

变电站铝合金接线板失效分析

陈家慧¹, 刘曦¹, 冯杰¹, 赵兴虹², 赵玉珍³, 吴隆文⁴

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 成都 610041; 2. 四川蜀能电力有限公司高新分公司, 成都 610041;
3. 清华大学 材料学院, 北京 100084; 4. 四川大学 电气工程学院, 成都 610065)

摘要: 针对一起变电站铸造铝合金接线板开裂事件, 从其化学成分、力学性能、显微组织、断口形貌、结构设计等多方面出发, 综合分析了接线板开裂原因并提出防范措施, 以避免同类事故的重复发生。结果表明: 失效铝合金接线板中铁元素含量高于标准 ZL108 铝合金的, 基体组织中有大量脆性 β (Al-Fe-Si) 相及孔洞缺陷, 显著降低了材料的力学性能; 接线板结构设计不合理导致垂直板与底板交界处形成应力集中, 在含氧、硫的腐蚀介质作用下产生应力腐蚀开裂, 服役过程中铝合金与电容式电压互感器(CVT)钢板通过腐蚀介质接触发生电偶腐蚀, 使铝合金强度进一步降低, 加速了裂纹的扩展, 最终导致接线板断裂。

关键词: 变电站; 铸造铝合金; 接线板; 腐蚀; 开裂

中图分类号: TG27 **文献标志码:** B **文章编号:** 1005-748X(2020)12-0070-05

Failure Analysis of Aluminum Alloy Terminal Board in Substation

CHEN Jiahui¹, LIU Xi¹, FENG Jie¹, ZHAO Xinghong², ZHAO Yuzhen³, WU Longwen⁴

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China; 2. Gaoxin District Branch, Sichuan Shuneng Electric Power Co., Ltd., Chengdu 610041, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The causes of terminal board cracking in a substation were analyzed comprehensively from the aspects of chemical composition, mechanical property, microstructure, fracture morphology and structural design. And preventive measures were proposed to avoid the recurrence of similar accident. The results show that the content of iron in the failed aluminum alloy terminal was higher than that in the standard aluminum alloy ZL108. A lot of brittle β phases (Al-Fe-Si) and hole defects existed in the microstructure of substrate, which significantly reduced the mechanical strength of the material. The unreasonable design of the terminal board structure caused stress concentration at the junction of vertical plate and bottom plate. And stress corrosion cracking was induced with cooperation of the oxygen and sulfur corrosion medium. The galvanic corrosion between the aluminum alloy and the capacitive voltage transformer (CVT) steel plate occurred through corrosive medium during service, which further reduced the strength of the aluminum alloy, accelerated the crack propagation, and finally led to the terminal board fracture.

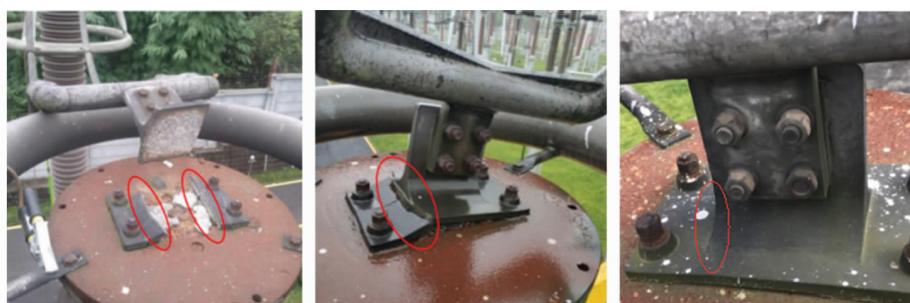
Key words: substation; cast aluminum alloy; terminal board; corrosion; cracking

铸造铝合金因具有导电性好、比强度高、零件结构设计限制小等综合优点, 在电网系统中得到广泛的应用^[1-8]。铸造铝合金接线板是连接变电站导线与电网设备的重要电气部件, 对电网的安全、稳定、经济运行有重要的辅助作用。由于其制造门槛低, 若生产过程中对产品质量把控不严, 如材质选择不

当、结构设计不合理、铸造质量差等^[9-10], 铸造铝合金接线板会出现缺陷。铝合金接线板工作时, 大多直接暴露在大气中, 易受腐蚀介质影响^[11-14]。其自身缺陷和腐蚀环境均会导致接线板开裂失效事件的发生, 给电网运行带来重大隐患。2018年9月, 某变电站电容式电压互感器(CVT)顶部接线板出现不同程度的断裂或开裂, 如图1所示。接线板为一体式铸造铝合金, 投运时间为2005年6月。本工作以该起典型事故为例, 通过宏观检查、材料检测、力学试验等理化分析手段分析了接线板失效的原因,

收稿日期: 2019-12-07

通信作者: 陈家慧(1991—), 工程师, 博士, 电网设备金属失效分析及新材料研究, 18801386391, cjh13w@163.com



(a) 两侧断裂 (b) 一侧断裂 (c) 一侧开裂

图1 现场失效接线板的宏观形貌

Fig. 1 Macrographs of failed terminal boards on site; (a) fracture on both sides; (b) fracture on one side; (c) crack on one side

并提出了有效防护措施,为接线板的设计、制造、维护等工作提供参考。

1 理化检验与结果

1.1 宏观形貌

正常情况下,接线板通过螺栓分别与 CVT 顶盖和 30°双导线设备线夹相连。裂纹和开裂均出现在垂直板与底板的侧面交界处,在底板与钢制 CVT 顶盖接触面有大量的白色粉末及块状腐蚀产物, CVT 顶盖表面凹凸不平,已被严重锈蚀,如图 1 所示。

选取一侧开裂的接线板进行进一步观察,如图 2 所示。可见,接线板结构近似一个倒置的 T 型,底板厚 11 mm、垂直板厚 14 mm,垂直板与底板在正面与背面的连接处有弧形过渡,在两侧面则为直角连接,裂纹位于一侧直角连接处,贯穿底板表面,且在 A 端的深度和宽度大于 B 端的,这表明裂

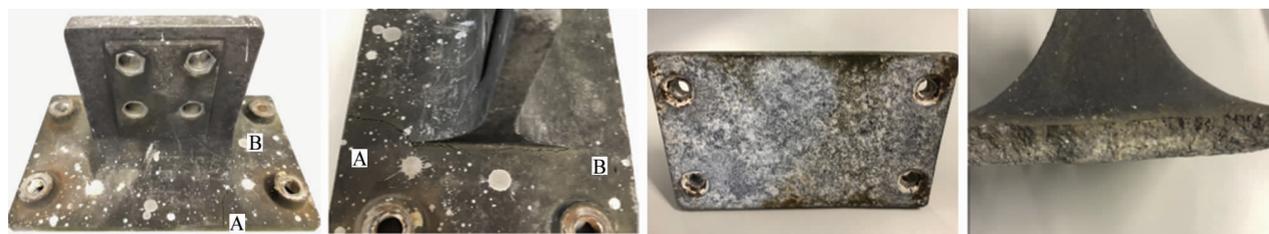
纹是由上而下、从 A 端扩展到 B 端,其中垂直板与双导线设备线夹的接触面与 B 端在同一侧。从接线板的断面可见腐蚀深度已达 4 mm,断口整体较平整,未见明显塑性变形,可见较多气孔缺陷,具有脆性断口特征,如图 2(d)所示。

1.2 化学成分

通过直读火花光谱仪分析失效接线板的化学成分,结果如表 1 所示。可见,该接线板的化学成分接近 GB/T 1173—2013《铸造铝合金》标准对 ZL108 铝合金的要求,但 Zn、Fe、Pb 含量高于标准 ZL108 铝合金的, Mn 含量低于标准 ZL108 铝合金的。ZL108 铝合金具有优良的铸造性、耐磨性及耐热性,但耐蚀性较差,过量的三种杂质元素会进一步降低材料的耐蚀性。

1.3 力学性能

从失效接线板上切取 3 块尺寸为 5 mm × 10 mm × 130 mm 的试样进行拉伸试验。结果表



(a) 正视图 (b) 侧视图 (c) 底面 (d) 断面

图2 开裂接线板的宏观形貌

Fig. 2 Macrographs of cracked terminal board; (a) front view; (b) side view; (c) under-surface; (d) fracture

表 1 失效接线板的化学成分(质量分数)

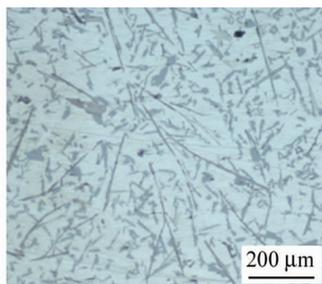
Tab. 1 Chemical composition of failed terminal board (mass fraction)

项目	Si	Cu	Zn	Fe	Ni	Mn	Mg	Pb	Ti	Al
测试值	12.39	1.90	0.30	1.22	0.09	0.15	0.41	0.21	0.10	余量
ZL108 铝合金的标准值	11.0~13.0	1.0~2.0	≤0.2	≤0.7	≤0.3	0.3~0.9	0.4~1.0	≤0.05	≤0.2	余量

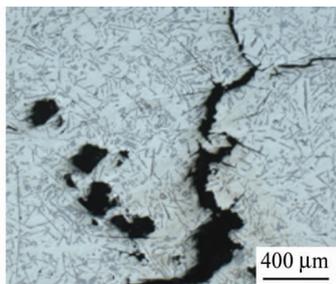
明,试样的抗拉强度分别为 128、149、110 MPa,均小于 GB/T 1173—2013 标准中对 ZL108 铝合金抗拉强度的最低要求(195 MPa)。

1.4 显微组织

在失效接线板断口附近取样进行金相分析,腐蚀剂为 Keller's 试剂($V_{H_2O} : V_{HNO_3} : V_{HCl} : V_{HF} = 95.0 : 2.5 : 1.5 : 1.0$)。由图 3(a)可知,开裂接线板组织为白色固溶体 α 相(Al)、灰色针状 β 相(Al-Fe-Si)和块状初晶 Si,属于未经变质处理的过共晶铸造铝硅合金。图 3(b)显示,裂纹主要沿针状 β 相扩展,断口附近存在较多形状不规则的黑色区域,为铸造过程中产生的孔洞缺陷。通过扫描电镜附带的能谱仪对断口附近的针状 β 相进行分析,结果如图 4 所示。从微观形貌可见,针状 β 相内部存在明显的裂纹,其组成元素为 Al, Si, Fe。



(a) 无裂纹处



(b) 裂纹处

图 3 失效接线板的显微组织

Fig. 3 Microstructure of failed terminal board;

(a) crack free zone; (b) crack zone

1.5 断口形貌

通过扫描电镜观察失效接线板断口的微观形貌。由图 5(a)和 5(b)可知,图 2 中近 A 侧断口的腐蚀深度大于近 B 侧断口的,这与裂纹从 A 端向 B 端扩展的路径相符合。进一步放大近 B 侧断口后可见,区域 I 呈“泥纹和龟裂”特征,为明显的应力腐蚀产物形貌,区域 II 以准解理形貌为主,符合脆性断裂特性,如图 5(c)和图 5(d)所示。

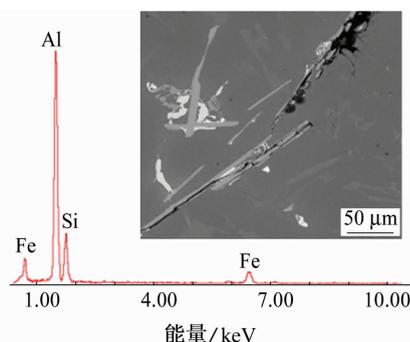


图 4 针状 β 相的微观形貌及能谱图

Fig. 4 Micro-morphology and energy spectrum of needle-like β phase

1.6 腐蚀产物

从图 5 中断口 I 区域腐蚀产物取样,采用扫描电镜附带的能谱仪及 X 射线衍射仪进行分析。能谱分析结果表明,失效接线板的腐蚀产物的化学成分(质量分数)为:62.7% O、33.5% Al、1.9% Fe、0.9% Si、0.9% S;XRD 谱显示,腐蚀产物为 $Al(OH)_3$,如图 6 所示。

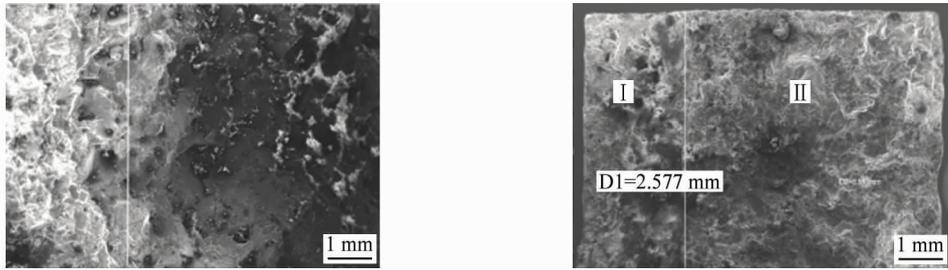
1.7 结构分析

通过 Abqaus 有限元分析软件,对失效接线板的受力情况进行模拟计算,结果如图 7 所示。模拟计算结果表明,垂直板与底板的交界处为应力集中区域,底面孔边距会影响接线板受力情况;当接线板底面螺栓孔的边距 L 为 20 mm,最大等效应力值为 2.9 MPa。当 L 为 40 mm 和 60 mm 时,最大等效应力均有所减小,分别为 2.4 MPa 和 2.1 MPa。

2 失效原因分析

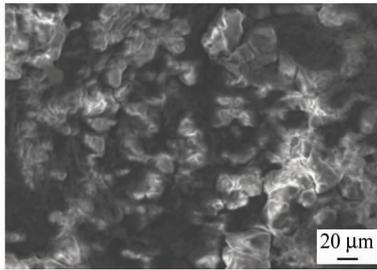
通过材料的化学成分和显微组织分析可见,铁含量过高会导致铝合金中出现大量针状 β 相。 β 相硬而脆,不溶于铝合金基体,铝合金受力时易在硬脆性相处形成应力集中而产生裂纹,大大降低了铝合金的抗拉强度、延伸性及耐蚀性。另外,铝合金中的孔洞为受力薄弱区域,为裂纹的产生和扩展提供有利条件。在 β 相和孔洞缺陷共同作用下,铝合金接线板的抗拉强度远小于标准要求值。

从接线板断裂的现场形貌可知,钢制 CVT 顶盖与接线板底板通过螺栓连接,两者之间缝隙较小,易聚集潮气和雨水,形成腐蚀环境。腐蚀产物分析结果显示,除了氧元素以外,腐蚀产物中存在一定比例的硫元素,这表明腐蚀介质中含有硫。这些硫主要来自于周边工业区产生的 SO_2 。 SO_2 在水中溶解后呈酸性,易破坏铝合金表面的氧化膜,使新鲜金属

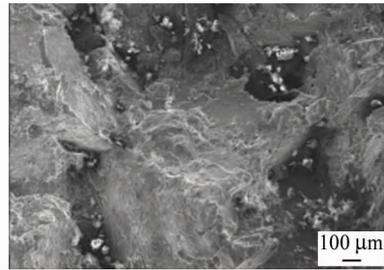


(a) 近 A 侧

(b) 近 B 侧



(c) I 区域



(d) II 区域

图 5 失效接线板的断口形貌

Fig. 5 Fracture morphology of failed terminal board: (a) near A side; (b) near B side; (c) at I area; (d) at II area

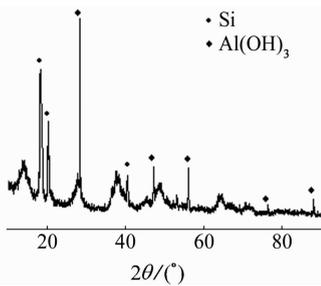


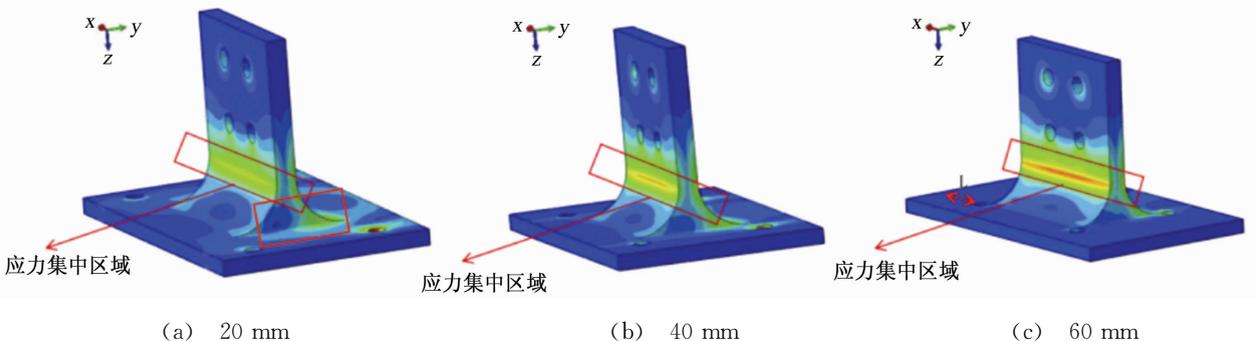
图 6 腐蚀产物的 XRD 谱

Fig. 6 XRD pattern of corrosion products

基体裸露在环境中并被不断腐蚀为 Al^{3+} , 最终在阴极区吸氧形成白色腐蚀产物^[14]。接线板与引线均通过 30° 双线夹相连, 接线板长期承受由引线弹力及重力产生的外应力。由力学模拟结果可知, 受力时在接线板垂直板与底板的交界处形成应力集中

区, 最大等效应力为 2.9 MPa, 增大底面螺栓孔边距可以有效减小应力。在腐蚀介质和应力的共同作用下, 接线板在垂直板与底板的交界处产生应力腐蚀开裂。由失效接线板的显微组织和断口形貌分析可知, 接线板断裂为沿晶脆性断裂, 断口被“泥纹和龟裂”状腐蚀产物覆盖, 具有应力腐蚀断口特征。

钢制品在空气中极易氧化, 常采用热镀锌层对其进行腐蚀防护。该事故变电站 CVT 顶盖为镀锌钢板, 锌和铁的标准电极电位分别为 -0.762 V 和 -0.441 V , 在酸性腐蚀环境中镀锌层作为牺牲阳极对钢板起到阴极保护作用, 随着镀锌层腐蚀程度的加重, 钢板失去了锌的防护作用而开始氧化, 产生红褐色腐蚀产物^[15]。另一方面, 铝的电极电位负于铁且电位差较大, 铝合金和失去保护层的钢板通过



(a) 20 mm

(b) 40 mm

(c) 60 mm

图 7 底面孔边距对接线板受力情况的影响

Fig. 7 The influence of hole edge space on the stress of terminal board

介质溶液接触,形成原电池,发生电偶腐蚀,电位较低的铝作为阳极不断被氧化,腐蚀速率加快,铁作为阴极吸收离子,腐蚀速率降低。接线板的腐蚀减薄,极大削弱了其力学性能,促进了裂纹的扩展,严重时造成接线板断裂。

3 结论与建议

铝合金中大量针状 β (Al-Fe-Si)相及孔洞缺陷导致接线板抗拉强度偏低,在外应力和腐蚀介质的共同作用下,在接线板的垂直板与底板交界处产生应力腐蚀开裂,铝合金底板与失去保护层的钢通过腐蚀介质接触形成原电池,加速了铝合金的腐蚀溶解,使底板厚度不断减薄,增大了裂纹扩展速率,严重时可导致接线板快速断裂。

根据以上分析,为今后工作提出以下几点建议:

(1) 加强对接线板的监督检查,防止部件“带病”入网。

(2) 优化接线板结构设计,减小接线板受力,如增大接线板底面螺栓孔边距。

(3) 改变接线板与 CVT 顶盖的连接方式,避免产生电化学腐蚀。

参考文献:

[1] 罗宏建,龚卓,王炯耿,等. 铝合金设备线夹失效分析[J]. 云南师范大学学报(自然科学版),2018,38(5):44-48.

[2] 夏晓健,张孔林,林德源. 电流互感器铝合金法兰开裂失效分析[J]. 理化检验-物理分册,2017,53(10):754-756.

[3] 许正全. 500 kV 升压站软母线连接器失效分析[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2007,27(4):19-20.

[4] 徐贤,吴国忠,包艳蓉,等. 变电站铝设备线夹断裂事故分析[J]. 热加工工艺,2012,41(7):191-192.

[5] 范明,夏强峰,屠晔炜,等. 一起 220 kV 设备引线线夹的失效故障分析[J]. 浙江电力,2013,32(8):29-32.

[6] 王红梅,蔡志强,王志,等. 一起 PT 引流线设备夹断裂失效分析与防范措施[J]. 四川电力技术,2015,38(6):23-26.

[7] 李铠,卞士朋,赵亮. 某 500 kV 变电站线夹开裂原因分析及其处理方法[J]. 电气工程与自动化,2016(3):20-21.

[8] 董重里,胡平,罗雪. 高压隔离开关静触头铸铝夹板的断裂失效分析[J]. 机电工程技术,2017,46(2):76-78.

[9] 刘磊. 接触网铝合金定位支座断裂原因分析及改进建议[J]. 铁道技术监督,2018,46(11):37-40.

[10] 王斐斐,刘爽,马永泉,等. 220 kV 管母线水平线夹断裂原因分析[J]. 山东电力技术,2015,42(8):51-53.

[11] 陈剑光,苏贲,罗雪,等. 近海含 SO_2 环境中高压隔离开关铝合金部件的组织及腐蚀特征[J]. 腐蚀与防护,2017,38(4):252-255.

[12] 窦志刚,王磊,赵玉凯,等. 热浸镀铝硅合金镀层的锈蚀过程[J]. 腐蚀与防护,2016,37(9):764-766.

[13] 刘化深,张文兴,白涛. ZL205A 铸造铝合金材料在海洋环境下的腐蚀断裂分析[J]. 热加工工艺,2017,46(22):257-260.

[14] 张增广,吕旺燕,苏伟. 变电站铝及铝合金的大气腐蚀与防护对策[J]. 腐蚀研究,2016,30(10):36-44.

[15] 刘静,黄青丹,张亚茹,等. 输电杆塔用热浸镀锌的大气腐蚀及影响因素[J]. 腐蚀科学与防护技术,2016,28(6):570-576.

(上接第 69 页)

[6] 阎永贵,郑玉贵,姚治铭,等. 冲刷腐蚀过程中氧的作用[C]//中国腐蚀与防护学会成立 20 周年暨 99 学术年会论文集. 北京:中国腐蚀与防护学会,1999.

[7] 廖俊生. 铈酰溶液中合金腐蚀行为和铈铈合金氧化特性研究[D]. 北京:中国工程物理研究院,2004.

[8] 屈钧娥,郭兴蓬,黄金营,等. 缓蚀剂吸附行为的电化学及 AFM 力曲线研究[J]. 分析测试学报,2007,26

(1):110-112.

[9] 吴伟词. 表面微纳米结构的构筑及其超疏水/超疏油性研究[D]. 兰州:中国科学院兰州化学物理研究所,2009.

[10] 刘宇,石勇,李宁,等. 5083 铝合金与 2205 不锈钢在天然海水中的电偶腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护,2012,33(6):532-534.