监测点, S_{x-2} 为沿短边方向应变监测点,其中 $x=1,2,3,\dots,13$ 。



a. 位移监测点



b. 应变监测点

图5 监测点布置图

Fig. 5 Layout of measurement points

2 光伏组件风揭破坏的试验分析

2.1 试验现象与失效模式

在 3 组试验工况的加载过程中,随着外荷载的持续施加,光伏组件表现出沿短边中点连线方向的凹陷变形,组件与压块接触面出现缝隙。当荷载达到临界值时,组件短边框

及压块逐渐屈服,导致组件与固定压块之间产生相对滑移,约束接触面积逐渐减少,固定压块逐渐失去紧固与传力作用,引发“掀起”失效。在加载过程中,3 组试验工况下光伏组件皆未发生破坏,所呈现的破坏过程和破坏机制基本一致,仅第 1 组试验工况由于压块间距较小,组件未约束两端整体向下弯曲幅度也较大,第 2 组试验工况的典型破坏细节如图 6 所示。

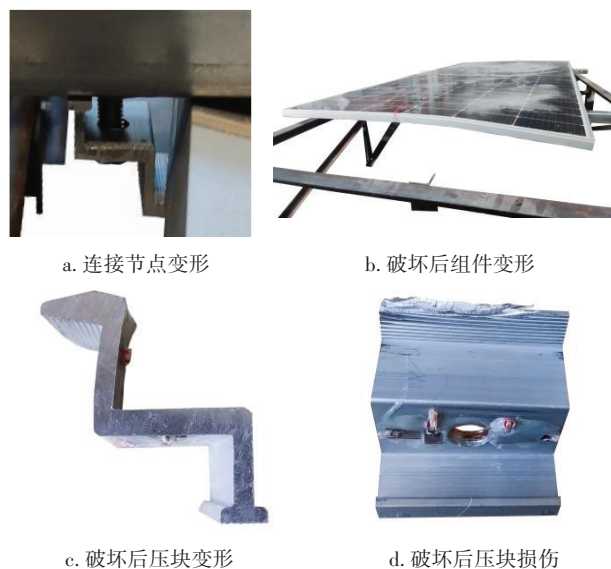


图6 试件破坏细节

Fig. 6 Failure details

2.2 试验结果分析

各试验工况的光伏组件跨中竖向位移与风荷载的关系曲线如图 7a 所示。组件跨中竖向位移主要由光伏组件、压块变形松脱引起。在荷载达到设计荷载(1 kPa)前,3 组试验工况下光伏组件跨中竖向位移增加平缓且数值较小,荷载位移曲线近似线性,表明光伏组件工作性能尚好。当第 1、2 组试验工况荷载达到 1.5 倍设计荷载,第 3 组试验工况达到 2.0 倍设计荷载时,各组件跨中竖向位移增大的速度加快,说明此时光伏组件与压块开始屈服,发生塑性变形;当荷载增加至 2.5 倍设计荷载时,第 1、2 组试验工况的组件已脱落,发生“掀起”失效,而当荷载增至 3.0 倍荷载时,第 3 组试验工况组件才脱落。由此可知,组件边框高度 $h = 35 \text{ mm}$ 时,较 30 mm 工况的抗风揭性能更优;压块间距 $l_0 = 1400 \text{ mm}$ 时,较 940 mm 工况的抗风揭性能更优。光伏组件的短边中点位移与荷载关系曲线如图 7b 所示,长边中点位移与荷载关系曲线如图 7c 所示。可看出,组件中点竖向位移主要由短边中部弯曲变形引起,长边弯曲程度较小。

3 组试验工况下光伏组件各典型部位应变随荷载的变化曲线如图 8 所示。组件正面跨中的横向(沿短边方向)应变与纵向(沿长边方向)应变皆为正值(拉应变),但横向应变值

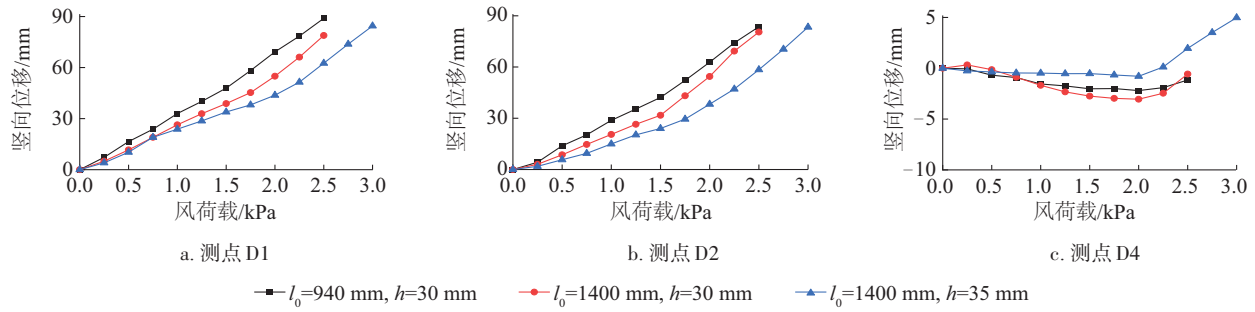


图7 试件的荷载-竖向位移曲线

Fig. 7 Load-vertical displacement curves of specimens

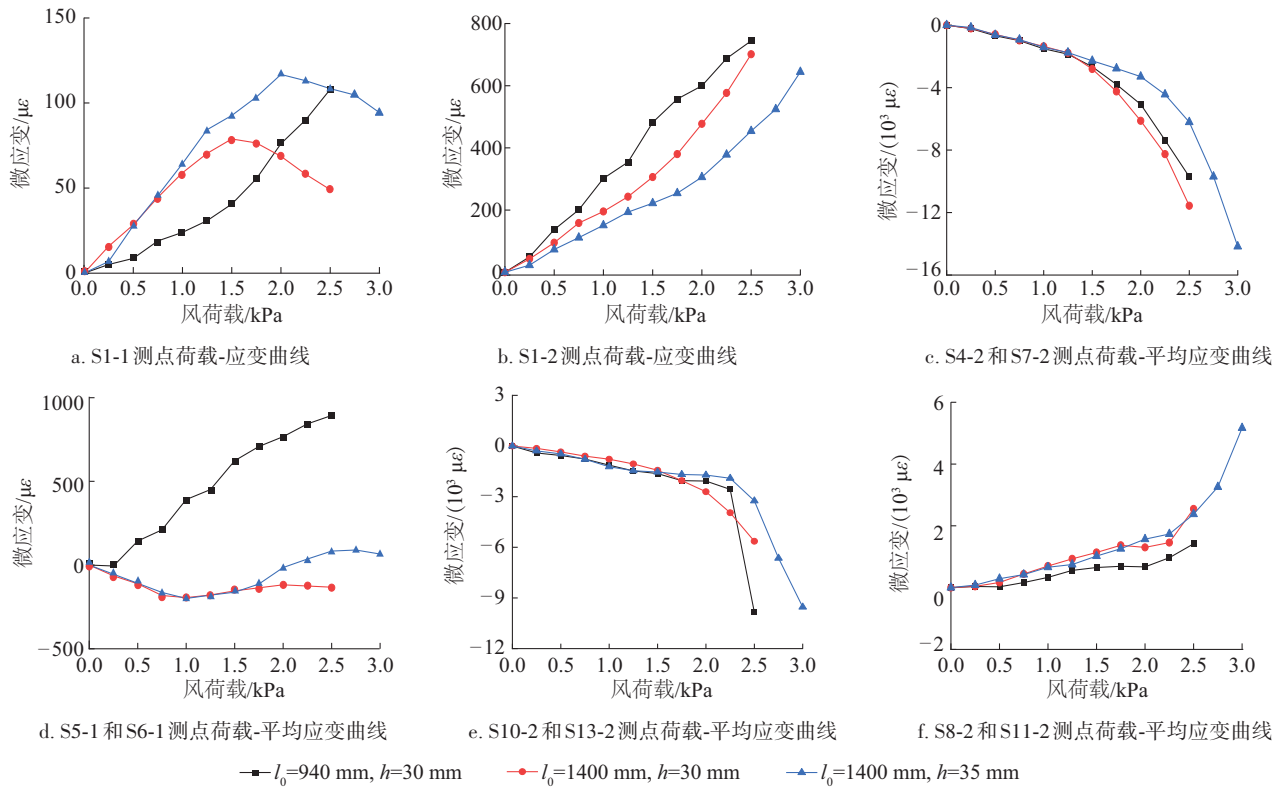


图8 试件的荷载-应变曲线

Fig. 8 Load-strain curves of specimens

远远大于纵向应变,这与光伏组件仅在长边由压块提供固定约束(即为单向板构造)有关。当第1、2组试验工况荷载达到1.5倍设计荷载时,第3组试验工况达到2.0倍设计荷载时,短边框中点横向应变增大开始加快,这由于此时各试验工况组件短边框开始出现塑性变形,且塑性变形发展较快,与位移变化相对应。各试验工况各测点横向应变趋势大致相同,而纵向应变的发展趋势中第1组试验工况与其他两组存在差异,这与第1组试验工况的压块间距更小,压块更靠近跨中部位,单向板效应更为明显有关。由图8e与图8f可知,3组试验工况下,风荷载皆达到2.1倍设计荷载时,压块开始屈服,这与3组试验工况中组件面积相同,传递到压块上的每级荷载都相同有关。由图8可看出,在受风荷载过程

中组件短边框为敏感部位,在荷载达到一定程度时发生屈服,但从结构实际设计(图9)来看,短边框截面积小于长边框,存在抗风揭设计缺陷。

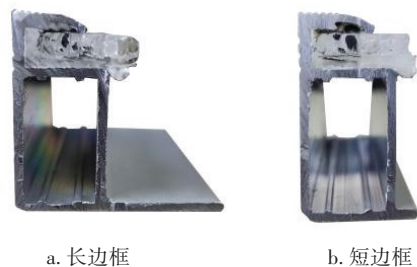


图9 光伏组件边框截面图

Fig. 9 Cross-sections of photovoltaic module frames

3 光伏组件抗风揭性能数值模拟

由于光伏组件抗风揭试验费用较高、耗时较长,本文在试验基础上,采用有限元模拟方法进一步分析光伏组件的抗风揭性能及影响因素。

3.1 有限元模拟方法及验证

针对试验工况 2 的光伏组件,其设计参数为 $l_0 = 1400 \text{ mm}$ 、 $h = 30 \text{ mm}$,利用 ABAQUS 有限元软件对组件受风荷载的全过程进行数值模拟。由于模型本身以及边界条件和荷载具有对称性,所以建立 1/4 的光伏组件精细化有限元模型以减少计算成本,如图 10 所示。光伏组件的制造过程:首先,通过层压工艺将多层材料(钢化玻璃、乙烯-醋酸乙烯胶膜(EVA)、太阳电池、背板)制成光伏层压板;随后,在光伏层压板四周涂覆密封胶,并将其嵌入带有卡槽的铝合金边框内;最终,封装成完整的光伏组件,其局部截面图如图 11 所示。光伏层压板中各层材料厚度如表 2 所示。安装固定时,使用压块将铝合金边框固定在檩条上,边框与压块截面尺寸如图 12 所示,紧固螺栓使用直径为 8 mm 的 A2-70 不锈钢螺栓,简化螺栓的几何形状。本文对各部件进行实体化建模,各材料属性^[16-17]如表 3 所示。

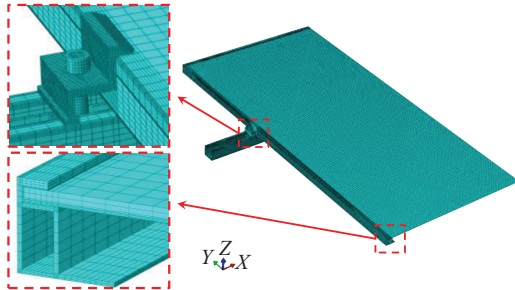


图 10 有限元模型

Fig. 10 Finite element model

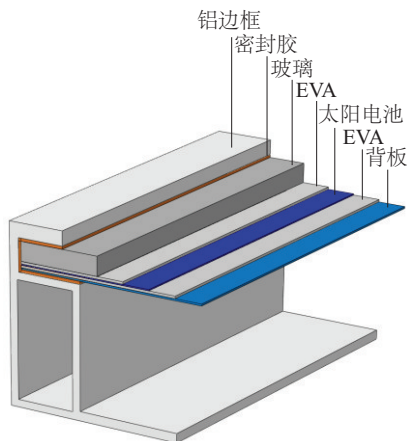


图 11 光伏组件局部模型截面图

Fig. 11 Cross-sections of local photovoltaic modules

表 2 组件层压板各层材料厚度

Table 2 Material thickness of each layer of PV cell laminate

材料名称	厚度/mm
钢化玻璃	3.2
EVA	0.4
太阳电池	0.2
背板	0.3
密封胶	0.5

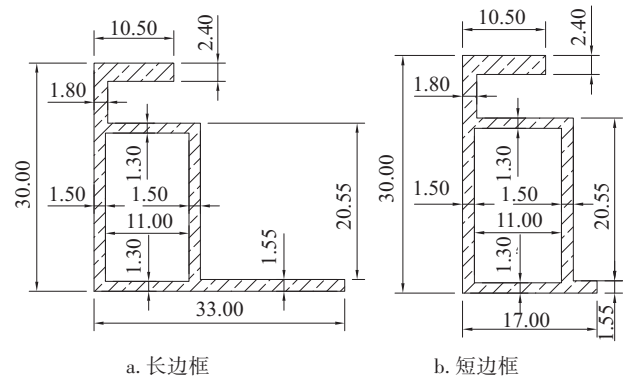


图 12 边框及压块截面尺寸图(单位:mm)

Fig. 12 Cross-sectional dimensions of frames and clamps (unit: mm)

表 3 材料参数

Table 3 Material parameters

部件	泊松比	弹性模量/ MPa	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
铝边框	0.30	58140.0	142	202
玻璃	0.23	73000.0		
EVA	0.33	67.7		
太阳电池	0.28	130000.0		
背板	0.29	3500.0		
密封胶	0.30	15.0		
压块	0.30	58140.0	142	202
螺栓	0.30	200000.0	450	700
檩条	0.30	206000.0	235	375

模型中各部件皆采用 8 节点实体单元(C3D8R)。由于试验过程中未出现组件层间位移,所以对于光伏组件中光伏层压板的模拟通过切分整块光伏层压板为不同厚度层,再对各层赋予对应属性来实现。为模拟边框与密封胶、密封胶与光伏层压板之间的可靠连接,将彼此之间的接触设置为绑定连接,其余各部件间的接触关系设定为面-面接触类型,法向设为硬接触,切向摩擦系数取值 0.3。依据对称性原理,对 1/4 模型的对称截面实施对称约束,并在檩条端部施加固定约束。荷载采用线性递增的方式施加,直到光伏组件风揭破坏。

图 13 为有限元计算得到的光伏组件在风荷载作用下变形结果,对比图 6a 可看出光伏组件破坏形态基本相同。图 14 为试验和模拟计算得到的光伏组件风荷载作用下位移和应变

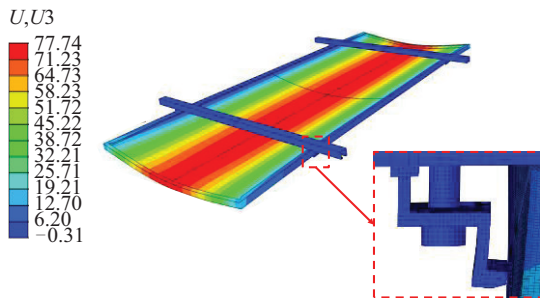
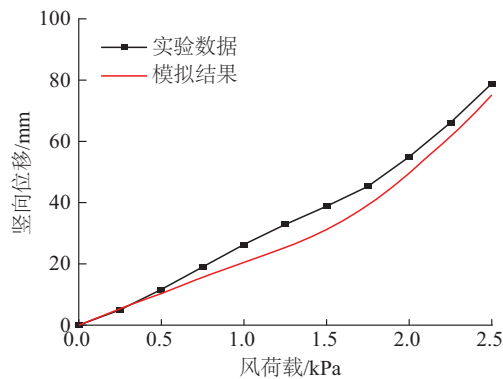
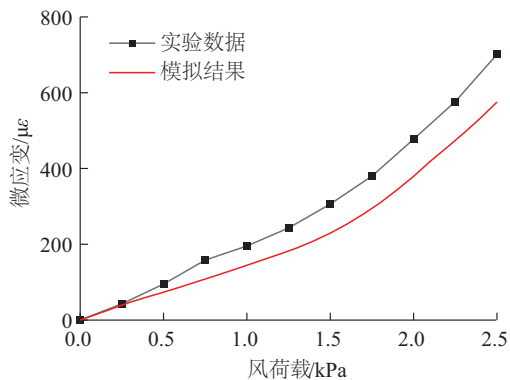


图 13 有限元模拟变形图(单位:mm)

Fig. 13 Deformation of finite element simulation (unit: mm)



a. 跨中荷载-竖向位移曲线对比



b. 跨中荷载-应变曲线对比

图 14 试验与模拟结果对比

Fig. 14 Comparison of Experimental and Simulation Results

结果对比,从可以看出,位移与应变曲线趋势基本一致,且跨中最大竖向位移相差 4.7%,表明本文建立的有限元模型可准确预测光伏组件的抗风揭性能,验证了有限元模型的准确性。

3.2 风揭破坏准则

由 1.3 节试验结果可知,光伏组件在风荷载作用下的风揭破坏主要由压块咬合处的松脱引起,光伏组件本身虽在短边框中部发生少量塑性变形但仍未破坏。将组件受 1.0 倍、1.5 倍、2.0 倍、2.5 倍设计荷载作用下,组件连接节点处截面变形状态列于图 15,可以看出,随着荷载的增大,压块与边框之间从紧密贴合状态,逐渐产生间隙与相对滑移,且增大的速率随荷载的增大明显加快,经过验证,其余两组试验对应的有限元模拟结果也符合这一特征。因此,压块固定式光伏组件在风荷载作用下本身不会发生边框撕裂、玻璃与背板破裂等破坏,破坏模式主要表现为组件短边框与压块屈服变形导致的压块咬合失效破坏。

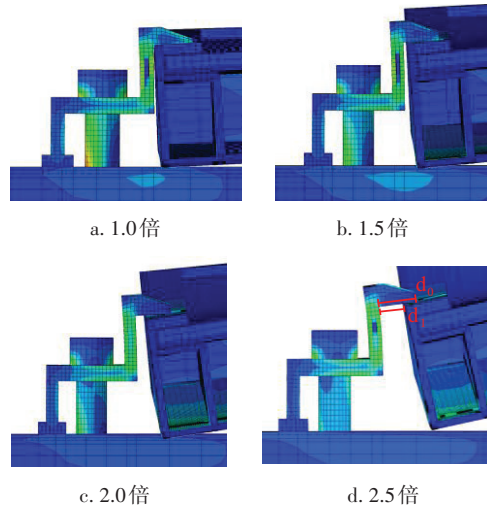


图 15 光伏组件连接节点变形示意图

Fig. 15 Deformation diagram of PV module connection joints

在已知破坏机理的基础上,对光伏组件系统的破坏准则进行确定。由图 15d 可知,在加压过程中,压块与组件边框之间产生相对滑移,压块对组件的约束面积逐渐减小。假定未加载时,压块对组件约束部位截面长度为 d_0 ($d_0=9\text{ mm}$)。加载过程中压块与组件边框之间的相对滑移量为 d_1 ,显然当 $d_1=9\text{ mm}$ 时,光伏组件脱离压块约束,发生风揭破坏。但结合试验现象,随着风压的增大,往往 d_1 尚未达到 9 mm ,光伏组件就会瞬间脱落,导致光伏组件破坏。为了保留一定的安全裕度,规定当 $d_1 \geq 2/3d_0$ 时,即认为光伏组件破坏,定义此时组件所受荷载为抗风揭极限荷载^[18]。

3.3 抗风揭性能影响因素分析

本节从组件设计与安装角度出发,探究影响光伏组件抗

风揭性能的主要因素。以试验工况 2 的光伏组件为原工况,从设计角度出发,改变组件长度和宽度为原始尺寸的 0.8、0.9、1.1 倍,改变组件边框高度为 25、35、40 mm;从安装角度出发,改变压块间距为 940、1170、1630 mm。共设计 12 组工况,各工况具体参数如表 4 所示。

表 4 各工况参数取值

Table 4 Parameter values of each working condition

工况编号	组件长度	组件宽度	组件高度	压块间距
原工况	2278	1134	30	1400
1	1822	1134	30	1400
2	2050	1134	30	1400
3	2506	1134	30	1400
4	2278	906	30	1400
5	2278	1020	30	1400
6	2278	1248	30	1400
7	2278	1134	25	1400
8	2278	1134	35	1400
9	2278	1134	40	1400
10	2278	1134	30	940
11	2278	1134	30	1170
12	2278	1134	30	1630

根据表 4 中的参数组合建立相应的有限元模型,计算得到光伏组件各工况的抗风揭极限荷载,如表 5 所示。为探究各参数的对光伏组件抗风性能的影响程度和影响趋势,将各工况下组件极限荷载随参数变化趋势绘制于图 16。可以看出,光伏组件的抗风揭性能与组件的长度、宽度成负相关,与组件边框高度和压块间距成正相关。且组件的尺寸变化对抗风揭性能影响程度大于压块的安装间距变化,其中宽度变化影响最显著。

表 5 各工况的抗风揭极限荷载

Table 5 Wind uplift ultimate load for each operating condition

工况编号	极限荷载/kPa	工况编号	极限荷载/kPa
原工况	2.50	7	2.10
1	3.05	8	2.90
2	2.70	9	3.45
3	2.25	10	2.20
4	4.35	11	2.31
5	3.20	12	2.55
6	1.90		

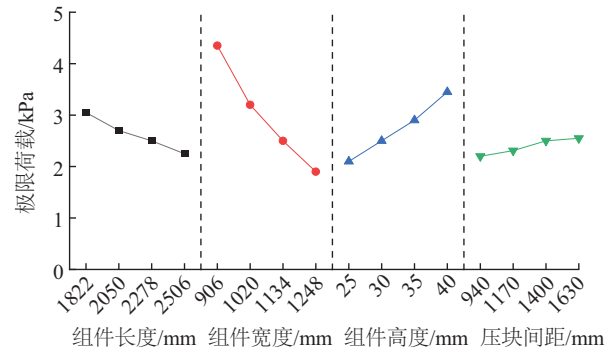


图 16 光伏组件抗风揭极限荷载随设计参数的变化规律

Fig. 16 Variation of wind uplift ultimate load of photovoltaic modules with design parameters

4 结 论

本文对刚性支撑压块固定式光伏组件进行模拟风荷载的全过程加载试验。结合精细化有限元分析方法,讨论光伏组件的抗风揭性能及失效模式并对影响其抗风揭性能的关键因素进行参数分析,得到如下主要结论:

1) 刚性支撑压块固定式光伏组件的失效模式主要表现为固定压块与组件边框的咬合失效破坏。当风荷载超过抗风揭承载力时,组件短边框与压块逐渐屈服,导致组件向内凹陷,压块与组件边框之间产生间隙与相对滑移,压块对组件的紧固约束面积逐渐减小,最终完全失去紧固作用,造成光伏组件风揭破坏。

2) 通过结合试验与有限元模拟结果分析,确立了光伏组件风揭破坏的判定准则,即当压块与光伏组件之间的相对滑移量超过压块对光伏组件边框原约束面截面长度的 2/3 时,认为组件破坏,此时组件所承受荷载为抗风揭极限荷载。

3) 从设计角度出发,减小光伏组件的长度和宽度、增加组件边框高度可显著提升其抗风揭性能,其中减小组件宽度的提升效果最显著。从安装角度出发,优化固定压块的间距也能在一定程度上改善光伏组件的抗风揭性能。

[参考文献]

- [1] 方元庆, 陈晶. 碳达峰碳中和背景下我国新能源技术发展及意义[J]. 材料导报, 2024, 38(增刊1): 35-40.
FANG Y Q, CHEN J. Development and significance of new energy technology in China under the background of carbon peaking carbon neutrality [J]. Materials reports, 2024, 38(S1): 35-40.
- [2] 苗青青, 石春艳, 张香平. 碳中和目标下的光伏发电技术[J]. 化工进展, 2022, 41(3): 1125-1131.
MIAO Q Q, SHI C Y, ZHANG X P. Photovoltaic technology under carbon neutrality [J]. Chemical industry and engineering progress, 2022, 41(3): 1125-1131.
- [3] 关鹏, 张家瑞, 朱宸, 等. 基于正交试验设计的双波光

- 伏组件仿真优化研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(4): 432-438.
- GUAN P, ZHANG J R, ZHU C, et al. Study on simulation and optimization of double glass photovoltaic components based on orthogonal experimental design[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2023, 44(4): 432-438.
- [4] 赵明智, 张丹, 宫博, 等. 沙漠环境对光伏组件的影响研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(5): 365-370.
- ZHAO M Z, ZHANG D, GONG B, et al. Study on influence of desert environment on photovoltaic modules[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2020, 41(5): 365-370.
- [5] 陈权, 牛华伟, 李红星, 等. 基于风洞试验与规范规定值的光伏支架风荷载取值研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 259-267.
- CHEN Q, NIU H W, LI H X, et al. Research on wind load value of photovoltaic bracket based on wind tunnel test and standard values[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2024, 45(9): 259-267.
- [6] ABIOLA-OGEDENGBE A, HANGAN H, SIDDIQUI K. Experimental investigation of wind effects on a standalone photovoltaic (PV) module[J]. *Renewable energy*, 2015, 78: 657-665.
- [7] AGARWAL A, IRTAZA H, ZAMEEL A. Numerical study of lift and drag coefficients on a ground-mounted photovoltaic solar panel[J]. *Materials today: proceedings*, 2017, 4(9): 9822-9827.
- [8] 马文勇, 柴晓兵, 马成成. 柔性支撑光伏组件风荷载影响因素试验研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(11): 10-18.
- MA W Y, CHAI X B, MA C C. Experimental study on wind load influencing factors of flexible support photovoltaic modules[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2021, 42(11): 10-18.
- [9] 郭涛, 杨渊茗, 孙震, 等. 光伏组件柔性拖曳结构与传统刚性结构风振响应对比[J]. 太阳能学报, 2024, 45(10): 317-325.
- GUO T, YANG Y M, SUN Z, et al. Comparison of wind vibration response of flexible dragging support structure and traditional rigid support structure of photovoltaic modules[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2024, 45(10): 317-325.
- [10] 杜航, 徐海巍, 张跃龙, 等. 大跨柔性光伏支架结构风压特性及风振响应[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(10): 67-74.
- DU H, XU H W, ZHANG Y L, et al. Wind pressure characteristics and wind vibration response of long-span flexible photovoltaic support structure[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(10): 67-74.
- [11] 韦媛. “彩虹”台风灾害对太阳能光伏电站损毁性影响原因分析和应对措施[J]. 通讯世界, 2015, (22): 103-105.
- WEI Y. Cause analysis and countermeasures of the destructive influence of typhoon “Rainbow” on solar photovoltaic power station[J]. *Telecom world*, 2015, (22): 103-105.
- [12] 吴函恒, 邢梓瑄, 王涛, 等. 风揭荷载作用下光伏与压型钢板一体化屋面支座节点的抗拔承载力与设计方法[J]. 太阳能学报, 2025, 46(8): 7-17.
- WU H H, XING Z X, WANG T, et al. Uplift bearing capacity and design approaches of clip connections joints in profiled steel sheet roof integrated solar arrays under wind loads[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2025, 46(8): 7-17.
- [13] 张亮, 王银玲, 谷若晨, 等. 光伏组件中压块承载能力有限元分析[J]. 光源与照明, 2022(7): 80-82.
- ZHANG L, WANG Y L, GU R C, et al. Finite element analysis of the bearing capacity of clamps in photovoltaic modules[J]. *Lamps & lighting*, 2022(7): 80-82.
- [14] 买发军, 白荣丽, 吕丹. 光伏电站支架连接节点探讨[J]. 太阳能, 2015(7): 34-36, 56.
- MAI F J, BAI R L, LYU D. Discussion on connection node of photovoltaic power station bracket[J]. *Solar energy*, 2015(7): 34-36, 56.
- [15] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范[S].
- GB 50009—2012, Load code for the design of building structures[S].
- [16] PAPARGYRI L, PAPANASTASIOU P, GEORGHIOU G E. Effect of materials and design on PV cracking under mechanical loading[J]. *Renewable energy*, 2022, 199: 433-444.
- [17] ZHANG J Y, LU B Q, ZHENG D F, et al. Experimental and numerical study on energy absorption performance of CFRP/aluminum hybrid square tubes under axial loading[J]. *Thin-walled structures*, 2020, 155: 106948.
- [18] 刘军进, 崔忠乾, 李建辉, 等. 铝镁锰直立锁边金属屋面抗风揭性能试验研究与理论分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(5): 19-31.
- LIU J J, CUI Z Q, LI J H, et al. Experimental study and theoretical analysis on performance of aluminum-magnesium-manganese standing seam metal roof under uplift wind load[J]. *Journal of building structures*, 2021, 42(5): 19-31.

STUDY ON WIND UPLIFT FAILURE MECHANISM AND INFLUENCING FACTORS OF CLAMP-FIXED PHOTOVOLTAIC MODULES

San Bingbing, Huang Rongliang, Qiu Ye, Ren Gaoke

(*College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: To investigate the wind uplift resistance and failure modes of rigidly supported clamp-fixed photovoltaic (PV) modules, considering the effect of module fixation spacing and frame height, this study conducted wind uplift resistance tests on PV modules with different parameter combinations. The entire loading process of the PV modules under simulated wind load was measured, including displacement and strain changes. The damage deformation characteristics and failure modes of the PV module were analyzed. A numerical analysis model of the PV module was established using the structural finite element analysis software ABAQUS to further study the factors affecting the wind uplift resistance of the PV modules. The results show that the wind uplift failure mode of the PV module is the failure of the engagement between the fixed block and the module frame, leading to the entire PV module being uplifted. The wind uplift failure criterion for the PV module is defined as failure occurring when the slippage between the clamps and the PV module exceeds $2/3$ of the original constraint surface section length of the block on the module frame. Reducing the length and width of the PV module, and increasing the height and fixation spacing of the PV module, can effectively improve its wind uplift resistance, with reducing the module width having the most significant effect.

Keywords: PV modules; uplift wind resistance; numerical simulation; wind resistance uplift test; failure mode; module clamp