

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.18.023

# 南通经济技术开发区中水回用工程工艺分析及改进

任书魁

(中国轻工业长沙工程有限公司, 湖南 长沙 410114)

**摘 要:** 南通经济技术开发区中水回用工程以江苏王子制浆有限公司南通工厂处理后的尾水作为原水,采用气浮、臭氧-活性炭、锰砂滤池、电吸附(ES)、超滤(UF)、反渗透(RO)、电渗析(ED)、蒸发结晶等组合工艺流程,实现了纸浆造纸废水的零排放,出水各项指标均远优于《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)的相关要求。针对运行过程中发现的澄清池污泥回流堵塞等问题,采用增设环形排泥管等技术措施加以解决。该工程总投资为 5.48 亿元,与排海管道工程相比,节省 1/2 建设资金,运行费用降低 30%。经估算,该工程建成运行后,可节约用水约  $1\,500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ,经济效益、社会效益显著。

**关键词:** 污(废)水回用; 臭氧活性炭生物滤池; 膜集成系统; 蒸发结晶

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)18-0122-05

## Analysis and Improvement of Reclaimed Water Reuse Process in Nantong Economic and Technological Development Zone

REN Shu-kui

(China Light Industry Changsha Engineering Co. Ltd., Changsha 410114, China)

**Abstract:** The reclaimed water reuse project in Nantong Economic and Technological Development Zone takes the tail water treated by Nantong Plant of Jiangsu Prince Pulp Co., Ltd. as raw water. It adopts the combined process of air flotation, ozone-activated carbon, manganese sand filter, electrosorption (ES), ultrafiltration (UF), reverse osmosis (RO), eletrodialysis (ED), and evaporative crystallization, to achieve zero discharge of pulp and paper wastewater. The indexes of effluent quality are far superior to the relevant requirements of *The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Industrial Uses* (GB/T 19923-2005). In order to solve the problems found in operation such as blockage of sludge return gap in clarifier, the technical measures such as adding annular sludge discharge pipe are adopted. The total investment of the project is 548 million yuan. Compared with the pipeline project discharged to the sea, the construction fund is saved by half and the operation cost is reduced by 30%. After completion and operation, the project can save about 15 million  $\text{m}^3/\text{a}$  of water, with remarkable economic and social benefits.

**Key words:** wastewater reuse; ozone activated carbon biofilter; integrated membrane system; evaporative crystallization

制浆造纸企业历来是水资源消耗大户,同时制浆造纸废水也是我国主要的工业污染源之一。如何依据我国造纸废水处理现状,实现制浆造纸清洁化

成为亟需解决的问题<sup>[1]</sup>。目前,国际上尚无大规模的造纸尾水零排放成套处理工艺,因此,研究利用造纸企业废水处理厂尾水作为原水,处理后出水水质

能够满足工业企业生产用水水质要求的大规模中水回用零排放成套处理工艺,对于我国长江流域制浆造纸公司和其他水资源匮乏区域企业尾水循环使用具有示范效应,对推进节能减排、开展循环经济、高标准维护生态环境、节约水资源、改善人居环境具有重要现实意义<sup>[2]</sup>。

1 设计进、出水水质及工艺流程

南通经济技术开发区中水回用工程所处理的废水主要来自制浆造纸企业污水处理厂排放的达标尾水,设计处理制浆尾水约  $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。制浆尾水经该工程深度处理后供园区内企业再利用,实现制浆尾水的零排放<sup>[3]</sup>。

制浆造纸废水的 SS、COD 浓度较高,COD 则由非溶解性 COD 和溶解性 COD 两部分组成,通常非溶解性 COD 占 COD 组成总量的大部分,当废水中 SS 被去除时,绝大部分非溶解性 COD 同时被去除。因此,造纸废水处理要解决的主要问题是去除 SS 和 COD。

中水回用工程设计进、出水水质主要指标如表 1 所示。

表 1 中水回用工程设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality of the reclamation project

项目	进水 (原水)	出水 (中水)	《城市污水再生利用 工业用水水质》 (GB/T 19923—2005)工艺与 产品用水标准
pH 值	6~9	6.5~8.5	6.5~8.5
SS/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	30	1	30
浊度/NTU	5	5	5
色度/度	50	7.67	30
BOD <sub>5</sub> /( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	20	8	10
COD/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	90	42	60
氯离子/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	797	217	250
总硬度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	450	65	450
硫酸盐/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	682	215	250
氨氮/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	8	8	10
总磷/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	0.8	0.8	1
石油类/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	1	1	1
溶解性总固体/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	2 684	658	1 000
粪大肠菌群/ (个 $\cdot \text{L}^{-1}$ )	$\leq 2\,000$	20	2 000

工艺流程见图 1。

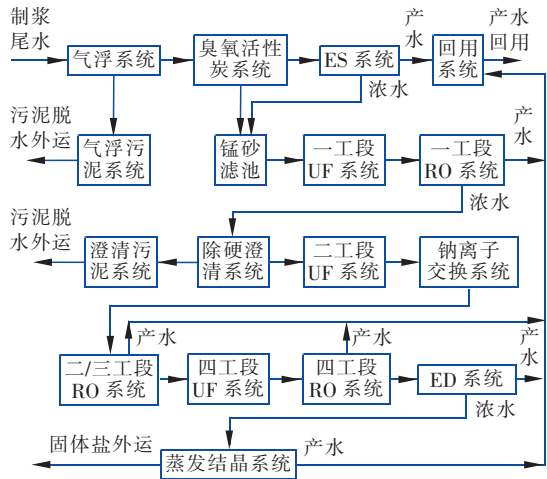


图 1 中水回用工艺流程

Fig. 1 Flow chart of reclamation treatment process

2 主要处理工段及设计参数

2.1 预处理工段

① 超效浅层气浮系统

均质池出水通过泵提升至超效浅层气浮系统。根据多个实际工程运行经验,化学浆中段废水经过二级处理后 COD 一般为 150~250 mg/L,采用超效浅层气浮处理后,COD 明显下降。

主要设备及技术参数:钢制浅层气浮池 3 座,设计内径 12 m,池深 1.1 m(水深 0.8 m),水力停留时间 6~8 min,水力表面负荷  $5 \sim 6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,回流比 30%,单台处理水量  $500 \text{ m}^3/\text{h}$ ;空压机 2 台, $Q = 1.2 \text{ m}^3/\text{min}$ ,压缩空气控制压力 0.65 MPa(表压),空气量和循环水量之比 1:6;溶气罐 3 台,尺寸  $\varnothing 480 \text{ mm} \times 2\,000 \text{ mm}$ ;高效微气泡释放装置,内置式;PAC 加药泵及 PAM 加药泵若干台,PAC 和 PAM 的用量分别为 200~400 mg/L 和 10~15 mg/L。采用浅层气浮工艺可将 COD 从 90 mg/L 降到 60 mg/L 以下。

② 臭氧-生物活性炭系统

臭氧-生物活性炭系统是将活性炭物理化学吸附、臭氧化学氧化、生物氧化降解及臭氧除臭等四种技术合为一体的工艺<sup>[4]</sup>。调试阶段出水 COD 为 45~50 mg/L。剩余的臭氧经过收集后统一由臭氧破坏装置处理,防止污染大气。主要设备及技术参数:臭氧接触池为地上式钢筋混凝土防腐结构,2 座,宽 6 m,长 24 m,水深 4.5 m;臭氧发生器 3 台, $Q = 25 \text{ kg/h}$ ,臭氧浓度 25 mg/L。另有 2 座臭氧缓

冲池,宽8 m,长24 m,设计水量41 475 m<sup>3</sup>/d。活性炭滤池为地上式钢筋混凝土防腐结构,2座,宽7 m,长24 m,水深4.0 m。臭氧接触池的臭氧投加量为2 mg/L,接触时间为30 min。活性炭滤池采用恒水位过滤、穿孔滤板小阻力配水系统,布水布气专用滤头。活性炭滤料采用比表面积>700 m<sup>2</sup>/g的颗粒活性炭,滤料层厚2.5 m。正常滤速为3.8 m/h,强制滤速为5.1 m/h。反洗系统由时间设定、液位控制开启,反冲洗周期12~24 h,采用两段式气、水联合反冲洗,气洗强度12~14 L/(m<sup>2</sup>·s),历时3 min,水洗强度6~8 L/(m<sup>2</sup>·s),历时6 min。

### ③ 除硬澄清系统

机械加速澄清池将混合、絮凝反应及沉淀工艺综合在一起,共2座,采用钢筋混凝土结构,半地下式,单座直径16 m、高7 m、底标高-2.0 m、有效容积1 000 m<sup>3</sup>。在澄清池入口处投加NaOH,在反应中心筒内投加混凝剂PAC 30 mg/L、助凝剂0.6 mg/L。pH值控制在8.2~9.2,NaOH、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>与废水中的Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>在澄清池的反应混合区域内发生化学反应,生成难溶性的沉淀物,沉淀物随刮泥机刮至泥斗内,用污泥泵送至污泥处理系统,清水区出水经过滤后进入二工段UF进水池。

### ④ 污泥处理系统

设污泥浓缩池2座,钢筋混凝土结构,直径16 m(池边水深3 m)。浓缩后的污泥与脱水剂、助凝剂混合后送到离心脱水机进行脱水。离心脱水机单台处理能力15~40 m<sup>3</sup>/h,脱水后污泥含水率<80%,单台处理能力为10 tDS/d。脱水后的污泥外运,作为固废填埋处理。

## 2.2 膜集成系统工段

膜集成系统采用电吸附(ES)、超滤(UF)、反渗透(RO)以及电渗析(ED)技术对经过预处理后的含盐废水进行处理<sup>[5]</sup>,获得达标回用水,剩余的高浓盐水进入蒸发结晶车间进一步处理。

### ① ES系统

臭氧生物活性炭系统部分出水由泵提升进入保安过滤器,去除部分杂质进一步降低进水浊度及悬浮物后自流入ES模块,在ES模块工作过程中完成离子的去除。ES模块处理水量417 m<sup>3</sup>/h,功率750 kW。ES模块产水至回用水池与RO产水混合后回用。在再生过程完成模块内离子的转移,产生浓水,同时模块得到再生。

### ② UF系统

废水通过UF进水泵先进入自清洗过滤器以进一步去除悬浮物、胶体等,保证后续膜处理系统稳定运行,然后输送至UF系统,去除大部分悬浮物<sup>[6]</sup>,达到进入RO系统的水质要求。设备材质及技术参数:一工段UF采用外压式中空纤维膜,PVDF材质,单套处理量120 m<sup>3</sup>/h,出水进入一工段RO进水池,反洗水排放至均质池。二工段UF采用外压式中空纤维膜,PVDF材质,单套处理量160 m<sup>3</sup>/h,浓水回流至机械搅拌澄清池,产水通过二工段RO系统处理后达标排入回用水池。四工段UF采用外压式中空纤维膜,PVDF材质,单套处理量60 m<sup>3</sup>/h,系统反洗水排放至机械搅拌澄清池,产水通过四工段RO系统处理后达标排入回用水池。

### ③ RO系统

RO系统采用一级四段,各工段膜组膜壳材质均为玻璃钢。一工段RO有机膜1 440支,每套进水量为417 m<sup>3</sup>/h,回收率为50%;二工段RO有机膜936支,每套进水量为208 m<sup>3</sup>/h,回收率为60%;三工段RO有机膜288支,每套进水量为84 m<sup>3</sup>/h,回收率为60%;四工段RO有机膜240支,每套进水量为42 m<sup>3</sup>/h,回收率为40%。最终的浓水送入ED系统进一步浓缩。

### ④ ED系统

废水经提升进入保安过滤器处理后进入ED系统。控制ED淡水无机盐浓度<3 000 mg/L,进入回用系统。ED淡水的COD约1 000 mg/L。控制ED浓水无机盐浓度约12%,ED浓水的COD低,基本不含大分子有机物,可避免有机物带入蒸发系统导致无机盐无法结晶。

## 2.3 蒸发结晶工段

采用机械热压缩蒸发工艺对含盐水进行蒸发,得到的冷凝水经适当处理后可作为工业循环水回用,结晶盐经固液分离及干燥包装形成产品外售。蒸发结晶系统单套处理量为1 000 m<sup>3</sup>/d,装机功率2 500 kW,运行功率1 700 kW。根据计算,蒸发处理41.7 t/h含盐水,可获得蒸发冷凝水约35.6 t/h,分离出结晶盐约3.8 t/h,为保证结晶盐的组分稳定以及蒸发冷凝水的品质,排放约2 t/h富集其他元素的母液返回前处理工段。

## 3 调试运行分析

该工程于2014年8月进入主要调试阶段,选取



2015 年 1 月—5 月期间各月进、出水 COD、浊度、总硬度的平均值进行数据分析,结果见表 2。

表 2 调试阶段主要进、出水水质

Tab. 2 Main water quality indexes of influent and effluent during commissioning

月份	COD/(mg · L <sup>-1</sup> )		浊度/NTU		硬度/(mg · L <sup>-1</sup> )	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水
1	79.5	0.6	0.95	0.09	346	3.3
2	56.5	0.4	0.86	0.10	316	3.3
3	56.0	0.4	0.76	0.11	274	3.0
4	113.3	1.0	1.36	0.21	569	4.3
5	26.8	1.4	1.34	0.19	220	4.3

由表 2 可知,该工程对 COD 的去除率达到 94% 以上,最高甚至达到 99.24%,具有良好的 COD 去除效果;对浊度的去除率达到 84.5% 以上,最高达到 90.52%,且出水浊度满足再生水作为工业用水的水质要求;对硬度的去除率达到 98% 以上,最高达到 99.04%,且出水总硬度远小于 450 mg/L 的指标要求。

统计数据表明,虽然调试期进水水质不是很稳定,波动较大,但出水水质全部满足且优于《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)的相关要求,充分证明了该处理工艺的优越性。

#### 4 运行中发现的问题及改进措施

##### 4.1 气浮处理效率不高

通过对调试阶段数据的统计分析,发现当来水水质较好时,气浮单元的处理效率并不高。主要原因是造纸厂内部污水处理厂已对废水进行了气浮处理,因此尾水中能够通过气浮去除的污染物并不多。

改进措施:视来水水质情况停/启用气浮处理单元。在今后类似的中水回用项目中,如果前端二级污水处理厂已经含有气浮处理单元,可以视来水水质情况取消后续的气浮单元。

##### 4.2 机械加速澄清池污泥堆积

观察调试期机械加速澄清池的运行情况,发现污泥回流缝容易堵塞,造成池内污泥堆积,无法外排,导致出水浊度偏高,影响了出水水质。

具体原因分析如下:

① 回流的泥渣通过狭窄的回流缝后,夹带泥渣的水流速度降低,泥渣析出沉降,且碳酸钙化学污泥比较黏稠,容易附着在池壁上,不易下滑至污泥斗,所以泥渣易在回流缝的近处滞留。从分离室析出回流的泥渣与进水中的泥渣接触,加之进水中混

凝剂的作用,絮凝效果增强,在进入第一反应室时与早已在回流缝近处滞留的泥渣接触黏附,于是泥渣在此处的滞留量增大,这部分泥渣若不及时排出,势必变成逐渐失去活性的重质泥渣。

② 污泥斗排泥量不足。以 120°等距布置在澄清池锥体部位的 3 个污泥斗,其接纳过剩的泥渣量较少,而在距污泥斗较远区间,从分离室沉降下来的大量泥渣,又不在污泥斗的排泥作用范围内,因而便黏滞在距污泥斗较远处的环状回流缝附近,较难及时排出。由于存在排泥分布的不均匀性,将最终导致离污泥斗较远的回流缝底面首先开始积泥,随之积泥层变厚,积泥带加宽和延伸,继而蔓延成整个回流缝的淤塞。一旦回流缝被淤塞,从分离室下沉的泥渣就不断地在伞形罩与澄清池的 45°锥壁之间沉积,池底放空管虽可定期地排除池底中心部位的泥渣,然而环状回流缝附近的泥渣又远离它的作用范围,造成池底积泥增多。沉积的泥渣被压实老化,无法在运行中排出,由于先期析出的泥渣停止了循环,澄清池的沉淀工作方式被迫改变,这些泥渣因不能与进水中的泥渣混合接触,沉淀作用显著减弱,导致出水逐渐浑浊,直至设备失去净水作用。

③ 运行管理中存在不规范,没有按要求连续运行和及时排出池底积泥,导致污泥被压实老化和板结,回流缝堵塞。

改进措施:

① 在池壁采用内衬光滑材料,使沉淀碳酸钙污泥不易附着在池壁上,顺利滑落至池底污泥斗。

② 在回流缝附近设置环形穿孔排泥管,并使其具有反冲洗功能,使原来设置的污泥斗及中心放空管所不能排出的这部分泥渣,能从穿孔管排出;当污泥附着在池壁上难以排出时,采用气水反冲洗扰动污泥,使其从池壁上脱落,从而顺利排出池外。穿孔管与回流缝的距离应该适中。穿孔管要设在易于最先开始积泥的回流缝附近处,而泥渣回流缝的过流面积又不能因环形穿孔管在其近处而变得窄小,最易在回流缝附近处沉积的泥渣应该在穿孔管排泥作用的最佳范围内。

③ 加强日常运行维护管理,及时排出积泥,防止积泥沉积板结<sup>[7]</sup>。

#### 5 技术经济分析

该中水回用工程处理产能为  $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  制浆合格水,总投资 5.48 亿元,于 2013 年末建成并投入

运行。与排海管道工程相比,该工程建设资金节约1/2,运行费用降低30%。目前中水回用处理运行成本约5元/m<sup>3</sup>,中水售价为2元/m<sup>3</sup>,实际运行成本为3元/m<sup>3</sup>,处于合理可控区间。实际运行情况良好,中水首要水质目标如COD、浊度、硬度、pH值等均优于长江水。实际回用水量约 $3.9 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,回用率达到98%,供帝人公司、江山农化、东丽等园区内公司作为工艺用水、锅炉补充水、循环冷却水使用,满足用户生产需要。此外,浓缩并通过蒸发结晶后生产的工业盐产量为3.8 t/h,可作为印染、建材等多个行业的质料再使用,具有一定的经济价值。

## 6 结论

该中水回用工程的预处理工段采用臭氧+生物活性炭滤池等工艺,可有效去除大量COD、SS、胶体物质、钙镁离子等,保障了后续膜集成系统的水回收率较高、运行费用最低、膜使用寿命最佳;膜集成系统采用ES+双膜+ED的技术,满足了出水水质混配要求,降低了蒸发水量;高效蒸发结晶系统进行高浓盐水的固液分离,实现了污染物零排放。对在运行过程中发现的问题通过调试和整改能够得以完善。总的来说,该工艺是一套处理效果较好、比较先进的造纸尾水处理回用工艺,出水各项指标均优于《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)的相关要求。经估算,该工程建成运行后,可节约用水约 $1\,500 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/a,社会效益、环境效益显著。

## 参考文献:

- [1] 陈得重. 制浆造纸废水处理的发展现状及趋势[J]. 云南化工, 2018, 45(3): 177-178.  
CHEN Dezhong. Development status and trend of pulping and papermaking wastewater treatment [J]. Yunnan Chemical Industry, 2018, 45(3): 177-178 (in Chinese).
- [2] 刘鹏飞. 废纸制浆造纸废水处理工艺设计实践与思考[J]. 中国造纸, 2010, 29(7): 44-49.  
LIU Pengfei. Experience of the wastewater treatment in a recycled paper mill [J]. China Pulp & Paper, 2010, 29(7): 44-49 (in Chinese).
- [3] 钱世通, 黄胜炎. 废纸制浆造纸废水封闭循环处理工艺[J]. 中国环保产业, 2006(11): 31-33.  
QIAN Shitong, HUANG Shengyan. A closed loop process of pulp and paper making from waste paper [J]. China Environmental Protection Industry, 2006(11): 31-33 (in Chinese).
- [4] 潘碌亭, 余波, 吴锦峰. 铁炭微电解—厌氧—好氧工艺处理制浆造纸废水[J]. 工业水处理, 2010, 30(9): 43-45.  
PAN Luting, YU Bo, WU Jinfeng. Research on the treatment of paper pulping and making wastewater by ferric-carbon micro-electrolysis - anaerobic - aerobic process [J]. Industrial Water Treatment, 2010, 30(9): 43-45 (in Chinese).
- [5] 高聪, 姚双全, 袁月, 等. 浅析膜分离制浆造纸废水深度处理工艺[J]. 造纸科学与技术, 2016, 35(2): 84-89.  
GAO Cong, YAO Shuangquan, YUAN Yue, et al. A review of membrane separation in pulping and papermaking wastewater advanced treatment [J]. Paper Science & Technology, 2016, 35(2): 84-89 (in Chinese).
- [6] 刘前军, 周胜昔. 超滤膜组合工艺在大型净水厂扩建工程中的应用[J]. 中国给水排水, 2017, 33(8): 65-68.  
LIU Qianjun, ZHOU Shengxi. Application of the combined UF membrane units in large-scale waterworks extension project [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(8): 65-68 (in Chinese).
- [7] 郑艳珍. 机械加速澄清池的改造[J]. 供水技术, 2010, 4(1): 28-29.  
ZHENG Yanzhen. Renovation of mechanical accelerated clarification tank in waterworks [J]. Water Technology, 2010, 4(1): 28-29 (in Chinese).

**作者简介:**任书魁(1983—),男,安徽枞阳人,硕士,高级工程师,主要从事工业废水、市政污水处理设计及施工管理工作。

**E-mail:**1192790199@qq.com

**收稿日期:**2020-03-10

**修回日期:**2021-02-25

(编辑:衣春敏)