

松南气田集输处理站提高循环水质量研究

姜大威

中国石油化工股份有限公司东北油气分公司, 吉林 长春 130062

摘要:分析松南气田集输处理站换热器效率低的原因,主要是循环水质量不达标,杂质在热交换面附着、结垢,同时水管道内壁结垢缩小了管道的实际管径,流量降低造成管道高点和末端换热器供水不足。通过对水样和垢样化验分析,确定结垢成分主要是 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 等矿物离子,矿物离子在循环和换热过程中不断浓缩并在换热面过饱和析出,而非结垢成分主要是黏土颗粒和微生物滋生产生的黏泥。补充新鲜水含带泥沙、循环水蒸发使得矿物质浓缩析出、旁滤未正常投用和循环水未加药等四个方面是造成水质不达标的主要原因。为此,通过在水源井出口加装初滤、浓水置换、解决回收水池冻堵问题和加入三防药剂等技改措施,有效提高了循环水质量,为天然气净化工业改善循环水水质提供了技术参考。

关键词:循环水;结垢;换热器;矿物质

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2018.06.017

Study on Improving Circulating Water Quality in Central Process Factory of Songnan Gasfield

Jiang Dawei

China Petrochemical Corporation Northeast Oil & Gas Branch Company, Changchun, Jilin, 130062, China

Abstract: This paper analyzed the reason why heat-exchanger in central process factory of Songnan Gasfield is ineffective. It is mainly caused by the unqualified circulating cooling water quality, the impurity attached in heat transfer area. In addition, the scaling in internal wall of water pipeline reduces the real diameter of pipeline and the reduced flow caused inadequate water supply in high point and terminal heat-exchanger. Through analyzing of the water and scaling samples, the component of scaling samples mainly consist of some of mineral ions such as Ca^{2+} , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} etc. They are precipitated by a concentrated process of circulation and heat transfer in heat transfer area. The components of other materials are mainly clay which is produced by granular clay and microorganism. The leading causes of unqualified circulating cooling water quality are supplementary fresh water with sediment, the minerals precipitated by evaporation of circulating water, the failed bypass filter and circulating water without chemical agent. Following measures have been taken to effectively improve the quality of circulating as installing elementary filter in the outlet of water source well, the substitution of heavy concentrations water, the solution of blockage in recycling tank and the injection of chemical agents, which provides reference for

收稿日期:2018-04-20

基金项目:中国石化“松南气田提高循环水质量项目”(08 DBYQ 115)

作者简介:姜大威(1985-),男,吉林农安人,工程师,学士,现从事天然气净化装置运行管理工作。

improving circulating water quality in natural gas purification industry.

Keywords: Circulating cooling water; Scaling; Heat-exchanger; Minerals

0 前言

松南气田属高含碳酸性气田,原料天然气中 CO_2 含量近 28%,脱碳工艺采用 MDEA 法,脱除的 CO_2 做为尾气经过压缩冷却后形成液碳,无论脱碳工艺还是液化工艺都需要循环水为介质降温。松南气田集输处理站经过近十年的运行发现,生产装置的湿净化气冷却器和贫液冷却器等换热效果达不到设计要求,使得装置处理能力降低,严重影响了天然气生产的正常运行。经过设备拆检和工艺参数分析,确定影响换热效果的主要因素是循环水水质不达标,造成换热器结垢影响换热效果,同时水管道内壁结垢缩小了管道的实际管径,流量降低造成管道高点和末端换热器供水不足。可见,要提升装置处理能力,必须以提高循环水水质来减缓结垢速度,并且通过经济有效手段脱除已生成的水垢。

1 循环水工艺

松南气田集输处理站循环水工艺主要为,循环水池内温度近 32°C 的循环水经过水泵升压到 0.3 MPa 后输送到装置区,对工艺介质冷却降温,而换热后的循环水温度升高到 42°C 返回冷却塔,经过风冷降温到 30°C 后再次升压供应到各个换热设备,完成水系统的循环。循环水的长期循环使用,不断地积累泥沙等悬浮物,为了保持循环水的洁净,设置循环水旁滤罐 1 套,引自循环水泵出口 5% 的水进入旁滤罐,脱除水中悬浮物杂质、藻类及菌类等物质,处理后的净化水返回循环水池;而旁滤设备内过滤出的杂质需要经过反冲洗除去,反洗出的污水在回收水池内沉降 72 h,上层清水回收进循环水池再利用,下层泥水做为污水集中处理。循环水工艺流程见图 1。

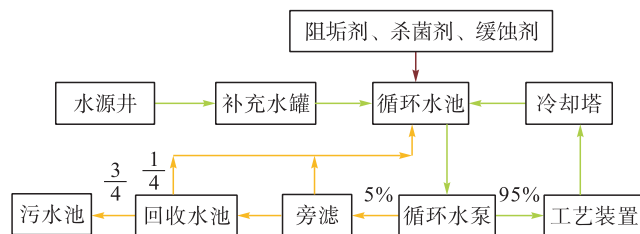


图 1 循环水工艺流程

2 水垢的成因

2.1 数据分析

为了解决循环水工艺设备结垢问题,研究人员从水质、垢样、菌落等方面入手,开展水垢成因的分析。分别

采集了 1#水源井、循环水池的水样及贫液冷却器循环水管道垢样,并对水样和垢样进行离子分析,见表 1~2。

表 1 水质分析结果

检测项目	1#水源井	循环水池
阴离子浓度 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		
F^-	-	2.6
Cl^-	5.6	47.3
NO_2^-	-	-
Br^-	-	-
NO_3^-	-	-
SO_4^{2-}	1.2	142.6
OH^-	-	-
CO_3^{2-}	-	113.7
HCO_3^-	205.0	381.3
阳离子浓度 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		
Li^+	-	-
Na^+	29.7	273.3
NH_4^+	0.3	1.0
K^+	1.3	13.1
Mg^{2+}	7.0	60.8
Ca^{2+}	39.8	9.3
Sr^{2+}	-	-
Ba^{2+}	-	-
总铁	-	-
矿化度 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	289.9	1 045.0
总硬度 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	128.9	276.8
pH 值	6.8	9.5
腐生菌 /($\text{个} \cdot \text{mL}^{-1}$)	-	700
大肠杆菌群 /($\text{CFU} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$)	-	33
菌落总数 /($\text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$)	-	340

表 2 贫液冷却器循环水管道垢样分析结果

检测项目	检测结果
含水率 /($\%$)	41.48
含油量 /($\%$)	-
酸不溶物 /($\%$)	40.07
酸溶物 /($\%$)	18.45
酸溶物中离子质量含量 /($\%$)	
Mg^{2+}	1.05
Ca^{2+}	26.5
Sr^{2+}	-
Ba^{2+}	-
SO_4^{2-}	33.5

由表 1~2 数据可知,循环水中含有高浓度 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 等阴离子和 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等阳离

子;贫液冷却器循环水管道中垢样由 18.45 % 结垢成分(酸溶物)和 40.07 % 非结垢成分(酸不溶物)组成,结垢成分主要是不溶性或微溶性硫酸盐和碳酸盐;非结垢成分则为黏土颗粒和微生物滋生产生的黏泥。

2.2 影响因素

在确定管道垢样成分的基础上,全面分析循环水工艺和设备因素,查找杂质来源。

1)生产运行中,循环水不断消耗损失,1#水源井提供的新鲜水在补充水罐简单沉降后直接进入循环水池,新鲜水中的泥沙悬浮物一同进入循环水池,尽管有旁滤设备,但旁滤并非全流量过滤,大部分悬浮物进入循环水管网。

2)冷却塔通过蒸发散热降低循环水温度,需要由新鲜水连续补充。随着水分的不断蒸发和注入,循环水中所含矿物质不断积累,浓缩后过饱和的钠、镁、钙盐由于热交换界面的温度和 pH 值变化而结晶沉积在换热器表面^[1]。

3)由于集输处理站位于草原边缘,周边沙漠化严重,冷却塔属敞开式冷却塔^[2-5],大量扬尘和沙粒随风进入循环水系统,在设计上通过旁滤罐脱除循环水中的颗粒杂质,旁滤反洗出的污水要经过沉降处理。在冬季,回收水池结冰使得旁滤无法反洗,长此以往旁滤罐内堵塞,无法继续脱除水中颗粒杂质。

4)循环水温度始终在 32 ~ 42℃,这样的温度适于多种菌类生存^[6-7]。由于集输处理站未按标准加入药剂,使得冷却塔百叶板、水池内壁等处附着厚厚的菌落,夏季更严重。

3 提高水质的措施

经过全面分析,梳理出影响循环水水质的主要因素,分别制定技改方案和管理措施。

3.1 源头过滤

根据每天新鲜水补水量的需求,设计在 1#水源井出口与补充水罐间增加 1 套新鲜水初滤设备,全量过滤新鲜水,脱除泥沙等固体颗粒,从源头上减少杂质混入循环水,初滤设备技改方案见图 2。

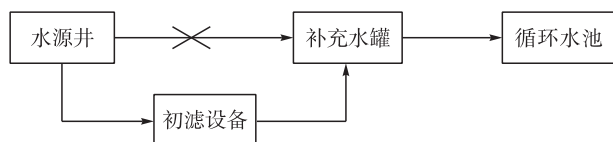


图2 增加初滤设备技改方案

分别取初滤罐进、出口水样化验,对比离子含量并采用恒重法检测固体含量变化,验证技改效果,数据对比见表 3。

表3 初滤罐进、口水样对比

检测项目	初滤进口水样	初滤出口水样
离子含量 / (mg·L ⁻¹)		
Ca ²⁺	56.11	52.1
Mg ²⁺	31.84	29.16
Na ⁺	25.31	27.75
SO ₄ ²⁻	7	8
HCO ₃ ⁻	350.85	348.17
CO ₃ ²⁻	11.25	未检出
矿化度 / (mg·L ⁻¹)	482.36	465.18
总硬度 / (mg·L ⁻¹)	6.13	6.11
pH 值	6.8	6.9
固体含量 / (mg·L ⁻¹)	5.2	2.5
粒径中值 / μm	4.22	2.47

由表 3 可看出,增加初滤设备后,进入补充水罐的新鲜水粒径中值下降,固体含量明显降低,表明循环水补充的源水水质得到改善。

3.2 浓水置换

循环水量 $Q_{\text{总}}$ 为 680 t/h,环境最高气温 23℃(蒸发系数 0.001 43),蒸发水量 $Q_{\text{蒸}}$ 为 9.72 t/h;环境最低气温 -18℃(蒸发系数 0.000 8),蒸发水量 $Q_{\text{蒸}}$ 为 5.44 t/h。

理想状况下可认为蒸发出的水不含矿物盐。风吹损失等其他原因消耗的水量 $Q_{\text{风}}$ 约 0.5 t/h。通过旁滤反洗实现浓水置换,平均每小时旁滤的反洗水量设为 $Q_{\text{反}}$,回收水池回收再利用的水量约 $1/4Q_{\text{反}}$,排出浓水量约 $3/4Q_{\text{反}}$ 。欲保持循环水的矿化度不升高,排出浓水的矿物质总量应大于等于新鲜水补充的矿物质总量。

$$\rho_{\text{反}} \cdot 3/4Q_{\text{反}} \geq \rho_{\text{新}} \cdot Q_{\text{新}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{新}} = 3/4Q_{\text{反}} + Q_{\text{蒸}} + Q_{\text{风}} \quad (2)$$

式中: $\rho_{\text{反}}$ 为旁滤反洗水的矿化度,mg/L; $Q_{\text{反}}$ 为反洗的水量,t/h; $\rho_{\text{新}}$ 为补充的新鲜水矿化度,mg/L; $Q_{\text{新}}$ 为补充的新鲜水量,t/h; $Q_{\text{蒸}}$ 为循环水蒸发量,t/h; $Q_{\text{风}}$ 为风吹损失等其他消耗,t/h。

经计算 $Q_{\text{反}} \geq 3.04 \sim 5.23$ t/h,即现有工况条件下,冬季平均每小时反洗水量应超过 3.04 t(夏季 5.23 t),补充新鲜水量超过 8.22 t(夏季 14.14 t),既可以满足循环水补充量的需求,同时可持续降低循环水矿化度,逐渐溶解已经析出的矿物盐。

3.3 恢复旁滤流程

解决旁滤冬季不能正常运行问题的关键,在于防止回收水池结冰。考虑该地区最低气温、碳钢管导热系数^[8-10]和水流速等因素,在循环回水返至冷却塔前,通过 DN 80 的碳钢管引流一部分循环回水,管道围绕回收水池内壁,应用热传导原理,降低循环回水温度的同时,提高反洗水的温度始终保持 0℃ 以上,旁滤罐可正常反洗和过滤,回收水池技改方案见图 3。

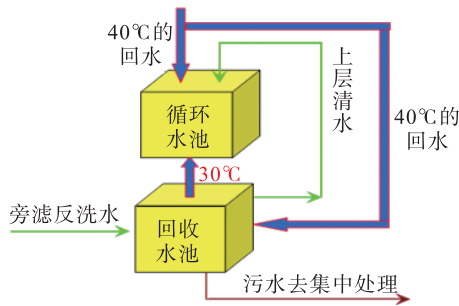


图3 回收水池技改方案

3.4 填加药剂

3.4.1 防垢剂筛选

取循环水作为试验药剂,选取3种阻垢剂,即:丙烯酸和2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸混合溶液(AA/AMPS)、水解聚马来酸酐(HPMA)、氨基三亚甲基膦(ATMP)在不同投加浓度进行阻垢剂性能试验,试验结果见表4。

表4 循环水阻垢剂筛选评价

药剂型号	浓度 / (mg · L ⁻¹)	防垢率 / (%)
AA / AMPS	3	27.6
	5	30.4
	7	70.5
	10	82.2
HPMA	3	26.5
	5	26.9
	7	43.9
	10	58.2
ATMP	3	55.6
	5	56.2
	7	83.1
	10	88.8

由表4可看出,ATMP药剂在不同浓度下的阻垢率大于相应浓度下其他两种药剂的阻垢率,阻垢效果较好。

3.4.2 杀菌剂筛选

对于敞开式循环水系统,因水份的不断补充和空气中大量尘埃从冷却塔进风口被带入水中,使循环水中的有机物、无机物大量增加,为新鲜水和空气中微生物的生长繁殖提供了良好条件,而且循环水的水温和pH值特别适宜微生物的生长繁殖。微生物在生长繁殖过程中产生大量生物排泄物,具有一定的黏性,与水中的菌藻等微生物、金属腐蚀产物、各种难溶盐等粘附在一起形成生物黏泥^[11-14],根据现场情况初步判断系统存在的菌类主要是腐生菌^[15-17]。在现场温度32°C环境下,取3种不同型号杀菌剂:二氯异氰尿酸钠(氧化型杀菌剂J1)、异噻唑啉酮(非氧化型杀菌剂J2)、十二烷基二甲基苄基氯化铵(非氧化型杀菌剂J3),选取不同投加浓度,考察对循环水腐生菌的杀菌效果,试验结果见表5。

表5 循环水杀菌剂筛选评价

药剂型号	浓度 / (mg · L ⁻¹)	杀菌效果
氧化型杀菌剂 J1	40	++
	60	++
	80	+ -
非氧化型杀菌剂 J2	40	++
	60	--
	80	--
非氧化型杀菌剂 J3	40	++
	60	++
	80	--

注:1. 试验菌种为腐生菌 TGB,菌落数:25 × 10² 个/mL;2. “+”表示有菌类生长,“-”表示无菌类生长。

由表5可见,试验用非氧化型杀菌剂J2最低致死浓度为60 mg/L,杀菌能力优于其他两种,推荐使用该杀菌剂。

3.4.3 缓蚀剂筛选

全面腐蚀的评估一般采用平均腐蚀率表示。以单位时间单位面积金属表面被腐蚀损失的量表示,称为腐蚀失重率 C_w ;以单位时间金属表面被腐蚀掉的深度表示,称为腐蚀深度速率 C_k ,简称腐蚀率^[18-19]。工程上常用 C_k 。在现场温度32°C环境下,松南气田集输处理站循环水空白腐蚀速率为0.0105 mm/a,根据GB 50050-2007《工业循环冷却水处理设计规范》规定,间冷开式循环水系统换热器,碳钢设备传热面水侧污垢热阻值应小于0.075 mm/a。目前现场腐蚀情况不明显,是因为结垢严重,阻碍了循环水与碳钢表面的接触。加入防垢剂后结垢降低,金属表面暴露,腐蚀速率有可能加大。

以循环水为腐蚀介质,加入不同型号缓蚀剂:羟基乙叉二磷酸(HEDP)、2-磷酸基-1,2,4-三羧酸丁烷(PBTCA)、DT-060缓蚀阻垢剂、ZH-505缓蚀阻垢剂,进行缓蚀剂性能评价试验,试验结果见表6。

表6 循环水缓蚀剂筛选评价

药剂名称	药剂浓度 / (mg · L ⁻¹)	腐蚀速率 / (mm · a ⁻¹)	现象及试件表面腐蚀情况	缓蚀率 / (%)
HEDP	20	0.0086	水无色透明,挂片表面发乌	23.2
	40	0.0076		32.1
	60	0.0038		66.1
PBTCA	20	0.0108	水无色透明,挂片表面发乌	3.6
	40	0.0079		29.5
	60	0.0025		77.7
DT-060	20	0.0081	水无色透明,挂片表面发乌	22.9
	40	0.0080		23.8
	60	0.0030		71.4
ZH-505	20	0.0060	水无色透明,挂片表面发乌	42.9
	40	0.0057		45.7
	60	0.0049		53.3

注:试验条件静态挂片失重法;挂片温度32 ± 1°C;试片材质A3钢;试验周期168h;试片尺寸50 mm × 13 mm × 1.5 mm;空白腐蚀速率为0.0105 mm/a。

由表6可看出,缓蚀剂PBTCA投加浓度60 mg/L时缓释率为77.7%,缓蚀速率降至0.0025 mm/a,优于其他缓蚀剂。

3.4.4 三防药剂配伍性

为了避免防垢剂、杀菌剂、缓蚀剂(三防药剂)在现场使用过程中出现化学反应,影响药剂的使用效果,开展3种药剂的配伍性试验,三防药剂对防垢性能的影响见表7。

表7 三防药剂对防垢性能的影响

药剂型号	浓度/(mg·L ⁻¹)	防垢率/(%)
缓蚀剂 PBTCA	5	91.2
	7	91.7
	10	91.8
杀菌剂 J 2	5	51.1
	7	68.9
	10	82.0
缓蚀剂 PBTCA + 杀菌剂 J 2	5	89.6
	7	90.1
	10	90.1

由表7可看出,杀菌剂J2的加入使防垢剂原有的防垢性能下降,但缓蚀剂的加入改善了防垢性能,缓蚀剂和杀菌剂混合加入同样提高了防垢性能,三防药剂对杀菌性能的影响见表8。

从表8可看出,防垢剂的加入对杀菌性能没有影响,但缓蚀剂的加入对杀菌性能产生影响,在混合使用中可适当提高杀菌剂的投入浓度。三防药剂对缓蚀性能的影响见表9。

表8 三防药剂对杀菌性能的影响

药剂型号	浓度/(mg·L ⁻¹)	杀菌效果
缓蚀剂 PBTCA	50	++
	60	++
	70	--
防垢剂 ATPM	50	++
	60	--
	70	--
缓蚀剂 PBTCA + 防垢剂 ATPM	50	++
	60	++
	70	--

表9 三防药剂对缓蚀性能的影响

药剂型号	浓度/(mg·L ⁻¹)	缓蚀率/(%)
防垢剂 ATPM	50	58.2
	60	77.9
	70	80.4
杀菌剂 J 2	50	52.1
	60	72.0
	70	75.6
防垢剂 ATPM + 杀菌剂 J 2	50	56.5
	60	75.3
	70	77.0

从表9可看出,防垢剂和杀菌剂的混合加入,对缓蚀性能基本无影响。

试验结果表明,所选的三种药剂配伍性良好,并具有一定的协同性,可同时使用。

4 结论

通过分析换热器换热效率低的问题,查找循环水结垢原因,主要是由于循环水不净,水中含有大量悬浮物、泥沙等,并且矿化度较高,不断有微溶或不溶的矿物盐析出,与微生物黏泥等混为一体附着于换热表面而生成水垢。经过技改措施,使循环水水质得到明显改善,结合日常管理经验,得到以下结论:

1)加强水源管理。从源头上控制新鲜水水质是改善循环水的主要措施。

2)冷却塔处循环水的蒸发必然会使矿物盐离子不断浓缩,无论采用旁滤反洗或是循环水池底部排污的方式,都能起到浓水置换的作用,但要注意置换的水量,确保排出的盐含量大于新鲜水补入的盐含量。

3)循环水定期化验,要根据三防药剂的最佳使用浓度及时补充药剂。

4)提高循环水水质,只能延缓循环水工艺管路及设备的结垢速度,并不能完全遏制。实际应用中还需要根据生产实际配合拆检或酸洗等方式清除水垢。

5)循环水用量较小的企业,可应用闭式冷却系统,采用软化水作为循环冷却水。优点是杂质少、矿化度低,不易结垢;缺点是运行成本较高。

参考文献:

- [1] 乐明聪,高鹏,徐庆磊.循环水换热器腐蚀原因分析及改进措施[J].石油化工腐蚀与防护,2016,33(4):55-58.
Yue Mingcong, Gao Peng, Xu Qinglei. Cause Analysis Corrosion in Cooling Water Heat Exchanger and Improvement Measures [J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2016, 33 (4): 55-58.
- [2] 王峰华.敞开式循环冷却水系统[M].北京:中国建筑工业出版社,2012.
Wang Fenghua. Open Recycling Cooling Water System [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [3] 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.
Zhao Shanlin. A Treatment Technology of Industrial Circulating Cooling Water [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2014.
- [4] 李永安.空调用封闭式冷却塔[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
Li Yongan. The Closed Cooling Tower for Air-Conditioning

- [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [5] 马迎军. 工业循环水处理药剂行业发展现状[J]. 当代化工, 2012, 41(1): 66-68.
- Ma Yingjun. Development Status of Water Treatment Chemicals for Industrial Circulating Water [J]. Contemporary Chemical Industry, 2012, 41(1): 66-68.
- [6] 华自强, 张忠进, 高青. 工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- Hua Ziqiang, Zhang Zhongjin, Gao Qing. Engineering Thermodynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [7] 郑书忠, 朱传俊, 魏静, 等. 工业水处理水质分析及药剂质量性能评价实用手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- Zheng Shuzhong, Zhu Chuanjun, Wei Jing, et al. The Practical Handbook of Industrial Circulating Water Quality Analysis and Chemical Agent Quality Evaluation [M]. Beijing: China Standards Press, 2015.
- [8] 李晨生, 张庆. 冷却塔运行维护与管理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- Li Chensheng, Zhang Qing. The Operation, Maintenance and Management of Cooling Tower [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [9] 赵振国. 冷却塔[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- Zhao Zhenguo. Cooling Tower [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2001.
- [10] 赵顺安. 冷却塔工艺原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Zhao Shun'an. The Process Principle of Cooling Tower [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [11] 胡文明. 循环水系统运行优化与应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- Hu Wenming. Operation Optimization and Application Research of Circulating Water System [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [12] 孙金瑜. 循环水操作工[M]. 北京: 中国石化出版社, 2011.
- Sun Jinyu. The Operator of Circulating Water [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2011.
- [13] 刘智安, 赵巨东, 刘建国. 工业循环冷却水处理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2017.
- Zhao Zhian, Zhao Judong, Liu Jianguo. The Treatment of Industrial Circulating Refrigerant Water [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2017.
- [14] 贾玉柱. 工业循环水中阻垢缓蚀剂测定方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- Jia Yuzhu. Determination Method of Scale and Corrosion Inhibitor in Industrial Circulating Water [D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [15] 朱月海. 循环冷却水[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Zhu Yuehai. Circulating Refrigerant Water [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [16] 齐冬子, 金熙, 项成林, 等. 循环冷却水技术问答[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- Qi Dongzi, Jin Xi, Xiang Chenglin, et al. Question and Answer on Circulating Cooling Water Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
- [17] 高强, 张凌峰, 李晨光, 等. 循环冷却水水质稳定性判断方法的研究综述[J]. 工业水处理, 2011, 31(10): 20-24.
- Gao Qiang, Zhang Lingfeng, Li Chenguang, et al. Review of the Research on the Adjustment Method for the Water Quality Stability of Circulating Cooling Water [J]. Industrial Water Treatment, 2011, 31(10): 20-24.
- [18] 周本省. 循环冷却水系统中微生物引起的腐蚀和粘泥的控制[J]. 腐蚀与防护, 2002, 23(7): 301-304.
- Zhou Bensheng. Control of Microbiologically in Fluenced Corrosion (MIC) and Slime in Recirculating Cooling Water Systems [J]. Corrosion & Protection, 2002, 23(7): 301-304.
- [19] 车海燕, 徐章法. 敞开式循环冷却水系统中的微生物及其控制[J]. 上海化工, 2005, 30(6): 4-7.
- Che Haiyan, Xu Zhangfa. Control of Microbe and Microbe in Open Recycling Cooling Water Systems [J]. Shanghai Chemical Industry, 2005, 30(6): 4-7.