

# MAP-铁碳芬顿-A<sup>2</sup>/O组合工艺处理高氨氮制药废水

雷 颖<sup>1</sup>, 方红莲<sup>1</sup>, 郭 勤<sup>2</sup>, 陈春丽<sup>3</sup>

(1. 南昌理工学院 新能源与环境工程学院, 江西 南昌 330044; 2. 江西省交通设计研究院  
有限责任公司, 江西 南昌 330052; 3. 南昌大学资源环境与化工学院 鄱阳湖环境与资源  
利用教育部重点实验室, 江西 南昌 330047)

**摘 要:** 江西某制药厂将废水分成高浓度生产废水和生活污水两类,分质收集并进行预处理。高浓度生产废水采用鸟粪石(MAP)化学沉淀-铁碳芬顿组合工艺预处理,之后与生活污水混合进入生化段,生化段采用A<sup>2</sup>/O+BAF组合工艺。运行结果表明,该组合工艺对高氨氮制药废水降解性能良好,最终出水COD与NH<sub>3</sub>-N浓度分别为103.5、22.5 mg/L,对COD和NH<sub>3</sub>-N去除率分别达到95.2%和91.6%;出水各项指标均可达到《化学合成类制药工业水污染物排放标准》(GB 21904—2008)。该系统运行稳定,耐冲击负荷能力较强,具有处理效果良好、处理成本较低等优势。

**关键词:** 高氨氮废水; 鸟粪石; 高级氧化; 生物脱氮

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)18-0088-06

## Application of MAP-Fe/C-Fenton-A<sup>2</sup>/O Process to Treat Pharmaceutical Wastewater Containing High Concentration of Ammonia Nitrogen

LEI Jie<sup>1</sup>, FANG Hong-lian<sup>1</sup>, GUO Qin<sup>2</sup>, CHEN Chun-li<sup>3</sup>

(1. School of New Energy and Environmental Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330044, China; 2. Communications Design & Research Institute Co. Ltd. of Jiangxi Province, Nanchang 330052, China; 3. Education Department Key Lab of Environment and Resources Utilization of Poyang Lake, School of Resources Environmental & Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

**Abstract:** The wastewater of a pharmaceutical company in Jiangxi Province was collected separately as high concentration production wastewater and domestic wastewater. The high concentration organic wastewater was pretreated with MAP-Fe/C-Fenton oxidation process and then mixed with domestic wastewater into the biological treatment section. The combined process of A<sup>2</sup>/O-BAF was adopted in the biological treatment section. The operation results showed that the process had good treatment effect for high-ammonia nitrogen pharmaceutical wastewater. The final effluent concentrations of COD and NH<sub>3</sub>-N were 103.5 mg/L and 22.5 mg/L, with the removal rates of 95.2% and 91.6% respectively. All the effluent indicators could meet the requirements specified in the *Discharge Standards of Water Pollutants for Pharmaceutical Industry Chemical Synthesis Products Category* (GB 21904-2008). The system had the advantages such as stable operation and treatment, strong impact load

resistance, good treatment effect and low treatment cost.

**Key words:** high concentration ammonia nitrogen wastewater; MAP; advanced oxidation; biological nitrogen removal

江西某制药厂面临搬迁,需新建一套废水处理设施,使处理后水质达到《化学合成类制药工业水污染物排放标准》(GB 21904—2008)表 2 限值的要求。基于当前企业生产原材料、工艺和废水水质情况,决定采用鸟粪石(MAP)-铁碳芬顿-A<sup>2</sup>/O 组合工艺对废水进行深度处理,保证出水水质达标后直接就近排入受纳水体<sup>[1-4]</sup>。

1 废水水质与水量

该厂在以化工合成法生产头孢类中间体过程中,产生了高浓度生产废水及生活污水,废水总量为 200 m<sup>3</sup>/d。其中高浓度生产废水主要来源于结晶母液、洗料清洗用水和设备冲洗用水等,平均产生量约 120 m<sup>3</sup>/d,COD>5 000 mg/L,含有不少难生物降解物质,B/C 值只有 0.24,可生化性较差,NH<sub>3</sub>-N 浓度为 420 mg/L;员工生活和车间地面清洗用水是生活污水的主要来源,平均产生量约 80 m<sup>3</sup>/d。该制药厂废水处理站设计进、出水水质见表 1。

表 1 废水水质及排放标准  
Tab.1 Wastewater quality and discharge standard

项 目	pH 值	COD/ (mg·L <sup>-1</sup> )	NH <sub>3</sub> -N/ (mg·L <sup>-1</sup> )
高浓度生产废水	5.4	5 460	420
生活污水	8~9	250~280	50
排放标准	6~9	120	25

2 工艺设计及主要构筑物

2.1 工艺流程

废水处理工艺流程见图 1。将高浓度生产废水与生活污水分别收集。高浓度生产废水经收集池进入初期调节池,通过调节酸碱度稳定池内水质,再提

升至 MAP 反应池预处理降低氨氮浓度,经铁碳芬顿高级氧化等工艺破坏大分子有机物,提高废水的可生化性,然后进入综合调节池。生活污水经管网收集,再由提升泵打入综合调节池,在综合调节池中通过投加质量分数为 10% 的 NaOH 溶液,将两种废水混合后的 pH 值调至 8 左右,然后在重力的作用下依次流入混凝沉淀池,在厌氧、缺氧和好氧串联反应池中进行深度降解,使得小分子有机物得到充分降解,强化了对 COD 的去除效果,并提高了联合生化工艺对 NH<sub>3</sub>-N 的降解效率<sup>[5-7]</sup>。生化处理出水进入二沉池进行泥水分离,上清液进入曝气生物滤池(BAF)进行最终处理,以确保出水各项指标达到《化学合成类制药工业水污染物排放标准》(GB 21904—2008)表 2 限值的要求。沉淀池、混凝沉淀池以及二沉池的污泥浓缩后,再经过板框压滤机降低其含水率,产生的泥饼外运填埋。

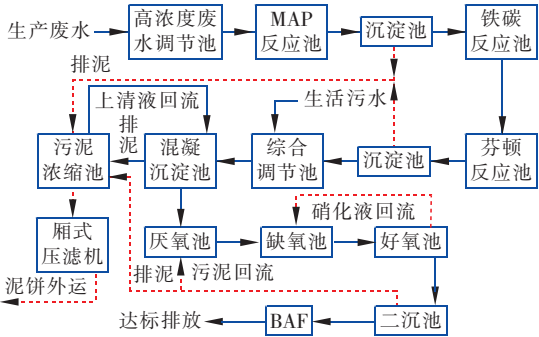


图 1 废水处理组合工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process

2.2 主要构筑物及设备参数

主要构筑物及设备参数见表 2。

表 2 主要构筑物及设计参数

Tab.2 Main structures and design parameters

项目	数量/ 座	尺寸/ (m×m×m)	设计参数	备注
高浓度废水调节池	1	10×5×3.5	HRT=25 h;有效容积为 150 m <sup>3</sup> ;加碱装置 1 套;pH 自动控制仪 1 套;曝气管 1 套;耐腐蚀氟塑料提升水泵 2 台(1 用 1 备),Q=25 m <sup>3</sup> /h,H=100 kPa,N=2.2 kW	地下式钢混结构
MAP 反应池	1	4×3×4	HRT=6 h;有效容积为 42 m <sup>3</sup> ;内置搅拌机 1 台,加药装置 2 套;pH 自动控制仪 1 套	全地上式钢混结构
铁碳反应池	1	4×4×3.5	HRT=4.5 h;有效容积为 48 m <sup>3</sup> ;内置搅拌机 1 台;加酸装置 1 套;全自动给料机 2 套;pH 自动控制仪 1 套;铁碳填充率约为 75%	全地上式钢混内防腐结构

续表2 (Continued)

项目	数量/ 座	尺寸/ (m × m × m)	设计参数	备注
芬顿反应池	1	6 × 3 × 4	HRT = 6 h; 有效容积为 60 m <sup>3</sup> ; 内置搅拌机 1 台; 加药装置 2 套, 分别投加 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 和 FeSO <sub>4</sub>	全地上式钢混内防腐结构
综合调节池	1	10 × 8 × 3.5	HRT = 32 h; 有效容积为 240 m <sup>3</sup> ; 加碱装置 1 套; pH 自动控制仪 1 套	半地下式钢混结构
混凝沉淀池	1	5 × 6 × 4.5	HRT = 6 h; 有效容积为 120 m <sup>3</sup> ; 加药装置 2 套 (PAC 和 PAM 投加装置各一套); 潜水推流器 2 台 (1 用 1 备), N = 1.5 kW, 设计表面负荷为 0.6 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> · h)	半地上式钢混结构
厌氧池	1	8 × 4 × 4	HRT = 8 h; 有效容积为 110 m <sup>3</sup> ; 配备 DO 在线仪 1 台, 控制 DO < 0.2 mg/L; 内置低速潜水推流器	半地上式钢混结构
缺氧池	1	12 × 6 × 4	HRT = 16 h; 有效容积为 250 m <sup>3</sup> ; 配备 DO 在线仪 1 台, 控制 DO 为 0.2 ~ 0.5 mg/L; 内置潜水推流器 2 台 (1 用 1 备), N = 1.5 kW	半地上式钢混结构
好氧池	1	10 × 8 × 4	HRT = 32 h; 有效容积为 420 m <sup>3</sup> ; 配备 DO 在线仪 1 台, 控制 DO 为 2 ~ 4 mg/L; 内置管式曝气器, 采用 2 台罗茨风机 (1 用 1 备), Q = 10 m <sup>3</sup> /min, P = 0.058 MPa, N = 20 kW; 配置回流泵 2 台 (1 用 1 备), Q = 8 m <sup>3</sup> /h, H = 0.12 MPa, N = 1.5 kW	半地上式钢混结构
二沉池	1	6 × 4 × 4	HRT = 12 h; 有效容积为 84 m <sup>3</sup> ; 1 套 PVC 材质中心导流管; 1 台污泥泵, 设计表面负荷为 0.6 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> · h)	半地上式碳钢结构
BAF	1	6 × 6 × 3	HRT = 6 h; 有效容积为 90 m <sup>3</sup> ; 陶粒滤料 15 m <sup>3</sup> ; 鼓风机 2 台	半地下式钢混结构
污泥浓缩池	1	5 × 5 × 4.5	HRT = 15 h; 污泥浓缩后含水率为 98%, 污泥体积为 30 m <sup>3</sup> ; 极限固体通量为 1.8 kg/(m <sup>2</sup> · h)	全地上式钢混结构

### 3 调试运行

#### 3.1 调试

##### 3.1.1 MAP 沉淀工艺段

主要包括高浓度生产废水 pH 调节池和 MAP 处理单元池的调试。为使 MAP 化学沉淀法对氨氮有较高的去除率, 在调节池加入质量分数为 10% 的 NaOH 溶液将废水 pH 值控制在 9 ~ 10。MAP 反应池调试过程中, 需注意控制 MgCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O 和 Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> · 12H<sub>2</sub>O 投加量以及沉淀反应时间, 测定水质变化。通过小试确定 MgCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O 和 Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> · 12H<sub>2</sub>O 的配制比例和流量, 当 pH 值为 9.5 左右和 n(Mg) : n(N) : n(P) 为 1.2 : 1.0 : 1.2 时, 氨氮去除效果良好。在实际调试时, 根据进水量变化等比例调整药剂投加量, 每日排泥一次, 产生的鸟粪石沉淀物与后续生化处理污泥统一外运处理。当处理水量和去除效果达到理论设计要求时, 即标志着前期调试完成。

##### 3.1.2 铁碳-芬顿处理工艺段

主要包括铁碳处理单元池和芬顿处理单元池的调试。废水流入铁碳反应池后, 投加 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 调节 pH 值为 2 ~ 3, 启动搅拌机后, 再投加一定配比率的活化铁粉和活性炭。前期实验得出最佳反应参数范围: pH 值为 2 ~ 3.5, 铁碳投加量为 300 ~ 350 mg/L,

反应时间为 90 ~ 120 min。实际调试时, 依据废水实时流量再确定活性铁粉和活性炭粉的使用总量。在芬顿反应池预先将废水 pH 值调至 3 ~ 4, 再加入硫酸亚铁和双氧水。依据前期单因素实验分析, Fenton 反应各项参数最优反应条件: pH 值为 2.3 ~ 3.5; FeSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 的投加量为 5 ~ 6 g/L; 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 投加量为 11 ~ 12 mL/L; 反应时间为 25 min。再根据实际废水流量确定两种药剂的使用总量。启动成功的标志是处理出水 B/C 值 ≥ 0.45, 其目的是为后续好氧生物处理提供良好条件<sup>[8-9]</sup>。

##### 3.1.3 A<sup>2</sup>/O 处理工艺段

厌氧池接种某污水处理厂二沉池活性污泥 15 t, 保证池内 MLSS 约为 2 ~ 3 g/L, 接种后密闭, 控制池内 DO < 0.2 mg/L。在距池底 0.5 m 处设置低速推流器, 增加污泥与污水的接触面积, 可防止污泥沉淀。缺氧池中接种污泥浓度为 2.5 ~ 3.5 g/L, 设置潜水搅拌机, 进而增加缺氧池中泥水接触效率和提高缺氧菌活性。为提高脱氮效果, 将好氧池末端硝化液通过泵回流到缺氧池前段, 其回流比控制为 200%, 使硝态氮进一步得到去除。好氧池内均匀铺设曝气管 80 根, 接种污泥后, 启动罗茨风机和搅拌机连续搅拌闷曝, 使得好氧池 DO 不低于 2 mg/L。在出水水质良好且各单元运行稳定后, 下阶段按前

一天处理量的 10% 逐步提高处理水量,直到达到实际负荷且出水水质稳定,即认为调试启动完成。

### 3.1.4 BAF

采用自然挂膜法,保证水温为 15~35℃,pH 值中性。将约占 10% 池容的污泥投入滤池,开启进水阀,向池内注入 1/3 池容的废水再加满自来水,以降低污泥负荷。启动鼓风机闷曝,将 DO 控制在 2~3 mg/L,间隔固定时间检测一次 COD 值,当 COD 值为进水数值的 50% 时,再向 BAF 送入最大处理量 50% 的废水体积(约为 100 m<sup>3</sup>),重复上述步骤反应一段时间后,进行连续进水调试,其进水量按现有处理量的 25%;保证 BAF 出水水质稳定,设备每运行 24 h 后,按现有处理量的 10% 提高进水量,直到达到最大处理水量。在挂膜期间滤池不进行反冲洗,以防止滤膜被破坏。调试完成后池中填料生长着一层褐色的生物膜,标志着挂膜结束,可正常运行。

### 3.1.5 整体预期处理效果

整体预期处理效果见表 3。

表 3 工艺预期处理效果

Tab.3 Removal effect of pollutants by process

项目	pH 值	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	COD 去除率/%	氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮去除率/%
MAP	9~10	5 200	—	420	65
铁碳-芬顿	2~3	5 200	64	140	—
A <sup>2</sup> /O	7~9	1 100	80	90	60
BAF	7~9	160	30	35	35

## 3.2 实际运行效果

经过近 3 个月的调试后,在以实际水量进水且稳定运行情况下,对各处理单元进、出水水质进行了为期两个月的监测。

### ① MAP 沉淀段

MAP 反应器稳定运行后,对 NH<sub>3</sub>-N 的去除效果见图 2。

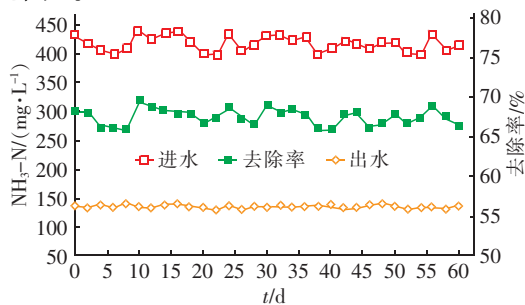


图 2 MAP 池对 NH<sub>3</sub>-N 的去除效果

Fig.2 Effect of MAP process on NH<sub>3</sub>-N removal

进水 NH<sub>3</sub>-N 均值约为 420 mg/L,出水均值约为 135.3 mg/L,平均去除率可达 68.8%。虽然原水中 NH<sub>3</sub>-N 波动较大(395.8~431.6 mg/L),但 MAP 工艺对 NH<sub>3</sub>-N 的去除效果相对稳定,保证了出水 NH<sub>3</sub>-N 浓度≤140 mg/L。

### ② 铁碳芬顿工艺

铁碳芬顿工艺对 COD 的去除效果见图 3。

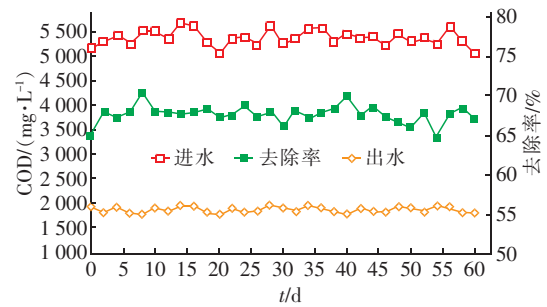


图 3 铁碳芬顿系统对 COD 的去除效果

Fig.3 Effect of Fe/C-Fenton system on COD removal

进水 COD 均值为 5 486 mg/L,出水均值为 1 760 mg/L,去除率为 67.29%。由检测数据可知,该工艺段出水 B/C 值不低于 0.52,这表明铁碳芬顿工艺可有效破坏废水中难降解有机物的化学空间结构,为后续好氧生物处理提供有利条件<sup>[10-11]</sup>。

### ③ A<sup>2</sup>/O 系统

A<sup>2</sup>/O 工艺对 COD 的去除效果见图 4。

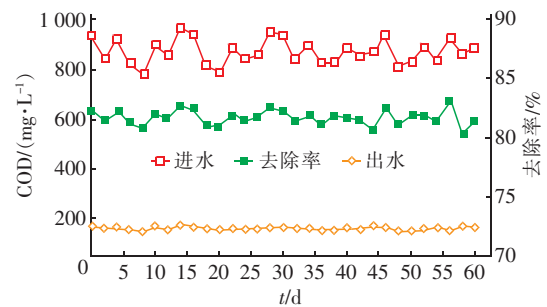


图 4 A<sup>2</sup>/O 工艺对 COD 的去除效果

Fig.4 Effect of A<sup>2</sup>/O system on COD removal

由图 4 可知,通过铁碳芬顿工艺预处理的高浓度废水与生活污水均质混合后,其进水 COD 均值为 916.3 mg/L,处理后出水 COD 均值为 158.5 mg/L。A<sup>2</sup>/O 系统对 COD 去除率不低于 80%,更加表明了铁碳芬顿预处理可有效提高废水的可生化性。

A<sup>2</sup>/O 系统对 NH<sub>3</sub>-N 的去除效果见图 5。进水 NH<sub>3</sub>-N 均值为 82.3 mg/L,出水 NH<sub>3</sub>-N 均值为 38.5 mg/L,平均去除率为 59.73%。其对 NH<sub>3</sub>-N

去除效果良好是由于在池中设置潜水搅拌器和潜流推进器,加大了缺氧菌与污水接触面积和时间,增强了缺氧池中污泥活性,促进了生物脱氮效果提升,并且通过将好氧池内混合液回流到缺氧池前段(回流比为200%),使得回流液中的硝态氮得到深度脱除。

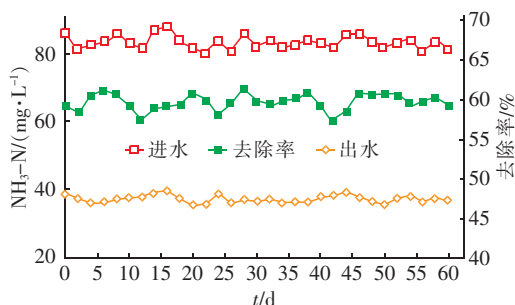


图5 A<sup>2</sup>/O系统对NH<sub>3</sub>-N的去除效果

Fig. 5 Effect of A<sup>2</sup>/O system on NH<sub>3</sub>-N removal

#### ④ BAF

BAF对COD和NH<sub>3</sub>-N的去除效果分别见图6、7。进水COD均值为152.5 mg/L,出水COD均值为103.5 mg/L,平均COD去除率为32.9%。进水NH<sub>3</sub>-N均值为38.2 mg/L,出水NH<sub>3</sub>-N均值为22.5 mg/L,平均NH<sub>3</sub>-N去除率为35.2%。

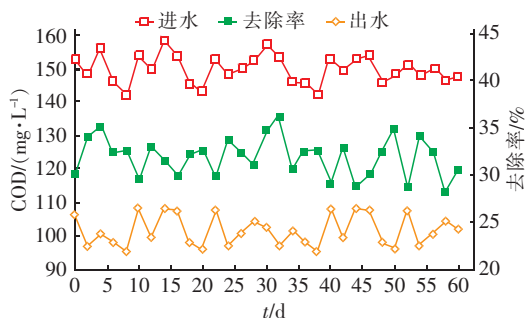


图6 BAF对COD的去除效果

Fig. 6 Effect of BAF system on COD removal

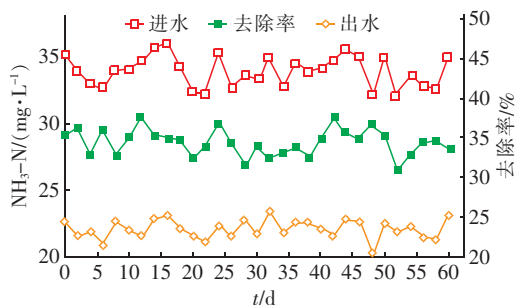


图7 BAF对NH<sub>3</sub>-N的去除效果

Fig. 7 Effect of BAF system on NH<sub>3</sub>-N removal

#### ⑤ 整体运行效果

整体工艺稳定运行工况见表4。整个系统的COD平均浓度为3284 mg/L且波动较大,但是经过铁碳芬顿、A<sup>2</sup>/O工艺处理后,COD控制在103.5 mg/L左右,整体系统对COD去除率为95.2%,证明该套组合工艺抗冲击负荷能力较强,对COD去除效果良好。进水NH<sub>3</sub>-N平均浓度为283 mg/L,出水NH<sub>3</sub>-N平均浓度为22.5 mg/L,其整体去除率可达91.6%,表明MAP-A<sup>2</sup>/O串联组合工艺脱氮效率维持在较高水平;同时,通过前置反硝化,将好氧池中硝化液回流至缺氧池,使得回流液中硝态氮得到深度释放。最终该组合工艺系统出水各指标均可达到《化学合成类制药工业水污染物排放标准》(GB 21904—2008)表2限值的要求。

表4 组合工艺对污染物的去除效果

Tab. 4 Removal effect of pollutants by combined process

项 目	进水	出水
COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	3 150~3 480	96.7~108.6
NH <sub>3</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	2 437~2 865	20.5~23.8
SS/(mg·L <sup>-1</sup> )	940~1 210	51~63
pH值	5.4	6~9

#### 4 经济分析

该项目为新建工程,预计处理水量为200 m<sup>3</sup>/d,总投资为240万元,其中设备材料费用为125.5万元,土建费用为84.5万元,其他费用为30万元。废水处理成本:投加药剂费为2.35元/m<sup>3</sup>;工作人员编制2人,平均月工资为2500元/人,则人工费为0.83元/m<sup>3</sup>;水电费为1.3元/m<sup>3</sup>,污泥处置费为1.35元/m<sup>3</sup>。运行费用合计为5.83元/m<sup>3</sup>。

#### 5 结论

针对江西某制药厂200 m<sup>3</sup>/d生产综合废水,采用MAP-铁碳芬顿-A<sup>2</sup>/O组合工艺进行处理。高氨氮生产废水先经MAP沉淀、铁碳微电解、芬顿氧化预处理后,与生活污水均质调节、混凝沉淀后,再进行生化处理,可降低废水处理成本和运行费用。整体工艺运行稳定,处理效果好,具有较强的抗冲击负荷能力,出水COD平均浓度约为103.5 mg/L, NH<sub>3</sub>-N平均浓度约为22.5 mg/L,满足《化学合成类制药工业水污染物排放标准》(GB 21904—2008)表2限值的要求,处理成本约5.83元/m<sup>3</sup>。

#### 参考文献:

[1] 何岩,赵由才,周恭明. 高浓度氨氮废水脱氮技术研

- 究进展[J]. 工业水处理,2008,28(1):1-4.
- He Yan, Zhao Youcai, Zhou Gongming. Research process on the denitrogenation of highly concentrated ammonium-nitrogen wastewater [J]. Industrial Water Treatment,2008,28(1):1-4(in Chinese).
- [2] 吴晴,刘金泉,王凯,等. 高级氧化技术在难降解工业废水中的研究进展[J]. 水处理技术,2015(11):25-29.
- Wu Qing, Liu Jinquan, Wang Kai, *et al.* Research progress of advanced oxidation processes in the treatment of refractory industrial wastewater [J]. Technology of Water Treatment,2015(11):25-29(in Chinese).
- [3] 宋鑫,任立人,吴丹,等. 制药废水深度处理技术的研究现状及进展[J]. 广州化工,2012,40(12):29-31.
- Song Xin, Ren Liren, Wu Dan, *et al.* The present situation and research progress in the advanced treatment of pharmaceutical wastewater[J]. Guangzhou Chemical Industry,2012,40(12):29-31(in Chinese).
- [4] 周伟博,伊学农,施柳,等. 吹脱联合 MAP 法处理高氨氮废水的研究[J]. 中国给水排水,2014,30(21):110-113.
- Zhou Weibo, Yi Xuenong, Shi Liu, *et al.* Treatment of high-concentration ammonia nitrogen paraquat wastewater by air stripping and MAP [J]. China Water & Wastewater,2014,30(21):110-113(in Chinese).
- [5] 邱攀,王白杨,胡春华,等. 物化+生化工艺处理高氮、高 COD 制药废水[J]. 中国给水排水,2017,33(10):100-103.
- Qiu Pan, Wang Baiyang, Hu Chunhua, *et al.* Application of physical-chemical + biochemical process to the treatment of pharmaceutical wastewater containing high concentration of nitrogen and COD[J]. China Water & Wastewater,2017,33(10):100-103(in Chinese).
- [6] 彭望峰,朱乐辉. 叶酸中间体生产废水处理的应用研究[J]. 工业水处理,2018,38(2):99-101.
- Peng Wangfeng, Zhu Lehui. Applied research on the treatment of wastewater from folic acid intermediates production [J]. Industrial Water Treatment, 2018, 38 (2):99-101(in Chinese).
- [7] 钟理,陈建军. 高级氧化处理有机污水技术进展[J]. 工业水处理,2002,22(1):1-5.
- Zhong Li, Chen Jianjun. Technical progress in organic effluent water treatment by advanced oxidation processes [J]. Industrial Water Treatment,2002,22(1):1-5(in Chinese).
- [8] 刘钰钦,洪志强,王京刚,等. 微电解-AO-臭氧氧化-BAF 组合工艺处理制药废水[J]. 水处理技术,2017,43(7):89-93.
- Liu Yuqin, Hong Zhiqiang, Wang Jinggang, *et al.* Pharmaceutical wastewater treatment by microelectrolysis - AO - ozonation - BAF combined process [J]. Technology of Water Treatment,2017,43(7):89-93(in Chinese).
- [9] 朱乐辉,左晶,程鹏. 混凝+铁炭微电解/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+活性炭处理化学清洗废水[J]. 工业水处理,2012,32(5):63-66.
- Zhu Lehui, Zuo Jing, Cheng Peng. Treatment of chemical cleaning wastewater by coagulation and iron-carbon microelectrolysis/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and activated carbon [J]. Industrial Water Treatment, 2012, 32 (5):63-66(in Chinese).
- [10] 冯雅丽,张茜,李浩然,等. 铁炭微电解预处理高浓度高盐制药废水[J]. 环境工程学报,2012,6(11):3855-3860.
- Feng Yali, Zhang Qian, Li Haoran, *et al.* Pretreatment of concentrated hyperhaline pharmaceutical wastewater by iron-carbon micro-electrolysis [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6 (11):3855-3860(in Chinese).
- [11] 万金保,付煜,刘峰,等. 微电解-芬顿-EGSB-A/O-接触氧化处理制药废水[J]. 中国给水排水,2017,33(20):104-108.
- Wan Jinbao, Fu Yu, Liu Feng, *et al.* Micro-electrolysis - Fenton - EGSB - A/O - biological contact oxidation process for treatment of pharmaceutical wastewater[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (20):104-108(in Chinese).



作者简介:雷颖(1981-),女,江西樟树人,硕士,讲师,主要研究方向为污水治理及环境监测。

E-mail:13797376@qq.com

收稿日期:2019-03-13