

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.14.016

纯膜MBBR+A/O双泥系统用于制药废水脱氮工程

肖 宁¹, 唐国卿², 周家中³, 杨忠启³, 管勇杰³, 韩文杰³,
周浩然³, 吴 迪³, 李振红³

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 2. 首创爱华<天津>市政环境工程有限公司, 天津 300060; 3. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266510)

摘 要: 某制药废水处理厂进行扩容提标改造时面临的难题有氨氮去除率高、进水有毒有害物质浓度高、无新增用地、水质水量波动大以及工程施工困难等。采用纯膜MBBR工艺对系统进行原池改造,将已有A/O活性污泥脱氮工艺改造为纯膜MBBR+A/O脱氮双泥系统。实际运行效果显示,纯膜MBBR可有效削减进水氨氮负荷,硝化能力达到 $0.45 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,正常运行系统出水氨氮 $< 5 \text{ mg/L}$,实现了药厂提质增产的目标,保障了实际出水水质的稳定性。面对进水pH冲击、二氯甲烷冲击、长期低基质运行后进水负荷激增冲击等,纯膜MBBR系统受影响程度小,展现了较强的抗毒能力和快速恢复能力。纯膜MBBR池仅通过曝气即可实现系统的充氧、悬浮载体良好流化,风机电耗为 $1.0 \sim 1.8 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,占全厂总电耗的20%~35%。纯膜MBBR工艺具备负荷高、耐冲击能力强的优势,适用于高氨氮工业废水的处理。

关键词: 纯膜MBBR; 高氨氮; 制药废水; pH冲击; 工业废水; 毒性冲击

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)14-0093-06

Application of Pure MBBR and A/O Double Sludge System in Pharmaceutical Wastewater Denitrification Project

XIAO Ning¹, TANG Guo-qing², ZHOU Jia-zhong³, YANG Zhong-qi³,
GUAN Yong-jie³, HAN Wen-jie³, ZHOU Hao-ran³, WU Di³, LI Zhen-hong³

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 2. Capital Aihua <Tianjin> Municipal and Environmental Engineering Co. Ltd., Tianjin 300060, China; 3. Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China)

Abstract: In view of the problems faced by a pharmaceutical sewage treatment plant during expansion and upgrading, including high ammonia nitrogen removal rate, high concentration of toxic and harmful substances in the influent, no new land use, large fluctuation of water quality and quantity, and difficulties in project construction, the pure MBBR process is used to innovate the original biochemical tank. The existing A/O activated sludge denitrification process is transformed into a double sludge system of pure MBBR and A/O denitrification. The actual operation results show that the pure MBBR can effectively reduce the influent ammonia nitrogen load, the nitrification capacity reaches $0.45 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, and the effluent ammonia nitrogen is less than 5 mg/L during normal operation, which realizes the goal of improving quality and production of the pharmaceutical factory and ensures the stability of the actual

effluent quality. Faced with the impact of influent pH, dichloromethane, and surge of influent load after long-term low substrate operation, the pure MBBR system is less affected and exhibits strong anti-toxicity and rapid recovery capabilities. The pure MBBR tank can realize the oxygenation of the system and good fluidization of suspended carrier only through aeration. The power consumption of the blower is $1.0\sim 1.8\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$, accounting for 20%–35% of the total power consumption of the whole plant. The pure MBBR process has the advantages of high load and strong impact resistance, which is suitable for the treatment of high concentration ammonia nitrogen industrial wastewater.

Key words: pure MBBR; high concentration ammonia nitrogen; pharmaceutical wastewater; pH impact; industrial wastewater; toxic shock

制药废水成分复杂、毒性大、氨氮浓度高、水质水量变化大,是工业废水中较难处理的一种^[1]。对于高氨氮制药废水的处理,普遍采用“预处理+生化法”的耦合工艺。冯金河^[2]采用“预处理+水解酸化+UASB+二级A/O+MBR膜”组合工艺处理制药废水,实际进水氨氮为 $1\,141\text{ mg/L}$,预处理采用吹脱法去除大部分氨氮,然后经过二级A/O-MBR工艺处理,出水氨氮低于 10 mg/L 。雷颖等^[3]采用“MAP-铁碳芬顿-A²/O-BAF”组合工艺处理高氨氮制药废水,MAP法可去除近70%的进水氨氮,出水氨氮低于 140 mg/L ,通过A²/O和BAF工艺的联合处理,最终出水氨氮低于 25 mg/L 。作为预处理工艺,吹脱法、MAP法均能实现高氨氮废水的有效处理,但是能耗、药耗均较高。生物法是较为经济的处理工艺,但高氨氮进水带来的高游离氨(FA)以及进水中存在的有毒有害物质会抑制活性污泥微生物的活性,从而降低活性污泥的处理效果,严重时直接导致生化系统崩溃。因此亟需寻求抗毒能力强、处理负荷高的替代工艺,而纯膜MBBR工艺是较好的选择。

纯膜MBBR工艺是移动床生物膜反应器(MBBR)的一种应用形式,属于生物膜法。纯膜MBBR工艺不富集活性污泥,摆脱了传统泥膜复合MBBR工艺中活性污泥与生物膜竞争底物的束缚,具有更高的处理负荷^[4]。在国外,针对市政污水处理,纯膜MBBR工艺可在3~6 h的停留时间内获得优于国内地表准Ⅳ类水水质的效果,具有较好的处理性能^[5]。在国内,纯膜MBBR工艺已在微污染水、市政污水处理等领域成功应用,如广东东莞某河道水质净化厂采用纯膜MBBR工艺对其原一级沉淀工艺进行原池改造,同时具备了除磷、硝化功能,有效改善了河道水质。江苏盐城某原水预处理项目采用纯膜MBBR

工艺处理微污染水,在实际进水氨氮为 1.4 mg/L 的条件下,可使出水氨氮低于 0.1 mg/L ,满足地表Ⅲ类水标准,取得了良好的应用效果^[6]。广东肇庆某市政污水厂设计处理水量 $3\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,二级工艺采用纯膜MBBR工艺,在HRT仅为1.99 h的条件下,可实现出水氨氮低于 1.5 mg/L 的处理目标^[7]。山东某污水厂处理水量 $2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,采用纯膜MBBR工艺,好氧区硝化容积负荷达到 $0.371\text{ kgN}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,出水氨氮稳定低于 1.0 mg/L 。在高氨氮污水处理方面,已有基于纯膜MBBR的全程自养脱氮(CANON)工艺成功用于污泥消化液的处理,在进水氨氮最高为 800 mg/L 的条件下,硝化负荷可达 $0.5\text{ kgN}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 以上,TN负荷达到 $0.9\text{ kgN}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ ^[8]。纯膜MBBR处理高氨氮废水,具有处理负荷高、耐水质水量冲击的特点,同时MBBR工艺可灵活与已有生化系统镶嵌,实现污水厂的原位提标、扩容改造。

以某制药厂废水处理系统改造为例,分析纯膜MBBR工艺应对高氨氮废水厂原位扩容提标的可行性以及处理性能,以期高氨氮废水的处理提供技术参考和数据支撑。

1 工程背景

1.1 项目概况

该制药废水处理厂主要处理制药车间生产废水,以氨氮和COD去除为主要目标,原设计流量 $500\text{ m}^3/\text{d}$ 。原进水氨氮为 500 mg/L ,要求出水氨氮 $<45\text{ mg/L}$,原进水COD为 $3\,000\text{ mg/L}$,要求出水COD $<500\text{ mg/L}$,出水进入厂内其他污水处理设施进一步处理。生化系统采用两段A/O工艺,第一段A/O主要去除有机物,经过沉淀池泥水分离后进入第二段A/O;第二段A/O主要进行脱氮。实际运行中,COD能够稳定达标,但出水氨氮难以稳定达标,主要原

因是进水水质复杂,存在氨氮浓度高、水温高(30~40℃)引起的高游离氨抑制等问题。随着药厂提量增产,实际进水水量预计达到1 000 m³/d,进水水质浓度增大近1倍,核心氨氮浓度达到950 mg/L。改造后进水氨氮负荷达到改造前的3.8倍,原有系统已难以应对,亟需进行改造,以提高生化系统的处理能力,保障出水水质稳定。本次改造设计进水量为1 000 m³/d,设计进、出水COD不变,分别为3 000、500 mg/L,设计进、出水氨氮分别为950、5 mg/L。

1.2 存在问题与应对措施

本次制药废水处理厂改造面临的主要问题有:

① 高氨氮去除率。进水水质提升后,对出水要求也同时提高,氨氮去除率由91%提升至99.5%,这种高浓度氨氮经过一段生化工艺处理出水达标鲜有报道。

② 进水有毒有害物质浓度高。实际进水成分复杂,主要含咖啡因、巴比妥、布洛芬生产原料及中间产物等有毒有害物质,对系统硝化有抑制作用;进水氨氮浓度高,水温一般在30~40℃,系统内游离氨较高,对硝化也有较强的抑制作用;原活性污泥系统在处理负荷较低时也仅能勉强达标,并不稳定,仍需要厂内其他污水处理设施进一步处理;随着进水氨氮浓度的进一步提高,将导致游离氨进一步提升,对硝化的抑制作用更强。

③ 无新增用地。厂区用地紧张,无扩建用地,无法延长工艺流程,只能通过原位改造方式增加处理负荷,需采用新工艺,充分挖掘处理潜能。

④ 水质水量波动大。受排污企业实际生产影响,来水水质水量波动较大,不具备建设调节池条件,所选工艺需具备良好的抗水质水量冲击性能,并能够应对长时间的水质波动。

⑤ 工程施工困难。污水处理全流程为全封闭结构,施工困难;要求所选新工艺改造简单,工程量少,并且尽可能少地改造构筑物。

针对存在的问题,并校核现有污水处理工艺性能,第一段A/O池容充分,结合已有系统运行情况,COD能够稳定达标。本项目的改造难点是氨氮的去除,拟对第二段A/O进行硝化能力强化。

2 技术路线与方案

改造后设计进水氨氮达到950 mg/L,更高的氨氮浓度必然进一步提升系统内游离氨,对活性污泥

抑制将更强,故不宜将活性污泥作为削减氨氮负荷的主体。对于TN而言,若氨氮能够稳定达标,既有反硝化池容充分,以厂内生产废料为碳源,可保障TN稳定达标。基于此,改造路线采用活性污泥系统前增设生物膜硝化系统,形成O(Biofilm)+A/O(AS)双泥系统(见图1),生物膜前置用于削减氨氮负荷,之后通过A/O实现污染物进一步处理达标。

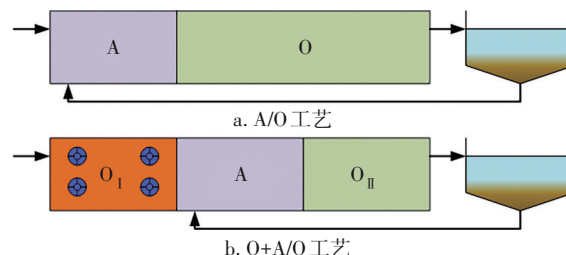


图1 双泥系统流程

Fig.1 Flow diagram of double sludge system

O+A/O双泥系统,O_I段为纯膜MBBR工艺段,微生物主要以附着态存在;A/O仍为活性污泥法,沉淀池回流污泥直接回流至A段,不经过O_I段。纯膜MBBR工艺段相当于后续活性污泥系统的预处理,进行氨氮的削减,同时悬浮载体脱落的生物膜随出水进入活性污泥系统,可对活性污泥进行硝化菌接种,维系污泥系统硝化能力的稳定性,活性污泥系统确保出水氨氮稳定达标。

3 工艺设计

改造前、后工艺流程对比见图2。

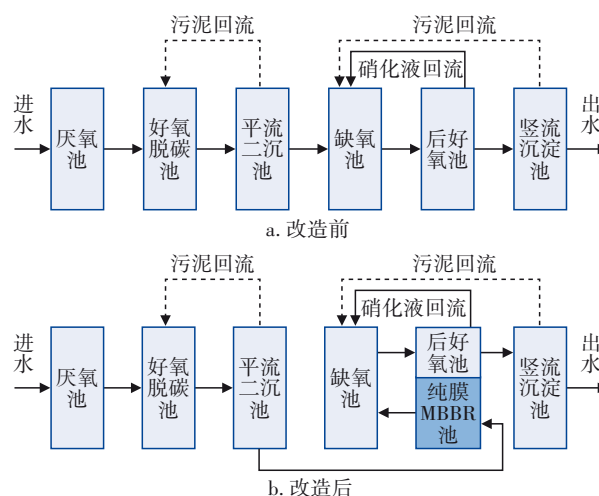


图2 改造前、后工艺流程对比

Fig.2 Comparison of process flow before and after transformation

针对脱氮池,将原二段A/O的后好氧池切割1/2

池容改造为纯膜 MBBR 区,形成两个独立的好氧区,流程上将二级 A/O 改造为 O_1+A/O_2 工艺双泥系统。改造后平流二沉池出水首先进入纯膜 MBBR 池完成高氨氮浓度的削减,然后进入缺氧池进行脱氮,后好氧保障出水氨氮和有机物的稳定达标。污水经过竖流沉淀池后,上清液排放至厂内其他污水处理设施进一步处理。污泥直接回流至缺氧池,不进入纯膜 MBBR 池,确保纯膜 MBBR 池以生物膜为主体。纯膜 MBBR 池的设计停留时间为 44 h,投加 SPR-Ⅲ型悬浮载体。为充分发挥纯膜 MBBR 池高负荷特性,纯膜 MBBR 池设计硝化负荷 $>0.49 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,出水氨氮低于 45 mg/L 。根据实际处理能力,重新校核需气量,纯膜 MBBR 池单独设 3 台空气悬浮风机,风量 $25 \text{ m}^3/\text{min}$ (标准状态下),风压 75 kPa ,2 用 1 备。好氧脱碳池和后好氧池更换为 2 台空气悬浮风机,1 用 1 备,风量 $120 \text{ m}^3/\text{min}$ (标准状态下),风压 75 kPa 。改造后核心功能区停留时间见表 1。在工程施工方面,新增了平流二沉池至纯膜 MBBR 区的进水管,更换了原纯膜 MBBR 池的曝气设备和风机房至纯膜 MBBR 池的空气管路,增加了纯膜 MBBR 区的拦截筛网。除此之外,无其他工程量。

表 1 改造后核心功能区停留时间

Tab.1 HRT of core functional area after reconstruction

项目	厌氧池	脱碳池	纯膜 MBBR 池	缺氧池	后好氧池
HRT	107	95	44	80	44

4 运行效果

该项目运行的难点在于纯膜 MBBR 池能否稳定发挥预处理功能,实现高氨氮浓度的削减,故主要分析纯膜 MBBR 池的硝化效果。系统投运后,控制纯膜 MBBR 池 $\text{DO}>3 \text{ mg/L}$,纯膜 MBBR 池进、出水氨氮浓度变化见图 3,进水氨氮负荷和硝化负荷变化见图 4,悬浮载体挂膜效果见图 5。系统经历了启动、稳定运行、两次 pH 冲击与恢复、低基质运行与恢复、二氯甲烷冲击与恢复等阶段。

纯膜 MBBR 池的启动运行和排污单位扩大生产同步进行。前 31 天,实际进水负荷基本为 $0.03 \sim 0.04 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,变化比较小。从第 32 天开始,进水负荷逐步提升,至第 74 天,进水负荷达到 $0.16 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,硝化负荷也从 0 逐步提升至 $0.14 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。在此期间,纯膜 MBBR 池出水氨氮稳定在

45 mg/L 以下,在提产过程中保障了出水水质的稳定性。纯膜 MBBR 区投加新悬浮载体,一次性接种活性污泥 4 g/L ,自然流失,不再回流污泥。运行至第 11 天,系统内污泥浓度降至 0.5 g/L 以下,与进水 SS 基本相同。挂膜方面,系统运行 7 d,悬浮载体内已明显富集生物膜;运行至 20 d,悬浮载体整体呈现淡黄色挂膜效果;运行至 40 d,生物膜颜色更加均匀;运行至 60 d,生物膜为深褐色,更加均匀致密。此后,系统进入正常运行阶段,第 75~152 天,实际进水量均值 $899 \text{ m}^3/\text{d}$,在第 75~114 天进水负荷均值为 $0.17 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,相对稳定,硝化负荷为 $0.15 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,氨氮去除率维持在 90% 以上。随后进水氨氮负荷继续提升至 $0.37 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。由于悬浮载体生物膜挂膜良好,硝化负荷随之提升。出水氨氮持续降至 5 mg/L 以下,运行效果稳定。经过本阶段的运行,硝化负荷达到 $0.37 \text{ kgN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

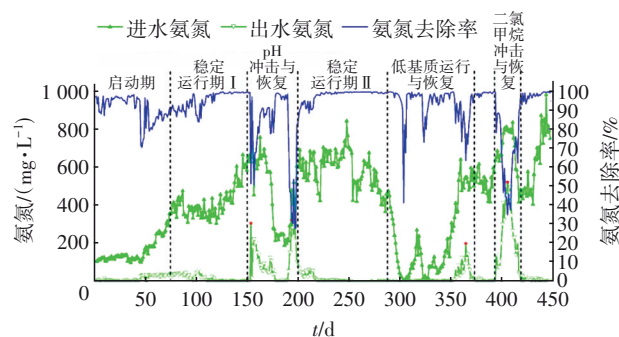


图 3 纯膜 MBBR 池进、出水氨氮

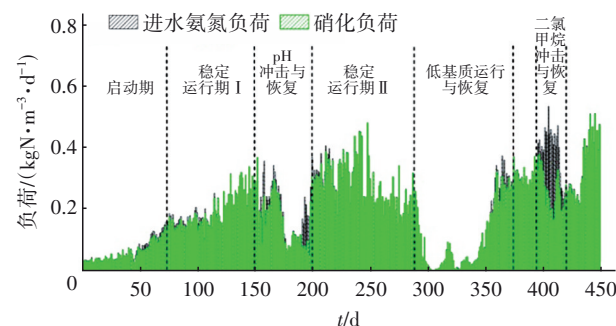
Fig.3 Influent and effluent $\text{NH}_3\text{-N}$ of pure MBBR tank

图 4 纯膜 MBBR 池进水氨氮负荷与硝化负荷

Fig.4 Influent ammonia nitrogen load and nitrification load of pure MBBR tank

第 153 天和 191 天,系统遭受两次高 pH 冲击, pH 分别达到 9.91 和 10.11。第一次 pH 冲击,硝化受影响较大,出水氨氮由 2 mg/L 迅速升高至 306 mg/L ,氨氮氧化率由 99.7% 降至 51.35%,硝化负荷由

0.37 kgN/(m³·d)降至0.08 kgN/(m³·d),降低了78.4%。运行11 d后,氨氮氧化率恢复到90%以上,硝化负荷达到0.25 kgN/(m³·d)。距第一次pH冲击仅39 d,系统再次遭受第二次pH冲击,对硝化的抑制程度较第一次更为严重,硝化能力被抑制时间长达5 d,硝化负荷最低仅为0.03 kgN/(m³·d),自第197天开始出水氨氮恢复降低。pH冲击10 d之后,氨氮氧化率恢复至90%以上,硝化负荷达到0.30 kgN/(m³·d)。研究表明,在生物脱氮过程中,氨氧化细菌(AOB)活性受所处环境pH影响较大,最适pH为7.4~8.2^[9-10]。当活性污泥受到高pH冲击时,微生物活性、污泥沉降性能会受到影响,而悬浮载体生物膜遭受高pH冲击的直接影响是脱膜。受pH冲击后,同步对纯膜MBBR池的悬浮载体和后好氧池的硝化污泥进行了硝化试验跟踪。结果显示,悬浮载体生物膜11 d后硝化能力基本恢复至冲击前的90%,而运行40 d后,活性污泥硝化能力恢复至抑制前的94%,活性污泥恢复时间较长。虽然悬浮载体生物膜存在部分脱落情况,但由于生物量大,且功能菌富集能力高,所以生物膜在应对pH冲击条件下,即使硝化能力受影响,但自身应对冲击能力较强,可在短时间内自然恢复。

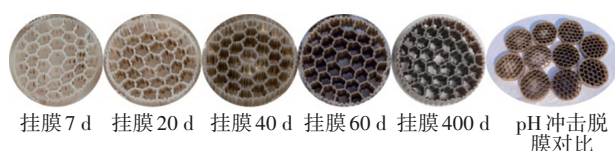


图5 悬浮载体生物膜

Fig.5 Suspended carrier biofilm

在第203~290天系统恢复正常运行,纯膜MBBR池继续保持良好的硝化能力,纯膜MBBR池出水氨氮稳定在5 mg/L以下,硝化负荷最大达到0.45 kgN/(m³·d)。生产单位自第291天开始停产检修,持续61 d,此时系统进水水量和水质大幅降低,进水负荷低于0.15 kgN/(m³·d),低于设计进水负荷的30%,纯膜MBBR系统进入低基质运行阶段。低基质运行阶段共持续61 d,其中,负荷低于0.10 kgN/(m³·d)的天数占93.4%。在此期间,系统一直处于低曝气阶段,DO低于1 mg/L,即可保障出水稳定达标。从第352天开始,系统进水负荷开始回升。7 d后进水负荷从0.13 kgN/(m³·d)升至0.34 kgN/(m³·d),提升了2.62倍。由于系统长期受低基质运行的影响,加之水温较高,生物膜性能显著下降,硝化负荷恢

复速率低于进水负荷提升速率,系统处理能力不足,出水氨氮升高,最高达到199 mg/L,氨氮氧化率降至63%。经过17 d的运行,出水氨氮降至13.8 mg/L,氨氮氧化率达到95%,硝化负荷也同步从0.16 kgN/(m³·d)恢复至0.32 kgN/(m³·d)。在饥饿运行过程中,胞外聚合物(EPS)可以作为能源物质转化为细胞生长所需碳源和能量。针对生物膜,由于EPS被消耗,直接导致了悬浮载体生物膜挂膜松散,在效果恢复期间易发生脱落。但从实际运行效果上看,低基质运行61 d,用时17 d即完成效果恢复,优于后端活性污泥的30 d,表明纯膜MBBR在应对间歇低基质运行上具备良好的适应能力及快速恢复能力。

正常情况下,系统会接收二氯甲烷废气,进气浓度低于20 mg/m³。运行至第395天,检测到实际进气浓度达到10 000 mg/m³,是正常进气浓度的500倍,系统遭遇严重的二氯甲烷冲击。冲击后第2天,纯膜MBBR池出水氨氮即上升至142 mg/L,在此后的23 d中出水氨氮一直高于45 mg/L,氨氮氧化率最低降至35%。值得注意的是,虽然硝化性能受限,但硝化负荷仍高于0.15 kgN/(m³·d),优于pH受冲击阶段。经过23 d,系统处理能力得以恢复,而后端活性污泥直到60 d后才恢复到冲击前硝化能力,进一步体现了MBBR生物膜的耐冲击性及快速恢复能力。

由于制药废水成分复杂,导致纯膜MBBR系统频繁受到冲击,包括pH冲击和二氯甲烷废气冲击等,但系统均能快速恢复,展现了较强的抗毒能力及快速恢复能力;系统正常进水时,纯膜系统能够满足处理要求,展现出较高的处理负荷。

5 经济性分析

本项目处理高浓度进水,稳定运行期间总运行电耗为4.1~5.4 kW·h/m³。其中纯膜MBBR池风机电耗1.0~1.8 kW·h/m³,占总电耗的20%~35%,主要与进水水质浓度和组成有关。所需药剂包括无机碳源和有机碳源,均为厂内其他车间副产物,不产生经济费用。

6 结论

采用纯膜MBBR工艺将已有A/O活性污泥脱氮工艺改造为O+A/O双泥系统,实现了制药废水处理厂原池扩容提标的目标。纯膜MBBR池硝化能力达

到 $0.45\text{ kgN}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,正常运行系统出水氨氮 $<5\text{ mg/L}$;面对进水pH冲击、二氯甲烷冲击、长期低基质运行后进水负荷激增冲击等,纯膜MBBR系统受影响程度小,展现了较强的抗毒能力及快速恢复能力;纯膜MBBR池仅通过曝气即可实现系统的充氧、悬浮载体良好流化,风机电耗 $1.0\sim 1.8\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。纯膜MBBR工艺有效解决了高氨氮去除率、进水有毒有害物质浓度高、无新增用地、水质水量波动大以及施工困难等难题,具备高负荷、耐冲击能力强的优势,适用于高氨氮工业废水的处理。

参考文献:

- [1] 范举红,刘锐,余素林,等.分质预处理强化制药废水处理效果的研究[J].中国给水排水,2012,28(23):34-37,41.
FAN Juhong, LIU Rui, YU Sulin, *et al.* Effect of quality-based pretreatment on enhanced treatment of pharmaceutical wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(23): 34-37,41 (in Chinese).
- [2] 冯金河.某制药废水处理工程实例[J].广东化工,2016,43(5):130-131.
FENG Jinhe. Engineering example of pharmaceutical wastewater treatment [J]. Guangdong Chemical Industry, 2016, 43(5):130-131 (in Chinese).
- [3] 雷颖,方红莲,郭勤,等.MAP-铁碳芬顿- A^2/O 组合工艺处理高氨氮制药废水[J].中国给水排水,2019,35(18):88-93.
LEI Jie, FANG Honglian, GUO Qin, *et al.* Application of MAP-Fe/C-Fenton- A^2/O process to treat pharmaceutical wastewater containing high concentration of ammonia nitrogen [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(18):88-93(in Chinese).
- [4] 周家中,韩文杰,吴迪,等.MBBR泥膜复合系统泥膜竞争关系的影响因素[J].中国环境科学,2020,40(11):4735-4743.
ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, WU Di, *et al.* Factors influencing the competition between activated sludge and biofilm in hybrid MBBR nitrification system [J]. China Environmental Science, 2020, 40(11): 4735-4743 (in Chinese).
- [5] 周家中,吴迪,郑临奥.纯膜MBBR工艺在国内外的工程应用[J].中国给水排水,2020,36(22):37-47.
ZHOU Jiazhong, WU Di, ZHENG Lin'ao. Engineering application of pure MBBR process at home and abroad [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22): 37-47 (in Chinese).
- [6] 王毅,井添祺,周家中,等.盐城市某原水预处理厂设计与运行分析[J].净水技术,2019,39(7):24-29,34.
WANG Yi, JING Tianqi, ZHOU Jiazhong, *et al.* Analysis of design and operation for a raw water pretreatment plant in Yancheng City [J]. Water Purification Technology, 2019, 39(7): 24-29, 34 (in Chinese).
- [7] 彭明,周家中,韩文杰,等.基于纯膜MBBR的BioFIMag工艺用于新建污水处理厂[J].中国给水排水,2021,37(6):71-75.
PENG Ming, ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, *et al.* Application of BioFIMag process based on pure MBBR in new wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(6):71-75(in Chinese).
- [8] 周家中,吴迪,韩文杰,等.基于MBBR的CANON工艺处理消化液中试启动[J].中国环境科学,2019,39(6):2378-2386.
ZHOU Jiazhong, WU Di, HAN Wenjie, *et al.* Pilot scale start-up of CANON disposal sludge-digestion wastewater treatment based on MBBR [J]. China Environmental Science, 2019, 39(6): 2378-2386 (in Chinese).
- [9] CLAROS J, JIMÉNEZ E, AGUADO D, *et al.* Effect of pH and HNO_2 concentration on the activity of ammonia-oxidizing bacteria in a partial nitrification reactor [J]. Water Science & Technology, 2013, 67(11): 2587-2594.
- [10] DAALKHAIJAV U, NEMATI M. Ammonia loading rate: an effective variable to control partial nitrification and generate the anaerobic ammonium oxidation influent [J]. Environmental Technology, 2014, 35(5/8): 523-531.

作者简介:肖宁(1977-),男,天津人,大学本科,高级工程师,注册咨询工程师,主要从事城市供水与污水处理工程设计与研究工作。

E-mail: xiaoning00@cemi.com.cn

收稿日期:2021-07-30

修回日期:2021-08-19

(编辑:衣春敏)