

内循环回流比和碳源投加量对两段进水 A/O 工艺去除重油加工污水氮污染物的影响

李长刚^{1,3}, 阎光绪^{2,3}, 郭绍辉^{1,3*}

1 中国石油大学(北京)理学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)化学工程学院, 北京 102249

3 中国石油大学(北京)油气污染防治北京市重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, cupgsh@163.com

收稿日期: 2018-09-03

国家自然科学基金联合基金(U1462201)资助

摘要 为了提高传统重油加工污水处理厂氮污染物的去除效率, 实现碳、氮污染物的协同脱除, 本文结合现场生化装置运行参数和前期研究成果, 构建了两段进水 A/O 工艺中试实验装置和运行参数。侧线实验在一个重油加工污水处理厂开展, 以水解酸化单元出水为处理对象。控制工艺条件: 分段进水比例为 7:3、外循环回流比 1、溶解氧浓度(缺氧区 0.1~0.4 mg/L, 好氧区 3.5~4.5 mg/L), 重点考察第 1 段 A/O 内循环回流比 R 值、第 2 段 A/O 反硝化段外加碳源(葡萄糖)量对装置氮污染物去除效果的影响。研究表明, 适当增加内循环回流比和碳源投加量, 可以明显提高两段 A/O 工艺的总氮去除能力, 并且不会降低有机污染物的去除效果。研究确定, 最佳内循环回流比 R 值为 0.5, 碳源投加量为 30 mg/L。在此条件下, 总氮去除率可达 84.7%, 出水总氮质量浓度可以控制在 10 mg/L 以下, 实现了重油加工污水深度脱氮。

关键词 重油加工污水; 两段 A/O 工艺; 内循环回流比; 碳源; 脱氮

随着全球能源消费地不断增长, 世界原油重质化趋势加剧, 发展重油加工是目前中国炼油工业乃至世界炼油工业的重要任务^[1]。重油轻质化主要采用脱碳和加氢两种方式, 经过多年的技术攻关和实践, 我国已经形成了比较成熟的重油加工技术、工艺和设备, 年重油及减压渣油加工量已经超过 1 亿吨^[2]。重油含有大量的非烃类极性杂原子(S、N、O)化合物, 在加工过程中这些杂原子化合物会转化到污水中, 形成重油加工污水, 其特点是难降解, 有机污染物含量高, 优质碳源较少^[3-6]。经过多年的环保技术攻关, 炼油企业已经基本解决污水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 S^{2-} 三个关键指

标达标排放的问题。但是随着《水污染防治行动计划》的发布, 总氮指标首次被列入污染物排放总量控制约束性指标体系, 我国的炼油企业在环保方面将面临污水总氮达标的严峻考验^[7], 已成为制约炼油工业可持续发展的“瓶颈”之一。

目前, 我国的炼油企业污水脱氮工艺主要以传统的 A/O 脱氮工艺为主, 运行方式为好氧条件, 主要控制 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 指标, 将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 排放, 总氮去除效率低。为提高总氮去除率, 企业多采用加大硝化液回流比和投加碳源等方式。但是在生产实践中发现存在 3 个问题: 1) 硝化液回流比增加将引

引用格式: 李长刚, 阎光绪, 郭绍辉. 内循环回流比和碳源投加量对两段进水 A/O 工艺去除重油加工污水氮污染物的影响. 石油科学通报, 2018, 04: 475-482

LI Changgang, YAN Guangxu, GUO Shaohui. Effect of internal recycle ratio and carbon source dosage on nitrogen removal performance of the A/O process with two-step-feeding in treating heavy oil processing wastewater. Petroleum Science Bulletin, 2018, 04: 475-482. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.04.043

起反硝化区溶解氧上升,导致溶解氧条件不能满足反硝化要求;2)减少了A/O工艺的污水停留时间,导致有机污染物、氨氮、硝态氮的降解时间缩短,降低了装置处理效能;3)运行成本增加。如何在现有工艺条件的基础上,科学合理地优化运行参数,实用、经济地获得深度脱总氮效果,是解决污水达标问题的关键。分段进水A/O工艺具有较高的脱氮效率、较长的水力停留时间,碳氮污染物协同降解效果好等特点^[8-17]。在前期的工作中,对重油加工污水研究了污泥大循环回流比对两段进水A/O工艺地影响,取得了良好效果,但未实现 $TN \leq 15 \text{ mg/L}$ 的目标^[18]。分析原因发现,第1段A/O脱总氮效能没有完全发挥,第2段A/O反硝化缺乏优质碳源。为此,本研究针对这两点开展了中试侧线实验研究,通过增加第1段A/O内循环回流比 R 值,补充第2段A/O反硝化段所缺碳源,强化两段进水A/O工艺的脱氮能力,以期实现重油加工污水氮、碳污染物深度协同脱除。

1 材料与方法

1.1 材料和仪器

实验污水:某典型重油加工企业污水处理场水解酸化出水,实验期间进水COD、TN、氨氮、硝态氮、有机氮均值依次为 380 mg/L 、 60 mg/L 、 52 mg/L 、 6.1 mg/L 和 1.5 mg/L 。

器材及仪器:紫外分光光度计,L6,上海仪电分

析仪器有限公司;TN/TOC分析仪,TOC-L,岛津;可见分光光度计,7230G;上海精科仪器有限公司;便携式水质分析仪,U-50,日本HORIBA;电热恒温鼓风干燥箱,101-0A,上海叶拓。

1.2 分析项目及方法

COD分析参照GB/T 11914-1989中的方法, NH_4^+-N 分析参照HJ 636-2012中的方法, NO_3^--N 分析参照HJ/T 346-2007中的方法。TN采用岛津TOC-L分析仪测定,DO、温度采用HORIBA U-50分析仪测定。

1.3 实验条件

实验工艺及设备:根据现场的硬件设施,模拟构建现场中试实验工艺如图1所示。两段进水A/O反应器总有效容积为 2160 L ,其中 A_1 、 O_1 、 A_2 、 O_2 的容积比为 $1:2.6:1.4:2.2$,好氧单元 O_1 和 O_2 各自均分成3个格室,分别为 O_{11} 、 O_{12} 、 O_{13} 和 O_{21} 、 O_{22} 、 O_{23} ,沉淀池有效容积 150 L 。4台隔膜计量泵分别控制进水、硝化液及污泥回流,1台蠕动泵投加碳源。空压机为好氧单元供气,机械搅拌器为缺氧区提供搅拌。 A_{1in} 和 A_{2in} 分别为反硝化单元 A_1 和 A_2 的进水采样点, A_1 、 A_2 、 O_{12} 、 O_{13} 、 O_{22} 、 O_{23} 的采样点均在相应单元出水侧液面下 10 cm 处, O_{11} 和 O_{21} 的出水采样点在出水侧距池底 20 cm 处设置的取样口采样。

实验装置启动及运行:控制实验温度为 $(33 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$,进水流量 Q 为 30 L/h ,两段进水A/O反应器水力总停

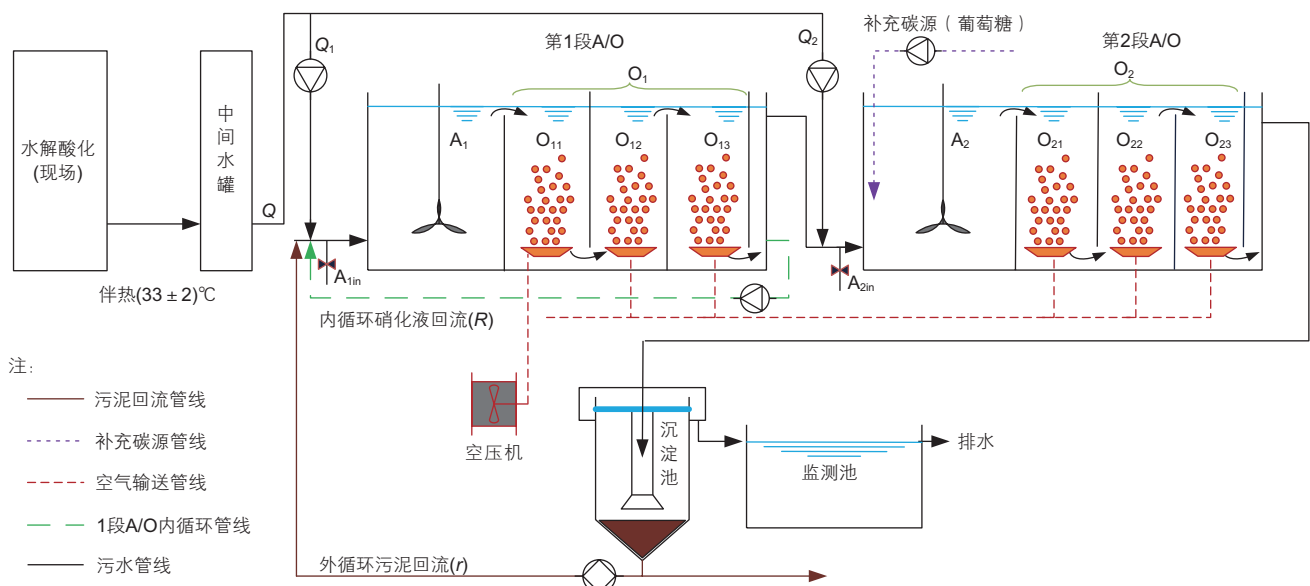


图1 两段进水A/O生物脱氮工艺流程图

Fig. 1 Schematic diagram of two-step-feeding A/O biological nitrogen removal process

留时间 72 h, 其中 A_1 、 O_1 、 A_2 、 O_2 的停留时间分别为 10 h、26 h、14 h 和 22 h。沉淀池停留时间 5 h。两段进水流量比 $Q_1:Q_2$ 为 7:3, 在此条件下, 如果第 1 段 A/O 进水的氨氮完全被硝化, 第二段 A/O 的反硝化单元 A_2 的碳源充足、反硝化条件适宜, 系统的脱氮率可以达到 85%, 实现深度脱总氮。鉴于此, 本文需要考察第 1 段 A/O 的硝化效果以及第 2 段 A/O 的反硝化效果。缺氧单元 A_1 和 A_2 采用 20 r/min 低速搅拌控制溶解氧在 0.1~0.4 mg/L, 好氧段通过调节空气量控制溶解氧在 3.5~4.5 mg/L。污泥回流比 r 值为 1.0, 启动期间两段 A/O 单元均不回流硝化液。间歇排泥控制活性污泥浓度在 4 000 mg/L 左右, 泥龄 SRT 25~30 天。待系统稳定运行后, 改变第 1 段 A/O 的 R 值及第 2 段 A/O 的碳源投加量, 考察它们对两段进水 A/O 工艺脱氮特性的影响。研究发现, 改变一次 R 值, 在第 4~5 天时, 系统会重新达到稳定状态。基于此, R 值影响考察, 每隔 7 天, 改变一次, 共计 21 天。碳源投加量考察, 在 $r=1.0$ 、 $R=0.5$ 条件下, 以葡萄糖为碳源, 每隔 5 天改变一次碳源投加量, 共计 15 天。

2 结果与讨论

2.1 第 1 段 A/O 硝化液回流比对系统处理效果的影响

2.1.1 对总氮去除效果的影响

R 值变化对两段进水 A/O 工艺 TN 去除效果的影响见图 2。由图 2 可知, R 值为 0、0.5、1.0 和 1.5 时, 对应的第 1 段 A/O 出水 TN 依次为 21.1 mg/L、18.0 mg/L、

18.9 mg/L 和 21.9 mg/L, 第 2 段 A/O 出水 TN 依次为 19.1 mg/L、15.4 mg/L、16.9 mg/L 和 19.7 mg/L。 $R=0.5$ 时, 系统对总氮的去除效果最好, 去除率约为 74.3%, 比硝化液回流量为 0 时的总氮去除率 68.2%, 提升了 6.1%。但是, 出水水质还不能满足 $TN \leq 15$ mg/L 的达标要求, 主要是因为 R 值增加只能提升 1 段 A/O 单元的脱氮能力, 并且提升幅度存在上限。

2.1.2 对氨氮去除效果的影响

R 值增加对氨氮去除效果的影响见图 3。由图 3 可知, 在 R 值从 0 增大到 1.50 的过程中, O_{23} 出水氨氮质量浓度均小于 1 mg/L, 去除率均达到了 98% 以上, 表明 R 值增加对氨氮去除效果基本没有影响, 两段进水 A/O 工艺很好地适应了 R 值增加引起的水力负荷增加。但是对各单元出水氨氮分析发现, R 值过高会降低第 1 段 A/O 单元氨氮的去除效果。 R 值为 0、0.5、1.0、1.5 时, 第 1 段 A/O 出水氨氮质量浓度依次为 1.3 mg/L、1.2 mg/L、1.78 mg/L 和 3.5 mg/L。 R 值由 1.0 增加到 1.5 的过程中, O_{13} 出水氨氮开始升高, 表明第 1 段 A/O 的硝化能力在下降。其原因主要是内循环回流量增加会缩短氨氮污染物的停留时间, 导致氨氮不能充分氧化^[19]。 R 值增加对整个工艺的氨氮去除效果基本没有影响, 但是考虑到如果氨氮没有在 $O_{11} \sim O_{13}$ 转化成为硝态氮, 就不可能在 A_2 反硝化去除, 最终在 $O_{21} \sim O_{23}$ 转化成硝态氮排放, 导致系统 TN 去除效果变差, 所以应控制 $R \leq 1.0$ 。

2.1.3 对硝态氮去除效果的影响

如图 4 所示, 随着 R 值增加, 除 A_1 外, 所有采样点的出水硝态氮质量浓度均呈先降低后增加的趋势,

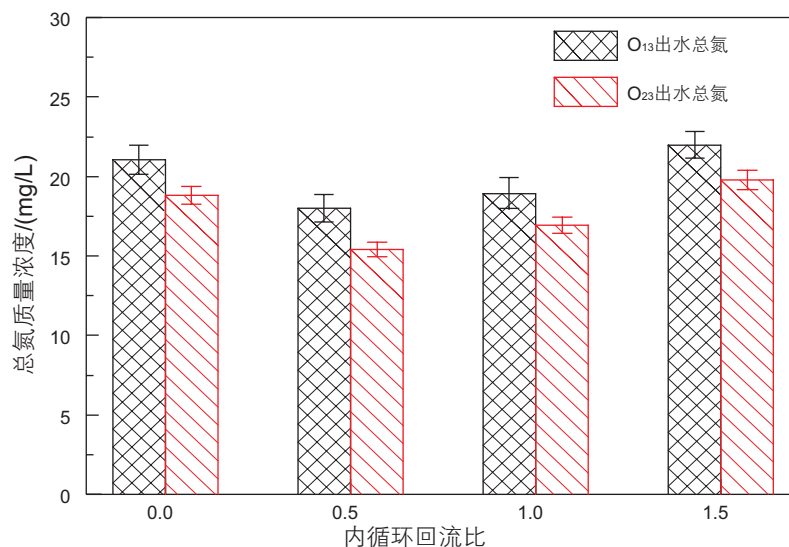


图 2 内循环回流比对总氮去除效果的影响

Fig. 2 Influence of internal recycle ratio on the TN removal

$R=0.5$ 时, 系统对硝态氮去除效果最好, 总出水硝态氮质量浓度最低, 为 14.8 mg/L 。 R 值的增加, 对第 1 段 A/O 单元的反硝化能力影响较大, 对第 2 段 A/O 单元基本没有影响。对于 A_1 单元, 随着 R 值的增加, 出水硝态氮质量浓度呈逐渐增加的趋势。当 $R \leq 0.5$ 时, A_1 出水硝态氮质量浓度均低于 1 mg/L , 表明 A_1 碳源充足反硝化效果良好; 当 R 值由 0.5 增加到 1.5 时, A_1 出水硝态氮质量浓度由 0.75 mg/L 快速增加到 7.87 mg/L , 表明 R 值过高反而会降低 A_1 单元硝态氮去除能力。对

于 A_2 单元, 硝态氮的去除量约在 8 mg/L 左右, 出水残留硝态氮约在 $6\sim 9 \text{ mg/L}$ 。

2.1.4 对 COD 去除效果的影响

R 值增加对 COD 去除效果的影响见图 5。由图 5 可知, R 值的改变对两段进水 A/O 工艺有机污染物去除效果影响较小, 系统的最终出水 COD 在 50 mg/L 左右。分析 R 值变化对各单元 COD 去除效果的影响, 发现 R 值增加对第 1 段 A/O 影响略大, 主要体现在 A_1 进水 COD 因回流稀释而浓度降低, 但是随着反应的进

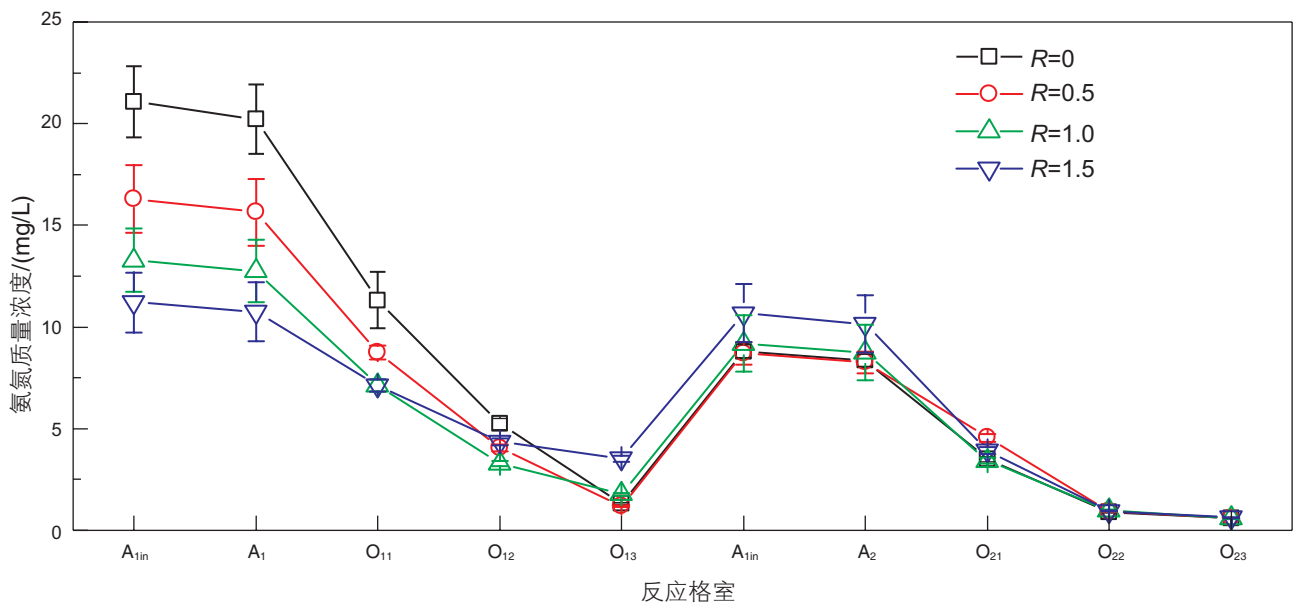


图 3 内循环回流比对氨氮去除效果的影响

Fig. 3 Influence of internal recycle ratio on the ammonia removal

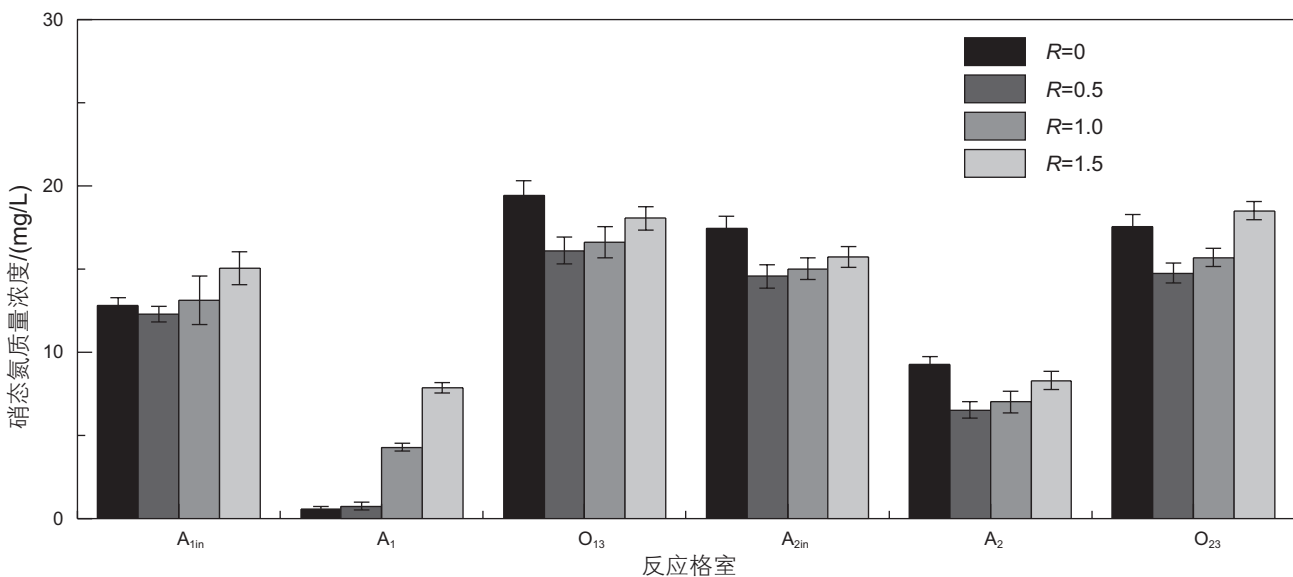


图 4 内循环回流比对硝态氮去除效果的影响

Fig. 4 Influence of internal recycle ratio on the nitrate removal

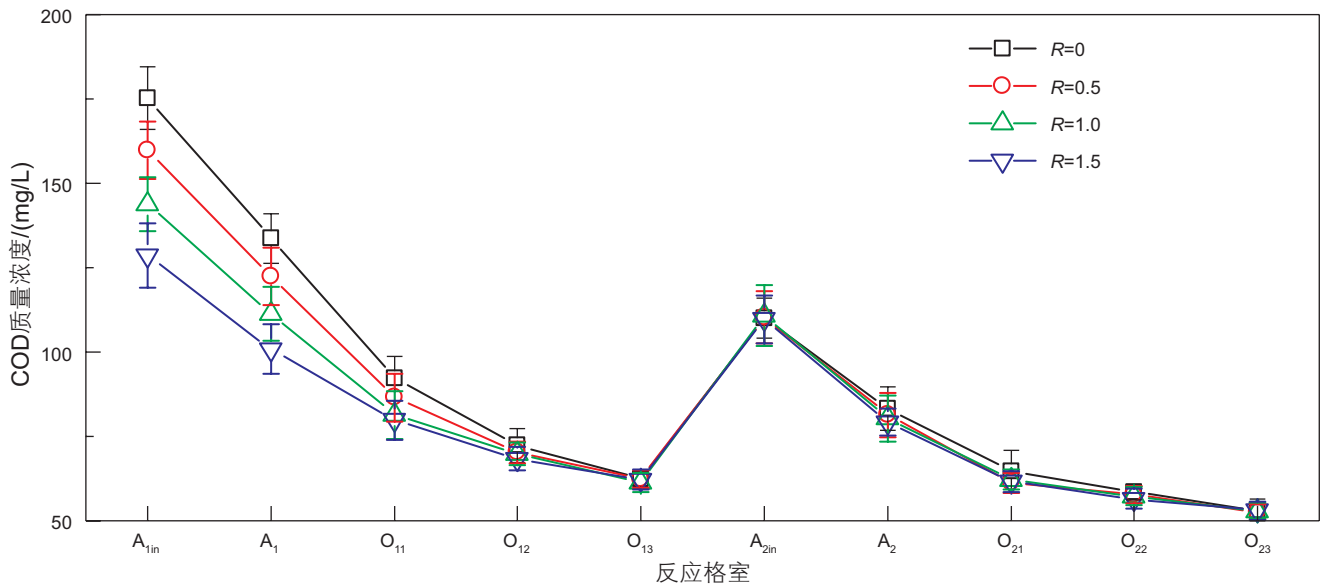


图 5 内循环回流比对 COD 去除效果的影响

Fig. 5 Influence of internal recycle ratio on the COD removal

行,影响越来越小,说明第 1 段 A/O 对水量负荷有较好的适应能力。

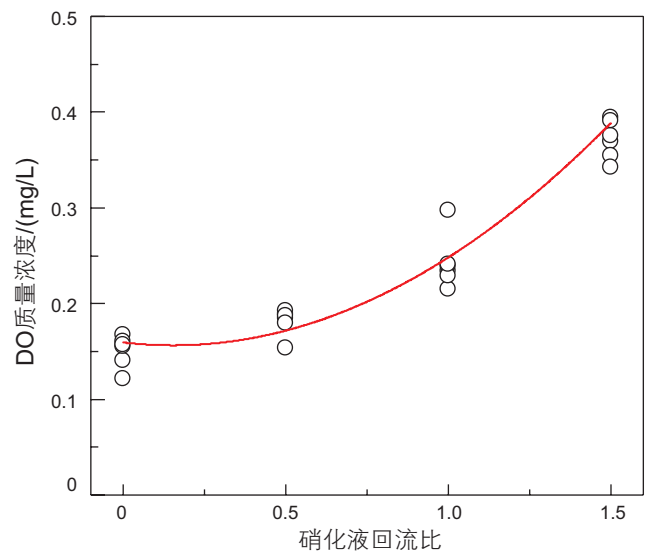
对于第 2 段 A/O, R 值增加对 COD 去除效果基本没有影响。 A_2 单元对 COD 的去除量在 30 mg/L 左右,对硝态氮的去除量约在 8 mg/L 左右(图 4),核算该单元的 COD 去除量与硝态氮去除量的比值,约为 3.75,表明污水中可用于反硝化的优质碳源较少, A_2 单元反硝化功能没有完全发挥。 $O_{21} \sim O_{23}$ 的 COD 降解曲线呈缓慢下降趋势,说明污水中的有机物可生化降解性能较差,已经很难通过活性污泥法去除。此外,第 2 段 A/O 无硝化液回流,相对于传统的 A/O 工艺,其污水停留时间延长了 1~2 倍,可为污水中的降解周期较长有机污染物提供充足的降解时间。

2.1.5 对 A_1 溶解氧的影响

R 值增加对 A_1 溶解氧的影响见图 6。由图 6 可知,随着 R 值的增加, A_1 溶解氧量在逐渐上升,当 R 值为零时,溶解氧约为 0.15 mg/L,当 R 值增加到 1.5 时,溶解氧上升到近 0.4 mg/L。溶解氧的上升会对反硝化过程产生抑制作用,同时好氧菌会消耗污水中原本就不多的优质碳源。但是从整体上看, R 值在 0~1.5 时, A_1 溶解氧的浓度依然满足反硝化要求。

2.2 碳源投加量对总氮去除效果的影响

增加第 1 段 A/O 的硝化液回流可以提高系统的总氮去除率,但是提升效果有限,主要限制因素是重油

图 6 内循环回流比对 A_1 溶解氧的影响Fig. 6 Influence of internal recycle ratio on the DO of A_1 unit

加工污水的优质碳源不足。因此,开展了碳源投加量研究。结果如图 7 所示,可见在 $r=1.0$ 和 $R=0.5$ 条件下,外加碳源可以明显提高系统对总氮和 A_2 对硝态氮的去除效果。 A_2 出水硝态氮和 O_{23} 出水 TN 呈正相关减小,总氮去除主要由 A_2 反硝化贡献。 O_{23} 出水氮污染物主要以硝态氮形态存在,由 A_2 出水中的氨氮氧化贡献。当碳源投加量为 0 mg/L、10 mg/L、20 mg/L 和 30 mg/L 时, A_2 出水硝态氮质量浓度依次为 6.5 mg/L、

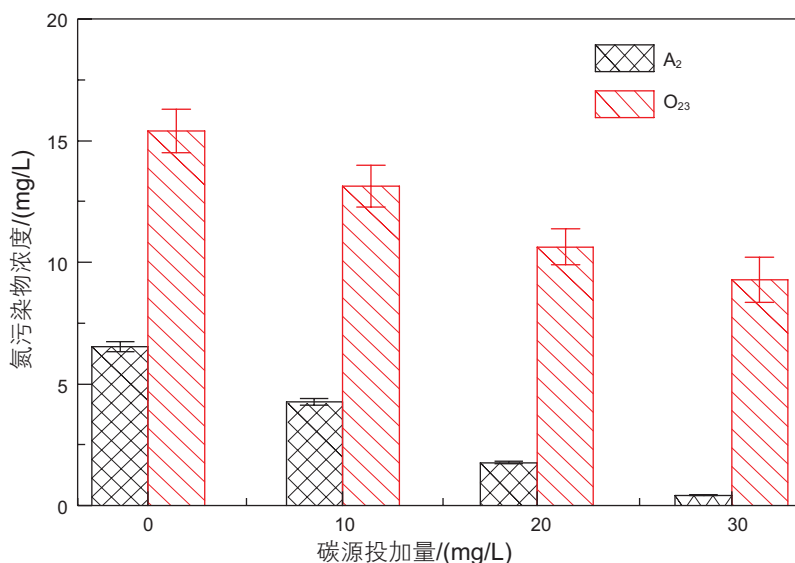


图7 碳源投加量对硝态氮和总氮的去除效果的影响

Fig. 7 Influence of carbon source dosing on the nitrate and TN removal

4.3 mg/L、1.8 mg/L 和 0.4 mg/L；系统出水总氮质量浓度依次为 15.3 mg/L、13.1 mg/L、10.6 mg/L 和 9.2 mg/L，去除率依次为 75.0%、78.3%、81.7% 和 84.7%。核算 A₂ 单元碳源投加量与硝态氮降解量的比值，约为 0、4.5、4.3 和 4.9，均值约为 4.5。结果表明，当碳源投加量为 30 mg/L 时，A₂ 出水硝态氮基本完全被去除，总出水 TN ≤ 10 mg/L，实现总氮的深度脱除目标。

3 结论

(1) 侧线实验结果表明，两段进水 A/O 工艺实现了重油加工污水碳氮污染物的深度协同脱除。该工艺

硝化液回流量少，污染物的停留时间更长，最终出水 TN ≤ 10 mg/L、COD ≤ 50 mg/L。

(2) 适度增加第 1 段 A/O 单元内循环回流比，可以提高第 1 段 A/O 进水中碳源利用率和总氮去除率。实验确定两段进水 A/O 工艺在第 1 段和第 2 段 A/O 单元内循环回流比值分别为 0.5 和 0，此时总氮去除率达到 74.3%，比无硝化液回流时提升了 6.1%。

(3) 适度补充第 2 段 A/O 单元反硝化所缺的碳源，可以充分利用该单元反硝化区的脱氮效能，系统最终出水 TN ≤ 10 mg/L，去除率达到 84.7%，比无外加碳源时提升了约 10%。

参考文献

- [1] 瞿国华. 21 世纪中国炼油工业的重要发展方向——重质(超重质)原油加工[J]. 中外能源, 2007, 12(3): 54-62. [QU G H. Important orientation of China's refining industry in 21th Century —— Processing heavy and superheavy crude oil[J]. Sino-Global Energy, 2007, 12(3): 54-62.]
- [2] 夏晓蓉, 邹圣武. 重油加工路线的优化及实践[J]. 中外能源, 2014, 19(06): 74-79. [XIA X R, ZOU S W. The optimization and practice of heavy oil processing schemes[J]. Sino-Global Energy, 2014, 19(06): 74-79.]
- [3] 车鑫博. 劣质重油加工污水臭氧催化氧化技术研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2011. [CHE X B. Study on tinpot oil processing wastewater treatment by ozone catalytic oxidation[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2011.]
- [4] 刘月佳. 劣质重油加工污水中有机污染物组成分析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2012. [LIU Y J. Study on analysis of organic pollutants in heavy oil refinery wastewater[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2012.]
- [5] 王鑫. 委内瑞拉重油加工点源废水污染物组成分析及数据库研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2012. [WANG X. Analysis and database research on the pollutant composition of Venezuela heavy oil processing point source wastewater[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2012.]
- [6] 王江. 提高重油加工污水可生化技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015. [WANG J. Research on improving biodegradability of

- heavy oil processing wastewater[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.]
- [7] 孙海. 我国未来运输能源可持续发展路径选择[J]. 科学管理研究, 2009, 27(3): 64–68. [SUN H. Path selection of sustainable development of china's future transportation energy[J]. scientific management research, 2009, 27(3): 64–68.]
- [8] 王社平, 于莉芳, 韩光辉, 等. A/O 工艺分段进水生物脱氮技术分析[J]. 工业用水与废水, 2006, 37(1): 7–9. [WANG D P, YU L F, HAN G H, et al. Analysis of A/O step-feed biological denitrogenation process[J]. Industrial Water & Wastewater, 2006, 37(1): 7–9.]
- [9] ZHU G B, PENG Y Z, WU S Y, et al. Simultaneous nitrification and denitrification in step feeding biological nitrogen removal process[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(9): 1043–1048.
- [10] 王伟, 彭永臻, 孙亚男, 等. 分段进水 A/O 工艺流量分配方法与策略研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(1): 89–92. [WANG W, PENG Y Z, SUN Y N, et al. Study of influent flow distribution methods and strategies in step-feed A/O process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(1): 89–92.]
- [11] 王伟, 王淑莹, 孙亚男, 等. 分段进水 A/O 工艺外碳源投加控制策略的比较研究[J]. 环境科学, 2009, 30(3): 792–797. [WANG W, WANG S Y, SUN Y N, et al. External carbon addition control strategies of step-feed A/O process[J]. Environmental Science, 2009, 30(3): 792–797.]
- [12] CAO G H, WANG S Y, PENG Y Z, et al. Biological nutrient removal by applying modified four step-feed technology to treat weak wastewater[J]. Bioresource Technology, 2013, 128: 604–611.
- [13] CHUNG J, KIM G, SEO K W, et al. Effects of step-feeding and internal recycling on nitrogen removal in ceramic membrane bioreactors, and their hydraulic backwashing characteristics[J]. Separation and Purification Technology, 2014, 138: 219–226.
- [14] 祝贵兵, 彭永臻, 王淑莹, 等. A/O 工艺与分段进水两种生物脱氮工艺的比较研究[J]. 东南大学学报(英文版), 2008, 1(4): 528–531. [ZHU G B, PENG Y Z, WANG S Y, et al. Comparative study of two biological nitrogen removal processes: A/O process and step-feeding process[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2008, 1(4): 528–531.]
- [15] ZHU G P, PENG Y Z, MA B, et al. Optimization of anoxic/oxic step feeding activated sludge process with fuzzy control model for improving nitrogen removal[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 151(1): 195–201.
- [16] PENG Y Z, GE S J. Enhanced nutrient removal in three types of step feeding process from municipal wastewater[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(11): 6405–6413.
- [17] 项敏, 陈东辉, 黄满红. 回流比对分段进水 A²/O 工艺脱氮除磷影响的小试研究[J]. 广州化工, 2011, 39(12): 127–130. [XIANG M, CHEN D H, HUANG M H. Effect of return ration on the step feed A²/O process for nitrogen and phosphorus removal[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2011, 39(12): 127–130.]
- [18] 李长刚, 阎光绪, 郭绍辉, 等. 污泥回流比对两段进水 A/O 工艺处理重油加工污水效果的影响[J]. 环境工程学报, 2018, 12(10): 1–7. [LI C G, YAN G X, GUO S H, et al. Effect of sludge reflux ratio on performance of two step-feed A/O process in treating heavy oil refining wastewater[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(10): 1–7.]
- [19] 王海东, 王淑莹, 彭永臻. 进水负荷对硝化菌与异养菌竞争关系的影响[J]. 中国给水排水, 2006, 22(23): 26–29. [WANG H D, WANG S Y, PENG Y Z. Influence of applied loading on competition between nitrifiers and heterotrophs[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(23): 26–29.]

Effect of internal recycle ratio and carbon source dosage on nitrogen removal performance of the A/O process with two-step-feeding in treating heavy oil processing wastewater

LI Changgang^{1,3}, YAN Guangxu^{2,3}, GUO Shaohui^{1,3}

1 College of Science, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 College of Chemical Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 Beijing Key Laboratory of oil & gas Pollution control, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract In order to improve the removal efficiency of nitrogen pollutants in traditional heavy oil processing waste water treatment plants and achieve synergistic removal of carbon and nitrogen pollutants, based on the operation parameters of the biochemical device on site and the previous research results, a pilot test device and operation parameters in a two-step-feeding anoxic/oxic (A/O) process was constructed in this paper. The side-line experiment was carried out in a heavy oil processing

wastewater treatment plant with the effluent of the hydrolysis acidification unit as the treatment target. Control process conditions, the ratio of step-feed influent water is 7:3, the reflux ratio of external circulation is 1, dissolved oxygen concentration (0.1~0.4 mg/L in the anoxic zone, 3.5~4.5 mg/L in the aerobic zone), pay more attention to the effects of the reflux ratio R of internal circulation of the first-stage A/O and the amount of additional carbon source (glucose) in the denitrification stage of the second-stage A/O on the removal efficiency of nitrogen pollutants. The results show that a proper increase of the reflux ratio in internal circulation and the carbon source addition can significantly improve the total nitrogen removal capacity of the two-step-feeding A/O process and will not reduce the removal efficiency of organic pollutants. The optimum reflux ratio R value of internal recycling is 0.5, and carbon source addition is 30 mg/L, under which the removal rate of total nitrogen can reach 84.7%, and the total nitrogen mass concentration of effluent can be controlled below 10 mg/L, thus realizing the deep denitrification of heavy oil processing wastewater.

Keywords heavy oil processing wastewater; A/O process with two-step-feeding; internal recycle ratio; carbon source; nitrogen removal

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.04.043

(编辑 马桂霞)