

张文帅,白鸿斌,边金利,等.阻垢剂在低温多效海水淡化装置中的工业化应用[J].净水技术,2024,43(7):177-182.

ZHANG W S, BAI H B, BIAN J L, et al. Industrial application of scale inhibitor in low-temperature multi-effect seawater desalination[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(7): 177-182.

## 阻垢剂在低温多效海水淡化装置中的工业化应用

张文帅\*,白鸿斌,边金利,依庆文,邢兆强,王伟亮

(天津国投津能发电有限公司,天津 300480)

**摘要** 目前我国低温多效海水淡化水处理药剂基本为国外公司垄断,价格昂贵。国产海水淡化阻垢缓蚀剂也正在突破瓶颈,质量、性能日渐成熟,但是缺乏统一、完善系统的方法验证,同时缺乏大型海水淡化工程考核验收平台,导致海水淡化水处理药剂价格居高不下。为打破国外垄断,提升我国海水淡化药剂自主创新能力和核心竞争力,并降低药剂使用成本,采用2.5万t/d低温多效海水淡化装置,开展了SD210阻垢剂在工业化试验装置中应用研究。试验结果表明:在为期2个月的试验期内,在SD210投加质量浓度为4~8 mg/L条件下,装置运行安全、平稳,无明显结垢和腐蚀现象;且海水淡化装置产品水水质优于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)所规定的指标要求。综上,SD210阻垢剂性能良好,能满足低温多效海水淡化装置使用要求。

**关键词** 低温多效 海水淡化 阻垢剂 工业化试验 浓缩海水 造水比

中图分类号: P747 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)07-0177-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.07.021

## Industrial Application of Scale Inhibitor in Low-Temperature Multi-Effect Seawater Desalination

ZHANG Wenshuai\*, BAI Hongbin, BIAN Jinli, YI Qingwen, XING Zhaoqiang, WANG Weiliang

(Tianjin SDIC Jinneng Electric Power Co., Ltd., Tianjin 300480, China)

**Abstract** At present, the low-temperature multi-effect(LT-MED) seawater desalination water treatment agents in China are basically monopolized by foreign companies, and the price is expensive. Domestic scale and corrosion inhibitors for seawater desalination are also breaking through the bottleneck, and their quality and performance are becoming more and more mature, but they are lack of unified and systematic method verification, and lack of examination and acceptance platform for large-scale seawater desalination projects. As a result, the price of seawater desalination water treatment medicament remains high. In order to break the foreign monopoly, enhance the independent innovation ability and core competitiveness of seawater desalination agents in our country, and reduce the use cost of seawater desalination agents, a study on the application of SD210 scale inhibitor in industrial test plant was carried out by using 25 000 t/d LT-MED seawater desalination plant. The test results showed that during the 2-month test period, under the condition that the mass volume concentration of SD210 was 4~8 mg/L, the device operates safely and smoothly. No obvious scaling and corrosion. And the water quality of seawater desalination plant was better than that of *Standards for Drinking Water Quality*(GB 5749—2006). In summary, SD210 has good scale inhibition performance and can meet the requirements of LT-MED seawater desalination plant.

**Keywords** low-temperature multi-effect seawater desalination scale inhibitor industrialization experiment concentrated seawater gained output ratio(GOR)

目前,我国海水淡化技术日臻成熟,关键核心技

术装备自主可控,产业链、供应链现代化水平进一步提高<sup>[1-3]</sup>。然而,在海水淡化水处理药剂领域我国海水淡化水处理药剂长期被国外公司垄断,价格居高不下,给企业经营带来不小负担。为此,国内高校、科研院所等先后开展了大量研究工作,研发出羧

[收稿日期] 2023-08-20

[通信作者] 张文帅(1980—),男,正高级工程师,主要从事海水淡化与电厂化学技术管理工作,E-mail:15609315@qq.com。

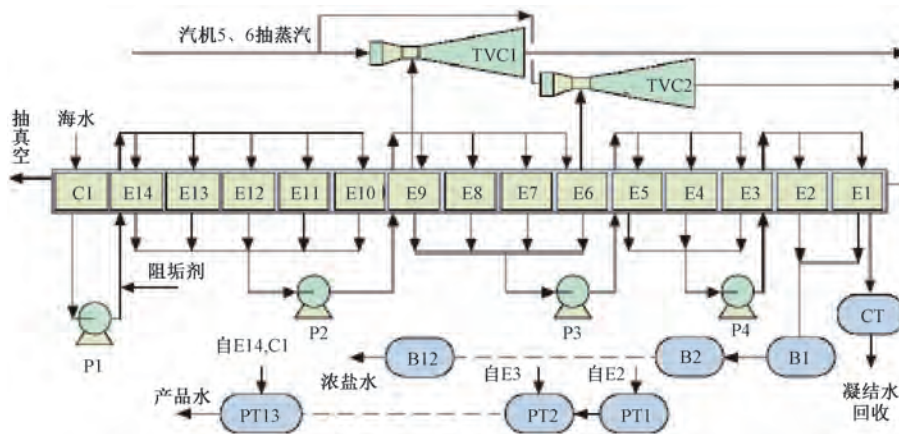
酸和环氧乙烷基团的亲水共聚物(AA/APEA)<sup>[4]</sup>、丙烯酸/2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸/羟丙基磺酸烯丙基醚(AA/AMPS/AHPSE)<sup>[5]</sup>等新型共聚物及以马来酸与丙烯酸共聚物(AA/MA)<sup>[6]</sup>、聚丙烯酸钠(PAAS)<sup>[7]</sup>等为主要原料的新产品,同时还设计出小型动态评价试验装置<sup>[8]</sup>。但缺乏大型海水淡化工程考核验收平台,相关药剂性能不能得到充分验证,因此,企业也不敢贸然采用。为此,在中试试验基础上,采用国内自主知识产权的SD210海水淡化阻垢剂(SD210为国内某科研院所自主研发的低温多效海水淡化专用阻垢剂自命名型号),利用2.5万t/d低温多效海水淡化装置,开展工业化应用试验,从装置运行状况、药剂阻垢缓蚀性能和产品水水质3个方面对使用效果进行综合评测,以实现与进口药剂相互替代,并为大型工程考核验收平台建设

提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

北疆电厂4#低温多效海水淡化装置采用基于蒸气压循环的多效蒸馏工艺,如图1所示。装置动力蒸汽采用汽轮机组5、6段抽汽,装置本体由14效蒸发器和1台降膜式冷凝器(FFC)、1台强制循环冷凝器(FCC)组成,其中1~2效为4段高温效组,3~5效为3段中温效组,6~9效为2段中温效组,10~14效为1段低温效组。14效加降膜冷凝器“逆流”运行工艺,即加热蒸汽由第1效流向第14效,入料原海水相反,因此,第1效蒸发器内运行工况温度最高,料液浓缩倍率最大、含盐量也最高,是装置内最容易结垢的部位。蒸发海水产生淡水效体内换热管采用材质为5052的铝合金。



注: E1~E14为第1~第14效蒸发器; TVC1为高压蒸汽喷射器; TVC2为低压蒸汽喷射器; B1~B12为浓盐水闪蒸罐; PT1~PT13为产品水闪蒸罐; C1为降膜式冷凝器; CT为凝水回收缓冲罐; P1~P4为给水泵。

图1 低温多效海水淡化装置工艺流程

Fig. 1 Technological Flow Chart of LT-MED Device

### 1.2 试验药剂

SD210海水淡化阻垢剂为国产市售产品,以丙烯酸为主要原料制得,物理特性指标如下:pH值为2.41,密度为1.19 g/cm<sup>3</sup>,固含量为39.11%,总磷(以PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>计)为1.0%。按照《火力发电厂循环水用阻垢缓蚀剂》(DL/T 806—2013),SD210磷酸盐含量小于2%,为无磷阻垢剂。试验过程中,SD210经变频泵注入入料原海水中,其投加质量浓度为4~8 mg/L(以入料海水量计)。

### 1.3 试验用水

本研究的入料用水为经絮凝、沉降等预处理工

序后的原海水,其水质分析检测结果,如表1所示。

### 1.4 试验方法

通过装置运行监控、药剂阻垢缓蚀性能和产品水水质3个方面来综合评估SD210的药剂性能,以及对产品水水质的影响,以下为具体试验方法。

#### 1.4.1 装置运行监控

装置运行过程主要通过监控各效体传热温差变化量、造水比来评估装置运行情况及SD210的阻垢性能。

##### (1) 传热温差变化量

传热温差可以有效反映效体内的结垢情况,其

表1 入料水水质  
Tab. 1 Feed-Water Quality

检测项	单位	检测值	分析方法执行标准
浑浊度	NTU	0.17	《海洋监测规范 第4部分:海水分析》(GB 17378.4—2007)
pH	/	8.11	《海洋监测规范 第4部分:海水分析》(GB 17378.4—2007)
总碱度	mg/L	135.0	《海水碱度的测定 pH电位滴定法》(HY/T 178—2014)
Cl <sup>-</sup>	g/L	17.49	《工业循环冷却水和锅炉用水中氯离子的测定》(GB/T 15453—2018)
Ca <sup>2+</sup>	mg/L	360.1	《锅炉用水和冷却水分析方法 钙的测定 络合滴定法》(GB/T 6910—2006)
Mg <sup>2+</sup>	mg/L	1 106.0	《锅炉用水和冷却水分析方法 钙的测定 络合滴定法》(GB/T 6910—2006)

值越小,说明传热管传热性能越好,且结垢程度较轻。在试验期间,以试验开始前效体传热温差为 $\Delta T_0$ ,试验开始后某时刻效体传热温差为 $\Delta T_i$ ,考察效体传热温差变化量( $\Delta T_i - \Delta T_0$ )随时间的变化情况。其中,4段高温效组选择1效和2效,3段、2段和1段效组分别以3效、6效及10效为准。

(2)造水比

造水比为海水淡化装置淡水总产量与盐水加热器所消耗的蒸汽量之比,是衡量海水淡化装置性能的重要参数。若阻垢剂选用不当,蒸发器内传热管短时间大量结垢,将导致装置造水比大幅降低。为此,在试验期间,考察装置造水比随时间的变化情况,来评估SD210的阻垢性能。

1.4.2 药剂阻垢缓蚀性能评价

(1)阻垢性能

参照标准《海水冷却水处理药剂性能评价方法 第2部分:阻垢性能的测定》(GB/T 34550.2—2017)<sup>[9]</sup>进行,通过测定同时刻入料原海水和浓海水中的Cl<sup>-</sup>浓度和总碱度等水质指标,计算得出浓缩倍率及 $\Delta A$ (Cl<sup>-</sup>浓缩倍数与总碱度浓缩倍数之差),来评估浓缩海水结垢倾向及SD210的阻垢性能,其中 $\Delta A$ 值越小,说明浓缩海水结垢倾向越小,而SD210阻垢性能也越好。

(2)缓蚀性能

参照标准《海水冷却水处理药剂性能评价方法 第1部分:缓蚀性能的测定》(GB/T 34550.1—2017)<sup>[10]</sup>进行,在效体内的传热管底部设置5052铝合金腐蚀监测片,通过试验前后金属试样重量的变化来测定金属的腐蚀速率。腐蚀监测片的选用和处理参照《水处理剂缓蚀性能的测定 旋转挂片法》(GB/T 18175—2014),选用标准I型试片,规格为50 mm×25 mm×2 mm。

1.4.3 产品水水质分析

系统稳定运行后,采用随机抽样法,对产品水水质进行检测,评估SD210对产品水水质的影响。表2为主要检测项及分析方法执行标准。

表2 主要检测项及分析方法执行标准  
Tab. 2 Main Determination Items and Executive Standards

检测项	分析方法执行标准
色度	《生活饮用水标准检验方法 第4部分:感官性状和物理指标》(GB/T 5750.4—2006)
浑浊度	
臭和味	《生活饮用水标准检验方法 第5部分:无机非金属指标》(GB/T 5750.5—2006)
pH	
总硬度	
总溶解固体(TDS)	《生活饮用水标准检验方法 第6部分:金属和类金属指标》(GB/T 5750.6—2006)
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	
Cl <sup>-</sup>	
Al	《生活饮用水标准检验方法 第6部分:金属和类金属指标》(GB/T 5750.6—2006)
Fe	

2 结果与讨论

2.1 装置运行监控

2.1.1 传热温差变化量

图2为1效传热温差变化量和蒸汽热负荷随试验时间变化的曲线。图3和图4分别为2效与3效、6效与10效传热温差变化量随试验时间变化的曲线。

由图2可知,试验期间,1效传热温差变化量波动相对较大。在0~2℃,随后采用相关性分析方法,研究了1效传热温差波动的原因,数据分析结果表明,蒸汽热负荷是1效传热温差波动的主要原因之一,二者之间Pearson相关系数为0.641,P值(显著水平)为0.01,二者呈现强相关关系,说明蒸汽热负荷变化是1效传热温差变化量波动的主要原因之一(本研究低温多效海淡装置的抽真空分别在1效

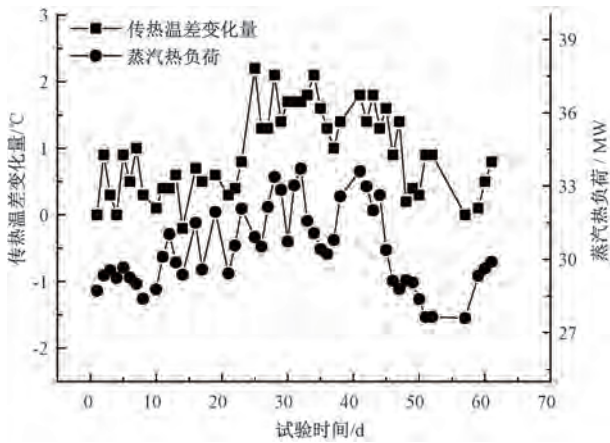


图2 1效传热温差变化量和蒸汽热负荷随时间变化的曲线  
Fig. 2 Changes of Temperature Difference of Effect 1 and Steam-Heat with Time

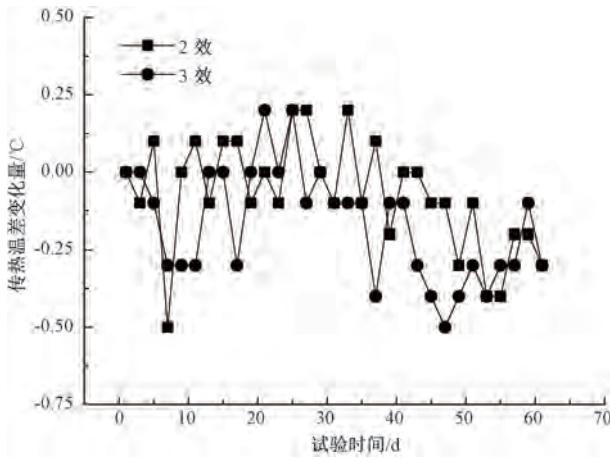


图3 2效和3效传热温差变化量随时间变化的曲线  
Fig. 3 Changes of Temperature Difference of Effect 2 and Effect 3 with Time

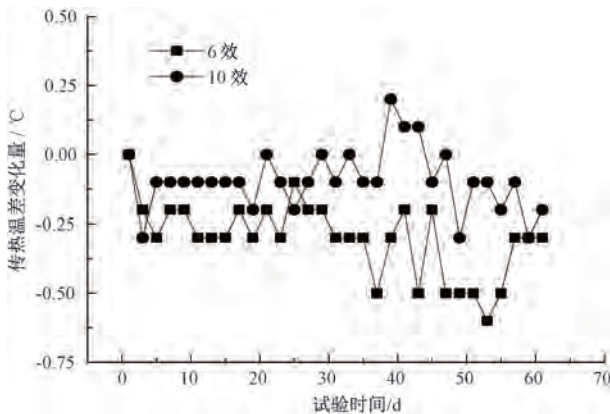


图4 6效和10效传热温差变化量随时间变化的曲线  
Fig. 4 Changes of Temperature Difference of Effect 6 and Effect 10 with Time

及降膜冷凝器,且加热蒸汽首先进入1效进行换热,因此,1效的蒸发及换热过程最剧烈,传热温差变化量波动也最大);1效传热温差波动与1效真空、入料水温度及盐度等因素的相关性,非主要因素,本文不再详细表述。另外,由图3和图4可知,相较于1效传热温差变化量,2效、3效、6效和10效传热温差波动均较小,为-0.6~0.25℃。总体来看,试验期间,4#低温多效海淡装置运行平稳,无明显结垢现象。

2.1.2 造水比

SD210工业化试验期间,考察了装置造水比随时间的变化情况,并与相似工况条件下的历史数据进行了对比。其中,图5为造水比随试验时间变化的曲线,表3为造水比数据统计分析结果。

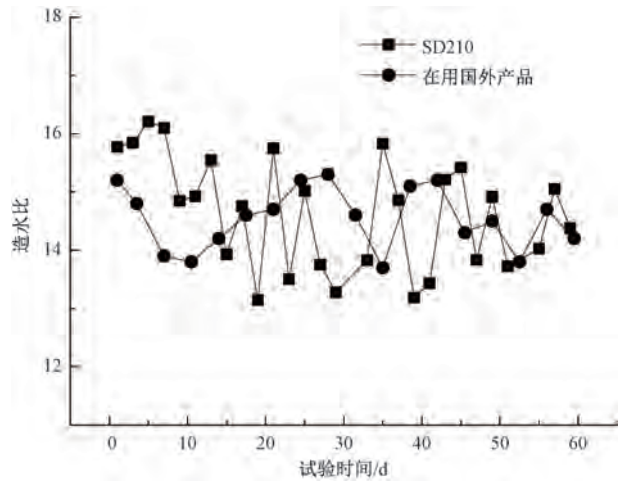


图5 造水比随时间变化的曲线  
Fig. 5 Changes of Water-Making Ratio with Time

表3 造水比数据统计分析结果  
Tab. 3 Statistical Analysis of Water-Making Ratio Data

项目	SD210	在用国外产品
平均值	14.64	14.54
最小值	13.14	13.70
中位数	14.85	14.60
最大值	16.20	15.30

由图5和表3可知,试验期间,装置造水比稳定在13.14~16.20,平均值为14.64,满足装置额定造水比10.0~15.0的设计要求。而在相似工况条件下,采用国外同类产品,造水比维持在13.70~15.30,平均值为14.54。从造水比波动情况和统计分析结果来看,SD210与国外产品性能相当,二者无

显著差异(图5中造水比是振荡缓慢下降,是由于装置产水量受生产调度的指令,人为降低了装置产水量,进而影响到造水比的变化)。

## 2.2 药剂阻垢缓蚀性能

### 2.2.1 阻垢性能

图6为浓缩倍率和 $\Delta A$ 随试验时间的变化曲线。由图6可知,随着入料原海水水质波动,系统浓缩倍率变化明显,但均处于1.40~1.50。同时, $\Delta A$ 值为-0.05~0.12,均低于 $\Delta A \leq 0.20$ 的控制指标要求。试验结果表明,在添加SD210缓蚀阻垢剂后,浓缩海水水质稳定,结垢倾向较小。

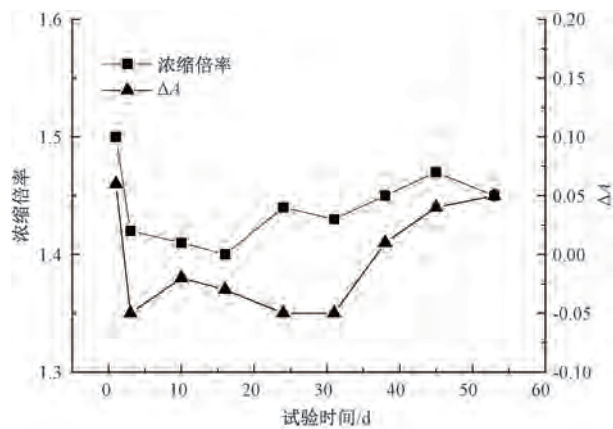


图6 浓缩倍率和 $\Delta A$ 随时间的变化曲线

Fig. 6 Variation Curves of Concentration Rate and  $\Delta A$  with Experimental Time

### 2.2.2 缓蚀性能

试验期间,在不同效体蒸发器内,设置5052铝合金标准腐蚀试片,以监测传热管腐蚀速率,试验结果如表4所示。

表4 腐蚀速率监测结果

Tab. 4 Corrosion Rate of Test Monitoring

序号	$M_1/g$	$M_2/g$	$\Delta M/g$	腐蚀速率值/ ( $mm \cdot a^{-1}$ )
1效	9.981	9.964	0.017	0.012
3效	9.916	9.910	0.006	0.004
14效	9.996	9.975	0.021	0.015

注: $M_1$ 表示腐蚀试片试验前的质量、 $M_2$ 表示腐蚀试片试验结束时的质量、 $\Delta M$ 表示腐蚀试片试验期间的质量减量。

由表5可知,1效、3效、14效腐蚀试片的腐蚀速率值分别为0.012、0.004、0.015 mm/a。而在常压原海水介质中,5052铝合金腐蚀速率测试值约为0.08 mm/a,远高于现场腐蚀速率测试结果,这主要

是因为:在负压条件下,入料海水中溶解氧含量较低,而腐蚀速率与溶解氧含量成正比,效体内腐蚀试片测试值均较小。而在14效中,虽然入料水温度较低,但其结垢倾向较小,所以14效内5052铝合金试片腐蚀速率值也更大。故而,在日常传热管腐蚀速率监测中,应以末端效体为主。

14效腐蚀试片试验前后对比如图7所示。运行前后,目视可见变化不大,传热管表面附着物稍有减轻,直观验证了药剂的阻垢缓蚀性能。

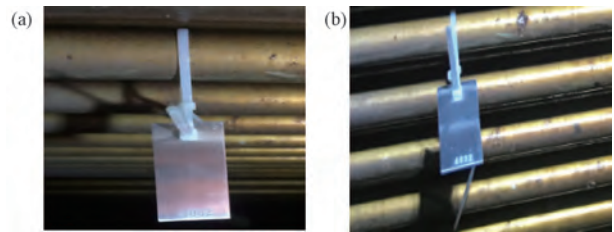


图7 14效腐蚀试片试验前后对比

Fig. 7 Comparison of Effect 14 Corrosion Test Piece before and after Experiment

## 2.3 产品水水质

表5为产品水水质抽检结果。

表5 产品水水质

Tab. 5 Water Quality of Product Water

序号	指标	单位	检测值	限值
1	色度	/	0	15
2	浊浊度	NTU	0.1	3
3	臭和味	/	无	无
4	pH值	/	6.62	6.5~9.5
5	总硬度	mg/L	0.1	450
6	TDS	mg/L	3.2	1 000
7	$SO_4^{2-}$	mg/L	0.1	250
8	$Cl^-$	mg/L	1.5	250
9	Al	$\mu g/L$	未检出	200
10	Fe	$\mu g/L$	未检出	300

由表5可知,低温多效海水淡化装置产品水为海水蒸发冷却后蒸馏水,水质明显优于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)所规定的水质指标要求<sup>[11]</sup>。同时,也说明通过SD210对产品水水质几乎没有影响。

## 3 结论

(1)试验期间,4#低温多效海淡装置运行较为安全、平稳、经济,1效传热温差变化在0~2℃,而2

效、3效、6效和10效则为 $-0.6\sim 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,造水比稳定在13.14~16.20。相较而言,1效传热温差变化量波动较大,而蒸汽热负荷波动是导致其传热温差波动的主要原因之一。

(2)从药剂性能评价结果来看,试验期间, $\Delta A$ 值介于 $-0.05\sim 0.12$ ,均低于 $\Delta A\leq 0.20$ 的控制指标要求。同时,效体内5052铝合金腐蚀监测片的腐蚀速率值均 $\leq 0.015\text{ mm/a}$ ,未见明显腐蚀现象的出现。

(3)试验期间,产品水水质优良,优于GB 5749—2006所规定的水质指标要求。

(4)综上,SD210阻垢剂性能优良,能满足大型低温多效海水淡化装置使用要求。

### 参考文献

- [1] 阮国岭,冯厚军. 国内外海水淡化技术的进展[J]. 中国给水排水, 2008, 24(20): 86-90.  
RUAN G L, FENG H J. Technical progress in seawater desalination technology at home and abroad[J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(20): 86-90.
- [2] 高从堦,周勇,刘立芳. 反渗透海水淡化技术现状和展望[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(1): 1-14.  
GAO C J, ZHOU Y, LIU L F. Recent development and prospect of seawater reverse osmosis desalination technology[J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(1): 1-14.
- [3] 艾钢,吴建平,朱忠信. 海水淡化技术的现状和发展[J]. 净水技术, 2004, 23(3): 24-28, 40.  
AI G, WU J P, ZHU Z X. Present situation and development of seawater desalination technology [J]. Water Purification Technology, 2004, 23(3): 24-28, 40.
- [4] LIU G Q, XUE M W, YANG H. Polyether copolymer as an environmentally friendly scale and corrosion inhibitor in seawater [J]. Desalination, 2017, 419: 133-140. DOI: 10.1016/J.DESAL.2017.06.017.
- [5] YANG L, YANG W Z, XU B, et al. Synthesis and scale inhibition performance of a novel environmental friendly and hydrophilic terpolymer inhibitor[J]. Desalination, 2017, 416: 166-174. DOI: 10.1016/j.desal.2017.05.010.
- [6] 贾利涛,李增朴,刘旭明,等. 一种用于低温多效海水淡化的阻垢剂及其制备方法: CN201811625744.7[P]. 2018-12-28.  
JIA L T, LI Z P, LIU X M, et al. Scale inhibitor for low-temperature multi-effect seawater desalination and preparation method thereof: CN201811625744.7[P]. 2018-12-28.
- [7] 林福成,王海江,丁涛. 一种铝管热法海水淡化用缓蚀阻垢剂及其制备工艺: CN202110549443.6[P]. 2021-05-20.  
LIN F C, WANG H J, DING T. A corrosion and scale inhibitor for thermal seawater desalination device using aluminum alloy tubes and its preparation process: CN202110549443.6[P]. 2021-05-20.
- [8] 张杰,张怀军. 低温多效海水淡化阻垢剂动态模拟装置设计及试验方法[J]. 山东电力技术, 2018, 45(8): 65-68.  
ZHANG J, ZHANG H J. Designing of dynamic simulation device and test procedure for multi-effect seawater desalination inhibitor [J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(8): 65-68.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 海水冷却水处理药剂性能评价方法 第2部分:阻垢性能的测定; GB/T 34550.2—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Method for evaluation of cooling seawater treatment agents—Part 2: Determination of scale inhibition performance: GB/T 34550.2—2017[S]. Beijing: Standard Press of China, 2017.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 海水冷却水处理药剂性能评价方法 第1部分:缓蚀性能的测定; GB/T 34550.1—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Method for evaluation of cooling seawater treatment agents—Part 1: Determination of corrosion inhibition performance GB/T 34550.1—2017[S]. Beijing: Standard Press of China, 2017.
- [11] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准; GB 5749—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.  
Ministry of Health of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Standard for drinking water: GB 5749—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.

(上接第148页)

- [9] 曹振桦,笄跃武,刘成,等. 碘值在水厂生物活性炭应用中的指示作用[J]. 净水技术, 2022, 41(12): 19-25.  
CAO Z H, DA Y W, LIU C, et al. Indicative effect of iodine value on application of BAC in WTPs[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(12): 19-25.
- [10] 江新瑜,吴苏炜,宣小军,等. 国内粉末活性炭投加技术在净水厂水处理中的应用[J]. 工业用水与废水, 2020, 51(6): 8-11, 17.  
JIANG X Y, WU S W, XUAN X J, et al. Application of powder activated carbon addition technology in water treatment process of water purification plant in China [J]. Industrial Water & Wastewater, 2020, 51(6): 8-11, 17.