

# LNG 工厂停产情况循环水系统冷态运行研究

杨 焱<sup>1</sup> 杨 远<sup>2</sup> 黄仲伟<sup>3</sup> 陈 伟<sup>1</sup> 杨 华<sup>1</sup> 陈 进<sup>1</sup>

1. 中国石化江汉油田分公司江汉采油厂湖北新捷 LNG 项目部, 湖北 黄冈 438011;
2. 油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学地球科学学院), 湖北 武汉 430100;
3. 中国石化江汉油田分公司盐化工总厂, 湖北 潜江 433124

**摘 要:**为了研究 LNG 工厂停产状态下循环冷却系统特性,找到冷态运行经济与环保共赢方案,结合 LNG 工厂停产情况下循环系统各项控制实例,通过添加更换药剂、优化循环水流量,控制循环水泵电耗,制定方案。研究表明:浓缩倍数是水质处理的关键因素。高浓缩倍数状态时,药剂在水中的停留时间更长,应选用稳定性优良、不易分解的药剂。若浓缩倍数发生大幅降低则必须立即调整药剂用量及种类,同时循环水泵流量控制必须与药剂控制复合使用。pH 值调节对水质处理有辅助作用,后续可对此开展节能措施研究。具体可通过 pH 调节、药剂调节与流量调节协同配合的方式达到最好水质处理效果,取得最大经济效应。

**关键词:**循环冷却水系统;冷态运行;浓缩倍数;节能环保;方案

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2017.03.018

## Research on Cold-Operation of Circulating Water System in LNG Plants Under Shutdown

Yang Ye<sup>1</sup>, Yang Yuan<sup>2</sup>, Huang Zhongwei<sup>3</sup>, Chen Wei<sup>1</sup>, Yang Hua<sup>1</sup>, Chen Jin<sup>1</sup>

1. Hubei Xinjie LNG Project of Jiangnan Oil Production Factory, Sinopec Jiangnan Oilfield Branch Company, Huanggang, Hubei, 438011, China;
2. Oil and Gas Resources and Exploration Technology Key Laboratory of the Ministry of Education (Yangtze University of Earth Sciences), Wuhan, Hubei, 430100, China;
3. Sinopec Jiangnan Salt & Chemical Complex, Qianjiang, Hubei, 433124, China

**Abstract:** In order to study the characteristics of circulating cooling system of LNG plant under shutdown state and find out win-win solution between economy and environmental protection for cold-operation, combined with the control cases of circulating system in LNG plant during shut down, plan has been made by adding and changing chemicals, optimizing circulating water flow, controlling circulating water pump power consumption. Research shows that concentration ratio is a key factor in water treatment. With high concentration ratio, chemicals will stay longer in the water. Persistent chemicals with good

收稿日期:2017-02-08

作者简介:杨 焱(1989-),男,湖北天门人,助理工程师,硕士,湖北 500 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d LNG 工厂国产化示范工程工艺技术员,主要从事 LNG 工厂生产运行工作。

stability shall be selected. If at a much lower concentration multiple, adjustments must be made immediately to chemical dosage and types. Circulating water pump flow control must be used with chemical control. PH adjustment is helpful to water treatment and has high potential value for energy saving. PH adjustment can be used in combination with chemical control and flow control to achieve the best water treatment with biggest economic effect.

**Keywords:** Circulating cooling water system; Cold-operation; Concentration ratio; Energy conservation and environmental protection; Solution

## 0 前言

循环冷却水系统广泛运用于石油化工、电力、制药、钢铁等工业领域。而 LNG 工厂对温度要求敏感,所以循环冷却水系统健康运行是 LNG 工厂正常生产的保障之一。循环冷却水系统最大的问题是腐蚀与结垢,清洗预膜与维护加药是克服此问题的关键<sup>[1]</sup>。所以当前研究主要集中在循环冷却水系统工艺设计与药剂研究上,缺乏系统运行实例参照,特别是工厂停产情况下循环水冷态运行时。本文在笔者前期研究基础上对低流量冷态运行进行危害性分析,找出最优循环水冷态运行方案<sup>[2]</sup>。

## 1 工程与运行

某厂循环冷却水系统现已运行 3 a,本工程主要由集水池、冷却塔、冷却水泵、冷却水地面地下管道、加药间水处理设备、仪表监测系统等设施组成,为典型间冷开式循环冷却水系统<sup>[3]</sup>。满负荷运行的循环水流量为 12 000 m<sup>3</sup>/h 左右。循环水管网送水压力 0.68 MPa,换热器回水压力 0.1 MPa。单台循环水泵出力 4 000 m<sup>3</sup>/h,电机运行负荷为 1 000 kW。设计供水温度为 32℃,回水温度为 40℃,浓缩倍数( $N$ )为 5,见图 1。

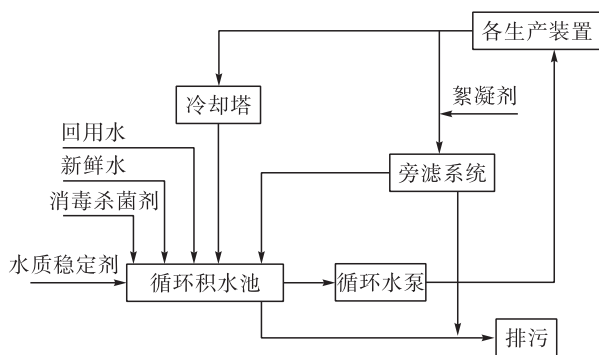


图 1 循环冷却水系统流程示意图

## 2 冷态运行研究

### 2.1 腐蚀与结垢

腐蚀和结垢是危害循环冷却水系统运行的主要因素。腐蚀会产生结垢,结垢又会导致垢下腐蚀,两者相辅相成,互为影响。因此在系统运行时要考虑防腐和除垢<sup>[4]</sup>。循环冷却水系统腐蚀与结垢跟水质、微生物和运行条件密切相关。这些影响因素并不是孤立存在的,而是相互关联的。所以水质控制是保障系统正常运行的主要任务之一。目前最直接的办法是根据系统工况(浓缩倍数),进行加药处理。并定期对水质做全面化验,分析和改进加药措施<sup>[5-7]</sup>。

浓缩倍数为循环冷却水的含盐浓度与补充水的含盐浓度之比。系统运行平衡时,系统排出的盐量等于进入系统的盐量,即:

$$N = \frac{C_{ri}}{C_{mi}} = \frac{Q_m}{Q_b + Q_w} = \frac{Q_b + Q_w + Q_e}{Q_b + Q_w}$$

式中: $N$ 为浓缩倍数; $C_{ri}$ 为循环冷却水含盐浓度,mg/L; $C_{mi}$ 为补充水含盐浓度,mg/L; $Q_m$ 为补充水量,m<sup>3</sup>/h; $Q_b$ 为排污水量,m<sup>3</sup>/h; $Q_w$ 为风吹损失水量,m<sup>3</sup>/h; $Q_e$ 为蒸发水量,m<sup>3</sup>/h;

若冷却水碳酸盐硬度大于极限值则会结垢,当补充水的含盐浓度不变,加大补水同时加大排污可以降低浓缩倍数同时有效控制结垢。但是不加限制地降低浓缩倍数会浪费水且不经济。所以工厂通常会根据生产负荷将浓缩倍数控制在一定值,并根据实际情况做加药处理<sup>[8]</sup>。以某厂正常生产时循环冷却水量 10 000 m<sup>3</sup>/h,分别计算在不同浓缩倍数情况下的补水量和排污量,见表 1。

表 1 不同浓缩倍数情况下的补水量和排污量

| 浓缩倍数                                   | 1.5   | 2     | 3     | 4     | 5    | 6     | 7     | 10    |
|--|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 补水量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 523.2 | 348.8 | 261.6 | 232.5 | 218  | 209.3 | 203.5 | 193.8 |
| 排污量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 343.8 | 169.4 | 82.2  | 53.1  | 38.6 | 29.9  | 24.1  | 14.4  |
| 补水量占系统循环水量比/(%)                        | 5.2   | 3.5   | 2.6   | 2.3   | 2.2  | 2.1   | 2     | 1.9   |
| 排污量占系统循环水量比/(%)                        | 3.4   | 1.7   | 0.8   | 0.5   | 0.4  | 0.3   | 0.2   | 0.1   |

由表 1 可见,补水量和排污量以浓缩倍数 3 为界,在 3 之前的范围减少趋势明显,在 3 之后的减少趋势则不明显。因此正常生产时某厂浓缩倍数取 3 最佳。但现在该厂处于停工状态系统无负荷,循环水蒸发量低,浓缩倍数无法提高,现约为 1.3 倍左右,水中钙硬度、碱度极低,造成循环水腐蚀性强。同时系统补水铁

离子含量较高,约为 0.35 mg/L,根据厂家试验分析,此情况会影响药剂性能发挥,这也是循环水处理达不到预期目的的主要原因。此外循环水通过冷却塔时,水与空气不断接触增加了溶解氧含量,间接加快了腐蚀速率。所以此方面应优化改变加药配方,找到经济可行的办法<sup>[9-11]</sup>。

表 2 水质情况计算分析

| 数据序列 | 总铁 / (mg·L <sup>-1</sup> ) | pH   | 电导率 / (μs·cm <sup>-1</sup> ) | 温度 / °C | 钙硬度 / (mg·L <sup>-1</sup> ) | 总碱度 / (mg·L <sup>-1</sup> ) | LSI   | RSI  | PSI  | 结果  |
|------|----------------------------|------|------------------------------|---------|-----------------------------|-----------------------------|-------|------|------|-----|
| 1    | 0.82                       | 7.9  | 212                          | 26      | 81.3                        | 52.3                        | -0.25 | 8.4  | 9.24 | 腐蚀型 |
| 2    | 0.94                       | 7.74 | 208                          | 26.5    | 66.1                        | 53                          | -0.48 | 8.7  | 9.38 | 腐蚀型 |
| 3    | 0.99                       | 7.86 | 206                          | 26.5    | 71.2                        | 53                          | -0.33 | 8.52 | 9.31 | 腐蚀型 |
| 4    | 1.17                       | 7.82 | 217                          | 27      | 71.2                        | 54.4                        | -0.35 | 8.52 | 9.25 | 腐蚀型 |
| 5    | 0.92                       | 7.79 | 206                          | 27      | 76.3                        | 55                          | -0.34 | 8.47 | 9.17 | 腐蚀型 |

鉴于当前情况更换原缓蚀阻垢剂(现药剂适用于低浓缩倍数、缓蚀性更强、对铁离子分散更出色),其他药剂不变。选取处理效果最稳定的水质情况计算分析,见表 2。无论是从饱和指数还是从稳定指数或者结垢指数计算,目前循环水均为腐蚀型,且腐蚀性较强。加之工厂目前处于停车状态,设备没有负荷,循环水无法浓缩,水的特性无法改变。水质的钙硬度又较低,影响药剂性能的发挥,因此,对循环水的总铁控制比较困难。后续

仍需进行加碱处理<sup>[12-14]</sup>。

## 2.2 节能与环保

循环冷却水主要能耗集中在电耗与新鲜水用量两方面,其中新鲜水水质、用量与加药运行情况又间接影响排水水质,从而影响废水处理装置功耗。冷态运行时系统无负荷浓缩倍数小,所以排污不进废水处理系统,直接外排<sup>[15-17]</sup>。在此废水处理功耗不做考虑,见表 3。

表 3 循环冷却水系统电耗

| 序号 | 设备名称  | 设备位号          | 设备型号       | 数量 / 台 | 结构型式    | 电机额定功率 / kW | 实际功率 / kW |
|----|-------|---------------|------------|--------|---------|-------------|-----------|
| 1  | 循环水泵  | P-3601A/B/C/D | 700 S-65 B | 4      | 单级双吸离心泵 | 1 000       | 931.63    |
| 2  | 循环水风机 | T-3601A/B/C/D | LF 80-400  | 4      | 冷却水塔减速机 | 132         | 0         |

循环水泵正常情况下为 3 用 1 备。当前循环水泵 2 台运行,新鲜水上水流量 50 m<sup>3</sup>/h,循环水至系统出口流量 8 643 m<sup>3</sup>/h,间歇性排污,循环水风机全部停止。所以电耗大约为 1 863.26 kW/h。每月电费支出 80 万元以上,下步可寻求低流量运行解决方案。并充分考虑低流量冷态运行方式的危害,进行材料优化及药剂防护等措施。

## 2.3 检修与维护

循环冷却水使用终端上,某厂 4 台丙烯冷凝器历史上曾拆解清洗过 2 次,均出现盘管腐蚀穿孔,丙烯制冷剂泄漏至循环水系统导致开式循环水池可燃气体报警问题。拆解后封头显微生物泥状物,换热盘管中出现铁瘤状结晶污垢,见图 2。从而引起换热效率下降造成夏季生产负荷大。2016 年 9 月生产时能清楚听见丙烯冷凝器 A 封头处有气串液气流声(生产时丙烯系统压力 1.3 MPa,循环水系统 0.6 MPa)。当时由于夏季生产负荷大,换热

不足,所以未做旁路处理。停产后建议丙烯冷凝器依次旁路清洗补漏,根治问题<sup>[18]</sup>。



图 2 冷凝器盘管附着棕红色软质沉积物

循环冷却水系统本体上,某厂现已建成 4 a,运行 3 a。其中 2015 年对循环水系统上水管线进行改造,对循环冷却塔拉筋进行加弹簧处理。现循环冷却水



统本体问题如下:

- 1) 循环水风机塔设计防腐问题。
- 2) 风筒加强筋强度不够,运行时由于风机抽风加上风机震动导致风筒变形摩擦风扇叶片。从图3 a)可以看



a) 风筒内部破损



b) 传动轴开口过小



c) 设备腐蚀



d) 内部钢结构腐蚀

图3 循环冷却水系统本体情况

针对以上循环冷却水系统本体问题,提出建议:

- 1) 对T型钢梁刷防水涂料,对管状钢材刷防锈漆后缠绕胶状防腐材料,再涂沥青<sup>[19]</sup>。若资金充足,可对钢架结构进行防腐处理或者改为水泥塔。钢架结构需定期维护(钢架结构一般用于4 m以下塔,4 m以上建议用水泥塔。其他用户曾经发生过钢结构塔腐蚀崩塌事故)。
- 2) 整体更换风筒。
- 3) 加带弹簧花篮螺丝,便于吸收震动,调整应力大小。
- 4) 风机电机油标处划线,润滑油1.5~2a更换一次。

出已有应力损伤,已对多处进行修补。

- 3) 传动轴口过小,有摩擦现象,见图3 b)。
- 4) 风筒内检修扶梯需防腐处理,否则会有安全隐患,见图3 c)、图3 d)。

- 5) 将钢结构支架更换成镀锌管。
- 6) 为检修安全和施工方便,风筒内检修扶梯做防腐处理。
- 7) 与设计方沟通循环水风机塔设计问题。
- 8) 开大传动轴口。

### 3 方案与分析

低流量冷态运行危害性分析见表4,在充分考虑低流量运行危害性及方案经济性前提下制定停产状态下冷态运行方案。

表4 低流量冷态运行危害性分析

| 项目     | 分析   | 备注                    |
|--------|--|-----------------------|
| 冷却塔部位  | 冷却塔进水流量减小或为零,淋水冲洗减弱,淋水滤网构件上微生物沉积量增加,加上本身尺寸结构等因素,外围挡风墙、立柱等部位受阳光照射的时间也比较长,因此青苔在淋水构件上的停留时间长,同时由于流量小立柱、挡风墙上的杀菌灭藻剂等药剂淋湿量减少,所以微生物滋生的条件更好,沉积在冷却塔和循环水管道内的杂物随之增加。   | 根据情况在停产状态下可考虑更换淋水滤网构件 |
| 系统设备内部 | 低流量导致以碳钢材质为主的系统管道及换热设备管程产生胶体状氢氧化物和铁氧化物的水合物腐蚀物并和有机物、泥沙、微生物混合沉积形成污垢,其中夏季循环水温度达25℃时容易造成细菌腐蚀   | 应考虑冬夏季水温变化            |
| 腐蚀机理   | 氧的去极化作用是碳钢腐蚀要因。当水在管内流动时,接近管壁处存在一滞流边界层,氧欲扩散到金属表面必须克服这一滞流边界层所造成的阻力,边界层愈厚,氧的扩散愈慢。因此,水流速大,有利于氧扩散,所以碳钢的腐蚀速度随着水流速度的升高而加大。但流速较大时,可冲去金属表面沉积垢,而氧向金属表面扩散的量增加,导致腐蚀加速 <sup>[20-22]</sup> 。水流速度进一步的升高,金属表面提供的氧足以使金属表面形成氧化膜,腐蚀速度降低。如果流速继续增加,则会破坏氧化膜,再次增大腐蚀速度,当水流速度很高时,还会产生气蚀。所以,流速选择,不能只从腐蚀角度出发,还要考虑到传热要求,水流速度过低,传热效果会降低 | 冷却水流速一般在1 m/s最合适      |

最终方案为,在操作上大体维持现有运行模式,但只运行1台循环水泵,循环水的流量只有设计值的1/3,管网流速度大大降低。原有加药方式不能保证系统缓蚀及微生物的滋生,因此投加一定量金属水基防锈剂并加大杀菌剥离剂的用量,确保系统安全。

#### 3.1 药剂投加浓度

金属水基防锈剂0.5 kg/m<sup>3</sup>(以总水量计),剥离剂

0.2 kg/m<sup>3</sup>。

#### 3.2 药剂投加量核算

首次运行金属水基防锈剂和杀菌灭藻剂为全量投加,在以后的运行中每周补充投加金属水基防锈剂一次,其他的日常维护药剂正常投加。

为了节省药剂的投加量,投加药剂前将系统的保有水量排至低安全水位。按照最低水量3 500 t左右计算,

金属水基防锈剂的每次投加量为 1.75 t,剥离剂 0.7 t。每月的药剂投加量:金属水基防锈剂 7 t,剥离剂 1 t。

### 3.3 经济性分析

药剂的总费用:金属水基防锈剂  $7 \times 1.2 = 8.4$  万元,剥离剂  $1 \times 1.2 = 1.07$  万元,合计费用 9.47 万元。

目前运行状态下的水电费支出(以月核算):电费 80 万元,水费(取水及排污)约 20 万元,共计 100 万元。

低流量运行方式的费用支出(以月核算):电费 40 万元,水费(取水及排污)约 10 万元,共计 50 万元。

增加的药剂费用 9.6 万元,每月节约的费用为 40 万元。

以上方案运行一个月后,各项水质指标稳定达到冷态运行情况控制界限,节电、节水,经济效益和社会环保效应明显。

## 4 结论与建议

浓缩倍数是水质处理的关键因素,循环水冷态运行时浓缩倍数会发生较大变化。高浓缩倍数状态时,药剂在水中的停留时间会更长,应选用稳定性优良,不易分解的药剂。若浓缩倍数发生大幅降低则必须调整相应药剂。而相应循环水冷态运行方案的制定也应充分考虑腐蚀与节能、检修与经济等复合问题,达到环保与经济共赢。

在药剂调整方面,除了改变配方,调整药剂种类外,应充分利用 pH 值调节辅助优化水质节约成本。系统运行时的 pH 值范围  $\Delta\text{pH}$ ,是由腐蚀所允许的最低 pH 值至结垢所允许的最高 pH 值来确定,循环水的浓缩倍数越低, $\Delta\text{pH}$  范围越宽,可调区间越大,反之  $\Delta\text{pH}$  范围越窄。所以在低浓缩倍数时可以根据工厂自身情况,在药剂经济性最大的条件下进行大规模加酸或加碱处理而减少缓蚀阻垢剂的用量。甚至可以通过各种方案复合使用达到零排污的目的。

针对 LNG 工厂情况和研究方案运用成效建议如下:

1) 科学建立冷态运行工艺、药剂、设备综合保障体系,达到腐蚀结垢程度、药剂成本与设备功耗的最优化配比。

2) 针对不同停产时间制定相应冷态运行计划。可根据现场实际进行部分循环水管线及设备的旁路放空并充氮气防腐。

3) 合理优选针对冷态运行情况下的药剂,并动态调整。

4) 制定合理的冷态运行人力资源巡检加药制度,节约成本。

参考文献:

- [1] 杨 焯,冯文斌,杨 远. LNG 工厂循环冷却水系统清洗预膜工艺探讨[J]. 炼油与化工,2016,27(6):23-25.  
Yang Ye, Feng Wenbin, Yang Yuan. Research on Cleaning Pre-Membrane of Circulating Cooling Water System in LNG Plant [J]. Refining and Chemical Industry, 2016, 27 (6): 23-25.
- [2] 杨 焯,何 骁. LNG 工厂停产状态下循环冷却水腐蚀性研究[J]. 石油与天然气化工,2016,45(1):102-106.  
Yang Ye, He Xiao. Study on the Corrosivity of the Recirculating Cooling Water During Shutdown in LNG Plant [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2016, 45 (1): 102-106.
- [3] 李 璐. 间冷开式循环冷却水系统节水分析及设计探讨[J]. 工业用水与废水,2015,46(4):52-55.  
Li Lu. Discussion on Water Saving Measures and Design for Indirect Open Circulating Cooling Water System [J]. Industrial Water and Wastewater, 2015, 46 (4): 52-55.
- [4] 刘 芳,张桂芝,夏 璐,等. 操作条件对循环冷却水系统腐蚀和结垢的影响[J]. 化工进展,2010,29(4):772-777.  
Liu Fang, Zhang Guizhi, Xia Lu, et al. Effects of Operating Conditions on Corrosion and Fouling in Circulating Cooling Water System [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, 29 (4): 772-777.
- [5] 肖兴成,常春芝,姬雅红. 污水回用作循环冷却水的缓蚀阻垢剂筛选[J]. 工业水处理,2002,22(4):45-48.  
Xiao Xingcheng, Chang Chunzhi, Ji Yahong. Study of the Complex Scale and Corrosion Inhibitor for Effluent Reused as Circulating Cooling Water [J]. Industrial Water Treatment, 2002, 22 (4): 45-48.
- [6] 赵 琼. 循环冷却水系统腐蚀情况分析及其药剂控制方法[J]. 天然气与石油,2010,28(2):49-50.  
Zhao Qiong. Analysis on Corrosion Conditions in Recycled Cooling Water System and Chemical Control Method [J]. Natural Gas and Oil, 2010, 28 (2): 49-50.
- [7] 陈 姣,魏素一. 工业循环水系统设计探讨[J]. 给水排水,2014,9(6):223-227.  
Chen Jiao, Wei Suyi. Design of Industrial Circulating Water System [J]. Water Supply and Drainage, 2014, 9 (6): 223-227.
- [8] 王勤娜,施宝昌,王 浩,等. 工业循环冷却水缓蚀阻垢剂的发展状况[J]. 化工进展,2001,20(5):26-28.  
Wang Qinna, Shi Baochang, Wang Hao, et al. Development of Scale and Corrosion Inhibitor for Industrial Cyclic Cooling Water [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2001, 20 (5): 26-28.

- [9] 陈爱民,李光海,杨清华,等. 循环冷却水零排污运行方案的研究[J]. 工业水处理,2002,22(4):14-16.  
Chen Aimin, Li Guanghai, Yang Qinghua, et al. Study on Zero Drainage Plan of Circulating Cooling Water System [J]. Industrial Water Treatment, 2002, 22 (4): 14-16.
- [10] 梁昌峰,刘芳,王飞扬,等. 残余水处理药剂对循环水排水处理中混凝的影响[J]. 工业水处理,2013,33(9):76-77.  
Liang Changfeng, Liu Fang, Wang Feiyang, et al. Effect of Residual Water Treatment Chemicals on the Coagulation in the Treatment of Blow-Down Water from Circulating Water System [J]. Industrial Water Treatment, 2013, 33 (9): 76-77.
- [11] 高强,赵阳. 工业循环冷却水腐蚀速率模型的研究[J]. 工业水处理,2015,9(6):129-134.  
Gao Qiang, Zhao Yang. Study on the Corrosion Rate Model Applied to Industrial Circulating Cooling Water [J]. Industrial Water Treatment, 2015, 9 (6): 129-134.
- [12] 张艳兵. 电厂循环水处理药剂的应用[J]. 科技视界,2014,(36):324-324.  
Zhang Yanbing. Application of Circulating Water Treatment Agent in Power Plant [J]. Science and Technology Vision, 2014, (36): 324-324.
- [13] 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.
- [14] 刘建朝,莘仲明. 浓缩型循环水药剂的试验研究[J]. 聚氯乙烯,2016,44(1):39-41.  
Liu Jianzhao, Xin Zhongming. Experimental Study on Concentrated Reagents for Circulating Water [J]. Polyvinyl Chloride, 2016, 44 (1): 39-41.
- [15] 王军,岑永虎,张有军,等. 重庆天然气净化总厂引进分厂污水处理装置优化运行探讨[J]. 石油与天然气化工,2010,39(5):459-461.  
Wang Jun, Cen Yonghu, Zhang Youjun, et al. Optimal Operation Discussion of the Sewage Treatment Device in Yinjin Branch Plant [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2010, 39 (5): 459-461.
- [16] 黄碧洋,任挺,文霞. 净化厂污水处理装置技术改造及中水回用效果分析[J]. 石油与天然气化工,2007,36(6):516-523.  
Huang Biyang, Ren Ting, Wen Xia. Technological Innovations of Sewage Treatment in Natural Gas Purification Plant and Its Effect on the Reclaimed Water [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2007, 36 (6): 516-523.
- [17] 黄晓东,黄斌. 萃取法处理油田含油污水[J]. 石油与天然气化工,1995,24(4):289-291.  
Huang Xiaodong, Huang Bin. Treatment of Oily Wastewater in Oil Field by Extraction Method [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 1995, 24 (4): 289-291.
- [18] 林景宏. 丙烯冷凝器内部列管失效原因分析[J]. 化工设备与管道,2004,41(5):15-16.  
Lin Jinghong. Analysis on Failure of Tubes in Propylene Condenser [J]. Process Equipment & Piping, 2004, 41 (5): 15-16.
- [19] 李明明. 制盐企业锅炉钢架腐蚀机理与对策[J]. 盐业与化工,2014,43(10):34-36.  
Li Mingming. Corrosion Mechanism and Countermeasures of Boiler Steel Frame in Salt Industry [J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 2014, 43 (10): 34-36.
- [20] 陈惠玲,李晓娟,魏雨. 碳钢在含氯离子环境中腐蚀机理的研究[J]. 腐蚀与防护,2007,28(1):17-19.  
Chen Huiling, Li Xiaojuan, Wei Yu. Corrosion Mechanism of Carbon Steel in Chloride Solution [J]. Corrosion & Protection, 2007, 28 (1): 17-19.
- [21] 孙彩霞,陈燕敏,张敏,等. 杀菌灭藻剂复配工艺研究[J]. 工业水处理,2012,32(12):69-71.  
Sun Caixia, Chen Yanmin, Zhang Min, et al. Study on the Combination Process of Bactericide and Algae Removal [J]. Industrial Water Treatment, 2012, 32 (12): 69-71.
- [22] 文明通,邵丽文,陈伟国. 含TCMTB杀菌灭藻剂的研究与应用[J]. 工业水处理,2008,28(12):33-35.  
Wen Mingtong, Shao Liwen, Chen Weiguo. Research and Application of Bactericidal Biocide Containing TCMTB [J]. Industrial Water Treatment, 2008, 28 (12): 33-35.