

基于固态残留物X射线能谱的GIS设备故障分析

气体绝缘开关设备（GIS）绝缘故障的事后分析对于提高制造和运行水平具有重要意义。通过X射线能谱分析得到的固态残留物的组成成分，可以获得故障发生的重要线索。首先介绍了X射线能谱分析方法的理论依据和仪器结构，然后对一起GIS设备内部击穿故障的固态残留物进行了成分分析。现场应用表明利用X射线能谱分析得到的固态残留物组分，能够揭示故障原因。这对于提升GIS故障分析水平和提高GIS安全可靠性的意义。

任志刚¹ 王雅群² 徐兴全¹ 江江³ 郭卫¹ 桂媛¹ 任健聪¹ 齐伟强¹ / 1. 国网北京电力科学研究院 2. 国网北京通州供电公司 3. 国网北京石景山供电公司



任志刚/工程师

关键词/Keywords

GIS •
绝缘故障 •
事故分析 •
X射线 •
能谱 •

0 引言

气体绝缘开关设备（GIS）是电力系统中的重要设备，其安全可靠运行对电网的安全和稳定具有重要影响。近年来，随着GIS设备的广泛使用，GIS意外事故也越来越多，给电力系统和国民经济造成了巨大的损失。为了避免GIS事故发生，就需要掌握可能造成GIS事故的各种诱因。然而，在许多已经发生击穿事故的GIS设备内部，难以直观看出造成事故的缺陷。这给运行人员带来了极大困惑。因此，迫切需要事故原因分析手段^[1-3]。

本文提出将X射线能谱分析技术用于GIS事故分析。它通过分析事故遗留固体产物的组成成分，来揭示造成事故的物质条件和事故发生过程。首先介绍了X射线能谱分析技术的工作原理，然后将该方法用于一起GIS击穿事故的原因分析。

1 X射线能谱分析技术

1.1 X射线的产生

当高能电子进入样品后，受到样品

原子的非弹性散射，将其能量传递给原子而使其中某个内壳层的电子被电离，并脱离该原子，内壳层上出现一个空位，原子处于不稳定的高能激发态。在激发后的瞬间(10~12 s内)，原子便恢复到最低能量的基态。在这个过程中，一系列外层电子向内壳层空位跃迁，释放出多余的能量，产生特征X射线和俄歇(Auger)电子。X射线辐射是一种量子或光子组成的粒子流，具有能量。特征X射线能量与样品原子序数Z存在函数关系。早在1913年Moseley导出下式

$$E=A(Z-C)^2$$

式中，A和C是与X射线谱线系有关的常数。这个关系式也称Moseley定律，表明如果检测出某个特征X射线的能量必将找到其对应的元素。这是利用特征X射线对材料进行元素成分分析的理论依据。

1.2 X射线能谱仪的结构

X射线能谱仪主要由探测器、放大器、脉冲处理器、显示系统和计算机构成。从样品出射的X射线进入探测器，转变成电脉冲，经过前置和主放大器放大，由脉冲处理器分类和累积计数，通过显示器展现X射线能谱图，利用计算机配备的专用软件对能谱进行定性和定量分析。图1为能谱仪的流程框图，每个步骤的相应功能在方框下方标明^[4]。

2 一起GIS击穿故障的固态残留物分析

2.1 GIS击穿故障概述

某变电站差动保护动作，A相跳闸重合未成功，三相跳闸。故障测距结果

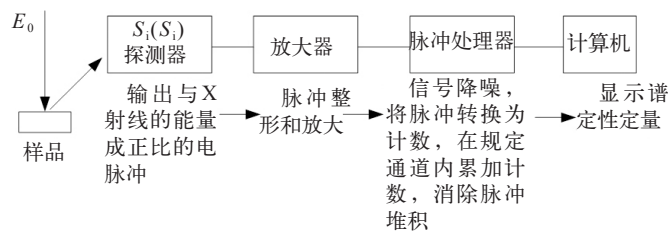


图1 能谱仪流程框图

表明短路故障发生在变电站内。事故发生后对架空线路、电缆和GIS设备进行了检查。变电检修人员对该变电站内的GIS间隔进行SF₆分解气体测试，发现某仓内SO₂气体严重超标，判定为气室内部有放电故障。开仓后发现仓内放电烧蚀严重，为此次事故的故障点。发生故障的GIS结构图如图2所示。

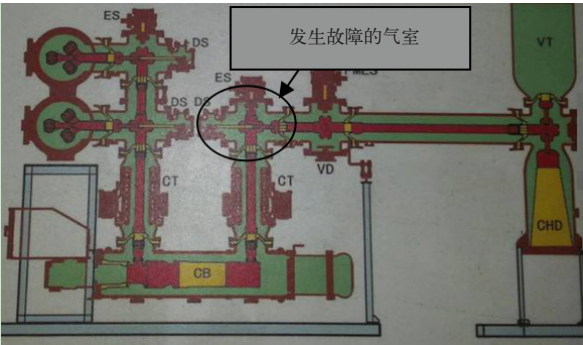


图2 发生故障的GIS结构图

开仓检查故障气室，发现仓体内部和高压导体上均有一层白色粉末，仓体内发现固态烧损残片，如图3所示。残留物呈固体形态，表面绝大部分呈黑色，其中部分黑色固体上附着绿色物质，将黑色部分折断后，发现基体部分也呈现黑色。

2.2 固态残留物成分分析

对故障残留物分别做能谱试验及X衍射试验，对不同颜色区域的成分及物相结构进行分析，从而确定其内部的主要成分及结构。

绿色部分的分析结果如图4所示，黑色部分的分析结果如图5所示。绿色部分和黑色部分的主要构成元素均为Fe和F。其中绿色部分的主要成分为F、Fe、Al、Cr和少量的S元素；黑色部分的主要成分为F、Fe、Cr、S和少量的Al元素。黑色部分和绿色部分的构成元素差别不大，但黑色部分的

Cr含量略高于绿色部分，Al的含量略低于绿色部分。图6为故障残留物截面的内部基体成分，与黑



图3 屏蔽罩烧损后的残留物

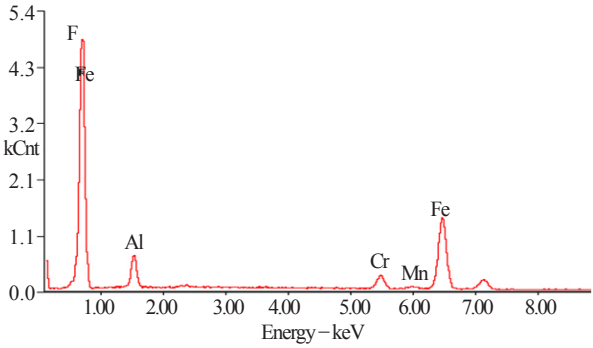


图4 绿色固体的能谱图

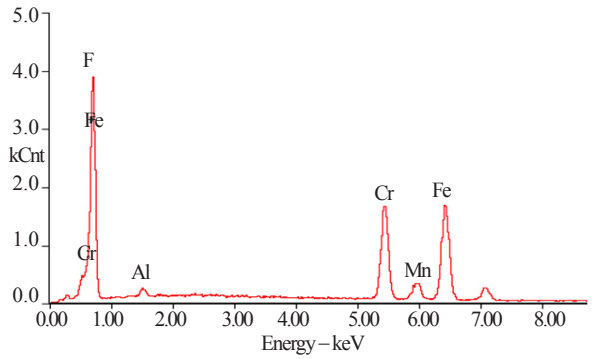


图5 黑色固体的能谱图

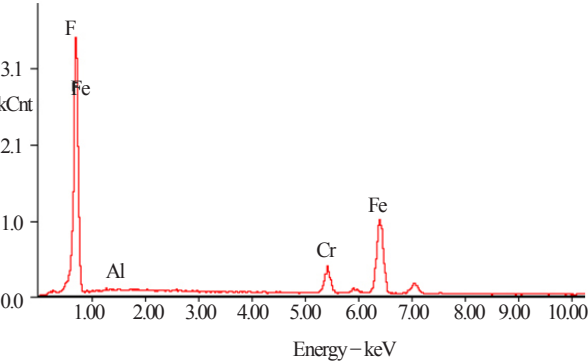


图6 残留物截面能谱图

色部分的成分构成差别不大。

2.3 GIS故障起因分析

与GIS厂家核实，屏蔽罩为不锈钢材料，厂家提供了该材料的成分表，除了铁元素外，其他主要元素为Cr含量为16.753%，Ni含量为10.148%。通过对故障残留物的成分及物相结构分析，可以得出以下结论：①故障残留物中没有高分子化合物，初步排除仓体安装时仓内遗留异物。②故障残留物主要为Fe、Cr、F的化合物，初步认为故障残留物为故障时，屏蔽罩（不锈钢材料）与SF₆发生化学反应后生成的化合物。③导电臂上残留的绿色物质与大块故障残留物上绿色部分材质相同主要是Fe的F化物。

为了进一步分析故障起因，进一步与厂家共同分析了屏蔽罩的安装结构及工艺。按照出厂工艺要求，屏蔽罩本身固定应如图7所示，铆冲在底座上，并进行如下工序：①屏蔽罩装好后进行四点铆冲；②手握屏蔽罩转动不发生位移；③作业人在铆冲点划标识；④填写检查表；⑤确认人应该确认以上程序是否达标。然后，在厂家检查了屏蔽罩安装工艺记录等书面资料。资料表明，在故障产品生产过程中，组装人员未严格按工序要求执行，导致屏蔽罩安装不牢固，如图8所示。在机械振动下屏蔽罩松动，并逐步产生放电烧蚀，最终发生击穿故障。

3 结束语

采用X射线能谱分析方法对故障GIS的固态残留物进行了分析，根据分析结果查明了故障诱因。这表明基于X射线能谱的固态残留物分析方法

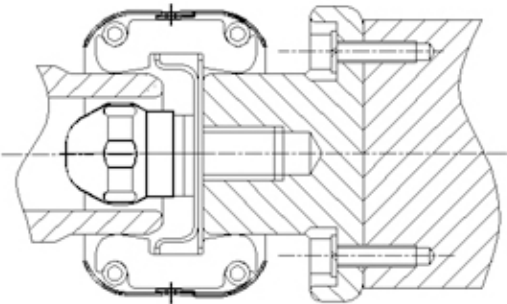


图7 屏蔽罩铆接结构

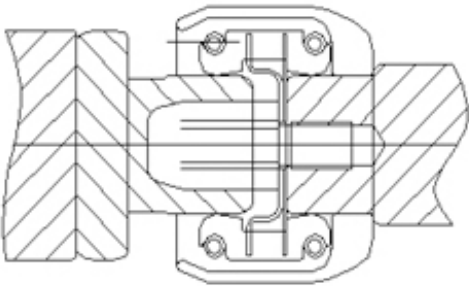


图8 故障屏蔽罩的安装结构

是揭示GIS绝缘故障有利工具。今后在GIS绝缘故障事后分析中可以推广应用该方法。

参考文献

[1] 马爱清, 杨秀, 陆鑫淼, 等. GIS盘式绝缘子三维电场计算及其逆问题分析[J]. 高电压技术, 2010(5).
[2] 何善庆. 550 kV GIS盆式绝缘子闪络事故的分析, 高压电器, 2003, 39(3).
[3] 王斌. 220 kV GIS设备事故及原因分析 [J]. 高电压技术, 2002(11).
[4] 张大同. 扫描电镜与能谱分析技术[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2008.

作者简介

任志刚（1983-），男，工程师，主要从事电力设备故障分析、电力电子技术、电力系统分析与控制方面的工作。

（收稿日期：2015-12-10） EA

（编辑：鞠佳）