

# 高压连接器安装工艺对系统可靠性的影响研究

李阿勇 狄长涛 马小军 张瑞阳  
陕西重型汽车有限公司 陕西 西安 710200

**摘要：**高压连接器安装工艺对系统可靠性具有决定性影响。研究显示，机械安装中紧固力矩偏差超5%将导致接触电阻升高30%以上，振动环境下动态力矩衰减超20%易引发接触失效；环境控制不当导致颗粒物污染会使绝缘电阻下降50%，盐雾环境腐蚀速率随密封压缩量不足呈指数级增长；压接高度偏差超 $\pm 0.05\text{mm}$ 或截面积压缩率异常，将直接破坏导电性能。通过力矩-角度监控系统、机器视觉对中检测等智能化技术，可有效降低安装工艺变量对系统可靠性的影响。

**关键词：**高压连接器；安装工艺；系统可靠性；影响

**引言：**在新能源汽车、航空航天、智能电网等关键领域，高压连接器承担着电力传输与信号传递的重任，其可靠性直接影响系统整体安全与运行效率。然而，安装工艺作为连接器从设计到应用的“最后一公里”，常因力矩控制偏差、环境污染、对中不准等问题，引发接触不良、绝缘劣化等故障。现有研究多聚焦于材料与结构设计，对安装工艺的系统性影响认识不足。本文深入剖析安装工艺对系统可靠性的作用机理，提出优化策略，为提升高压连接器应用可靠性提供参考。

## 1 高压连接器安装工艺概述

### 1.1 安装工艺分类

(1) 机械安装：作为安装基础，需严格把控核心操作指标。螺栓紧固力矩需符合设备规格书要求，避免力矩不足导致接触松动或力矩过载引发螺栓断裂；压接工艺需采用专用压接工具，保证压接部位紧密贴合，减少接触阻抗；对中精度控制需通过定位工装实现，确保连接器插合时芯体精准对接，防止错位造成绝缘损伤。

(2) 环境控制：安装环境需满足洁净度等级（通常不低于ISO8级），避免金属碎屑、粉尘附着于接触表面；温湿度需维持在 $15\text{-}30^{\circ}\text{C}$ 、 $40\%\text{-}60\%\text{RH}$ 范围，防止高温高湿导致材料老化或低温影响密封性能；同时需采取防尘罩覆盖、洁净工作台操作等防尘措施，隔绝外部污染物。

(3) 检测工艺：安装后需通过多轮检测验证质量。接触电阻测试采用微欧表，确保阻值低于规定阈值（一般 $\leq 50\mu\Omega$ ）；绝缘耐压试验需施加额定电压1.5倍的高压，持续1min无击穿现象；X射线检测用于排查压接部位内部缺陷，如虚接、裂纹等隐性问题。

### 1.2 关键工艺参数

(1) 紧固力矩范围与材料蠕变效应：需根据螺栓材质（如不锈钢、钛合金）确定力矩范围，例如M8不锈钢

螺栓力矩通常为 $20\text{-}25\text{N}\cdot\text{m}$ ；同时需考虑长期使用中材料蠕变导致的力矩衰减，定期进行力矩复检。(2) 压接高度与截面积压缩率对导电性能的影响：压接高度需控制在设计公差 $\pm 0.05\text{mm}$ 内，截面积压缩率一般为 $15\%\text{-}20\%$ ，压缩率过低易导致接触不良，过高则可能损伤导体，两者均需通过拉力测试与电阻测试验证。(3) 安装环境颗粒物污染对绝缘性能的威胁：直径 $> 5\mu\text{m}$ 的颗粒物若附着于绝缘件表面，易引发爬电现象，导致绝缘电阻下降，因此需通过粒子计数器实时监测环境，确保颗粒物浓度符合标准要求<sup>[1]</sup>。

## 2 高压连接器安装工艺对系统可靠性的影响机制

### 2.1 接触可靠性

(1) 紧固力矩不足/过量导致的接触面微观变形与氧化加速：当紧固力矩不足时，连接器接触面无法形成有效压力，金属表面微观凸起仅局部接触，导致实际导电面积减小，接触电阻显著升高，通电时产生大量焦耳热；同时，接触面间隙增大，空气中的氧气与水汽易侵入，加速金属氧化，形成绝缘氧化层进一步恶化接触性能。若力矩过量，会造成接触面金属过度塑性变形，破坏表面镀层（如镀银、镀金层），暴露基材引发更严重的氧化腐蚀，且可能导致螺栓螺纹损伤，为后续维护与更换埋下隐患。(2) 振动环境下动态力矩衰减对长期稳定性的影响：车辆、风电等应用场景中，持续振动会导致安装螺栓出现动态力矩衰减。若安装时未采用防松工艺（如涂抹螺纹胶、使用防松垫圈），或力矩校准精度不足，振动会使螺栓逐渐松动，接触面压力持续下降，接触电阻周期性波动。长期运行下，这种波动会引发接触面温度交替变化，加速材料疲劳，最终导致接触失效，引发系统断电或局部过热起火风险。

### 2.2 绝缘可靠性

(1) 安装间隙控制与电场均匀性(如爬电距离、空气间隙): 安装时若间隙控制不当, 会破坏电场分布的均匀性。当爬电距离(沿绝缘表面的最短距离)小于设计值时, 高压下易发生沿面放电; 空气间隙(绝缘件间的最短空气距离)不足则可能引发空气击穿, 导致绝缘失效。例如, 若安装时绝缘衬套错位, 使爬电距离缩短至标准值的80%以下, 系统在额定电压运行时, 局部电场强度会骤升30%以上, 大幅增加绝缘击穿概率。(2) 表面污染对局部放电的触发作用: 安装环境若未严格控制清洁度, 粉尘、油污等污染物附着于绝缘件表面, 会形成导电通道。在高压电场作用下, 污染物会触发局部放电, 放电产生的臭氧、氮氧化物会腐蚀绝缘材料, 导致绝缘性能持续下降。长期累积下, 局部放电会发展为贯穿性放电, 引发系统短路故障<sup>[2]</sup>。

### 2.3 机械可靠性

(1) 对中偏差引起的应力集中与疲劳断裂风险: 安装时若连接器芯体对中偏差超过允许范围, 插合后会产生径向应力集中, 应力集中部位的材料会因长期受力而出现疲劳损伤。在振动、冲击等工况下, 应力集中处易产生裂纹, 裂纹扩展后会导致芯体断裂, 造成电力传输中断; 同时, 对中偏差还会加剧壳体与芯体的摩擦, 缩短连接器使用寿命。(2) 温度循环下材料热膨胀系数失配导致的微动磨损: 安装时若未考虑不同材料(如金属壳体、陶瓷绝缘件)的热膨胀系数差异, 在温度循环(如-40℃~125℃)工况下, 材料膨胀与收缩量不同步, 会引发微动摩擦。微动磨损会产生金属碎屑, 这些碎屑若堆积于接触部位, 会加剧接触不良; 同时, 磨损会破坏表面防护层, 使基材暴露, 增加腐蚀风险, 进一步降低机械结构稳定性。

### 2.4 环境适应性

(1) 盐雾环境下的腐蚀速率与防护工艺有效性: 在海洋、沿海等盐雾环境中, 若安装时密封圈压缩量不足、涂层喷涂不均, 盐雾会通过缝隙侵入连接器内部, 与金属部件发生电化学反应, 加速腐蚀。数据显示, 当密封圈压缩量低于设计值的70%时, 腐蚀速率会提升2-3倍, 短期内导致接触电阻升高, 长期则会造成壳体穿孔、芯体断裂, 彻底破坏连接器功能。(2) 高海拔低压条件下的绝缘强度衰减: 高海拔地区气压降低, 空气绝缘强度随海拔升高而线性衰减(海拔每升高1000m, 绝缘强度下降约10%)。若安装时未针对高海拔环境优化绝缘设计(如增加空气间隙、采用耐低压绝缘材料), 或绝缘件安装存在气泡、缝隙, 会进一步加剧绝缘强度衰减。在额定电压运行时, 易发生空气击穿, 引发系统故

障, 严重时会造成设备烧毁<sup>[3]</sup>。

## 3 高压连接器安装工艺对系统可靠性影响的研究方法与实验设计

### 3.1 实验平台搭建

(1) 测试样品: 选取两类典型高压连接器作为测试对象—插拔式连接器(适用于新能源汽车快充场景)与螺钉式连接器(常用于风电变流器), 每种样品各制备30组, 确保样本量满足统计分析需求; 所有样品需符合行业标准(如IEC61984), 且初始性能参数一致, 避免样品差异干扰实验结果。(2) 变量控制: 重点控制三类关键工艺变量: ①力矩梯度, 设置50%、80%、100%、120%、150%额定力矩共5个梯度, 模拟力矩不足与过量工况; ②压接高度偏差, 按 $\pm 0.02\text{mm}$ 、 $\pm 0.05\text{mm}$ 、 $\pm 0.08\text{mm}$ 设置偏差等级, 覆盖实际安装常见误差范围; ③污染等级, 参照ISO8573-1, 通过人工喷涂粉尘(粒径 $5\text{-}10\mu\text{m}$ )与油污, 构建清洁(0级)、轻度污染(1级)、中度污染(2级)、重度污染(3级)4个环境等级, 模拟不同安装清洁度条件。

### 3.2 可靠性测试项目

(1) 电气性能: ①接触电阻动态监测, 采用微欧表(精度 $0.1\mu\Omega$ ), 在测试周期内每2小时采集1次数据, 记录不同工艺变量下接触电阻的变化趋势; ②介电强度试验, 按照GB/T16935.1, 施加1.2倍额定电压, 持续1min, 记录绝缘击穿情况, 评估工艺缺陷对绝缘性能的影响。

(2) 机械性能: ①振动台疲劳测试, 依据IEC60068-2-6, 设定正弦振动(频率 $10\text{-}2000\text{Hz}$ , 加速度 $10\text{g}$ ), 持续振动1000h, 监测连接器是否出现结构松动、芯体断裂; ②拉脱力试验, 采用拉力试验机, 以 $5\text{mm/min}$ 的速度施加轴向拉力, 记录不同工艺变量下连接器的拉脱力峰值, 评估机械连接强度。(3) 环境适应性: ①盐雾试验, 参照GB/T2423.17, 设置5%氯化钠溶液, 温度 $35^\circ\text{C}$ , 持续喷雾1000h, 每200h拆解样品观察腐蚀情况, 测量接触电阻变化; ②温湿度循环试验, 按 $-40^\circ\text{C}$ (低温保持2h) $\rightarrow 25^\circ\text{C}$ (常温保持1h) $\rightarrow 125^\circ\text{C}$ (高温保持2h) $\rightarrow 25^\circ\text{C}$ (常温保持1h)为1个循环, 共进行500个循环, 监测样品机械结构与电气性能的衰减规律<sup>[4]</sup>。

### 3.3 数据分析方法

(1) 失效模式与效应分析(FMEA): 组建跨领域团队(工艺、测试、可靠性工程师), 梳理所有可能的失效模式(如接触电阻超标、绝缘击穿、结构断裂), 通过风险优先数( $\text{RPN} = \text{严重度} \times \text{发生概率} \times \text{探测度}$ )评估不同工艺缺陷的风险等级, 确定需重点关注的工艺环节(如力矩控制、清洁度管理)。(2) 加速寿命试验

(ALT)与Weibull分布拟合:基于高温、高振动等加速应力条件下的测试数据,采用Arrhenius模型推算正常工况下的寿命;通过Weibull分布拟合寿命数据,得到特征寿命与形状参数,对比不同工艺变量下的寿命差异,量化工艺优化对寿命的提升效果。(3)多因素方差分析(ANOVA):以接触电阻、拉脱力、寿命等为因变量,以力矩、压接高度、污染等级为自变量,通过ANOVA分析各变量及其交互作用对可靠性指标的影响显著性(显著性水平设为0.05),识别对可靠性影响最大的关键工艺参数,为工艺标准制定提供依据。

#### 4 高压连接器安装工艺对系统可靠性影响的优化策略与标准建议

##### 4.1 工艺参数标准化

(1)紧固力矩容差范围与复检周期:根据连接器规格与螺栓材质制定分级标准,如M6-M10不锈钢螺栓,力矩容差控制在额定值 $\pm 5\%$ 内(例:额定 $20\text{N}\cdot\text{m}$ 时,允许 $19\text{--}21\text{N}\cdot\text{m}$ );复检周期需结合应用场景设定,振动频繁的车载场景每6个月复检1次,静态工业场景每年复检1次,确保力矩衰减在安全范围内。(2)压接工艺窗口(如压缩率控制阈值):依据导体材质与截面积确定压缩率区间,铜导体压接压缩率标准为 $18\%\text{--}22\%$ ,铝导体为 $15\%\text{--}19\%$ ;同步明确压接高度偏差不得超过 $\pm 0.03\text{mm}$ ,压接后需通过拉力测试(如最小拉脱力 $\geq 500\text{N}$ )验证工艺有效性,未达标产品需重新压接并记录追溯。

##### 4.2 智能化安装技术应用

(1)力矩-角度监控系统的实时反馈机制:采用带扭矩传感器与角度编码器的智能扳手,安装时实时采集力矩与螺栓旋转角度数据,当力矩超出容差范围或角度异常(如卡滞导致角度突变)时,系统立即触发声光报警并锁定操作,同时自动记录数据至云端,形成可追溯的安装档案,避免人为操作失误。(2)机器视觉在装配对中精度检测中的应用:在安装工位部署高清工业相机与AI识别算法,对连接器芯体插合过程进行动态拍摄,通过图像比对分析对中偏差,当偏差超过 $0.1\text{mm}$ 时自动提示

调整,检测精度达 $\pm 0.02\text{mm}$ ,确保插合对中符合标准,降低应力集中风险。

##### 4.3 环境适应性改进

(1)密封结构设计优化(如IP68防护等级):统一采用IP68及以上防护标准,密封结构采用“双密封圈+密封胶”组合设计,密封圈选用耐老化硅橡胶(硬度 $50\text{--}60\text{ShoreA}$ ),压缩量控制在 $30\%\text{--}40\%$ ;壳体接口处涂抹厌氧型密封胶,固化后形成防水防尘屏障,适应潮湿、多尘等恶劣环境。(2)抗腐蚀涂层材料选择与工艺规范:优先选用纳米陶瓷涂层(如 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ 复合涂层)或镀锌镍合金涂层,涂层厚度标准为 $8\text{--}12\mu\text{m}$ ,盐雾试验中需满足 $1000\text{h}$ 无明显腐蚀;涂层工艺需符合ASTMB117标准,喷涂前基材表面除锈等级达Sa2.5级,确保涂层附着力(划格试验 $\geq 5\text{B}$ 级),提升连接器在盐雾环境中的使用寿命。

##### 结束语

高压连接器安装工艺是保障系统可靠性的核心环节,其精度直接决定电力传输的稳定性与安全性。本文通过系统研究证实,机械安装的力矩控制、环境洁净度管理以及智能化检测技术的应用,可显著降低接触失效、绝缘击穿等风险。未来需进一步结合数字孪生技术实现安装过程全生命周期监控,同时推动行业标准化建设,以工艺优化驱动高压连接器向更高可靠性、更强环境适应性方向发展,为关键领域装备安全运行提供坚实保障。

##### 参考文献

- [1]梁栋林,马国芳.新能源汽车高压连接器可靠性研究[J].安防科技,2020,(03):31-32.
- [2]宁振国.接触件在新能源汽车高压连接器上的研究与应用[J].科学大众:科技创新,2020,(11):102-103.
- [3]王斌,李航.新能源汽车关键电子部件的可靠性工程研究[J].电子元器件与信息技术,2021,(14):129-130.
- [4]刘昕伟,周美玲,陈剑美.新能源汽车高压连接器可靠性研究[J].时代汽车,2021,(06):93-94.