

· 运行分析 ·

电缆 GIS 终端环氧套管开裂原因分析及对策研究

胡 鹏, 李成钢, 陈大兵

(国家电网公司 GIS 设备运维检修技术实验室(国网江苏省电力公司电力科学研究院), 江苏 南京 211103)

摘 要:针对某变电站主变进线电缆 GIS 终端环氧套管开裂故障, 综合分析了裂纹宏观形貌、环氧树脂浇注体材料性能和环氧套管力学仿真, 认为产生环氧套管开裂的根本原因是连接导体和电缆终端安装偏差间隙过大, 环氧套管法兰的凹槽处在运行中长期处于接近其材料强度极限的应力状态下, 安全裕度不足。据此, 提出了更换整改的建议, 确定安装偏差间隙应不大于 0.5 mm。

关键词:环氧套管; 材料性能; 安装偏差; 力学分析; 安全裕度

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)01-0102-04

随着电气设备技术的进步以及制造工艺的提高, 气体绝缘开关设备(GIS)在智能变电站建设中得到越来越广泛的应用^[1]。它将断路器、互感器、接地开关、套管、隔离开关、避雷器以及母线等完全封装在一个接地的金属外壳内(变压器除外), 并且将 SF₆ 气体充入其中, 作为电气设备绝缘和灭弧介质^[2-4], 将输电电缆终端安装在 GIS 内, 就是 GIS 电缆终端^[5]。

套管是 GIS 设备不可缺少的部件, 承担着高压绝缘电负荷及机械负荷(内压、弯矩、扭矩、拉伸或压缩等)的双重作用^[6,7]。套管内充有 SF₆ 绝缘气体, 套管贯穿裂纹的产生, 会造成 SF₆ 气体的泄露, 影响绝缘效果, 如未能及时发现, 将击穿设备甚至发生爆炸, 对 GIS 的安全运行构成巨大威胁^[8]。

本文针对某变电站 2 号主变进线电缆 GIS 终端环氧套管开裂故障进行了详细分析, 认为材料本身对开裂没有影响, 连接导体和电缆终端安装偏差间隙过大是开裂的根本原因, 并据此, 提出了安装偏差控制对策。

1 故障概述

2016 年 9 月 18 日, 某电力公司运维人员发现 110 kV 某变电站 2 号主变进线电缆 GIS 终端漏气。9 月 19 日上午 9 点至 12 点, 运维单位和厂家共同制定了 2 号主变进线电缆 GIS 终端拆解方案并进行了现场拆解, 拆解过程中发现电缆终端 B 相环氧套管浇筑法兰处存在裂纹, 如图 1 所示。

据悉, 2016 年 3 月在该相环氧套管同一位置亦出现过开裂的情况。半年内, 同一位置的 2 个不同批次的环氧套管均出现了开裂, 由此, 可以初步猜

收稿日期: 2016-10-18; 修回日期: 2016-10-21

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(重要电缆通道新型可控运维技术研究)

测此处环氧套管的受力状态可能出现的问题。

2 裂纹宏观检查

环氧套管开裂处直径 210 mm, 裂纹长 380 mm, 开裂长度约占套管周长 58%。在裂纹起源处, 裂纹深 20 mm, 为贯穿性裂纹(如图 2 所示), 环氧套管内部环氧树脂与铝合金的接触面也出现裂纹。



图 1 环氧套管裂纹局部



图 2 裂纹起源处的贯穿性裂纹

3 环氧树脂浇注体性能检测

为确定环氧套管材料本身有无问题, 根据 GB/T 4472—2011、GB/T 2567—2008、GB/T 1634—2004、GB/T 19466—2004 等标准, 对开裂的环氧套管取样进行理化性能、热性能、机械性能的检测, 检

测项目包括密度、热变形温度、玻璃化转变温度、抗弯强度、拉伸强度,检测结果见表 1。

表 1 环氧树脂浇注体性能检测结果

	检测项目	性能要求	检测结果
理化性能	密度/ $\text{g} \cdot (\text{cm}^3)^{-1}$	1.75~1.85	1.81
	热变形温度/ $^{\circ}\text{C}$	105~125	100
热性能	玻璃化转变温度/ $^{\circ}\text{C}$	100~120	104
	抗弯强度/ MPa	≥ 100	142.32
机械性能	拉伸强度/ MPa	—	80.75

其中,环氧树脂浇注体性能指标由厂家提供。在检测结果中,密度、玻璃化转变温度、抗弯强度均符合指标要求,热变形温度^[9,10]指标要求 105~120 $^{\circ}\text{C}$,检测结果为 100 $^{\circ}\text{C}$,检测结果跟指标要求稍有偏差。

由于电缆运行温度不允许超过 90 $^{\circ}\text{C}$,且测量结果和指标要求相差较小,可以认为对环氧套管的开裂影响不大。因此,可能是环氧套管受力不合理导致产生开裂。

4 力学仿真分析

在对 B 相电缆 GIS 终端拆解过程中发现,松开紧固螺栓后,GIS 设备 B 相连接导体与电缆终端一侧翘起,有 1.4 mm 左右缝隙。由此可以推断,当连接导体与电缆终端用螺栓进行紧固后,此间隙必定会导致环氧套管承受一定的拉应力。为了验证由于连接导体与电缆终端存在间隙导致的拉应力对环氧套管开裂的影响,对此进行了力学仿真计算。

采用 ANSYS 分析软件进行建模,单元类型为实体单元 Solid186,环氧树脂浇注体弹性模量取为 5 GPa,泊松比为 0.3,铝合金弹性模量取为 71 GPa,泊松比为 0.33。模型尺寸与环氧套管设计图纸一致,环氧套管法兰凹槽处有圆滑过渡,防止出现应力集中,如图 3、图 4 所示。



图 3 电缆终端 ANSYS 模型

设备运行时,GIS 套管没有额外的振动荷载,但因为安装偏差产生了初始变形使得套管承受了偏心静力荷载。本文通过加载变形后的位移边界条件来计算环氧套管法兰凹槽开裂处的应力。

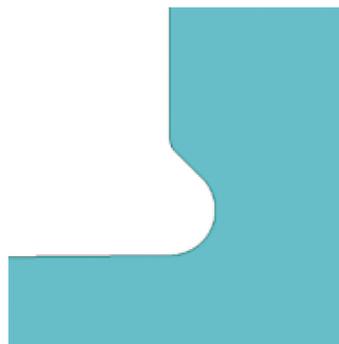


图 4 环氧套管法兰凹槽处圆滑过渡

螺栓紧固后连接导体与电缆终端的变形示意图如图 5 所示(虚线为变形后形状)。为了准确计算出模型变形所需加载的位移量,设电缆终端顶面中心 A 点在变形后移至 A' 点,水平侧移量为 x ,竖直位移为 y ,顶面偏转角为 θ ,由变形量计算示意图 6 所示, $x=R-R\cos\theta$, $y=579-R\sin\theta$ 。

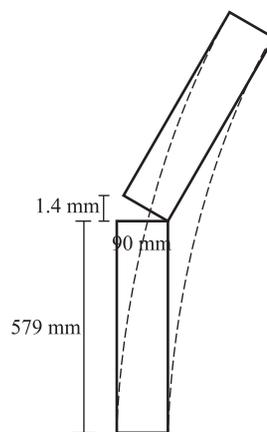


图 5 螺栓紧固前后变形示意图(虚线为变形后形状)

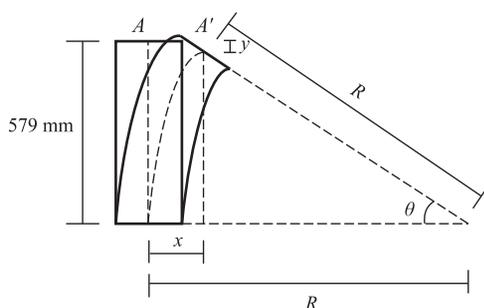


图 6 电缆终端变形量计算示意图

螺栓紧固前,连接导体与电缆终端的夹角为 0.9° ,那么电缆终端在变形时顶面的偏转角 $0 \leq \theta \leq 0.9^{\circ}$,分别取偏转角 θ 为 0.45° , 0.6° 和 0.9° 进行计算,算出的水平侧移量 x 分别为 2.274 mm, 3.032 mm, 4.547 mm, 竖直位移 y 分别为 0.006 mm, 0.011 mm, 0.024 mm。分别施加这 3 种偏转角下的位移边界条件进行计算,以 0.9° 偏转角下的计算结果为例,得到的环氧套管应力云图如图 7、图 8 所示,可

见在电缆终端环氧套管受拉侧法兰凹槽处拉应力值突增较大。三种偏转角下环氧套管法兰凹槽处的应力最大点的拉应力值如图9所示。

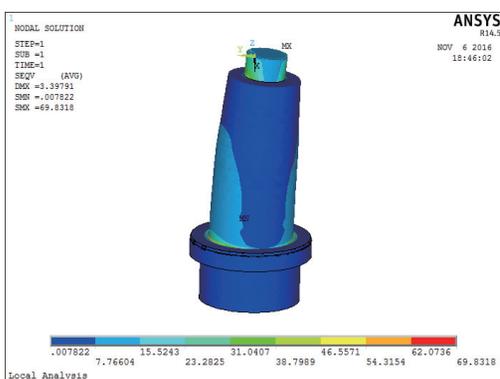


图7 环氧套管应力云图

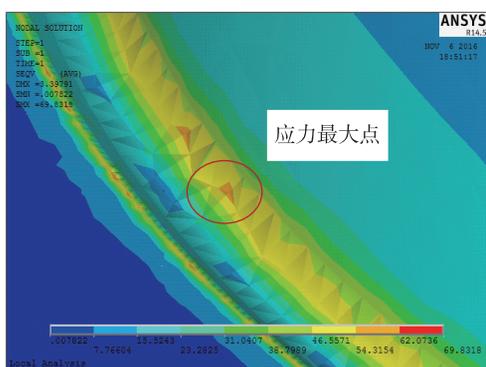


图8 环氧套管法兰凹槽处应力云图及应力最大点

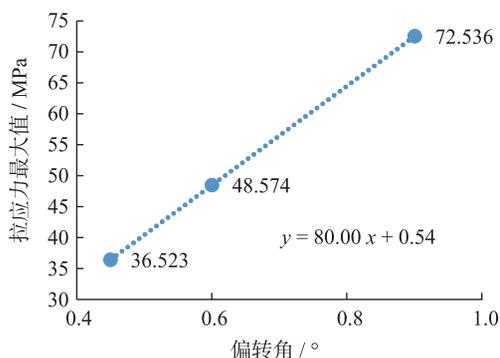


图9 三种偏转角下环氧套管法兰凹槽处拉应力最大值

由上图可知,环氧套管法兰凹槽处的最大拉应力与电缆终端顶面变形偏转角基本呈线性关系,拟合的线性方程为 $y = 80.007x + 0.54$ 。

5 开裂原因及对策研究

由前文可知,螺栓紧固前,1.4 mm 的安装偏差可能产生的最大顶面变形偏转角为 0.9° ,即在环氧套管法兰凹槽处产生的拉应力最大值可能达到 72.536 MPa,虽然小于材料的实验抗拉强度 80.75 MPa,但安全裕度已严重不足^[11]。又因为力学仿真是在线弹性、材料完全均质无缺陷且设备完全静止

的静力理想条件下进行的,而现实材料的不均匀性会导致部分区域材料抗拉强度薄弱,因此电缆终端环氧套管法兰凹槽处存在较大的开裂风险。

环氧树脂固化后可能存在内应力大,脆性大,耐疲劳性、耐湿热性、抗冲击韧性差等缺陷^[12]。在静荷载下,脆性材料的安全系数 n_b 一般取 2.5 ~ 3^[13]。考虑到设备运行安全要求较高,安全系数取为 3,即环氧套管法兰凹槽处最大的许用拉应力为 26.9 MPa,带入拟合的线性公式,算出允许的最大偏转角为 0.33° ,即安装偏差取为 0.5 mm。

因此,在螺栓紧固前应先使用塞尺测量连接导体和电缆终端间的缝隙宽度,确保缝隙宽度在 0.5 mm 以内才可进行螺栓紧固安装,否则,需要调整连接导体和电缆终端的相对位置使二者的连接面尽可能持平,再进行安装。

6 结束语

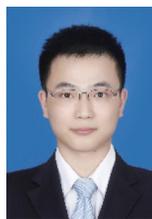
本文综合分析了某变电站主变进线电缆 GIS 终端环氧套管的裂纹形态、环氧套管材料性能及其在安装偏差下的受力状况,确认由于安装偏差导致的拘束应力过大是导致环氧套管开裂的主要原因,并提出了相应的对策:(1) 由于连接导体与电缆终端存在 1.4 mm 的安装偏差,电缆终端环氧套管法兰凹槽处产生的拉应力最大值可达 72.536 MPa,接近环氧套管的实际抗拉强度,安全裕度严重不足,因此在设备运行时电缆终端环氧套管法兰凹槽处发生了开裂。(2) 建议在安装时将连接导体与电缆终端的安装偏差控制在 0.5 mm 以内,可确保在环氧套管材料性能合格的条件下,不发生因附加拘束应力导致的开裂。

参考文献:

- [1] 王椿丰,熊静,卫银忠,等.基于GIS设备的智能变电站电气接线方案优化研究[J].江苏电机工程,2016,35(4):11-14.
- [2] 尹承尚,于泳.GIS的运行状态检测与诊断[J].山东电力技术,2001,119(3):27-29.
- [3] 李信.GIS局部放电特高频检测技术的研究[D].北京:华北电力大学,2005.
- [4] 康莉娟,王雨新.浅谈SF6气体绝缘全封闭组合电器(GIS)的运行维护管理[J].科技信息,2011,26:328-330.
- [5] 王滨.GIS电缆终端局部放电在线检测系统设计与应用[D].北京:华北电力大学,2015.
- [6] 李宝宝.户外GIS套管导线拉力计算[J].电气技术,2016,7:163-165.
- [7] 沈丰慧.GIS复合套管应力特性与绝缘性能综合影响的研究[D].沈阳工业大学,2015.
- [8] 王伟,潘晓明,张永生.电磁超声技术在变电站GIS管道裂纹检测中的应用研究[J].江苏电机工程,2011,30(5):82-84.

- [9] 余益斌. 环氧树脂建筑结构胶的耐热性研究[D]. 湖南大学,2012.
- [10] 曾 剑, 罗 炎, 杜 涛, 等. 聚酯增韧环氧树脂的耐热性研究[J]. 热固性树脂, 2010, 25(4): 12-16.
- [11] 杜志明, 范军政. 安全裕度研究与应用进展[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(6): 6-10.
- [12] 张胜佳, 刘松杭, 王二国. 环氧树脂增韧的研究进展[J]. 宁波化工, 2015(1): 1-6.
- [13] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 40-41.

作者简介:



胡 鹏

胡 鹏(1989—),男,安徽安庆人,硕士研究生,从事电力设备结构力学分析和状态评价专业工作;

李成钢(1984—),男,浙江绍兴人,工程师,从事电力设备材料性能分析及状态评价专业工作;

陈大兵(1979—),男,湖北大悟人,高级工程师,从事电力设备检验检测及评估工作。

Cause Analysis and Countermeasure Study of Cracking Accident of Cable GIS Terminal Epoxy Casing

HU Peng, LI Chenggang, CHEN Dabing

(State Grid Laboratory of GIS Operation and Maintenance Technology

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute), Nanjing 211103, China)

Abstract: According to a cracking accident of an incoming cable GIS terminal epoxy casing in a substation main transformer, the macroscopic crack morphology, the material performance and the mechanical simulation of epoxy casing are analyzed in this paper. Thinking that the root cause of epoxy casing cracking is a large installation deviation of the connection conductor and the cable terminal. So that the groove of the epoxy casing flange is operating in a state of stress close to its material strength limit for a long time, and the safety margin is insufficient. Accordingly, replacement recommendations are presented to ensure that the installation deviation should not be greater than 0.5 mm.

Key words: epoxy casing; material performance; installation deviation; mechanical analysis; safety margin

(上接第 97 页)

- [4] 陈德胜. 城轨新型能馈式牵引供电集成技术研究及试验[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [5] 陈 勇,刘承志,郑 宁,等. 基于逆变回馈的地铁再生制动能量吸收的研究[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 12(3): 36-39.
- [6] 李 洁,郑伊飞,郑月宾,等. 地铁再生制动能量回馈装置软并网技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 16(10): 89-92.
- [7] 刘国华,洪 丹,王 瑞,等. 双馈风机转子侧变流器不平衡控制策略[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(2): 5-9.
- [8] 许爱国,谢少军. 城市轨道交通牵引供电 PWM 变流器的研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(12): 7-9.
- [9] 王 军,江 平,杨海英. 城市轨道交通制动能量逆变回馈系统研究[J]. 城市轨道交通研究, 2007, 8(12): 23-27.

- [10] 王 宇,杨 浩,方太勋,等. 地铁再生电能回馈系统试验研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(6): 86-90.

作者简介:



黄志高

黄志高(1962—),男,江苏泗阳人,高级工程师,从事电力系统及自动化研究工作;

刘洪德(1986—),男,山东潍坊人,工程师,从事电子技术在电力系统中应用工作;

连建阳(1987—),男,福建泉州人,工程师,从事电子技术在电力系统中应用工作;

李晓飞(1983—)男,河北廊坊人,工程师,从事轨道交通供变电系统应用技术工作;

杜海源(1982—)男,河北井陘人,工程师,从事轨道交通供变电及自动化工作。

Optimization Scheme for Charging Circuit of the Subway Energy Feedback System

HUANG Zhigao¹, LIU Hongde², LIAN Jianyang², LI Xiaofei³, DU Haiyuan³

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China; 2. Nanjing Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China; 3. Shijiazhuang Urban Rail Transit Co. Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Subway energy feedback system can put the subway brake energy back to the power grid, to save energy and stabilize DC voltage. The design of the charging circuit is related to not only the secure operation of the energy feedback device, but also the impact on the power grid when the device is connected to the power grid. After analyzing the working principle of subway energy feedback system, AC charging and DC charging, the two design schemes are given with their charging process. Through building 1.2 MW back-to-back test platform system, the charging experiment and the grid connection experiment have been conducted. The results show that the DC charging scheme is the ideal charging scheme, not only because it meets the cut-in requirements of the subway energy feedback system, but also because its operation process is simple and reliable.

Key words: energy feedback; charging circuit; soft cut-in