

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.09.011

煤化工循环水阻垢缓蚀剂(JC-800)的制备及应用

王曰锋¹, 洪宇¹, 闫浩¹, 尹新旺¹, 暴彦慧¹, 谢书乾²,
孙永军²

(1. 金瓷科技实业发展有限公司, 宁夏 银川 750000; 2. 南京工业大学 城市建设学院,
江苏 南京 211816)

摘要: 针对西北地区煤化工企业高碱度、高硬度、高pH循环冷却水的水质特点,以锌盐、2-膦酸丁烷-1,2,4-三羧酸、苯并三氮唑、马来酸-丙烯酸共聚物等为原料,制备出适用于西北地区煤化工企业循环冷却水的阻垢缓蚀剂(JC-800),并通过静态阻垢试验、旋转挂片腐蚀试验和现场应用试验对其进行评价。同时,在不同水质条件下,确定达到最佳缓蚀效果时的药剂投加量。测试期间系统运行情况良好,循环水管道运行正常。该阻垢缓蚀剂各项指标满足国标和行业标准,综合性能优于现有阻垢剂,具有广阔的应用前景。

关键词: 阻垢缓蚀剂; 煤化工循环水; 腐蚀速率; 阻垢率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)09-0070-06

Preparation of Coal Chemical Circulating Water Scale and Corrosion Inhibitor (JC-800) and Its Application

WANG Yue-feng¹, HONG Yu¹, YAN Hao¹, YIN Xin-wang¹, BAO Yan-hui¹,
XIE Shu-qian², SUN Yong-jun²

(1. Glod Porcelain Technology Industrial Development Co. Ltd., Yinchuan 750000, China;
2. College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: The water quality of circulating cooling water from coal chemical enterprises in Northwest China is characterized by high basicity, hardness and pH. By using zinc salt, 2-phosphonate butane-1,2,4-tricarboxylic acid, benzotriazole and maleic acid/acrylic acid copolymer as the raw materials, a scale and corrosion inhibitor (JC-800) suitable for circulating cooling water from coal chemical enterprises in Northwest China was prepared and evaluated by static scale inhibition test, rotating coupon corrosion test and field application test. In addition, the dosage of inhibitor to achieve the best corrosion inhibition performance was determined under different water quality conditions. The system operated well and the circulating water pipe ran normally during the test. The indicators of the inhibitor meet the requirements of national and industrial standards, and its comprehensive performance is better than the existing scale inhibitors, which has a broad application prospect.

Key words: scale and corrosion inhibitor; coal chemical circulating water; corrosion rate;

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0602500); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20201362); 江苏省第十五批“六大人才高峰”高层次人才项目(JNHB-038)

通信作者: 洪宇 E-mail: yu.hong.a@chnenergy.com.cn

scale inhibition rate

工业循环冷却水系统能否高效安全运行是企业的重要考量,而该系统中水处理药剂性能的优劣直接影响生产设备的寿命和生产效率。近几年,随着煤化工行业的高速发展,煤化工企业用水问题日益突出,而我国煤化工企业大多分布在西部缺水省份^[1],煤化工装置中各冷却设备泄漏出的高浓度污水中污染物成分极其复杂,难降解物质多,循环水系统中还含有甲醇、二甲醚、丁烯-1、C4、C5等诸多高毒性物质^[2]。由于煤质和工艺不同,其污染物含量和种类也存在差异,微生物、结垢等问题已严重影响煤化工装置的安全、稳定、经济运行^[3]。

目前用于煤化工行业循环冷却水系统中的阻垢缓蚀剂种类很多,但其组分大都较单一,稳定性和生物降解性不好,不适用于高碱度、高硬度、高pH水质,阻垢缓蚀效果相对较差,不利于循环冷却水系统的高效运行^[4]。为了确保煤化工循环水经济、安全、平稳运行,除了装置应该设计可靠、配置合理、运行管理完善周到之外,还应选择合适的循环水专业药剂并采取专业的维保,防止循环水系统因为水质的浓缩和恶化造成各换热设备腐蚀速率加快、结垢严重,进而影响换热效率^[5]。因此,研制低磷或无磷,阻垢性、缓蚀性、稳定性和生物降解性均较好的环境友好型阻垢缓蚀剂是当前的研究热点之一,对于节约水资源、降低生产成本和保护环境都具有非常重要的意义^[6]。

含磺酸盐共聚物的突出优点^[7]:在阻垢方面不受水中是否存在金属离子的影响,对P、S、Mg(OH)₂、CaCO₃等盐垢,特别是磷酸钙有良好的抑制作用,且能有效分散颗粒物,稳定金属离子和有有机磷酸,药力持久,不易结胶圈。苯并三氮唑(BTA)能够有效提高铜表面的凹凸速率差,达到加强其表面平坦化的效果,它能抑制铜界面和表面非均匀化腐蚀,随着BTA浓度增加铜表面覆盖层厚度也会相应增加^[8]。但有研究发现^[9],少量的BTA没有缓蚀作用,反而加重了铜的腐蚀,因此BTA剂量不足可能会在未钝化处造成严重的腐蚀点;2-膦酸丁烷-1,2,4-三羧酸(PBTCA)能够提高产品的缓蚀效果,稳定锌卤,并能在高浓缩倍数、高温、高碱、高硬等条件下保持有效浓度,从而节约药剂用量^[10]。

由此可见,单独使用缓蚀剂具有局限性,但是缓蚀剂在控制金属腐蚀方面发挥重要作用^[11]。因此,笔者通过复配协同效应将多种缓蚀剂进行复配,以达到较优的缓蚀效果。以锌盐、2-膦酸丁烷-1,2,4-三羧酸、苯并三氮唑、丙烯酸-2-甲基-2-丙烯酰胺基丙烷磺酸共聚物、马来酸-丙烯酸共聚物为原料^[12],制备出适用于煤化工企业循环冷却水的阻垢缓蚀剂(JC-800),并通过静态阻垢试验、旋转挂片试验及现场应用试验研究了药剂投加量对腐蚀速率和缓蚀率的影响,同时对该阻垢缓蚀剂的性能进行了评估,旨在对该新型阻垢剂的应用推广及适用于煤化工循环冷却水的阻垢缓蚀剂研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验仪器包括RCC-Ⅲ型旋转挂片腐蚀测试仪、KZC-Ⅲ型快速阻垢性能测试仪。通过20#碳钢挂片、不锈钢挂片及铜材质挂片评价阻垢缓蚀剂对不同材料的缓蚀效能。合成阻垢缓蚀剂JC-800的反应条件:PBTCA:BTA:丙烯酸-2-甲基-2-丙烯酰胺基丙烷磺酸共聚物:马来酸-丙烯酸共聚物=0.5:0.3:1:2.5,反应温度为90℃,反应时间为4.5h。试验用水取自宁夏三个煤化工企业的循环水补水,其中,煤制焦化项目的水质:总硬度、钙离子、总碱度(均以CaCO₃计)分别为508、487、298 mg/L,氯离子和硫酸根分别为123、82 mg/L,pH为8.83,电导率为894 μS/cm;煤制甲醇项目:总硬度、钙离子、总碱度(均以CaCO₃计)分别为708、676、351 mg/L,氯离子和硫酸根分别为193、102 mg/L,pH为8.45,电导率为679 μS/cm;煤制烯烃项目:总硬度、钙离子、总碱度(均以CaCO₃计)分别为626、543、256 mg/L,氯离子和硫酸根分别为157、139 mg/L,pH为8.76,电导率为897 μS/cm。

1.2 阻垢试验

1.2.1 旋转挂片腐蚀试验

采用旋转挂片腐蚀法测定20#碳钢挂片、不锈钢挂片、铜材质挂片在水中的腐蚀速率,按照《水处理剂缓蚀性能的测定 旋转挂片法》(GB/T 18175—2014)进行试验。试验过程中,恒温水浴温度为

45℃, 试片线速度为0.3~0.4 m/s, 试验周期为72 h。腐蚀速率 μ 和缓蚀率 η 分别按照式(1)和式(2)进行计算。

$$\mu = 8760(m - m_0) \times 10 / spt \quad (1)$$

$$\eta = (\mu_0 - \mu_1) / \mu_0 \times 100\% \quad (2)$$

式中: μ 为腐蚀速率, mm/a; m 为试片的质量损失, g; m_0 为试片酸洗空白试验的质量损失平均值, g; ρ 为试片的密度, g/cm³; t 为试验时间, h; s 为试片的表面积, cm²; η 为缓蚀率, %; μ_0 为试片空白试验的腐蚀速率, mm/a; μ_1 为试片的腐蚀速率, mm/a。

1.2.2 静态阻垢试验

根据《水处理剂阻垢性能的测定 碳酸盐沉积法》(GB/T 16632—2019)开展试验, 配制500 mL溶液, 其中Ca²⁺含量为120 mg, 碳酸氢根离子含量为366 mg。将试验溶液和空白溶液分别放置于两个锥形瓶中(锥形瓶顶部用塑料薄膜覆盖), 浸入80℃的恒温水浴中, 放置10 h。

根据《水处理剂阻垢性能的测定方法 鼓泡法》(HG/T 2024—2009)对阻垢缓蚀剂的性能进行评

价, 测定水样中未投加阻垢剂和投加阻垢剂后Ca²⁺含量的变化。配制500 mL溶液, 其中Ca²⁺含量为240 mg, 碳酸氢根离子含量为732 mg。量取约450 mL试验溶液于500 mL三颈烧瓶中, 浸入60℃的恒温水浴中, 同时以80 L/h的流量鼓入空气, 时间为6 h, 停止鼓入空气后取出三颈烧瓶, 放至室温, 测定溶液中钙离子含量。

阻垢率按式(3)计算。

$$p = (p_1 - p_0) / (p_2 - p_0) \times 100\% \quad (3)$$

式中: p_0 为未加入阻垢剂空白组试验后Ca²⁺浓度, mg/mL; p_1 为加入阻垢剂试验组试验后Ca²⁺浓度, mg/mL; p_2 为试验前溶液中Ca²⁺浓度, mg/mL。

2 结果与讨论

2.1 旋转挂片腐蚀试验

分别在煤制焦化项目、煤制甲醇项目、煤制烯烃项目的循环水补水中悬挂20#碳钢挂片、不锈钢挂片、铜材质挂片进行旋转挂片腐蚀试验, 在每组试验的烧杯中投加阻垢缓蚀剂(JC-800), 试验结果见表1~3。

表1 煤制焦化项目旋转挂片腐蚀试验结果

Tab.1 Results of rotating coupon corrosion test of coal coking project

JC-800浓度/(mg·L ⁻¹)	挂片材质	试验前质量/g	试验后质量/g	质量差值/g	腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)	缓蚀率/%
0	20#碳钢	20.879 8	20.824 3	0.055 5	0.307	—
	不锈钢	22.409 6	22.390 2	0.019 4	0.107	—
	铜	22.751 6	22.741 9	0.009 7	0.054	—
60	20#碳钢	20.756 7	20.749 8	0.006 9	0.038	87.568
	不锈钢	22.564 3	22.563 7	0.000 6	0.003	96.907
	铜	22.565 4	22.565 2	0.000 2	0.001	97.938
80	20#碳钢	20.789 0	20.785 0	0.004 0	0.022	92.793
	不锈钢	22.615 8	22.615 6	0.000 2	0.001	98.969
	铜	22.781 3	22.781 2	0.000 1	0.001	98.969

表2 煤制甲醇项目旋转挂片腐蚀试验结果

Tab.2 Results of rotating coupon corrosion test of coal to methanol project

JC-800浓度/(mg·L ⁻¹)	挂片材质	试验前质量/g	试验后质量/g	质量差值/g	腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)	缓蚀率/%
0	20#碳钢	20.679 0	20.517 8	0.161 2	0.892	—
	不锈钢	22.789 0	22.775 6	0.013 4	0.074	—
	铜	22.752 1	22.741 9	0.010 2	0.056	—
60	20#碳钢	20.698 7	20.689 1	0.009 6	0.053	94.045
	不锈钢	22.659 0	22.658 5	0.000 5	0.003	96.269
	铜	22.625 6	22.625 1	0.000 5	0.003	95.098
80	20#碳钢	20.659 6	20.652 2	0.007 4	0.041	95.409
	不锈钢	22.652 6	22.652 3	0.000 3	0.002	97.761
	铜	22.765 9	22.765 6	0.000 3	0.002	97.059

表3 煤制烯烃项目旋转挂片腐蚀试验结果

Tab.3 Results of rotating coupon corrosion test of coal to olefin project

JC-800浓度/(mg·L ⁻¹)	挂片材质	试验前质量/g	试验后质量/g	质量差值/g	腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)	缓蚀率/%
0	20#碳钢	20.584 3	20.517 8	0.066 5	0.368	—
	不锈钢	22.765 1	22.756 7	0.008 4	0.046	—
	铜	22.891 2	22.881 2	0.010 0	0.055	—
60	20#碳钢	20.583 5	20.579 7	0.003 8	0.021	94.286
	不锈钢	22.765 7	22.765 2	0.000 5	0.003	94.048
	铜	22.657 9	22.657 4	0.000 5	0.003	95.000
80	20#碳钢	20.878 9	20.875 7	0.003 2	0.018	95.188
	不锈钢	22.674 3	22.674 0	0.000 3	0.002	96.429
	铜	22.716 4	22.716 1	0.000 3	0.002	97.000

在煤制焦化项目及煤制甲醇项目中,对于20#碳钢挂片、铜材质挂片和不锈钢挂片,当JC-800投量为80 mg/L时,缓蚀效果最佳,平均缓蚀率分别为94.101%、98.014%、98.365%,平均腐蚀速率分别为0.031 5、0.001 5、0.001 5 mm/a,远小于国家规定的标准限值(20#碳钢挂片腐蚀速率的限值为0.075 mm/a,铜和不锈钢挂片腐蚀速率的限值为0.005 mm/a)。考虑循环水运行的经济性,当JC-800投加量为60 mg/L时,平均腐蚀速度也小于国家标准限值,因此确定JC-800阻垢缓蚀剂的最佳投加量为60 mg/L。

在煤制烯烃项目中,当JC-800投量为80 mg/L时,20#碳钢挂片、不锈钢挂片及铜材质挂片的缓蚀率均较高,分别为95.188%、96.429%、97.000%,腐蚀速率分别为0.018、0.002、0.002 mm/a,缓蚀效果较好,达到《工业循环冷却水处理设计规范》(GB/T 50050—2017)的技术要求。这说明不同水质条件需要的阻垢剂投加量不同,实际应用时应该根据现场的水质情况确定最佳阻垢剂投加量,以达到最佳的缓蚀效果。

2.2 静态阻垢试验

静态阻垢试验结果见表4和表5。其中,碳酸盐沉积法测定阻垢率试验中,1、2、3号试验配制的原水Ca²⁺浓度分别为206、198、194 mg/L。鼓泡法测定钙离子稳定浓度试验中,1、2、3号试验配制的原水Ca²⁺浓度均为202 mg/L。

由表4可知,当JC-800浓度达到60 mg/L时,平均阻垢率为80.30%;当JC-800浓度达到80 mg/L时,平均阻垢率为88.64%。可见,JC-800不同浓度的阻垢效果均满足要求,且当投量为80 mg/L时,平均阻垢率更高,阻垢效果更好。

表4 碳酸盐沉积法测定阻垢率试验结果

Tab.4 Test results of determination of scale inhibition rate by carbonate deposition method

序号	JC-800浓度/(mg·L ⁻¹)	钙离子浓度/(mg·L ⁻¹)	阻垢率/%
1	0	21	—
	60	168	79.55
	80	181	86.36
2	0	29	—
	60	164	77.27
	80	189	90.91
3	0	21	—
	60	177	84.09
	80	185	88.64

表5 鼓泡法测定钙离子稳定浓度试验结果

Tab.5 Test results of determination of calcium ion stable concentration by bubble method

序号	JC-800浓度/(mg·L ⁻¹)	钙离子浓度/(mg·L ⁻¹)
1	0	21
	60	177
	80	177
2	0	25
	60	185
	80	189
3	0	21
	60	181
	80	189

由表5可知,当阻垢缓蚀剂JC-800的浓度为60 mg/L时,平均钙离子稳定浓度为181 mg/L,与原水中钙离子浓度相差21 mg/L;当JC-800浓度为80 mg/L时,平均钙离子稳定浓度升至185 mg/L,与原水中钙离子浓度相差17 mg/L。由此可见,当阻垢缓蚀剂JC-800投加量为60和80 mg/L时,均满足应用

要求,且浓度达到80 mg/L时,钙离子稳定浓度更高,性能更加优良。由静态阻垢试验可知,该阻垢剂具有优良的阻垢分散性能。

2.3 现场应用试验

为评价自制阻垢缓蚀剂JC-800的性能,分别在3个煤化工企业循环水系统应用三个月,试验水质与静态试验相同,JC-800投加量为20 mg/L,具体应用数据见表6。投加阻垢缓蚀剂期间,系统运行情况良好,循环水管道运行正常、稳定,检修期间未发

现新的腐蚀和硬垢附着,缓蚀和阻垢达到了很好的效果,20#碳钢的平均腐蚀速率为0.021 9 mm/a,不锈钢平均腐蚀速率为0.001 8 mm/a,铜材质平均腐蚀速率为0.001 3 mm/a,平均污垢热阻为 $1.029 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。以上指标在运行过程中均满足中石化《水质管理制度》技术要求(铜的腐蚀速率 $<0.075 \text{ mm}/\text{a}$,不锈钢的腐蚀速率 $<0.005 \text{ mm}/\text{a}$,碳钢的腐蚀速率 $<0.075 \text{ mm}/\text{a}$,污垢热阻 $<3.44 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$),且设备管道光滑,基本没有沉积的黏泥及水垢^[13]。

表6 现场应用数据

Tab.6 Field application data

项目	实施周期	循环水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	保有水 量/ m^3	浓缩倍 数/倍	腐蚀速率/($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)			污垢热阻/ ($10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$)
					20#碳钢	不锈钢	铜	
煤制焦化项目	第一个月	5 000	2 000	2~3	0.021 7	0.002 0	0.001 0	0.805
	第二个月				0.011 8	0.002 0	0.001 0	0.649
	第三个月				0.032 1	0.001 8	0.001 0	1.276
煤制甲醇项目	第一个月	11 000	5 000	3~4	0.018 3	0.001 5	0.001 7	0.078
	第二个月				0.012 7	0.001 9	0.001 0	1.347
	第三个月				0.021 9	0.001 5	0.001 4	1.295
煤制烯烃项目	第一个月	12 000	5 500	4~5	0.042 1	0.001 3	0.002 0	0.098
	第二个月				0.013 8	0.003 0	0.001 6	1.598
	第三个月				0.023 4	0.001 9	0.001 3	2.123

3 结论

① JC-800具有优良的缓蚀阻垢性能,应用于结垢倾向较强的水中,可对20#碳钢、不锈钢及铜起到良好的阻垢和缓蚀作用。当循环水中JC-800浓度为60和80 mg/L时,阻垢缓蚀性能均满足国标要求。在静态阻垢试验中,当循环水中JC-800浓度为80 mg/L时,溶液中钙离子稳定浓度更高,性能更好。

② 旋转挂片腐蚀试验发现,在煤制焦化项目及煤制甲醇项目中,当循环水中JC-800浓度为80 mg/L时,20#碳钢挂片、铜材质挂片以及不锈钢挂片的平均缓蚀率分别为94.101%、98.014%、98.365%,平均腐蚀速率分别为0.031 5、0.001 5、0.001 5 mm/a。在煤制烯烃项目中,当循环水中JC-800浓度达到80 mg/L时,对20#碳钢、不锈钢及铜材质三种挂片的缓蚀率均达到最高,分别为95.188%、96.429%、97.000%。不同水质条件下,达到最佳缓蚀效果时的JC-800投量有所差别,所以在应用时应根据现场水质条件确定达到最佳效果的投量。

③ 现场应用试验表明,该阻垢缓蚀剂JC-800可成功应用于煤化工循环水中,该产品满足煤化工循环水稳定运行的要求,其缓蚀性能和阻垢性能均

可达到国家和行业标准,比现有阻垢剂更加优质高效,具有一定的推广价值。

参考文献:

- [1] 张军,任相坤. 煤化工项目循环水冷却系统工艺对比及技术经济分析研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(11): 29-32.
ZHANG Jun, REN Xiangkun. Technological comparison and tech-economic analysis of cooling water system for coal chemical projects[J]. Coal Engineering, 2018, 50(11): 29-32 (in Chinese).
- [2] 刘兴社,刘永军,刘喆,等. 煤化工废水中油、酚、氨回收研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(2): 1048-1057.
LIU Xingshe, LIU Yongjun, LIU Zhe, et al. Research advances on recovery of oil, phenols, and ammonia in coal chemical wastewater [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(2): 1048-1057 (in Chinese).
- [3] 董永志. 煤化工生产过程中的防止腐蚀结垢的技术措施[J]. 煤化工与甲醇, 2017, 31(11):5.
DONG Yongzhi. Technical measures to prevent

- corrosion and scale in coal production [J]. *Coal Chemical Methanol*, 2017, 31(11):5 (in Chinese).
- [4] 荆国华. 耐高硬度、高碱度、高pH值阻垢分散剂的研制[D]. 湘潭:湘潭大学, 2001.
- JING Guohua. Preparation of a Scale Inhibitor Adapting to High Hardness, High Alkalinity and High pH [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2001 (in Chinese).
- [5] 陆展家. 工业循环冷却水系统中的沉积物及其处理方法[J]. *广东化工*, 2015, 42(2): 65-67, 55.
- LU Zhanjia. Sediment in the industrial circulating cooling water system and its processing method [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2015, 42(2): 65-67, 55 (in Chinese).
- [6] 李慧芝, 许崇娟, 庄海燕, 等. 新型三元共聚物阻垢剂的合成及阻垢性能研究[J]. *工业水处理*, 2013, 33(4): 40-42.
- LI Huizhi, XU Chongjuan, ZHUANG Haiyan, *et al.* Study on the synthesis and scale inhibiting capability of a new-type of ternary copolymer as a scale inhibitor [J]. *Industrial Water Treatment*, 2013, 33(4): 40-42 (in Chinese).
- [7] 张卫星, 陈江涛, 李红. 含磺酸盐类多元共聚物的合成及阻垢性能研究[J]. *全面腐蚀控制*, 2011, 25(3): 36-39.
- ZHANG Weixing, CHEN Jiangtao, LI Hong. Study on synthesis of sulphonate-containing copolymer and its scale inhibition performance [J]. *Total Corrosion Control*, 2011, 25(3):36-39(in Chinese).
- [8] 张胜涛, 薛茗月, 王艳波, 等. 苯并三氮唑缓蚀剂在铜表面覆盖行为的研究[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2006, 18(5):313-316.
- ZHANG Shengtao, XUE Mingyue, WANG Yanbo, *et al.* Study on covering behavior of BTA inhibitor on pure copper surface [J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2006, 18(5): 313-316 (in Chinese).
- [9] 王玄石, 高宝红, 曲里京, 等. IC铜布线CMP过程中缓蚀剂应用的研究进展[J]. *半导体技术*, 2019, 44(11): 863-869.
- WANG Xuanshi, GAO Baohong, Qu Lijing, *et al.* Research progress on the application of corrosion inhibitors in IC copper wiring CMP process [J]. *Semiconductor Technology*, 2019, 44(11): 863-869 (in Chinese).
- [10] 何阳, 余远航, 关俊果, 等. PBTCA在焦化企业中的研究与应用[J]. *河南冶金*, 2020, 28(6):4.
- HE Yang, YU Yuanhang, GUAN Junguo, *et al.* The research and application of PBTCA in coking enterprises [J]. *Henan Metallurgy*, 2020, 28(6):4(in Chinese).
- [11] 邱文革, 常西亮. 聚合物缓蚀剂的研究进展[J]. *北京工业大学学报*, 2003, 29(2):210-214.
- QIU Wenge, CHANG Xiliang. Development of polymeric corrosion inhibitors [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2003, 29(2):210-214(in Chinese).
- [12] 孙琪娟, 徐军礼, 孙长顺. 马来酸酐/丙烯酸/丙烯酸甲酯共聚阻垢剂的合成及应用性能研究[J]. *当代化工*, 2015, 44(8): 1745-1747, 1751.
- SUN Qijuan, XU Junli, SUN Changshun. Study on synthesis and application of maleic anhydride/acrylic acid/methyl acrylate copolymer scale inhibitor [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2015, 44(8): 1745-1747, 1751 (in Chinese).
- [13] 王娟, 张俊玲. 新型高效缓蚀阻垢剂的实际现场应用[J]. *工业水处理*, 2009, 29(6): 83-85.
- WANG Juan, ZHANG Junling. Practical application of a new-type of highly efficient scale and corrosion inhibitor [J]. *Industrial Water Treatment*, 2009, 29(6): 83-85 (in Chinese).

作者简介:王曰锋(1982-),男,山东莱西人,硕士,高级工程师,研究方向为工业节水。

E-mail:yuefeng.wang.c@chnenergy.com.cn

收稿日期:2021-03-08

修回日期:2021-03-22

(编辑:任莹莹)