

DOI: 10.19666/j.rlfed.202307113

发电厂脱硫系统氯离子在线监测技术 研究及应用

钟杰¹, 刘玮¹, 龙国军¹, 吴磊², 熊卫军², 刘海龙³

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2.华能武汉发电有限责任公司, 湖北 武汉 430415;

3.中国华能集团有限公司华中分公司, 湖北 武汉 430077)

[摘要] 氯离子是发电厂脱硫系统的关键运行指标, 快速准确监测脱硫浆液氯离子对脱硫设备防腐、运行工艺优化调整、脱硫废水排放及节水均具有重要意义。通过样品预处理的方法研发出了一种高效复合介质滤芯, 及适用于脱硫系统样品预处理的方法, 并进行了实验室实验; 对脱硫系统氯离子在线测量方法原理进行研究, 研制出了一种固态聚合膜氯离子选择性电极, 研究出了一种发电厂脱硫系统氯离子在线监测技术, 并进行了实验室准确性实验以及现场工业应用试验。结果表明: 该脱硫系统氯离子在线监测技术能够实现脱硫浆液中氯离子的连续准确在线监测, 大大减少了工作量, 提高氯离子测量准确性, 对实现脱硫系统设备的经济、智能化运行具有重要意义。

[关键词] 脱硫系统; 脱硫浆液; 氯离子; 在线监测; 样品预处理

[引用本文格式] 钟杰, 刘玮, 龙国军, 等. 发电厂脱硫系统氯离子在线监测技术研究及应用[J]. 热力发电, 2024, 53(2): 170-176. ZHONG Jie, LIU Wei, LONG Guojun, et al. Research and application of on-line monitoring technology for chloride in desulfurization system of power plant[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(2): 170-176.

Research and application of on-line monitoring technology for chloride in desulfurization system of power plant

ZHONG Jie¹, LIU Wei¹, LONG Guojun¹, WU Lei², XIONG Weijun², LIU Hailong³

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Huaneng Wuhan Power Generation Co., Ltd., Wuhan 430415, China; 3. Huazhong Branch, China Huaneng Group Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

Abstract: Chloride ion is the key operating index in desulfurization system of power plants. Rapid and accurate monitoring of chloride ion content in desulfurization slurry is of great significance for anti-corrosion of desulfurization equipment, optimization and adjustment of operation process, as well as desulfurization waste water discharge and water saving. By studying the pretreatment method of sample, a high-efficiency composite medium filter is developed, and the method suitable for the desulfurization system sample pretreatment is studied, and the laboratory test is carried out. At the same time, by studying the principle of online measurement method of chloride ion in desulfurization system, a solid polymer membrane chloride selective electrode is developed, and on-line monitoring technology of chloride ion in desulfurization system of power plant is developed, and the accuracy test in laboratory and field industrial application test are carried out. The results show that, the technology can realize continuous and accurate online monitoring of chloride ion content in desulfurization slurry, reduce the workload of laboratory personnel greatly, and improve the accuracy of chloride ion measurement. It is of great significance to realize the economic and intelligent operation of desulfurization system equipment.

Key words: desulfurization system; desulfurization slurry; chloride ion; on-line monitoring; pretreatment of sample

收稿日期: 2023-07-06

基金项目: 西安热工研究院有限公司研究开发基金项目 (TK-22-TYK08)

Supported by: Research and Development Fund of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. (TK-22-TYK08)

第一作者简介: 钟杰 (1994), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为发电厂水汽品质监测与控制, zhongjie@tpri.com.cn.

近年来,随着我国对环保的日益重视,烟气脱硫及废水零排放成为各大燃煤发电企业污染物排放关注的焦点^[1]。氯离子具有极强的腐蚀性,是脱硫浆液及脱硫废水监测中的关键指标,过高的氯离子不仅会对脱硫设备产生严重腐蚀危害,还会降低脱硫浆液中 CaCO_3 的分解速率,改变脱硫浆液 pH 值,影响脱硫塔中 SO_2 的去除,降低脱硫效率,造成石灰石的消耗,增加运行成本^[2-6]。《火力发电厂石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统设计规程》(DL/T 5196—2016)将氯离子列为关键运行指标,要求脱硫浆液中的氯离子质量浓度不高于 20 000 mg/L^[7]。因此,快速准确检测脱硫浆液及脱硫废水的氯离子含量具有重要意义^[8-9]。

水样中氯离子测定的方法主要有摩尔法、电位滴定法、离子选择性电极法、离子色谱法、分光光度法、原子吸收法等。其中,离子色谱法、分光光度法和原子吸收法适用于低含量氯离子水样的分析,且仪器设备昂贵,测量系统复杂,不适用于脱硫系统水样;离子选择性电极法具有响应快速、易微型化、操作方便、能够在线监测等优点,但存在受其他干扰离子影响较大等问题,未在脱硫系统水样监测中应用;电位滴定法测量准确性高、重复性好,但测量需消耗大量化学试剂,因此无法实现在线监测,不适用于脱硫系统氯离子的在线测量;摩尔法需要化验人员定期取样进行实验室分析,实验室分析方法不仅操作繁琐,大大增加运维人员的工作量,而测量准确性受工作人员分析水平限制,准确性难以保证^[10-14]。

脱硫系统氯离子在线监测技术研究存在以下问题:1)测量量程受限,脱硫浆液中氯离子质量浓度极高,超出各类现有离线分析方法或设备测量上限,采用稀释等测量方法会带来极大误差;2)杂质离子干扰,脱硫浆液中含有大量硫酸根、氟离子、溴离子等离子,这些离子会对测量造成严重干扰,现有方法很难去除上述杂质离子的干扰;3)泥渣悬浮物污堵干扰,脱硫浆液含有大量泥渣型悬浮物及其他不溶物,浊度、有机物含量等指标极高,极易污染损坏各类测量传感器及设备。

基于以上原因,迫切需要研发适用于脱硫系统氯离子在线测量技术及仪表。本文研发出一种脱硫系统氯离子在线监测技术及系统,实现脱硫系统氯离子的在线监测,在确保测量准确性的同时,大大减少化验工作量。

1 脱硫浆液预处理方法

脱硫浆液含有大量泥渣型悬浮物及其他不溶物,严重影响测量仪表的使用寿命和测量准确性。脱硫浆液及脱硫废水样品预处理可以去除悬浮物、不溶物及其他干扰因素,使预处理后的样品可以直接进入分析仪器。

1.1 预处理方法原理

预处理原理为机械过滤。根据脱硫浆液水质情况,研制出一种高效复合介质滤芯,该滤芯主要材质为 PP 熔喷材料,是以聚丙烯为原料,经过加热熔融、喷丝、牵引、接受成型制成的管状滤芯。滤芯结构为外层疏松、内层紧密,独特的梯度深层过滤可实现立体滤渣效果。

脱硫浆液预处理系统工艺如图 1 所示。预处理设备主要由设备主体、滤芯、压力表和各阀门及相关管路组成。图 1 中 V1 为水样入口阀, V2 为预处理水样出水阀, V3 为正洗冲洗阀, V4 为反洗水冲洗阀, V5 为底部排污阀, V1—V5 均为电动球阀,根据控制系统设定程序运行。

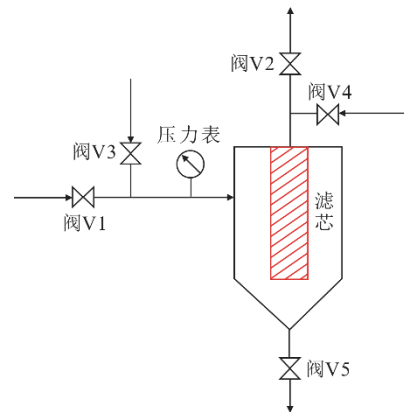


图 1 脱硫浆液预处理工艺原理

Fig.1 Schematic diagram of desulfurization slurry pretreatment process

预处理系统运行时,水样入口阀门 V1 和预处理水样出水阀门 V2 打开,正洗冲洗阀 V3、反洗水冲洗阀 V4 和底部排污阀门 V5 关闭,水样通过滤芯进行预处理,预处理后的水样通过 V2 进入分析仪器进行测量。当压力达到预设值或运行时间达到预设值时,启动清洗程序, V1 和 V2 关闭, V3、V4 和 V5 打开,对预处理设备进行清洗,废液通过 V5 排出。清洗完毕后,自动进入运行程序。

1.2 预处理系统性能实验

根据预处理工艺原理搭建预处理系统模拟实

验台,在实验室进行预处理系统实验,实验浆液为某电厂脱硫吸收塔浆液。设定预处理系统周期过滤时间为2h,运行过程中通过量杯收集过滤后水样,通过流量计观察过滤速度,通过压力表观察预处理系统入口压力,每隔10min记录量杯中过滤水量、过滤速度以及预处理系统入口压力;同时,取样测量未经预处理的脱硫浆液中氯离子含量和经过预处理后滤液中氯离子含量;当达到过滤时间后,自动启动清洗程序,清洗时间为3min,清洗结束后,自动转入过滤程序,循环进行。浆液预处理前后水质情况如图2所示,预处理系统首次运行实验结果见表1、表2。



图2 预处理前后水质情况对比

Fig.2 Comparison of water quality before and after pretreatment

表1 预处理系统实验室首次水质测试结果 单位:mg/L

Tab.1 Water quality test results of the first operation of the pretreatment system

项目	悬浮物质量浓度	氯离子质量浓度
预处理前	148 820	10 198
预处理后	86	10 296

表2 预处理系统首次实验结果

Tab.2 First operation test results of pretreatment system

运行时间/min	过滤水量/L	过滤速度/(mL·min ⁻¹)	预处理系统入口压力/MPa
0	0	150	0.11
60	4.6	50	0.12
120	7.2	50	0.14

由实验结果可知,预处理后悬浮物去除率达99%,氯离子质量浓度未发生明显变化,且2h过滤水量约7.2L,平均过滤速度约60mL/min,整个运行过程压力低于0.15MPa。

预处理系统经过30天长时间运行后,对其1个运行周期内过滤效果进行实验。每隔10min记录量杯中过滤水量、流量计所示过滤速度以及预处理系统入口压力,同时取样测量预处理前后脱硫浆液中

氯离子质量浓度,实验结果见表3、表4。

表3 预处理系统运行30天后1个运行周期水质测试结果 单位:mg/L

Tab.3 Water quality test results of one run cycle after 30 days operation of the pretreatment system

项目	悬浮物质量浓度	氯离子质量浓度
预处理前	155 220	11 264
预处理后	88	11 315

表4 预处理系统运行30天后1个运行周期实验结果

Tab.4 The test results of one run cycle after 30 days operation of the pretreatment system

运行时间/min	过滤水量/L	过滤速度/(mL·min ⁻¹)	预处理系统入口压力/MPa
0	0	160	0.10
60	4.4	45	0.13
120	6.6	30	0.15

由实验结果可知,预处理系统经过30天长时间运行后,入口悬浮物质量浓度为155 220mg/L,过滤后为88mg/L,悬浮物去除率达99%,出水水质满足测量要求。而且该预处理系统在设定的2h运行周期结束时,过滤水量仍可达到6.6L,未出现污堵情况,运行状态良好。

水样经过预处理系统后悬浮物质量浓度明显降低,预处理后的样品可以直接进入分析仪器不会影响氯离子质量浓度,且预处理系统能够长期稳定运行,满足在线测量要求。

2 脱硫浆液氯离子在线测量技术

2.1 测量原理

离子选择性电极是指具有将溶液中某种特定离子的活度转变成一定电位功能的电极^[15],其原理是基于能斯特方程的电位式分析法。本技术采用离子选择性电极法测量氯离子质量浓度,测量时电极膜与溶液界面发生离子交换反应,在电极表面建立具有一定梯度的双电层,电极与溶液之间产生电位差,构成可逆原电池。电位差与氯离子活度符合能斯特方程:

$$E = E_0 - \frac{2.302}{nF} 6RT \lg a_{Cl} \quad (1)$$

式中: E 为水样中氯离子选择性电极和参比电极间的电位差; E_0 为标准电极电位; a_{Cl} 为待测溶液中氯离子的活度; n 为电极反应得失电子数,此时 $n=1$; F 为法拉第常数; R 为气体常数; T 为热力学温度。

令 $k=2.302 6RT/nF$,根据式(1)得出溶液氯离子质量浓度 c_{Cl} (mg/L)与氯离子选择性电极的电极电位 E (mV)对应关系:

$$c_{Cl} = 10^{\left(\frac{E_0 - E}{k}\right)} \times 35.5 \times 10^3 \quad (2)$$

根据式(2),通过测量电位差即可计算出氯离子质量浓度^[16-19]。

2.2 高性能氯离子选择性电极

离子选择性电极法具有测量氯离子响应快速、操作方便、无需配制专用滴定溶液及指示剂等优点,是脱硫系统在线氯离子测量的基本方法。但氯离子选择性电极受干扰离子影响较大,脱硫浆液大量的 SO₄²⁻、F⁻、Br⁻、NO₃⁻等离子,将严重影响氯离子测量准确性。因此,需研发一种高性能氯离子选择性电极,减少干扰离子对测量的影响^[20-25]。

离子选择性膜是离子选择电极的核心,其材料主要分为固态膜和液态膜 2 种。固态膜通过固体单晶或多晶膜测量电位差,对氯离子的选择性好,多用于高质量浓度氯离子的测量,但是对低质量浓度氯离子响应能力较差;液态膜是将离子选择性化合物嵌入在 PVC 中测量电位差,具有较好的响应能力和检测下限,但是测量易受 F⁻、Br⁻和 NO₃⁻等阴

离子干扰^[26-28]。

本文研究出了一种固态聚合膜氯离子选择电极,可兼顾固态膜和液态膜的优点,适用于高质量浓度氯离子的测量,具有良好的响应能力,电极对氯离子的选择性强。该电极结构示意图如图 3 所示。

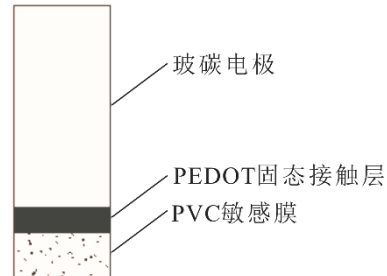


图 3 固态聚合膜氯离子选择性电极的结构示意
Fig.3 Schematic diagram of chloride ion selective electrode with solid polymerized membrane

采用固定干扰法对研发的高性能氯离子电极和普通电极进行干扰离子测试。配制质量浓度 20 000 mg/L 的氯离子溶液,加入不同质量浓度的干扰离子,氯离子质量浓度测量结果见表 5。

表 5 干扰离子对氯离子测量结果的影响

Tab.5 Influence of interfering ions on measurement results of chloride ion

干扰离子	干扰离子质量浓度/(mg·L ⁻¹)	氯离子标准溶液质量浓度/(mg·L ⁻¹)	高性能氯离子电极		普通氯离子电极	
			氯离子质量浓度/(mg·L ⁻¹)	干扰离子影响/%	氯离子质量浓度/(mg·L ⁻¹)	干扰离子影响/%
F ⁻	200	20 000	20 189	0.9	21 256	6.3
SO ₄ ²⁻	10 000	20 000	20 116	0.6	20 951	4.8
SO ₃ ²⁻	10 000	20 000	20 090	0.5	21 403	7.0
NO ₃ ⁻	200	20 000	20 210	1.1	20 815	4.1
NO ₂ ⁻	200	20 000	20 165	0.8	20 722	3.6
Br ⁻	100	20 000	20 201	1.1	23 556	17.8

注:干扰离子影响等于氯离子质量浓度测量值与标准溶液质量浓度的差与氯离子标准溶液质量浓度之比。

由实验结果可知,固态聚合膜氯离子电极选择性强,其他杂质离子对测量的干扰不超过 1.1%,其离子选择性能远优于其他普通电极。

2.3 脱硫系统氯离子在线测量系统

脱硫系统氯离子在线测量系统结构如图 4 所示。

2.4 测量准确性

2.4.1 氯离子标准溶液准确性测量试验

配制质量浓度 10 000、15 000、20 000、25 000、30 000、50 000 mg/L 的氯离子溶液,采用该氯离子在线测量系统测定标准溶液氯离子含量,每个标准溶液均做 6 次平行测定,测量误差及相对标准偏差见表 6。由表 6 可知,采用该氯离子在线测量系统测量相对误差不超过±5%,相对标准偏差不超过

3%,重复性和准确性可满足技术要求。

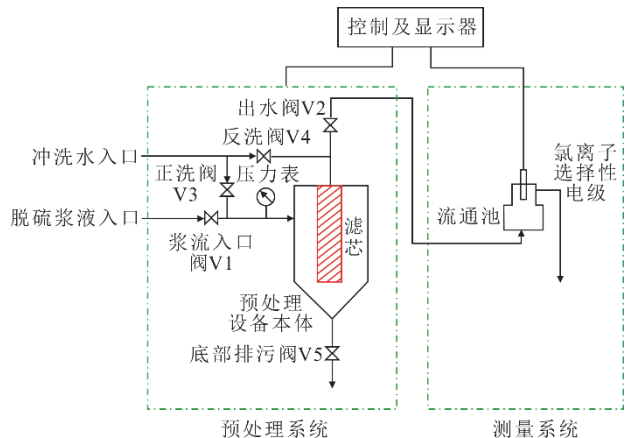


图 4 脱硫系统在线氯离子测量系统
Fig.4 Schematic diagram of the online measurement system for chloride ion in desulfurization system

表 6 脱硫系统氯离子在线测量系统测量准确性试验结果

Tab.6 Measurement accuracy test results of online measurement system for chloride ion in desulfurization system

项目	氯离子标准溶液质量浓度/(mg·L ⁻¹)						
	10 000	15 000	20 000	25 000	30 000	50 000	
测量氯离子质量浓度/(mg·L ⁻¹)	1	9 936	14 562	19 509	24 112	28 198	47 735
	2	10 239	14 867	19 825	24 391	28 328	47 988
	3	10 428	15 213	19 871	24 279	28 525	48 237
	4	10 549	15 425	19 871	24 447	28 657	48 237
	5	10 671	15 425	19 871	24 391	28 856	47 600
	6	10 795	15 496	19 508	24 391	28 989	49 000
平均值/(mg·L ⁻¹)	10 436	15 165	19 742	24 335	28 592	48 133	
相对误差/%	4.36	1.10	-1.29	-2.66	-4.69	-3.73	
相对标准偏差/%	2.99	2.47	0.92	0.50	1.06	1.03	

2.4.2 脱硫浆液氯离子准确性测量试验

采用该在线氯离子测量系统与经过检定的电位滴定仪测量不同质量浓度脱硫浆液中氯离子, 结果见表 7。由表 7 可知, 通过脱硫系统氯离子在线测量系统测量相对误差不超过±5%, 测量准确性满足要求。

表 7 脱硫浆液氯离子质量浓度测量结果
Tab.7 Measurement results of chloride ion mass concentration in desulfurization slurry

序号	电极法测量值/(mg·L ⁻¹)	电位滴定仪测量值/(mg·L ⁻¹)	测量误差/%
1	2 987	3 039	-1.71
2	9 815	10 100	-2.82
3	13 325	14 000	-4.82
4	16 840	17 605	-4.35
5	20 090	20 100	-0.05
6	21 486	22 000	-2.34
7	24 561	25 714	-4.48
8	47 968	50 000	-4.06

3 工业应用试验

某电厂 600 MW 燃煤发电机组脱硫浆液中氯离子含量通过定期取样人工化验。在该机组脱硫塔增加脱硫浆液氯离子在线测量取样点, 通过脱硫系统氯离子在线测量系统对氯离子质量浓度进行在线测量。以电位滴定仪所测氯离子质量浓度为标准值^[29-31], 比对脱硫系统氯离子在线系统测量准确性, 并连续运行 500 h 以上, 观察系统稳定运行状况。试验数据如图 5 所示。由图 5 可知, 在工业试验期间, 脱硫系统氯离子在线测量系统测量值与电位滴定仪测量值基本一致, 变化趋势相同, 相对误差不超过±5%。这表明脱硫系统氯离子在线测量系统能够准确监测脱硫浆液中氯离子质量浓度, 而且

保持稳定运行状态, 测量数据连续、稳定、可靠。

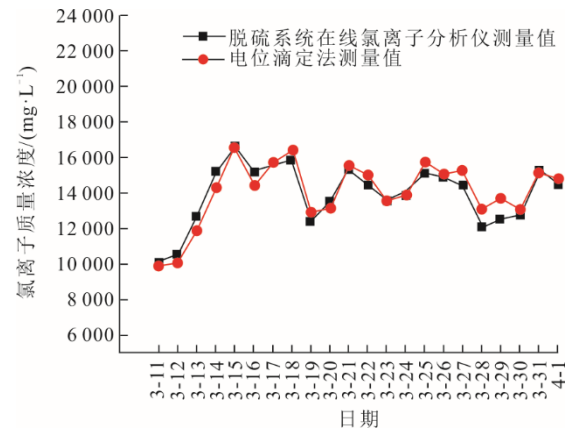


图 5 某电厂脱硫系统氯离子在线测量系统测量数据
Fig.5 The measurement data of online measurement system for chloride ion in desulfurization system of a power plant

4 结 论

1) 本文提出了一种脱硫浆液预处理方法, 结合自主研发的高效复合介质滤芯, 能够在线连续去除浆液中各种泥渣、悬浮物及不溶物。经过预处理系统后的水质明显澄清, 悬浮物去除率可达 99% 以上, 且预处理前后氯离子质量浓度不发生变化, 满足脱硫系统氯离子在线测量的要求。

2) 高性能氯离子选择性电极能准确测量高质量浓度氯离子, 并能有效消除其他杂质离子对测量的干扰, 使干扰影响不超过 1.1%, 保证测量结果准确性, 适用于脱硫浆液复杂样品氯离子测量。

3) 采用以高效复合介质滤芯为主体的脱硫浆液预处理方法及高性能氯离子选择性电极的脱硫系统氯离子在线测量技术及系统, 在某电厂进行应用试验。结果表明, 该技术实现了脱硫浆液中氯离子质量浓度的在线准确测量, 提高了氯离子测量准

确性,这对实现脱硫系统设备的经济、智能化运行具有重要意义。

[参考文献]

- [1] 吕武学,邱明杰,于燕飞,等. 燃煤电厂脱硫废水零排放母液制备净水剂新工艺分析[J]. 热力发电, 2021, 50(4): 97-102.
LYU Wuxue, QIU Mingjie, YU Yanfei, et al. Preparation of water purifying agent by using zero discharge mother liquid of FGD in coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(4): 97-102.
- [2] 倪黎. 脱硫废水处理过程氯对锅炉设备影响分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 1-10.
NI Li. Analysis of influence of chlorine on boiler equipment in desulfurization wastewater treatment process[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020: 1-10.
- [3] 刘新妹. 电厂废水中高含量氯离子自动检测技术研究及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2018: 2-5.
LIU Xinmei. Research and application of high content chlorine ion automatic detection technology in power plant wastewater[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018: 2-5.
- [4] 杨博. 电解-电渗析法处理湿法烟气脱硫废水中氯离子的试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2017: 1-4.
YANG Bo. Experimental study on processing Cl⁻ in WFGD wastewater by electrolysis-electrodialysis method[D]. Jinan: Shandong University, 2017: 1-4.
- [5] 马双忱,徐昉,徐东升,等. 燃煤电厂脱硫废水氯离子检测现状与应用进展[J]. 化工进展, 2018, 37(10): 4044-4051.
MA Shuangchen, XU Fang, XU Dongsheng, et al. Advances in the detection of chlorides in desulfurization wastewater of coal-fired power plant[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(10): 4044-4051.
- [6] 陈向阳,曹建宗,樊帅军,等. 湿法烟气脱硫浆液氯离子质量浓度模拟计算与优化运行[J]. 热力发电, 2022, 51(5): 97-105.
CHEN Xiangyang, CAO Jianzong, FAN Suaijun, et al. Simulation calculation and optimized operation of mass concentration of chlorine ion in wet flue gas desulfurization slurry[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(5): 97-105.
- [7] 火力发电厂石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统设计规程: DL/T 5196—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 15.
Code for design of limestone/gypsum wet flue gas desulfurization system of fossil fired power plant: DL/T 5196—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 15.
- [8] 刘新妹,星成霞,王应高,等. 复杂背景废水中高含量氯离子检测技术探讨[J]. 华北电力技术, 2017, 6: 67-70.
LIU Xinmei, XING Chengxia, WANG Yinggao, et al. Study on detection technology of high content of chloride ion in wastewater with complex background[J]. North China Electric Power, 2017, 6: 67-70.
- [9] 马双忱,黄陆月,葛昊然,等. 电解制氯技术处理燃煤电厂脱硫废水研究进展[J]. 热力发电, 2022, 51(2): 12-20.
MA Shuangchen, HUANG Luyue, GE Haoran, et al. Research progress on treatment of desulfurization wastewater from coal-fired power plants by electrochlorination technology[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(2): 12-20.
- [10] 戴恩贤,周英. 多项目自动电位滴定连续检测中氯离子测定的研究[J]. 工业水处理, 2015, 35(9): 82-86.
DAI Enxian, ZHOU Ying. Study on the determination of chloride ions in the continuous detection by multi-project automatic potentiometric titration[J]. Industrial Water Treatment, 2015, 35(9): 82-86.
- [11] 梁科红,李蓓,阎伟华,等. 氨法脱硫浆液中氯离子测定方法的应用探索[J]. 化工管理, 2019, 16: 35-36.
LIANG Kehong, LI Bei, YAN Weihua. Application of determination of chloride ions in ammonia desulfurization slurry[J]. Chemical Engineering Management, 2019, 16: 35-36.
- [12] 付志浩,罗正维,谢刚,等. 烟道气氨法脱硫铵液中氟氯离子在线监测技术优化[J]. 工业安全与环保, 2019, 45(9): 1-4.
FU Zhihao, LUO Zhengwei, XIE Gang, et al. Optimization of on-line monitoring technology for fluoride and chloride in flue gas ammonia desulfurization ammonia sulfate solution[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2019, 45(9): 1-4.
- [13] 李永生,郭慧. 工业水中氯离子测定方法的进展[J]. 工业水处理, 2007, 27(4): 1-4.
LI Yongsheng, GUO Hui. Development of the determination of chloride ions in industrial water[J]. Industrial Water Treatment, 2007, 27(4): 1-4.
- [14] 翟秋月,星成霞,王应高,等. 流动注射-离子选择性电极电位法测定电厂脱硫废水中的氯离子[J]. 河南化工, 2020, 37(4): 51-53.
ZHAI Qiuyue, XING Chengxia, WANG Yinggao, et al. Determination of chloride ion in desulfurization wastewater of power plant by flow injection ion-selective electrode potentiometry[J]. Henan Chemical Industry, 2020, 37(4): 51-53.
- [15] 承慧才,王中甲,孙墨杰,等. 电厂化学仪表[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 1998: 29.
CHENG Weicai, WANG Zhongjia, SUN Mojie, et al. Chemical instrument of power plant[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 1998: 29.
- [16] JUNSOMBOON J, JAKMUNEE J. Determination of chloride in admixtures and aggregates for cement by a simple flow injection potentiometric system[J]. Talanta, 2008, 76: 365-368.
- [17] MARTINA V. PATRICK M, CLAUDIA G, et al. Low-cost potentiometric sensor for chloride measurement in continuous industrial process control[J]. Molecules, 2022, 27: 3087-3088.
- [18] 陈吉勇,陈娟. 基于离子选择性电极的氯离子浓度检测的研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2016, 43(5): 95-100.
CHEN Jiyong, CHEN Juan. Study of chloride ion concentration detection based on ion-selective electrodes[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Nature Science), 2016, 43(5): 95-100.
- [19] 郭杰. 新拌混凝土含水量及氯离子含量快速测定与装置的开发研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2009: 19-25.
GUO Jie. Rapid measurement of water content and chloride ion content in fresh concrete and the development of its device[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009: 19-25.
- [20] 黄德培,沈子琛,吴国梁,等. 离子选择电极的原理及

- 应用[M]. 1 版. 北京: 国防工业出版社, 1982: 47-49.
- HUANG Depei, SHEN Zichen, WU Guoliang, et al. Principle and application of ion selective electrode[M]. 1th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 1982: 47-49.
- [21] 雷鸣. 氯离子传感技术的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018: 9-14.
- LEI Ming. Study on the technology of chlorine ion sensing[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018: 9-14.
- [22] 孙奎. 氯离子检测系统研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018: 13-15.
- SUN Kui. Study on the system of chlorine ion detection[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018: 13-15.
- [23] 陈吉勇. 氯离子浓度检测的研究与实现[D]. 北京: 北京化工大学, 2016: 9-15.
- CHEN Jiyong. Research and implementation of chlorine ion concentration detection[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016: 9-15.
- [24] MCGAUGHY K, WILHELM J P, REZA M T. Ion selective electrodes for flue gas desulfurization wastewater monitoring: effects of ionic strength on selective ions[J]. Applied Sciences, 2019, 9: 1-13.
- [25] VERA G D, CLIMENT M A, ANTON C, et al. Determination of the selectivity coefficient of a chloride ion selective electrode in alkaline media simulating the cement paste pore solution[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2010, 11: 43-49.
- [26] ZHE L, HUANG S H, JUAN C, et al. Fabrication and optimization of chloride ion electrode based on bilayer membrane[J]. Electrochemical Science, 2020, 15: 6376-6395.
- [27] PARK W J, LEE H S, JOH S H, et al. Monitoring method for the chloride ion penetration in mortar by a thin-film sensor reacting to chloride ion[J]. Construction and Building Materials, 2014, 53: 403-410.
- [28] 刘喆. 航空装备盐雾腐蚀环境微液膜氯离子监测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019: 12-58.
- LIU Zhe. Study on Chloride ion monitoring technology of micro-liquid membrane in salt spray corrosion environment of aviation equipment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019: 12-58.
- [29] 宋晓红, 高姗, 杨杰, 等. 自动电位滴定法测定脱硫系统中氯化物[J]. 理化检验-化学分册, 2011, 47(6): 684-686.
- SONG Xiaohong, GAO Shan, YANG Jie, et al. Automatic potentiometric determination of chloride in desulfurizing system[J]. PTCA (Part B: CHEM. ANAL.), 2011, 47(6): 684-686.
- [30] 杭蕾, 吕程, 陈慧慧, 等. 自动电位滴定法测定烟气氨法脱硫模拟浆液中氯离子的研究[J]. 工业安全与环保, 2015, 41(3): 31-34.
- HANG Lei, LYU Cheng, CHEN Huihui, et al. The study on detection of chloride ion in flue gas ammonia sulfate slurry by automatic potentiometric titration method[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015, 41(3): 31-34.
- [31] 工业循环冷却水和锅炉用水中氯离子的测定: GB/T 15453—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 2-3.
- Determination of chloride in water for industrial circulating cooling system and boiler: GB/T 15453—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018: 2-3.

(责任编辑 杨嘉蕾)