

# 500 kV 输电导线耐张线夹断裂失效分析

陈家慧<sup>1</sup>, 赵兴虹<sup>2</sup>, 刘曦<sup>1</sup>, 冯杰<sup>1</sup>, 林德源<sup>3</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 四川蜀能电力有限公司高新分公司, 四川 成都 610041;

3. 国网福建省电力公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

**摘要:** 采用宏观检查、拉伸试验、金相组织检测、扫描电镜及能谱分析等方法, 对输电导线耐张线夹断裂的原因进行了分析。结果表明, 耐张线夹内钢芯和铝管的力学性能、显微组织及化学材质均正常, 耐张线夹断裂失效的主要原因为钢锚表面存在较深压痕及明显弯曲变形, 会使钢芯在变形点产生较大的应力集中和挤压摩擦损伤。长时间运行后钢芯受损程度加重, 钢芯在变形处相继断裂, 从而导致外部铝管断裂事故发生。

**关键词:** 耐张线夹; 钢芯; 断裂; 变形

中图分类号: TM755 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2020)02-0070-04

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.02.015

## Failure Analysis on Fracture of Strain Clamp in 500 kV Transmission Line

Chen Jiahui<sup>1</sup>, Zhao Xinghong<sup>2</sup>, Liu Xi<sup>1</sup>, Feng Jie<sup>1</sup>, Lin Deyuan<sup>3</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Gaoxin District Branch, Sichuan Shuneng Electric Power Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, Fujian, China)

**Abstract:** The fracture reason of a strain clamp in 500 kV transmission line is investigated by macroscopic examination, tensile testing, metallographic examination, scanning electron microscopy and energy spectrum analysis. Results show that mechanical properties, microstructure and chemical composition of the steel core and aluminum tube are qualified and can satisfy the requirements of relevant standards. Repeated crimping trace and obvious bending deformation can be clearly observed on the surface of steel anchor, resulting in larger stress concentration and the extrusion friction damage of steel core. After long time running, the damage of steel core is aggravating and steel cores suffer the fracture successively, which leads to the fracture of external aluminum tube. Thus, the accident happens.

**Key words:** strain clamp; steel core; fracture; deformation

## 0 引言

耐张线夹是用于在耐张、转角、终端杆塔的绝缘子串上固定导线或避雷线, 并承受导线张力的金具。压缩型耐张线夹作为机械和电气负荷的传递者, 是输电线路最常见的工具之一<sup>[1-6]</sup>。本体由钢锚和铝管组成, 钢锚用来接续和锚固钢芯铝绞线的钢芯, 通过压力使铝管产生塑性变形, 从而使线夹与导线结合在一起。线夹的装配、设计和压接缺陷以及恶劣运行环境均有可能造成线夹断裂<sup>[7-11]</sup>, 直接威胁高

压输电线路的安全运行。

下面以一起 500 kV 输电导线耐张线夹内钢芯断裂事故为研究对象, 对失效线夹进行解剖, 借助材料表征手段综合分析线夹断裂原因, 并提出科学、可行的防护措施, 对防止类似事故发生、提高耐张线夹可靠性有一定的警示、借鉴意义。

## 1 事故概况

2018 年 6 月, 500 kV 某输电线路发生非计划停运跳闸, 选相为 AC 相(无负荷损失), 故障巡视发

现140号塔小号侧四分裂导线C相(中相)的左下导线耐张线夹断裂,导致子导线掉落,与A相(下相)距离不足,如图1所示。140号塔型为SJ453,同塔双回路架设,小号侧档距为148m,挂线点高差为48.5m,气象区为10mm轻冰,27m/s风速。导线型号为JL/G1A-500/45-48/7钢芯铝绞线,耐张线夹型号为NY-500/45,铝管材质为1050A。

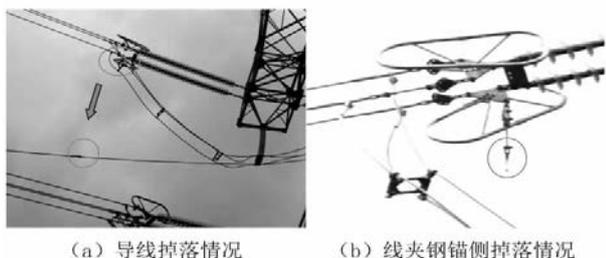


图1 导线耐张线夹失效现场形貌

## 2 理化检验

### 2.1 宏观分析

结合失效耐张线夹外部(见图2)和内部情况(见图3),线夹存在两处断口。铝管断裂位置为接续板附近的未压接区(近钢锚侧),断口具有明显拉伸颈缩特征,属于韧性断裂。导线钢芯断裂在距端口34mm的钢锚内部,整体看7根钢芯断口高低不平,拉边与轴线几乎成45°,断口处均存在明显的颈缩现象,宏观上显示一定的塑性变形特征,如图4所示。钢芯的表面和断面均覆盖有大量的黑色产物,局部位置有明显的挤压和磨损痕迹,表明钢芯在运行时承受拉伸、挤压和摩擦多种应力。



图2 耐张线夹铝管断裂位置

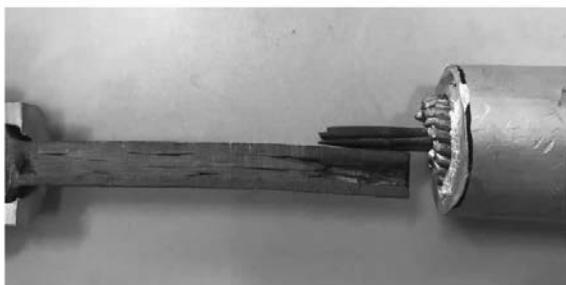


图3 钢锚内钢芯断裂位置

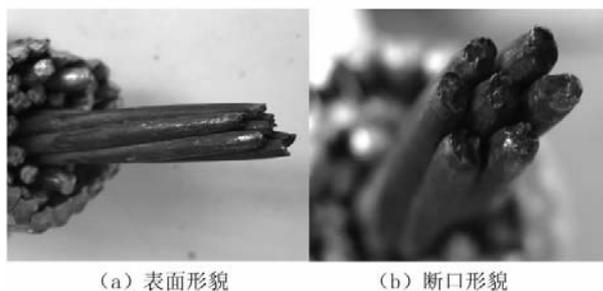


图4 钢芯断裂的宏观形貌

### 2.2 压接质量检测

对失效耐张线夹的压接质量进行测量,发现铝管和钢管的压后最大对边距均符合《输变电工程架空导线(800mm<sup>2</sup>以下)及地线液压压接工艺规程》(DL/T 5285-2018)的相关要求。但钢锚的外观形貌显示,钢锚存在明显的弯曲变形,且表面有较深的压接痕迹(见图5)。经测量,钢锚弯曲点与钢芯断裂位置一致,可知钢锚压接工艺不合格导致内部钢芯在变形处产生较大的应力集中。



图5 钢锚外观形貌

### 2.3 扫描电镜及能谱分析

将7根钢芯线中的2根钢芯线断口置于扫描电子显微镜下观察,结果见图6。由图6(a)和6(c)可知,钢芯断口凹凸不平,C区存在剪切唇特征,断口有明显的径缩现象,符合韧性断裂特征。进一步观察发现,断口A区域附近的表面磨损处存在很多互相平行且垂直于钢芯径向的裂纹,最大裂纹宽度达100μm,如图6(c)和6(d)所示。由此可知,裂纹在A区域萌生,B区域快速扩展,C区域瞬时断裂。由图6(b)可知,2号样断口覆盖有大量的堆积物,经能谱仪分析为氧化腐蚀产物,占据约1/3断面,表明其断裂时间早于1号样。对图6(d)中钢芯表面进行能谱分析,结果以Zn、Fe、O三种元素为主,可推断钢芯表面的黑色物质为镀锌层氧化后产物。观察断口外缘形貌,发现原圆弧形外表面局部已变形成为边角状,即本应为圆周形状的钢芯线外周表面变

为多边形及圆弧形的混合形状,且挤压变形区域与裂纹源位置一致。

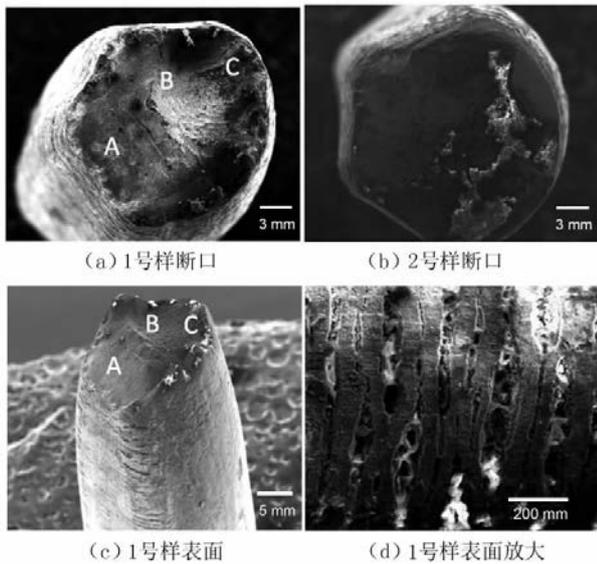


图6 钢芯微观形貌

由此推断,原钢芯线断口位置曾经受外力挤压后变形,变形部位机械强度较低,可成为裂纹萌生点。

### 2.4 显微组织分析

选取1根钢芯进行切割、镶嵌、抛磨,在金相显微镜下观察其径向截面,钢芯内部无异常的金属夹杂物,如7(a)所示。经硝酸酒精浸蚀后,基体组织显示为铁素体+索氏体,表明显微组织正常,如7(b)所示。

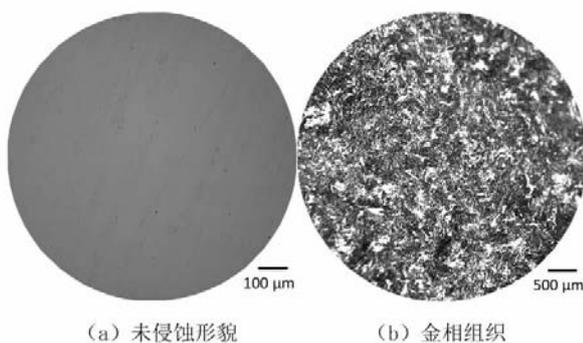


图7 钢芯横向显微形貌

### 2.5 力学性能试验

从远离断口的失效钢芯和铝管上分别选取3段试样进行室温拉伸试验,钢芯和铝管的最小抗拉强度分别为1580 MPa和87 MPa,铝管断后平均伸长率为46%,分别满足《导地线采购标准第2部分:钢芯铝绞线专用技术规范》(Q/GDW 13236.2-2014)和《铝及铝合金热挤压管第1部分:无缝圆管》(GB/T 4437.1-2015)标准要求。

### 2.6 材质分析

对耐张线夹铝管进行化学成分分析,结果符合标准《变形铝及铝合金化学成分》(GB/T 3190-2008)中对牌号1015A的要求。钢芯线的化学成分检测结果显示,钢材中有害元素P和S的含量分别为0.015%和0.008%,均满足相关要求。

## 3 综合分析

通过上述分析可知,耐张线夹中钢芯和铝管的显微组织、力学性能及材质均满足相关要求。钢锚上有较深压接痕迹且存在明显弯曲现象,内部钢芯在变形处产生应力集中。这极有可能是压接过程中出现钢锚弯曲,然后试图通过反复压接将钢管弯曲部位复原所致。多次压接过程导致钢芯产生挤压变形,机械强度降低。运行时,钢芯和钢锚在变形处产生较大的接触摩擦使钢芯表面被磨损,其力学性能进一步降低。钢芯在表面受损处产生裂纹源,使耐张线夹承受载荷的有效面积减小。在导线张力作用下,受损较严重的钢芯在应力集中处首先发生断裂,剩余钢芯和铝管承受的载荷急剧增大,且钢芯断口较为锋利,会对周边的钢芯造成持续的摩擦损伤,形成恶性循环,最终导致剩余钢芯和铝管断裂。

## 4 结语

该导线耐张线夹断裂属于韧性断裂事故,主要是由线夹压接质量不佳引起的。钢锚弯曲变形导致钢芯在变形处产生应力集中,压接过程中的挤压变形和运行过程中的摩擦损伤使钢芯力学性能显著降低,在导线张力作用下钢芯相继被拉断,从而使铝管拉伸断裂,最终导致耐张线夹失效。

为提高耐张线夹的运行可靠性,建议对同批次压接耐张线夹进行X射线探伤检测,排查压接时存在的安全隐患,防止类似事故再次发生。在新建、改造及扩建的线路工程中,应提升耐张线夹压接工艺,加强对线夹压接质量的抽检,以确保线路安全。

### 参考文献

- [1] 王伟,朱成丽,吴洪亮,等.耐张线夹内钢芯铝绞线断裂原因及断口特征[J].腐蚀与防护,2014,35(3):297-301.
- [2] 王若民,吴刚,严波,等.高压输电用耐张线夹的失效

分析[J]. 热处理, 2018, 33(4): 41-47.

[3] 何喜梅, 王志惠, 云峰, 等. 750 kV 导线断裂原因分析及预防措施[J]. 热加工工艺, 2018, 47(4): 257-259.

[4] 王坤, 郑准备, 杨占君, 等. 某220 kV 输电导线断线原因分析[J]. 理化检验(物理分册), 2018, 54(9): 692-697.

[5] 胡加瑞, 刘纯, 欧阳克俭, 等. 500 kV 直流输电线路耐张线夹断裂的原因分析[J]. 电力建设, 2012, 33(7): 82-85.

[6] 利佳, 李志翔. 500 kV 线路压缩型耐张线夹断裂原因分析[J]. 云南电力技术, 2015, 43(S1): 27-28.

[7] 唐凌毅. 一起子导线耐张线夹断裂故障的启示[J]. 现代工业经济和信化, 2019, 9(10): 138-139.

[8] 胡加瑞, 谢亿, 刘纯, 等. 输电线路耐张线夹典型缺陷

探析[J]. 华北电力技术, 2013(4): 34-37.

[9] 邵明星, 武臻, 杨东旭. 220 kV 线路耐张线夹断裂原因分析[J]. 山东电力技术, 2017, 44(6): 77-80.

[10] 陈云翔, 林德源, 洪毅成, 等. 35 kV 架空输电线路钢芯铝绞线内层铝股线的腐蚀失效分析[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(6): 594-598.

[11] 赵测峰, 王若民, 陈国宏, 等. 基于数字射线的耐张线夹压接质量评价试验[J]. 浙江电力, 2018, 37(11): 41-45.

作者简介:

陈家慧(1991), 博士, 工程师, 从事电网设备金属失效分析及新材料研究。

(收稿日期: 2020-02-24)

(上接第20页)

活方式, 可以继续保持燃气供暖方式。3) 宜电择电。在大型商场、学校、公共设施应逐步推广电采暖方式, 加热效果好、速度快, 且清洁环保, 在新建小区可以铺设电缆等电力取暖设备。

未来应进一步提高电采暖的应用面积与比重, 合理推广电采暖方式。一是大力推广经济性相对较好的供暖方式, 在非连续性取暖的学校、政府机关等场所优先推广; 二是推广电锅炉与热电联产机组相结合的灵活性改造模式, 增加热电联产机组的供暖能力和电力系统的调峰能力; 三是创新开展新能源发电供暖新交易模式, 加强新能源发电供暖的机制研究和推广, 探索直接交易的市场化模式, 合理降低取暖输配电价, 鼓励清洁取暖用电量与电力市场直接交易。

参考文献

[1] 袁泽, 于雪皎, 郑小宇, 等. “煤改电”项目综合效益的模糊评判方法[J]. 农村电气化, 2018(2): 18-22.

[2] 苗常海, 白中华, 王雯, 等. 典型蓄热式电采暖项目经济性对比分析[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(6): 36-39.

[3] 曾智勇, 董华佳, 周厚国. 储能在“煤改电”中的应用[J]. 绿色科技, 2019(8): 154-158.

[4] 孙勇, 严干贵, 郑太一, 等. 电力市场背景下蓄热式电采暖消纳弃风的经济性分析[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(4): 532-538.

[5] 杨玉龙, 王彤, 赵磊洋, 等. 分布式电采暖负荷群建模及备用优化[J/OL]. 电测与仪表: 1-8 [2019-12-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20181227.1657.005.html>.

[6] 王锋, 李大勇, 方劲宇, 等. 基于储能协调蓄热式电锅炉消纳风电供暖系统的经济性评估[J]. 电工电能新

技术, 2019(6): 50-56.

[7] 吕泉, 刘永成, 刘乐, 等. 两种风电供热模式的节煤效果比较[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 49-59.

[8] 贺孟春, 刘东, 李斯玮. 集中采暖地区住宅建筑不同采暖方式的经济性比较[J]. 节能技术, 2008, 26(4): 340-346.

[9] 林军. 国家首批火电灵活性改造试点项目吉电股份白城热电机组直热式电锅炉经验介绍——热电解耦, 可再生能源消纳, 清洁供暖一体化灵活性改造[C]. 北京能源与环境学会, 2018 火电灵活性改造及深度调峰技术交流研讨会论文集, 北京能源与环境学会: 北京中能联创信息咨询有限公司, 2018.

[10] 李炎锋, 武海琴, 王贯明, 等. 发热电缆用于路面融雪化冰的实验研究[J]. 北京工业大学学报, 2006, 31(3): 217-222.

[11] 冉东生, 田开明, 王月敏. 低温电热膜的产业化现状[J]. 科技与金融, 2019(9): 94-97.

[12] 范孟华, 王丹, 张家安, 等. 电热泵负荷等值热力学建模及控制策略评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(4): 31-37.

[13] 张志英, 吴贤哲, 赵军. 地源热泵及其系统的相关标准与规范的综述与建议[J]. 太阳能, 2015(3): 8-11.

[14] 张增强, 王祺, 许叶林, 等. “煤改电”工程节能减排潜力分析方法研究[J/OL]. 电测与仪表: 1-4 [2019-12-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20191104.1509.014.html>.

作者简介:

姚锦松(1994), 硕士研究生, 主要研究方向为泛在电力物联网及清洁能源替代;

常喜强(1976), 教授级高工, 主要从事电网运行管理工作;

于冰(1976), 高级工程师, 主要从事电网运行管理工作;

郭小龙(1983), 高级工程师, 主要从事电网运行管理工作;

徐吉智(1991), 硕士研究生, 主要研究方向为新能源储能;

刘博文(1990), 助理工程师, 主要从事电网运行管理工作。

(收稿日期: 2019-12-04)