

污水处理厂提标改造工程工艺进展

郭欢¹, 吴学伟^{2*}, 李碧清³

(1. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广州市水务投资集团有限公司, 广东 广州 510655;

3. 广州市净水有限公司, 广东 广州 510163)

摘要:随着污水排放标准的逐渐提高, 城镇污水处理厂的提标改造工程势在必行。污水处理厂提标改造路线包括生化池改造、增加深度处理以及两者结合实施。介绍了目前主要的生化池改造措施如主体工艺中镶嵌 MBBR 工艺增强脱氮作用, 将传统活性污泥工艺改造成能够同步脱氮除磷的工艺等; 深度处理主要采用增加滤池且辅以化学加药进一步去除 SS、TP 等指标。为我国的污水处理厂提标改造工程提供了技术方向和参考。

关键词:提标改造; MBBR 工艺; 深度处理; 脱氮除磷; 滤池

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)S-0302-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.S.062

A review of sewage treatment plant upgrading project

GUO Huan¹, WU Xue-wei^{2*}, LI Bi-qing³

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. Guangzhou Water Investment Group Company Limited, Guangzhou 510655, China;

3. Guangzhou Sewage Purification Co., Ltd., Guangzhou 510163, China)

Abstract: With the increasing standards for sewage discharge, it is imperative to upgrade and renovate urban sewage treatment plants. The upgrading and renovation routes for sewage treatment plant include the renovation of biochemical tank, the increase of advanced treatment and the combination of the two. Current main renovation measurements for biochemical tank are introduced, such as the embedded moving bed biofilm reactor (MBBR) process in the main process to enhance denitrification effect, and the transformation of traditional activated sludge process into a process that can simultaneously remove nitrogen and phosphorus. Advanced treatment mainly adopts an additional filter and further removes SS, TP and other indicators with supplement of chemical dosing. It is expected to provide technical direction and reference for future sewage treatment plant upgrading and renovation projects in China.

Key words: upgrading and renovation; MBBR process; advanced treatment; removal of nitrogen and phosphorus; filter

污水处理厂是一个地区水资源开发和利用系统中的重要组成部分。中国经济高速发展, 城镇化和工业化加速推进, 人民的生活水平正在不断上升, 与此同时, 伴随而来的环境污染问题愈来愈明显, 尤其是水资源污染问题格外严重。近几年我国开始加大对城市污水治理的重视, 2015 年国务院发布《水污染防治行动计划》(国发〔2015〕17 号, 简称水十条), 要求敏感区域(重点湖泊、水库、近岸海域汇水区域)城镇污水处理设施于 2017 年底全面达到一级 A 标准。据统计全国 95% 以上的城市(镇)污水处理厂出水仍然没有达到国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 标准,

城镇污水处理厂提标改造工程势在必行^[1]。

目前, 中国的城镇污水处理厂大都采用传统活性污泥法及以活性污泥为基础改良开发的工艺, 如 SBR 工艺(序批式活性污泥工艺系统)、氧化沟工艺、A-B(吸附-降解)工艺、A-O(厌氧-好氧)工艺、A²O(厌氧-缺氧-好氧)工艺等。虽然这些工艺经过了长久的发展已经趋向成熟, 有着稳定的处理性能并且具有同步脱氮除磷的作用, 但是这些工艺在有机物去除和脱氮除磷方面效果并不是十分明显, 面对新排放标准中更加严格的 BOD₅、SS、TN、NH₄-N、TP 等指标(一级 A 标准相较于原先普遍采用的一级 B 标准主要提升的指标有: BOD₅ 由

收稿日期: 2021-01-08; 修回日期: 2021-05-18

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2019B110209002); 广州市“岭南英杰工程”人才计划(穗人社函[2019]928 号)

作者简介: 郭欢(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为污水处理, 798969596@qq.com; 吴学伟(1969-), 男, 博士, 教授级高工, 研究方向为污水处理及污泥脱水干化等, 通讯联系人, wuxw2002@163.com。

20 mg/L 调整至 10 mg/L; SS 由 20 mg/L 调整至 10 mg/L; TN 由 20 mg/L 调整至 15 mg/L; $\text{NH}_4\text{-N}$ 由 8 mg/L 调整至 5 mg/L; TP 由 1 mg/L 调整至 0.5 mg/L), 若污水处理厂只采用这些工艺必然是不够的, 需要因地制宜进行提标改造。通常来说, 污水处理厂提标改造工程没有一个标准化的解决方案, 且由于污水处理厂之间所使用的工艺、设施等都不尽相同, 且提质的侧重点也并不同, 因此限制了成功改造工程案例的复制^[2]。在此背景下, 研究优秀的污水处理厂提标改造方案, 根据其改造技术路线来进行系统归纳分析, 并针对提标侧重点给出建议方案, 对于今后污水处理厂借鉴、创新、发展有着重大意义。

1 污水处理厂提标改造路线

为了经济可持续发展考虑, 污水处理厂提标改造都遵循“首先对内部运行工艺进行调控优化, 深入挖掘现有处理单元的能力, 然后再进行强化处理或深度处理的外部改造工程”的技术路线^[3]。在保证原有工艺处理单元的能力发挥至最佳状态后, 再基于原有的工艺特点和出水水质情况, 针对其不足之处因地制宜改造成处理效果更好的工艺。

1.1 污水厂生化池改造

生化池起到有机物去除及脱氮除磷作用, 是污水处理单元的核心所在。在通过合理的优化生化池处理工艺、有效利用进水碳源、强化系统硝化与反硝化功能的情况下, 可在不增加原厂区面积的基础上提高系统的出水水质。对于建设用地或经济方面有限的污水处理厂, 对生化池进行改造多采用能较好地原工艺转化的工艺或新型技术, 使其改造后具有更好的脱氮除磷性能, 或具有更优的经济与环境效益。

青岛市团岛污水处理厂由于实际进水水质浓度比原设计标准严重超标, 导致出水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 TN 过高, 为了提高同步脱氮除磷能力, 将原有改良 A^2O 工艺中的调节池改造成缺氧池, 而预缺氧池、厌氧池、缺氧池保持不变, 以此增大反硝化区的池容, 并向好氧区中投加生物填料以保证硝化区的功能正常运行, 形成了同步脱氮除磷性能良好且具有较强抗冲击负荷的 MBBR 工艺系统^[4]; 马来西亚某污水处理厂将一种称为好氧颗粒污泥工艺的新技术引入原有 SBR 工艺, 在最大程度减少工程量的基础上将其改造为好氧颗粒污泥型 SBR 工艺, 有着更好的脱氮

除磷能力和更少的化学药剂消耗^[5]。为了加强对 BOD_5 、COD 的去除, 十堰市神定河污水处理厂将原有 A^2O 池和矩形二沉池改为改良 $\text{A}^2\text{O}+\text{MBR}$ 池工艺, 降低了生物池负荷, 增加了处理规模^[6]; 遵义某污水处理厂将原 A_mO_n 工艺中的部分构筑物拆除后新建 A^2O 池和 MBR 池, 在保证碳源充足的情况下, 后续辅以投加化学除磷剂, 出水可直接用于中水回用, 且能耗节省 20%^[7]。以色列的阿西尔西部工业区污水处理厂原采用延时曝气活性污泥法, 有着能耗高、工程量大、出水水质差的缺点, 考虑使用了一种新型曝气装置 Venturi Type Aeration Array (文丘里型曝气阵列装置), 该装置模块可通过产生一股压力空气射流来使污水曝气, 解决了原 BOD_5 、COD 处理不充分的问题, 使水质达到了预期, 能耗降低了 50%^[8]。为了应对出水中 SS 过高的情况, 国外污水处理厂也考虑生化池改造的方法: 伊斯法罕的某污水处理厂原采用 A-B 法, 由于进水碳氮比较低, B 段反硝化不彻底, A 段污泥沉降性能差, 产泥量大, 通过在回流污泥生产线中引入 OSA (Oxic-Settling-Anoxic, 氧沉降-缺氧过程) 工艺和超声波工艺后在出水 SS、有机物去除率和污泥沉降性方面较常规 A-B 法有着明显的提高^[9]; 意大利某污水处理厂将其原有的传统活性污泥法改造成创新的序批式生物滤池颗粒反应器 (SBBGR, Sequencing Batch Biofilter Granular Reactor), 改造后可大大减少污泥产量, 污泥脱水后的干物质含量可达 28%, 且除磷外的所有出水指标均得到改善。此外还可取消二沉池和污泥稳定单元, 减少占地面积^[10]。

1.2 在原工艺末端增加深度处理

污水深度处理是指城市污水或工业废水经一级、二级处理后, 为了达到一定的回用水标准使污水作为水资源回用于生产或生活的进一步水处理过程, 常用于污水厂生化池后进一步去除水中的微量 COD 和 BOD 有机污染物质, SS 及氮、磷高浓度营养物质及盐类。国内污水提标改造常见的做法为增设反硝化滤池或高效沉淀池以及配套工艺, 其本质在于强化 SS 的去除, 而 SS 主要由活性污泥絮体构成, 一般 SS 中含 BOD_5 30%~75%、TN 8%~10%、TP 3%~6%, 所以在深度处理去除 SS 的过程中可以降低出水中的其他指标^[11]。

湖北省北部的某污水处理厂由于进水的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN 较高, 仅靠原有的二级 A/O 生物池工艺已无法继续满足排放要求, 为了强化脱氮效果, 在末端增

设了上流式反硝化滤池提高 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 TN 去除率后,出水水质达到一级 A 标准^[12];深圳市横岗污水处理厂运用模块化水处理装备,在原 SBR 工艺末端增设了上向流式反硝化深床滤池标准件,工期在仅 2 个月的情况下出水达到地表准 IV 类标准^[13];黄浦路污水处理厂在原有工艺预处理+高效沉淀池+硝化滤池+消毒池基础上,在硝化滤池后加入反硝化滤池;武汉经济技术开发区污水处理厂在预处理+UNITANK 末端增加高效沉淀池+过滤工艺强化脱氮^[6];湖北省某污水处理厂进水碳源不足,增建了乙酸钠投加系统保证缺氧区反硝化作用正常进行,再增设了高效沉淀池,即精密过滤池,进一步提高出水水质^[14];湖北汤逊湖污水处理厂原出水为一级 A,为提质到 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的 III 类(湖库)水质标准,对尾水增加深度处理工艺,采用高密度沉淀池+CUF(粉末活性炭膜生物反应器)+大孔树脂脱氮组合工艺(大孔树脂吸附 $\text{NO}_3\text{-N}$ 后通过反硝化—一体化 MBR 膜反应器),出水 TN 去除率可达 99%^[15];河北省某污水处理厂出水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度较高,改造前进行中试,采用 DN/CN(反硝化生物滤池+曝气生物滤池组合工艺),通过投加碳源,有效强化污水脱氮效果,出水 TN 可 < 10 mg/L,在反硝化滤池后配置曝气生物滤池的目的是防止出水 COD 超标^[16];为提高除磷能力,三峡库区某污水处理厂改造前为厌氧池+SBR,在通过增加曝气时间提高 COD、 BOD_5 去除率,投加碳源增加硝化液混合时间强化 TN 处理效果后,出水 TP 指标依然较高,在新增高密度沉淀池辅助化学除磷后出水 TP 值 < 0.1 mg/L,且高密度沉淀池对 SS、 TN 、COD 的去除率也分别达到 12.5%、21.1%、22.8%^[17];佛山市某污水处理厂将“精细格栅+连续砂滤池”工艺增加至原一期氧化沟和原二期工艺循环活性污泥系统(CASS)池后,提高了 TP 和 SS 去除率^[18]。在法国发现了一种钢渣过滤器用作深度处理设施可以提升小型污水处理厂的除磷性能^[19]。对出水脱氮除磷效果不佳的情况,增加深度处理也可起到很好的作用。北京某污水处理厂大部分进水为可生化性较差的工业废水,且 COD、 TN 、TP 浓度均较高,进水 SS 波动较大,在原 SBR 工艺后针对二级出水加入了以 MBBR 为主体的深度处理工艺:缺氧 MBBR+好氧 MBBR+气浮池+微滤膜(CMF)+臭氧接触氧化工艺,出水指标为 BOD_5 3.1 mg/L、COD 21.7 mg/L、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 0.57 mg/L、 TN 7.84 mg/L、TP 0.15 mg/L、

SS 2.54 mg/L^[20]。珠海某污水处理厂在原工艺改良 A^2O 氧化沟后增设了精密过滤池, TN 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TP 的排放值分别比原标准降低了 25%、37.5%、50%^[21]。莆田市某污水处理厂改造前为卡鲁塞尔氧化沟,通过往氧化沟内投加碳源提高 TN 去除率,并新建高效沉淀池+滤布滤池工艺,保证 TP 和 SS 的处理效果^[22]。福建某污水处理厂改造前采用 A^2O 工艺,由于一二三期分散,工程建设较难不利于集中管理,所以考虑收集三期的尾水进行集中深度处理,新建“曝气生物滤池+高效沉淀池+反硝化深床滤池+消毒池”,出水可达 IV 类水标准^[23]。中国最大石化废水处理厂的提标改造工程采用生物处理单元 A/O 法末端集成微絮凝动力池+滤池+臭氧催化氧化工艺,显著提高处理质量,出水 COD 从 84.7 mg/L 降至 47.0 mg/L,显示出比德国化学废水排放标准更低的急性毒性和遗传毒性^[24]。长沙城南污水处理厂原二沉池出水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TP 都已达一级 A,但 SS 指标依然较高,在可用建筑面积少的情况下加入了滤布滤池,主要去除了 SS,进一步降低了 COD、 BOD_5 等污染物参数^[25]。

1.3 生化池改造+深度处理

污水处理厂的提标改造常以生化池改造和增建深度处理设施两种方向进行。其中强化生物处理一般是着重有机物去除和脱氮除磷作用;而深度处理则是去除 SS 的同时也能进一步减少出水中与 SS 正相关的 BOD_5 、 TN 、TP 等污染物的含量。若污水处理厂以一个本身略低的处理质量提升至较高的水质标准的话,有时仅考虑一个方向进行,如进行原工艺的优化改造或者增设深度处理环节并不能解决问题,若将生化池改造和深度处理结合起来则可以在加强同步脱氮除磷能力的同时确保出水 SS、 BOD_5 等达标。

珠海市某工业园污水处理厂进水中工业废水占 90%,可生化性差且含有有毒物质,原工艺 AO 微孔曝气氧化沟已无法满足排放要求,需进行提标改造。在原氧化沟中镶嵌 MBBR 工艺辅以投加碳源增强脱氮作用后,为提高 COD 与 SS 去除率,在末端增设了混凝沉淀+超滤+臭氧催化氧化(活性炭吸附)。这套工艺先利用氧化沟镶嵌 MBBR 工艺来强化生物脱氮除磷功能,再采用深度处理单元进一步去除有机物和 SS,最后利用臭氧将难降解有机污染物彻底氧化去除,改造后的污水厂出水稳定在一级 A 标准^[26]。浙江江口污水处理厂在原卡鲁塞尔氧化沟

的好氧段中镶嵌 MBBR 工艺,增强了系统硝化能力,同时采用高效沉淀池和转盘滤池强化出水 SS 和 TP 的去除率,改造完成后,系统出水由原来的二级出水提升为一级 A 标准^[27]。南方某污水处理厂采用改良 A²O 工艺,进水波动性大、C/N 低,改造前出水水质为一级 B 标准,经过碳源的重新分配、调整内外回流比、延长曝气时间等一系列方法对生化系统优化调控后,再将原好氧池的部分池体改造为缺氧池,往好氧池投加载体的方式改造成 MBBR 工艺,最后在末端增设 V 型滤池,使得系统抗冲击能力大大提高,出水水质明显提升^[28]。广州沥滘污水处理厂一期工程在原改良 AO 工艺的基础上改造为分点进水多点回流的改良 A²O 工艺,后期考虑在曝气池内投加填料或扩建好氧区来保证脱氮效果,在二沉池出水后增设砂滤池或滤布滤池等深度处理以加大对 BOD₅、TP、SS 的去除^[29]。润西污水处理厂原工艺为预处理+A²O,改造后为预处理+A²O 镶嵌 MBBR 工艺+高效沉淀池+过滤工艺,出水水质由原来的一级 B 提升至一级 A^[6]。南京开发区某污水处理厂进水浓度普遍较低,生化性能较差,在原 CASS 工艺上改造成两点进水前置加药 A²O 工艺,通过辅助投加碳源并增加深度处理高效沉淀池+滤布滤池+消毒工艺后,出水也由一级 B 稳定达到一级 A 标准^[30]。无锡某城镇污水处理厂二期为 CAST 工艺出水,时常超标,考虑两种改造方案:尽可能利用原有构筑物改造成改良式序列间隔反应器(MSBR)工艺+深床反硝化滤池;或拆除重建为 A²O-AO(缺氧-厌氧-好氧-缺氧-好氧)工艺+二沉池+深床反硝化滤池,在 A²O 工艺后设置缺氧区是为了进一步提高反硝化脱氮作用,也可投加碳源强化脱氮释磷作用以保证 COD 和 TP 达标^[31]。

2 分析和建议

通过以上提标改造案例可以看出,国内污水处理厂普遍存在着进水浓度低、C/N 低、可生化性差的问题,这其中有城市管网系统不完善导致雨水进入管网中以致浓度下降的因素,也有收集区域内有工业废水的排入导致污水厂进水中难降解物质过多的原因,对此应适当设计预处理单元以去除无机悬浮物,提高 BOD₅ 浓度;设置多点进水,调整优化内回流比,合理控制曝气时间保证本身碳源充分利用。目前污水处理厂提标改造主要针对指标为 COD、TN、NH₄-N、TP、SS。C/N 会导致生物脱氮作用较

弱,常见的做法是额外投加碳源、好氧池镶嵌 MBBR 工艺、提高曝气时间增大好氧区内溶解氧含量、增设反硝化滤池等来增强 TN 和 NH₄-N 的去除。值得注意的是,投加碳源后出水 COD 可能增大,需在后增加曝气生物滤池以保证出水 COD 达标;针对出水 TP 过高的情况,一般考虑生物除磷的同时辅以后置化学除磷,另外由于在厌氧段,硝态氮浓度过高将影响释磷作用的进行,通过投加碳源也可降低硝态氮的抑制作用^[32];对于难降解物质引起的出水 COD 较高,可采用臭氧接触氧化等工艺,需注意采用臭氧接触氧化后出水 BOD₅ 含量较低,若后续深度处理采用曝气生物滤池则难以挂膜;对于 SS,在生化池末端增设深度处理工艺,如高效沉淀池+滤布滤池、V 型滤池、精密过滤池等,在降低 SS 的同时可以进一步减少 TP、TN、COD、BOD₅ 等,在某些情况下,仅增加深度处理设施加强去除 SS 即可满足提标改造要求。

3 结语

随着排水标准的日益提高,污水处理厂提标改造势在必行。由国内外污水处理厂提标改造案例来看,提标改造主要的方向基于原有的工艺特点和出水水质情况,对生化池因地制宜改造成脱氮除磷效果更好的相关工艺和加入深度处理以及两者结合实施;对于难以达标的参数,在针对性采取措施的同时,也要考虑设备工艺之间的相互影响和制约,做到一体化建设。随着城市管网的日渐完善,最好能预留用地来应对将来进水浓度必然会逐渐提高所带来的难题和新一轮的提质增效工程。

参考文献

- [1] 成官文,冯皓品,梁剑成.我国城市(镇)污水处理厂提标改造工程实践进展[J].桂林理工大学学报,2017,37(4):694-698.
- [2] Brepols C H, Dorgeloh E, Frechen F B, et al. Upgrading and retrofitting of municipal wastewater treatment plants by means of membrane bioreactor (MBR) technology [J]. Desalination, 2008, 231(1-3):20-26.
- [3] 王阿华.城镇污水处理厂提标改造的若干问题探讨[J].中国给水排水,2010,26(2):19-22.
- [4] 韩萍,许斌,宋美芹,等.团岛污水厂 MBBR 工艺的升级改造及运行效果[J].中国给水排水,2014,30(12):110-114.
- [5] Rashid S S, Liu Y Q, Zhang C. Upgrading a large and centralised municipal wastewater treatment plant with sequencing batch reactor

- technology for integrated nutrient removal and phosphorus recovery: Environmental and economic life cycle performance[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 749: 141465.
- [6] 刘向荣, 简德武, 简爽. 高排放标准下城镇污水处理厂的提标改造探讨[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(20): 19-25.
- [7] 杨鹏, 高诗琦. AAO+MBR 工艺在城市污水处理厂提标改造的运用[J]. *广东化工*, 2019, 46(23): 94-96.
- [8] Anker Y, Mualem D, Gimburg A, *et al.* Application of an innovative venturi type aeration array as part of the restoration and upgrading of an obsolete wastewater treatment plant [J]. *APCBEE Procedia*, 2014, 10: 120-125.
- [9] Amin M M, Taheri E, Ghasemian M, *et al.* Proposal of upgrading isfahan north wastewater treatment plant: An adsorption/bio-oxidation process with emphasis on excess sludge reduction and nutrient removal[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 255: 120247.
- [10] Di I C, Del M G, Bertanza G, *et al.* Upgrading small wastewater treatment plants with the sequencing batch biofilter granular reactor technology: Techno-economic and environmental assessment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 148: 606-615.
- [11] 蒲贵兵, 吕波, 靳俊伟, 等. 重庆市某污水处理厂扩建、提标改造工程[J]. *水处理技术*, 2013, 39(2): 119-122, 126.
- [12] 袁挺. 上向流式反硝化滤池在高含氮城镇污水处理厂提标改造工程中的设计与运行实践[J]. *广东化工*, 2020, 47(1): 104-105, 103.
- [13] 伍波, 叶昌明. 上向流反硝化深床滤池模块化标准件用于大型污水厂[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(18): 99-101.
- [14] 潘振, 罗剑云, 梁程钧. 改良氧化沟工艺污水处理厂提标改造工程实践[J]. *工业用水与废水*, 2020, 51(1): 70-73.
- [15] 刘鲁建, 董俊, 张岚欣, 等. 膜生物反应器-大孔树脂脱氮工艺在污水处理厂提标改造工程中的应用[J]. *工业用水与废水*, 2020, 51(1): 44-47, 69.
- [16] 王晓磊, 押玉荣, 吴江渤, 等. DN/CN 强化脱氮技术在污水厂提标改造中的应用[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(11): 15-20.
- [17] 张双, 陈贵生, 杨仁凯, 等. 高密度沉淀池在污水处理厂提标改造工程的应用[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(24): 80-84.
- [18] 钟敏. 连续流砂滤池在城镇污水处理厂提标改造中的应用[J]. *广东化工*, 2020, 47(8): 112-113, 102.
- [19] Barca C. Modelling hydrodynamics of horizontal flow steel slag filters designed to upgrade phosphorus removal in small wastewater treatment plants [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 8: 349-356.
- [20] 张子潇, 魏屹, 王京涛, 等. MBBR 工艺用于工业区污水处理厂的提标改造[J]. *给水排水*, 2020, 56(5): 112-117, 122.
- [21] 周亚梁, 黄东月. 南方某污水处理厂提标改造工艺运行优化[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(8): 113-118.
- [22] 王旦一. 城镇污水处理厂“一级 A”提标改造工程实例[J]. *广东化工*, 2020, 47(14): 125-126.
- [23] 严潇南. 城镇污水处理厂类 IV 类水标准提标改造工程实例[J]. *工业用水与废水*, 2020, 51(4): 74-76.
- [24] Wu C, Li Y, Zhou Y, *et al.* Upgrading the Chinese biggest petrochemical wastewater treatment plant: Technologies research and full scale application [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 633: 189-197.
- [25] 陈林. 滤布滤池在城镇污水处理厂提标改造中的应用[J]. *工业用水与废水*, 2019, 50(5): 48-50.
- [26] 陈金灿, 陈永军, 张权沛. MBBR 氧化沟/超滤/O₃ 工艺用于工业区污水厂提标改造[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(2): 69-73.
- [27] 周祯领, 吴迪, 韩文杰, 等. MBBR 镶嵌氧化沟在某污水处理厂的提标效果分析[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(17): 1-6.
- [28] 肖先念, 唐霞, 孙伟, 等. 南方某典型污水处理厂提标改造内部调控及工艺探讨[J]. *给水排水*, 2020, 56(5): 73-77.
- [29] 唐霞, 庞博, 肖先念, 等. 某大型污水处理厂提标改造的思考[J]. *广东化工*, 2015, 42(13): 198-199.
- [30] 吴飞, 徐剑新, 李模权, 等. 前置加药 A²/O+高效沉淀工艺用于园区污水处理厂的提标改造[J]. *水处理技术*, 2019, 45(12): 137-140.
- [31] 李易寰, 张慧旻, 王艳红, 等. 不同水处理工艺在污水处理厂中的应用[J]. *水处理技术*, 2020, 46(8): 135-140.
- [32] 李激, 王燕, 罗国兵, 等. 城镇污水处理厂一级 A 标准运行评估与再提标重难点分析[J]. *环境工程*, 2020, 38(7): 1-12. ■

(上接第 301 页)

参考文献

- [1] 刘志强. 浅议轻烃脱硫加工工艺[J]. *科技咨询*, 2010, (5): 121.
- [2] 张卫明, 张桂岩, 贾振勇. 低压气小气量轻烃回收工艺技术探讨[J]. *河南化工*, 2011, (22): 25-26.
- [3] 胥金江, 韩薇, 杨肇琰, 等. 新疆油田伴生气增压脱水工艺的应用与优化[J]. *化工技术与开发*, 2011, 35(6): 4-7.
- [4] 李宏, 胡泓. CNG 母站与轻烃回收装置合建站工艺流程优化[J]. *石油工程建设*, 2009, 30(2): 6-11.
- [5] 孙青冶, 孙胜勇. 天然气浅冷装置轻烃稳定系统工艺流程优化[J]. *中国外资*, 2012, (13): 216-225.
- [6] 熊运涛, 吴学东, 郭庆生, 等. 天然气净化脱硫研究进展[J]. *当代化工*, 2013, 42(3): 288-290.
- [7] 王开岳. 天然气脱硫脱碳工艺发展进程的回顾[J]. *油气加工*, 2011, 29(1): 15-20.
- [8] 郑佳, 侯建平, 高波, 等. 碱洗脱硫在塔河油田天然气凝液回收中的应用[J]. *油气田地面工程*, 2016, 35(1): 12-13.
- [9] 张力, 田彩君, 胡景磊. 混合轻烃碱洗脱硫在塔河油田成果应用[J]. *山东化工*, 2014, 43(1): 85-89. ■