高压直流换流阀均压电极的结垢机理研究

国建宝[1]，崔鹏飞[1]，关胜利[2]，汪广武[2]，王海军[1]，陈建业[3]，
黄克峰[2]，耿曼[2]，傅宇湘[2]，杨伟龙[2]，吴安兵[2]，邓龙龙[1]

（1.中国南方电网有限责任公司 超高压输电公司检修试验中心，广州 510663；2.广州高澜节能技术股份有限公司，广州 510663；3.清华大学 电机工程与应用电子技术系，北京 100084）

摘 要：目的 通过研究换流阀冷却系统均压电极结垢机理，分析结垢的过程、影响因素、形成规律，总结结垢的根本原因，再根据分析结论提出均压电极腐蚀结垢的综合整治措施，形成改进技术方案。**方法** 先通过文献分析国内外均压电极研究进展并进行总结，找出均压电极结垢的相关影响因素，通过试验验证，明确均压电极结垢的主要过程和影响结垢的主要因素，最后根据试验结果提出合理的抑制或减轻结垢的措施。**结果** 均压电极结垢的主要影响因素是铝制散热器的电化学腐蚀及流体冲刷腐蚀，腐蚀产物在均压电极部位汇聚、沉积，导致结垢。结垢过程为：散热器内表面发生的化学腐蚀以及流体喘振造成的磨损腐蚀二者协同，相互加强，致使铝元素转化为离子形态进入循环系统冷却介质中，并在均压电极电场作用下吸附至电极表面，从而在电极表面形成结垢。**结论** 均压电极结垢与水冷系统的电化学腐蚀和流体冲刷有关，采用深度除盐水质精处理的方式去除冷却水中的致垢离子，能有效减缓均压电极的结垢。

关键词：换流阀；均压电极；腐蚀；结垢；机理

中图分类号：TG172 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2019)10-0285-07

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.10.035

Study on Scaling Mechanism of Piezoelectric Balance Electrode of HVDC Converter Valve

***GUO Jian-bao*[1], *CUI Peng-fei*[1], *GUAN Sheng-li*[2], *WANG Guang-wu*[2], *WANG Hai-jun*[1], *CHEN Jian-ye*[3], *HUANG Ke-feng*[2], *GENG Man*[2], *FU Yu-xiang*[2], *YANG Wei-long*[2], *WU An-bing*[2], *DENG long-long*[1]**

(1.Maintenance & Test Center of CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China;
2.Goaland Energy Conservation Tech. Co. Ltd, Guangzhou 510663, China;
3.Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: By studying the scaling mechanism of equalizing electrodes in the cooling system of converter valves, the scaling process, influencing factors and forming rules are analyzed, and the basic causes of corrosion and scaling are summarized. Based on the results of the research, the comprehensive treatment measures for scaling of equalizing electrodes are formed to improve the technical scheme. Through literature analysis and summary of the research progress of equalizing electrodes at

收稿日期：2019-05-07；修订日期：2019-07-11

Received：2019-05-07；**Revised**：2019-07-11

基金项目：南网超高压输电公司科技项目（CGYKJXM20160093）

Fund：Supported by Scientific Research Project of CSG EHV Power Transmission Company (CGYKJXM20160093)

作者简介：国建宝（1981—），男，硕士，高级工程师，主要从事直流输电工程换流阀控制保护技术研究及技术监督工作。

Biography：GUO Jian-bao (1981—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: control protection research and technical supervision for converter valves in HVDC transmission projects.

通讯作者：耿曼（1982—），女，硕士，高级工程师，主要从事直流输电工程换流阀冷却技术研究工作。

Corresponding author：GENG Man (1982—), Female, Master, Senior engineer, research focus: cooling technology for converter valves in HVDC transmission projects.

home and abroad, find out the related factors of scaling of equalizing electrodes, and then through test verification, clear the main process of scaling of equalizing electrodes and the main factors affecting scaling. Finally, according to the experimental conclusions, put forward reasonable anti-corrosion measures to inhibit or reduce scaling. The results show that the main factors affecting scaling of equalizing electrodes are electrochemical corrosion and fluid erosion corrosion of aluminum radiators. The corrosion products converge and deposit at the equalizing electrodes, resulting in scaling. The scaling process is as follows: the chemical corrosion on the inner surface of radiator and the wear corrosion caused by fluid surge are synergistic and mutually reinforcing, resulting in the transformation of aluminum elements into ionic forms and entering the cooling medium of circulating system, which are adsorbed to the surface of the electrode due to the electric field of the equalizing electrode, and over time, the formation of a junction on the surface of the electrode. Scaling of equalizing electrodes is related to electrochemical corrosion and fluids scouring in water cooling system. Scaling ions in cooling water can be removed by deep desalination, which can effectively slow down scaling of equalizing electrodes.

KEY WORDS: Converter valve, Piezoelectric equalizing electrode, Corrosion, Scaling Mechanism

换流阀是超高压直流输电（HVDC）的核心设备[1]，它在正常工作时会释放出大量的热。工程上一般配置相应的换流阀冷却系统[2]，将热量转移出去，确保换流阀处在安全的工作状态。换流阀冷却系统分为内冷却系统和外冷却系统[3]，内冷却系统的冷却介质采用低电导率的去离子水，为避免系统管道、散热器等材质的影响，设置去离子交换装置作为旁路实时循环净化水质，由于内冷却系统各部件所采用的不同金属材质，水质必然受到离子溶度的影响，同时内冷水环境条件，如温度、含氧量、流速等，导致内冷却系统也会发生微弱的腐蚀[4]，日积月累，最终导致均压电极结垢、管路堵塞、漏水，甚至引起直流闭锁或紧急停运事故，给电网安全稳定运行造成隐患。研究分析均压电极结垢机理，对于高压直流工程可靠性设计和高压直流工程现场运行维护具有重大实践指导意义。

当前国内外已投运的高压直流换流阀冷却系统中均发生过腐蚀和结垢问题，很多机构针对该问题组织了相关的探索性研究。国内通过对广州换流站换流阀均压电极垢样分析认为：均压电极结垢主要成分是铝的氧化物，主要由铝质散热器的腐蚀产物经长期沉积而形成。目前采取的处理办法是人工除垢，即取出电极后机械清除垢质，同时加强对内冷水的水质监测[5]。通过对肇庆换流站换流阀均压电极结垢问题的研究，发现内冷水中的树脂粉末是导致铝合金散热器腐蚀的主要原因，因此在其管路中增加了旁路过滤器，目的在于减少树脂粉末侵入内冷水中，但效果不明显[6]。通过对铝散热器腐蚀量估算，认为铝散热器腐蚀是引起均压电极结垢，导致冷却水管路堵塞和均压电极密封垫圈泄漏的主要原因[7]。

均压电极结垢在国际上也引起广泛关注，国外有学者提出添加 CO_2 防止均压电极结垢思路[8]。有研究人员认为，树脂粉末释放碱性物质（如 OH^-）造成 Al_2O_3 钝化膜的稳定性被破坏，这是均压电极结垢的根本原因，因此在新树脂使用时应加强冲洗，去除新树脂中树脂粉末[9]，并且离子交换树脂脱盐装置需要进一步提高水的纯度，严格控制水的酸碱度和电导率，尽量消除微量的有机杂质，并防止树脂泄露，具体手段包括提高位于脱盐混床出水管道过滤器的过滤细度等[10-11]。还有研究人员对均压电极表面垢样成分进行分析，发现垢样中绝大多数成分为三羟基铝石和三水铝石，是铝合金的腐蚀产物，因此认为均压电极结垢的根本原因在于晶闸管铝合金散热器的腐蚀，但其结垢原因尚不明确[12-14]。

综上所述，目前业界对于换流阀内冷水系统中的腐蚀和结垢研究还停留在腐蚀机理的探究方向。本文拟通过理论研究铝散热器腐蚀、均压电极结垢形成机理，分析腐蚀与结垢的发生过程、影响因素、形成规律，总结分析腐蚀结垢的根本原因和影响因素。

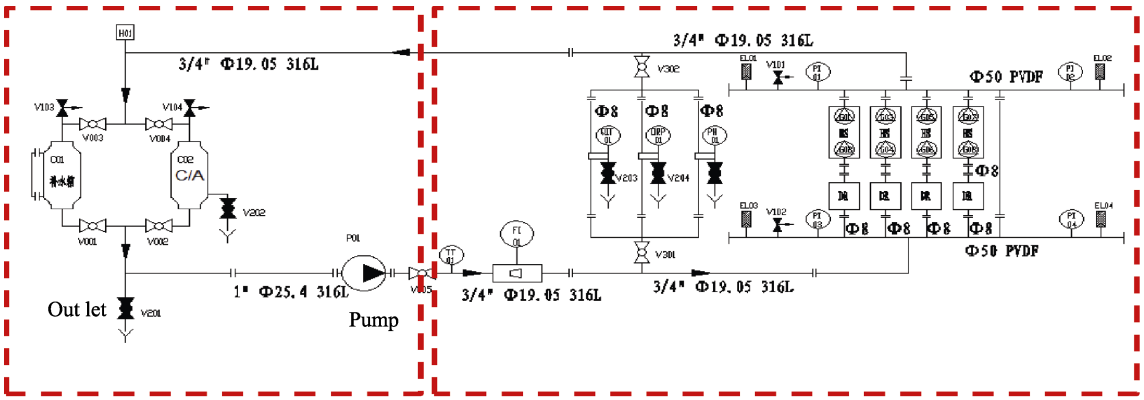
1 实验与方法

1.1 实验原料

实验过程中所涉及到的水冷散热器为 6063 铝合金，其组分及含量（以质量分数计为）：Si 0.40%~0.9%，Fe≤0.35%，Cu≤0.35%，Mn≤0.50%，Mg 0.40%~0.8%，Cr≤0.30%，Zn≤0.25%，Ti≤0.10%，Al 余量。

1.2 试验方法

模拟直流换流站密闭式内冷水循环系统，如图 1 所示。通过搭建试验平台，控制水的流量、温度等模拟现场运行环境，验证重现结垢现象，同时实时监控记录 pH、电导率、氧化还原电位、均压电极泄漏电流、溶解氧、施加直流电压等数据。经过多个周期的运行，观察铝制水冷散热器、均压电极结垢程度，检测主回路（包括离子交换器进出水）阴阳离子浓度，检测结垢产物。试验条件：电压 3 kV，电流 250 μA。水循环的技术参数如表 1 所示。通过多个周期的运行以后，铝制水冷散热器内部结垢情况如图 2 所示。



a 水循环单元　　b 换流阀模拟单元

图 1　水循环工艺流程

Fig.1 Flow chart of water circulation process

表 1　技术参数表

Tab.1 Technical parameter table

Serial number	Name	Parameter
1	Flow of each branch	4~6 L/min
2	Rated flow rate of main pipe	24 L/min
3	Minimum inlet valve temperature	20 ℃
4	Maximum inlet valve temperature	50 ℃
5	Cable specification	(3×35+2×16) mm^2
6	Influent water quality	Conductivity< 10 μS/cm
7	Specification of inlet and outlet pipe	3/4" rubber hose
8	Interface size	3/4"



图 2　均压电极结垢图

Fig.2 Scaling diagram of piezoelectric balance electrode

2　水冷散热器腐蚀机理

2.1　均压电极

由于在换流阀阀段中，由几个晶闸管和与之并串联的均压电阻、电容组成了换流阀组件，每个晶闸管位于两个铝制散热器之间，阀段所承受的电压几乎平均分配到晶闸管上，其中晶闸管两端的铝质水冷散热器之间电压差为晶闸管的分担电压[15-16]。换流阀水冷系统冷却介质虽然采用去离子水，仍然无法避免冷却介质中离子的存在，晶闸管在阻断状态时，阀段不同电位间配水管路产生漏电流，漏电流的计算方法按照公式（1）计算[17]。

$$I=\frac{\sigma UA}{L} \tag{1}$$

式中：I 为泄露电流（mA）；σ 为水的电导率（μS/cm）；U 为层间电压（kV）；A 为管道截面积（m^2）；L 层间管道距离（m）。

为了防止漏电流引发金属器件电解腐蚀，在阀段两端的冷却水管道中安装铂制均压电极，但是并非所有的水冷散热器都安装均压电极，所以在整个阀段范围内，除了两端的散热器外，电位不相同的水冷散热器间会发生电化学反应[18]。如图 3 所示，L1—L4 分别表示阀层 4 个电抗器，E3—E10 表示阀层 8 个均压电极，V1—V26 表示晶闸管，S 表示阀层散热器，Z、A 分别表示阀层进、出水管，R1—R26 表示水冷电阻，L1Z、L1A 分别表示流经电抗器的进、出水管。在现有的研究中，通过对内冷水系统中均压电极上和堵塞位置的垢质以及补充水水质进行分析，确定铝散热器是腐蚀产物的主要来源[18]。

2.2　水冷散热器电化学腐蚀

水冷散热器的材质通常为 6063 铝合金，铝合金表面极易生成钝化膜，腐蚀的发生首先是钝化膜破坏[19]。以一对电位差不为零的散热器为例，钝化层和氢氧根发生如下反应：

$$Al_2O_3+3H_2O+2OH^- \rightarrow 2[Al(OH)_4]^- \tag{2}$$

钝化层被破坏后，高电位的金属铝还会发生进一步的反应：

$$Al \rightarrow Al^{3+}+3e \tag{3}$$

$$Al^{3+}+3OH^- \rightarrow Al(OH)_3\downarrow \tag{4}$$

$Al(OH)_3$ 还可以进一步与 OH^- 发生反应，形成 $Al(OH)_4$：

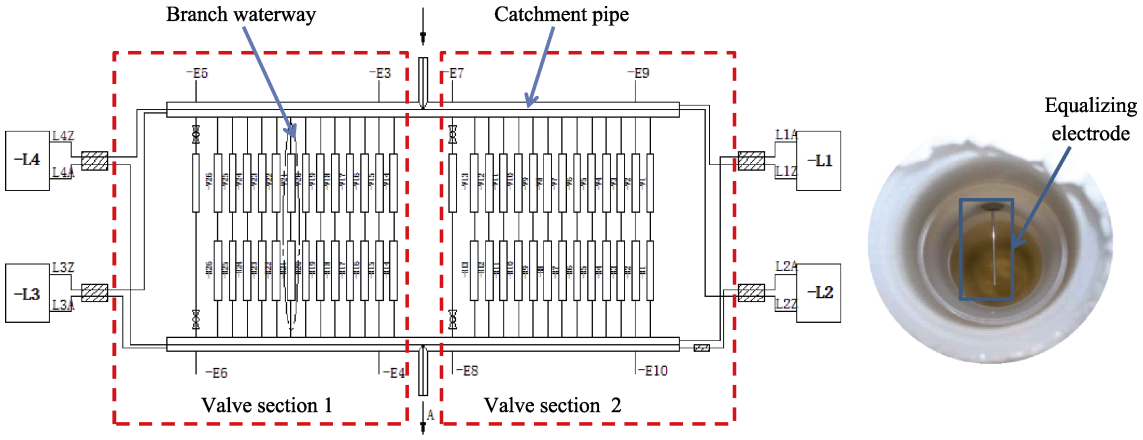


图 3　换流阀组件均压电极示意图

Fig.3 Schematic diagram of equalizing electrode for commutation valve assembly

$$2Al(OH)_3+2OH^- \rightarrow 2[Al(OH)_4]^- \quad (5)$$

对于低电位的金属铝则会发生如下反应：

$$Al+4H_2O+e \rightarrow [Al(OH)_4]^-+2H_2\uparrow \quad (6)$$

2.3　冲刷腐蚀

金属材料在流体作用下容易发生冲刷腐蚀，铝制散热器在长期运行中一直受高速冷却介质的冲刷，同时冷却介质中的泄漏电流会导致其发生缓慢的腐蚀[20]。在中等流速下对流导致传质增加，使得电极表面的钝化膜在液体流动引起的剪切力作用下不再稳定，导致腐蚀速率迅速增大，此时冲刷磨损开始占据主导作用，冲刷腐蚀本质上是冲刷磨损和电化学腐蚀相互作用的结果[21]。由冲刷磨损和电化学腐蚀相互作用引起的金属材料的腐蚀速率要大于两者单独作用时的腐蚀速率之和[22-25]。

3　均压电极结垢分析

3.1　结垢过程

铝制散热器表面发生了电化学腐蚀反应，同时由于冷却介质流动造成的冲刷磨损，致使铝离子进入到循环水路中进行循环流动，虽然部分铝离子经副循环离子交换装置后被吸附，但仍有部分铝离子会随冷却水流动经过均压电极。由于均压电极附近电场较集中，容易俘获冷却水中的铝离子。久而久之，电极表面积累大量铝离子及其生成物，最终形成电极结垢[26]。

在阳极上主要为$[Al(OH)_4]^-$引发的沉积，反应为：

$$4[Al(OH)_4]^- \rightarrow 2Al_2O_3\downarrow+8H_2O+O_2\uparrow+4e \quad (7)$$

在阴极上主要为 Al^{3+}引发的沉积，反应为：

$$4Al^{3+}+16OH^- \rightarrow 2Al_2O_3\downarrow+8H_2O+O_2\uparrow+4e \quad (8)$$

离子在电场作用下向电极迁移，而电化学过程中形成的不溶性物质 $Al(OH)_3$ 及$[Al(OH)_4]^-$等会附着在均压电极上形成结垢。当电极针表面未覆盖垢质时，管径中心的离子直接向电极针附近集中，而管壁周围的离子则沿管壁向电极根部运动。因为管径中部区域离子团较大，电极针端部周围场强最强，更易捕获较大离子团而形成垢质，所以电极针端部垢质生长较快，电极根部则较慢。

3.2　结垢影响因素

引起均压电极结垢的因素较多，本文重点从水质方面对腐蚀结垢机理进行分析。影响水质的因素也有很多种，鉴于高压直流输电换流阀冷却系统的冷却水为超纯水，因此选取电导率、pH 值、溶解氧以及离子成分等因素做具体分析。

3.2.1　电导率

冷却介质的电导率越大，其电阻率就越小，泄漏电流也越大，因此泄漏电流造成的电解腐蚀就越严重[27]。冷却介质的电导率越大，表明冷却介质中的离子越多，水的腐蚀性就越强[28]。通常地，在工程应用上一般要求冷却介质的电导率在 0.3~0.5 μs/cm 之间，因此在水质控制上电导率作为其中一个核心指标参数被监控。

3.2.2　pH 值

实验中通过挂片试验研究了冷却介质 pH 的变化对铝离子含量和导电率的影响，所得到结果如图 4 所示。从图 4 可知，介质中的铝离子含量和导电率随 pH 变化一致。当 pH 在 4.0~7.0 之间变化时，铝离子含量和导电率随 pH 的增加而逐渐减少，随后随 pH 的增加而逐渐增加。pH 在 7.0 时，铝离子含量和导电率达到最小值。

进一步地，实验中利用质量损失方法研究了 pH 变化对腐蚀速率的影响。腐蚀速率（C_R，mg/(cm^2·h)）通过公式（9）计算获得。

$$C_R=\frac{\Delta m}{s\times\Delta t} \quad (9)$$

其中，Δm、s、Δt 分别为低碳钢在模拟海水中的平均质量损失（mg）、试样的暴露面积（cm^2）和浸渍时间（h）。所得到的腐蚀速率结果如图 5 所示。从

图 5 中可知，pH 在 4.92~7.09 之间变化时，腐蚀速率随 pH 值的增加而逐渐减少，之后随 pH 值的增加而增加。当 pH=7.09 时，腐蚀速率达到最小值，约为 0.019 mg/(cm^2·h)。这与介质中的铝离子浓度和导电率随 pH 变化的趋向具有一致性，因此可以通过控制介质 pH 值来减少铝合金散热器的腐蚀速率。

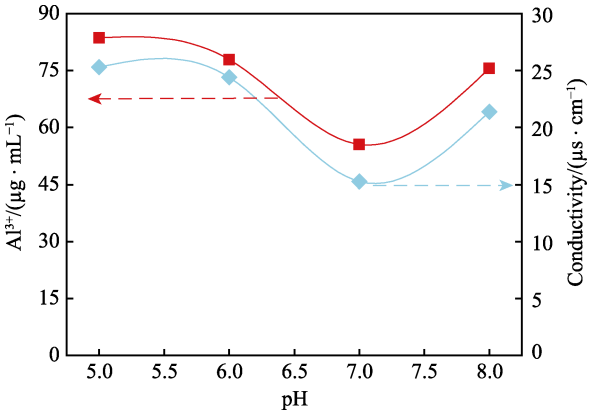


图 4　铝离子含量和电导率与 pH 变化关系
Fig.4 Relationship between aluminum ion content and conductivity and pH change

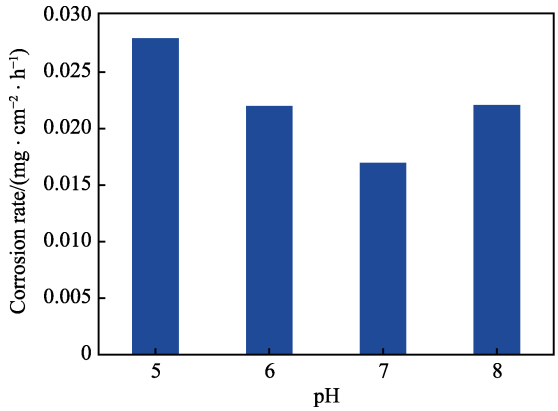


图 5　腐蚀速率与 pH 变化关系
Fig.5 Relation between corrosion rate and pH change

3.2.3　离子成分

根据腐蚀机理的分析可知，均压电极的垢样组成来源于冷却水中的离子成分，因此去除冷却水中的致垢离子可以很好地减缓均压电极的结垢。

在纯水系统中，空气中 CO_2 的溶解，将进一步生成 H_2CO_3。H_2CO_3 在电解质溶液中可电离产生 HCO_3^-、CO_3^{2-}、H^+等离子。根据科尔劳施离子独立运动定律可知，溶液介质的 pH 可影响离子对溶液的导电率。据此，实验中研究了 HCO_3^-、CO_3^{2-}、H^+等离子在不同 pH 下对纯水介质导电率的影响，所得结果如图 6 所示。从图 6 可知，当 pH 在 5.6~6.4 之间时，导电率随 H^+ 显著降低；当 pH 进一步增加时，导电率随 H^+轻微的降低。与 H^+对导电率影响有明显的差异，在整个 pH（5.6~7.0）范围内，导电率随 HCO_3^-只有轻微的变化，而 CO_3^{2-}对导电率的影响几乎可以忽略不计。

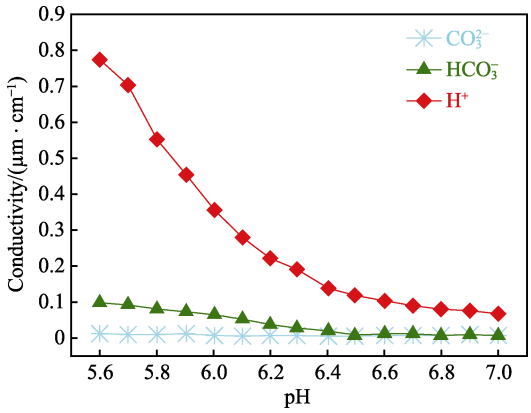


图 6　不同离子随 pH 变化对电导率的影响
Fig.6 Relationship between PH and conductivity in pure water dissolved with carbon dioxide

3.2.4　溶解氧

实验中采用挂片试验研究了溶解氧对铝离子含量及电导率的影响，结果如图 7 所示。由图 7 可知，当溶解氧在 0%~30%之间变化时，介质中铝离子含量随溶解氧的增大而增加；溶解氧在 0%~13%之间变化时，介质电导率随溶解氧的增大而显著增大；溶解氧在 13%~30%之间变化时，电导率基本保持稳定。

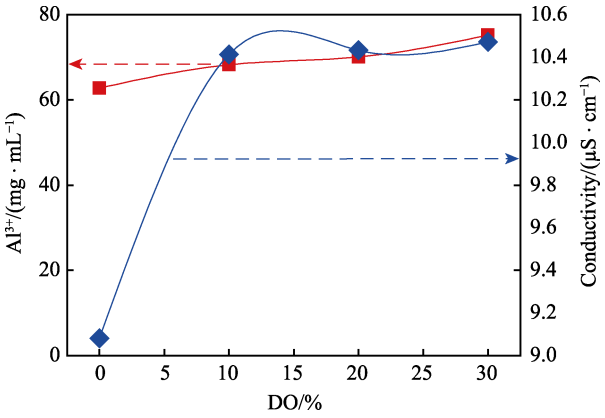


图 7　铝离子含量和电导率与溶解氧变化关系
Fig.7 Relationship between aluminum ion content and conductivity and dissolved oxygen

采用质量损失法研究了溶解氧对挂片腐蚀速率的影响，根据式（8）计算得到不同溶解氧环境中挂片的腐蚀速率，如图 8 所示，腐蚀速率随溶解氧的增大而小幅增大，溶解氧浓度从 0%增加到 30%时，腐蚀速率小幅增加。主要原因在于对铝合金而言，氧气具有两种相反的作用，虽然氧气参与阴极反应，加速腐蚀，但介质中溶解氧浓度越高，铝合金的自腐蚀电位正移至钝化区，更易形成钝化膜保护金属，两种因素共同作用，使腐蚀速率的增加幅度较小[29]。腐蚀速率的变化规律与铝离子含量及电导率变化规律一致。

3.2.5　温度

随着温度的升高，离子活性增强，运动加快，电导率增加。因此，实验中研究了温度变化对纯水导电率的变化，结果见图 9。从图 9 可知，随着温度从 0 ℃

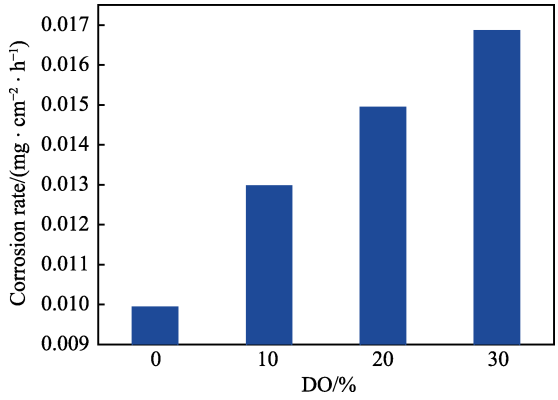


图 8　腐蚀速率与溶解氧变化关系

Fig.8 Relation between corrosion rate and dissolved oxygen change

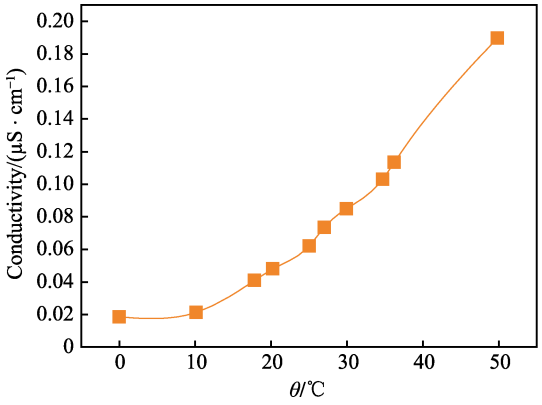


图 9　纯水电导率随温度变化关系

Fig.9 Temperature dependence of pure water conductivity

逐步增加到 50 ℃，纯水电导率从 0.02 μS/cm 增加到 0.19 μS/cm。

同样地，通过实验室挂片试验研究了温度变化对纯水介质中铝离子含量和电导率的影响，所得结果如图 10 所示。从图 10 中可以清楚地看到，当温度从 30 ℃增加到 60 ℃时，介质中铝离子含量及介质电导率均显著增大。当温度升至 60 ℃时，铝离子浓度和电导率达到最大，这是因为温度升高，阳极铝合金溶解加快，进入水体的铝离子浓度增大，溶液电导率

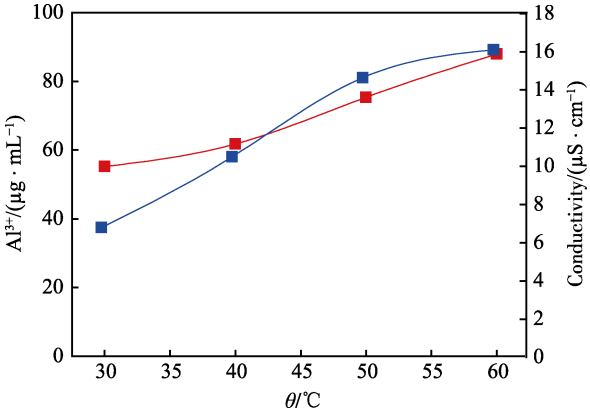


图 10　铝离子含量和电导率与温度变化关系

Fig.10 Relationship between aluminum ion content and conductivity and temperature change

增大。进而以式（8）计算出腐蚀速率与温度的变化关系，结果显示在图 11。当试验温度由 30 ℃升至 60 ℃时，腐蚀速率逐步加快，至 60 ℃时，腐蚀速率达到最大，约 0.021 mg/(cm^2·h)。这主要归因于在中性溶液中，阴极发生的是析氢反应，随着温度的升高，水黏度降低，传质动力学常数增大，同时水温升高，反应动力增大，导致铝合金的腐蚀速率增大。再次证明腐蚀速率的变化趋势与铝离子含量及介质电导率的变化具有一致性。

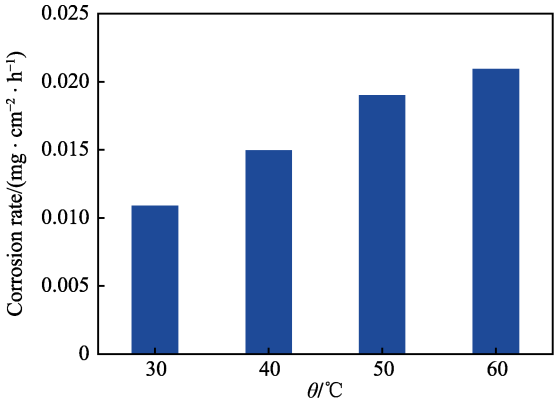


图 11　腐蚀速率与温度变化关系

Fig.11 Relation between corrosion rate and temperature change

4　结论

1）均压电极结垢的主要过程为：散热器内表面发生的化学腐蚀以及流体造成的磨损腐蚀二者协同，相互加强致使铝元素转化为离子进入循环系统冷却介质中，并在均压电极电场作用下被吸附至电极表面，从而在电极表面形成结垢。

2）内冷水中铝离子含量与均压电极结垢呈明显正相关，通过降低内冷水中铝离子含量，可有效减缓均压电极结垢。因此，采用深度除盐水质精处理加大副循环处理能力的方式，可去除冷却水中的致垢离子，能有效减缓均压电极结垢。

参考文献：

[1] XU Zheng, CHEN Hai-rong. Overview of voltage source converter type HVDC transmission technology[J]. High voltage technology, 2007, 33(1): 1-10.

[2] 刘秀平. 高压直流输电纯水冷却装置仿真培训系统建模与开发[D]. 广州: 广东工业大学, 2012.
LIU Xiu-ping. Modeling and development of simulation training system for HVDC pure water cooling device[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2012.

[3] 刘重强, 张恩龙, 陈绪胜, 等. 高温缺水地区换流阀冷却系统的研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 54-58.
LIU Chong-qiang, ZHANG En-long, CHEN Xu-sheng, et al. Study on the cooling system of converter valves in high temperature and water shortage areas[J]. Electric power engineering technology, 2017, 36(4): 54-58.

[4] 伍秋坤. 换流阀冷却系统电化学腐蚀机理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
WU Qiu-kun. Study on electrochemical corrosion mechanism of commutation valve cooling system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.

[5] WANG Yuan-you, HAO Zhi-jie, LIN Rui. Corrosion and deposition of converter valve cooling system in tianguang DC project[J]. High voltage technology, 2006, 32(9): 80-83.

[6] 张培东, 郝志杰, 刘红太. 贵广 HVDC 阀冷均压电极改造原理与实施[J]. 电工技术, 2008(12): 1-2.
ZHANG Pei-dong, HAO Zhi-jie, LIU Hong-tai. Guiguang HVDC valve cold equalizing electrode transformation principle and implementation[J]. Electrical technology, 2008 (12): 1-2.

[7] 赵文亮. 高压直流输电换流阀晶闸管铝散热器腐蚀问题研究[J]. 清洗世界, 2015, 31(12): 1-3.
ZHAO Wen-liang. Study on corrosion of thyristor aluminium radiator of HVDC converter valve[J]. Cleaning the world, 2015, 31(12): 1-3.

[8] IMMO Weber, BERT Mallick, MATTHIAS Schild, et al. Behavior of highly diluted electrolytes in strong electric fields—prevention of alumina deposition on grading electrodes in HVDC Transmission Modules by CO_2-induced pH-Control[J]. Chem eur j, 2014, 20: 1-14.

[9] HOLWEG N. Siemens investigation report of scaling phenomenon on grading electrodes in thyristor valve cooling cirguit[J]. Journal of Lishui University Erlangen, 2007(7): 136.

[10] QIAN Y H, ZHOU Y Y, XU C W. Research on the formation and preventive measure of scale in the cooling system of HVDC converter valve[J]. Advanced materials research, 2011, 354-355: 1157-1160.

[11] 张格红, 闵建文, 赵勤虎, 等. 换流阀冷却系统腐蚀结垢分析研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(11): 92-97.
ZHANG Gehong, MIN Jianwen, ZHAO Qinhu, et al. Nalysis and study of corrosion and scaling in HVDC converter valve cooling water system[J]. Power grid analysis & study, 2018, 46(11): 92-97.

[12] 李道豫, 邱志远, 李学武, 等. 铝在高压直流输电系统中高电压高温下的腐蚀行为研究[J]. 化工进展, 2016 (2): 92-98.
LI Daoyu, QIU Zhiyuan, LI Xuewu, et al. Corrosion behavior of aluminum at high potential and high temperature in HVDC systems[J]. Chemical industry and engineering progress, 2016(2): 92-98.

[13] 丁德, 左坤, 谷永刚, 等. 换流阀均压电极结垢分析及其去除方法[J]. 清洗世界, 2014, 30(6): 15-19.
DING De, ZUO Kun, GU Yonggang, et al. Analysis of equalizing electrode deposit in converter valve and it's removal methods[J]. Cleaning world, 2014, 30(6): 15-19.

[14] 丁德. 高压直流输电换流阀均压电极腐蚀结垢防护技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
DING De. Research on corrosion and scaling protection technology of voltage equalizing electrode of HVDC converter valve[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.

[15] ZHAO Zhong-yuan, ZHU Zhou-xia, QIU Yu-chang, et al. Study on pressure sharing characteristics of thyristor modules for high voltage commutation valves[J]. Power construction, 2002, 23(12): 39-41.

[16] 姜亚青. 直流输电换流阀内冷水系统腐蚀产物沉积行为研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
JIANG Ya-qing. Deposition behavior of corrosion products in internal cooling water system of HVDC converter valves[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.

[17] 耿曼, 冷明全. 防爆变频器水冷系统的设计[J]. 广东化工, 2016, 43(2): 108-109.
GENG Man, LENG Ming-quan. Design of water cooling system for explosion-proof frequency converter[J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(2): 108-109.

[18] 葛东阳. 换流阀冷却系统腐蚀与沉积分析模型与影响因素研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
GE Dong-yang. Research on corrosion and deposition analysis model and influencing factors of converter valve cooling system[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2016.

[19] 黄元伟. 铝和铝合金的腐蚀及其影响因素的评述[J]. 有色金属材料与工程, 2012, 33(2): 89-95.
HUANG Yuan-wei. Corrosion of aluminium and aluminium alloys and its influencing factors[J]. Non-ferrous metal materials and engineering, 2012, 33(2): 89-95.

[20] ZHU Juan, ZHANG Qiao-bin, CHEN Yu, et al. Research status of erosion corrosion[J]. Chinese journal of corrosion and protection, 2014, 34(3): 199-210.

[21] 王梓通. 常减压装置常顶腐蚀探讨[J]. 化工管理, 2019 (13): 144.
WANG Zi-tong. Discussion on atmospheric roof corrosion of atmospheric and vacuum distillation unit[J]. Chemical management, 2019 (13): 144.

[22] HODGKIESS T, NEVILLE A, SHRESTHA S. Electrochemical and mechanical interactions during erosion-corrosion of a high-velocity oxy-fuel coating and a stainless steel[J]. Wear, 1999, 233-235: 623-634.

[23] NEVILLE A, HODGKIESS T, DALLAS J T. A study of the erosion-corrosion behaviour of engineering steels for marine pumping applications[J]. Wear, 1995, 186/187: 497-507.

[24] STACK M M, CORLETT N, TURGOOSE S. Some thoughts on modelling the effects of oxygen and particle concentration on the erosion-corrosion of steels in aqueous slurries[J]. Wear, 2003, 255(1-6): 225-236.

[25] BURSTEIN G T, SASAKI K. Effect of impact angle on the slurry erosioncorrosion of 304L stainless steel[J]. Wear, 2000, 240(1/2): 80-94.

[26] 田兴旺, 杨洁民, 张望平. 天广直流均压电极密封圈渗水原因分析及改进建议[J]. 今日科苑, 2008(8): 68-70.
TIAN Xing-wang, YANG Jie-min, ZHANG Wang-ping. Cause analysis and improvement suggestions for leakage of DC equalizing electrode seal ring in Tianguang[J]. Today's science park, 2008(8): 68-70.

[27] GENG Zhi, SU Chang-hua, ZHANG Yong-ling, et al. Study on corrosion types and prevention measures of internal cooling water system of uhv converter valve[J]. Corrosion science and protection technology, 2018, 31(2): 256.

[28] 何运华, 冯雪玉, 何潇, 等. 直流输电换流阀腐蚀机理研究进展[J]. 广东化工, 2016, 43(22): 116-117.
HE Yun-hua, FENG Xue-yu, HE Xiao, et al. Research progress on corrosion mechanism of HVDC converter valves [J]. Guangdong chemical industry, 2016, 43(22): 116-117.

[29] 冯雪玉, 换流阀内冷水系统腐蚀行为研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
FENG Xue-yu, Research on corrosion behavior of internal cooling water system of converter valve[D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2017.

[30] ZHAO Xue-liang, LI Shuai-lun, LI Jie. Research on high precision dissolved oxygen detection technology based on multi-source information fusion[J]. Instrument technology and sensors, 2017(2): 541.