

文章编号: 1000-8241(2019)06-0617-06

GIS 壳体焊缝缺陷的安全评定方法

王炯耿¹ 唐夏焘² 罗宏建¹ 郑三龙² 陈冰冰²

1. 国网浙江省电力公司电力科学研究院; 2. 浙江工业大学过程装备及其再制造教育部工程研究中心

摘要: 针对某在役特高压电网 GIS 壳体焊缝发现的缺陷, 引入缺陷断裂安全评定和疲劳评定方法。采用与原壳体相同的材料和焊接工艺制作的焊接试板, 通过试验获得母材和焊缝试样的力学性能、疲劳裂纹扩展及断裂性能。采用 GB/T 19624—2004《在用含缺陷压力容器安全评定》中的推荐方法, 对壳体纵焊缝中两个最大缺陷进行断裂评定和疲劳评估。结果表明: 该 GIS 壳体中的两个缺陷在当前工况下是安全的, 按焊接试板测试的疲劳裂纹扩展速率估算, 壳体左筒体缺陷的疲劳寿命循环次数为 6 971 次, 壳体右筒体缺陷的疲劳寿命循环次数为 37 915 次, 估算的疲劳寿命还有待于实践校验。建议在运行中特别关注缺陷疲劳扩展的状态监测, 约 5 年后应进行无损检测, 并与现缺陷对比, 进行安全评定。评定结果与该设备投用以来的安全运行状态相符, 说明, GB/T 19624—2004 的评定方法可适用于高压电网 GIS 壳体的安全评定。(图 3, 表 7, 参 24)

关键词: 缺陷; GIS 壳体; 5083 铝合金; 安全评定

中图分类号: TM595, TE88

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2019.06.003

Safety assessment method for weld defects of GIS shell

WANG Jiongeng¹, TANG Xiatao², LUO Hongjian¹, ZHENG Sanlong², CHEN Bingbing²

1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute; 2. Engineering Research Center of Process Equipment and Re-manufacturing Ministry of Education, Zhejiang University of Technology

Abstract: In this paper, a method for fracture safety assessment and fatigue assessment was introduced to assess the defects discovered in the welds of GIS shell in one in-service ultra high voltage power system. The weld specimen was prepared from the same material by the same welding technology as the original shell. The properties of the base material and the weld specimen were experimentally measured, including mechanical property, fatigue crack propagation and fracture property. And fracture assessment and fatigue assessment were carried out on two biggest defects in the longitudinal welds of the shell by means of the assessment method stipulated in the Safety Assessment on In-Service Pressure Vessels with Defects (GB/T 19624-2004). It is shown that these two defects in the GIS shell are safe under the current working condition. Then, the fatigue life of the defect was calculated based on the fatigue crack propagation rate of the weld specimen. And the fatigue life of the defect in the left cylinder of the shell is 6 971 cycles, and that in the right cylinder is 37 915 cycles. The estimated fatigue life shall be validated in the future practice. It is recommended to pay much attention to monitoring the fatigue propagation state of defects in the process of operation. And in order to carry out safety assessment, nondestructive testing shall be performed and compared with current defects in the following 5 years. It is concluded that safe operation state of this GIS shell since its commissioning is accordant with the assessment result, so the GB/T 19624-2004 is applicable to the safety assessment of GIS shell in high voltage power system. (3 Figures, 7 Tables, 24 References)

Key words: defects, GIS shell, 5083 aluminum alloy, safety assessment

GIS 是一种先进的高压电气配电装置, 由断路器、隔离开关、接地开关、互感器、避雷器、母线、连接件及出线终端等部件组成, 这些部件封闭在金属接地的外

壳中, 在壳体内部充有 0.4~0.8 MPa 工作压力的 SF₆ 绝缘气体^[1-4]。GIS 壳体在制造过程中可能存在未熔合、未焊透等原始缺陷, 会削弱壳体的承载能力, 在使

用过程中因载荷波动等因素影响,缺陷可能发生疲劳扩展,直至断裂。GIS设备一旦发生事故,停电范围广,修复时间长,对供电系统的影响大^[5-9];同时,SF₆电离产生的氟化物具有高毒性及高污染性,如果发生泄漏,会对人体及环境造成威胁^[10-17]。然而,如果发现缺陷就停机返修或报废等,则会造成巨大经济损失,并且返修过程中电弧气刨、焊接等也会对焊接结构性能产生影响,甚至加速材料劣化。因此,对缺陷进行安全评定以确定其安全状态至关重要。

含缺陷压力容器安全评定标准主要有英国国家标准 BS7910-2013《金属结构裂纹验收评定方法指南》、核电规范 R6-2009《含缺陷结构的完整性评估》、API579-2016《合于使用评价》、WES2805-1997《含缺陷熔焊接头脆性断裂和疲劳裂纹扩展评定方法》以及 GB/T 19624—2004《在用含缺陷压力容器安全评定》等。GB/T 19624—2004《在用含缺陷压力容器安全评定》常规评定采用技术成熟的 R6 通用失效评定图,并结合自身国情进行了创新^[18],在钢制压力容器焊缝缺陷安全评定中发挥了重要作用^[19-22]。在某变电站铝合金特高压 GIS 设备金属监督检验中发现壳体存在若干处焊接缺陷,为了确保电网安全运行,确认该 GIS 壳体在当前工况下缺陷是否会导致泄漏失效,并估算其疲劳扩展寿命,需要对该含缺陷壳体进行安全评定。关于铝合金容器安全评定的相关文献很少,黄雪坤等^[23]采用 R6 对 LF2 铝制压力容器进行失效评定。在此,采用 GB/T 19624—2004 对该 GIS 壳体的两个代表性缺陷进行安全评定,为其运行维护提供决策依据。

1 GIS 壳体缺陷

GIS 母线壳体分为左右两部分(图 1),通过伸缩膨胀节联接成一体。其中,右侧竖直筒名义内径 1 460 mm,壁厚 25 mm;左侧水平筒名义内径 1 032 mm,壁厚 16 mm。使用 26 MG 超声波测厚仪检测壳体壁厚,右侧竖筒最小壁厚 24.69 mm,最大壁厚 25.67 mm;左侧水平筒最小壁厚 15.52 mm,最大壁厚 16.14 mm。基于安全角度考虑,进行安全评定时,壁厚取最小值。GIS 母线壳体左右两侧工作压力均为 0.52 MPa。2013 年对该 GIS 设备的金属监督检验中,采用超声波脉冲反射法检测发现,右侧竖筒纵焊缝有 4 个缺陷,均为链状气孔,将 4 个气孔包络成 1 个整体缺陷,标示为缺陷 1;左侧水

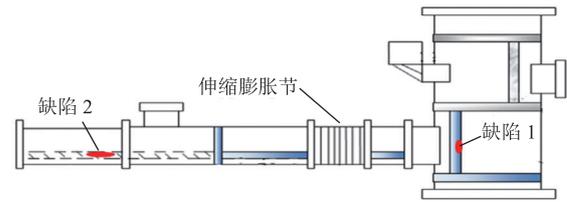


图 1 GIS 壳体结构示意图

平筒纵焊缝有 1 个椭圆形点状缺陷,标示为缺陷 2。该壳体原已按 GB/T 28819—2012《充气高压开关设备用铝合金壳体》验收合格,但因检测出缺陷,故需要对其进行安全评定。

为了更加准确地测量缺陷尺寸,2016 年再次对该 GIS 壳体焊缝进行无损探伤,分别采用了脉冲反射、TOFD、相控阵 3 种方法,因 TOFD 数据监测能力相对更高,缺陷尺寸以 TOFD 检测结果为准(表 1)。

表 1 GIS 壳体缺陷尺寸 TOFD 检测结果

| 缺陷 | 高度/mm | 深度/mm | 长度/mm | 性质 | 方向 |
|----|-------|-----------|-------|------|----|
| 1 | 2.0 | 16.9~18.9 | 14.2 | 平面缺陷 | 纵向 |
| 2 | 3.6 | 7.6~11.2 | 54.0 | 平面缺陷 | 纵向 |

注:表中缺陷深度从外表面算起。

2 GIS 壳体缺陷安全评定

2.1 缺陷评定方法

对于在役含缺陷压力容器,GB/T 19624—2004 规定了断裂安全评定方法和疲劳评定方法。断裂安全评定方法采用失效评定图法,包括简化评定方法和常规评定方法,在此采用常规评定方法。断裂评定所需要的基础数据包括:缺陷类型、尺寸和位置,结构和焊缝的几何形状和尺寸,材料和化学成分、力学和断裂韧度数据,载荷引起的应力和残余应力等。平面缺陷的疲劳评定方法采用断裂力学的 Paris^[24]公式法。疲劳评定所需要的基础数据包括材料疲劳裂纹扩展速率及载荷波动引起的应力波动等。

2.2 缺陷表征

缺陷 1:高度 $h=2$ mm,长度 $l=14.2$ mm,缺陷与壳体表面最小距离 $P_1=5.79$ mm,与壳体另一表面距离 $P_2=16.9$ mm。缺陷 2:高度 $h=3.6$ mm,长度 $l=54$ mm,缺陷与壳体表面最小距离 $P_1=4.32$ mm,与壳体另一表面距离 $P_2=7.6$ mm。根据标准 GB/T19624—2004

第 5.3.1.4 节规定,如果缺陷尺寸满足式(1),缺陷可规则化表示为埋藏椭圆形裂纹。经计算,两处缺陷均可规则化表示为埋藏椭圆形裂纹,缺陷尺寸安全系数取 1.1(图 2, t 为壳体壁厚, L 为规则化裂纹长度, c 为规则化裂纹半长, H 为规则化裂纹高度, a 为规则化裂纹半高)。

$$0.4h \leq P_1 \leq P_2 \text{ 且 } h \leq l \quad (1)$$

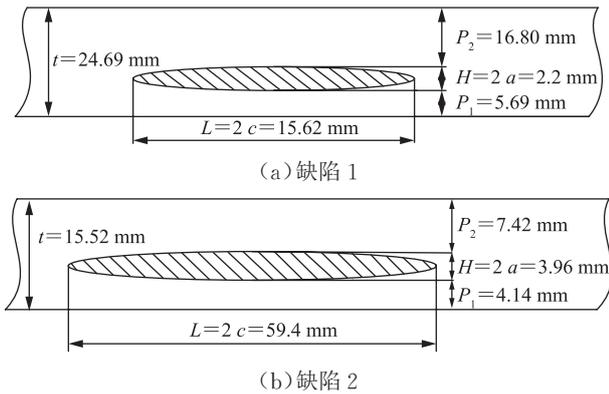


图 2 GIS 壳体缺陷规则化表征后的位置和尺寸示意图

表 2 5083-H112 铝合金所含化学元素的质量分数

| 位置 | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Al |
|----|--------|-------|--------|-------|-------|--------|----------|--------|-----------|
| 母材 | 0.074% | 0.28% | 0.015% | 0.52% | 4.02% | 0.076% | 0.006 5% | 0.017% | 94.991 5% |
| 焊缝 | 0.086% | 0.22% | 0.023% | 0.48% | 4.25% | 0.100% | 0.007 8% | 0.023% | 94.810 2% |

表 3 5083-H112 铝合金母材及焊缝力学性能参数

| 位置 | 屈服强度/ MPa | 抗拉强度/ MPa | 弹性模量/ GPa | 延伸率 | 断面收缩率 |
|----|--------------|--------------|--------------|-----|-------|
| 母材 | 143 | 295 | 62 | 24% | 37% |
| 焊缝 | 141 | 282 | 66 | 26% | 34% |

2.3.2 断裂韧度

壳体材料的断裂韧度参数,采用三点弯曲(Single Edged Notched Bending, SEB)试样按照 ASTM E1820-2015《断裂韧性测量试验方法》单试样法进行室温下的断裂韧度 J_{IC} 试验。母材和焊缝各测得两个有效断裂韧度 J_{IC} 数据,通过式(2)换算成断裂韧度 K_{IC} 进行断裂评定(表 4)。母材与焊缝的断裂韧度比较接近,采用几个试样中最低的断裂韧度 ($56.44 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$)

表 4 5083-H112 铝合金母材与焊缝的断裂韧度

| 位置 | 试样 | $J_{IC}/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2})$ | $K_{IC}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5})$ |
|----|----|--|--|
| 母材 | 1 | 48.45 | 59.28 |
| | 2 | 47.36 | 58.61 |
| 焊缝 | 3 | 48.97 | 59.14 |
| | 4 | 44.60 | 56.44 |

2.3 材料性能

该 GIS 壳体材料为耐蚀性好、焊接性能优良、冷加工性较好并具有中等强度的 Al-Mg-Si 系合金 5083-H112。在役设备的安全评定中需要得知缺陷位置材料的屈服强度、抗拉强度、断裂韧度及疲劳裂纹扩展速率等参数,但从设备上取样获得材料性能参数往往不太现实。为此,由该壳体制造厂制作了与壳体材料、制造工艺相同的焊接试板,已知母材和焊缝化学成分(表 2),分别从该试板母材和焊缝取样,进行力学、裂纹扩展和断裂性能测试,获得相应的性能参数。

2.3.1 常规力学性能

材料的常规力学性能通过室温拉伸方法获得,试样尺寸和试验过程按照 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》进行。根据该材料的力学性能(表 3)可知:铝合金 5083 母材和焊缝的常规力学性能接近,焊缝比母材略小,从安全角度考虑,评估时采用焊缝的力学性能。

作为壳体材料断裂性能的评定指标。

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{J_{IC} E}{(1-\nu^2)}} \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量,MPa; ν 为泊松比。

2.3.3 疲劳裂纹扩展速率

GIS 壳体材料疲劳裂纹扩展速率是其疲劳评定的基础数据。根据 ASTM E647-2015e1《疲劳裂纹扩展速率测量试验方法》,采用标准紧凑拉伸试样进行恒载荷幅正弦波形的疲劳裂纹扩展试验,获得母材和焊缝的疲劳裂纹扩展数据(表 5),裂纹扩展速率 da/dN 与应力强度因子幅 ΔK 的关系可利用 Paris 公式^[22]表示:

$$da/dN = C(\Delta K)^n \quad (3)$$

式中: C 、 n 均为材料常数。

表 5 5083-H112 铝合金母材与焊缝的疲劳裂纹扩展速率测试结果

| 位置 | 试样 | C | n |
|----|----|-----------------------|------|
| 母材 | 1 | 1.16×10^{-8} | 4.06 |
| | 2 | 1.94×10^{-8} | 3.75 |
| 焊缝 | 3 | 1.41×10^{-8} | 3.97 |
| | 4 | 2.29×10^{-8} | 4.04 |

根据表5数据可知:5083铝合金母材与焊缝的疲劳裂纹扩展性能比较接近,评定时采用扩展速率最快的试样4的数据作为材料的疲劳裂纹扩展速率。

2.4 评定结果

对GIS壳体纵焊缝最大的两处缺陷分别进行断裂评定和疲劳评定。该GIS设备的隔离开关和接地开关母线壳体额定压力均为0.5 MPa(20℃,表压),设计压力0.7 MPa,设备操作压力0.52 MPa。对其进行安全评定时,取最高压力0.7 MPa作为评定压力。壳体应力波动取夏季现场测试的缺陷附近的应力波动15 MPa,并按壳体最大温升线性外插值。

2.4.1 断裂评定

采用GB/T 19624—2004中的常规评定方法,根据载荷比 L_r 和断裂比 K_r 为坐标组成的通用失效评定图进行评定。评定图边界曲线(FAC)方程如式(4)所示,右边界垂直线方程如式(5)所示。

$$K_r = (1 - 0.14 L_r^2)(0.3 + 0.7 e^{-0.65 L_r^6}) \quad (4)$$

$$L_{r_{\max}} = 0.5(\sigma_b + \sigma_s) / \sigma_s = 1.5 \quad (5)$$

式中: σ_b 为抗拉强度,MPa; σ_s 为屈服强度,MPa。

由于壳体有伸缩节,轴向变形由伸缩节吸收,因此,壳体的轴向外载不大。一次膜应力 p_m 主要由内压引起,故筒体的环向应力最大,GIS壳体为薄壁圆筒,根据薄膜应力公式计算环向应力 σ_θ :

$$\sigma_\theta = \frac{p(D + t_{\min})}{2 t_{\min}} \quad (6)$$

式中: p 为筒体内压,MPa; D 为筒体内径,mm; t_{\min} 为壳体最小壁厚,mm。

二次膜应力 Q_m 主要由焊接残余应力和热应力引起,焊接残余应力取材料的屈服应力(141 MPa),据现场测试夏季天气晴朗时昼夜温差较大时为10℃左右,壳体缺陷处的实测热应力变化值为15 MPa左右。按该设备所处地区可能最大温差30℃线性外插值,热应力变化值取45 MPa。外观检测错边量不超过2 mm。焊缝中若存在错边,则会产生应力集中,对于平行纵焊缝的缺陷,错边产生的二次弯曲应力 Q_b 按GB/T 19624—2004中表5-3计算。经计算:缺陷1附近 $Q_b/p_m = 0.27$,缺陷2附近 $Q_b/p_m = 0.42$ 。缺陷表征尺寸、断裂韧度、一次应力及二次应力按严重失效后果安全系数分别取1.1、1.2、1.5、1.0。取安全系数后,按常规评定方法评定缺陷基本数据(表6, p_b 为一次弯曲应力)。

载荷比 L_r 是一次应力的施加载荷与屈服极限载

表6 缺陷的常规评定基本数据

| 缺陷 | 表征尺寸/mm | 断裂韧度/ (MPa·m ^{0.5}) | 一次应力/MPa | | 二次应力/MPa | |
|----|--------------|----------------------------------|----------|-------|----------|-------|
| | | | p_m | p_b | Q_m | Q_b |
| 1 | $2a = 2.20$ | 47.03 | 31.57 | 0 | 186 | 5.68 |
| | $2c = 15.62$ | | | | | |
| 2 | $2a = 3.96$ | 47.03 | 35.85 | 0 | 186 | 9.92 |
| | $2c = 59.40$ | | | | | |

荷的比值,表示载荷接近于结构塑性极限载荷的程度。断裂比 K_r 是指施加载荷作用下的应力强度因子与材料断裂韧度的比值。

$$L_r = \frac{3\zeta p_m + p_b + \sqrt{(3\zeta p_m + p_b)^2 + 9[(1-\zeta)^2 + 4\zeta\gamma] p_m^2}}{3[(1-\zeta)^2 + 4\zeta\gamma] \sigma_s} \quad (7)$$

$$K_r = G(K_1^p + K_1^s) / K_p + \rho \quad (8)$$

式中: $\zeta = \frac{2ac}{B(c+B)}$; $\gamma = \frac{p_1}{B}$; G 为相邻两裂纹间弹性干涉效应系数,表征裂纹附近没有其他缺陷,取值1; K_1^p 为一次应力引起的沿裂纹尺寸高度方向的应力强度因子,MPa·m^{0.5}; K_1^s 为二次应力引起的沿裂纹尺寸高度方向的应力强度因子,MPa·m^{0.5}; K_p 为评定材料的断裂韧度,MPa·m^{0.5}; ρ 为塑性修正因子。

根据缺陷评定基本数据,可以得到缺陷1(L_r, K_r) = (0.18, 0.50)与缺陷2(L_r, K_r) = (0.25, 0.69)。将两处缺陷相应的评定参数均绘制在通用失效评定图中(图3,其中由FAC曲线、右边界垂直线以及两直角坐标轴所围成的区域为安全区,该区域之外为非安全区),两处缺陷评定坐标点均位于安全区内,在目前工况下不会发生断裂失效。两处缺陷的载荷比 L_r 均较小,远离载荷比的右极限,表明该壳体存在当前缺陷时强度裕度仍较大。而断裂比 K_r 离评定线边界相对较近,断裂强度裕度相对较小。

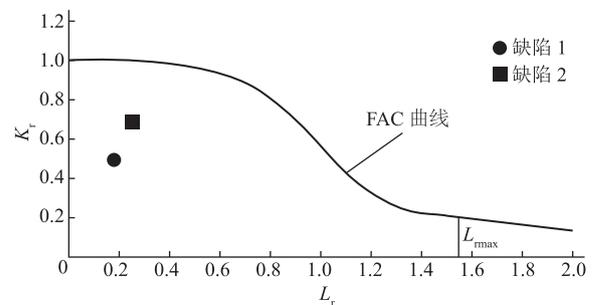


图3 GIS壳体缺陷安全评定的FAD评定图

2.4.2 疲劳评定

工程结构大多承受动态变化的载荷,80%以上的构件失效事故是由疲劳引起的。具有初始裂纹或缺陷

的构件,由于初期缺陷尺寸较小,载荷变化引起的缺陷尖端应力强度因子幅小,裂纹或缺陷在服役前期往往扩展很慢,甚至检测不到明显的裂纹增长,但随着缺陷尺寸的增长,应力强度因子幅也相应增加,裂纹扩展速率随之增加。对在役 GIS 壳体内缺陷进行监测和寿命评估是保障其安全可靠的有效方法。

对于埋藏缺陷,如果其尖端应力强度因子幅 ΔK 在以下范围内(表 7),预期循环次数小于所对应的容许承受循环次数,则该缺陷可免于疲劳评定,认为是安全的或可接受的。

表 7 缺陷免于疲劳评定的判别界限

| $\Delta K/$ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$) | 容许循环 次数 | $\Delta K/$ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$) | 容许循环 次数 |
|--|------------|--|------------|
| 14.55~11.64 | 1 000 | 5.37~3.95 | 20 000 |
| 11.63~8.57 | 2 000 | 3.94~3.19 | 50 000 |
| 8.56~6.77 | 5 000 | 3.18~ ΔK_{th} | 100 000 |
| 6.76~5.37 | 10 000 | 小于 ΔK_{th} | 不限 |

注: ΔK_{th} 为材料疲劳裂纹扩展应力强度因子幅门槛值, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 。

为了掌握该 GIS 壳体受载荷变化的响应情况,对该 GIS 壳体进行多次现场测试,利用应变片、热电偶及千分表分别监测壳体不同部位的应力应变、温度及位移的变化规律。取壳体缺陷处实测最大应力变化值的线性外插值,获得热应力波动 45 MPa 作为应力波动量进行疲劳评估。缺陷 1 附近错边引起的应力集中系数为 1.27,缺陷 2 附近的应力集中系数为 1.42。则可以得缺陷 1 的二次膜应力波动 $\Delta Q_m=57.15$ MPa,缺陷 2 二次膜应力波动 $\Delta Q_m=63.90$ MPa,二次弯曲应力波动 $\Delta Q_b=0$ 。

根据试验数据,用最小二乘法回归得到的裂纹扩展速率方程中的 C 应乘以一个不小于 4 的系数(在此取 5)后作为评定用的 C 值(1.15×10^{-7}), $n=4.04$ 。

根据裂纹尺寸的逐个循环计算式(9),计算每次应力循环后裂纹长度 a_i 。根据断裂力学理论,缺陷 a 方向(短轴方向)应力强度因子最大,裂纹扩展最快,仅对 a 方向进行疲劳评定。

$$a_i = a_{i-1} + C (\Delta K_a)_{i-1}^m \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中: ΔK_a 为裂纹短轴高度方向上的应力强度因子, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 。

根据 GB/T 19624—2004 第 6.1.7.1 节疲劳泄漏评定条件,若埋藏裂纹疲劳扩展最终尺寸 a_f 满足式(10),则不会发生泄漏。

$$\frac{p_1 + a_0 - a_f}{a_f} \geq 0.8, \frac{p_1 + a_0 + a_f}{B} \leq 0.7 \quad (10)$$

式中: a_0 为裂纹初始值, mm。

对于缺陷 1,根据式(10)的临界条件,其埋藏裂纹疲劳扩展最终尺寸 $a_f=2.10$ mm,疲劳寿命循环次数根据式(9)计算为 37 915 次。对于缺陷 2,其埋藏裂纹疲劳扩展最终尺寸 $a_f=3.40$ mm,疲劳循环次数根据式(9)计算为 6 971 次。壳体实际疲劳寿命应在设备实践运行中校验,在设备定期检查时应监测其扩展状态。

根据该 GIS 壳体的无损检测,当前缺陷为制造过程中的原始缺陷。鉴于实际 GIS 壳体检修、维护及可靠性需要,建议运行中应特别关注缺陷状态监测,定期(5 年左右)进行无损检测与评估,关注其疲劳扩展情况。

3 结论

根据 GB/T 19624—2004 的断裂安全评定,该 GIS 壳体两个埋藏缺陷当前是安全的,缺陷不影响在当前工况下的正常使用。根据 GB/T 19624—2004 的疲劳评定方法, GIS 壳体的左右两侧最大缺陷的疲劳寿命循环次数分别为 6 971 次、37 915 次,实际疲劳寿命有待实践校验。设备在以后的运行过程中,应重视监控缺陷的疲劳扩展状态,建议定期检测这些缺陷,并根据无损检测结果对缺陷进行安全评定。

参考文献:

- [1] 林莘. 现代高压电器技术[M]. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2011: 353-364.
LIN X. Techniques of modern high voltage apparatus[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2011: 353-364.
- [2] 郭媛媛, 崔博源, 王承玉, 等. 1100kV/63kA 气体绝缘金属封闭开关设备的研制[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 20-25.
GUO Y Y, CUI B Y, WANG C Y, et al. Development and implementation of gas-insulated metal-enclosed switchgear with breaking capability of 63 kA for 1100 kV AC power transmission project[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 20-25.
- [3] 林莘, 李丹, 徐建源. 800kV GIS 高压开关设备抗震性能分析[J]. 高压电器, 2015, 51(5): 8-13.
LIN X, LI D, XU J Y. Analysis on seismic performance of 800 kV gas insulated switchgear(GIS)[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 8-13.

- [4] 李永祥, 王天正, 李艳鹏, 等. 基于红外成像检漏技术的 GIS 设备气体泄漏异常分析[J]. 高压电器, 2016, 52(7): 185-191.
LI Y X, WANG T Z, LI Y P, et al. Abnormal analysis of GIS electrical equipment gas leakage based on infrared imaging leakage detection technology[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7): 185-191.
- [5] 陈昱同, 郭建宏, 刘杨, 等. 220kV 某 GIS 盆式绝缘子漏气原因分析及处理措施[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 196-200.
CHEN Y T, GUO J H, LIU Y, et al. Leakage analysis and countermeasures for a type of 220 kV GIS disc insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 196-200.
- [6] 陈飞. GIS 设备的发展和应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 22-33.
CHEN F. Investigation of GIS development and application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007: 22-33.
- [7] 何良, 王红梅, 张旭波, 等. 一起 220 kV GIS 设备发热异常检测及解体分析实例[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 236-240, 247.
HE L, WANG H M, ZHANG X B, et al. Detection and disassembly analysis on an abnormal heat fault of 220 kV GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 236-240, 247.
- [8] 李永祥, 王天正, 李艳鹏, 等. 基于红外成像检漏技术的 GIS 设备气体泄漏异常分析[J]. 高压电器, 2016, 52(7): 185-191.
LI Y X, WANG T Z, LI Y P, et al. Abnormal analysis of GIS electrical equipment gas leakage based on infrared imaging leakage detection technology[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7): 185-191.
- [9] 王伟, 冯新岩, 牛林, 等. 利用红外成像法检测 GIS 设备 SF₆ 气体泄漏[J]. 高压电器, 2012, 48(4): 84-87.
WANG W, FENG X Y, NIU L, et al. SF₆ gas leakage detection using infrared imaging method for GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(4): 84-87.
- [10] YUN K D, DENG M X, JIONG C. Insulation performance of CF₃I-N₂ gas mixtures as alternative for SF₆ in GIS/C-GIS[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(9): 2288-2293.
- [11] WOO S Y, JEONG D H, SEO K B, et al. A study on dielectric strength and insulation property of SF₆/N₂ mixtures for GIS[J]. Journal of International Council on Electrical Engineering, 2012, 2(1): 104-109.
- [12] 李旭东, 周伟, 屠幼萍, 等. 0.1~0.25 MPa 气压下二元混合气体 SF₆-N₂ 和 SF₆-CO₂ 的击穿特性[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 260-264.
LI X D, ZHOU W, TU Y P, et al. Breakdown characteristics of binary gas mixture SF₆-N₂ and SF₆-CO₂ under 0.1~0.25 MPa atmosphere pressures[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 260-264.
- [13] 颜湘莲, 王承玉, 季严松, 等. 开关设备中 SF₆ 气体分解产物检测的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 160-165.
YAN X L, WANG C Y, JI Y S, et al. Application of decomposition products detection of SF₆ in switchgears[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 160-165.
- [14] 潘臻, 温定筠, 彭鹏, 等. SF₆ 气体分解产物检测技术在开关类设备状态诊断中的应用[J]. 高压电器, 2016, 52(7): 196-201.
PAN Z, WEN D J, PENG P, et al. Application of SF₆ gas decomposition products detection technology to switchgear state diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7): 196-201.
- [15] 龚尚昆, 陈绍艺, 周舟, 等. 局部放电中的 SF₆ 分解产物及其影响因素研究[J]. 高压电器, 2011, 47(8): 48-51.
GONG S K, CHEN S Y, ZHOU Z, et al. Study on SF₆ decomposition products of partial discharge and its influencing factors[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8): 48-51.
- [16] 鲁钢, 郭江涛, 孙福军, 等. GIS 在局部放电下的 SF₆ 气体分解产物实验研究[J]. 高压电器, 2013, 49(6): 10-16.
LU G, GUO J T, SUN F J, et al. Experimental study on relationship of SF₆ decomposition products and partial discharge in gas insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(6): 10-16.
- [17] 颜湘莲, 王承玉, 宋杲, 等. 气体绝缘开关设备中 SF₆ 气体分解产物检测与设备故障诊断的研究进展[J]. 高压电器, 2013, 49(6): 1-9, 16.
YAN X L, WANG C Y, SONG G, et al. Recent progress in detection of SF₆ decomposition products and fault diagnosis for gas insulated switchgears[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(6): 1-9, 16.
- [18] 钟群鹏, 李培宁, 李学仁, 等. 国家标准《在用含缺陷压力容器安全评定》的特色和创新点综述[J]. 管道技术与设备, 2006(1): 1-5.
ZHONG Q P, LI P N, LI X R, et al. The Summarization of the features and creative ideas of safety assessment of the in-service pressure vessels with defects[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2006(1): 1-5.

(下转第 628 页)

ports: CN102403083A[P]. 2012-04-04.

- [20] 白国义, 夏国发, 王成会, 等. 一种管道端口磁滞缓冲消磁方法: CN102403084A[P]. 2012-04-04.
BAI G Y, XIA G F, WANG C H, et al. A kind of pipeline port magnetic hysteresis buffer demagnetization method: CN102403084A[P]. 2012-04-04.
- [21] 王绍智, 汤海东, 邹波, 等. 长输管道管口消磁装置: CN104842049A[P]. 2015-08-19.
WANG S Z, TANG H D, ZOU B, et al. Pipeline degaussing device for long distance pipelines: CN104842049A[P]. 2015-08-19.
- [22] SHELIKHOV G S. Pipe tools demagnetizing technique for main pipelines[J]. *Materials Evaluation*, 2014, 72(6): 646-651.
- [23] 肖农, 赵龙, 董超兰, 等. 一种优化退磁的管道链式导磁工具: CN204035823U[P]. 2014-12-24.
XIAO N, ZHAO L, DONG C L, et al. An optimized demagnetization for pipe chain magnetic tools: CN204035823U [P]. 2014-12-24.

- [24] 王鹏雁, 唐元生, 闫建义, 等. 管道焊缝消磁防偏吹装置: CN102019492A[P]. 2011-04-20.
WANG P Y, TANG Y S, YAN J Y, et al. Demagnetization anti-bias blowing device for pipeline welds: CN102019492A[P]. 2011-04-20.
(收稿日期: 2018-10-09; 修回日期: 2019-05-06; 编辑: 韩文超)

基金项目: 国家重点研发计划资助项目“国家石油及天然气储备库安全保障技术与装备研发”, 2017YFC0805800; 国家自然科学基金资助项目“海底油气管道封堵致振机理及气动减振控制方法研究”, 51575528; 中国石油管道分公司研发项目“中俄东线管道在线退磁可行性研究”, 20180106.

作者简介: 王维斌, 男, 1972年生, 高级工程师, 2004年博士毕业于北京工业大学材料加工工程专业, 现主要从事油气管道检测技术的研究与应用工作。地址: 河北省廊坊市广阳区金光道51号, 065000。电话: 0316-2072841。Email: wangweibin@petrochina.com.cn

(上接第622页)

- [19] 王爱华. 含表面裂纹Q345C钢焊接接头超低温安全评定[J]. 焊接技术, 2014, 43(5): 64-66.
WANG A H. Ultra low temperature safety assessment of Q345C steel welded joint containing surface crack[J]. *Welding Technology*, 2014, 43(5): 64-66.
- [20] 朱小刚. 高水头电站压力钢管安全评定[D]. 成都: 西南交通大学, 2011: 43-51.
ZHU X G. Study on safety assessment methods of the penstock of the high head hydropower station[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011: 43-51.
- [21] 祁建磊, 路智敏, 赵飞, 等. 含裂纹压力容器的安全评定及强度因子求解[J]. 化工设备与管道, 2016, 53(3): 21-23, 80.
QI J L, LU Z M, ZHAO F, et al. Safety assessment for pressure vessel with crack and solution by using intensity factor[J]. *Process Equipment & Piping*, 2016, 53(3): 21-23, 80.
- [22] 万晋, 陈晨曦, 陈宇慧. 高压加热器焊缝裂纹缺陷安全评定分析[J]. 化工机械, 2016, 43(6): 784-790.
WAN J, CHEN C X, CHEN Y H. Safety assessment of high-

pressure heater with weld cracks[J]. *Chemical Engineering & Machinery*, 2016, 43(6): 784-790.

- [23] 黄雪坤, 王志文, 潘缙梯, 等. LF2铝制压力容器的失效评定[J]. 化工机械, 1996, 23(2): 42-45, 62.
HUANG X K, WANG Z W, PAN J T, et al. The failure assessment LF2 aluminum alloy pressure vessels[J]. *Chemical Engineering & Machinery*, 1996, 23(2): 42-45, 62.
- [24] PARIS P, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1963, 85(4): 528-533.
(收稿日期: 2017-07-09; 修回日期: 2019-05-18; 编辑: 刘朝阳)

作者简介: 王炯耿, 男, 1973年生, 高级工程师, 1995年毕业于武汉水利电力大学焊接工艺及设备专业, 现主要从事电网及电厂设备的无损检测工作。地址: 浙江省杭州市朝晖八区华电弄1号国网浙江省电力公司电力学研究院, 310014。电话: 0571-51211447。Email: wjgxyz@163.com