输电线路耐张线夹常见缺陷成因及防控措施研究

张鹏扬 张园梦
中国电建集团河南电力器材有限公司，河南 漯河 462300

[摘要]耐张线夹既担负着导线张力锚固的任务，又担负着工作电流传导的任务，它的压接属于隐蔽工程，缺陷在安装阶段就埋入了，但是运行几年后才以发热、断股或者断裂的形式表现出来。文中从施工压接、材料环境、结构力学和运维条件四个方面分析缺陷产生的原因，整理出压接偏差、腐蚀侵入、接触电阻增大、温升加快、疲劳断裂等耦合演化过程，对无人机数字射线、红外热成像的适用条件以及防控措施的分阶段配置进行讨论。从分析结果可知，施工阶段工艺失控是失效链的触发因素，耐张线夹发热缺陷占线路总缺陷的19%，81.5%是由于施工安装工艺不规范造成的，防控资源应该首先配置到压接过程拦截上，设计选型决定裕度基础，检测和治理承担兜底功能。

[关键词]耐张线夹；压接缺陷；接触电阻；疲劳断裂；全寿命周期防控
DOI：10.33142/hst.v9i9.20643 中图分类号：TM726.3 文献标识码：A

Research on the Causes and Prevention Measures of Common Defects in Tension Clamps of Transmission Lines

ZHANG Pengyang, ZHANG Yuanmeng
PowerChina He'nan Electric Power Equipment Co., Ltd., Luohe, He'nan, 462300, China

Abstract: The tension clamp is responsible for both anchoring the tension of the wire and conducting the working current. Its crimping belongs to concealed engineering, and defects are buried during the installation stage. However, it only manifests in the form of heating, broken strands or fractures after several years of operation. The article analyzes the causes of defects from four aspects: construction crimping, material environment, structural mechanics, and operation and maintenance conditions. It summarizes the coupling evolution process of crimping deviation, corrosion invasion, increased contact resistance, accelerated temperature rise, fatigue fracture, etc. It discusses the applicable conditions of unmanned aerial vehicle digital radiation and infrared thermal imaging, as well as the phased configuration of prevention and control measures. From the analysis results, it can be seen that the out of control process during the construction phase is the triggering factor of the failure chain. The heating defects of tension clamps account for 19% of the total defects of the line, and 81.5% are caused by non-standard construction and installation processes. The prevention and control resources should first be allocated to the interception of the crimping process, and the design and selection should determine the margin foundation, while detection and treatment should assume the role of a safety net.

Keywords: tension clamp; crimping defects; contact resistance; fatigue fracture; whole life cycle prevention and control

引言

耐张线夹是输电线路中把导线或者避雷线锚固在耐张绝缘子串上的关键金具，它要承受线路的全部张力和工作电流。压缩型耐张线夹属于隐蔽工程，安装完毕后内部状态不能通过外观直接判断，缺陷在投运前很难被拦截，只能在运行应力和腐蚀环境的长期作用下慢慢暴露出来。已有研究对于压接工艺、腐蚀机理、疲劳断裂以及检测技术的论述已经比较全面，但是大多集中在单一的失效模式或者单一的手段上，耐张线夹的机械性能、电气性能分析主要集中在单一的失效机理分析上，很少涉及多物理场下的特征分析，对施工偏差怎样在运行过程中逐级放大缺少贯通性的解释。本文采用“性能要求、成因分析、防控措施”三部分结构，从性能角度出发论述了影响其运行性能的因素，分析了造成这些因素影响的原因，在防控方面从全寿命周期角度出发，对各种防护措施的优先顺序和衔接关系进行了阐述。

1 输电线路耐张线夹的性能要求

耐张线夹的约束条件是由机械承载和电气传导共同

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

组成的，两者之间通过压接界面的接触状态相互耦合，不是两个独立的指标集合。机械方面的主要问题是握力，钢芯铝绞线用耐张线夹，握力不应小于导线额定拉断力的95%，试验加载速度控制在 20mm/min 到 50mm/min 之间，保持 2min 无滑移现象，试验后金具无明显变形、损坏。握力裕度决定线夹在覆冰、舞动或者大档距工况下抵抗钢芯从钢锚中抽出的能力，如果握力裕度不够就会把额外的载荷转移到钢芯传力路径上。电气上接续处电阻不应大于同样长度导线的电阻，接续处温升不应大于被接续导线的温升，在额定电流 1.1 倍下经过 125 次热循环后电阻变化率不应大于 5%。这并不是指初始电阻的瞬间合格，而是指接触界面在长期通流和温度循环中是否稳定。机械和电气两条约束的交点就是压接质量，压接形成的金属间接触既是握力的物理来源，又是导电通路的承载者，任何削弱接触完整性的工艺偏差都会同时破坏机械裕度和电气裕度。理解该种约束结构，就是找出各种缺陷原因的前提。

2 输电线路耐张线夹缺陷成因分析

2.1 施工与压接工艺因素

压接缺陷在安装阶段就已产生，但是运行阶段才会逐渐暴露出来，其危害的滞后性就是防控困难的根本原因。漏压和欠压都是工艺偏差，但是它们对承载力的破坏途径不一样。凹槽处漏压是钢锚和铝管压接处握力的主要影响因素，漏压越多，凹槽处剪切力越低，该压接区的承载能力降低，部分握力由钢芯钢锚承担，容易造成钢芯断裂或者钢锚脱出两种断裂失效。穿管长度不够会从接触面积上同时降低剪切力和摩擦力，钢锚钢芯压接区域的握力随着穿管长度的减小而减小，穿管长度是导致钢锚拉脱断裂失效的一个因素，失效形式由铝股滑移变为钢芯从钢锚中抽出。氧化膜清理不彻底和电力脂涂覆缺失会在铝-铝接触面上留下高电阻区，给温升异常提供最初的条件。这些缺陷的共同点就是隐蔽性，在安装完毕之后内部的状态不能通过外观来判断，压接质量的失控在投运之前没有有效的拦截手段，因此成为腐蚀和疲劳过程的共同起点。

2.2 材料与环境因素

腐蚀失效的起始点并不在腐蚀本身，而是在压接过程中已经存在的界面损伤。铝管和钢芯处在不同的电位上，铝是阳极，在电解液中优先溶解，压接区的空隙以及铝股的损伤给介质入侵留了门路。该类线夹在压接时就存在铝线断股的情况，服役期间使酸性雨水更容易渗透到压接管内部，腐蚀生成腐蚀产物，使耐张线夹电阻增大；随着腐蚀的进行，线夹电阻越来越大，温度也越来越高；当温度超过临界温度时，热平衡状态被打破，最终线夹过热，导致高温烧损失效。腐蚀产物的疏松结构会减小有效导电面积，给水分和氧的不断进入留有通道，从而造成电阻和温升互相促进[1]。引流板连接处容易出现发热现象，主要是由于引流板连接处的耐张线夹紧固螺栓松动，电气接触面接触不良，实际接触面积大大减小，造成接触电阻迅速增大。从统计结果可知，耐张线夹螺栓松动是造成其发热的主要原因，螺栓预紧力的衰减和接触面氧化一起促使局部热点向结构性损伤发展。

2.3 结构与力学因素

断裂类缺陷的力学原因就是线夹根部刚度突然变化造成的应力集中和交变载荷的相互作用。耐张线夹根部受约束，受到较大的应力时，耐张线夹的转角部位产生应力集中，裂纹在风力引起的交变应力作用下扩展而产生疲劳断裂。钢芯传力路径上的风险更隐蔽，钢芯在钢锚出口处、钢锚最后一模压接处和凹槽阶梯处都存在应力集中，钢芯传力路径上有三个可能发生断裂的危险截面，危险截面的破坏载荷与强度极限和截面积呈正相关，与应力集中水平呈反相关。当压接质量不够造成铝管分担的张力比例降低的时候，钢芯路径上的载荷就会增加，从而加大断裂的可能性。大档距、高落差区段的附加弯矩和振动能量超过设计假定，把本来处在裕度之内的应力集中变成了裂纹萌生点。跳跃式压接顺序也会在钢芯内部产生初始应力集中，在线路运行时由于受到风载、覆冰等外力的作用而使内部钢芯出现断裂，把施工阶段的工艺偏差直接转化成运行阶段的断裂隐患。

2.4 运行与运维因素

运维因素不会直接造成缺陷，但是决定隐性缺陷是否能在失效链贯通之前被拦截。引流板螺栓松动属于发展性问题，在风振和热循环的共同影响下，预紧力会逐渐衰减，接触电阻增大，温升加快，从而产生正反馈。红外测温条件控制非常重要，检测应在负荷率 30%及以上、无风或者微风（风速≤3m/s）、夜间或者阴天进行，相间温差大于 15℃或者同一金具不同部位温差大于 10℃时，应判断为严重发热缺陷。但是施工期埋入的压接缺陷在投运初期还没有发展到可以被常规红外巡检稳定识别的程度，检测周期和缺陷发展速度之间的时间窗口不匹配，容易造成早期漏判[2]。老旧线夹超期服役是由于材料老化、历史工艺缺陷等原因导致的，使得运维决策从原来是否处理转变为能否安全运行到下次检修。

2.5 多因素耦合作用路径

把四个维度放在同一个失效过程中，可以得到一条具有代表性的一条耦合路径，即施工阶段漏压、穿管不足或

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

者氧化膜清理不彻底，造成压接界面局部空隙和高电阻区；运行时水分沿空隙渗透进去，电偶腐蚀不断发生，腐蚀产物加大了接触电阻；电阻增大引起局部温升，温升加快了腐蚀动力学进程，同时降低了铝材的力学性能；微风振动在已经因为压接不良而应力分布异常的地方推动裂纹产生和发展。压接缺陷、腐蚀、温升、疲劳断裂这四个都是触发条件，腐蚀是放大器，温升是加速器，疲劳断裂是终点。耦合分析的价值就在于揭示出单点防控的效果界限，单点防控只能解决发热问题而不能追溯压接质量，腐蚀通道依然存在，单点防控提高检测频率，但是没有改善施工过程控制，新的缺陷在相同的工艺环节上不断产生。

3 输电线路耐张线夹缺陷防控措施

3.1 设计选型阶段的源头防控

设计选型属于干预成本最低、杠杆效应最强的环节，主要原则就是使线夹的机械和电气性能与具体的工况载荷谱以及腐蚀等级相匹配。腐蚀性较强的地段，应先选择铝管和钢芯界面密封性更好的结构或者附加防护措施，从设计上减少介质进入空腔的途径；大档距、高落差和风口区段，应对疲劳裕度做专门校核，不能沿用常规档距的选型参数。选型文件要确定压接工艺的重要参数、检测节点以及验收标准，给施工和运维赋予可追溯的控制接口。设计阶段还要留出检测可达性，保证后续无人机数字射线或者红外检测有可操作的空间，防止防控链条中检测环节因为可达性不足而失效。

3.2 压接施工过程的工艺控制

施工阶段是阻断失效链最有效的地方，这时的缺陷还没有和运行应力、腐蚀环境产生耦合，干预的收益最大。工艺控制的关键是把控制对象从结果合格前移到过程受控上，即压接顺序、凹槽充填度、保压参数、模具选配、穿管深度、氧化层清理程度、电力脂涂覆状态等每一个环节都应该有可以记录、可以复核的量化标准。凹槽欠压数≤2 个，钢芯、钢管未压接长度＜60%，铝管、导线未压接长度＜60%，钢管、铝管弯曲度≤2%，这些量化的判据给压接过程的质量拦截赋予了清楚的阈值参照。从管理角度来说，压接人员资质及操作记录的可追溯性属于防控能力的一个方面，只有当过程参数记录和检测结果可以相互对照的时候，才能判定某一个缺陷是偶然的操作偏差还是工艺条件的系统性偏差，从而将质量控制由“事后发现”变为“过程拦截”。

3.3 运维阶段的检测与状态管控

运维检测的主要矛盾就是检出能力和作业可行性之间的矛盾。常规的外观检查对内部压接缺陷没有太大的帮助，人工登塔的数字射线检测虽然可以直观地看到压接的状态，但是存在高坠的风险以及效率低下的问题。采用无人机作业方式，在 15min 内可以对一座基塔进行检测作业，比人工作业安全、高效。数字射线可以用于内部压接质量的识别，钢锚和铝管压接要保持共轴线，缺齿率不能大于 2%，没有明显的压伤、脱空。两者检测对象不一样[3]，不能互相替代。对已经检测出缺陷的线夹，状态管控要根据缺陷等级采取不同的复检周期，内部压接缺陷主要依靠数字射线复查压接状态变化，发热缺陷主要依靠红外跟踪温升趋势，防止出现早期漏判或者过度检测的情况。检测数据还要反馈到施工工艺和选型环节，把运维发现变成上游改进的信息来源。

3.4 缺陷治理与修复技术

治理措施的选择要根据缺陷的力学和电气实质来定，不能只看表面现象。发热如果是由螺栓松动造成的接触压力降低引起的，复紧和接触面处理就可以达到目的；如果是由于压接区内部腐蚀或者接触电阻结构上的变化所引起的，那么表面处理只能起到暂时的缓解作用。引流板发热初期依靠记忆合金垫片形状的变化来紧固连接、增大接触面积来减小接触电阻，从而降低引流板的发热和故障率，其机理是温度触发后的自响应，把治理动作从人工发现后处置变成材料层面的自动响应，在发热早期形成自抑制。压接缺陷和断裂隐患的修复更加刚性，漏压或者穿管不足达到影响握力的程度时，补压或者开断重压是恢复承载能力的必要手段；钢芯路径已经出现损伤迹象的时候，更换线夹比局部修复更能消除危险截面[4]。治理方案要依照缺陷的力学实质来制订，不能只看温度是否“看起来正常”，而应从材料的力学性能出发。

3.5 防控措施的系统集成与优先级

将各个环节的措施放在全寿命周期的框架里，要回答的主要问题是，在资源有限的情况下，先将措施配置到哪里。从失效链的干预效率来看，压接施工阶段工艺控制的优先级最高，因为它是直接阻止缺陷产生的环节，而其他环节的干预成本远远小于运行阶段的事后治理；设计选型次之，它决定了后面环节的难易程度和裕度空间；检测和治理是缺陷产生之后的补救措施，其作用在于防止隐性的缺陷发展成显性的失效，但是不能代替源头控制。表 1 用缺陷类型作为行、防控阶段作为列来表示措施配置和优先级的矩阵形式。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

表 1 耐张线夹缺陷类型—防控阶段—措施优先级矩阵

缺陷类型	设计选型	压接施工	运维检测	治理修复	优先级判断
压接质量缺陷	明确工艺要求与验收判据	穿管深度、压接顺序与凹槽充填度过程记录	无人机数字射线抽检	补压或开断重压	施工控制为最高
过热类缺陷	接触面材质与结构匹配	氧化层清理与电力脂涂覆	红外相对温差跟踪	复紧或 TiNi 垫片	施工预防为主，治理为辅
腐蚀类缺陷	腐蚀等级匹配选型与密封设计	穿管到位与界面防护	数字射线与红外联合筛查	更换或防护处理	设计与施工并重
断裂类缺陷	疲劳裕度专项校核	避免钢芯初始损伤与应力集中	数字射线检出内部缺陷	更换线夹或补强	设计裕度与施工质量共同决定

该矩阵把全面加强转化为按缺陷类型配置防控重心，压接缺陷重心在施工端，腐蚀缺陷要设计和施工两端共同发力，断裂风险由设计裕度和施工质量的乘积效应决定。如果防控资源没有前面的优先级结构，即使各个环节都有投入，但是失效链仍然会在最弱的地方贯穿下去。

4 结语

耐张线夹的缺陷本质就是施工阶段形成的隐性偏差，在运行应力、腐蚀环境的作用下，沿着压接、腐蚀、温升、疲劳这条路径慢慢放大的过程。压接工艺缺陷会引发后续的腐蚀加快、断裂等风险，二者之间存在着明确的因果联系，因此单点防控的效用范围是有限的。全寿命周期防控的优先级指向是清楚的，施工过程控制在第一位，设计选型决定裕度基础，检测和治理起兜底作用。在无人机数字射线和红外巡检越来越普遍的环境下，怎样把检测数据反馈到施工工艺改善和选型改良当中，从而达成闭环而不是单向的“发现-处理”，乃是提高耐张线夹运行可靠性的关键问题。

[参考文献]

[1]翟洋洋.输电线路耐张线夹优化设计研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(8):26-28.

[2]滕玉林,吕岩婷,李军,等.基于磁记忆的耐张线夹钢芯断裂检测技术[J].电气技术,2024,25(9):51-55.

[3]敬兴东,廖然,黄拥,等.输电线路耐张线夹发热状态检测方法[J].大众用电,2024,39(1):59-60.

[4]骆国防,章学兵,赖江波.220kV 输电线路耐张线夹缺陷分析[J].电力与能源,2022,43(2):132-134.

作者简介：张鹏扬（1999—），男，河南漯河人，助理工程师，许昌学院机械设计制造及其自动化专业毕业，现就职于中国电建集团河南电力器材有限公司，从事电力金具制造工作。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.