

# 防火泥涂覆 5052 铝管的快速点蚀穿孔研究

周海飞<sup>1</sup>, 周飞梅<sup>1</sup>, 汤翰博<sup>2</sup>, 孙庆峰<sup>3</sup>, 张杰<sup>1</sup>, 陈明旭<sup>4</sup>, 罗宏建<sup>1</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司 电力科学研究院, 杭州 310014; 2. 三峡大学, 湖北 宜昌 443002;  
3. 浙江省电力锅炉压力容器检验所有限公司, 杭州 310014;  
4. 国网浙江省电力有限公司 台州供电公司, 浙江 台州 318000)

**摘要:** **目的** 对运行仅 3 a 的浙江近海某主变出线气室 GIS 筒体 8 mm 厚铝管 SF<sub>6</sub> 泄漏事故展开研究, 以明确事故原因。 **方法** 通过光谱、金相、表面形貌 (SEM) 与能谱 (EDS)、X 射线衍射 (XRD) 等技术手段, 从材料、结构、环境等角度探讨了该 GIS 筒体铝管点蚀穿孔可能的原因, 并利用电化学测试技术进一步验证了模拟环境的腐蚀性, 据此研究了某防火泥对 5052 铝管快速点蚀穿孔的影响。 **结果** 腐蚀样基材材质为 5052, 与腐蚀铝材紧密接触的防火泥中的总氯质量分数达 24.5%, 按照 GB/T 12007.3—1989, 测得其无机氯质量分数为 3.3%。腐蚀导致的微裂纹密布反过来促进了腐蚀介质的传输。此外, 设备所处区域临海, 2012 年降雨的年均 pH 值低至 4.64, 为明显的酸性雨水, 同年降雨中 Cl<sup>-</sup> 年均浓度高达 1.8 mg/L, 均有利于铝自催化反应的发生。 **结论** 防火泥的高氯含量是导致该 GIS 筒体铝管快速点蚀穿孔的主要原因, 微裂纹结构、酸雨及临海大气环境具有促进作用。

**关键词:** 防火泥; GIS; 铝管; SF<sub>6</sub> 泄漏; 点蚀穿孔; Cl<sup>-</sup>

**中图分类号:** TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)02-0265-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.02.033

## Accelerated Pitting Perforation of 5052 Aluminum Tube with Fireproofing Mud Coating

ZHOU Hai-fei<sup>1</sup>, ZHOU Fei-mei<sup>1</sup>, TANG Han-bo<sup>2</sup>, SUN Qing-feng<sup>3</sup>,  
ZHANG Jie<sup>1</sup>, CHEN Ming-xu<sup>4</sup>, LUO Hong-jian<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310014, China;  
2. China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Zhejiang Electric Power Boiler &  
Pressure Vessel Supervision and Inspection Institute Co. Ltd, Hangzhou 310014, China;  
4. Taizhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Taizhou 318000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the leakage of SF<sub>6</sub> from GIS cylinder 8 mm-thick aluminum tube in air chamber of a main transformer in Zhejiang offshore, which has only operated for 3 a and then determine the cause of the accident. Through the technical means of optical spectrum, metallography, SEM, EDS, and XRD etc, the possible causes of the leakage of SF<sub>6</sub> and

收稿日期: 2019-03-02; 修订日期: 2019-05-15

Received: 2019-03-02; Revised: 2019-05-15

基金项目: 国家电网公司科技项目 (5211DS17001X)

Fund: Supported by State Grid Scientific and Technological Research Program of China (5211DS17001X)

作者简介: 周海飞 (1977—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为输变电设备腐蚀与防护。邮箱: zhouhf@alum.imr.ac.cn

Biography: ZHOU Hai-fei (1977—), Male, Ph. D., Senior engineer, Research focus: power equipment corrosion and protection. E-mail: zhouhf@alum.imr.ac.cn

引文格式: 周海飞, 周飞梅, 汤翰博, 等. 防火泥涂覆 5052 铝管的快速点蚀穿孔研究[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 265-271.

ZHOU Hai-fei, ZHOU Fei-mei, TANG Han-bo, et al. Accelerated pitting perforation of 5052 aluminum tube with fireproofing mud coating[J]. Surface technology, 2020, 49(2): 265-271.

pitting in the aluminum tube were discussed from the aspects of material, structure, environment, etc. Corrosiveness of simulated environment was validated by electrochemical testing. Then, the effect of fireproofing mud on accelerated pitting perforation of 5052 aluminum tube was revealed. The substrate material of corrosion sample was 5052 and the chlorine content of fireproofing mud in contact with the etched sample was up to 24.5wt%. According to the GB/T 12007.3—1989, the inorganic chlorine was about 3.3wt%. The dense microcracks caused by corrosion in turn promoted the transmission of corrosive medium. Furthermore, area where the GIS was located lied on the coast. Annual  $\text{Cl}^-$  content of rainfall was up to 1.8 mg/L in the region in 2012. Rainfall was obviously acidic and had a pH of 4.64 at the same year. Both pH and  $\text{Cl}^-$  content were beneficial to autocatalytic reaction of aluminum. The high chlorine content of fireproofing mud is the main reason for the rapid pitting and perforation of the aluminum tube of the GIS cylinder, and the microcrack structure, acid rain and the coastal atmospheric environment have a promoting effect.

**KEY WORDS:** fireproofing mud; GIS; aluminum tube; leakage of  $\text{SF}_6$ ; pitting perforation;  $\text{Cl}^-$

随着电力设备运行时间的逐渐延长,腐蚀带来的风险越来越大。近年来,变压器<sup>[1]</sup>、接地网<sup>[2]</sup>、继电器<sup>[3]</sup>、换流阀<sup>[4]</sup>、铁塔<sup>[5]</sup>及线路金具<sup>[6]</sup>等的腐蚀失效时有发生,其中,气体绝缘开关设备(Gas insulated switchgear, GIS)在电网建设中具有重要地位<sup>[7]</sup>,其 $\text{SF}_6$ 的泄漏将导致设备内部绝缘性能下降,影响电力设备稳定运行,还会对大气环境造成严重污染<sup>[8]</sup>,所以GIS设备的腐蚀应该受到关注。

2007年,广州芳村220 kV变电站GIS设备的全部75个气室中有24个出现漏气,最终全部GIS设备返厂重造<sup>[9]</sup>。2008年底,常州500 kV晋陵变电站GIS设备发生 $\text{SF}_6$ 气体泄漏<sup>[10]</sup>。近年来,南宁供电局也在各供电部门相继发现部分变电站GIS穿墙套管发生漏气现象<sup>[11]</sup>。上述漏气故障均能找到腐蚀的痕迹,如晋陵变GIS设备的 $\text{SF}_6$ 气体泄漏便是由于雨水浸入而腐蚀密封面“O”形圈造成的<sup>[10]</sup>。

关于铝材腐蚀的研究很多<sup>[12-16]</sup>,如杨大宁等发现海洋环境及化工污染对加速海南电网铝合金刀闸部件腐蚀失效十分明显<sup>[16]</sup>,而浙江省兼具重酸雨、高工业化程度及海洋性气候等环境特征,GIS筒体铝管快速腐蚀致使 $\text{SF}_6$ 泄漏的问题具有一定的典型性。2012年7月,杭州市电力局220 kV某变某出线筒体便发生因铝材腐蚀导致的 $\text{SF}_6$ 泄漏,不得不进行更换处理。但铝材在防火泥中发生快速点蚀穿孔的现象较为特别,内在本质尚未可知。浙江近海某供电公司发现运行仅三年的110 kV某变#1主变出线气室的墙体内部和外部两圈处发生 $\text{SF}_6$ 泄漏,其中一处严重的渗漏点处于靠墙内一圈,不得不进行更换处理。现场发现,墙体把室内、室外隔离,且筒体铝管与墙体缝隙间填充有红棕色防火泥。

本研究基于上述某变主变出线气室GIS筒体铝管发生的 $\text{SF}_6$ 泄漏事故,经光谱与金相分析、腐蚀产物表面形貌(SEM)与能谱(EDS)分析、防火泥EDS及XRD分析,从材料因素、结构因素、环境因素等角度探讨了防火泥对GIS筒体5052铝管快速点蚀穿孔的影响,并利用电化学测试技术对模拟环境的

腐蚀性进行了验证。

## 1 试验

所用防火泥外观如图1所示。通过EDS能谱对防火泥进行元素分析,并参照GB/T 12007.3—1989方法<sup>[17-18]</sup>测试防火泥中的无机氯含量。



图1 所用防火泥外观  
Fig.1 Appearance of fireproofing mud

利用OLYMPUS INNOV X便携式直读光谱仪对腐蚀样进行化学成分分析。在腐蚀坑附近取样,采用蔡司Axiovert 200 MAT金相显微镜对机械抛光样进行金相分析,腐蚀剂为氢氟酸溶液。通过Super 35扫描电子显微镜进行微观形貌与能谱分析。

利用电化学技术测试5052铝管在不同浓度NaCl溶液中的耐蚀性。使用荷兰Autolab电化学工作站;试验在恒温水浴槽中进行。测试采用三电极体系:研究电极为5052铝管,导电面积 $0.38\text{ cm}^2$ ;辅助电极为铂电极;参比电极为饱和甘汞电极。扫描速度 $30\text{ mV/min}$ 。

## 2 结果与讨论

图2为该GIS筒体铝管漏气处外部形貌。经测量,该铝管壁厚约8 mm。可以发现,筒体表面已有多处腐蚀坑,中心最大的一个已贯穿筒壁,坑洞附近凹

凸起伏，可见不平整的腐蚀痕迹。腐蚀种类可判断为点蚀。



图 2 近海某变 GIS 筒体铝管腐蚀穿孔外部形貌  
Fig.2 External morphology of GIS cylinder aluminum tube corroded and perforated in a main transformer in offshore

金属材料腐蚀的原因是多方面的,在此,从材料、结构、环境等方面对台州某变主变出线气室 GIS 筒体铝管点蚀穿孔原因进行探讨。

2.1 材料因素

表 1 为腐蚀样中未腐蚀区域的化学成分分析数据。按设计要求,该 GIS 筒体铝管材质为 5052,测试结果显示材料组成符合国家标准 GB/T 1196—2008<sup>[19]</sup>关于 5052 的要求。

表 1 GIS 筒体铝管光谱成分  
Tab.1 Spectral composition of GIS cylinder

wt%						
Si	Mn	Cr	Al	Cu	Mg	Fe
0.061	0.080	0.188	96.5	0.004	2.88	0.237
0.067	0.049	0.199	97.1	0.006	2.27	0.285

腐蚀坑附近的金相如图 3 所示,可以发现,α(Al)

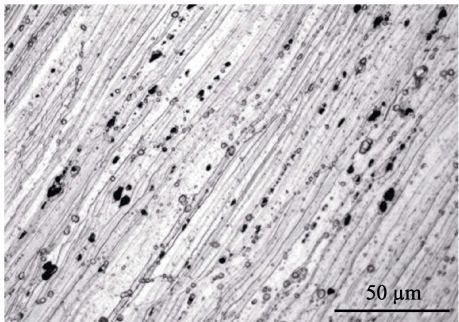


图 3 GIS 筒体金相照片  
Fig.3 Metallographic photo of GIS cylinder

基体上析出相质点,锻件取向明显沿压延方向排列,呈明显的层状,即样本在金相组织上未见有异。作为 Al-Mg 系列的 5052 铝合金虽具有较好的耐蚀性能,但是在盐雾、硝酸盐等环境中依然存在严峻的点蚀风险<sup>[20-21]</sup>。

2.2 结构因素

截取部分铝管腐蚀样本进行表面形貌及能谱分析,结果见图 4、图 5 和表 2。由图 4a 可以直观地看出,腐蚀导致了裂纹的萌生与发展。这些裂纹不仅大大降低了材料强度,也有利于腐蚀介质的传输,为进一步腐蚀创造了条件。杨大宁等<sup>[16]</sup>发现,在海南电网铝合金刀闸杆中也存在类似裂纹。由能谱数据可知,腐蚀产物中含有质量分数 7.50%的氯与质量分数 0.25%的硫。结合图 4b、图 5b 与表 2 可知,腐蚀产物疏松地附着于蚀孔表面,鼓包处的氯质量分数则高至 29.46%,蚀孔内外氧含量的差异也易于引起氧浓差电池形成。

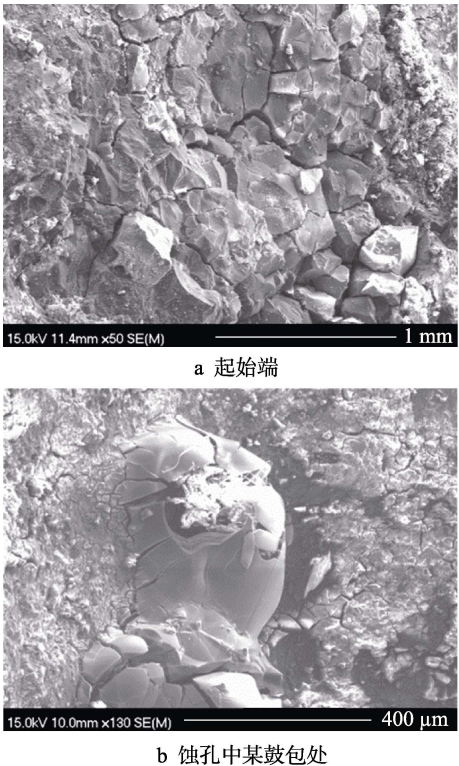


图 4 铝管腐蚀样的表面微观形貌  
Fig.4 SEM images of the corrosive aluminum tube:  
a) starting location; b) bulge in pitting hole

表 2 铝管腐蚀样起始端及鼓包处的 EDS 能谱数据  
Tab.2 EDS spectrum data of the aluminum tube corrosion sample in the starting and the bulging locations

wt%										
Position	O	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca	Fe	P	Total
Starting location	54.76	5.58	30.26	0.12	0.25	7.50	0.38	1.03	0.12	100
Bulginglocation	44.95	0.70	24.88	—	—	29.46	—	—	—	100

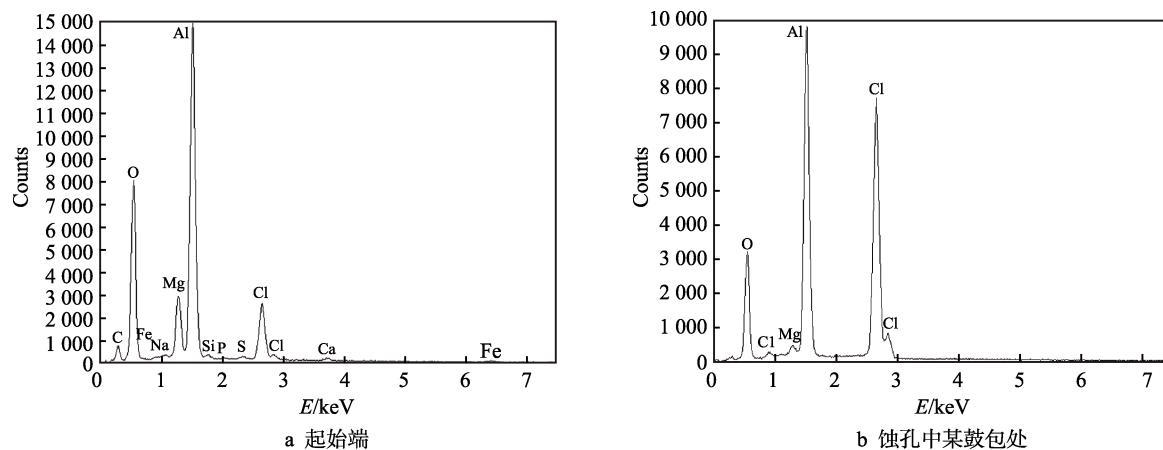


图 5 铝管腐蚀样的 EDS 能谱

Fig.5 EDS of aluminum tube corrosion sample: a) starting location; b) bulge in pitting hole

## 2.3 环境因素

$\text{Cl}^-$ 能明显加速金属材料的腐蚀。两年的现场暴晒数据表明<sup>[26]</sup>, 电镀锌在青岛高  $\text{Cl}^-$ 含量大气环境中的腐蚀速率是西双版纳环境中的 4 倍左右。ISO9223—2012 则明确指出<sup>[27]</sup>,  $\text{Cl}^-$ 与  $\text{SO}_2$  均为造成材料大气腐蚀的重要因素。此外, 硫化物与  $\text{Cl}^-$ 对腐蚀的协同效应早有文献报道<sup>[28-32]</sup>:  $\text{NaHSO}_3$  与  $\text{NaCl}$  混和介质对锌的腐蚀作用远大于单一的  $\text{NaCl}$  介质<sup>[28]</sup>,  $\text{SO}_2$  与  $\text{NaCl}$  同时存在对 AZ91D 的腐蚀远大于两者单独作用的加和<sup>[29]</sup>, 0.143 mg/L 的  $\text{SO}_2$  便使铝合金 1060、2A12 及 7A04 在表面沉积  $70 \mu\text{g}/\text{cm}^2$   $\text{NaCl}$  条件下的腐蚀速率大幅提高<sup>[30]</sup>。

铝合金耐蚀的基础在于其表面的钝化膜, 钝化膜的溶解和再钝化处于动态平衡状态, 当介质中存在活性阴离子时, 平衡即被破坏, 使溶解占优,  $\text{Cl}^-$ 便是促进铝材点蚀发生发展的活性阴离子, 使表面保护膜迅速被破坏<sup>[22-25]</sup>。图 6 所示为铝管腐蚀样 6 处不同腐蚀部位的氯含量 (含起始端与蚀孔中鼓包处), 证明了氯离子的高含量及其浓度梯度。

在发生腐蚀穿孔的 GIS 筒体铝管结构中, 腐蚀产物中的  $\text{Cl}^-$ 具备充足的来源。图 7 为与腐蚀铝管直接接触的防火泥的 EDS 能谱, 对应数据列于表 3, 数据显示防火泥中的氯与硫含量分别为 24.53%与 0.30%。

以下述方法分析防火泥中无机氯的含量: 取防火泥少许,  $105^\circ\text{C}$  下干燥 30 min 后冷却, 切成细丝状, 称取 0.2 g, 参照 GB/T 12007.3—1989<sup>[17,18]</sup>, 用氢氧化钾-乙醇溶液溶解, 经超声搅拌、溶解静置后, 状态如图 8a 所示; 用硝酸银溶液进行滴定, 滴定终点的状态如图 8b 所示。据此测得防火泥中无机氯质量

分数为 3.3%, 该值换算成  $\text{NaCl}$  溶液质量分数即为 5.44%。由能谱数据与无机氯数据可知, 该防火泥中

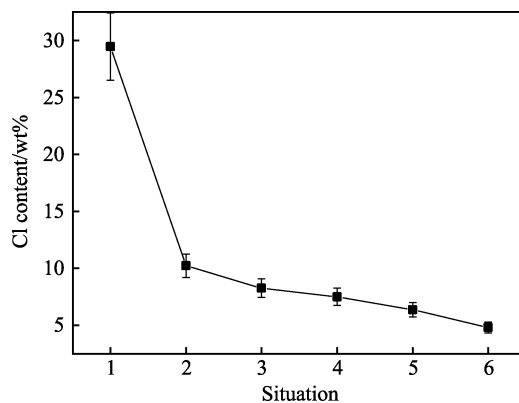


图 6 铝管腐蚀样不同腐蚀部位的氯含量

Fig.6 Chlorine contents in the different parts of aluminum tube corrosion sample

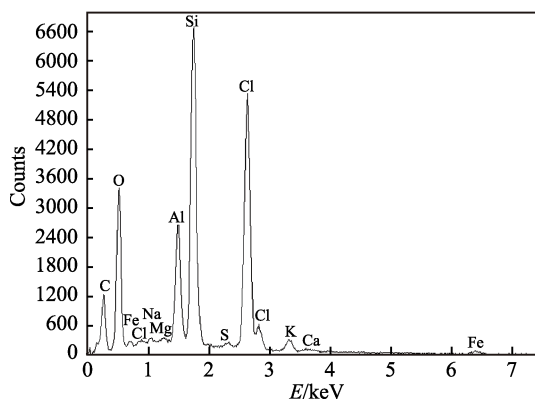


图 7 防火泥的 EDS 能谱

Fig.7 EDS of the fireproofing mud

表 3 防火泥 EDS 能谱数据

Tab.3 EDS spectrum data of the fireproofing mud

Element	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
at%	62.30	0.16	0.14	5.64	14.94	0.21	15.21	0.86	0.10	0.53
wt%	45.61	0.17	0.16	6.96	19.20	0.30	24.53	1.54	0.18	1.34





a 经氢氧化钾-乙醇溶液溶解后      b 经硝酸银滴定后

图 8 防火泥状态

Fig.8 State of the fireproofing mud: a) dissolved with potassium hydroxide-ethanol solution; b) titrated with silver nitrate

有机氯质量分数达 21.23%。

有机氯对腐蚀的影响同样不容忽视，有研究表明，原油中 1 μg/g 的有机氯便可使其形成的 HCl 翻一倍<sup>[33]</sup>，由此可见有机氯对腐蚀的重要影响。防火泥由氯化石蜡、瓷土粉等组成，短链氯化石蜡因对水生物具有很强毒性而禁止使用，中、长链氯化石蜡中位于分子链末端的有机氯则易于脱离而形成无机氯，是 Cl<sup>-</sup>的重要来源。无机氯对腐蚀的作用将用 2.4 小节中的模拟实验进行验证。

此外，大气环境对 GIS 筒体铝管的腐蚀具有辅助作用。腐蚀穿孔的 GIS 筒体位于三面临海的温岭市，据浙江省环境监测中心提供的数据显示，温岭市 2012 年降雨的年均 pH 值低至 4.64，为明显的酸性雨水，同年降雨中 Cl<sup>-</sup>年均质量浓度高达 1.8 mg/L，大气中 SO<sub>2</sub> 年均质量浓度为 0.016 mg/m<sup>3</sup>。潮湿且含硫的海洋性大气及长年累月的酸雨，必然会加剧 GIS 筒体铝管的腐蚀。

2.4 模拟环境腐蚀性验证

如前所述，该防火泥中无机氯含量与 5.44%NaCl 溶液中的 Cl<sup>-</sup>相当，故利用电化学技术测试 5052 在 5.44%NaCl 溶液中的耐蚀性，以验证该防火泥中的无

机氯对 5052 的腐蚀性。

图 9 为铝管腐蚀样在 5.44%和 3.5%NaCl 溶液中的极化曲线，对应的塔菲尔拟合数据列于表 4。数据显示，随着 NaCl 溶液由 3.5%提高至 5.44%，体系的自腐蚀电位  $E_{\text{corr}}$  由 -1.11 V 降低至 -1.21 V，说明其耐腐蚀能力因 NaCl 溶液浓度提高而下降，自腐蚀电流密度  $J_{\text{corr}}$  由 2.05 μA/cm<sup>2</sup> 增大至 5.49 μA/cm<sup>2</sup>，年腐蚀速率  $V_{\text{corr}}$  提高近 3 倍，由 0.066 mm/a 增加至 0.176 mm/a，印证了点蚀随 Cl<sup>-</sup>浓度加大而加速的观点<sup>[34]</sup>。由图还可看出，Cl<sup>-</sup>浓度的提高使得维钝电位对应的腐蚀电流明显提高，一旦超过点蚀电位（约 -0.8 V），腐蚀电流急速增大。如在稍正于点蚀电位的 -0.65 V 时的腐蚀电流密度达 2.624×10<sup>3</sup> μA/cm<sup>2</sup>，高于自腐蚀电流密度  $J_{\text{corr}}$  上千倍，再辅以硫化物、腐蚀性大气及酸雨等次要环境因素的协同作用，8 mm 壁厚的 5052 铝管 3 a 左右发生腐蚀穿孔是完全有可能的。

外部 Cl<sup>-</sup>向孔内迁移、富集，孔内外形成氧浓差电池（表 2 中氧含量数据）等，均有利于铝自催化反应的发生（如式(1)所示），从而使腐蚀不断发展<sup>[34]</sup>。

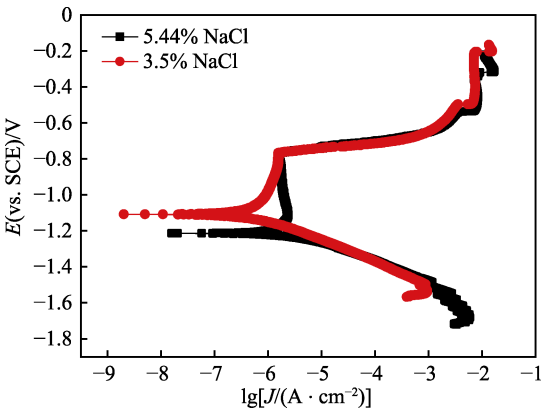
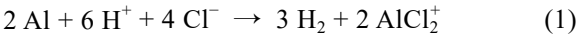


图 9 腐蚀铝管样在 5.44%及 3.5%NaCl 溶液中的极化曲线  
Fig.9 Polarization curves of aluminum tube corrosion sample in 5.44% and 3.5% NaCl solution

表 4 极化曲线对应数据

Tab.4 Corresponding data of the polarization curves

Solution	$E_{\text{corr}}/\text{V}$	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$C_a\text{ beta}/\text{V}$	$A_n\text{ beta}/\text{V}$	$V_{\text{corr}}/(\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$
5.44%NaCl	-1.2116	5.49	0.0649	1.571	0.176
3.5%NaCl	-1.1084	2.05	0.1250	0.906	0.0659

3 结论

1) 浙江近海某变主变出线气室 GIS 筒体铝管的 SF6 泄漏由铝管的快速点蚀穿孔造成。

2) 总氯质量分数达 24.5%、无机氯质量分数达 3.3%的防火泥是 5052 铝管点蚀快速发生与发展的主要原因，该铝材腐蚀后的微裂纹结构、pH 值低至 4.64

的酸雨及临海大气环境等辅助因素，进一步促进了腐蚀的发展过程。

3) 与 3.5%NaCl 溶液比较，防火泥中的无机氯使 5052 铝材的自腐蚀电位降低，自腐蚀电流密度增大，年腐蚀速率增大近 3 倍，维钝电位下的腐蚀电流明显提高，超过点蚀电位后的腐蚀电流急速增大。

4) 防火泥中大量存在的有机氯为无机氯的腐蚀提供了充足来源。

## 参考文献:

- [1] 周淦, 饶俊星, 陈瑶, 等. 缓蚀剂 BTA 对变压器热老化油硫腐蚀的影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 203-210.  
ZHOU Quan, RAO Jun-xing, CHEN Yao, et al. The influence of corrosion inhibitor BTA on sulfur attack of transformer oil[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2016, 31(4): 203-210.
- [2] 王晓宇, 何为, 杨帆, 等. 基于微分法的接地网拓扑结构检测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 73-78.  
WANG Xiao-yu, HE Wei, YANG Fan, et al. Topology detection of grounding grids based on derivative method[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2015, 30(3): 73-78.
- [3] 王召斌, 翟国富, 黄晓毅. 电磁继电器贮存期接触电阻增长的动力学模型[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 205-211.  
WANG Zhao-bin, ZHAI Guo-fu, HUANG Xiao-yi. Kinetic model of resistance increment of electromagnetic relay in storage[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2012, 27(5): 205-211.
- [4] 段涛, 杨斌, 李贤庆, 等.  $\pm 500$  kV 换流站阀水冷系统隐患分析治理[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 132-138.  
DUAN Tao, YANG Bin, LI Xian-qing, et al. Analysis of potential dangers in  $\pm 500$  kV converter station valve water cooling system[J]. Power system protection and control, 2014, 42(18): 132-138.
- [5] 陈彤, 庄建煌, 黄伟林, 等. 输电线路镀锌铁塔塔脚局部腐蚀失效分析及防护[J]. 中国电力, 2015, 48(5): 139-143.  
CHEN Tong, ZHUANG Jian-huang, HUANG Wei-lin, et al. Corrosion failure analysis and protection for tower foot of hot galvanized transmission tower[J]. Electric power, 2015, 48(5): 139-143.
- [6] 张秀丽, 柯睿, 杨跃光, 等. 酸性湿沉降区域 500 kV 输电线路金具缺陷机理分析及防范措施[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 223-232.  
ZHANG Xiu-li, KE Rui, YANG Yue-guang, et al. Mechanism analysis and prevention countermeasures of hardware defects on 500 kV transmission lines of acid wet subsidence areas[J]. High voltage engineering, 2016, 42(1): 223-232.
- [7] 胡榕, 崔翔, 陈维江, 等. 特高压气体绝缘开关设备瞬态外壳电压特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5244-5258.  
HU Rong, CUI Xiang, CHEN Wei-jiang, et al. Experimental research on the characteristics of transient enclosure voltage in ultra high voltage gas insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5244-5258.
- [8] 王伟, 冯新岩, 牛林, 等. 利用红外成像法检测 GIS 设备  $\text{SF}_6$  气体泄漏[J]. 高压电器, 2012, 48(4): 84-87.  
WANG Wei, FENG Xin-yan, NIU Lin, et al.  $\text{SF}_6$  gas leakage detection using infrared imaging method for GIS[J]. High voltage apparatus, 2012, 48(4): 84-87.
- [9] 李刚. 芳村站 GIS 设备漏气与湿度超标原因分析[J]. 高压电器, 2008, 44(4): 359-361.  
LI Gang. Analysis on gas leakage and overproof moisture in the gas-insulated metal-enclosed switchgear to Fangcun substation[J]. High voltage apparatus, 2008, 44(4): 359-361.
- [10] 杨振宇, 何正兴, 俞澄一. 晋陵变 220 kV GIS 的漏气检修及其相关问题[J]. 高压电器, 2010, 46(6): 93-97.  
YANG Zhen-yu, HE Zheng-xing, YU Cheng-yi. Trouble-shooting of 220 kV GIS leakage in Jinling substation and the effect on local grid[J]. High voltage apparatus, 2010, 46(6): 93-97.
- [11] 毛学飞. 变电站 GIS 穿墙套管腐蚀漏气现象分析[J]. 广西电力, 2013, 157(5): 114-115.  
MAO Xue-fei. Analysis of corrosion leak about GIS wall bushing in substation[J]. Guangxi electric power, 2013, 157(5): 114-115.
- [12] XIAO Bing, WANG Dong-po, CHENG Fang-jie, et al. Oxide film on 5052 aluminium alloy: its structure and removal mechanism by activated  $\text{CsF-AlF}_3$  flux in brazing[J]. Applied surface science, 2015, 337: 208.
- [13] ANAS N M, QUAH W L, ZUHAILAWATI H, et al. Effect of immersion duration in liquid nitrogen for cryorolled A5052 aluminium sheet alloy[J]. Procedia chemistry, 2016, 19: 241.
- [14] AMULYA B P, SATYABRAT D, BHARAT B J, et al. Effect of Al-5Ti-1B grain refiner on the microstructure, mechanical properties and acoustic emission characteristics of Al5052 aluminium alloy[J]. Journal of materials research and technology, 2015, 4(2): 171.
- [15] 孙飞龙, 李晓刚, 卢琳, 等. 5052 和 6061 铝合金在中国南海深海环境下的腐蚀行为研究[J]. 金属学报, 2013, 49(10): 1219-1226.  
SUN Fei-long, LI Xiao-gang, LU Lin, et al. Corrosion behavior of 5052 and 6061 aluminum alloys in deep ocean environment of South China Sea[J]. Acta metallurgica sinica, 2013, 49(10): 1219-1226.
- [16] 杨大宁, 董凯辉, 符传福, 等. 海南电网刀闸铝合金部件腐蚀失效分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2016, 28(1): 82-87.  
YANG Da-ning, DONG Kai-hui, FU Chuan-fu, et al. Corrosion failure analysis on Al-alloy parts of knife switches in Hainan power grid[J]. Corrosion science and protection technology, 2016, 28(1): 82-87.
- [17] GB/T 12007.3—1989, 环氧树脂总氯含量测定方法[S]. GB/T 12007.3—1989, Epoxide resins—Determination of total chlorine content[S].
- [18] 黄逸东, 陈丰. TGIC 中总氯含量的测定和分析[J]. 涂料工业, 2012, 42(8): 54-56.  
HUANG Yi-dong, CHEN Feng. Determination and analysis of total chlorine content in TGIC[J]. Paint & coatings industry, 2012, 42(8): 54-56.

- [19] GB/T 1196—2008, 重熔用铝锭[S].  
GB/T 1196—2008, Aluminium ingot for remelting[S].
- [20] 刘海霞, 杜向前, 段继周, 等. 天然海水微生物对 5083 铝合金初期腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2016, 28(1): 51-57.  
LIU Hai-xia, DU Xiang-qian, DUAN Ji-zhou, et al. Effect of microorganism on initial corrosion behavior of 5083 aluminum alloy in natural seawater[J]. Corrosion science and protection technology, 2016, 28(1): 51-57.
- [21] MEHDI F N, MOHAMMAD H S, MEHDI E. On the chloride-induced pitting of ultra fine grains 5052 aluminum alloy produced by accumulative roll bonding process[J]. Journal of alloys and compounds, 2011, 509(14): 4696-4700.
- [22] 董超芳, 生海, 安英辉, 等.  $\text{Cl}^-$ 作用下 2A12 铝合金在大气环境中腐蚀初期的微区电化学行为[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(7): 878-883.  
DONG Chao-fang, SHENG Hai, AN Ying-hui, et al. Local electrochemical behavior of 2A12 aluminium alloy in the initial stage of atmospheric corrosion under  $\text{Cl}^-$  conditions[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(7): 878-883.
- [23] 周育红, 郑利民, 郭兴华, 等. 工业纯铝在模拟海水中的电化学腐蚀行为[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(12): 58-63.  
ZHOU Yu-hong, ZHENG Li-min, GUO Xing-hua, et al. Electrochemical corrosion behavior of industrial pure aluminum in simulated seawater[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(12): 58-63.
- [24] 王彬彬, 王振尧, 曹公望, 等. 2024 铝合金在中国西部盐湖大气环境中的局部腐蚀行为[J]. 金属学报, 2014, 50(1): 49-56.  
WANG Bin-bin, WANG Zhen-yao, CAO Gong-wang, et al. Localized corrosion of aluminum alloy 2024 exposed to salt lake atmospheric environment in western China[J]. Acta metallurgica sinica, 2014, 50(1): 49-56.
- [25] WANG Xue-hui, WANG Ji-hui, FU Cong-wei. Characterization of pitting corrosion of 7A60 aluminum alloy by EN and EIS techniques[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24:3907.
- [26] 逢昆, 郝文魁, 吴俊升, 等. 海洋大气环境中电镀锌板的腐蚀行为与机理[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2016, 28(3): 221-228.  
PANG Kun, HAO Wen-kui, WU Jun-sheng, et al. Corrosion behavior of field-exposed electrogalvanized steel plate in marine atmosphere[J]. Corrosion science and protection technology, 2016, 28(3): 221-228.
- [27] ISO 9223—2012, Corrosion of metals and alloys—Corrosivity of atmospheres—Classification, determination and estimation[S].
- [28] 王振尧, 于国才, 郑逸苹, 等. 锌的加速腐蚀与大气暴露腐蚀的相关性研究[J]. 环境技术, 1999, 19(4): 239-244.  
WANG Zhen-yao, YU Guo-cai, ZHEN Yi-ping, et al. Investigation on interrelation of accelerated corrosion testing and atmospheric exposure of zinc[J]. Environmental technology, 1999, 19(4): 239-244.
- [29] 林翠, 李晓刚. NaCl 沉积和  $\text{SO}_2$  污染对镁合金初期大气腐蚀行为的影响[J]. 北京科技大学学报, 2004, 16(5): 524-528.  
LIN Cui, LI Xiao-gang. Atmospheric corrosion initial stages of magnesium alloy in the presence of NaCl and  $\text{SO}_2$ [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2004, 16(5): 524-528.
- [30] 周和荣, 李晓刚, 董超芳, 等. 铝合金在模拟  $\text{SO}_2$  污染大气环境中的腐蚀行为[J]. 航空材料学报, 2008, 28(2): 39-45.  
ZHOU He-rong, LI Xiao-gang, DONG Chao-fang, et al. Corrosion behaviors of aluminum alloys in simulated  $\text{SO}_2$  pollute atmosphere[J]. Journal of aeronautical materials, 2008, 28(2): 39-45.
- [31] 屈庆, 严川伟, 张雷, 等. NaCl 和  $\text{SO}_2$  在 A3 钢初期大气腐蚀中的协同效应[J]. 金属学报, 2002, 38(10): 1062-1066.  
QU Qing, YAN Chuan-wei, ZHANG Lei, et al. Synergism of NaCl and  $\text{SO}_2$  in the initial atmospheric corrosion of A3 steel[J]. Acta metallurgica sinica, 2002, 38(10): 1062-1066.
- [32] ŠEKULARAC G, INGRID M. Corrosion of aluminium alloy AlSi7Mg0.3 in artificial sea water with added sodium sulphide[J]. Corrosion science, 2018, 144(11): 54-73.
- [33] 韩磊, 刘小辉. 炼油生产中有有机氯的检测与控制[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(3): 227-231.  
HAN Lei, LIU Xiao-hui. Detection and control of organic chloride in oil refining[J]. Corrosion and protection, 2011, 32(3): 227-231.
- [34] 杨德钧, 沈卓身. 金属腐蚀学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.  
YANG De-jun, SHEN Zhuo-shen. Corrosion science of metal[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999.