

# 一起 PT 引流线设备夹断裂失效分析与防范措施

王红梅<sup>1</sup>, 蔡志强<sup>2</sup>, 王志<sup>2</sup>, 李刚<sup>3</sup>

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041;

2. 四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610072;

3. 国网四川省电力公司德阳供电公司, 四川 德阳 618000)

**摘要:** 利用扫描电镜及金相显微镜对某变电站内 PT 引流线夹断裂断口进行了微观形貌及金相组织分析, 借助能谱分析仪、XRD 物相分析仪以及显微硬度计对断口表面的成分、物相和显微硬度进行了检测。结果表明, 铜铝焊接处存在夹渣、氧化膜及未熔合等焊接缺陷, 在长期处于复杂应力状态下发展成裂纹, 加上当天当地刮大风, 最终导致设备线夹完全断裂。此外, 对如何加强该类线夹的安全运行提出了应对措施。

**关键词:** PT 引流线夹; 夹渣; 断裂

**Abstract:** The micro fracture morphology, metallographic structure, composition of the fracture surface, phases and micro-hardness of a fractured jumper conductor clamp of PT have been studied by means of scanning electron microscope (SEM), metalloscope, energy dispersive spectrometer, XRD phase analyzer and micro-hardness tester. The results show that the clamp is finally fractured because of the heavy wind and the existing welding defects such as slag inclusion, oxidation film and incomplete fusion in the copper-aluminum weld which would develop into a crack under the complex stress for a long time. In addition, the corresponding measures are proposed on how to strengthen the safe operation of such clamps.

**Key words:** jumper conductor clamp of PT; slag inclusion; fracture

中图分类号: TM451 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-23-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.006

## 0 引言

电网设备中的引流导线与电气设备出线端子间的联接通常采用铜铝过渡线夹<sup>[1-2]</sup>, 究其原因主要在于铜铝设备线夹很好地兼顾了导电性能及经济性。然而近年来国家电网相继发生铜铝过渡线夹断裂失效的案例, 例如 2012 年 6 月的江西电力公司某变电站铜铝过渡线夹断裂事件, 2012 年 6 月, 新疆 35 kV 火车站变电站 35 kV 楼火线 C 相穿墙套管与引流线的铜铝过渡线夹突然断裂, 使得整个火车站镇停电, 电网经济损失巨大<sup>[3]</sup>。2015 年 2 月, 国网系统某变电站发生 PT 引流线夹断裂失效事件, 线夹断裂造成 A、B 相间短路, 设备损坏。目前由于四川境内在役铜铝过渡线夹近 5 万只, 全面更换存在极大的难度。为了避免类似事故的发生, 以某变电站内的 PT 引流线夹断裂为例, 对典型铜铝过渡线夹断裂失效进行综合分析, 为此类事故的防范提供依据。

## 1 PT 引流线夹断裂情况

2015 年 2 月 28 日 16 时 40 分, 某变电站 220 kV 差动保护、快速距离、距离 I 段、纵联距离、纵联零序同时动作, 选相 A、B 相, 短路电流 115 A, 故障测距 0 公里。现场检查发现 T 接于架空线路 A 相的线路 PT 引流线靠近 PT 端设备线夹断裂(见图 1), 引流线脱落晃动导致 A、B 相间短路。

该 PT 引流线夹为螺栓型对接式铜铝过渡设备线夹, 采用闪光焊接技术进行铜铝搭接对接焊, 型号为 SLG-4, 于 1999 年 6 月投运。引流线为钢芯铝绞线, 型号为 LG-185/25。

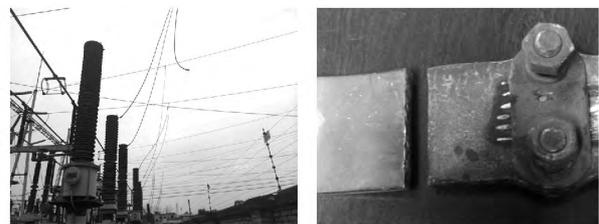


图 1 断裂的 PT 引流线夹

## 2 材质鉴定分析

根据 GB 2341 - 1998 中相关技术要求,按该类线夹设计材质为:铝材牌号按 GB/T 3190 采用不低于 99.6% 铝制造,铜材牌号按 GB/T 2040 采用工业纯铜 T2。为判别材质主要合金元素成分,对已断裂的线夹铜铝两侧板材分别进行了合金元素光谱复核,结果见表 1 所示。

表 1 材质光谱分析

试样	元素成分
铜材	Cu 99.65% Ag 0.11% 其他≤0.03
铝材	Al 99.61% Fe 0.23% Zn 0.035 其他≤0.03

设计铜材(T2)要求含铜+银量≥99.90%,杂质含量≤0.1%;设计铝材(1060)要求铝含量≥99.6%。光谱分析结果表明各试样材质的主要合金元素含量均基本满足标准要求,表明不是因为误用材质而引起的断裂。

## 3 断口分析

### 3.1 断口形貌宏观分析

断裂线夹两侧断口见图 2、图 3。该线夹接线板厚度约为 5 mm,断裂部位为铜铝接触部位。通过对两侧断裂面的痕迹观察,发现铝侧断口表面污染严重,通过目视很难区分有效信息,但铜侧断口表面断裂形貌特征明显,可以将截面大致分为 3 个部分,最先开裂 I 区、未熔合 II 区及最终撕裂 III 区。在铜侧断面 I 区发现大量铜绿色腐蚀产物,并附有极少部分的铝,大约占整个截面的一半以上,说明该区域所生成的氧化物时间较长,结合面在断裂之前很可能已经有氧化物存在。III 区表现为铜侧粘有连续存在的光亮铝,面积大约为 10%,基本可以判断为最终撕裂区域。而 II 区主要表现为铜本体颜色,并未像 I 区产生明显的腐蚀产物,开裂时间上应在 I 区之后。在该区域并未发现铝金属光泽,说明该区域极有可能在焊接上铜铝没有形成有效的熔合,即焊接时可能出现大面积的未熔合现象。

此外,从侧边观察断口无明显宏观塑性变形,说明塑性断裂可能性极小,断面基本无倾角,基本可以排除是在剪应力下断裂。在两侧断口中部对应部位

数个凹坑和凸瘤。

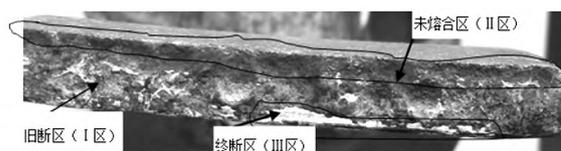


图 2 铜侧断口



图 3 铝侧断口

### 3.2 断口 SEM 形貌分析

通过断口扫描分析可从微观上及元素分布上更为清晰确定断裂的方式以及为判明断裂失效的模式提供依据<sup>[4-5]</sup>。

从断口宏观形貌可以看出,断裂几乎发生在铝侧,铜侧相对保留完整,因此重点选取铝侧断口进行扫描观察。

根据宏观分析得知,断裂面分为最先开裂 I 区,未熔合 II 区以及最终撕裂 III 区,由于最终断裂前有效结合面积已经很小,导致不能承载而最终断裂,形成新鲜断口。因此在截取断口时试样应尽量包含以上 3 个区域,截取方位见图 4。



图 4 试样截取示意图

对断口沿厚度方向选择了 3 个区域(图 5 ~ 图 7)进行扫描电镜观察,图 5 为最终断裂区(新断区)电镜扫描图,可以看到明显的韧窝形貌。图 6 为铝侧突出部位形貌图,断口上附有大量的泥纹状氧化物和少量颗粒状的夹杂(杂物),这种泥纹状氧化物一般在高温下才能形成,对图 6 中 1 号区域进行能谱分析,主要成分为除 Al 基体外,含有少量的氧化铝、氧化铜以及少量铁和碳。图 7 为中间部位形貌图,发现韧窝中存有较多的第二相颗粒,对其中的第二相颗粒进行能谱分析,主要成分除 Al 基体和少量氧化铝、氧化铜外,还发现少量的硅、氯及硫等元素。

对铜侧凹坑局部扫描形貌图,可以看出断口较平滑,韧窝附近存在较多第二相颗粒,经能谱分析主

要成分除氧化铝、氧化铜外,同样发现少量硫和氯。

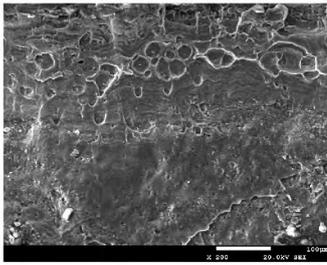


图 5 铝侧边缘(新断区域)扫描电镜形貌图

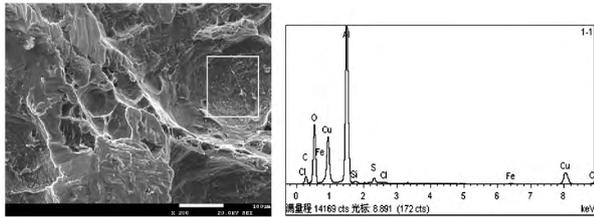


图 6 铝侧中间凸起物扫描电镜形貌及能谱分析图

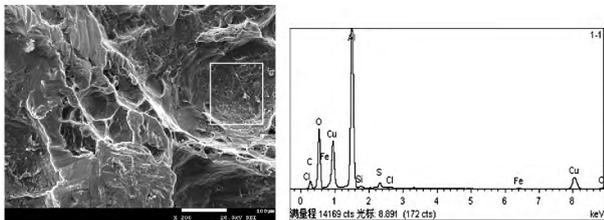


图 7 铝侧中部区域扫描电镜形貌及能谱分析图

扫描电镜及能谱分析表明,断口的主要形貌为韧窝,断口上存在大量的泥纹状氧化物和颗粒状的夹杂(杂)物,这种泥纹状氧化物一般在高温下才能形成。

### 3.3 金相组织分析

观察断口附近的金相组织有助于分析焊接的热影响程度,判断材质是否存在组织相变或晶粒粗大化等缺陷,以此来分析熔合区的金相组织及焊接质量。

金相组织分析表明铜断口边缘热影响区和母材的组织均为  $\alpha$  固溶体,铝侧热影响区和母材的组织均为  $\alpha$ (Al) 基体和带状的  $\alpha$ (Al<sub>12</sub>Fe<sub>3</sub>Si) 相,无明显异常。从金相分析上来看,所使用的铜板及铝材均符合相应的国家标准,说明焊接过程并未造成组织变化。

### 3.4 断口微观成分分析

铜铝闪光对焊时对温度控制要求较高,铜和铝熔合之后极易形成铜铝金属化合物,如 CuAl<sub>2</sub> 及 CuAl<sub>4</sub> 等,这类化合物导电性能极差;而且硬而脆,具有热裂倾向,易发展成微观裂纹源,极大降低焊接质量,因此对其进行 XRD 物相检测和显微硬度测试

来判断该物相是否存在便非常有必要。

#### 3.4.1 XRD 物相分析

图 8、图 9 分别为铜侧断口和铝侧断口的 X 射线衍射图谱,从其分析结果来看,断口表面只存在铜、铝以及氧化铝,并没有发现铜铝间金属化合物的生成,焊接区成分未发现异常,基本上可以判定断裂的原因和焊接生成物没有多大关系。

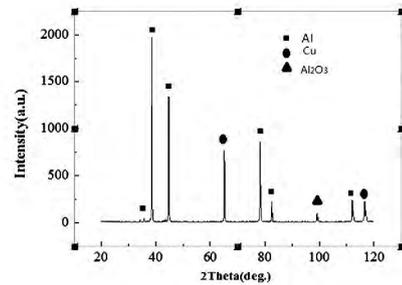


图 8 铝侧断口 XRD

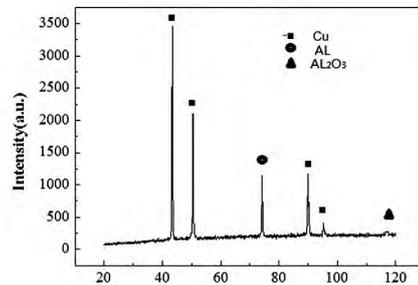


图 9 铜侧断口 XRD

#### 3.4.2 显微硬度分析

由于铜铝均为较软材质,易采用显微硬度进行硬度测试较为合理。对断裂试样按从断口边缘起向两侧均匀取 5 个点,每个点沿宽度方向打 3 个硬度取其平均值,记录硬度值。检测结果见表 2,从硬度测试结果看,在焊接热影响区附近硬度变化不大,进一步说明在焊接热影响区未显著生产铜铝间的金属化合物等脆性相,这个 XRD 检测结果基本吻合。

表 2 显微硬度值/HV

	1	2	3	4	5
Cu	97.16	94.98	96.61	96.88	98.28
Al	32.25	32.32	33.70	31.48	30.74

## 4 综合分析

从铝侧断口对应位置的形貌扫描及能谱分析结果可以得知,断口的形貌主要表现为韧窝形貌和覆盖在铝基体上的大量泥纹状氧化膜;而这种泥纹状

氧化物通常在焊接时高温下产生,说明在断裂前的焊接过程中,铜和铝已被一层氧化膜给隔离了,致使铜铝结合面有效强度不够。能谱分析结果显示韧窝和泥纹状氧化膜中含有大量铜和铝的氧化物,以及少量的铁、硅、硫和氯。除氯、硫杂质可能是在断裂后的外部环境所带来的外,硅和铁杂质更多的应是产生于焊接过程或材质本身。在铜铝闪光对焊时,由于温度较高,极易生产氧化铝,而氧化铝又很难熔化;如果顶锻压力不够,未能将其全部挤出而保留在焊缝中成为所谓的“夹渣”,因此,它和硅、硫等杂质一起成为显微孔洞的形核源,微小孔洞聚集成长成裂纹源,在外应力的长期作用下,裂纹不断扩展,最后导致断裂。

通过宏观分析可知,铜侧断面中间区域呈铜绿色,说明该区域已长时间处于和外界环境接触状态,裂纹首先应该出现在该铜绿区域。铜在潮湿的空气中产生的电化学腐蚀加快了对线夹有效截面的侵蚀,加剧了线夹的断裂。

此外,根据宏观结果分析,知道铜铝焊接处很大部分区域存在未有效熔合,最终断裂区域只占整个断面的不到10%,且位于焊接边缘,表面断裂前有效强度已经严重不足,导致线夹最终断裂。

## 5 结论及建议

线夹断裂的原因主要应为铜铝焊接时产生夹渣、未熔合等焊接缺陷,在长期复杂外力作用,在焊接缺陷产生成裂纹,裂纹逐步扩展,致使线夹的有效承载面积不断减小,有效强度不断降低,在遇到较大外力(例如当天的大风),最终导致线夹断裂。

根据该起PT引流设备夹断裂失效的原因,为防止类似事故再次发生,建议采用以下防范措施:

1) 立即开展该变电站其他类似对接式铜铝过渡设备线夹的排查治理工作,条件满足的应尽快更换该类铜铝过渡线夹。无法立即更换的,应加大宏观巡查和红外测温检测,以及停电检修时的专项检查,重点对设备线夹焊缝接头处进行检测,宏观巡测和温度测量发现异常应停电进行检查处理,对于发现裂纹或存在较大焊缝咬边及未熔合等焊接缺陷的对接焊接铜铝线夹,应立即更换。

2) 鉴于闪光焊和摩擦焊对接式铜铝过渡设备线夹目前常规的检查手段的局限性,不能有效地检出铜铝过渡设备线夹的缺陷,特别是该类设备线夹焊缝内部的缺陷。建议采用目前较为先进的超声相控阵无损检测技术,通过制作专用探头,加工人工试块,可以非常直观形象地有效检测出该类线夹对接焊缝内部缺陷。

3) 由于闪光焊接和摩擦焊焊接工艺控制难,焊接缺陷多,根据国家电网的要求,新更换的铜铝过渡设备线夹不得使闪光焊和摩擦焊对接式线夹,建议采用钎焊或爆炸焊接工艺的铜铝过渡设备线夹。

### 参考文献

- [1] 陈国宏,倪满生,田宇,等. 铜铝过渡线夹使用状况与选型分析[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2012(3): 15-19.
- [2] 吴爽登,陈静,梁永纯,等. 铜铝钎焊接头盐雾腐蚀行为研究[J]. 物理测试, 2012(1): 49-53.
- [3] 国网公司安监部文件. 江西南昌220 kV昌东变电站母线失压事件通报[G]. 2006.
- [4] 张栋,钟培道,陶春虎,等. 失效分析[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
- [5] 崔约贤,王长利. 金属断口分析[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2006.

(收稿日期: 2015-07-15)

# 促节能减排和低碳发展 改善环境保护生态