

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.06.004

# 以软化水为水源的循环冷却水水质控制技术

Water quality control technology for circulating cooling water  
taking soft water as source

牛犇

NIU Ben

(中国大唐集团科学技术研究院有限公司华中电力试验研究院, 郑州 450000)  
(Central-China Electric Power Test Research Institute, China Datang Corporation Science  
and Technology Research Institute Company Limited, Zhengzhou 450000, China)

**摘要:**为了节约用水,同时保证机组安全运行,需要寻求循环冷却水最佳处理方案及运行工况。根据以软化水为补充水水源的冷却水系统特点,通过极限碳酸盐碱度法、腐蚀挂片失重法、动态模拟试验对4种缓蚀阻垢剂的性能进行了研究与评价。在动态模拟试验中采用控制“ $1/2\text{Ca}^{2+} + \text{JD}_M$ ”值代替传统冷却浓缩倍数与碱度浓缩倍数差值( $\Delta A$ 值)来调整循环水系统排污,并考察了高 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量循环水对冷却塔混凝土的侵蚀性。循环水浸泡混凝土试件20d后,溶液 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量稳定,试件形貌并无改变。试验结果表明:QJ药剂具有优良的缓蚀阻垢性能,适用于以软化水为水源的循环冷却水系统;采用控制“ $1/2\text{Ca}^{2+} + \text{JD}_M$ ”值来预防循环水系统结垢是可行的;当循环水高浓缩倍数运行时, $\text{SO}_4^{2-}$ 对混凝土中水泥和骨料侵蚀性不显著。

**关键词:**软化水;循环冷却水;水质控制;阻垢缓蚀剂;硫酸盐;混凝土

中图分类号:TQ 085<sup>+</sup>.4

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2020)06-0016-06

**Abstract:** To ensure the water saving and operation safety of units at the same time, the optimal treatment scheme and operation condition of circulating cooling water were sought for. According to the characteristics of circulating cooling water taking soft water as supplement, the performance of four scale and corrosion inhibitors was studied by limit carbonate alkalinity method, weight-loss method and dynamic simulated test. In the dynamic simulated test, “ $1/2\text{Ca}^{2+} + \text{JD}_M$ ” value which replaced the traditional  $\Delta A$  value was used to adjust the sewage discharge in the circulating water system, and the corrosion of the concrete of cooling tower immersed in the circulating water with high  $\text{SO}_4^{2-}$  content was observed. Being soaked in circulating water for 20 days, the morphology of specimens remained unchanged, and the  $\text{SO}_4^{2-}$  content of the solution was stable. The results show that QJ has excellent corrosion and scale inhibition performance, and is suitable for the circulating cooling water system taking soft water as supplement. It is feasible to prevent scaling in circulating water system by controlling “ $1/2\text{Ca}^{2+} + \text{JD}_M$ ” value, and  $\text{SO}_4^{2-}$  shows no significant erosion on cement and aggregate in concrete when circulating water is of high cycle of concentration.

**Keywords:** soft water; circulating cooling water; water quality control; scale and corrosion inhibitors; sulfate; concrete.

## 0 引言

缺水制约我国经济的发展。数据显示,2016年我国工业用水1308.0亿 $\text{m}^3$ ,占总用水量的21.6%,其中循环冷却水系统用水量占工业用水量的70.0%~80.0%<sup>[1]</sup>。循环冷却水处理针对敞开式循环冷却水,目的是尽量减轻系统的结垢、腐蚀、微生物滋生等问题<sup>[2-6]</sup>。物理阻垢技术操作简单、污染

小,但在火电厂循环冷却水处理方面还不够成熟<sup>[7]</sup>。目前工业生产中,大多采用化学药剂处理法<sup>[8-9]</sup>。

国内外学者对循环冷却水的化学药剂处理开展了大量工作。文献[10]针对内蒙古某电厂循环冷却水,分析了阻垢剂种类、加入量等因素对循环冷却水系统结垢和腐蚀的影响。文献[11]研究了适用于天津某电厂中水回用循环冷却水系统的水处理药剂及其配套处理技术。文献[12]通过小型阻垢缓蚀剂添加试验确定了山东某电厂工业循环冷却水的最佳水处理方案。文献[13]通过对4种药剂的阻垢、防腐及杀菌性能的筛选试验,确定了循环冷却水处理的

收稿日期:2020-03-15;修回日期:2020-04-20

最佳控制参数和运行标准。此外,当循环冷却水中的  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度比较高时,要考虑硫酸盐对混凝土的侵蚀问题<sup>[14-15]</sup>。国内外学者对此也做了大量研究。文献[16]通过测定混凝土强度、吸水性、重量损失率等指标,研究海水对混凝土的侵蚀性。文献[17]通过试验模拟干湿循环作用下硫酸盐对混凝土的侵蚀,研究混凝土劣化机理。

某燃煤电厂  $2 \times 350 \text{ MW}$  机组,循环冷却水原水选用地下水,生水经升压泵升压后由弱酸阳离子床处理,软化水进入敞开式循环冷却水系统。近年来,原水水质持续恶化,水样氯离子含量由几年前的  $60.0 \sim 70.0 \text{ mg/L}$  提升到现在的  $200.0 \sim 240.0 \text{ mg/L}$ ,且硫酸根上升至  $300.0 \sim 400.0 \text{ mg/L}$ ,循环冷却水系统结垢腐蚀问题严重。循环水浓缩倍数由  $3 \sim 4$  倍被迫改变为  $2$  倍,不仅浪费了大量的新鲜水,还产生了大量排污水。为节约用水,同时保证机组安全运行,须筛选新的阻垢缓蚀剂。

## 1 试验部分

### 1.1 试验水质

为确保试验数据与实际工况相吻合选用现场软化器出水进行试验。补充水平均水质见表1。

由表1可以看出,系统补充水为高硬度、中碱度的结垢型水质,且水中含有大量的腐蚀性离子。

### 1.2 主要试验设备、药剂及材质

设备:水浴锅、恒温摇床、pH计、电导率仪、循环水动态模拟装置、分析天平。

药剂:4种阻垢缓蚀剂,代号分别为DQ,QJ,GL,RG。

材质:换热管——316L;腐蚀挂片——Q235A,316L,HSn70-1A标准试片。

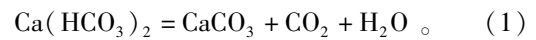
混凝土:该电厂一期循环水冷却水系统凉水塔水池壁面。

### 1.3 评价方法

#### 1.3.1 阻垢性能:极限碳酸盐碱度法

冷却水在循环过程中不断被浓缩,若水中没有沉淀析出,循环冷却水的总碱度与补充水的总碱度

应呈直线关系。但随着浓缩倍数的增大, $\text{CO}_2$ 不断溢出,溶液的碳酸盐平衡被破坏, $\text{CaCO}_3$ 析出,冷却水的浓缩倍数与碱度浓缩倍数出现差值,



$\Delta A$  定义为冷却水的浓缩倍数( $K$ )与碱度浓缩倍数的差值。 $\Delta A = 0.20$  对应的循环水浓缩倍数称为极限浓缩倍数,对应的碱度称为极限碳酸盐碱度。若  $\Delta A \geq 0.20$  可判定  $\text{CaCO}_3$  析出。采用静态蒸发浓缩的方法,蒸发温度  $50^\circ\text{C}$ ,测定4种药剂(DQ,QJ,GL,RG)的  $\Delta A-K$  关系,图解极限浓缩倍数,即

$$\Delta A = K - \frac{M_r}{M_m} \quad (2)$$

式中: $M_r$  和  $M_m$  分别为循环冷却水碱度和补充水修正碱度,  $\text{mmol/L}$ 。这里,修正碱度是指修正药剂消耗后的碱度。

#### 1.3.2 缓蚀性能:失重法

参照 HG/T 2159—1991《水处理剂缓蚀性能的测定》,制作13种  $K_0$  倍旋转挂片液(空白+4种阻垢缓蚀剂的3种剂量),以空白挂片液的pH值为基准,调整各挂片液的pH值,直到偏差小于0.05, $K_0$  是根据某发电公司节水目标确定的循环冷却水最低浓缩倍数。准备Q235A标准试片,用游标卡尺测量试片长、宽、厚、孔直径,计算表面积;清洗恒重后,挂入装有挂片液的锥形瓶;启动恒温摇床,调节转速为  $40 \text{ r/min}$ ,温度为  $50^\circ\text{C}$ 。挂片约7d后择机结束挂片,计算Q235A试片在不同溶液中的腐蚀速度。

#### 1.3.3 药剂适用性:动态模拟试验

动态模拟试验研究沉积物在流动状态和有热量传递的金属面上的沉积过程,测定水侧的污垢热阻值,同时观察沉积物的形态。

依据1.3.1,1.3.2节的试验结果,筛选出动态模拟试验所用的阻垢缓蚀剂。参照 HG/T 2160—2008《冷却水动态模拟试验方法》,在下述条件下测定316L换热管污垢热阻和污垢黏附速度,以及Q235A,HSn70-1A,316L的腐蚀速度。

表1 补充水平均水质指标

Tab.1 Quality indicators for supplementary water on average

项目	数值	项目	数值	项目	数值
pH值	7.12	$\rho(\text{Ca}^{2+})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	37.8	总硬度/ $(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	5.735
电导率( $25^\circ\text{C}$ )/ $(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	1200	$\rho(\text{Mg}^{2+})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	46.8	暂时硬度/ $(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	0.926
$\rho(\text{Cl}^-)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	152.3	$\rho(\text{HCO}_3^-)/(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	0.926	永久硬度/ $(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	4.809
$\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	326.1	酚酞碱度/ $(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	0	总碱度/ $(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	0.926
$\rho(\text{CO}_3^{2-})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0	总碱度/ $(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	0.926		

(1) 试验装置: 双通道动态试验装置。

(2) 换热管: 外径为 10 mm, 壁厚为 1 mm, 长度 600 mm, 材质 316L。

(3) 热介质: 常压饱和蒸汽。

(4) 水汽工况: 循环水流量为  $(180 \pm 0.5)$  L/h; 换热管进口与出口温度限值分别为 35, 45 °C; 循环水的浓缩倍数以  $\text{Cl}^-$  指示, 并参考电导率、水量浓缩倍数。

(5) 腐蚀挂片: 在换热管的进水口和出水口分别安装 6 块腐蚀挂片用于监视 (Q235A, HSn70-1A, 316L 各 2 块), 所有挂片均不预膜。

(6) 试验时间: 不低于 15 d。

#### 1.3.4 冷却塔混凝土的腐蚀: 硫酸盐侵蚀试验

$\text{SO}_4^{2-}$  对混凝土的侵蚀性主要表现在与混凝土中水泥胶块反应生成的结晶物具有膨胀性。将混凝土浸泡在溶液中一段时间, 测定水样中  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SiO}_2$  的变化, 分析混凝土中水泥的溶解量、反应量, 评价混凝土的耐久度。

从样品中选取没有大块骨料 (如石英砂、卵石、钢筋) 的混凝土块作为试验的候选样品; 通过敲击、刷除、吹脱等手段将候选样品附着的松软碎屑去除干净; 称量受试混凝土样品重量, 估算表面积; 在 50 °C 下用循环水浸泡受试混凝土 20 d; 浸泡结束后, 取试验水测定  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ , 电导率, pH 值,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SiO}_2$ 。视情况, 取浸泡前后受试混凝土观察微观形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 药剂的理化性能

参照 DL/T 806—2013《火力发电厂循环水用阻垢缓蚀剂》测定药剂的理化性能, 检测指标见表 2。

4 种阻垢剂均为含磷阻垢剂, 含磷量  $\text{DQ} > \text{GL} > \text{RG} > \text{QJ}$ ; 20 °C 下, 密度均大于  $1.0000 \text{ g/cm}^3$ ; 固体含量不同, 但相差不大; 均有较强的酸性, 其中 GL 酸性最强, QJ 酸性最弱; QJ, GL 唑类含量较高, DQ 唑类含量较低。

同等条件下, 药剂的含磷量越高, 循环水中的含磷量也越高。为环境友好, 减小水体富营养化, 应尽量选用低含磷量的药剂。

### 2.2 $\Delta A - K$ 关系曲线

药剂的阻垢作用不能理解为单纯的化学反应, 它包含若干物理化学过程。解释阻垢原理的有晶格畸变、分散、络合等理论。

图 1—4 分别为 4 种药剂在不同剂量下的  $\Delta A - K$  关系曲线。由图 1 可知, 空白水样的极限浓缩倍数为 4.47, 但 QJ, GL, RG 在 4 mg/L 剂量的极限浓缩倍数均大于 5.50。说明阻垢剂在低剂量时就可以稳定大量的钙离子。由图 2—4 可知, 当药剂剂量超过 8 mg/L 时, 极限浓缩倍数并未有明显提高。说明药剂剂量与极限浓缩倍数之间不存在简单的化学计量关系。当剂量增加至过大时, 药剂的稳定作用不再有明显的改进。

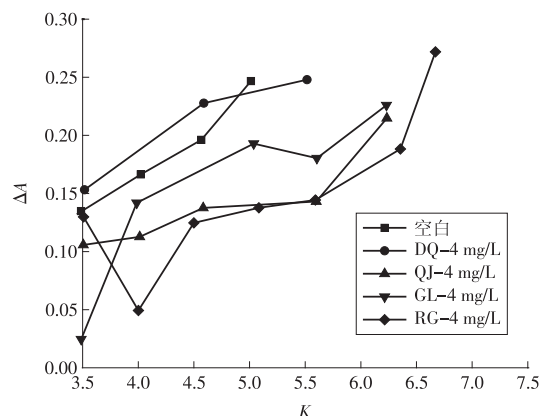


图 1  $\Delta A - K$  在药剂剂量为 4 mg/L 时的关系曲线

Fig. 1 Relationship of  $\Delta A - K$  with 4 mg/L agent

除 DQ 外, QJ, GL, RG 3 种药剂明显提升了循环冷却水的极限浓缩倍数, 极限浓缩倍数随着药剂剂量的增大而增大, 且 QJ 药剂、RG 药剂的阻垢性能较好。考虑经济性和药剂的阻垢效果, 选择 6 ~ 8 mg/L 的剂量较为合适。

### 2.3 腐蚀速度

$\text{Cl}^-$  会加剧碳钢的全面腐蚀, 也会破坏不锈钢表面致密的钝化膜, 形成闭塞系统腐蚀电池<sup>[18-19]</sup>。

表 2 阻垢剂理化性能检测指标

Tab. 2 Physicochemical property indicators for scale inhibitors

药剂	外观	唑类 (以 $\text{C}_4\text{H}_4\text{NHN} : \text{N}$ 计) 质量分数/%	膦酸 (以 $\text{PO}_4^{3-}$ 计) 质量分数/%	亚磷酸 (以 $\text{PO}_4^{3-}$ 计) 质量分数/%	正磷酸 (以 $\text{PO}_4^{3-}$ 计) 质量分数/%	固体质量分数/%	pH 值 (1% 水溶液)	密度 (20 °C) / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
DQ	橙黄色	0.060	8.983	0.008	8.413	36.020	1.82	1.2995
QJ	黄色	3.410	11.371	0.095	0.060	38.280	2.49	1.1816
GL	浅黄色	3.400	15.889	0.029	0.117	34.270	1.80	1.1937
RG	棕黄色	1.090	14.558	0.039	0.030	34.500	1.96	1.1711

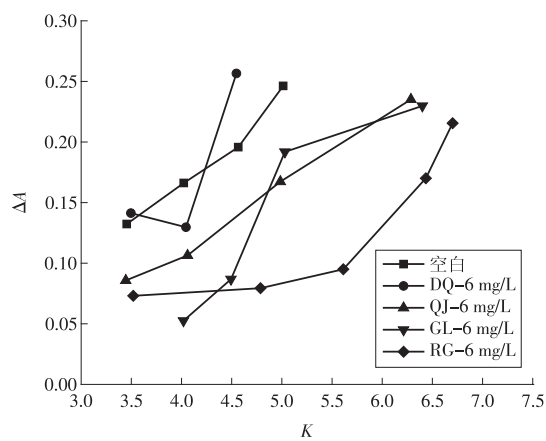


图 2  $\Delta A-K$  在药剂剂量为 6 mg/L 时的关系曲线  
Fig. 2 Relationship of  $\Delta A-K$  with 6 mg/L agent

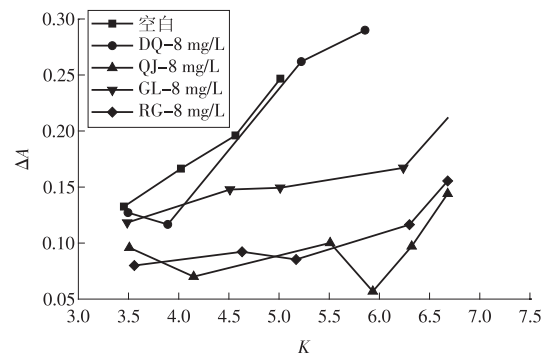


图 3  $\Delta A-K$  在药剂剂量为 8 mg/L 时的关系曲线  
Fig. 3 Relationship of  $\Delta A-K$  with 8 mg/L agent

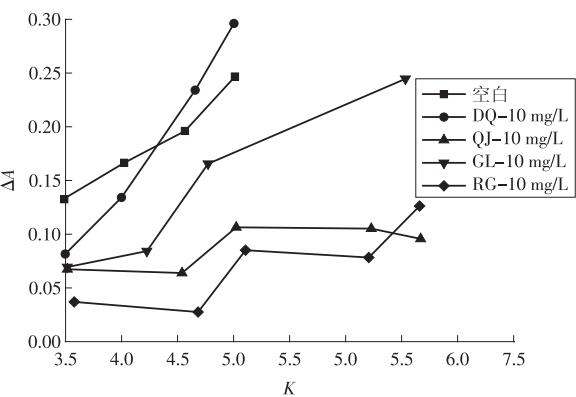


图 4  $\Delta A-K$  在药剂剂量为 10 mg/L 时的关系曲线  
Fig. 4 Relationship of  $\Delta A-K$  with 10 mg/L agent

$\text{SO}_4^{2-}$  可以与混凝土中的水泥胶块、骨料反应,生成钙矾石或石膏,填充混凝土的内部孔隙,引起内壁应力的出现,加速混凝土的微裂缝的形成和发展,进而使混凝土表面剥落<sup>[20]</sup>。由表 1 可知,补充水中  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度较高。综合考虑节水目标,极限浓缩倍数,  $\text{Cl}^-$  对碳钢、不锈钢的腐蚀,  $\text{SO}_4^{2-}$  对循环冷却塔水泥的侵蚀等因素,最终确定  $K_0$  为 5。

根据 1.3.2 节制作旋转挂片液,并将 Q235A 试片挂入装有挂片液的锥形瓶。Q235A 试片在  $K_0$  倍旋转挂片液中的腐蚀速度见表 3。由表 3 可知 QJ 药剂的缓蚀率较好。QJ 药剂在 6 mg/L 剂量时的缓

蚀率可达 95.25%, 腐蚀速度为 0.018 9 mm/a, 满足 GB/T 50050—2007《工业循环冷却水处理设计规范》中规定的碳钢腐蚀速度低于 0.075 0 mm/a 的要求。

表 3 Q235A 腐蚀速度  
Tab. 3 Corrosion rate of Q235A

药剂名称	投加药剂剂量/ (mg · L <sup>-1</sup> )	腐蚀速度/ (mm · a <sup>-1</sup> )	缓蚀率/%
空白	0	0.397 8	0.00
	2	0.092 2	76.82
DQ	6	0.059 4	85.07
	10	0.045 1	88.66
QJ	2	0.099 6	74.96
	6	0.018 9	95.25
	10	0.011 1	97.21
GL	2	0.161 8	59.33
	6	0.155 8	60.83
	10	0.117 2	70.54
RG	2	0.149 4	62.44
	6	0.159 2	59.98
	10	0.161 4	59.43

2.4 动态模拟试验

综合 2.1—2.3 节的试验结果,筛选出 QJ 药剂,剂量为 6 mg/L,通过动态模拟试验评价其药剂适用性。

某取样时间段,软化器出水水质见表 4。由表 4 可知不同时间点软化器出水的碱度( $\text{JD}_M$ )和钙硬度有较大差别,因此本动态试验不宜采用  $\Delta A > 0.20$  作为排污依据,确定依据“ $1/2\text{Ca}^{2+} + \text{JD}_M$ ”调整排污。

表 4 某取样时间段监测的软化水水质  
Tab. 4 Soft water quality in a sampling period mmol/L

时刻	碱度( $\text{JD}_M$ )	钙硬度( $1/2\text{Ca}^{2+}$ )	$1/2\text{Ca}^{2+} + \text{JD}_M$
19:00	1.00	1.60	2.60
20:00	1.00	1.80	2.80
20:30	1.00	1.80	2.80
21:00	1.00	1.80	2.80
21:30	1.00	1.80	2.80
22:00	1.10	2.00	3.10
22:30	1.10	2.10	3.20
23:00	1.10	2.10	3.20
23:30	1.20	2.20	3.40
00:00	1.20	2.30	3.50
00:30	1.20	2.40	3.60
01:00	1.30	2.40	3.70
01:30	1.30	2.50	3.80

具体如下:

(1) 循环水“ $1/2\text{Ca}^{2+} + \text{JD}_M$ ”控制范围: 系统 I 为 13.50 ~ 14.20 mmol/L, 系统 II 为 16.60 ~ 17.20 mmol/L。补充水平均水质的“ $1/2\text{Ca}^{2+} + \text{JD}_M$ ”值为 2.81, 以控制下限计, 系统 I 的初始浓缩倍数  $N_1$  为 4.8, 系统 II 的初始浓缩倍数  $N_2$  为 5.9。

(2) 当循环水的“ $1/2\text{Ca}^{2+} + \text{JD}_M$ ”达到或超过控制值上限(I 为 14.20 mmol/L, II 为 17.20 mmol/L), 则增加间歇排污流量或延长排污持续时间; 反之, 若循环水的“ $1/2\text{Ca}^{2+} + \text{JD}_M$ ”等于或低于控制下限(I 为 13.50 mmol/L, II 为 16.60 mmol/L), 则降低间歇排污流量或缩短排污持续时间。

动态模拟试验结果见表 5, 表中:  $\Delta B$  定义为冷却水的浓缩倍数( $K$ )与  $\text{Ca}^{2+}$  浓缩倍数的差值;  $\Delta H$  定义为冷却水的浓缩倍数( $K$ )与硬度浓缩倍数的差值。

动态模拟试验运行 361.70 h, 系统 I, II 换热管内壁均光亮洁净, 说明在高浓缩倍数下, QJ 药剂实

际运行的阻垢效果优良。

动态挂片的腐蚀速度见表 6。由表 6 可知 HSn70-1A 的腐蚀速度小于 0.005 0 mm/a, 316L 的腐蚀速度小于 0.005 0 mm/a, 但 Q235A 的腐蚀速度远大于 GB 50050—2007《工业循环冷却水处理设计规范》中规定的碳钢腐蚀速度小于 0.075 0 mm/a 的要求。说明碳钢发生了较为严重的全面腐蚀, 需要增强 QJ 药剂的碳钢缓蚀能力。

## 2.5 硫酸盐侵蚀试验

浸泡溶液水质指标见表 7。由表 7 可知, 在 50℃ 以下用循环水浸泡受试混凝土 20 d 后, 溶液  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{SiO}_2$  质量浓度相对保持稳定, 说明  $\text{SO}_4^{2-}$  对混凝土中水泥和骨料的侵蚀性不显著。

浸泡试件的质量变化及表面积见表 8。由表 8 可知, 试件浸泡后的质量减少。这是因为混凝土表面含有微粒、水泥灰等易脱离的附着物, 称量过程中, 出现了难以避免的损失。试验前后, 试件形貌并无改变。

表 5 动态模拟试验结果

Tab. 5 Results of the dynamic simulation test

系统	污垢热阻值/ [ $(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot \text{W}^{-1}$ ]	污垢黏附速度/ ( $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot 30 \text{ d}$ )	浓缩倍数( $K$ ) (以 $\text{Cl}^-$ 计)	$\Delta A$	$\Delta B$	$\Delta H$	电导率/ ( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )
I	$< 1.7 \times 10^{-4}$	0	4.7 ~ 5.2	0.10 ~ 0.25	0.04 ~ 0.22	0.10 ~ 0.25	5170 ~ 5480
II	$< 1.7 \times 10^{-4}$	0	5.7 ~ 6.2	0.04 ~ 0.30	0.18 ~ 0.34	0.08 ~ 0.28	5960 ~ 6460

表 6 动态挂片腐蚀速度

Tab. 6 Corrosion rate of hanging pieces in the dynamic simulation test

材质	挂片部位	腐蚀速度	材质	挂片部位	腐蚀速度	材质	挂片部位	腐蚀速度
Q235A	I 进口	0.308 9	HSn70-1A	I 进口	0.001 0	316L	I 进口	0.000 4
	I 出口	0.455 9		I 出口	0.002 4		I 出口	0.000 4
	II 进口	0.276 0		II 进口	0.000 9		II 进口	0.000 4
	II 出口	0.390 5		II 出口	0.003 0		II 出口	0.000 5

表 7 浸泡溶液水质指标

Tab. 7 Water quality indicators for soaking solution

水样 编号	pH 值	电导率/ ( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	$c(\text{Na}^+)/$ ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	钙硬( $1/2\text{Ca}^{2+}/$ ) ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{Cl}^-)/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	活性硅/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	全硅/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
空白	8.66	5150	13.236	11.45	986.43	1770.92	73.23	83.84
1	8.31	5108	15.167	14.75	993.91	1775.35	72.26	81.93
2	8.24	5060	13.427	16.77	997.68	1773.90	73.04	84.28

表 8 浸泡试件的质量变化及表面积

Tab. 8 Variation of the weight and surface area of immersed specimens

混凝土 编号	浸泡前质 量/g	浸泡后质 量/g	浸泡时 间/d	表面积/ $\text{cm}^2$
1	63.69	63.14	20.5	59.971 0
2	123.75	123.39	20.5	100.577 5

## 3 结束语

QJ 药剂磷含量较低, 且具有优良的阻垢性能、缓蚀性能。系统 I, II 较低的污垢热阻值和污垢黏附速度, 表明 QJ 药剂耐氯分解能力强, 适应高浓缩倍数下药剂在水中停留时间长的情况; 采用控制“ $1/2\text{Ca}^{2+} + \text{JD}$ ”值的方法来调整循环水系统排污,

用于预防循环水系统结垢是可行的。

当循环水高浓缩倍数运行时,  $\text{SO}_4^{2-}$  对混凝土中水泥和骨料侵蚀性不显著。

限于时间,硫酸盐侵蚀试验未采用国家标准,宜再考察水泥强度等主要指标。笔者还将开展进一步研究,摸索硫酸盐侵蚀混凝土的快速试验方法,以便能短期内(如1个月内)科学评判硫酸盐侵蚀混凝土的程度,预测混凝土使用寿命,指导人们采取措施减缓混凝土的硫酸盐侵蚀。

## 参考文献:

- [1] 周柏青, 胡梦莎. 工业循环冷却水系统降耗减排综述[J]. 工业水处理, 2017(3): 16-20.  
ZHOU Baiqing, HU Mengsha. Review on the consumption lowering and emission reduction of industrial circulating cooling water systems[J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(3): 16-20.
- [2] 赵杉林. 工业循环冷却水处理技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2014: 6-11.
- [3] 杨其涛. 全中水条件下循环水模拟试验研究及应用[J]. 华电技术, 2018, 40(10): 33-36.  
YANG Qitao. Experimental study and application of circulating water simulation test fully replenished by intermediate water[J]. Huadian Technology, 2018, 40(10): 33-36.
- [4] 冷以康, 程春兰, 徐敬玮. 330 MW 机组循环水处理优化试验研究[J]. 华电技术, 2009, 31(12): 42-44.  
LENG Yikang, CHENG Chunlan, XU Jingwei. The research on optimization test in circulating cooling water treatment at 330 MW unit power plant[J]. Huadian Technology, 2009, 31(12): 42-44.
- [5] 钱锡琳. 凝汽器不锈钢管的结垢分析及综合治理[J]. 华电技术, 2019, 41(7): 51-53.  
QIAN Xilin. Scale analysis and comprehensive treatment of condenser stainless steel tubes[J]. Huadian Technology, 2019, 41(7): 51-53.
- [6] 温晓红, 崔绍波. 循环冷却水动态模拟试验分析[J]. 华电技术, 2014, 36(9): 30-31.  
WEN Xiaohong, CUI Shaobo. The analysis of circulating cooling water in dynamic simulation test[J]. Huadian Technology, 2014, 36(9): 30-31.
- [7] 赵丹丹, 曹顺安, 陈东, 等. 电解技术在循环冷却水处理中的应用研究进展[J]. 热力发电, 2018, 47(6): 1-7.  
ZHAO Dandan, CAO Shunan, CHEN Dong, et al. Research progress of application of electrolysis technology in circulating cooling water treatment[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(6): 1-7.
- [8] 鲍其犇. 我国循环冷却水处理 30 年[J]. 工业水处理, 2010, 30(12): 6-14.  
BAO Qinai. Circulating cooling water treatment over the last thirty years in China[J]. Industrial Water Treatment, 2010, 30(12): 6-14.
- [9] 谭明德. 循环冷却水加药处理及分析[J]. 华电技术, 2011, 33(12): 46-47.  
TANG Mingde. The analysis of dosing treatment in cooling water system[J]. Huadian Technology, 2011, 33(12): 46-47.
- [10] 王维娜, 沈炳耘, 侯晓羽. 内蒙古某电厂循环冷却水系统阻垢缓蚀试验研究[J]. 工业水处理, 2010, 30(10): 92-95.  
WANG Weina, SHEN Bingyun, HOU Xiaoyu. Experiment research of scale and corrosion inhibition in circulating cooling water system in a thermoelectric power station of Inner Mongolia[J]. Industrial Water Treatment, 2010, 30(10): 92-95.
- [11] 商永鑫, 刘光华, 李映川. 中水回用循环冷却水系统现场应用[J]. 工业水处理, 2005, 25(12): 70-72.
- [12] 潘丽娜. 工业循环冷却水添加阻垢缓蚀剂的试验研究[J]. 华电技术, 2017, 39(2): 31-34, 37.  
PAN Lina. Experiment research of scale and corrosion inhibition in circulating cooling water system[J]. Huadian Technology, 2017, 39(2): 31-34, 37.
- [13] 王应高, 王晶, 马继玲. 电厂循环冷却水阻垢缓蚀杀菌剂筛选试验研究[J]. 华北电力技术, 2010, 10(7): 1-5.  
WANG Yinggao, WANG Jing, MA Jiling. Screening of scale and corrosion inhibitor and sterilant in power plant circulating cooling water[J]. North China Electric Power, 2010, 10(7): 1-5.
- [14] 刘志明, 郑永来. 冷却塔钢筋混凝土耐久性分析[J]. 工业建筑, 2010, 40(S1): 796-798, 802.  
LIU Zhiming, ZHENG Yonglai. Durability analysis of reinforced concrete of cooling tower[J]. Industrial Construction, 2010, 40(S1): 796-798, 802.
- [15] 冷发光, 马孝轩, 田冠飞. 混凝土抗硫酸盐侵蚀试验方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006(S2): 45-48.  
LENG Faguang, MA Xiaoxuan, TIAN Guanfei. Investigation of test methods of concrete under sulfate corrosion[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2006(S2): 45-48.
- [16] 张玉敏, 王铁成. 人工海水对混凝土侵蚀性的研究[J]. 混凝土, 2001, 145(11): 48-50.
- [17] 董宜森. 硫酸盐侵蚀环境下混凝土耐久性性能试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [18] RAHMANI K, JADIDIAN R, HAGHTALAB S. Evaluation of inhibitors and biocides on the corrosion, scaling and bio-fouling control of carbon steel and copper-nickel alloys in a power plant cooling water system[J]. Desalination, 2016, 393(1): 174-185.
- [19] 王凤平, 康万利, 敬和民, 等. 腐蚀电化学原理、方法及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, (下转第 34 页)

- ZHU Fahua, SUN Zunqiang, SHEN Zhiyong. Cause analysis of colored smoke plume and related studies on economic and environmental benefits of its treatment technologies for ultra-low emission coal-fired power plants [J]. Electric Power, 2019, 52(8): 1-7.
- [5] 欧阳丽华, 庄烨, 刘科伟, 等. 燃煤电厂湿烟囱降雨成因分析[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 1975-1982.
- OUYANG Lihua, ZHUANG Ye, LIU Kewei, et al. Analysis on mechanism of rain out carried by wet stack of thermal power plant[J]. Environmental Science, 2015, 36(6): 1975-1982.
- [6] 郭彦鹏, 潘丹萍, 杨林军. 湿法烟气脱硫中石膏雨的形成及其控制措施[J]. 中国电力, 2014, 47(3): 152-154, 159.
- GUO Yanpeng, PAN Danping, YANG Linjun. Formation and control of gypsum rain in wet flue gas desulfurization[J]. Electric Power, 2014, 47(3): 152-154, 159.
- [7] 赵萍, 王明浩, 包洪亮, 等. 烟气消白技术的分析研究[J]. 环境工程, 2019, 37: 600-603.
- ZHAO Ping, WANG Minghao, BAO Hongliang, et al. Analysis and study of flue gas whitening technology[J]. Environmental Engineering, 2019, 37: 600-603.
- [8] 谭厚章, 熊英莹, 王毅斌, 等. 湿式相变凝聚器协同多污染物脱除研究[J]. 中国电力, 2017, 50(2): 128-134.
- TAN Houzhang, XIONG Yingying, WANG Yibin, et al. Study on synergistic removal of multi-pollutants by WPTA[J]. Electric Power, 2017, 50(2): 128-134.
- [9] 李军状, 朱法华, 李小龙, 等. 燃煤电厂烟气中可凝结颗粒物测试研究进展与方法构建[J]. 电力科技与环保, 2018, 34(1): 37-44.
- LI Junzhuang, ZHU Fahua, LI Xiaolong, et al. Progress and method construction of condensable particles in flue gas of coal-fired power plants[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2018, 34(1): 37-44.
- [10] 郭静娟. 燃煤电站烟囱排放有色烟羽现象研究[J]. 华电技术, 2017, 39(1): 73-74.
- GUO Jingjuan. Coal-fired power plant stack emission colored smoke plume study[J]. Huadian Technology, 2017, 39(1): 73-74.
- [11] 胡鑫, 潘响明, 李啸, 等. 湿法脱硫烟气“消白”工艺探索[J]. 化肥设计, 2018, 56(2): 28-30.
- HU Xin, PAN Xiangming, LI Xiao, et al. Exploration on the process of white smoke elimination in wet flue gas desulfurization[J]. Chemical Fertilizer Design, 2018, 56(2): 28-30, 37.
- [12] 吴冲, 王争荣. 烟气冷凝技术在火电厂超低排放工程中的应用[J]. 华电技术, 2018, 40(8): 72-73.
- WU Chong, WANG Zhengrong. Application of flue gas condensation technology in ultra-low emission project of thermal power plants[J]. Huadian Technology, 2018, 40(8): 72-73.
- [13] 火电厂大气污染物排放标准: DB 12/810—2018[S].
- [14] 王东雷, 许家明. 浆液冷却烟气脱白设计边界条件的选择及应用[J]. 环境工程, 2019, 37: 528-531.
- WANG Donglei, XU Jiaming. Application and selection of boundary conditions for design of desulphurization slurry cooling flue gas[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(S1): 528-531.
- [15] 王争荣, 耿宣, 汪洋, 等. 燃煤电厂湿烟羽消除设计方案对比分析[J]. 华电技术, 2018, 40(9): 5-9.
- WANG Zhengrong, GENG Xuan, WANG Yang, et al. Comparative analysis of design schemes for wet plume removal in coal-fired power plant[J]. Huadian Technology, 2018, 40(9): 5-9.

(本文责编: 齐琳)

#### 作者简介:

杨鹏飞(1987—), 男, 河北任丘人, 工程师, 工程硕士, 从事燃煤电厂环保改造项目工艺设计及研发方面的工作(E-mail: yangpf@chec.com.cn)。

2006(3): 201-210.

(本文责编: 张帆)

#### 作者简介:

牛犇(1994—), 男, 河南驻马店人, 工程师, 工学硕士, 从事电厂化学水处理方面的工作(E-mail: 1245242375@qq.com)。

(上接第 21 页) 2008: 21-29.

- [20] 曹征良, 袁雄洲, 邢锋, 等. 美国混凝土硫酸盐侵蚀试验方法评析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2006(3): 201-210.

CAO Zhengliang, YUAN Xiongzhou, XING Feng, et al. American test methods for evaluating the durability of cement based materials against external sulfate attack [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering),