

某GIS设备黄铜三通阀法兰失效分析

赵兴虹¹, 陈家慧², 冯杰¹, 彭倩², 王方强²

(1. 四川蜀能电力有限公司高新分公司, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:某变电站GIS设备黄铜三通阀法兰出现大批量的断裂或开裂现象,易导致SF₆气体泄漏,存在严重安全隐患。文中通过对失效三通阀的宏观形貌、化学成分、金相组织、结构等多方面进行分析、研究,明确了三通阀的开裂原因并提出改进措施。结果表明三通阀法兰材质为铅黄铜,因结构设计及装配方式不当受到较大的周向拉应力,在周围环境含有氧、硫元素的腐蚀性作用下,沿法兰的应力集中区域发生应力腐蚀开裂。

关键词:GIS; 黄铜; 三通阀; 应力腐蚀; 开裂

中图分类号: TG 146 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2023)03-0081-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230314

Failure Analysis of Brass Three-way Valve Flange in A GIS Equipment

ZHAO Xinghong¹, CHEN Jiahui², FENG Jie¹, PENG Qian², WANG Fangqiang²

(1. Gaoxin District Branch of Sichuan Shuneng Electric Power Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: A large number of fractures or cracks occurs in brass three-way valve flange of GIS equipment in a substation, which is easy to cause SF₆ gas leakage and has serious safety hazards. Through the analysis and research on macroscopic appearance, chemical composition, metallographic structure, structure of the failed three-way valve, the reasons for the cracking of three-way valve are clarified and the improvement measures are put forward. Results show that the flange of three-way valve is lead brass and subjected to large circumferential tensile stress due to improper structural design and assembly method. Under the action of surrounding corrosive environment containing oxygen and sulfur elements, stress corrosion cracking occurs along the stress concentration area of the flange.

Key words: GIS; brass; three-way valve; stress corrosion; cracking

0 引言

黄铜具有良好的工艺性能、力学性能以及较高的导电、导热性,在电气设备中得到了广泛应用^[1-3]。轴销、阀体等电网材料的黄铜部件通过加工成型可提高其塑性和强度,但设计、制造、装备以及运行环境均可能造成其开裂,直接影响电网的安全稳定运行^[4-5]。

某220 kV变电站GIS设备运行5年,其充气接头三通阀法兰出现不同程度的断裂或开裂,可能导

致SF₆气体泄漏,影响设备安全稳定运行。该法兰材质为加工黄铜,牌号未知。下面以该起事故为例,通过宏观检查、成分分析、金相检测、断口形貌及能谱分析等技术方法,结合结构设计及运行环境分析找出法兰开裂原因,并提出防护改进措施,为GIS充气接头的设计、制造、运维检修提供参考依据,避免类似失效再次发生。

1 理化检验与结果

1.1 运行环境

该变电站处于化工园区内,环境相对恶劣,存在

腐蚀性物质。另外该市常年气温在 15 ℃ 左右,雨量充沛,环境相对潮湿,因此三通阀法兰长期处于潮湿且有腐蚀性物质的运行环境中。

1.2 宏观检查

三通阀本体与法兰非一体式结构,两颗铆钉将法兰固定在三通阀本体上,三通阀法兰通过两个螺栓与 GIS 设备壳体连接,如图 1 所示。



(a) 运行工况 (b) 断裂法兰

图 1 GIS 设备三通阀法兰现场形貌

图 2 为开裂三通阀法兰的宏观形貌。可见,裂纹位于法兰一侧铆钉连接部位,沿着自上而下、由外到内的方向扩展,直至贯穿法兰径向薄弱处。断口无明显塑性变形,呈典型的脆性断裂特征。



(a) 侧视图 (b) 仰视图

图 2 失效三通阀法兰宏观形貌

1.3 化学成分

对失效法兰取样进行化学分析,结果如表 1 所示。可看出,法兰为铅黄铜,其化学成分符合 GB/T 5231—2012《加工铜及铜合金牌号和化学成分》中铅黄铜 HPb59-1 的要求。HPb59-1 具有良好的可切削性及力学性能,但耐腐蚀较差,易出现应力腐蚀开裂。

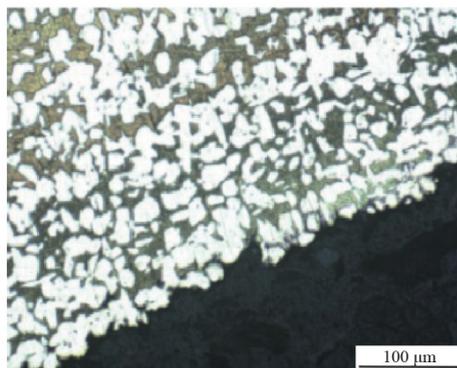
表 1 失效法兰的化学成分质量分数 单位:%

对比项	Cu	Fe	Pb	杂质总和	Zn
测试值	58.03	0.15	1.58	0.89	39.35
HPb59-1 的标准值	57.0~60.0	≤0.5	0.8~1.9	≤1.0	余量

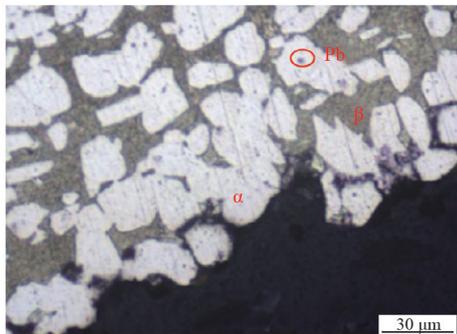
1.4 金相分析

垂直于断裂面取样,制成金相试样。经磨制、抛光、腐蚀后进行金相显微组织观察,结果如图 3 所示。可看出,金相组织为白色 α 相+灰色 β 相+黑色

颗粒 Pb 相, α 相呈块状、针状及卵状。裂纹整体沿 α 和 β 相晶界分布,符合沿晶开裂特征。



(a) 放大200倍



(b) 放大500倍

图 3 法兰断口附近金相组织

1.5 断口分析

为进一步分析法兰断裂形式,使用扫描电子显微镜观察断口微观形貌,如图 4 所示。断口整体表现为沿晶断裂形貌,并伴有二次裂纹的产生,且存在一定量非导电的腐蚀产物。对断口进行能谱分析,断口处合金基体的 3 种元素 Cu、Zn、Pb 含量分别为 43.5%、28.3%及 8.6%。此外,还检测到较多 O、S 等腐蚀元素,含量分别为 16.1%和 3.4%。

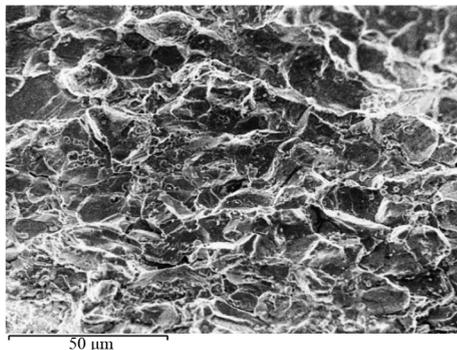


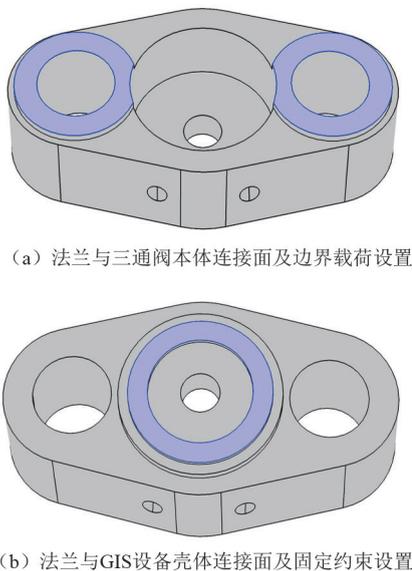
图 4 三通阀法兰断口的微观形貌

1.6 结构分析

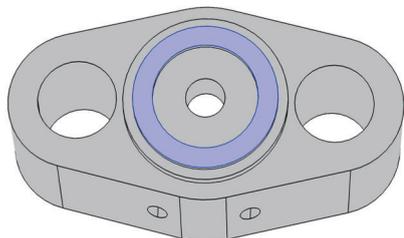
裂纹位于三通阀法兰径向厚度较薄区域,极易造成应力集中。为了深入分析三通阀法兰运行时的

受力情况,并提出结构优化方案,利用 SolidWorks 构建三通阀模型,通过 COMSOL 有限元分析软件进行仿真计算。

图5为失效三通阀法兰的几何模型,选择材料杨氏模量为 90 GPa,密度为 8500 kg/m^3 ,泊松比为 0.35。结合实际运行情况,法兰主要承受螺栓位置施加的垂直应力为 1 MPa,将其设置为法兰边界载荷,整个几何体为线弹性材料。法兰与三通阀本体连接面(上表面)如图5(a)所示。法兰与 GIS 设备壳体连接面(下表面)存在一个橡胶垫片,在使用螺栓固定时垫片被压缩形成一个固定的圆环平面,因此在仿真时将此面作为固定约束,如图5(b)所示。



(a) 法兰与三通阀本体连接面及边界载荷设置



(b) 法兰与GIS设备壳体连接面及固定约束设置

图5 失效三通阀法兰的几何模型

图6为三通阀法兰在服役过程中所受应力的整体分布情况。可见法兰在铆钉连接部位对应位置存在显著的应力集中,且上表面应力大于下表面应力。三通阀法兰的形变分布情况如图7所示,由图可知:法兰中间部分形变不明显,法兰两端形变较为严重,这就导致法兰下部承受压应力,而上部承受拉应力;孔所在位置金属厚度较小,因此法兰的小孔侧为易失效区域,与实际失效情况吻合。

2 结构优化

通过上述分析,在底座上由于垫片及小孔的存在,造成法兰小孔附近部位成为应力集中和受力薄弱区,在不均匀应力和腐蚀的共同作用下导致一侧

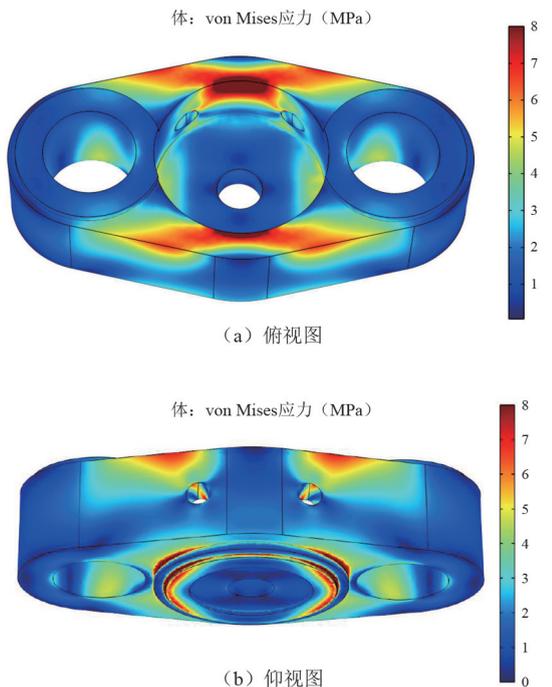


图6 三通阀法兰整体应力分布

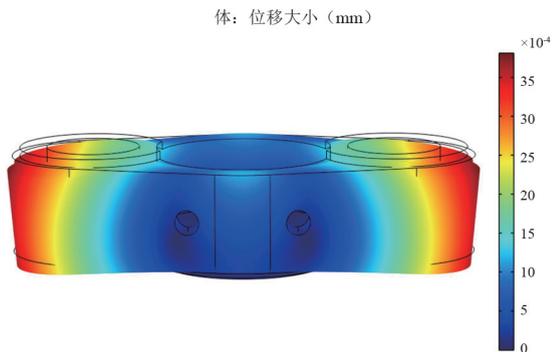


图7 三通阀法兰整体形变分布

先发生断裂失效。进一步,该截面应力全部转移集中到对侧,最终可造成底座的整体断裂甚至脱落。因此为防止法兰发生断裂失效,可以通过去除小孔的方式改进法兰结构,即对法兰和三通阀本体进行一体化设计,改善应力分布降低区域的应力值,降低其断裂失效的风险。计算结果显示,一体化设计后形变情况与初始相差不大,而法兰应力分布的均匀性得到提升,容易开裂部位的应力值降低近 30%。

3 分析讨论

通过法兰的化学成分及显微组织分析可知,法兰盘属于铅黄铜,含 Zn 量为 40.24%,属于高锌 ($w(\text{Zn}) > 30\%$) 黄铜,存在较多脆性 β 相组织,黄铜

在受力状态下易在 β 相内及 α 相、 β 相的晶界处形成应力集中,为裂纹的产生提供内在条件,降低了铜合金的延展性和耐蚀性,易发生脆性断裂。

通过断口能谱分析可知,断口处存在一定比例的 O、S 等腐蚀元素,与三通阀法兰所处的运行环境相吻合,运行环境为腐蚀提供了条件。由法兰本身结构可知,法兰径向厚度较薄处或铆钉孔处为受力薄弱区域,极易应力集中;从法兰安装结构和现场失效法兰应力分布可知,法兰下部承受压应力,而上部承受拉应力,且小孔附近为法兰受力薄弱区,易导致裂纹的产生并沿着从上到下的方式扩展。通过显微组织观察分析,金相组织整体形貌上呈带状分布,法兰内部可能留有残余应力。通过裂纹附近显微组织和断口形貌观察分析,三通阀法兰开裂处晶粒无变形,断口为典型的准解理形貌,属于穿晶脆性断裂,符合典型的高锌黄铜应力腐蚀开裂的断口特征。故而在外力、残余应力、腐蚀介质的共同作用下,法兰在其径向厚度较薄处或铆钉孔处发生了应力腐蚀开裂。

4 结 论

该铅黄铜三通阀法兰长期处于潮湿且有腐蚀性物质的运行环境中,且结构设计和安装方式使其受到较大周向拉应力,在加工过程中法兰内部可能存在残留应力。在设计、制造、装配、运行环境等共同

因素作用下,铅黄铜法兰发生了应力腐蚀断裂或开裂。因此,提出以下建议:

1) 黄铜三通阀进行挤压或冷加工工艺后须进行退火消除内应力,防止残余应力为应力腐蚀提供基础件;

2) 优化三通阀结构设计,将法兰和气管采取一体化设计,减小法兰受力薄弱位置的受力;

3) 因黄铜具有较大应力腐蚀倾向,三通阀法兰运行环境恶劣时,建议用防腐性能较好且具有一定强度的金属材料代替,比如优质的不锈钢和铝合金。

参考文献

- [1] 路俊攀,李湘海.加工铜及铜合金金相图谱[M].长沙:中南大学出版社,2012.
- [2] 李炯辉,林德成.金相图谱下册[M].北京:机械工业出版社,2015.
- [3] 郑宏晔,陈胤桢,裘吕超,等.变压器铅黄铜线夹开裂原因分析[J].热处理,2021,36(1):51-53.
- [4] 张健,刑明军,陈国宏,等.主变黄铜轴销断裂失效分析[J].机械设计,2020,37(S2):133-137.
- [5] 张铭,伍超群,李扬.铅黄铜阀体开裂原因分析[J].材料研究与应用,2009,3(3):200-203.

作者简介:

赵兴虹(1990),女,工程师,从事电网材料检测及失效分析工作。

(收稿日期:2022-07-27)

(上接第 57 页)

- [11] 肖天为,张磊,黄炎光,等.特高频方法用于套管局部放电检测的可行性研究[J].电网技术,2015,39(6):1719-1724.
- [12] AMORIM H P, CARVALHO A T D, RODRIGUES T B, et al. On-site measurements of partial discharges through tap of the bushings-Brazilian experience in power transformers[C]. IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Bologna, IEEE, 2013(12):2010-1023.
- [13] 朱学成,高自伟,姜德胜,等.套管局放 UHF 检测用传感器的必选与应用[J].黑龙江电力,2016,38(3):257-262.
- [14] 唐炬,尹佳,张晓星,等.基于压力和特高频的少油设备绝缘缺陷联合在线监测[J].高电压技术,2020,46(2):546-553.

- [15] 国网四川省电力公司.电力少油设备监测器:201720551103[P].2018-02-09.
- [16] 国网四川省电力公司.电力少油设备监测装置:201720554508[P].2018-06-05.
- [17] 电力行业电力变压器标准化技术委员会.变压器油中溶解气体分析与判断导则:DL/T 722—2014[S].北京:中国电力出版社,2015.
- [18] 全国绝缘子标准化技术委员会.绝缘套管油为主绝缘(通常为纸)浸渍介质套管中溶解气体分析(DGA)的判断导则:GB/T 24624—2009[S].北京:中国标准出版社,2010.

作者简介:

涂彦明(1972),男,硕士,高级工程师,从事高电压技术和电力系统继电保护工作。

(收稿日期:2023-05-19)