

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.16.018

强化生物脱氮反应器处理煤气化及合成氨混合废水

马俊¹, 闫松², 袁丙平³, 刘钰³, 刘霞⁴

(1. 金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌 737100; 2. 福建申远新材料有限公司, 福建 福州 350512; 3. 上海中耀环保实业有限公司, 上海 200092; 4. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 煤气化及合成氨废水具有高硬度、高总氮、高氨氮、低碳氮比等特点,属于典型的难处理煤化工废水,目前对该类废水直接排放处理的工程实例较少。某煤气化制氢及合成氨企业采用“软化预处理-强化生物脱氮反应器-反硝化生物滤池”工艺处理生产废水,设计进水量为300 m³/h,进水总硬度、总氮、氨氮、COD平均值分别为794.2、488.2、425.3、488.7 mg/L。实际运行结果表明,软化系统对总硬度的平均去除率为62.3%;强化生物脱氮反应器处理工艺段可将总氮、氨氮、COD分别降至17.0、1.5、22.5 mg/L,平均去除率分别为96.5%、99.6%、95.4%;强化生物脱氮反应器出水进入反硝化生物滤池,可进一步实现高达69.0%的总氮平均去除率,确保出水总氮稳定达到10 mg/L以下。当进水COD波动时,启动Fenton氧化工艺,可实现43.6%的COD平均去除率,确保出水COD稳定小于30 mg/L。测算电费、药剂费等运行成本可知,软化预处理段为1.81元/m³,强化生物脱氮反应器和反硝化生物滤池段为2.95元/m³,Fenton氧化段为0.51元/m³,合计5.27元/m³。

关键词: 煤气化废水; 合成氨废水; 强化生物脱氮反应器; 软化预处理; 反硝化生物滤池; Fenton氧化池

中图分类号: TU992 文献标识码: B 文章编号: 1000-4602(2025)16-0112-08

Enhanced Biological Nitrogen Removal Reactor for Coal-to-hydrogen and Synthetic Ammonia Wastewater Treatment

MA Jun¹, YAN Song², YUAN Bing-ping³, LIU Yu³, LIU Xia⁴

(1. Jinchuan Group Co. Ltd., Jinchang 737100, China; 2. Fujian Shenyuan New Materials Co. Ltd., Fuzhou 350512, China; 3. Shanghai Zhongyao Environmental Protection Industry Co. Ltd., Shanghai 200092, China; 4. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Coal-to-hydrogen and synthetic ammonia wastewater is characterized by high hardness, high total nitrogen, high ammonia nitrogen and low carbon to nitrogen ratio, which is typical refractory coal chemical wastewater. There are few engineering cases about treating this wastewater to meet the direct discharge standard. A coal-to-hydrogen and synthetic ammonia production plant adopts the process of softening pre-treatment, enhanced biological nitrogen removal reactor, denitrification biofilter to treat its production wastewater. The design influent volume is 300 m³/h, and the average influent total hardness, total nitrogen(TN), ammonia nitrogen(NH₃-N) and COD are 794.2 mg/L, 488.2 mg/L, 425.3 mg/L, and 488.7 mg/L, respectively. The results show that the average removal rate of total hardness of wastewater by softening system is 62.3%. TN, NH₃-N and COD can be reduced to 17.0 mg/L, 1.5 mg/L, and 22.5 mg/L

respectively by enhanced biochemical treatment, and the average removal rate were 96.5%, 99.6%, 95.4%, respectively. The effluent from the enhanced biological nitrogen removal reactor enters into the denitrification biofilter treatment system, which can further achieve a total nitrogen removal rate of up to 69.0%, ensuring a stable total nitrogen in the effluent below 10 mg/L. When the influent COD fluctuates greatly, the Fenton oxidation treatment system is started, and the degradation efficiency of COD can reach 43.6%, ensuring the COD in the effluent below 30 mg/L. The operation chemical and electricity cost of the system includes 1.81 yuan/m³ for softening pre-treatment, 2.95 yuan/m³ for enhanced biological nitrogen removal reactor and denitrification biofilter, 0.51 yuan/m³ for Fenton oxidation treatment, and 5.27 yuan/m³ for total cost.

Key words: coal-to-hydrogen wastewater; synthetic ammonia wastewater; enhanced biological nitrogen removal reactor; softening pre-treatment; denitrification biofilter; Fenton oxidation tank

推进煤炭清洁高效利用是实现“双碳”目标的重要途径,国家“十四五”规划也对此提出了明确要求。煤气化技术是煤炭高效洁净利用的核心技术,利用煤气发生炉或气化炉将煤炭中可燃组分转化为可燃气体^[1],如H₂、CH₄、CO等。氢能被认为21世纪最优清洁能源,全国氢气产能超过2 000×10⁴ t/a^[2],其中利用化石燃料如煤、天然气等生产的氢气占比近70%;氢气最大的终端消费领域是合成氨^[3];73.7%的合成氨以煤为原料生产^[4]。由此可知,煤气化制氢进而合成氨仍是目前国内重要的能源化工技术路线。随着煤气化制氢产业的发展壮大,其生产过程中产生的难处理废水已成为制约煤化工发展的重要因素之一。

煤气化及合成氨废水是一种典型的高浓度有机废水,不仅氨氮含量极高,且C/N偏低导致反硝化脱氮碳源不足。该类煤化工废水含有大量长链烯烃和芳香烃物质,还有部分有毒有害物质(如挥发酚、氰化物、硫化物等),影响生化处理效果^[5-6]。此类废水中有机成分大多来自气化炉的煤气洗涤和冷凝过程,此外,煤化工其他生产车间还会产生变换废水、脱硫脱碳废水、锅炉冷却循环废水等多种性质不同的废水。煤气化及合成氨废水中还含有高浓度的钙镁离子,总硬度高达1 500 mg/L甚至2 000 mg/L以上,易结垢并堵塞管道^[7]。

对于煤气化及合成氨废水,目前多采用化学除硬+SBR反应器^[8]、SBR短程硝化反硝化^[9]、USAB厌氧消化^[10]等工艺,以“厌氧水解+两级AO”工艺为主体的工程案例鲜有报道。

以某煤化工企业的污水处理工程为例,针对其

水质复杂、出水标准高的难点,采用“软化预处理-强化生物脱氮反应器-反硝化生物滤池”工艺进行处理,取得较好效果,可为同类水质处理工程的设计、运行提供参考。

1 工程设计

1.1 废水水质及工艺流程

该煤化工企业以煤炭为原料利用煤气化技术制取纯氢气、液氨、硫酸等产品,生产规模为液氨40×10⁴ t/a、氢气4×10⁸ m³/a,操作时间达8 000 h/a。该企业废水主要包括煤气化废水、低温甲醇洗废水以及氨合成废水。

废水处理工程设计进水水质及排放标准如表1所示。

表1 设计进水水质及排放标准

Tab.1 Wastewater quality and discharge standard

项目	设计进水水质	排放标准
pH	6.0~9.0	6~9
总硬度(以CaCO ₃ 计)/(mg·L ⁻¹)	≤1 000	—
COD/(mg·L ⁻¹)	≤800	≤30
总氮/(mg·L ⁻¹)	≤500	≤10
氨氮/(mg·L ⁻¹)	≤400	≤3

由表1可见,废水呈现高总氮、高氨氮、低碳氮比等特点。该工程设计规模7 200 m³/d,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准、《石油化学工业污染物排放标准》(GB 31571—2015)直接排放标准以及《合成氨工业水污染物排放标准》(DB 41/538—2017)直接排放标准三者中的最严值。

为使高氮废水达标排放,该污水处理站采用

“软化预处理-强化生物脱氮反应器-反硝化生物滤池”工艺,工艺流程见图1。

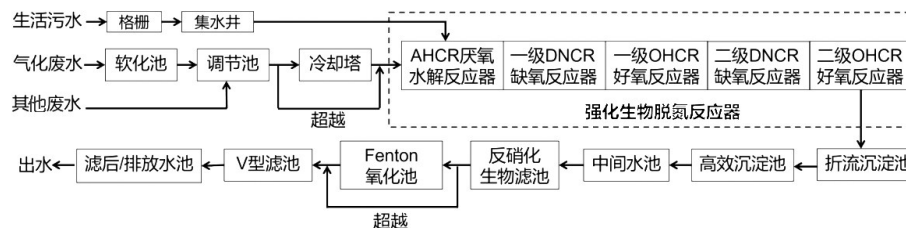


图1 煤气化及合成氨废水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of coal-to-hydrogen and synthetic ammonia wastewater treatment process

因煤气化及合成氨的气化废水总硬度高达1 000 mg/L,容易引发管道堵塞并严重影响后续处理,故软化预处理段先后投加NaOH、 Na_2CO_3 ,然后与混凝剂PAC、助凝剂PAM充分反应后自流进入沉淀区进行泥水分离以降低总硬度,出水投加 H_2SO_4 ,调节pH后进入调节池。调节池内设搅拌机均衡水质,同时避免悬浮物沉淀。调节池出水由提升泵送至冷却塔降温,控制出水温度低于35℃。若水温低于设定值,则可超越冷却塔,直接进入强化生物脱氮反应器。

废水中大分子有机物在AHCR厌氧水解反应器中被迅速分解成小分子有机物,煤气化废水的可生化性得以大大提升。在一级DNCR缺氧反应器中, NO_3^- 、 NO_2^- 被反硝化菌转化为 N_2 ,脱氮后的废水自流进一级OHCR好氧反应器继续进行硝化反应降低氨氮,同时水中有机物在异养菌作用下进一步被分解成 CO_2 和 H_2O 。二级DNCR缺氧反应器中的反硝化菌继续去除水中残余的硝态氮,由于废水的碳氮比极低,其充分反硝化作用需补充外部碳源,多余碳源在二级OHCR好氧反应器内被去除。强化生物脱氮反应器出水进入折流沉淀池后进行泥水分离,一部分污泥回流至一级DNCR缺氧反应器或AHCR厌氧水解反应器。

高效沉淀池出水依次进入中间水池、反硝化生物滤池。反硝化生物滤池的滤料表面附着的生物膜利用进水和外加的碳源进一步去除水中残余的总氮;同时,滤层还可以截留一部分SS。向Fenton氧化池内投加 H_2SO_4 、 H_2O_2 和 FeSO_4 ,在pH为3左右发生Fenton反应,将难降解有机物进一步氧化分解。

1.2 主要处理单元设计

① 软化反应沉淀池

软化反应沉淀池1座2组,尺寸为18.5 m×13.5 m×6.2 m,每组设3格:pH调整池、混凝反应池和絮

凝反应池,每格水力停留时间(HRT)20 min。第一格设1台桨式搅拌机,投加NaOH,控制pH为9~10;第二格设1台桨式搅拌器, Na_2CO_3 投加量为300~500 mg/L,PAC投加量为50~100 mg/L;第三格设1台框式搅拌机,PAM投加量为3~5 mg/L。另设pH回调池,HRT为3 min,投加 H_2SO_4 控制出水pH为8~9。

② 调节池

调节池1座,主要用于收集软化后的气化废水、低温甲醇洗废水以及合成氨废水,调节水质水量稳定后进入下一工段。调节池尺寸为33.2 m×33.0 m×7.5 m,设8台潜水混合搅拌器。

③ 强化生物脱氮反应器

强化生物脱氮反应器1座2组,总尺寸为66.2 m×83.7 m×7.5 m,由AHCR厌氧水解反应器、两级DNCR缺氧反应器和两级OHCR好氧反应器组成。AHCR厌氧水解反应器的HRT为6.5 h,单组尺寸为19.95 m×7.00 m×7.50 m,池内设置高比表面积叠片展开式球形微生物载体,高度为3 m,设2台推流式潜水搅拌器。一级DNCR缺氧反应器单组尺寸为45.8 m×9.2 m×7.5 m,HRT为19.7 h,设4台推流式潜水搅拌器,利用生产装置的废甲醇作为外加碳源,反硝化负荷为0.138 $\text{kgNO}_3^-/\text{N}/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$;一级OHCR好氧反应器HRT为72 h,单组由3条廊道组成,尺寸分别为45.80 m×10.35 m×7.50 m、45.80 m×10.35 m×7.50 m、53.20 m×10.35 m×7.50 m,设2 494套倒伞型免堵塞微孔曝气器,氨氮负荷为0.038 $\text{kg}/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$, BOD_5 负荷为0.1 $\text{kg}/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$,末端设置2台潜水回流泵,1用1备,将泥水混合液回流至一级DNCR缺氧反应器的进水端;二级DNCR缺氧反应器水力停留时间为8.4 h,单组尺寸为23.0 m×8.0 m×7.5 m,利用生产装置的废甲醇作为外加碳源;二级OHCR好氧反应器HRT为6.3 h,用于降解二级DNCR缺氧反应器出水中残留有机物,

单组尺寸为17.5 m×8.0 m×7.5 m,设182套倒伞型免堵塞微孔曝气器。

④ 折流沉淀池

折流沉淀池1座2组,单组尺寸为41.25 m×6.00 m×7.50 m,单组表面负荷 $0.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,设1台行车式吸泥机,配2台吸泥泵,流量为 $75 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

⑤ 高效沉淀池

高效沉淀池1座2组,与泵房、中间水池合建,总尺寸为24.35 m×11.82 m×6.60 m,每组设2格反应池:混凝反应池和絮凝反应池,反应时间分别为3.0、11.0 min。第一格设桨式搅拌器,PAC投加量为50~100 mg/L;第二格设升流式桨式搅拌器,PAM投加量为3~5 mg/L,每组沉淀池设置1台刮泥机,直径6.2 m。

⑥ 反硝化生物滤池

反硝化生物滤池1座2组,与V型滤池、泵房合建,总尺寸为10.35 m×6.90 m×6.60 m,在进水口设碳源混合池,混合时间2 min,设1台桨式混合搅拌机。

⑦ Fenton氧化池

Fenton氧化池1座2组,反应池总尺寸为38.9 m×4.2 m×6.1 m,辐流式沉淀池单组直径18 m。设pH调节池,配1台桨式反应搅拌机,设计投加 H_2SO_4 和 FeSO_4 , FeSO_4 投量为120 mg/L,投加硫酸控制pH为2.5~3.5,混合时间6.0 min;设反应池1,穿孔曝气管搅拌,投加 H_2O_2 ,反应48 min;设反应池2,穿孔曝气管搅拌,反应48 min;设脱气池,穿孔曝气管搅拌,投加NaOH控制pH为8~9,脱气30 min;设絮凝池,采用框式反应搅拌机,投加PAM反应15 min。沉淀池内设1台1.1 kW中心传动刮泥机。

⑧ V型滤池

V型滤池1座2组,总尺寸为13.0 m×7.5 m×4.5 m,单组过滤段为4.6 m×4.8 m×4.5 m。

⑨ 滤后/排放水池

滤后/排放水池1座,滤后水池和消毒池合建,总尺寸为12.70 m×10.30 m×4.55 m,外排水池停留时间40 min,消毒时间60 min。

2 实际运行效果

2.1 硬度去除效果

软化反应沉淀池某月实际运行进、出水总硬度数据如图2所示。可以看出,经软化处理后的废水总硬度明显降低,软化反应沉淀池进水平均总硬度为794.2 mg/L时,出水总硬度平均值降至299.1 mg/L,

平均去除率为62.3%。进水中的总硬度主要为钙硬度,通过控制适宜的反应pH及 Na_2CO_3 投加量生成碳酸钙沉淀,降低水中硬度,该体系对高、低硬度进水均有明显效果,具有较强的抗冲击负荷能力。

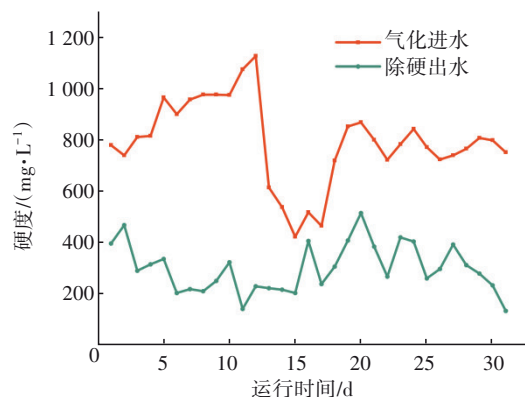
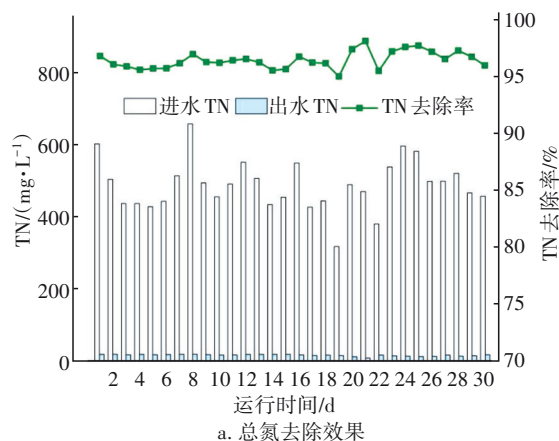


图2 软化反应沉淀池硬度去除效果

Fig.2 Removal effect of total hardness in softening reaction sedimentation tank

2.2 氨氮和总氮去除效果

该工艺试运行稳定后,强化生物脱氮反应器对总氮和氨氮的去除效果如图3所示。该生化处理系统连续运行30 d,对总氮的去除效果稳定,总氮从488.2 mg/L降至17.0 mg/L,平均去除率可达96.5%。总氮中氨氮平均占比为87.1%,其次为硝态氮和有机氮。氨氮在该生化系统中大幅降低,当进水氨氮平均浓度为425.3 mg/L时,对氨氮的平均去除率高达99.6%,出水平均氨氮浓度为1.5 mg/L。强化生物脱氮反应器通过一、二级DNCR缺氧反应器的缺氧反硝化作用共同去除废水中的氮,根据进水水质合理设计一、二级反硝化段不同的除氮量,可避免大比例混合液回流对缺氧反硝化的抑制作用,强化硝化、反硝化作用,取得良好的除氮效果。



a. 总氮去除效果

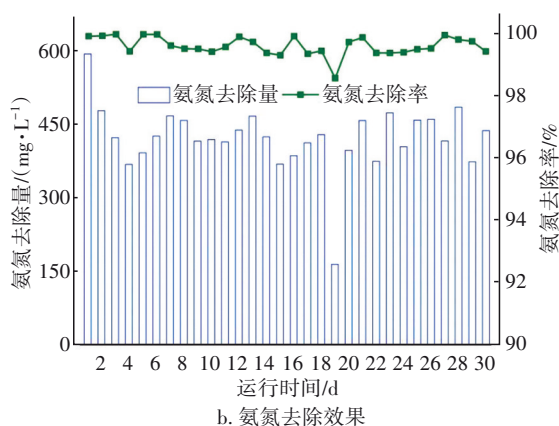


图3 生化处理段对总氮和氨氮的去除效果

Fig.3 Removal effect of total nitrogen and ammonia nitrogen by enhanced biological nitrogen removal reactor

强化生物脱氮反应器极大地降低了总氮及氨氮浓度,其出水中的氮大多以硝态氮形式存在。该工程出水总氮和氨氮排放标准严格,尤其是总氮要求小于10 mg/L,强化生物脱氮反应器出水总氮平均为17 mg/L,为了进一步降低总氮,出水需进入反硝化生物滤池。水中残余硝态氮在反硝化生物滤池滤料表面附着的生物膜作用下,经反硝化过程转化为氮气逸出。反硝化生物滤池运行31 d的总氮处理效果如图4所示。

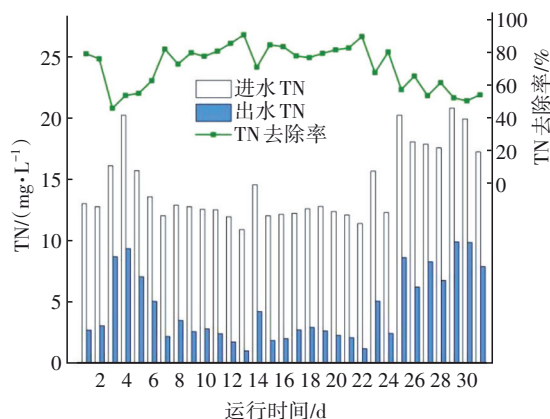


图4 反硝化生物滤池脱氮效果

Fig.4 Removal effect of total nitrogen in denitrification biofilter

由图4可见,反硝化生物滤池能达到69.0%的总氮平均去除率、出水总氮平均值为5.3 mg/L,远低于总氮<10 mg/L的排放标准。

2.3 COD去除效果

生化处理段COD去除效果见图5,生化处理段各单元出水COD浓度变化见图6。

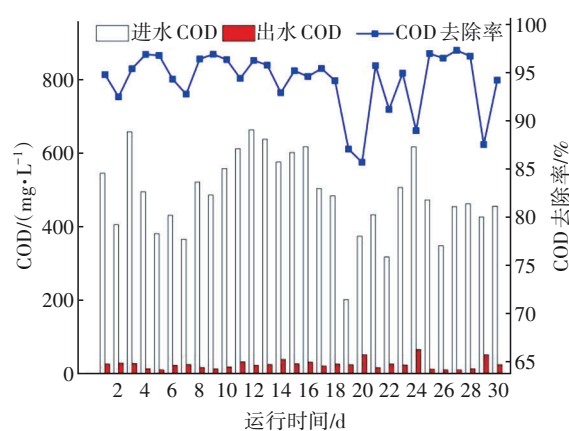


图5 生化处理段COD去除效果

Fig.5 Removal effect of COD in biological treatment

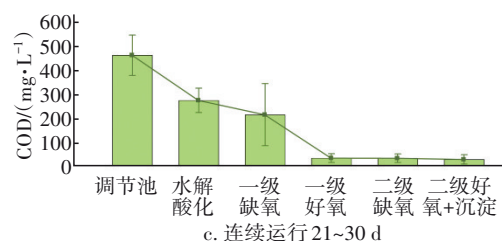
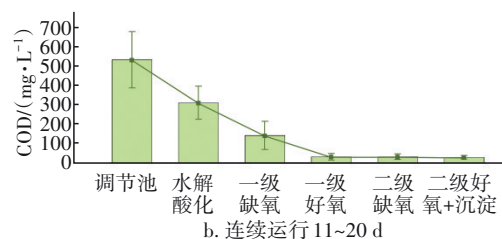
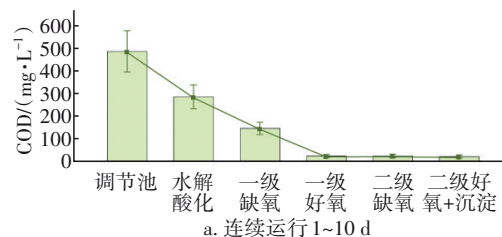


图6 生化处理段各单元出水COD浓度变化

Fig.6 Change of effluent COD in each biological treatment unit

由图5可见,强化生物脱氮反应器对COD的去除效果明显;图6显示各处理单元的出水COD,调节池的平均COD为488.7 mg/L,经过AHCR厌氧水解、一级DNCR缺氧、一级OHCR好氧反应器处理后,COD降至30.4 mg/L,经过二级DNCR缺氧反应器、二级OHCR好氧反应器及高效沉淀池处理后,出水平均COD为22.5 mg/L,平均去除率达95.4%。AHCR厌氧水解反应器在降低有机物的同时提高了废水的可生化性,其出水中的有机物和投加的甲醇共同作为一级DNCR缺氧反应器缺氧反硝化的

碳源,在一级 DNCR 缺氧反应器进一步降低,一级 OHCR 好氧反应器在好氧微生物作用下大幅降低废水中的 COD,二级 DNCR 缺氧反应器和二级 OHCR 好氧反应器对 COD 降解效率不高,主要是因为废水中能作为反硝化碳源被好氧微生物降解的大部分有机物已在前段去除。

若进水水质波动很大,强化生物脱氮反应器无法将 COD 降至排放标准(30 mg/L)时,将启用 Fenton 氧化池进一步氧化分解水中有机物。Fenton 氧化段 COD 去除效果如图 7 所示。

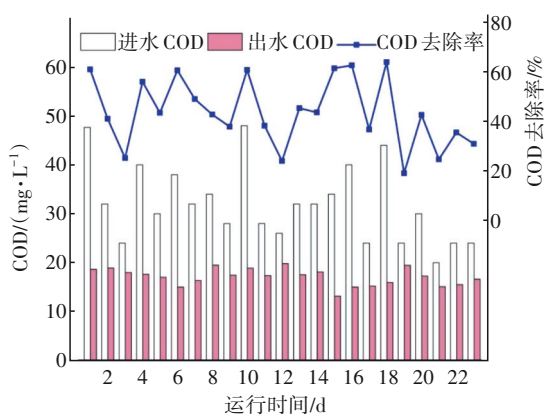


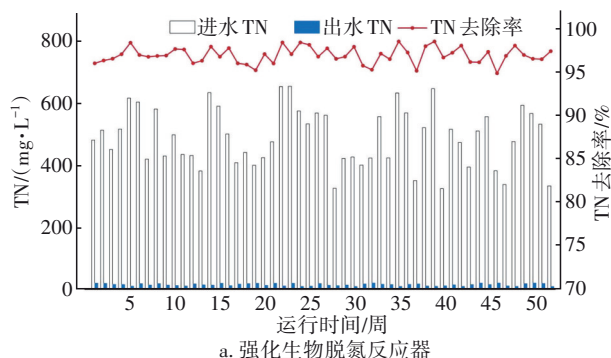
图7 Fenton 氧化段 COD 去除效果

Fig.7 Removal effect of COD in Fenton oxidation

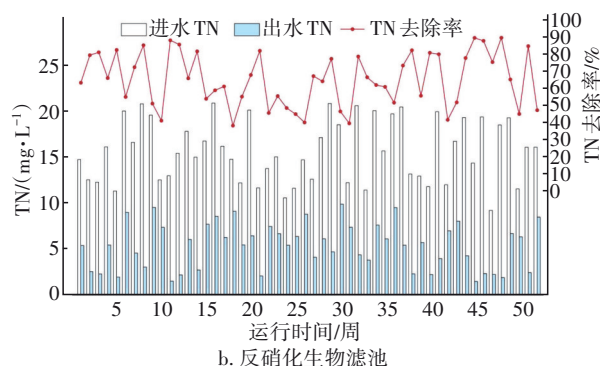
收集 Fenton 氧化池 23 d 的运行数据,进水平均 COD 浓度为 32.0 mg/L 时,平均去除率为 43.6%,最终出水 COD 稳定在 13.2~19.8 mg/L,处理效果好。Fenton 氧化池利用 H_2O_2 和 $FeSO_4$ 产生的羟基自由基的强氧化作用可无选择性地降解废水中的有机物并根据进水水质灵活调节加药量,对进水水质波动的适应性强,可完全保障系统出水 COD 满足排放要求。

2.4 长期运行效果

该系统连续一年的总氮去除效果如图 8 所示。



a. 强化生物脱氮反应器



b. 反硝化生物滤池

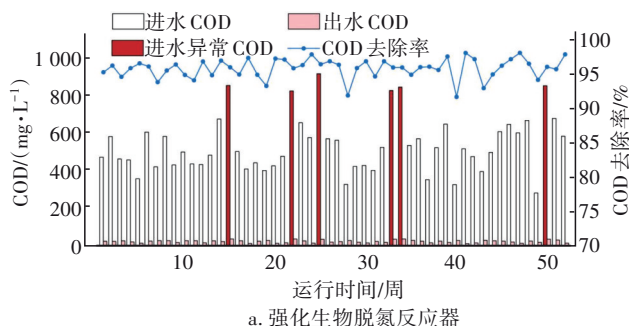
图8 强化生物脱氮反应器和反硝化生物滤池的脱氮效果

Fig.8 Removal effect of total nitrogen in enhanced biological nitrogen removal reactor and denitrification biofilter

进水总氮周平均值为 324.4~654.6 mg/L、波动较大,但强化生物脱氮反应器出水总氮维持在 8.5~19.6 mg/L,大幅削减了煤气化废水中的氮含量。反硝化生物滤池处理效果优异,保证出水总氮在 10 mg/L 以下,其中 22 周的平均出水总氮低于 5 mg/L。

强化生物脱氮反应器对 COD 连续一年的去除效果如图 9(a) 所示。进水 COD 的周平均值为 279.6~677.0 mg/L 时,该反应器能完全保证出水 COD 低于 30 mg/L;当进水 COD 显著升高且高于 800 mg/L 时,进水中的难降解有机物增加,为保证系统出水 COD 达标,启用 Fenton 氧化池对 COD 进一步去除,各组运行时间依次为:第 1 组 2023-12-20—2023-12-26,第 2 组 2024-02-14—2024-02-20,第 3 组 2024-03-06—2024-03-12,第 4 组 2024-05-01—2024-05-07,第 5 组 2024-05-08—2024-05-14,第 6 组 2024-09-25—2024-10-01,处理效果如图 9(b) 所示。Fenton 氧化池出水 COD 平均值为 18.4 mg/L,稳定小于 30 mg/L。

由图 8、9 可见,该系统连续长时间运行,出水总氮及 COD 稳定达标,具有良好的稳定性和较强的冲击负荷适应性。



a. 强化生物脱氮反应器

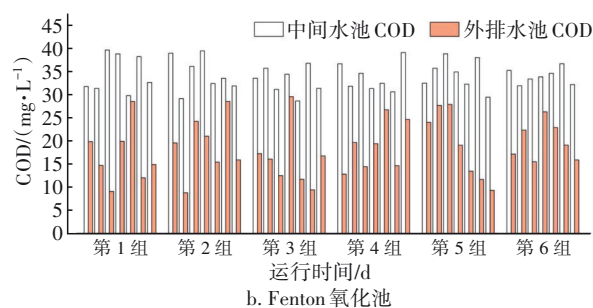


图9 强化生物脱氮反应器和Fenton氧化池的COD去除效果

Fig.9 Removal effect of COD in enhanced biological nitrogen removal reactor and Fenton oxidation process

2.5 技术及经济分析

该工程设计处理水量为7 200 m³/d,其中软化预处理系统为5 760 m³/d。主要运行成本包括电费、药剂费,合计5.27元/m³,具体核算见表2。

表2 各工艺段主要运行费用

Tab.2 Main operating costs for each process section

项目		消耗量	价格	运行费用/(元·m ⁻³)
软化预处理段	耗电量	343.04 kW·h/d	0.65元/(kW·h)	0.04
	氢氧化钠(32%)	4 680.00 kg/d	1.2元/kg	0.98
	浓硫酸(98%)	881.63 kg/d	0.5元/kg	0.08
	碳酸钠(98%)	1 526.40 kg/d	2.1元/kg	0.56
	混凝剂PAC	288.00 kg/d	2.5元/kg	0.13
	阴离子型PAM	11.52 kg/d	10.0元/kg	0.02
生化处理和反硝化生物滤池段	耗电量	12 571.27 kW·h/d	0.65元/(kW·h)	1.13
	混凝剂PAC	360.00 kg/d	2.5元/kg	0.13
	磷酸氢二钠	18.60 kg/d	2.5元/kg	0.01
	氢氧化钠(32%)	9 633.38 kg/d	1.2元/kg	1.61
	阳离子型PAM	18.70 kg/d	20.0元/kg	0.05
	阴离子型PAM	14.40 kg/d	10.0元/kg	0.02
Fenton氧化工艺段	耗电量	851.66 kW·h/d	0.65元/(kW·h)	0.08
	氢氧化钠(32%)	1 125.00 kg/d	1.2元/kg	0.19
	浓硫酸(98%)	1 080.00 kg/d	0.5元/kg	0.08
	双氧水	654.54 kg/d	1.1元/kg	0.10
	硫酸亚铁	147.17 kg/d	0.36元/kg	0.01
	阴离子型PAM	21.60 kg/d	10元/kg	0.03
	次氯酸钠(10%)	144.00 kg/d	1元/kg	0.02
注: 软化预处理段+强化生物脱氮反应器段和反硝化生物滤池段+Fenton氧化工艺段总计运行费用为5.27元/m ³ 。				

由表2可知,运行费用包含软化预处理段、生化处理段和反硝化生物滤池段、芬顿氧化工艺段三部

分,其中软化预处理段为1.81元/m³,生化处理段和反硝化生物滤池段为2.95元/m³,Fenton氧化工艺段为0.51元/m³。因为反硝化过程中投加的碳源来自该厂煤化工工艺段所产生的废甲醇,“以废治废”极大降低了生化处理的运行成本。

通过煤气化进而制氢、合成氨、制甲醇等为常用的煤化工工艺路线,而煤气化废水为煤化工生产过程中的主要废水。针对煤气化废水高硬度、高氮等特点,目前常采用除硬+SBR或除硬+A/O处理工艺。古才荣^[8]采用“除硬+SBR”工艺处理煤气化制氢废水,出水COD基本可小于50 mg/L,进水总氮平均为300 mg/L,出水最低为4 mg/L、最高为37 mg/L、平均为25 mg/L,处理效果不稳定,出水水质难以稳定达标,处理成本为5.43元/m³。

该项目出水COD、氨氮、总氮分别稳定小于30、3、10 mg/L,进水总氮、氨氮虽远高于类似工程案例,但出水水质远远优于常规工艺且运行效果稳定。“软化预处理段+生化处理和反硝化生物滤池段”主要运行费用为4.76元/m³,当进水水质波动时启用Fenton氧化工艺段,总主要运行费用为5.27元/m³。在进水氮含量高且出水实现直排的严格要求下,该项目运行成本低于类似工程案例,具有经济性。

3 结语

煤气化制氢及合成氨废水具有高硬度、高总氮、高氨氮、低碳氮比的特点,采用“软化预处理-强化生物脱氮反应器-反硝化生物滤池”工艺处理后,出水水质可稳定优于一级A排放标准。当进水总硬度、总氮、氨氮、COD平均值分别为794.2、488.2、425.3、488.7 mg/L时,软化系统对废水总硬度的平均去除率为62.3%;强化生物脱氮反应器可将总氮、氨氮、COD分别降至17.0、1.5、22.5 mg/L,平均去除率分别为96.5%、99.6%、95.4%;强化生物脱氮反应器出水进入反硝化生物滤池,可进一步实现69.0%的总氮平均去除率,确保出水总氮稳定达到10 mg/L以下。当进水COD波动时,启动Fenton氧化工艺,可以达到43.6%的COD平均去除率,确保出水COD稳定小于30 mg/L。该项目出水可长期稳定达标排放,具有极好的稳定性和抗冲击负荷能力。

参考文献:

[1] 王利峰. 我国煤气化技术发展展望[J]. 洁净煤技

- 术, 2022, 28(2): 115-121.
- WANG Lifeng. Development and prospect of coal gasification technology in China [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(2): 115-121 (in Chinese).
- [2] 刘坚, 钟财富. 我国氢能发展现状与前景展望 [J]. 中国能源, 2019, 41(2): 32-36.
- LIU Jian, ZHONG Caifu. Current status and prospect of hydrogen energy development in China [J]. Energy of China, 2019, 41(2): 32-36 (in Chinese).
- [3] 熊亚林, 刘玮, 高鹏博, 等. “双碳”目标下氢能在我国合成氨行业的需求与减碳路径 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(12): 4048-4058.
- XIONG Yalin, LIU Wei, GAO Pengbo, *et al.* Research on the hydrogen energy demand and carbon-reduction path in China's synthetic ammonia industry to achieve the “carbon peak” and “carbon neutrality” goals [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(12): 4048-4058 (in Chinese).
- [4] 李育磊, 刘玮, 董斌琦, 等. 双碳目标下中国绿氢合成氨发展基础与路线 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(9): 2891-2899.
- LI Yulei, LIU Wei, DONG Binqi, *et al.* Green hydrogen ammonia synthesis in China under double carbon target: research on development basis and route [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9): 2891-2899 (in Chinese).
- [5] 程瀚洋, 夏俊兵, 王波, 等. 典型煤制气废水处理工艺优化改造研究 [J]. 工业水处理, 2020, 40(10): 126-128.
- CHENG Hanyang, XIA Junbing, WANG Bo, *et al.* Optimization wastewater treatment process for a typical coal-to-natural project [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(10): 126-128 (in Chinese).
- [6] 朱昊, 李双涛, 刘汉飞, 等. 煤制气废水厌氧处理技术研究进展与机理解析 [J]. 工业水处理, 2022, 42(8): 43-50.
- ZHU Hao, LI Shuangtao, LIU Hanfei, *et al.* Research progress and mechanism analysis of anaerobic treatment technology for coal gasification wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(8): 43-50 (in Chinese).
- [7] 李程, 王敬楠, 崔新安. 三维电极法处理煤化工气化废水 [J]. 化工环保, 2024, 44(3): 371-376.
- LI Cheng, WANG Jingnan, CUI Xin'an. Treatment of gasification wastewater from coal chemical industry by three-dimensional electrode method [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2024, 44(3): 371-376 (in Chinese).
- [8] 古才荣. 高硬度高氨氮煤制氢污水处理技术的工业应用 [J]. 石油炼制与化工, 2022, 53(2): 123-126.
- GU Cairong. Commercial application of high hardness and ammonia nitrogen wastewater treatment technology for coal gasification [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2022, 53(2): 123-126 (in Chinese).
- [9] 王刚, 翟亚男, 高会杰. SBR 短程硝化反硝化技术处理煤制氢废水 [J]. 当代化工, 2021, 50(12): 2896-2900.
- WANG Gang, ZHAI Yanan, GAO Huijie. Treatment of coal gasification wastewater by short-cut nitrification-denitrification process [J]. Contemporary Chemical Industry, 2021, 50(12): 2896-2900 (in Chinese).
- [10] KONG W, LI Y, ZHANG Y, *et al.* Biological treatment of refractory organic compounds in coal gasification wastewater: a review [J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 60: 105255.

作者简介: 马俊(1982-), 女, 甘肃静宁人, 硕士, 高级工程师, 主要从事污染治理技术研究工作。

E-mail: majun19820326@126.com

收稿日期: 2025-01-23

修回日期: 2025-02-26

(编辑: 衣春敏)