

光伏发电 MC4 插头质量控制措施

田小龙², 司俊龙¹, 宫兆军¹, 周奎应¹, 张城¹, 张洪星¹

1. 国家电投集团综合智慧能源有限公司, 北京 100044

2. 国家电力投资集团有限公司, 北京 100029

DOI:10.61369/EPTSM.2025070014

摘要 : 本文旨在探讨光伏发电中 MC4 插头的质量控制措施。首先分析了国内主要生产厂家的情况, 接着阐述了 MC4 插头存在的主要问题, 包括老化、短路和着火等现象及其原因。随后详细论述了在制造过程中控制质量的方法, 以及设备采购阶段和安装阶段的质量控制要点。随后详细论述了在制造过程中控制质量的方法, 以及设备采购阶段和安装阶段的质量控制要点, 涵盖了材料选择、工艺标准、供应商评估及现场操作规范等关键环节。通过对这些方面的综合研究, 为提高光伏发电系统中 MC4 插头的质量可靠性提供参考。

关键词 : 光伏发电; MC4 插头; 质量控制

Photovoltaic MC4 Plug Quality Control Measures

Tian Xiaolong², Si Junlong¹, Gong Zhaojun¹, Zhou Kuiying¹, Zhang Cheng¹, Zhang Hongxing¹

1. State Power Investment Group Comprehensive Smart Energy Co., Ltd., Beijing 100044

2. State Power Investment Corporation Limited, Beijing 100029

Abstract : This paper investigates quality control measures for MC4 connectors in photovoltaic power generation systems. The study begins with an analysis of major domestic manufacturers, followed by a detailed examination of common issues including aging, short circuits, and fire hazards along with their root causes. Subsequent sections elaborate on manufacturing process controls and critical quality assurance strategies during equipment procurement and installation phases. Key aspects covered include material selection, process standards, supplier evaluation, and field operation protocols. Through comprehensive research in these areas, the paper provides actionable recommendations to enhance the reliability of MC4 connectors in photovoltaic systems.

Keywords : photovoltaic power generation; MC4 plug; quality control

引言

光伏发电作为清洁能源体系的重要组成部分, 光伏发电系统的运行稳定性与安全性相互关联。在光伏组件直流侧的关键电气接口中, MC4 连接器的性能优劣直接影响发电效率及设备安全。近年来, 因 MC4 插头质量问题引发的火灾和短路事故频发, 凸显了加强全产业链质量控制的重要性。本文基于国内 MC4 插头生产现状, 深入剖析现存问题, 并系统探讨其全生命周期质量管理的优化路径。

一、国内 MC4 插头主要生产厂家概述

根据行业调研, 国内 MC4 插头主要生产商包括中航光电、浙江昱辉、江苏通润等企业。这些企业在材料研发、生产工艺及认证标准上逐步与国际接轨, 但市场竞争激烈, 部分中小厂商仍存在技术薄弱、质量控制不严的问题。因此, 选择供应商时需重点审核其 ISO 认证、UL/TUV 等国际资质, 并参考过往项目案例。

二、MC4 插头存在的主要问题及成因分析

(一) 老化与接触电阻升高

MC4 插头长时间处在高温、低温、紫外线以及潮湿等恶劣环境之中, 其外壳和内部导电材料容易出现老化现象, 物理性能随之下降, 材料脆化、密封圈弹性变差会导致插头密封性变差, 湿气和尘埃渗入内部, 金属接触面的氧化与腐蚀程度加重。接触表

作者简介:

田小龙, (1980.11-), 男, 山西大同人, 研究生, 高级工程师, 研究方向: 安全工程;

司俊龙 (1976.10-), 男, 河南开封人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 长期从事电力系统及综合智慧能源产业安全生产管理。

面状况恶化之后，接触电阻明显上升。有研究显示，当接触电阻过大时，电流通过就会产生局部高温，这种过热会加快材料退化速度，而且有可能引发直流电弧，电弧能量非常高，如果持续存在，就会使周围材料碳化甚至燃烧，成为光伏系统火灾的主要诱因。所以，老化造成的接触电阻变化既会影响系统效率，又会威胁到运行安全。^[1]

(二) 短路与火灾风险

在光伏系统中，直流侧由于电压高、电流大，一旦出故障就会产生持续电弧，直流电弧不易自灭，非常有火灾危险性。MC4插头是重要连接部件，如果存在制造缺陷、型号混用、安装工艺问题，像没有用专用工具压接、连接螺帽没按规定拧紧等，都会造成接触不良、阻抗不均。^[2-5]局部高温烧毁绝缘层引发短路。而且，有些非标插头还有结构不匹配、接触面积不够等状况，这样就加大了短路的风险。电弧和短路造成的高温能够点燃附近的可燃物，特别是在屋顶光伏的情形下，火灾的后果会很严重。所以，要规范安装并使用同型号认证的插头，是降低风险的关键措施。

(三) 机械损伤与密封失效

MC4插头在运输、安装及维护过程中易受到机械损伤，被叉车撞击，踩踏，尖锐物体划伤等，造成外壳破裂，内部结构变形，这些物理性损伤会直接破坏插头的结构完整度，使其锁紧，密封功能失效，如果安装时遗漏密封圈或者没有正确压接，插头的防护等级就会降低，外界湿气，灰尘容易渗入连接器内部，引发金属导体腐蚀，绝缘性能下降，在湿热，盐碱等恶劣环境下，腐蚀现象会急剧加快，使得接触电阻变大并且产生发热现象，而且密封失效还会让雨水渗入，造成内部短路，所以要保证施工规范，防止外力损伤，选用带有良好密封结构和耐候材料的插头，这样才能维持长久的可靠性。^[5-7]

三、MC4插头质量控制的主要措施

(一) 制造阶段的质量控制措施

1. 材料与工艺优化

材料选取方面，MC4插头制作大量使用PPO（聚苯醚）、PA66（尼龙66）这类性能优良的工程塑料，这些材料有着不错的机械强度和尺寸稳定性，而且能承受-40到90摄氏度的温度变化，抵御紫外线照射以及潮湿条件，保证外壳密封性与绝缘耐久性，金属接触件经过精细镀银处理，银层可以抑制表面氧化，大幅度削减接触电阻，改善载流效能和热稳定性，进而减小连接处发烫和产生电弧的风险，材料与电镀工艺的协同优化，从根源上加强了产品的环境适应能力和电气安全性。

2. 严格测试标准

制造过程中执行多维度可靠性测试，把插头在实际恶劣工况下的性能全部检测出来，环境应力测试包括高低温循环，湿热交变，盐雾腐蚀这些项目，用来检查材料老化，密封失效，机械变形等情况，电气性能测试非常严格，接触电阻要小于等于 $0.5\text{m}\Omega$ ，绝缘耐压像4000V/1min无击穿，插拔寿命要在500次

重复连接之后仍然符合性能标准，这样就能保证产品在高压，大电流环境下长时间安全工作，这组测试是制造质量保障的关键部分。

3. 智能化生产监控

为最大限度减少人为操作误差并实现全程质量可控，现代的MC4插头生产线中使用了大量的自动化设备以及智能监测系统，机器人可以精准地完成注塑、嵌件、压接这些关键工序，保证了装配的一致性以及接触的可靠性，而视觉检测系统以及传感器会实时地收集工艺参数，对注塑温度、压接深度、镀层质量进行监控，有些先进的产线还会配备AI质量分析模块，自动识别出外观上的缺陷、尺寸上的偏差以及装配上的瑕疵，从而做到实时报警并且分拣出来，智能化制造既提高了产能，又保证了每一件产品的高一致性和高可靠性的标准。^[8]

(二) 设备采购阶段的质量控制

1. 供应商综合评审

采购时先要对供应商展开系统评估和筛选，企业得创建起健全的供应商数据库，全方位检查其生产资质，看有没有TUV，UL之类的国际认证，还要有ISO9001这样的质量体系，这些认证是供应商生产规范，产品可靠的重要保障。也要考量它的行业名声，以前的合作表现和客户的评价，防止由于供应商挑选失误引发的质量风险。而且，要让供应商递交权威第三方机构出具的检测报告，比如德国莱茵TÜV的耐候性，防火性能之类的专项认证，从而保证供应商的产品在实际使用过程中能够满足高温，高湿，紫外线照射等苛刻环境的要求，从源头上消除质量隐患。

2. 合同条款约束

采购合同要明确具体的技术和质量要求，成为一个有约束力的法律文件。合同当中要详细规定插头的关键性能指标，比如接触电阻值，绝缘等级，工作温度范围，耐久性标准等。而且，应该设定不低于10年的质保期，体现供应商对于产品长久可靠的承诺，合同里也要明确违约责任和赔偿条款，防止由于条款模糊引发纠纷，保证在出现质量问题的时候可以迅速而有效地追责和补救。这样就能从法律和商业两方面加强对于产品质量的把控。^[9]

3. 到货验收与抽样检测

物资到货后，要执行验收程序，通过抽样检测来确认整批产品质量。用红外热成像仪给插头通电测温，随时监测它在额定电流下的温升状况，异常发热常常表明接触不良或者绝缘有问题。还要用微欧计这些精密仪器测定接触电阻，保证数值符合设计标准，比如小于等于 $0.5\text{m}\Omega$ ，防止电阻太大造成运行过热，抽样方案应该依照统计原理，保证样本具有代表性并且批次一致。只有经过严格验收的合格产品才准许入库并投入使用，这样才能阻止不合格品进入光伏系统，保障电站整体安全与效率。^[10]

(三) 安装和运行阶段的质量控制要点

1. 施工人员培训

施工人员必须接受系统、专业培训，熟悉MC4插头的结构特点，安装流程，质量要求，培训内容要涵盖专用压接工具的使用方法，插头对接的正确手法，常见错误操作的分析与预防，采用理论讲解与实操演练相结合的方式，让安装人员掌握接线端子

的压接工艺，插头锁紧时的“咔嗒”声确认，密封组件的装配要点，只有经过考核合格的人员才能上岗，防止因操作不当导致的接触不良，密封失效或者机械损伤，从源头上提高安装质量。

2. 安装环境要求

MC4插头的安装要在干燥又干净的环境下作业，绝对不能在下雨天、下雪天或者潮湿多灰的地方工作，现场要铺上防潮布，设立临时围挡，防止水分和灰尘进入插头里面，造成电化学腐蚀或者绝缘性能变差，环境温度最好保持在零下二十度到四十度之间，太冷的时候塑料壳子会变脆，太热的时候密封圈容易老化，作业地点还要有充足的光线，空气流通好，这样可以让操作人员看清楚，做得准，最大程度地降低环境对安装质量的影响。

3. 规范安装操作

安装时插头与插座的极性要对应，不能混用不同品牌、型号或规格的产品，以免因为机械公差或者电气参数的不同造成接触电阻变大或者发生电弧放电。连接的时候要把插头和电缆垂直对正，均匀施力推入直到听见清脆的“咔嗒”锁紧声，确认连接器已经完全啮合，安装好以后用手摸一摸看连接是否牢固，轻轻拉动没有松动的感觉，仔细查看尾部的密封胶圈有没有损坏，压接的地方是否紧密，保证整个结构有IP67以上级别的防护能力，能够起到防尘防水的作用。

4. 现场防护措施

剥线的时候要使用专门的工具，裸露铜线的长度务必控制在8到10毫米之间，太长容易引发短路，太短则会压接不实，电缆敷设时不可出现锐角弯曲，严禁踩踏或者堆压插头和连接线缆，最好采用桥架、线槽之类的固定保护手段，缩减因为机械拉伸，挤压或者摩擦造成的损害，地面电站或者屋顶项目还要执行防晒，防鼠咬之类的操作，以延长插头在运行环境下的使用寿命。

5. 安装后检测

安装完毕之后一定要形成起完善的检测体系。首先要执行电气性能验证，用微欧计来检测回路电阻，保证其小于等于1毫欧，再用绝缘电阻测试仪检测极间以及对地绝缘电阻，保证其大于等于100兆欧，必要时候还要开展耐压检测。系统投入运用之后，应当创建起定时巡查制度，每三个月用红外热像仪去检测插头运作时候的温度，如果发觉存在异常的热点就要立即加以解决。针对比较大的光伏电站，可以选用无人机装着红外相机来做大规模

的巡查，从而提升巡查的效率和覆盖范围。而且，要定时查看插头外观是否出现龟裂，变形或者烧蚀等情况，还要创建运行档案，把每次检测的结果记录下来，做到全程的质量追踪和追溯，从而尽早发现问题并且及时处理。

四、案例分析与改进建议

2025年1月，由某公司经营的山地光伏电站光伏子阵区发生火灾，致使1491块组件及7台组串式逆变器和直流电缆、MC4接头、支架等受损，造成周边山林发生火灾事故。该公司调查发现，在2024年一年内该电站发生39起MC4接头烧损情况，3月份甚至出现将近20例；直流电缆和组件烧毁事件也频繁发生。事故之后经过调查，原来此山地光伏电站并没有按照规定对设备进行第三方质量检测流程，在其整个施工期间也没有完整地记录了相关重要安装数据参数比如扭矩值等信息。缺少对设备故障或者存在安全隐患的定期筛查机制，更没有对MC4接头的状态进行周期性的评估和维护。没有能够形成有效的经验总结以及不断改进的措施。

五、结论

MC4插头的质量管控体系要贯穿产品全生命周期的关键环节，包含设计选型，采购验收，安装调试等阶段，选设备的时候，先挑那些有良好可靠性的优质供应商，而且对供应商给出的出厂检测报告要仔细核查，最好选带有电弧监测装置和快速断路保护功能的电气元件来加强系统的安全性。电缆选型和敷设要严格依照《电力工程电缆设计规范》，还要结合预防性试验的数据，对于绝缘值不合格或存在明显下降的电缆，应及时查明原因并更换。定期开展电气设备红外热成像扫描，加强对易发生放电和过热设备、元件、电缆、接头等的检查，对多发、普发性的设备缺陷，要认真研究分析，及时组织开展技术改造。光伏场站电缆、MC4接头这类重要部件需采取恰当的固定办法来保证牢固连接，从而防止因强风造成的松动，过热以及电气放电等危险状况出现。未来，随着智能化监测技术的普及，MC4插头的可靠性将进一步提升，为光伏电站安全运营提供坚实保障。

参考文献

- [1] MC4连接器接触电阻升高机理与预防性维护策略《太阳能学报》(2025年第1期).
- [2] 户外光伏连接器老化性能测试标准与实施指南深圳市讯科标准技术服务有限公司(2025).
- [3] 光伏系统电气连接故障分析与MC4插头质量控制《电力电子技术》期刊(2024年第2期).
- [4] 光伏连接器MC4接头技术演进与可靠性研究史陶比尔集团技术白皮书(2023).
- [5] 肖祥珀.光伏电站机电设备常见故障与处理技术[J].通讯世界,2025,32(07):100-102.
- [6] 朱华.不同型号光伏连接器间的匹配性研究[J].太阳能,2023,(11):56-64.
- [7] 沈钱平,袁万强,马良.浅析光伏系统运维风险中的连接器失效[J].太阳能,2018,(07):52-54.
- [8] 刘智涛.分布式光伏发电系统的安装与施工安全管理[J].灯与照明,2025,49(04):185-187.
- [9] 覃智锦.光伏发电设备安装质量控制与安全管理[J].中国机械,2024,(03):97-100.
- [10] 朱华.不同型号光伏连接器间的匹配性研究[J].太阳能,2023,(11):56-64.