

全中水条件下循环水模拟试验研究及应用

杨其涛

(华电滕州新源热电有限公司,山东 滕州 277500)

摘 要:华电滕州新源热电有限公司 2 台 350 MW 机组通过开展全中水方式的循环水补水模拟试验,确定了满足机组安全、经济运行水质控制标准及加药量,同时进行了现场实际应用,循环水系统无结垢和明显腐蚀,实现了高比例中水回用条件下机组的安全、稳定运行。

关键词:循环水;中水回用;模拟试验;结垢;腐蚀

中图分类号:X 703.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1674-1951(2018)10-0033-04

0 引言

华电滕州新源热电有限公司(以下简称新源热电) #3, #4 机组为 2 台 350 MW 供热机组,原循环水水源为马河水库地表水及少量城市中水。循环冷却水系统共有 2 台双曲线自然通风逆流冷却塔。每台机组设计冬季和夏季的循环水量为 25 000 m³/h 和 41 000 m³/h,凝汽器材质为 TP316L 不锈钢。循环水系统管道和其他换热器壳体材质为碳钢。循环水处理方式加硫酸、阻垢剂及杀菌剂。

根据地方政府减少地表水使用、提高中水用量的要求,新源热电需要加大中水回用量。由于电厂循环水冷却水系统在循环水水质条件比较恶劣时容易发生结垢和腐蚀现象,影响机组运行的安全性和经济性^[1]。当循环水由水质较好的地表水更换为水质较差的中水时,需进行模拟试验,通过静态阻垢试验及动态模拟试验,确定循环水用缓释阻垢剂在运行中的最佳浓缩倍率和缓释效果,将起到防止凝汽器结垢和腐蚀的重要作用^[2],保证机组的安全、稳定运行。

1 试验准备

1.1 阻垢缓蚀剂理化性能分析

依据 DL/T 806—2013《火力发电厂循环冷却水用阻垢缓蚀剂》,对缓释阻垢剂进行理化性能检测,结果见表 1。检测结果表明,阻垢缓蚀剂符合标准要求。

1.2 试验水质

对中水水质全分析,水质全分析结果见表 2。

1.3 试验仪器及装置

1.3.1 静态阻垢试验装置

静态试验的目的是采用极限碳酸硬度法初步确

表 1 阻垢缓蚀剂理化性能检测结果

检测项目	产品指标			检测结果
	A 类	B 类	C 类	
唑类(C ₆ H ₄ NHN: N)/%	—	≥1.00	≥3.00	0.72
磷酸盐(以 PO ₄ ³⁻ 计)/%		≤20.00		11.92
亚磷酸(以 PO ₄ ³⁻ 计)/%		≤1.00		0.03
正磷(以 PO ₄ ³⁻ 计)/%		≤0.50		0.02
固体含量/%		≥32.00		32.16
pH 值(1%水溶液)		3.00±1.50		2.51
密度(20℃)/(g·cm ⁻³)		≥1.15		1.15

表 2 补充水水质全分析结果

项目	数值
颜色	淡黄色、透明
溶解固形物/(mg·L ⁻¹)	918.60
浊度/FTU	1.33
电导率/(μS·cm ⁻¹)	1310
全碱度/(mmol·L ⁻¹)	2.83
1/2Mg ²⁺ /(mmol·L ⁻¹)	2.61
SO ₄ ²⁻ /(mg·L ⁻¹)	185.85
全硅/(mg·L ⁻¹)	9.57
CODcr/(mg·L ⁻¹)	15.76
总磷/(mg·L ⁻¹)	1.51
余氯/(mg·L ⁻¹)	<0.01
气味	无味
悬浮物/(mg·L ⁻¹)	23.40
pH 值	7.54
酚酞碱度/(mmol·L ⁻¹)	0.00
1/2Ca ²⁺ /(mmol·L ⁻¹)	6.00
总硬度/(mmol·L ⁻¹)	8.61
Cl ⁻ /(mg·L ⁻¹)	150.00
活性硅/(mg·L ⁻¹)	7.93
正磷/(mg·L ⁻¹)	1.51
氨氮/(mg·L ⁻¹)	0.22
铁离子/(mg·L ⁻¹)	0.07

定循环水极限浓缩倍率及对应加药量。试验装置如图 1 所示。

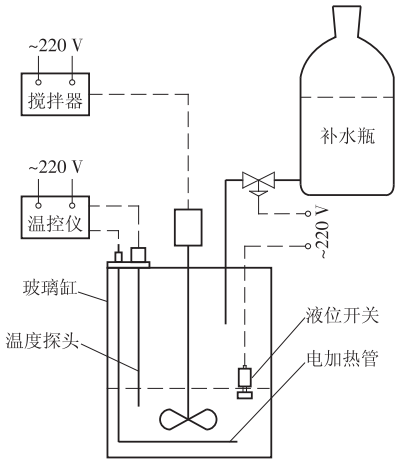


图 1 极限碳酸盐硬度试验装置

1.3.2 动态模拟试验试验装置

开展循环冷却水动态模拟试验,目的是为验证静态试验结果的可行性,确定在此条件下运行的循环水控制指标。动态模拟试验台系统如图 2 所示。

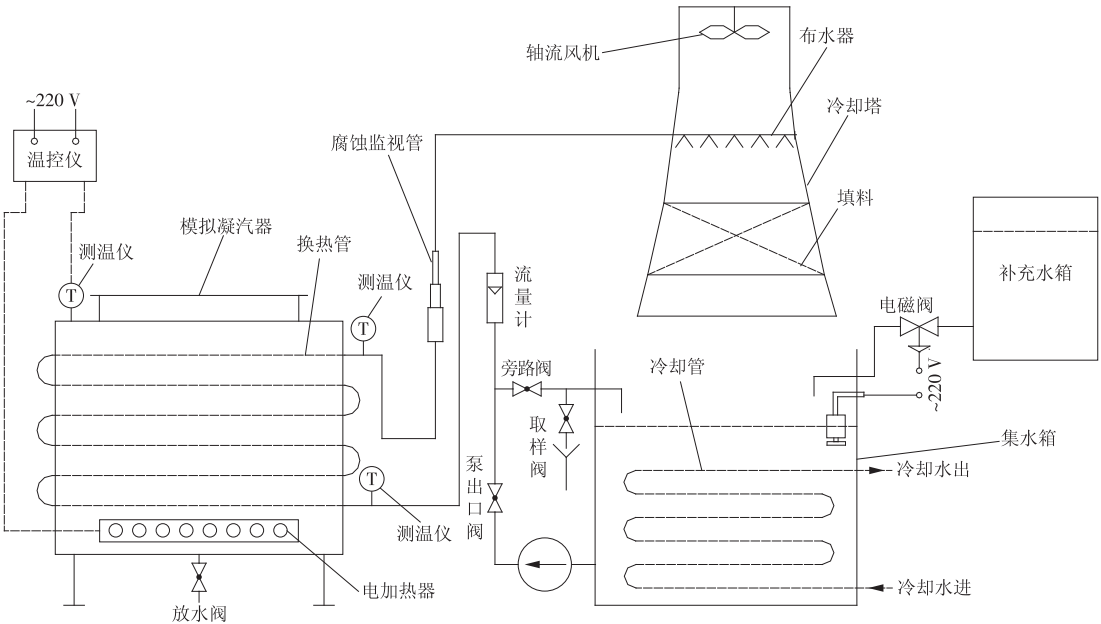


图 2 动态模拟试验台系统

表 3 阻垢缓蚀剂静态浓缩倍率试验结果

编号	加药量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	补充水碱度/ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	极限碳酸盐硬度/ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	极限浓缩倍率		工业应用值	
				KCl	KCa	KCl	KCa
1	5	0.79	4.73	6.13	5.95	4.90	4.76
2	5	1.24	5.69	4.86	4.67	3.89	3.74
3	10	0.79	4.40	6.64	6.46	5.31	5.17
4	10	1.24	6.59	5.85	5.68	4.68	4.54

注:本试验求得的极限浓缩倍率需乘以系数 0.80^[2],方可作为工业循环冷却系统的应用数据,后续所有静态阻垢试验结果的现场应用值均应乘以该系数。

2 试验过程及结果

2.1 静态阻垢试验

加酸调节补充水碱度并添加阻垢缓蚀剂,采用极限碳酸盐硬度法进行静态阻垢试验,结果见表 3。

试验结果表明,编号为 1,2,4 的加药方案均能够满足 3.8~4.5 浓缩倍率的工业应用要求。其中,将补充水碱度调至 0.79 mmol/L、加药量 5 mg/L 的加药方案最经济,故选择此加药方案用于动态试验。

2.2 动态模拟试验

2.2.1 试验期间的水质变化情况

向补充水中加入阻垢缓蚀剂 5 mg/L,调节碱度至 0.8 mmol/L,连续补水进行动态模拟试验。试验期间,调整排污量使浓缩倍率稳定在 3.8~4.5 倍。动态试验监测情况见表 4,浓缩倍率变化情况如图 3 所示。

动态试验结束时,测定循环水中硫酸根质量浓度为 1 322.0 mg/L,计算循环水中硫酸根 + 氯离子的总质量浓度为 1 909.5 mg/L,满足硫酸根 + 氯离子不超过 2 500 mg/L 的要求^[3]。

表 4 动态模拟试验期间的水质变化情况

指标	中水		循环水	
	范围	平均值	范围	平均值
浓缩倍率 K_{Cl}			3.82 ~ 4.49	4.14
电导率/ $(\mu S \cdot cm^{-1})$	1 347 ~ 1 374	1 364	4 650 ~ 5 270	4 924
pH 值	5.90 ~ 6.07	5.97	8.55 ~ 8.77	8.65
酚酞碱度/ $(mmol \cdot L^{-1})$	0	0	0.17 ~ 0.39	0.31
全碱度/ $(mmol \cdot L^{-1})$	0.77 ~ 0.79	0.79	2.76 ~ 3.21	2.91
$Cl^{-}/(mg \cdot L^{-1})$	139.00 ~ 143.00	142.00	541.00 ~ 635.00	585.00
钙硬 $(1/2Ca^{2+})/(mmol \cdot L^{-1})$	5.90 ~ 6.06	5.98	22.51 ~ 25.94	24.06
总磷(以 PO_4^{3-} 计)/ $(mg \cdot L^{-1})$	1.75 ~ 2.03	1.91	3.13 ~ 3.69	3.40
正磷(以 PO_4^{3-} 计)/ $(mg \cdot L^{-1})$	1.14 ~ 1.36	1.28	1.42 ~ 2.45	2.20
$COD_{Cr}/(mg \cdot L^{-1})$	16.90 ~ 19.00	18.00	39.60 ~ 68.70	48.40
浊度/FTU	0.67 ~ 1.00	0.83	0.94 ~ 2.10	1.30

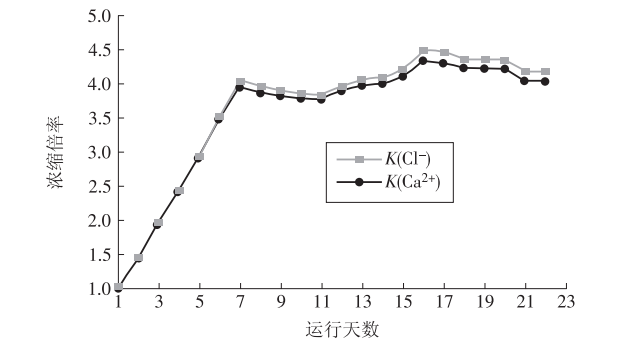


图 3 动态试验期间循环水浓缩倍率随时间变化曲线

2.2.2 换热管内黏泥沉积及结垢试验

动态模拟试验中,换热管(316L 材质)内表面原始状态和水冲洗后状态如图 4 所示。

从图 4 可以看出:换热管内表面无明显结垢性沉积物,系统无结垢倾向。

2.2.3 材质腐蚀性能试验

动态模拟试验结束后,对试片附着的腐蚀产物和黏泥进行冲洗,观察试片表面,称重计算均匀腐蚀速率。腐蚀试验的结果见表 5。

由表 5 的试验结果可以看出,316L 不锈钢和 HSn701 – AB 试片腐蚀速率满足要求^[3],20 号碳钢试片腐蚀速率属于良好级别^[4]。

表 5 材质腐蚀性能试验结果

流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	试片材质	均匀腐蚀速率/ ($mm \cdot a^{-1}$)	试片原始 表面状态
0.32	20 号碳钢	0.085 0	大量黑褐色腐 蚀产物附着
	316L 不锈钢	0.000 7	光亮
	HSn701 – AB	0.000 8	光亮

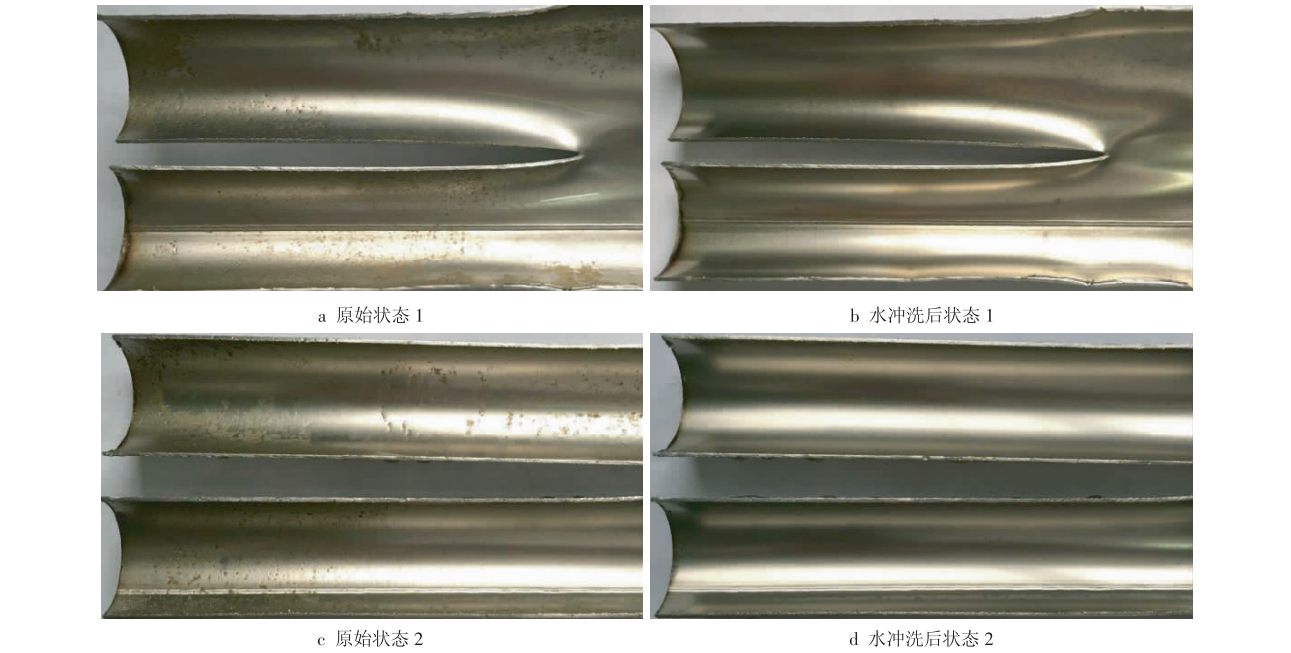


图 4 换热器管出口内表面

续表

流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	试片材质	均匀腐蚀速率/ ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	试片原始 表面状态
0.57	20 号碳钢	0.155 0	大量黑褐色腐 蚀产物附着
	316L 不锈钢	0	光亮
	Sn701 - AB	0	光亮
1.29	20 号碳钢	0.217 0	大量黑褐色腐 蚀产物附着
	316L 不锈钢	0.000 2	光亮
	HSn701 - AB	0.000 9	光亮

2.3 试验结论及控制指标

试验期间,循环水全碱度控制在 2.76 ~ 3.21 mmol/L,pH 值在 8.55 ~ 8.77,浊度在 2.10 FTU 以下,COD_{Cr} 在 68.68 mg/L 以下,符合 pH 值、浊度、COD_{Cr}的控制标准^[3];循环水无结垢现象,316L 不锈钢和 HSn701 - AB 试片的腐蚀速率低于规定要求^[4];20 号碳钢试片腐蚀速率属于良好级别^[4];循环水浓缩倍率控制在 3.82 ~ 4.49,Cl⁻ 质量浓度在 541.68 ~ 635.47 mg/L 之间,满足凝汽器不锈钢管所适应水质的要求^[5]。在上述动态模拟试验基础上,确定的循环水控制指标见表 6。

表 6 循环水水质控制指标

指标	控制范围	分析频次
浓缩倍率 K_{Cl}	3.8 ~ 4.5	1 次/d
pH 值	8.5 ~ 8.8	1 次/d
酚酞碱度/($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.2 ~ 0.4	1 次/d
全碱度/($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	2.8 ~ 3.2	1 次/d
Cl ⁻ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	540.0 ~ 630.0	1 次/d
钙硬度($1/2\text{Ca}^{2+}$)/($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	22.0 ~ 26.0	1 次/d
总磷(以 PO_4^{3-} 计)/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	3.2 ~ 3.6	1 次/d
有机磷(以 PO_4^{3-} 计)/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.9 ~ 2.0	1 次/d
COD _{Cr} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	≤100	1 次/周

3 现场应用

3.1 实际使用情况

在完成全中水模拟试验后,新源热电逐渐加大中水回用量,从 2015 年到 2017 年,2 台 350 MW 机组中水年使用量由 100 万 m³ 已增加至 300 万 m³ 以上,中水的使用比例由 2015 年初的 30% 已提高至 2017 年的 80% 以上。循环水水质实际控制指标见表 7。

3.2 现场检查情况

在机组检修及停备用期间,新源热电对循环水系统及凝汽器进行检查,未发现凝汽器结垢问题,也未出现管材腐蚀加剧现象。2017 年 9 月, #3 机组

凝汽器图片如图 5 所示。

表 7 循环水质实际控制指标

指标	实际控制指标	
	指标范围	平均值
pH 值	7.68 ~ 8.73	
全碱度/($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	2.70 ~ 4.60	3.64
电导率/($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	2 938 ~ 3 725	3 330
硬度($1/2\text{Ca}^{2+} + 1/2\text{Mg}^{2+}$)/ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	10.20 ~ 12.10	11.43
Ca ²⁺ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	340.68 ~ 440.88	392.78
Cl ⁻ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	252.00 ~ 322.00	283.20
硫酸根/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	664.52 ~ 781.26	723.00
COD _{Cr} /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	45.33 ~ 49.61	47.47
总磷/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	4.50 ~ 5.20	4.93
浓缩倍率 K_{Cl}	3.12 ~ 4.18	3.64



图 5 凝汽器水室外观

为适应中水水质,目前循环冷却水系统部分黄铜材质冷却器已改为 316L 不锈钢,仅发电机氢冷器材质为镍铜。2017 年 9 月,新源热电化学专业在 #3 机组凝汽器水室加装碳钢 (C20)、镍铜 (B20) 腐蚀指示片 (如图 6 所示)。可利用机组检修机会检测腐蚀指示片的腐蚀速率,便于定量监督循环水系统中碳钢及镍铜材质的腐蚀情况。

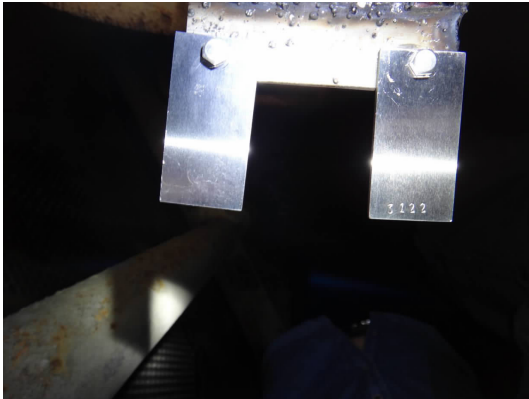


图 6 循环水系统加装的腐蚀指示片

4 结束语

通过开展全中水条件下循环水模拟试验,确定了循环水水质控制指标,为加大中(下转第 39 页)

机组发电标准煤耗降低量

$$\Delta b = \frac{\Delta q}{29\,279\eta_b\eta_g} \times 10\,000 \quad , \quad (7)$$

式中: η_g 为管道效率,%。

机组全年煤耗降低量

$$\Delta B = \Delta b P n \times 10^{-6} \quad , \quad (8)$$

式中: P 为发电机组额定功率,kW; n 为机组在额定功率年工作小时数。

1 000,750 MW 工况下汽轮机低加经济性数据见表 2。

表 2 1 000,750 MW 工况下低加经济性数据

项目	符号	单位	#8 低加	#7 低加	#6 低加
抽汽放热	q_r	kJ/kg	2 558.1/2 576.3	2 396.51/2 422.23	2 253.06/2 329.66
凝结吸热	τ_r	kJ/kg	259.87/250.21	94.25/78.88	103.58/96.28
疏水放热	γ_r	kJ/kg	244.66/226.82	102.36/92.37	61.29/97.48
等效焓降	H_r	kJ/kg	158.69/171.75	226.64/231.10	221.83/221.26
抽汽效率	η_r	%	6.20/6.67	9.46/9.54	9.85/9.50

莱州公司 #1 机组加装低温省煤器后,1 000,750 MW 工况的机组经济性数据见表 3。

表 3 1 000,750 MW 工况加装低温省煤器经济数据

项目	符号	单位	数值
抽汽等效焓降增加	ΔH	kJ/kg	2.12/1.45
系统经济性相对提高率	η_i	%	0.15/0.11
热耗降低量	Δq	kJ/(kW·h)	1.26/7.75
发电煤耗降低量	Δb	g/(kW·h)	0.42/0.29
全年节省标煤量	ΔB	t	2 515/2 393
热煤循环泵电耗		kW·h	83.62/52.67
全年节约成本		万元	17.66/12.39

5 结论

(1)莱州公司低温省煤器布置在静电除尘器入口烟道上,既降低了电除尘器入口烟气温度,提高了电除尘器除尘性能,同时充分吸收排烟余热,提高机组热经济性,位置布置方案具有现实指导意义。

(2)考虑到受热面低温腐蚀,低温省煤器凝结水取水方案、分水流量系数需经过优化选择设计,保



(上接第 36 页)水回用量后的水质监督提供依据。

在加大中水回用量后,通过严格控制水质指标,实际生产过程中未出现循环冷却水系统明显结垢、腐蚀问题,保证了机组安全稳定运行。

做好循环水系统的监督与管理,一方面需要在机组运行期间继续安装模拟试验确定的控制标准做好水质监督控制,以及加强胶球清洗系统的投运及维护管理。另一方面也需要在机组停备用和检修期间做好凝汽器及相关系统的清淤、保护工作。

参考文献:

[1]高秀山,张渡. 火电厂循环水冷却水处理[M]. 北京,中国电力出版社,2001.

证低温省煤器出口烟温维持在(90±2℃)。

(3)机组加装低温省煤器后,1 000,750 MW 工况下利用等效焓降法进行热经济性分析,年节省标准煤量分别为 2 515/2 393 t,去除热煤循环泵电耗,年节约成本分别为 17.66/12.39 万元,提高了机组运行的热经济性。

参考文献:

[1]邵青伍,冯晓君. 电厂锅炉排烟温度高的原因及处理措施[J]. 内蒙古科技与经济,2008(8):124.

[2]黄嘉骊,李杨. 低压省煤器水侧系统连接方案优化分析[J]. 热力发电,2011,40(3):62-64.

[3]周新军,房林铁,张红方,等. 330 MW 机组增装低压省煤器及经济性分析[J]. 节能,2011,30(6):16-20.

(本文责编:白银雷)

作者简介:

马记(1983—),男,山东滕州人,工程师,工学硕士,从事火电厂集控运行、节能分析方面的工作(E-mail:22849136@qq.com)。

[2]吴晓伟. 循环水缓蚀阻垢剂的筛选模拟试验[J]. 贵州电力技术,2004(7):8-8.

[3]工业循环冷却水处理设计规范:GB 50050—2007[S].

[4]左景伊. 腐蚀数据手册[M]. 北京:化学工业出版社,1982.

[5]火电厂凝汽器及辅机冷却器管选材导则:DL/T 712—2010[S].

(本文责编:白银雷)

作者简介:

杨其涛(1975—),男,山东滕州市人,工程师,从事火力发电厂化学技术监督管理及科技管理等工作(E-mail:yqt1018@126.com)。