

换流阀均压电极电吸附抑垢方法研究

刘 倩, 乔武宁, 焦秀英, 马元社

(西安西电电力系统有限公司, 陕西西安 710075)

[摘要] 换流阀冷却系统均压电极结垢会造成管路堵塞、泄漏等问题, 给换流阀的稳定运行带来较大的隐患, 严重时甚至会导致直流闭锁停运。目前换流站主要采取人工定期取出电极清除表面结垢物的方法来解决该问题。由于换流站电极数量众多, 除垢工作任务繁重。为了减轻换流阀维护工作量并缓解均压电极结垢现象, 提出了一种基于电吸附原理的换流阀均压电极抑垢方法, 设计了一种电吸附抑垢装置, 将其接入换流阀内冷水系统模拟实验平台, 对该方法的可行性进行实验验证, 并进一步研究该抑垢装置的电极板电流密度和入口水流速度对抑垢效果的影响。研究结果显示, 模拟实验平台接入抑垢装置后, 与无抑垢装置相比, 相同时间内单只均压电极的结垢量从 0.5~0.7 mg 减少到 0.1 mg 以下, 表明电吸附抑垢法可以减缓换流阀均压电极结垢的进程。此外, 当抑垢装置电极板电流密度为 5~50 A/m² 时, 该装置的抑垢效率随电极板电流密度的增加而先增大后减小; 当入口流量为 8~14 L/min 时, 装置抑垢效率随水流速度的增加而减小。

[关键词] 换流阀; 均压电极; 抑垢; 电吸附

[中图分类号] TK268.12 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)12-0148-06

Study on electro-adsorption scale inhibition for valve equalizing electrode

LIU Qian, QIAO Wuning, JIAO Xiuying, MA Yuanshe

(Xi'an XD Power System Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: The scaling of the equal pressure electrode of the converter valve cooling system will cause pipeline blockage, leakage and other problems, which will bring greater hidden danger to the stable operation of the converter valve and even lead to DC blocking shutdown in serious cases. At present, the converter station mainly adopts the method of removing the electrode to remove the surface scaling by hand regularly to solve the problem. Due to the large number of electrodes in the converter station, the descaling work is a heavy task. In order to reduce the maintenance workload of the converter valve and alleviate the scaling phenomenon of the equal pressure electrode, a method of equal pressure electrode scale suppression of the converter valve based on the principle of electric adsorption is proposed. An electro-adsorption scale suppression device is designed and connected to the simulated experimental platform of the cold water system in the converter valve to verify the feasibility of the method, and further study the influence of the electrode plate current density and inlet water velocity of the scale suppression device on the scale suppression effect. The results of the study show that, after the simulated experimental platform is connected to the scale suppression device, the scaling amount of a single equal pressure electrode is reduced from 0.5-0.7 mg to less than 0.1 mg in the same time compared with no scale suppression device, which indicates that the electroadsorption scale suppression method can slow down the scaling process of the equal pressure electrode of the converter valve. In addition, when the electrode plate current density of the scale suppression device is 5-50 A/m², the scale suppression efficiency of the device increases and then decreases with the increase of the electrode plate current density. When the inlet flow rate is 8-14 L/min, the scale inhibition efficiency of the device decreases with the increase of water flow rate.

Key words: valve; equalizing electrode; scale inhibition; electroadsorption

换流阀冷却系统是高压直流输电工程关键设备——换流阀的重要辅助系统。当换流阀内冷水系

统发生均压电极结垢后可能会带来管路堵塞、漏水等问题, 影响换流阀的安全稳定运行, 严重时甚至发

生直流闭锁停运等事故^[1]。目前在实际直流输电工程中,当换流阀均压电极表面结垢达到一定厚度,采取的办法往往是更换电极或人工刮除垢质^[2]。但换流阀中包含的均压电极数量达数千个,更换与刮除过程极为繁琐,定期检查维修需耗费大量人力物力。因此,研究更加方便、高效的技术替代传统人工除垢方法具有重要意义。

针对换流阀内冷水系统均压电极结垢问题,国内外已开展了相关研究。研究表明,换流阀均压电极结垢的源头在于铝散热器的腐蚀,电极结垢物中的氧化铝是金属铝发生腐蚀并在电极表面沉积形成的^[3-4]。ABB公司在换流阀散热器进出口设置不锈钢环泄漏电解电流,以减轻散热器腐蚀、抑制结垢,但换流阀阀塔主水路中的电极仍然存在结垢问题^[5]。李振宇等^[6]提出通过在内冷水中注入二氧化碳,改变内冷水pH,使铝处于铝-水pH电位图的免腐蚀区,实现散热器腐蚀抑制。还有部分研究在换流阀内冷水系统中设置EDI装置去除水中结垢离子,以缓解均压电极结垢^[7]。

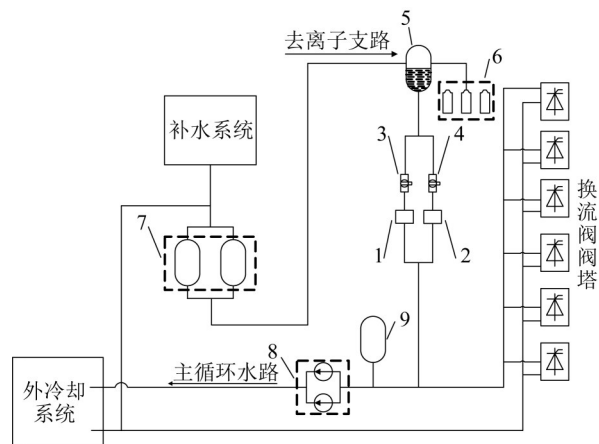
电吸附除盐技术是一种新型的除盐技术,近年来引起广泛关注,目前已应用于海水淡化、工业水处理等领域^[8]。由于换流阀均压电极结垢物基本来源于内冷水中铝散热器腐蚀产生的 $Al(III)$ 配离子(以下称“致垢离子”),而电吸附技术可以实现水中致垢离子的吸附和去除,从而抑制均压电极结垢。与目前采用的换流阀均压电极抑垢方法相比,电吸附技术具有较好的应用前景,不仅可使换流阀阀塔主水路及散热器水路处的电极结垢现象得到抑制,同时避免了向换流阀冷却水中注入其他物质引发的风险,且操作维护简单、无二次污染。笔者采用电吸附方法抑制换流阀均压电极结垢,设计了一种基于电吸附原理的抑垢装置并进行可行性实验验证,对抑垢效果的影响因素进行研究。

1 电吸附抑垢方法与原理

基于电吸附原理的换流阀均压电极抑垢方法是通过在换流阀内冷水系统中安装电吸附抑垢装置,与阀塔水路中的均压电极形成“竞争吸附”,将内冷水中的大部分致垢离子沉积于该电吸附装置中,从而抑制均压电极的结垢速度与结垢量,缓解均压电极结垢现象。

电吸附抑垢装置串联连接于换流阀内水冷系统

去离子支路中,在系统中的安装位置如图1所示。



1—抑垢装置;2—备用抑垢装置;3—第一支路阀门;4—第二支路阀门;5—膨胀罐;6—氮气瓶;7—离子交换器;8—主循环水泵;9—脱气罐。

图1 电吸附抑垢装置安装位置

Fig. 1 Diagram of installation location of electro-adsorption scale inhibition device

电吸附抑垢装置的结构如图2所示,其主体由透明有机玻璃材料制成,便于在实验过程中观察结垢现象。装置内部设有间距均匀的卡槽,用于固定板状电极。电极采用阴阳极交替、互相平行的方式放置,阴极电极由不锈钢材料制成,阳极电极为了防止腐蚀则用钛材料制作,二者形状及尺寸均相同。抑垢装置电极由一台独立的直流电源施加电压,并用电流表实时监测其工作电流。

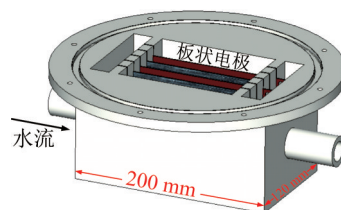


图2 抑垢装置的结构

Fig. 2 Structure of scale inhibition device

抑垢装置中平行板电极的结垢机理与换流阀均压电极结垢机理^[4]基本相同,即在强电场作用下, $Al(III)$ 配离子被吸附聚集至电极表面,在电解水和酸碱中和两个反应作用下生成氢氧化铝沉积物并附着在电极上。以阳极电极结垢为例,从微观角度解释电极结垢形成机理:在阳极电极附近电场的作用下,内冷水中带负电的 $Al(OH)_4^-$ 向电极表面聚集,随即与阳极表面因水电解反应而产生的 H^+ 发生酸碱中和反应,生成不稳定的 $Al(H_2O)(OH)_3$ 。 $Al(H_2O)(OH)_3$ 随后脱水转化为稳定

不溶解的 β -三羟基铝石,部分会转化为更加稳定的 γ -三水铝石。

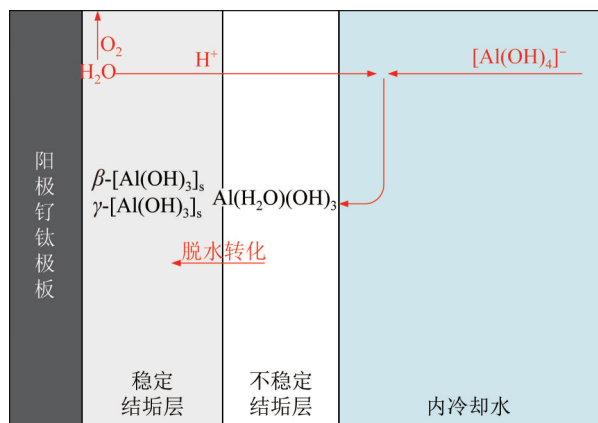


图3 阳极电极表面结垢物形成过程

Fig. 3 Formation process of scale on anode electrode surface

当 β -三羟基铝石及 γ -三水铝石层在整个阳极表面达到一定厚度时,结垢层对电极产生了绝缘作用,并阻碍 $Al(OH)_4^-$ 到达电极表面继续反应。在这一阶段,阳极表面的电解水反应继续进行,电解产生的 H^+ 因质子隧道效应穿过结垢层到达内冷水与结垢层交界面,继续与 $Al(OH)_4^-$ 发生酸碱中和反应,如此累积导致结垢层厚度增长。

为保证抑垢装置对致垢离子的吸附效果大于换流阀中的所有均压电极的吸附效果,抑垢装置中的电极表面积应设计成远大于换流阀水路内所有均压电极的总表面积之和,把抑垢装置接入水路后,其内部的平行板电极与均压电极进行“结垢竞争”,若将平行板电极表面电流密度与均压电极表面平均电流密度大小保持相同,由于平行板电极拥有更大的有效沉积面积,致垢离子将大部分沉积在抑垢装置内,从而减缓阀组件内均压电极的结垢进程,降低其结垢速率。

2 抑垢方法可行性验证

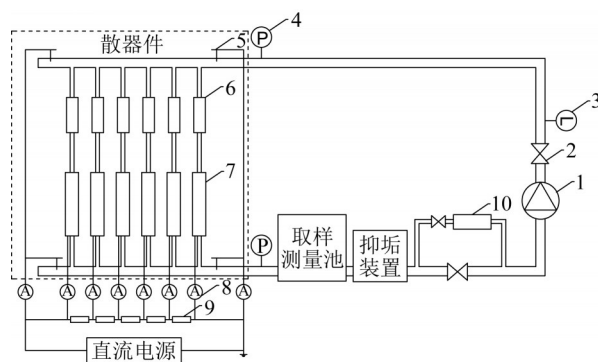
2.1 实验内容

为验证电吸附抑垢装置能否有效减缓均压电极的结垢进程,通过实验验证其抑垢可行性。设计了两组实验:(1)电吸附抑垢实验。实验中同时给4枚均压电极(阳极针电极Ep1和Ep2、阴极针电极Ep3和Ep4)及抑垢装置中的板状电极(阳极板电极Ea1、阴极板电极Ea2)施加电压,运行一段时间后分别记录二者的结垢物质量;(2)空白对照实验。该实验中

只给4枚均压电极(阳极针电极Ep1'和Ep2'、阴极针电极Ep3'和Ep4')施加电压,运行一段时间后记录其结垢物质量。除电流条件以外,两组实验的其他条件均保持一致,对比两组实验中相同时间内均压电极结垢物的质量,计算电吸附抑垢装置有效减缓均压电极的表面结垢速度。

2.2 模拟实验平台

抑垢装置在换流阀内冷水模拟实验平台中的连接方式如图4所示。该平台由散热器组件、取样测量池、抑垢装置、去离子树脂罐、水泵、液体流量计等元件通过PVC管件连接而成。实验平台采用桥式分压电路为各散热器及均压电极供电。



1—水泵;2—阀门;3—液体流量计;4—压力表;5—均压电极;6—水阻;7—散热器;8—电流表;9—分压电阻;10—去离子树脂罐。

图4 换流阀内水冷系统模拟实验平台

Fig. 4 Diagram of simulation experiment platform of water cooling system inside valve

2.3 实验条件

电吸附抑垢实验与空白对照实验的初始水质参数及流场条件均保持一致。电吸附组的初始水质参数如表1所示。两组实验的总流量均为10 L/min,进水口压力为0.10~0.11 MPa。

表1 初始水质参数

温度/ $^{\circ}C$	溶解氧/ ($mg \cdot L^{-1}$)	电导率/ ($\mu S \cdot cm^{-1}$)	pH	铝离子/ ($mg \cdot L^{-1}$)	总水量/ L
24.1	2.7	7.57	9.14	2.51	12

实验中,电吸附抑垢装置内板状电极的电流施加原则为:使其表面电流密度与均压电极表面平均电流密度相近,二者的电流密度均取 $11.2 A/m^2$,经计算,模拟散热器模块中均压电极电流设置为4 mA左右,电吸附抑垢装置电极施加电流约为100 mA。实验过程中施加电压保持不变,由于水发生电解,所

以电流略有增大。

2.4 实验结果与分析

电吸附抑垢实验与空白对照实验均持续 48 h,实验结束后取出电极自然风干。干燥完全后发现,无论是换流阀汇流水管中的均压电极,还是抑垢装置内的板状电极,发生结垢的电极均为处于高电位的电极(即阳极)。实验电极的结垢形貌如图 5 所示。

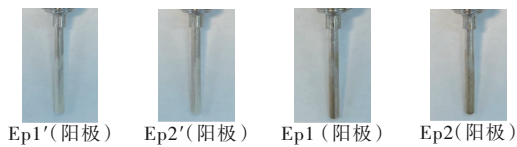


图5 均压电极结垢形貌对比

Fig. 5 Scale morphology comparison of equalizing electrode

由图 5 可见,空白组的均压电极 Ep1' 和 Ep2' 表面有一层明显的沉积物,沉积物形貌均为白色且具有一定的物理稳定性;而电吸附组的均压电极 Ep1

和 Ep2 表面基本观察不到结垢物的存在。如图 6 所示,电吸附抑垢装置内板状电极表面 Ea1 有较多的白色结垢物。

实验前后均压电极及抑垢装置内板状电极的质量变化如表 2 所示。



图6 电吸附抑垢装置内阳极板状电极结垢物

Fig. 6 Scaling morphology of anode plate electrode in the electro-adsorption scale suppression device

表 2 均压电极及抑垢装置板状电极的质量变化

Table 2 Mass changes of equalizing electrode and plate electrode of scale inhibition device

电极	空白对照组		电吸附组			
	均压电极阳极 Ep1'	均压电极阳极 Ep2'	均压电极阳极 Ep1	均压电极阳极 Ep2	抑垢电极阳极 Ea1	抑垢电极阴极 Ea2
质量增加量/mg	0.5	0.7	0.1	-0.1	21.2	<0.05

由表 2 可见,模拟实验平台启用电吸附抑垢装置后,在电吸附抑垢装置电极表面施加了与均压电极表面相同的电流密度,内冷水中大部分致垢离子优先沉积至抑垢装置内的板状电极上,均压电极表面的结垢进程得到抑制,相同时间内结垢量大大减少。

综上可知,电吸附抑垢装置能有效抑制均压电极表面的结垢进程。

3 抑垢效果的影响因素研究

电吸附抑垢装置的抑垢效果受多方面因素影响,其中抑垢装置内的电极电流密度和水流速度是较突出的两个因素。为探究这两个参数对电吸附抑垢装置抑垢效果的影响,采用控制变量法进行研究。

3.1 电流密度对抑垢效果的影响

循环水中的致垢离子流经抑垢装置时,在平行板电极间受电场作用而向电极移动,当其运动至表面时与水的电解产物发生酸碱中和反应并沉积附着在电极上。结垢实验中,假设循环水的电导率近似不变,阴阳极板之间的水阻一定,改变电极表面的电流密度只能通过改变施加电压的方式来实现,而电

压决定了电极附近的电场强度,直接影响电极对致垢离子的吸附能力。另一方面,由法拉第定律可知水的电解产物在单位时间内生成量与电解电流成正比,因此电流密度可决定电极表面电解水反应的激烈程度。而电解产物(氢/氢氧根离子)作为酸碱中和反应的反应物之一,其单位时间内的生成量与致垢离子的沉积速度有直接关系。综上,电流从物理吸附和电化学反应两个方面影响致垢离子的沉积,是电场抑垢装置抑垢效果的关键影响因素。

参考工程实际中的均压电极电流密度,设置一定电流密度梯度分别进行实验。除电流密度外,每一组实验的初始水质条件、流场条件、实验时间等均保持一致,其中一组的实验条件如表 3 所示。实验中以 $\text{NaAl}(\text{OH})_4$ 溶液作为致垢离子补充试剂,滴加后循环水呈弱碱性,滴加原则为使水中铝离子初始质量浓度为近似 2.5 mg/L,其准确值由 ICP-MS 测量得到。实验总流量 10 L/min,进水口压力为 0.10~0.11 MPa。

每组实验持续 24 h,实验结束后发现抑垢装置内不锈钢阴极表面无明显变化,而钉钛阳极表面出现明显的白色沉积物见图 7。从图 7 可以看出,电流密度较

表3 实验初始水质参数

Table 3 Initial water quality

温度/℃	溶解氧/ (mg·L ⁻¹)	电导率/ (μS·cm ⁻¹)	pH	铝离子/ (mg·L ⁻¹)	总水量/ L
24.6	3.1	7.87	9.14	2.51	12

小时,极板表面结垢主要分布在电流较为集中的边缘处。随着电流密度增大,电极表面结垢量不断增多。

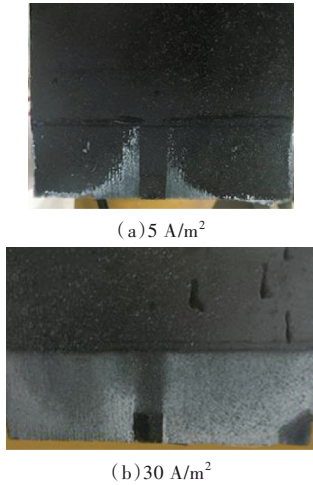


图7 不同电流密度下抑垢装置阳极电极结垢形貌

Fig. 7 Scaling morphology of anode electrode in the scale inhibition device at different current densities

分别称量实验前后干燥的阳极电极的质量,差值即为结垢量,结果如表4所示。

表4 阳极电极结垢量与电流密度的关系

Table 4 Relationship between anode electrode fouling and current density

电流密度/ (A·m ⁻²)	试验前质量/mg	试验后质量/mg	增量/mg
5	38 632.15	38 639.30	7.15
10	38 632.00	38 640.53	8.53
15	38 649.41	38 662.58	13.17
20	38 651.02	38 675.31	24.29
25	38 631.51	38 655.10	23.59
30	38 632.92	38 656.00	23.08
40	38 655.53	38 677.86	22.33
50	38 631.60	38 653.13	21.53

从表4可见,电流密度较低时,电极结垢量随电流密度的增加近似呈线性关系增长,符合法拉第定律,即电极界面上发生化学变化的物质的质量与通入的电量成正比。当电流密度增至20 A/m²时,电极结垢量达到峰值,后续不再随电流密度增加而增加,甚至略有下降趋势。

结合前述电极结垢机理,认为电极结垢量随电流

密度先增后减的原因是,电流密度超过20 A/m²后,电极表面的水电解反应更加剧烈,阳极电极表面的O₂生成量加大并附着在阳极板表面,导致极板对Al(OH)₄⁻的电场吸附力下降,阻碍了Al(OH)₄⁻向极板附近迁移,因而结垢量下降^[9]。

实验结果表明电吸附抑垢装置的抑垢效率,并非随电极板的电流密度增大而增大,大于一定阈值后其抑垢效率会下降。

3.2 水流速度对抑垢效果的影响

由均压电极结垢机理可知,致垢离子沉积过程是Al(Ⅲ)配离子先与H⁺反应形成不稳定的Al(H₂O)(OH)₃,随即转化成更加稳定的β-三羟基铝石和γ-三水铝石。在水流冲击作用下,电极表面初始沉积物由不稳定形态向稳定形态转化的过程受到不利影响。另一方面,致垢离子随循环水运动至抑垢装置的阴阳极板之间时受到电场和流场的共同作用。将其受力简化为切向的流场力和法向的电场力,在流场作用下致垢离子随循环水沿切向方向运动,在电场作用下致垢离子沿法向方向向电极偏移,切向速度越快则在电极间受到电场力作用的时间越短,致垢离子难以到达电极表面发生沉积。因此从理论上讲,抑垢装置内板状电极附近的水流速度越大,板状电极沉积致垢离子的效率越低,即抑制均压电极结垢的效率越低。

参考工程实际中换流阀均压电极所在管路的水流速度,设置一定流速梯度进行若干组实验。除水流速度以外,每一组实验的初始水质条件、电流参数、实验时间等均保持一致。进水口压力为0.10~0.11 MPa,电极电流密度均为11.2 A/m²,初始水质参数如表5所示。采用NaAl(OH)₄溶液作为致垢离子补充试剂,滴加后循环水中铝离子初始浓度由ICP-MS测得到。

表5 实验初始水质参数

Table 5 Initial water quality

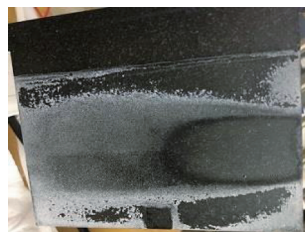
温度/℃	溶解氧/ (mg·L ⁻¹)	电导率/ (μS·cm ⁻¹)	pH	铝离子/ (mg·L ⁻¹)	总水量/ L
23.2	2.5	15.75	9.48	5.02	12

每组实验持续24 h,发现抑垢装置内出现结垢现象的仍为钎钛阳极。观察其中两组实验的干燥阳极电极结垢形貌,如图8所示。

从图8可以看出,阳极极板表面均存在一个明显的“结垢空白区”,该区域朝向抑垢装置的进水口。由于该处水流速度较快,结垢不易形成,即水流冲击作用导致该结垢分布特征。



(a) 8 L/min



(b) 14 L/min

图8 不同流量下抑垢装置阳极电极结垢形貌

Fig. 8 Scaling morphology of anode electrode in the scale inhibition device at different water flow rates

实验前后阳极的质量变化如表6所示。可见在8~14 L/min的范围内,水流速度越大,相同时间内阳极的结垢量越少,二者近似呈线性负相关关系。实验结果表明抑垢装置水流速度越快,抑制均压电极结垢的效率越低。

表6 阳极电极结垢量与抑垢装置流量的关系

Table 6 Relationship between anode electrode fouling and flow rate

流量/(L·min ⁻¹)	试验前质量/mg	试验后质量/mg	增量/mg
8	38 643.12	38 691.08	47.96
9	38 654.11	38 701.27	47.16
10	38 631.39	38 674.20	42.81
11	38 650.30	38 690.92	40.62
12	38 634.59	38 674.07	39.48
13	38 653.77	38 689.99	36.22
14	38 667.36	38 701.68	34.32

4 结论

设计了一种换流阀均压电极抑垢装置,将其接入换流阀内冷水系统模拟平台,通过实验验证了换流阀均压电极抑垢的可行性。研究了抑垢装置加载的电极表面电流密度及水流速度对抑垢效果的影响,为后续电吸附抑垢装置设计与应用提供一定基础。

参考文献

[1] 段涛,杨斌,李贤庆,等. ± 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 Xianqing, et al. Analysis of potential dangers in ± 500 kV converter station valve water cooling system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 132-138.

[2] 付纪华,李庆宇,谷永刚,等. 高压直流输电光触发换流阀塔均压电极除垢技术和工艺研究[J]. 陕西电力, 2014, 42(10): 72-75.

FU Jihua, LI Qingyu, GU Yonggang, et al. Study on descaling technology and processing of voltage-sharing electrodes in HVDC light-triggered thyristor valve tower[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(10): 72-75.

[3] 王远游,郝志杰,林睿. 天广直流工程换流阀冷却系统腐蚀与沉积[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 80-83.

WANG Yuanyou, HAO Zhijie, LIN Rui. Primary analysis on corrosion and deposit in valve cooling system of Tian-Guang HVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 80-83.

[4] WEBER I, MALLICK B, SCHILD M, et al. Behavior of highly diluted electrolytes in strong electric fields—Prevention of alumina deposition on grading electrodes in HVDC transmission modules by CO₂-induced pH-control[J]. Chemistry-A European Journal, 2014, 20(38): 12091-12103.

[5] 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. Analysis and study of corrosion and scaling in HVDC converter valve cooling water system[J]. Smart Power, 2018, 46(11): 92-97.

[6] 李振宇,丁德,曹顺安. 二氧化碳对换流阀铝合金散热器冲刷腐蚀影响分析[J]. 清洗世界, 2016, 32(10): 28-32.

LI Zhenyu, DING De, CAO Shunan. Effect of CO₂ on erosion corrosion of aluminum alloy heat sink in HVDC valve cooling system[J]. Cleaning World, 2016, 32(10): 28-32.

[7] 张杰峰,刘晓波,刘源,等. 特高压换流站阀水冷系统 EDI 技术的研究[J]. 电气时代, 2021(1): 52-54.

ZHANG Jiefeng, LIU Xiaobo, LIU Yuan, et al. Research on EDI technology of valve water cooling system in UHV converter station[J]. Electric Age, 2021(1): 52-54.

[8] 许勇毅,杨定畅,王峰,等. 电吸附技术在电力行业废水处理中的应用[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(3): 138-146.

XU Yongyi, YANG Dingchang, WANG Feng, et al. Application of electro-adsorption technology in wastewater treatment of electric power industry[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(3): 138-146.

[9] 钱凯凯,胡将军. 电解参数对循环冷却水处理及倒极除垢效果的影响[J]. 工业水处理, 2020, 40(1): 83-86.

QIAN Kaikai, HU Jiangjun. Influence of electrolysis parameters on the treatment of circulating cooling water and the descaling effect of reversing electrodes[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(1): 83-86.

[作者简介] 刘倩(1992—), 工程师, E-mail: liuq@xd.cee-group.cn。

[收稿日期] 2022-11-14(修改稿)