

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.040



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



固定式光伏支架檩条-檩托-斜梁连接节点 静力承载性能及破坏机制试验研究

张敦元^{1,2}, 杨波³, 刘滨彬², 宋磊⁴, 汪润章^{1,2}, 贾睿²

(1. 四川蜀道清洁能源集团有限公司建设管理分公司, 成都 610041; 2. 盐源蜀道清洁能源有限公司, 四川 西昌 615700; 3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 4. 隆基乐叶光伏科技有限公司, 西安 710018)

摘要: 为了明确固定式光伏支架檩条-檩托-斜梁连接节点承载性能及破坏机制, 开展了静力单调加载试验, 研究不同构造参数对节点力学行为的影响规律。试验变量包括螺栓孔型(圆孔、槽孔)、螺栓类型(M10 普通螺栓、M12 高强螺栓)及斜梁是否布置撑管。加载过程中同步采集节点荷载-位移曲线、螺栓预紧力演化及孔周应变响应, 以揭示节点受力机理与破坏演化特征。结果表明, 节点破坏模式主要包括檩条孔壁压溃破坏和斜梁连接处螺栓拉脱破坏两类, 两者均与孔壁局部承压能力及受力重分布密切相关; 孔型和螺栓类型对节点初始刚度、极限承载力及变形能力具有显著影响, 高强螺栓能提高滑移前刚度与极限承载水平, 并改善受力稳定性; 槽孔节点对撑管布置更为敏感, 设置撑管能增强构件局部约束, 改善变形协调性并延缓预紧力衰减过程。根据荷载-位移曲线与应变监测结果, 将节点力学响应划分为弹性阶段、滑移发展阶段及失效阶段, 其中局部承压区的塑性演化控制了极限承载能力及最终破坏路径。

关键词: 光伏支架; 高强螺栓连接节点; 静力加载试验; 承载性能; 破坏模式; 构造参数

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Experimental study on static bearing capacity and failure mechanism of purlin-purlin cleat-inclined beam connection joint in fixed photovoltaic support system

ZHANG Dunyuan^{1,2}, YANG Bo³, LIU Binbin², SONG Lei⁴, WANG Runzhang^{1,2}, JIA Ru²

(1. Sichuan Shudao Clean Energy Group Co., Ltd. Construction Management Branch, Chengdu 610041, P. R. China; 2. Yanyuan Shudao Clean Energy Co., Ltd., Xichang 615700, Sichuan, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 4. LONGi Solar Technology Co., Ltd., Xi'an 710018, P. R. China)

Abstract: To address the engineering demand for understanding the load-carrying capacity and failure mechanisms of purlin - bracket - inclined beam connections in fixed photovoltaic (PV) support systems, a series

收稿日期: 2026-03-04

基金项目: 隆基乐叶光伏科技有限公司科研项目(H20251063)

作者简介: 张敦元(1988-), 男, 主要从事新能源结构抗风、抗震研究, E-mail: kmustzdy@163.com。

杨波(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: yang0206@cqu.edu.cn

Received: 2026-03-04

Foundation items: Research Project of LONGi Solar Technology Co., Ltd. (No. H20251063)

Author brief: ZHANG Dunyuan (1988-), main research interest: wind -resistant and seismic-resistant structural in the field of new energy, E-mail: kmustzdy@163.com.

YANG Bo (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: yang0206@cqu.edu.cn.

of systematic monotonic static loading tests was conducted to investigate the influence of key structural parameters on the mechanical behavior of the joints. The test variables included bolt hole configuration (circular hole and slotted hole), bolt type (M10 ordinary bolts and M12 high-strength bolts), and the presence or absence of a bracing tube in the inclined beam. During testing, load – displacement responses, bolt pretension evolution, and strain distributions around bolt holes were synchronously monitored to elucidate the load transfer mechanism and failure evolution characteristics of the connections. The results indicate that two primary failure modes were observed: bearing failure of the purlin bolt hole wall and bolt pull-out failure at the inclined beam connection. Both modes are closely associated with the local bearing capacity of the hole wall and the redistribution of internal forces within the joint. The hole configuration and bolt type exert significant effects on the initial stiffness, ultimate load-carrying capacity, and deformation capacity of the connections. High-strength bolts enhance the pre-slip stiffness and ultimate resistance, and improve the overall mechanical stability of the joint. Slotted-hole connections exhibit greater sensitivity to the presence of bracing tubes; the installation of bracing tubes strengthens local confinement, improves deformation compatibility, and mitigates the rate of pretension loss. Based on the combined analysis of load – displacement curves and strain measurements, the mechanical response of the joints can be categorized into three stages: elastic stage, slip development stage, and failure stage. The plastic evolution in the local bearing zone governs both the ultimate load-carrying capacity and the final failure path.

Keywords: photovoltaic fixed support; high-strength bolted connection; static loading test; bearing capacity; failure mode; structural parameters

近年来,中国光伏产业保持高速增长态势,太阳能发电装机规模持续扩大^[1-3]。国家能源局统计数据显示,截至2025年10月底,全国太阳能发电累计装机容量已达到11.4亿kW,较上年同期增长43.8%,光伏发电在新型电力系统中的地位和规模显著提升。作为光伏电站中最为常见的承载体系,固定式光伏支架因其结构形式简洁、适用性强、施工与维护成熟,广泛应用于各类光伏工程,主要承担光伏组件自重以及风荷载、雪荷载等环境作用,其结构安全性直接关系到电站的整体稳定性与长期服役性能^[4]。

围绕固定式光伏支架结构的受力性能,众多学者已开展了大量研究。黄华等^[5]通过足尺静力试验与有限元分析,系统研究了固定式光伏支架的承载能力与破坏形态;胡宝琳等^[6]在风荷载作用下对足尺光伏支架进行了破坏性试验,揭示了其受力性能及典型破坏模式。在数值模拟方面,随着有限元技术的不断发展,相关研究逐渐增多^[7-8]。张亮等^[9]基于实测材料参数,采用三维线性开口梁单元对固定式光伏支架进行了有限元模拟;张向向等^[10]构建了单柱固定光伏组件-支架-基础一体化三维数字模型,系统分析了自重、风荷载、雪荷载及其组合工况下的受力变形特征,并探讨了支架弹性模量、混凝土强度、檩条长度和桩基埋深等关键参数对结构性能的影响机制。

在光伏支架体系中,檩条-檩托-斜梁连接节点

是实现荷载传递与结构协同工作的核心部位,其主要功能在于将檩条传递的光伏组件自重及风、雪等环境荷载可靠地传导至斜梁,对支架整体受力性能与稳定性起决定性作用。针对该类节点,田志强等^[11]在风吸与风压工况下开展了静力加载试验,分析了节点的受力机理、破坏形态、承载性能及应变分布特征,并考察了檩条壁厚对节点性能的影响;郭永泉^[12]等针对某光伏支架工程中光伏面板被风刮飞的工程事故,通过现场调查与计算分析指出,风荷载取值不当及连接构造不合理(如垫片尺寸不足)导致螺栓拉脱和主檩条面外失稳是结构破坏的主要原因,并提出相应的加固方案并进行了数值与试验验证。

光伏支架节点普遍采用螺栓连接,其构造设计在工程实践中仍具有较强经验性,针对檩条-檩托-斜梁节点受力机制、破坏模式及构造参数影响规律的系统试验研究仍相对不足。尤其是螺栓孔型形式、螺栓类型等关键构造参数对节点性能的影响及其耦合效应尚未得到充分揭示,导致部分节点在服役过程中出现螺栓松动、孔壁压溃甚至连接失效等问题,制约了结构安全性与可靠性设计水平的提升。

笔者对光伏支架檩条-檩托-斜梁连接节点开展静力加载试验,通过对节点荷载-位移响应、螺栓预紧力演化及螺栓孔周应变等关键参数的测量,揭示节点的力学响应特征和典型破坏模式,阐明不同构

造条件对节点承载性能的影响机制。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验以某实际工程中固定式光伏支架的檩条—檩托—斜梁连接节点为原型,结合节点构造特征及试验加载需求,设计并制作多组试件。试件主要由檩条、檩托及斜梁3部分组成,其中檩条和斜梁采用冷弯薄壁C型钢,截面尺寸分别为C90 mm×60 mm×

20 mm×1.8 mm 和 C80 mm×50 mm×15 mm×2.0 mm,材料分别为镀锌铝镁 Q420 和镀锌铝镁 Q355。檩托采用 L 型角钢经切割、钻孔加工而成,型钢尺寸为 L90 mm×56 mm×5 mm,材料为热镀锌 Q235。根据不同螺栓直径设置相应的孔型参数:M10 普通螺栓对应圆孔孔径为 12 mm,槽孔孔径为 12 mm,槽孔长度为 30 mm,孔距为 50 mm;M12 普通螺栓对应圆孔孔径为 14 mm,槽孔孔径为 14 mm、槽孔长度为 30 mm,孔距同为 50 mm。试件的具体构造及尺寸布置如图 1 所示。

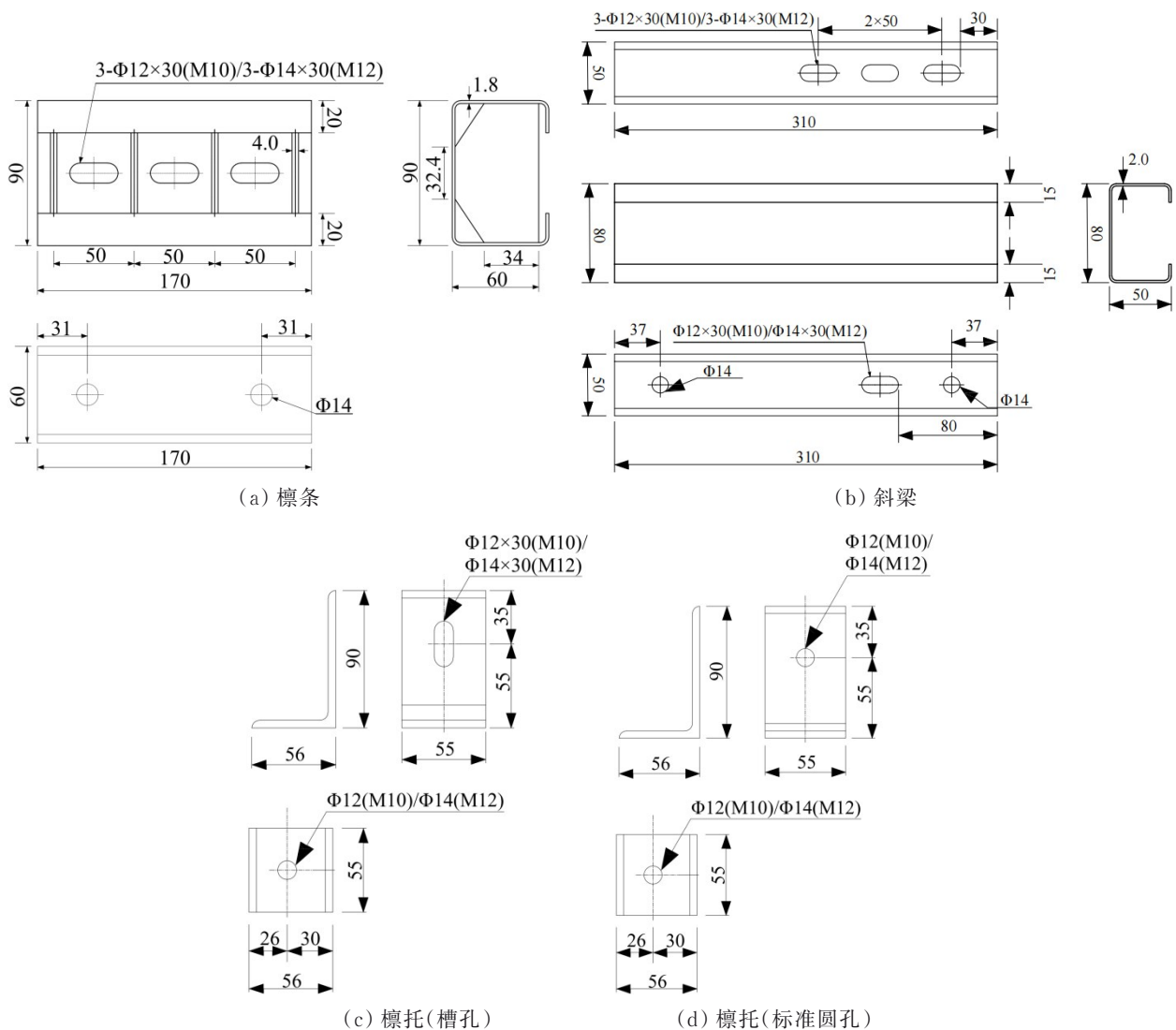


图 1 试验试件尺寸图(单位:mm)

Fig.1 Test specimen dimensions

为避免在加载过程中檩条因薄壁开口截面特性发生扭转或局部屈曲,在檩条受力区域内部沿长度方向设置了4道加劲肋,其尺寸及布置形式见图1(a)。该措施有效提高了檩条的整体与局部稳定性,确保试验过程中节点破坏优先发生于连接区域,而非构件本体失稳。

为系统分析关键构造参数对节点受力性能的

影响,试验设置3类控制变量,分别为螺栓孔型(标准圆孔与槽孔)、螺栓类型(M12 高强螺栓与 M10 普通螺栓)以及斜梁节点处是否设置撑管。其中,撑管常用于提高开口截面斜梁连接区的面外刚度并抑制孔壁局部压溃,因此通过设置该变量以评估其对节点力学性能的影响。基于上述变量组合,共设计并制作8个试件,各试件的构造参数与分组情况

见表 1。

表 1 抗滑移试验方案
Table 1 Anti-slip test protocol

编号	与檩条连接处檩托的螺栓孔孔型	螺栓类型	斜梁处有无撑管
YK-PT-W	标准圆孔	M10 普通螺栓	无
YK-PT-Y	标准圆孔	M10 普通螺栓	有
YK-GQ-W	标准圆孔	M12 摩擦型高强螺栓	无
YK-GQ-Y	标准圆孔	M12 摩擦型高强螺栓	有
CK-PT-W	槽孔	M10 普通螺栓	无
CK-PT-Y	槽孔	M10 普通螺栓	有
CK-GQ-W	槽孔	M12 摩擦型高强螺栓	无
CK-GQ-Y	槽孔	M12 摩擦型高强螺栓	有

注:YK、CK 分别代表标准圆孔和槽孔;PT、GQ 分别代表普通螺栓和摩擦型高强螺栓;W、Y 分别代表无撑管和有撑管。

试验装置如图 2 所示,上下两端均设置夹持端,并分别通过试验机的上、下夹具进行固定,以保证加载过程中的受力传递稳定性与轴线一致性。上夹持端采用销轴与连接板相连,以减小附加弯矩对试验结果的影响;连接板与檩条之间通过两颗 10.9 级 M12 摩擦型高强螺栓进行连接,从而实现节点剪力的有效传递。为了考察撑管对节点力学性能的加固作用,斜梁的下翼缘通过两颗 10.9 级 M12 摩擦型高强螺栓与连接板相连,从而形成完整的檩条-檩托-斜梁节点受力体系。

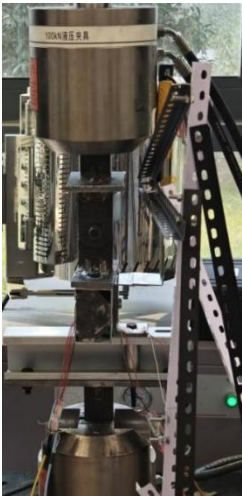


图 2 试验装置整体布置
Fig.2 Overall layout of the test apparatus

1.2 材料性能

试验前,对所用的两种钢材按照《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[13]进行室温拉伸试验。每种材料均设置 3 个试件,其力学性能取 3 个试件的平均值,结果列于表 2 中。拉伸后的试件形态如图 3 所示。

1.3 测量方案

为监测节点受力过程中螺栓预紧力的演化规律,在两颗高强螺栓处分别布置预紧力传感器,实

表 2 钢材力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel

钢材种类	E/GPa	f_y/MPa	f_u/MPa	$A/\%$
Q420	209.3	418.1	544.0	20.6
Q355	207.9	361.2	517.8	23.9
Q235	201.7	235.8	377.6	28.3

注: E 、 f_y 、 f_u 、 A 分别表示弹性模量、屈服强度、抗拉强度、断后伸长率。



图 3 材性试验试件
Fig.3 Material property test specimens

现加载全过程中预紧力变化的实时采集。针对螺栓孔在受力方向上的应变响应特征,在试件关键位置粘贴电阻式应变片,应变片的粘贴位置如图 4 所示。此外,在檩条与檩托连接处的螺栓位置布置 1 个量程为 100 mm 的线性可变差动变压器(Linear Variable Displacement Transducer, LVDT)位移计,用于测量螺栓在加载过程中的位移,布置方式如图 5 所示。试验过程中,采用东华测试 DH3820N 动态数据采集系统同步采集两颗螺栓的预紧力、孔周应变及螺栓位移数据,采样频率统一设置为 50 Hz。

1.4 测量方案

试验加载采用 WANCE 微机控制电子万能试验机,按照《钢结构工程施工质量验收标准》(GB 50205—2020)^[14]对摩擦型高强螺栓施加预紧力,采用数显扭力扳手并结合预紧力传感器数据,确保每个螺栓初始预紧力控制在 42.75~45 kN 区间内,预紧完成后静置 10 min,待预紧力达到稳定状态后启动加载。普通螺栓统一施加 40 N·m 的扭矩,以保证试件安装条件的一致性。

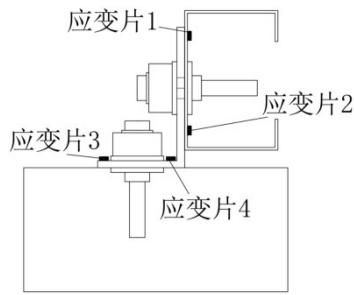


图4 应变测量方案

Fig.4 Strain measurement scheme

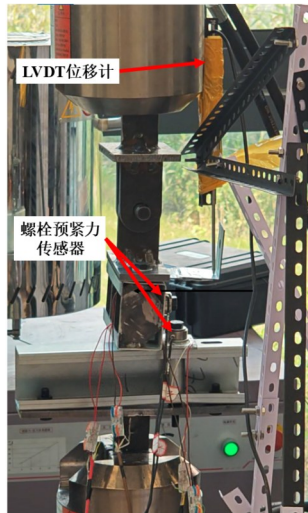


图5 试件测量布置图

Fig.5 Specimen Measurement Layout Diagram

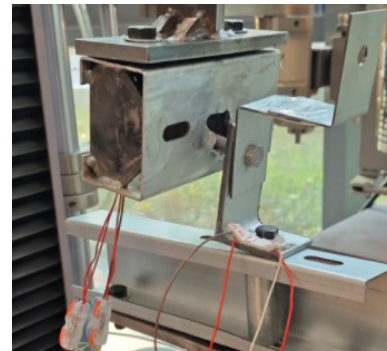
由于主要关注节点的极限承载能力及破坏机理,因此采用单调加载方式进行试验。试验采用位移控制加载,拉伸加载速率为 0.5 mm/min 。在加载过程中持续观察节点区域的受力响应与外观变化,重点记录滑移起始位置及对应荷载、异常声响、摩擦面涂层或镀层的磨损与剥落情况,以及螺栓转动或松动现象等,为节点破坏机理分析提供依据。当试件承载力较峰值下降超过 15% ,或出现明显的结构性破坏(如螺栓孔壁压溃、螺栓拉脱等)时,判定节点达到极限状态并终止加载。

2 试验结果

节点破坏共有两种典型模式:一是檩条连接处孔壁压溃破坏,二是斜梁连接处的螺栓拉脱破坏。试验结果表明,不同构造参数对节点主导破坏模式具有显著影响,其中试件CK-PT-Y和CK-GQ-Y发生了檩条孔壁压溃破坏,而其余6个试件均表现为斜梁处螺栓拉脱破坏,各试件的具体破坏形态如图6、图7所示。

由图6可见,檩条孔壁压溃破坏主要集中于槽孔受力端部区域。孔边缘出现明显塑性挤压痕迹,并沿受力方向产生撕裂裂缝,裂纹由孔端向板边扩

展,局部伴随孔壁压溃及板厚方向剪切变形。该现象表明,当节点发生滑移后,荷载传递机制由摩擦传递转变为栓杆-孔壁承压传递,螺栓与槽孔端部形成高度集中的承压接触区,应力难以沿截面宽度方向有效扩散,导致孔端区域首先进入塑性阶段并发生撕裂破坏。不同螺栓类型下破坏形态基本一致,说明在构件开槽孔并设置撑管条件下,节点整体面外稳定性得到一定程度保障,但极限状态仍主要受檩条孔端局部承压能力控制。



(a) CK-PT-Y



(b) CK-GQ-Y

图6 孔周撕裂破坏

Fig.6 Peripheral tearing and damage

图7所示为斜梁侧螺栓拉脱破坏形态。由图7可见,斜梁孔周末形成大范围贯通撕裂,而是在孔端形成明显压溃区及局部板厚方向撕裂痕迹,螺栓发生拔出,孔壁沿受力方向产生局部破坏并伴随构件面外变形。该破坏模式表明,在加载过程中若斜梁侧局部刚度不足或构造约束较弱,螺栓将承受较强的拉-弯-剪复合作用,承压区集中于孔端局部区域,孔壁在局部压溃与剪切撕裂作用下逐步失稳,最终导致拉脱破坏。此类破坏未表现为截面整体拉断,说明其极限承载能力主要受孔端局部稳定性及构造约束条件控制,而非净截面强度控制。

两种破坏模式的差异反映了不同构造条件下应力传递路径与局部稳定性的区别:檩条孔周压溃

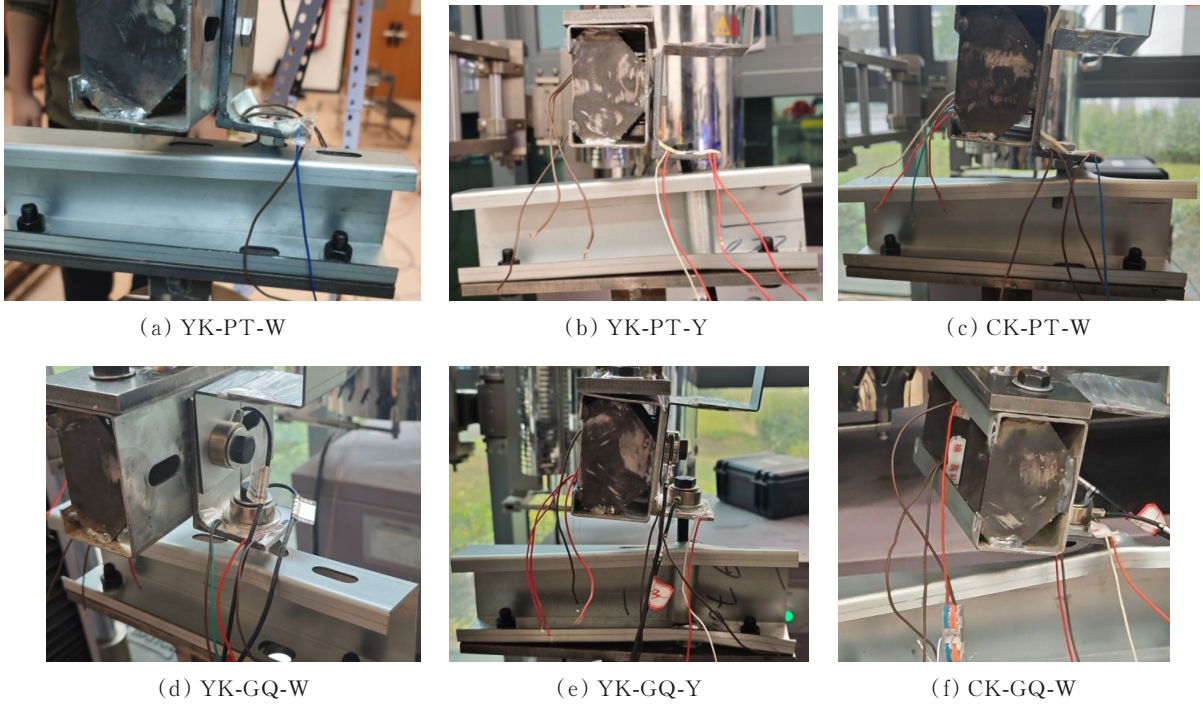


图7 螺栓拉脱破坏

Fig.7 Bolt pull-out failure

破坏以孔周钢板剪切破坏为主,体现为局部承压区塑性发展与撕裂扩展;斜梁侧拉脱破坏则以孔端局部承压失稳及螺栓弯剪耦合作用为主,表现为局部压溃与面外变形主导的连接失效。

3 试验结果分析

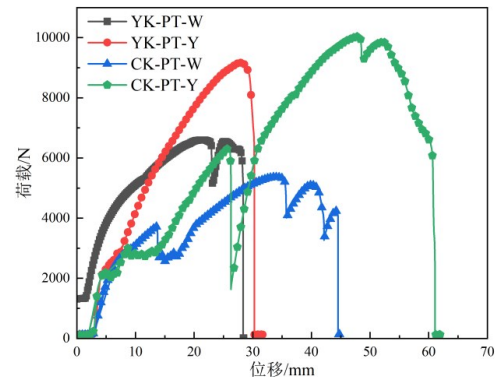
3.1 荷载-位移曲线及参数影响分析

各试件的荷载-位移曲线如图8所示,总体而言,节点受力过程均可划分为弹性阶段、滑移发展阶段及失效阶段3个典型阶段,但不同孔型及撑管构造对节点初始刚度、极限承载力及延性特征影响显著。构造参数不仅改变了荷载传递路径,也对滑移演化及破坏模式产生直接影响。

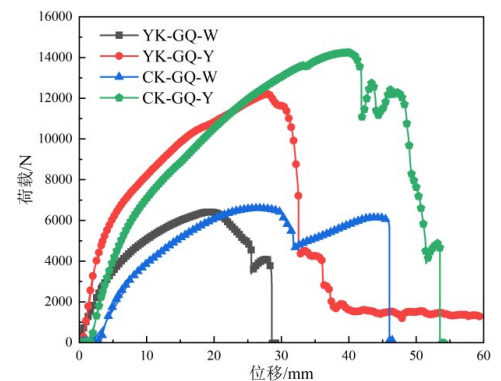
3.1.1 普通螺栓组

YK-PT-W 试件在加载初期迅速进入稳定受力阶段,曲线整体较为平滑,极限荷载约为 6.5 kN,对应位移约 25 mm。峰值后荷载迅速下降,表现出一定的突发性破坏特征,说明在普通螺栓条件下,圆孔节点主要由螺栓拉脱控制,其变形能力相对有限。设置撑管后(YK-PT-Y),节点极限承载力提升至约 9 kN,较未设撑管提高 35% 左右,同时峰值位移略有增加。曲线斜率整体提高,表明撑管有效增强了斜梁局部抗变形能力,改善了节点受力路径,使螺栓受力状态更加合理。峰值后仍出现明显荷载突降,破坏形式仍以螺栓拉脱为主。

CK-PT-W 试件呈现明显的阶段性特征。加载



(a) 普通螺栓组



(b) 高强螺栓组

图8 荷载-位移曲线

Fig.8 Load-displacement curve

初期刚度较低,并伴随波动现象,反映槽孔条件下螺栓与孔壁之间存在显著滑移与接触重分布过程。其极限荷载为 5 kN 左右,低于圆孔节点,说明槽孔

削弱了普通螺栓连接的初始刚度与承压能力。峰值阶段曲线起伏明显,表明孔内接触状态频繁调整,力传递路径不稳定。当设置撑管后(CK-PT-Y),节点受力性能显著改善。其极限荷载提升至约 10 kN 以上,极限位移可达 60 mm 左右,承载能力与变形能力均明显提高。曲线中后期持续强化,未出现剧烈下降,表明撑管对槽孔节点具有显著约束作用,可有效抑制滑移放大及局部失稳发展。

综上所述,在普通螺栓条件下,孔型对节点性能影响较为明显。圆孔节点受力相对稳定,而槽孔节点对构造加强措施更为敏感;合理设置撑管可显著提升其承载能力与延性水平。

3.1.2 高强螺栓组

与普通螺栓组相比,高强螺栓组整体承载水平显著提高,曲线形态更为平滑,弹性阶段斜率增大,峰值荷载及变形能力均有所提升。这主要得益于较高预紧力所提供的摩擦承载能力,使节点初始刚度及滑移控制能力增强。

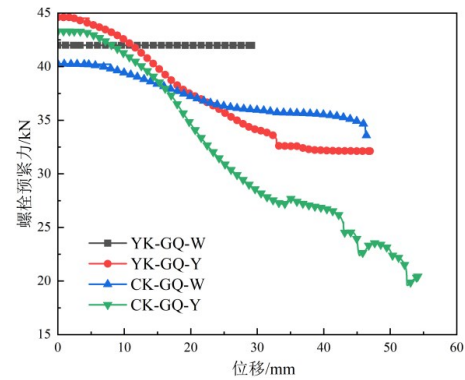
YK-GQ-W 试件极限荷载约为 6.5 kN,峰值位移约 25 mm,达到峰值后承载力迅速退化,曲线在弹性阶段斜率较大,虽然高预紧力提高了初始刚度,但在未设撑管条件下,斜梁局部变形仍较明显,导致峰值后承载力快速下降。设置撑管后(YK-GQ-Y),极限荷载提高至约 12 kN,较未设撑管提高 80% 左右,峰值位移约 30 mm。曲线中后期呈持续强化趋势,峰值后未出现剧烈失稳,说明撑管在高强螺栓条件下显著改善了局部受力状态,增强了螺栓与孔壁之间的协同承载能力。

CK-GQ-W 试件在加载初期仍存在一定滑移现象,但高预紧力有效延缓了滑移发展,其极限荷载约 6.5 kN,峰值位移约 30 mm,与圆孔节点承载力接近,说明孔型影响在高预紧力作用下有所削弱。CK-GQ-Y 试件极限荷载约 14 kN,峰值位移约 45 mm,曲线整体上升平稳,中后期未出现明显刚度退化,显示出良好的延性与变形协调能力。峰值后虽存在阶段性波动,但承载水平保持较高,表明撑管在高强螺栓条件下能够充分发挥约束与稳定作用。

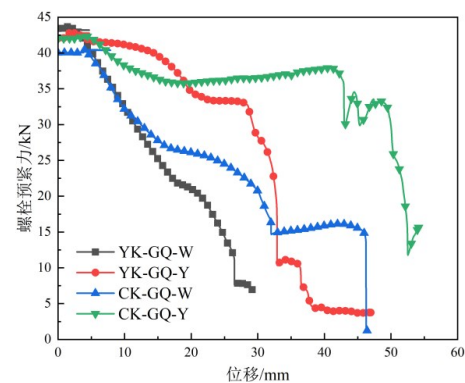
比较可知,高强螺栓显著提高了节点的极限承载能力和整体受力稳定性。较高的预紧力增强了摩擦承载能力,并使摩擦-承压转化过程更加平稳。孔型与撑管设置仍对节点性能产生重要影响,其中槽孔节点对撑管设置更为敏感。未设撑管时,圆孔与槽孔节点承载力差异有限;设置撑管后,承载能力显著提升,且槽孔节点提升幅度更为显著,说明撑管对改善槽孔受力不均及滑移问题具有更为明显的效果。

3.2 高强螺栓预紧力演化规律

为揭示不同构造条件下高强螺栓预紧力的演变特征,图 9 分别给出了檩托—檩条连接处与檩托—斜梁连接处高强螺栓预紧力随节点竖向位移发展的变化曲线。总体而言,两处连接螺栓的预紧力均随位移增加而发生不同程度衰减,但其衰减幅度、阶段特征及稳定区间受孔型形式与撑管构造等因素显著影响。



(a) 与檩条连接处螺栓



(b) 与斜梁连接处螺栓

图 9 螺栓预紧力-位移曲线

Fig.9 Bolt preload-displacement curve

3.2.1 檩条—檩托连接处

檩条连接处螺栓预紧力整体衰减幅度较小,曲线变化相对平缓,未出现突发性骤降现象,表明该侧节点变形以构件整体弯曲为主,螺栓轴向附加变形及有效夹持长度变化有限。

圆孔试件表现出较好的预紧力保持能力。YK-GQ-W 试件在加载全过程中预紧力基本保持稳定,至位移约 30 mm 时仍维持在约 41 kN,说明圆孔条件下螺栓与孔壁接触稳定,摩擦面未发生显著滑移。设置撑管后(YK-GQ-Y),预紧力随位移呈缓慢衰减趋势,在 20 mm 后下降速率略有增加,极限阶段降至约 32 kN。与未设撑管工况相比,其预紧力损失更为明显,表明撑管提高节点整体刚度后,外荷载更充分传递至螺栓-孔壁承压区,局部塑性及嵌入变形发展加剧,从而导致部分预紧力释放。

槽孔试件预紧力衰减更为显著。CK-GQ-W 试件在加载初期即出现明显下降,至 20 mm 位移时降至约 36 kN,随后趋于稳定,反映出槽孔条件下早期滑移及接触重分布现象。CK-GQ-Y 试件呈持续下降趋势,至 30 mm 时降至约 28 kN,后期进一步衰减至约 20 kN,曲线伴随阶段性波动,说明槽孔与撑管共同作用下,孔壁承压区不断转移,接触嵌入效应增强,预紧力持续释放。

综上所述,檩条连接处预紧力衰减总体较缓,圆孔构造有利于维持稳定预紧力,而槽孔构造易诱发早期滑移及嵌入变形;撑管在提高节点刚度的同时,可能加剧局部承压区塑性发展,对该位置的预紧力保持能力产生不利影响。

3.2.2 檩托-斜梁连接处

相较于檩条连接处,斜梁连接处螺栓预紧力衰减更为显著。在加载初期,各试件预紧力损失率均较小,节点处于稳定静摩擦状态;随着位移增加,摩擦面发生错动,预紧力开始明显衰减。

无撑管工况(W组)下,预紧力衰减最为迅速。以 YK-GQ-W 为例,当位移约 10 mm 时,预紧力已降至 30 kN 以下,损失率在 30% 左右。其主要原因在于薄壁斜梁在拉力作用下上翼缘发生变形,导致螺栓孔局部变形直至压溃,使预紧力快速释放。

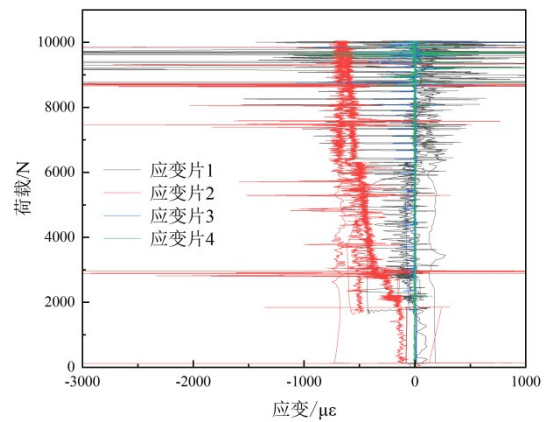
设置撑管后(Y组),预紧力保持能力明显提升。撑管增强了螺栓轴向受压区的法向刚度,抑制了截面局部变形,延缓了预紧力衰减进程。其中,CK-GQ-Y 试件在较大位移范围内维持较高的预紧力,曲线呈现相对稳定的特征。这表明槽孔提供一定的位移容许能力,减弱螺栓杆与孔壁之间的早期挤压接触,而撑管保证夹紧力的有效传递,两者协同提高了大变形阶段的夹持稳定性。

螺栓预紧力的衰减主要由连接区域在受力过程中的多种局部变形共同引起。首先,摩擦接触面在预紧力作用下会发生微观嵌入变形,加载过程中该变形持续发展,使螺栓夹持长度发生微小变化,从而导致预紧力逐渐降低。其次,摩擦面在受荷过程中可能产生微滑移和接触状态重分布,削弱连接界面的夹紧效果。此外,孔壁局部承压变形及构件弯曲变形会引起连接区局部刚度变化,使螺栓轴力发生重新分配并产生一定衰减。总体而言,螺栓预紧力衰减是摩擦面嵌入变形、接触面状态变化及构件局部变形等多种因素耦合作用的结果,其变化程度与节点局部刚度及受力传递路径密切相关。

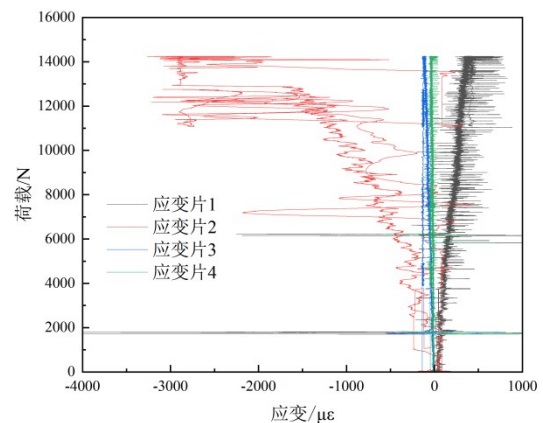
3.3 应变分析

根据试验现象与应变监测结果,节点破坏模式可归纳为檩条孔周撕裂破坏与斜梁处螺栓拉脱破

坏两类,图 10 和图 11 分别展示了两种破坏模式对应的荷载-应变曲线,结果表明,不同构造条件下应变演化规律具有明显差异。



(a) CK-PT-Y



(b) CK-GQ-Y

图 10 檩条螺栓孔周撕裂破坏工况

Fig.10 Peripheral tearing failure condition of purlin bolt holes

3.3.1 檩条-檩托连接处

在该破坏模式下,应变片 2 始终为破坏控制应变区,整体应变演化清晰地反映出孔端局部承压控制特征。以 CK-PT-Y 试件为例,随荷载增加,应变片 2 率先出现显著压应变增长,峰值约达 $(-2\ 500 \sim -3\ 000) \times 10^{-6}$,明显高于孔上方及檩托侧测点。该现象表明滑移发生后,螺栓与槽孔端部的接触集中于受力端下缘,局部承压与剪切耦合作用显著,应力沿截面宽度方向扩散能力有限,塑性区主要局限于孔边邻近区域,最终沿孔下缘发展形成撕裂破坏。在 CK-GQ-Y 试件中,螺栓孔下方压应变峰值进一步增大且对应荷载水平更高,说明高强螺栓较大的预紧力提高了滑移前刚度。然而,应变分布仍呈单侧集中特征,螺栓孔上方及檩托侧应变幅值相对较小,破坏主要区域依然位于檩条孔下端局部区域。对比两类试件可知,尽管高强螺栓提高了承载

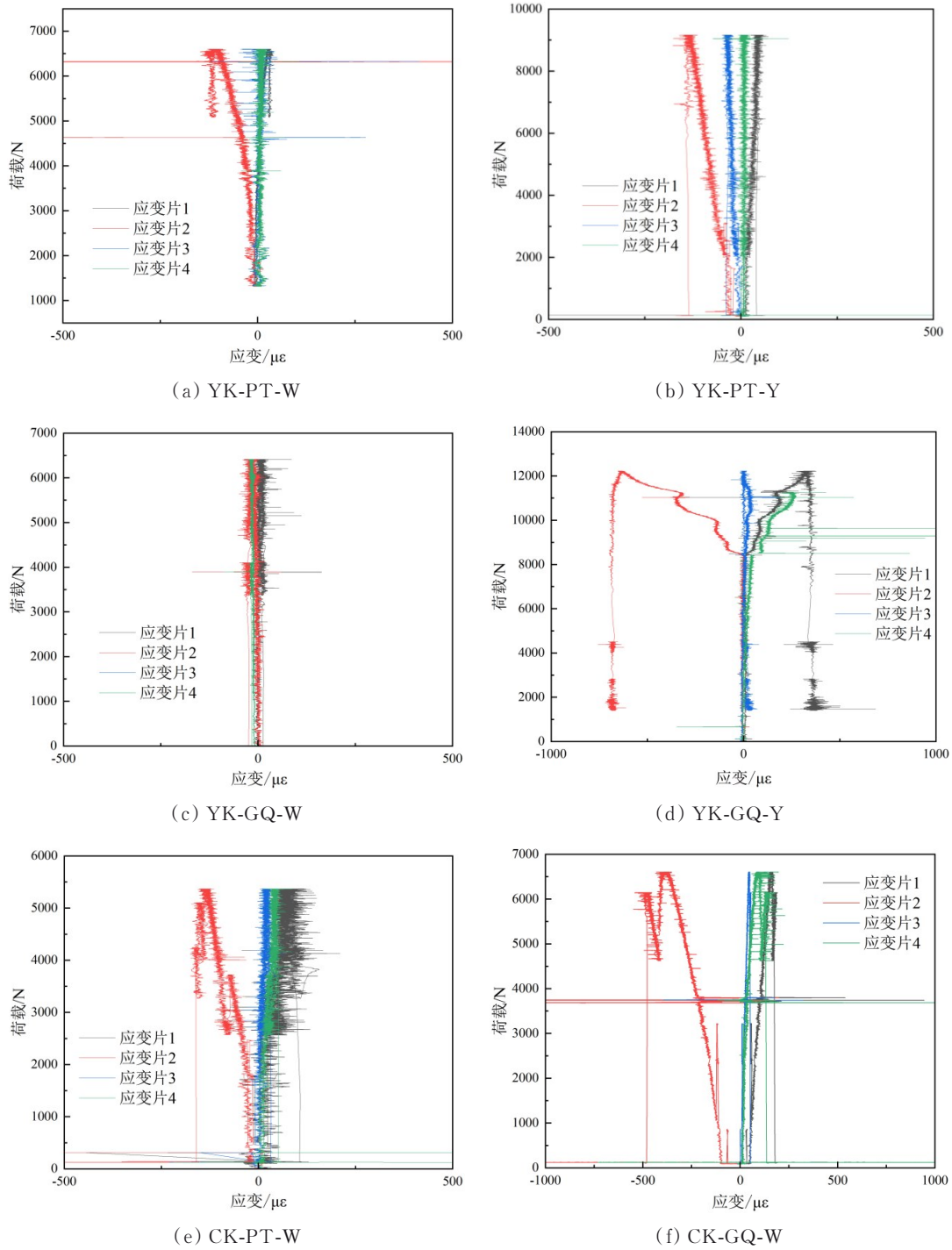


图 11 斜梁处螺栓拉脱破坏工况

Fig.11 Bolt pull-out failure condition at inclined beam

能力,但并未改变由槽孔端部局部承压-剪切集中所控制的孔周撕裂失效机理。

此外,设置撑管虽在一定程度上改善了节点整体稳定性,但孔端局部承压集中仍为决定性因素。各试件在远离孔边区域均未形成大范围塑性扩展,极限阶段应变突增位置与宏观撕裂路径高度一致。

3.3.2 斜梁处螺栓拉脱破坏模式

在斜梁拉脱破坏模式下,檩条的净截面未形成控制性塑性区,破坏并非由檩条孔周撕裂主导。相

比之下,斜梁对应区域在极限前出现更为显著的应变突变或波动,尤其在无撑管工况下,应变发展表现出离散性和突跳特征,反映出局部接触状态突变及板件局部失稳的发生。

对比不同螺栓类型可见,普通螺栓试件在达到较低荷载水平时孔周应变即出现明显偏压特征,应变片2(螺栓孔下方)多表现为压应变占优,表明滑移后承压区迅速集中于孔端下缘,螺栓产生偏心弯曲并促使局部承压区提前形成;而高强螺栓试件在

滑移前阶段应变发展较为稳定,孔周应变整体幅值较小且分布更均匀,说明较大的预紧力延缓了接触集中与孔壁压溃的发生。

撑管的设置对节点变形协调性具有显著影响。设置撑管时,各测点应变曲线相对集中、增长趋势平稳,说明撑管提高了夹紧区的面外刚度,抑制了薄壁构件局部畸变;无撑管工况下,应变分布不对称性增强,局部突变现象明显,反映出板件局部屈曲与孔壁压溃耦合作用更加显著,加速了螺栓由承压状态向拉脱破坏的演化。

综合应变分布特征可知,在斜梁拉脱破坏模式下,檩条孔周区域始终未形成大范围塑性扩展,应力主要集中于斜梁孔端局部承压区并伴随螺栓弯剪耦合效应逐步加剧,最终导致孔壁局部压溃与板厚方向撕裂而发生拉脱。应变测试结果与宏观破坏形态相吻合,表明该类节点的极限承载能力受孔端局部稳定性与构造约束条件控制,而非截面整体强度控制。

4 结论

通过光伏支架檩条-檩托-斜梁连接节点静力加载试验,系统分析了节点力学响应特征、破坏模式及构造参数影响规律,得到以下结论:

1)光伏支架檩条-檩托-斜梁节点在静力加载下表现出两类典型破坏模式:檩条孔壁压溃破坏和斜梁连接处螺栓拉脱破坏。

2)相比于圆孔构造,槽孔构造因存在较大初始几何间隙,会导致节点抗滑移系数降低,且在滑移阶段出现明显的荷载波动,但其对极限承载力的削弱幅度有限。在薄壁斜梁内部设置撑管是提升节点性能的关键措施。撑管有效改变了力的传递路径,并消除了因螺栓孔周凹陷导致的螺栓拉脱风险。

3)螺栓预紧力衰减特征显示,檩条连接处整体衰减平缓,而斜梁连接处衰减迅速。受局部抗压刚度及摩擦面微滑移影响,撑管可延缓预紧力衰减并改善局部变形协调性。节点荷载-位移响应呈现弹性阶段、滑移发展阶段及失效阶段三阶段特征,破坏极限由局部承压区控制,而非构件净截面强度控制。

参考文献

[1] Luo H, Li Z, Xiong Q, et al. Study on the wind-induced fatigue of heliostat based on the joint distribution of wind speed and direction[J]. Solar Energy, 2020, 207: 668-682.

[2] 解月阳, 白建波, 黄悦婷, 等. 不同支架结构遮挡对双面光伏阵列年发电量的影响分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(9): 134-140.
Xie Y Y, Bai J B, Huang Y T, et al. Analysis of annual power generation of bifacial PV array under occlusion of different spindle structures[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(9): 134-140. (in Chinese)

[3] 李明东, 李婧雯. “双碳”目标下中国分布式光伏发电的发展现状和展望[J]. 太阳能, 2023(5): 5-10.
Li M D, Li J W. Development status and prospects of distributed PV power generation in China under the goal of emission peak and carbon neutrality[J]. Solar Energy, 2023(5): 5-10. (in Chinese)

[4] Allouhi A, Rehman S, Buker M S, et al. Up-to-date literature review on Solar PV systems: technology progress, market status and R&D[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 362: 132339.

[5] 黄华, 张梅, 何银涛. 固定式光伏支架承载能力试验研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(4): 7-13.
Huang H, Zhang M, He Y T. Experimental study on load-carrying capacity of fixed photovoltaic bracket[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2020, 41(4): 7-13. (in Chinese)

[6] 胡宝琳, 吴仁杰, 周磊, 等. 固定式光伏支架受力性能与试验研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(8): 116-121.
Hu B L, Wu R J, Zhou L, et al. Mechanical properties and experimental study on fixed photovoltaic bracket[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(8): 116-121. (in Chinese)

[7] ABAQUS user subroutines reference manual v6.14[Z]. ABAQUS Inc, 2014.

[8] Jin S, Li Z C, Lan T Y, et al. Nonlinear finite element analysis of prestressed concrete containment vessel under severe accident loads[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(3): 816-825.

[9] 张亮, 朱紫玲, 罗冰冰, 等. 固定式光伏支架可承受荷载有限元分析[J]. 太阳能学报, 2022, 43(9): 15-20.
Zhang L, Zhu Z L, Luo B B, et al. Finite element analysis of allowable load of fixed photovoltaic brackets [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(9): 15-20. (in Chinese)

[10] 张向向, 赵太军, 侯献业, 等. 单柱固定光伏系统受荷特性及影响机制[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 244-252.
Zhang X X, Zhao T J, Hou X Y, et al. Load characterization and influence mechanisms of single-column fixed photovoltaic systems[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2025, 53(2): 244-252. (in Chinese)

[11] 田志强, 孟令峰, 邵戊辰, 等. 光伏支架C型钢檩条-斜梁节点受力性能试验研究[J]. 工程质量, 2024, 42(增刊

2): 170-176.

Tian Z Q, Meng L F, Shao W C, et al. Experimental study on mechanical behavior of C-shaped steel purlin to inclined beam joints in photovoltaic support systems[J]. Construction Quality, 2024, 42(Sup 2): 170-176. (in Chinese)

[12] 郭永泉, 高鹏飞. 某光伏支架损伤原因分析及加固方案研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊 2): 1656-1660.

Guo Y Q, Gao P F. Study on the damage cause and strengthening scheme of photovoltaic support[J]. Building Structure, 2023, 53(Sup 2): 1656-1660. (in Chinese)

[13] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法[S].

GB/T 228.1—2021 Metallic materials—Tensile testing: Part 1: Method of test at room temperature [S].

[14] GB 50205—2020 钢结构工程施工质量验收标准[S].

GB 50205—2020 Standard for acceptance of construction quality of steel structures [S].

(编辑 XXX)