

超高压输电线路X光探伤下钢芯铝绞线压接质量与钢芯受损关系研究

杨 帅 龚晓松 孟 祥 刘宇洋 雷云春

中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650000

摘 要：本文聚焦特高压输电线路中钢芯铝绞线及地线压接质量与钢芯受损的关系，通过X光探伤技术分析压接工艺缺陷对钢芯的影响。研究揭示了欠压、漏压、多压及应力集中等典型缺陷与钢芯断裂的关联机制，并提出基于数字孪生的压接工艺优化方案。研究成果为提升特高压线路运行安全性提供了理论依据和技术支撑。

关键词：超高压输电线路；钢芯铝绞线；X光探伤；压接质量；钢芯受损

引言

超高压输电线路关乎电网稳定，钢芯铝绞线用耐张线夹和接续管连接，其压接质量影响线路性能。但现场压接存在工艺偏差，或致钢芯微观损伤引发断裂，2020-2024年全国特高压线路因压接缺陷断线事故占37%，钢芯断裂占62%。传统检测难发现钢芯隐性损伤，X光探伤技术穿透性强、分辨率高，可实现压接区域内部可视化检测，本文通过分析X光图像缺陷特征并结合磁记忆检测，探讨压接质量与钢芯受损关联，为优化工艺提供依据。

1 X光探伤技术原理及在压接检测中的应用

1.1 X光探伤技术原理

X光探伤技术作为一种高效的无损检测手段，其核心原理基于射线与物质相互作用时产生的衰减差异。当X射线穿透钢芯铝绞线压接区域时，不同材质的部件对射线的吸收程度各不相同。钢芯铝绞线主要由铝管、钢锚与钢芯构成，其中铝的密度为 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ ，钢的密度为 $7.85\text{g}/\text{cm}^3$ ，这种显著的密度差异使得X射线在穿通过程中产生不同程度的衰减。通过成像装置，如高精度的数字探测器或传统的胶片，能够记录下压接区域内部结构的密度分布情况，进而形成清晰的图像。在图像中，不同密度的部件会呈现出不同的灰度层次，从而可以直观地观察到压接界面的压实程度、空隙分布以及钢芯的形变等关键信息，为准确评估压接质量提供了可靠的依据^[1]。

1.2 检测系统与工艺参数

在实际现场检测超高压输电线路钢芯铝绞线压接时，常用便携式定向X射线机搭配成像系统，除DR成像外，还有CR成像及传统胶片成像技术。目前，DR成像系统因成像快、质量高、可实时处理存储图像等优势而广泛应用。便携式定向X射线机具有管电压可调范围为160-320kV，管电流在2-5mA之间，这种灵活的参数设置

能够根据不同的检测对象和要求进行调整，以确保获得最佳的检测效果。DR成像系统则具备高分辨率的成像能力，能够清晰地呈现压接区域的细节。在检测过程中，焦距的设置至关重要，一般将其设置为600-800mm，这样可以满足图像分辨率的要求，使图像中的细节能够清晰可辨。透照布置遵循“射线源中心垂直入射”的原则，确保X射线能够均匀地穿透压接区域，减少因入射角度不当而产生的图像失真。成像板紧贴线夹表面放置，这一操作可以有效减少几何模糊，提高图像的清晰度。曝光量的控制是影响图像质量的关键因素之一，通过管电流与时间的协同控制来实现。在实际操作中，需要确保图像黑度(D)在2.0-2.5范围内，对比度敏感度(CS) $\geq 1.5\%$ 。合适的图像黑度能够保证图像具有足够的对比度，使不同密度的部件在图像中清晰区分；而较高的对比度敏感度则有助于检测出微小的缺陷，提高检测的准确性。

1.3 典型缺陷图像特征

X光检测凭借其高分辨率和清晰的成像效果，能够准确识别出钢芯铝绞线压接过程中出现的三类关键缺陷：

1.3.1 钢锚压接区(A区)缺陷

钢锚压接区是压接过程中的关键部位，常见的缺陷包括凹凸槽欠压、漏压、多压以及钢锚根部受压等：

凹凸槽欠压、漏压、多压：表现为凹槽部位的压实程度不足、凹凸槽压接长度未全部覆盖、压接到不压区，在X光图像中可以看到凹槽内存在明显的空隙、未压接到位及压接到不压区等，这会导致钢锚与铝管之间的接触面积减少、钢芯受拉等，降低连接的可靠性。

钢锚根部受压：由于不恰当的压接顺序或压接预偏不够导致钢锚根部受铝管压力作用，可能会导致凹凸槽部位的断裂或钢锚强度降低，严重影响钢锚的机械性能。

1.3.2 铝管不压区（B区）缺陷

铝管不压区的缺陷主要包括导线钢芯未插入钢锚底部、钢锚管毛刺、异物以及多压等。导线钢芯未插入钢锚底部在X光图像中可以清晰地看到钢芯端部与钢锚底部之间存在间隙，这会导致钢芯无法充分发挥其承载作用，影响整个压接结构的强度。钢锚管毛刺是由于压接前未去除氧化层等原因造成的，在图像中表现为钢锚管表面存在不规则的凸起，这些毛刺可能会损伤钢芯，降低连接的可靠性。多压则会在非受压区域形成压痕，改变铝管的结构，同时对增加钢芯的内部拉力，影响其电气和机械性能。

1.3.3 导线受压区（C区）缺陷

导线受压区的缺陷有铝股切割不齐、钢芯灯笼股、漏压以及钢芯断裂等。铝股切割不齐在X光图像中表现为铝股端部参差不齐，这会影响铝股与铝管之间的接触紧密性，导致接触电阻增大，产生局部过热等问题。钢芯灯笼股是由于压接力超载导致钢芯鼓肚，在图像中可以看到钢芯中部出现明显的膨胀变形，这种变形会使钢芯内部的应力分布不均匀，降低钢芯的强度。钢芯断裂则是最严重的缺陷，在图像中会呈现出钢芯的断裂线，一旦发生钢芯断裂，将直接导致导线连接失效，引发严重的安全事故。

2 压接质量缺陷对钢芯受损的影响机制

2.1 欠压（及漏压）缺陷与钢芯疲劳断裂

欠压是压接过程中常见的缺陷之一，它会导致钢锚凹槽与铝管之间的接触面积大幅减少。根据应力集中理论，接触面积的减少会使应力集中系数（ K_t ）显著升高。以 800mm^2 钢芯铝绞线为例，当欠压达到20%时，钢芯表面的最大应力可高达 320MPa ，而钢芯的屈服强度通常为 295MPa ，此时钢芯表面的应力已经超过了其屈服强度，从而引发微裂纹的萌生。在特高压输电线路的运行过程中，导线会受到风偏、覆冰等多种因素的影响而产生交变载荷，导线的振动频率一般在 $0.5\text{--}2\text{Hz}$ 之间。在这种交变载荷的反复作用下，微裂纹会不断扩展，裂纹扩展速率可达 $0.8 \times 10^{-6}\text{mm/cycle}$ 。经过 10^7 次循环后，微裂纹会逐渐发展成宏观裂纹，最终导致钢芯断裂，严重影响电网的安全运行^[3]。

2.2 漏压、多压与钢芯剪切破坏

在大截面导线的压接作业中，倒压顺序（从导线端向钢锚端压接）若控制不当，极易引发一系列问题。实际操作时，若铝管伸长量补偿不足，钢锚拉环根部会与铝管端部顶死。这一状况会改变导线的正常受力模式，使得原本均匀的受力分布被打破，进而在钢芯与铝管的

接触区域产生复杂的应力集中现象。在电网运行过程中，导线会受到风偏载荷的影响。在风偏载荷作用下，导线会产生横向位移，一般可达 0.3m 。这种横向位移会使钢芯持续承受反复的剪切力。在长期的反复剪切作用下，钢芯内部的微结构逐渐发生变化，微裂纹开始萌生并不断扩展，产生疲劳损伤。随着损伤的不断累积，钢芯的承载能力持续下降，最终会引发钢芯断裂，给电网的安全稳定运行带来巨大隐患。

2.3 应力集中与钢芯脆性断裂

压接模具的磨损或者压接顺序的错误会导致铝管压痕分布不均匀，在压接区域形成局部应力集中区。磁记忆检测技术是一种能够检测金属部件应力状态的无损检测方法，通过检测漏磁场强度（ H_p ）来反映应力集中程度。检测结果显示，应力集中区的漏磁场强度可达 120A/m ，而正常区域的漏磁场强度小于 30A/m ，两者之间存在显著差异，且漏磁场强度过零点位置与钢芯断裂位置高度吻合。为了进一步研究钢芯断裂的机制，采用断口扫描电镜（SEM）对断裂的钢芯进行分析。SEM图像显示，断裂源区存在解理台阶和河流花样，这些特征是脆性断裂的典型标志。这表明在应力集中区，钢芯在较高的应力作用下发生了脆性断裂，而不是塑性断裂，这种断裂方式往往具有突发性，难以提前预测，对电网安全构成严重威胁^[1]。

3 基于X光检测的钢芯受损评估方法

3.1 缺陷分级标准

为了对钢芯铝绞线压接缺陷进行科学合理的评估和处理，依据T/CEC526-2021《架空输电线路线夹X射线检测技术导则》，制定了详细的压接缺陷分级准则：

3.1.1 III级缺陷（需立即处理）

钢芯断裂：X光图像显示钢芯完全断开，导致导电和力学性能丧失。

锚管裂纹：锚管本体存在穿透性裂纹，可能引发断裂风险。

钢锚凹凸槽未压实超过50%：凹槽区域压接面积缺失超过一半，导致握力不足。

钢锚管和芯线未压接部分超过30%、腔体空隙超过30%：线夹机械性能不足。

钢芯鼓肚或灯笼股：钢芯受压变形导致直径膨胀，引发局部应力集中。

处理要求：该类缺陷应尽快进行处理。

3.1.2 II级缺陷（限期处理）

钢锚凹槽未压接部分20%-50%：压接面积部分缺失，需补压增强握力。

钢锚管和芯线未压接部分、腔体空隙15%-30%：线

夹机械性能降低。

铝管弯曲度5%-8%：弯曲变形偏高，影响机械稳定性。

处理要求：当压接线夹存在Ⅱ级缺陷时，应按要求采取开断重压、补压及预绞丝加强等方式进行处理，可以在停电检修时进行处。

3.1.3 I级缺陷（跟踪监测）

钢锚凹槽未压接部分小于20%、钢锚管和芯线未压接部分、腔体空隙小于15%等

钢锚压模不平整、弯曲有飞边：钢锚表面存在金属毛刺，易造成电场集中。

处理要求：当压接线夹存在I级缺陷时，可不处理；但对于重要交跨、大高差、大档距、重覆冰及舞动区域等承载力要求较高的线路区段，宜每隔4年或根据运行工况变化进行复检^[2]。

3.2 数字孪生模型构建

为了更深入地了解压接过程中钢芯的应力分布情况，为工艺优化提供量化依据，建立了压接过程数字孪生模型。该模型综合考虑了多种因素，包括材料参数（如钢芯弹性模量210GPa、铝管屈服强度140MPa）、工艺参数（如压接力500kN、压接速度2mm/s）以及环境参数（如温度25℃、湿度60%）。通过输入这些参数，模型可以模拟压接后的钢芯应力分布情况。将模型预测结果与X光检测的应力集中位置进行对比分析，发现两者吻合度高达92%。这表明数字孪生模型能够准确地预测压接过程中钢芯的应力分布，为优化压接工艺、提高压接质量提供了有力的支持^[3]。

4 压接工艺优化与质量控制策略

4.1 工艺参数优化

为了提高压接质量、降低钢芯受损风险，需对压接工艺参数进行优化。实际压接中不能一概而论采用固定模式，如大截面（标称截面积在800平方毫米及以上）导线的耐张线夹压接顺序应采用倒压，且各截面的导线压接过程中其预偏值是不同的，预留偏移值应根据导线截面积等关键参数确定，若预留不当，不足会使钢锚拉环根部与铝管端部顶死增加钢芯应力集中风险，过大则影响压接效果和稳定性。

4.2 在线监测系统部署

为了实现对钢芯铝绞线压接质量的实时监测和早期缺陷识别，在耐张线夹上安装了振动传感器和应变片。振动传感器的采样频率设置为1kHz，能够实时准确地监测导线的振动频率。应变片的量程为 $\pm 500\mu\epsilon$ ，可以精确测量钢芯的应变情况。在线监测系统实时采集导线的振

动频率和钢芯的应变数据，并进行实时分析。当振动频率超过设计值（1.2Hz）或应变超过预警阈值（ $300\mu\epsilon$ ）时，系统会立即触发X光检测任务。通过这种方式，可以及时发现压接过程中出现的潜在问题，实现缺陷的早期识别和处理，避免缺陷进一步发展导致更严重的后果。

4.3 标准化作业流程

为了确保压接质量的一致性和稳定性，需确保压接过程中的细节控制：

4.3.1 压接前清理

在压接前，必须仔细清理钢锚与铝管表面的油污。油污的存在会影响钢锚与铝管之间的接触紧密性，降低连接的可靠性。通过使用合适的清洁剂和清洁工具，确保接触面粗糙度 $Ra \leq 6.3\mu m$ ，这样可以增加接触面积，提高连接的强度和稳定性^[4]。

4.3.2 同轴度校准

对铝管与钢锚的同轴度进行校准，确保小于0.3mm，同轴度的好坏直接影响压接质量，如果同轴度偏差过大，会导致压接过程中受力不均匀，产生应力集中，增加钢芯受损的风险。通过精确的同轴度校准，可以保证压接过程的顺利进行，提高压接质量。

4.3.3 压接后检测

压接完成后，必须立即进行X光检测。X光检测是评估压接质量的重要手段，能够准确检测出压接过程中存在的缺陷。要求图像合格率达到100%，只有通过X光检测合格的压接产品才能投入使用，从而确保特高压输电线路的安全可靠运行。

结束语

本文通过X光探伤技术揭示了特高压线路钢芯铝绞线压接质量与钢芯受损的关联机制：欠压、错位及应力集中是导致钢芯断裂的主要因素，其影响程度可通过缺陷分级标准量化评估。结合磁记忆检测与数字孪生模型，提出了基于多技术融合的压接质量评估方法，为优化工艺参数、提升线路可靠性提供了理论支撑。

参考文献

- [1]丁广鑫,孙竹森,张强,李明,莫娟,叶鸿声,王钢,万建成.节能导线在输电线路中的应用分析[J].电网技术,2012,08:24-30
- [2]田超凯,王志伟,等.碳纤维复合芯导线在特高压交流工程中的优势[J].电线电缆,2018(1):1-4.
- [3]刘斌,杨光耀,等.碳纤维复合芯导线在新建500kV工程中的应用[J].电线电缆,2018(3):1-5.
- [4]王健林.浅谈碳纤维复合芯(ACCC)导线的研究应用与发展前景[J].电力建设,2016(3):48-50.