

城市污水再生全流程优化理念与系统设计

王俊安, 李冬, 张杰

(北京工业大学水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要:提出了城市污水再生全流程优化的新理念,阐述了生物法除磷脱氮机理和典型的工艺技术,并基于生物除磷脱氮的新工艺新技术,组成了若干高效低耗的污水再生全流程系统。

关键词:城市污水;再生;除磷脱氮;全流程优化

中图分类号:X703.1

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2009)03-0060-04

Optimization theory and system design of integrated reclamation flow for municipal sewage

WANG Jun-an, LI Dong, ZHANG Jie

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A new optimization theory of integrated reclamation flow for municipal sewage is put forward. In addition, the mechanism and representative technics of biological dephosphorization and nitrogen removal are expatiated. Based on the new technics of biological dephosphorization and nitrogen removal, some systems of wastewater integrated reclamation flow are formed according to the optimization theory.

Key words: municipal sewage; reclamation; dephosphorization and nitrogen removal; integrated flow optimization

城市污水是国际公认的宝贵的城市“第二水源”,再生水循环利用是应对水危机的必然选择^[1]。随着污水处理厂排放标准的提高,绝大多数污水处理厂都需要升级改造。在改造并升级原二级污水处理或新建污水再生水厂时,传统的做法是先进行污水二级处理,再进行深度净化,分别考虑其处理工艺与流程,然后组合起来,使再生水水质达到一级A标准。这就导致了现有的城市污水再生处理存在工艺流程长、单元搭配不合理、投资和运行费用高等问题,致使再生水的成本价格偏高,使再生水与自来水相比失去了经济优势^[2]。基于此,笔者从污水再生全流程^[3]优化的理念出发,以城市污水为处理对象,以再生水生产为目的,在现有工艺技术和实践经验的基础上,优化组合单元技术,合理分配磷、氮、有机物、悬浮物等污染物负荷,通过设计高效低耗的污水再生全流程系统,来实现经济高效生产再生水的目标。对于污水再生全流程优化的研究,可以缩短再生水处理工艺的流程,为全国污水处理厂的节能降

耗及运营优化提供技术支撑,在节省基建投资、运行费用和提高再生水厂效益的同时,减少城市污水的排放量,减轻污水排放对水体的污染,并减少城市自然水的取水量,缓解城市用水供需之间的矛盾。

1 城市污水再生全流程优化理念

1.1 城市污水再生处理现状

统观全国各地污水再生水厂,主要包括下面3种形式的污水再生流程。

(1)普通活性污泥法-混凝沉淀过滤污水再生流程

混凝-沉淀-过滤净化流程主要是去除水中在二沉池里没有来得及沉淀下来的活性污泥碎片,使得二级处理水得到深度净化,可大幅度降低水中的悬浮物(SS)、五日生化需氧量(BOD₅)和化学需氧量(COD)以及微生物数量。同时通过混凝沉淀可以大幅度除磷,即化学除磷;在滤池中,如果采用好气滤池,可取得NH₄⁺-N进一步硝化的效果,而总氮却得

收稿日期:2008-11-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50878003);城市水资源与水环境国家重点实验室开放课题(08UWQA08);河南省重大公益性科研项目;北京市教育委员会科技发展计划重点项目,北京市自然科学基金重点项目(KZ200610005001)

作者简介:王俊安(1981-),男,博士生, wangjunan@emails.bjut.edu.cn;张杰(1938-),男,博士,教授,中国工程院院士,主要从事水环境恢复理论与工程技术方面的研究。

不到进一步去除。

(2) 厌氧-缺氧-好氧(A²/O)活性污泥法-混凝沉淀过滤污水再生流程

在上述基本流程基础上,将二级生物处理工艺换成A²/O同时除磷脱氮工艺。该流程是为了在去除有机污染物的同时,使N、P也都得到生物去除。但是在理论上和实践上都很难达到预期目的。该流程生产的再生水中,只有磷因为有混凝沉淀的化学除磷补充作用,可达排放标准,总氮(TN)仍然得不到深度去除,仍不能满足排放水一级A标准。

(3) 厌氧-好氧(A/O)脱氮活性污泥法-混凝沉淀过滤污水再生流程

在(1)中流程的基础上,将二级生化处理改为A/O脱氮工艺。该流程在生化处理中,可充分满足硝化菌和反硝化菌各自的生理代谢条件,可获较好的脱氮效果,二级出水含有较高的P,可在深度处理中以化学方法去除。采用该流程再生水厂的排放水N、P含量可满足一级A标准,但其能耗、物耗巨大,再生水处理成本偏高。

以上3种污水再生流程,是在人类社会污水处理程度逐步提高的历史中形成的。通常先进行污水二级生化处理的建设,然后在二级处理水的基础上,再进行污水深度净化的设计。在设计之初并没有从原污水到再生水(或一级A排放水)净化进行全流程考虑。因此,每个流程在各单元构筑中污染物的去除种类和负荷都难免出现不合理、不经济甚或错误之处。

1.2 城市污水再生全流程优化理念

理想的污水净化工艺应该遵循可持续发展和循环经济的原则^[4]。

(1) 对出水水质来讲,应达到回用所需标准,以确保污水的再生、再利用、再循环。

(2) 对处理剩余物而言,如大量的污水处理终端产物——污泥等,要避免二次污染,在进行安全处理与处置的同时,尽可能做到“变废为宝”。

(3) 从经济上考虑,应尽量节省曝气等能耗以及减少碳源投加量等物耗,努力做到节能降耗。

(4) 从工艺技术来看,应加快研发高效、低耗的关键技术,不断优化系统,使工艺简洁、易操作运行和维护。

基于上述原则,笔者提出了污水再生全流程优化的理念。所谓污水再生全流程优化,就是在现有污水处理工艺技术和实践经验的基础上,针对从原污水水质到再生水水质,统一设计污水一级处理、二

级处理和深度净化全部流程,在全部处理净化流程中,各单元反应器和构筑物间合理分配待去除污染物的种类和负荷,以最经济的能量与资源消耗取得良好的再生水水质,满足用户和排放水体的需求。污水再生全流程优化包括新节能工艺关键技术的研发、各处理单元本身的优化和各单元之间的整体优化等。

2 城市污水再生处理关键工艺技术

2.1 厌氧-好氧活性污泥法除磷脱氮

2.1.1 厌氧-好氧生物除磷

生物除磷在去除有机物的同时又可除磷,其技术经济指标优于标准活性污泥法。可以预言A/O除磷工艺将取代标准活性污泥法而被广泛应用。另外,应用厌氧/好氧原理生物除磷的工艺还有Phostrip、氧化沟、序批式活性污泥法(SBR)和A²/O等工艺。近年来,一些新的研究表明,自然界中还存在着新的磷元素生物转化途径,如反硝化除磷^[5]以及生物脱氮系统中无厌氧释磷的生物除磷工艺^[6]等。

2.1.2 缺氧-好氧(A/O)生物脱氮

传统的硝化-反硝化生物脱氮工艺在废水脱氮领域曾起到了非常积极的作用,但由于工艺的自身特点,生化反应时间长,硝化阶段能耗巨大,反硝化阶段碳源需求量大。近年来,一些新的研究表明,自然界中存在着多种新的氮素转化途径,如短程硝化/反硝化^[7]和厌氧氨氧化^[8-9]等。

2.1.3 A²/O生物脱氮除磷

由于脱氮菌和聚磷菌在微生物学上存在的固有矛盾,世界各地A²/O工艺的水厂运行中往往难以达到预期效果。为此出现了UCT脱氮除磷工艺、改良UCT工艺、VIP脱氮除磷工艺和MAAO^[10]等工艺,试图消弱或切断回流污泥中的硝酸盐对聚磷菌释磷的影响,但解决不了碳源争夺和BOD污泥负荷的根本问题。

2.1.4 短程硝化/反硝化

短程硝化/反硝化(nitrosification-dinitrification)工艺是把硝化反应过程控制在产生亚硝酸盐的阶段,阻止亚硝酸盐的进一步氧化,直接以NO₂⁻作为菌体呼吸链氢受体进行反硝化,可以实现O₂和COD的双重节省^[11-12]。

2.1.5 同时硝化-反硝化(SND)工艺

同时硝化-反硝化工艺是指硝化与反硝化反应同时发生在同一反应器中完成。这项工艺技术的开发

充分利用了反应器供氧不均匀的客观现象以及微环境理论,控制系统中生物膜、微生物絮体的结构及溶解氧(DO)浓度,形成污泥絮体或生物膜微环境的缺氧状态,实现硝化与反硝化的反应动力学平衡^[13-14]。SND 工艺明显具有缩短反应时间,节省反应器体积,不需补充硝化池碱度,简化工艺、降低成本等优点。目前,对 SND 生物脱氮技术的研究主要集中在氧化沟、生物转盘、间歇式曝气反应器等系统。

2.2 反硝化除磷

反硝化聚磷菌(DPAOs)可以 NO_3^- 为电子受体,利用体内储存的 PHB 同时除磷反硝化,实现了“一碳两用”,部分解决了除磷菌和脱氮菌之间对碳源的竞争问题;另外,还可以减少好氧区聚磷菌(PAOs)对 O_2 的需求,因而能节省好氧区的曝气量,同时也使好氧池的体积得到降低。反硝化除磷理论的发现和提出为污水的脱氮除磷提供了新的思路^[15]。然而,目前应用到反硝化除磷理论的工艺尚存在着很多问题^[16-17],亟需进一步改进。

2.3 厌氧氨氧化生物自养脱氮

20 世纪 90 年代,在发现厌氧氨氧化(ANAMMOX)现象的同时,荷兰 Delft 大学 Kluyer 生物技术实验室开发出 1 种新型自养生物脱氮工艺,在缺氧条件下,以浮霉菌目细菌为代表的微生物直接以 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为电子受体, CO_2 为主要碳源,将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 氧化成 N_2 的生物脱氮工艺^[7,18]。

目前厌氧氨氧化工艺主要用以处理污泥硝化上清液、垃圾渗滤液以及一些高氨、低 COD 的工业废水^[19]。厌氧氨氧化生物脱氮工艺具有耗氧量少、无需碳源、低污泥产量和无二次污染等优点。如果厌氧氨氧化生物自养脱氮应用于城市污水的处理和深度处理上,将解决城市污水去除营养盐 N、P 在争夺碳源、泥龄、BOD-SS 负荷上一些固有矛盾,并取得巨大的经济效益。为现有城市污水厂的改造升级和新建污水再生水厂的建设,提供节能降耗的污水再生工艺流程,将是继厌氧-好氧活性污泥法之后的又一次污水生物处理技术的突破。

2.4 好气滤池

好气滤池是给水净化快滤池、污水处理生物膜技术在污水深度处理领域应用发展的产物^[20]。物理截滤是其功能之本,生化效应是其功能的发展。它与欧洲引进的曝气生物滤池(biological aerated filters)虽有异曲同工之妙,但也有明显的区别。曝气生物滤池在滤层结构上更似具有曝气系统的生物滤池反应器;好气滤池是由普通快滤池发展而来,更似

滤池,兼有物理截滤与生物反应器的功能。它与曝气生物滤池的区别在于滤层结构,更适于截滤细小颗粒杂质,更适于污水的深度处理。它与普通快滤池的区别在于形成好气过滤空间,滤料表面有发达的生物膜,从而引进了生物机制。它与接触氧化生物反应器的区别在于其主要功能还是滤池,同时具有截留、吸附悬浮颗粒和生物氧化的功能,所以能更好地完成流程深度净化的作用^[21]。上述各种净化单元技术的内在联系如图 1 所示。

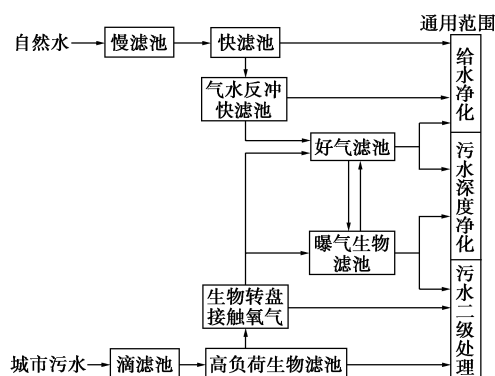


图 1 过滤、污水膜法净化技术发展示意图

3 污水再生全流程系统设计

3.1 A/O 生物除磷-厌氧氨氧化生物脱氮污水再生流程

以城市污水为处理对象,将厌氧/好氧活性污泥法生物除磷与 ANAMMOX 生物自养脱氮工艺进行结合,组成厌氧-好氧-部分亚硝化-厌氧氨氧化高效低耗型城市污水再生处理工艺,其流程如图 2 所示。该工艺在全流程中将除磷和脱氮分为前后 2 个单元,前段利用厌氧/好氧典型活性污泥法,与传统的活性污泥法相比在不增加基建费用和运行费用的前提下,进行生物除磷,并同步将大部分有机物降解,出水水质 C/N 比较低,可为后段的以自养菌代谢为主的部分短程硝化和厌氧氨氧化生化反应提供适宜的进水。

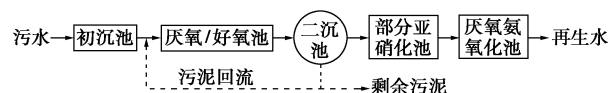


图 2 A/O 生物除磷-厌氧氨氧化生物脱氮污水再生流程

以上全流程为创新流程。应用了国内外多年的科研及生产试验成果,将厌氧-好氧活性污泥法除磷工艺与厌氧氨氧化生物膜过滤工艺组合为污水再生全流程。其特点之一是在二级处理过程中,不

改变普通活性污泥的主要运行参数,如污泥负荷、泥龄、混合液 DO 等条件,只是将生化反应池前端改变为厌氧段,这样在不增加基建投资费用、不提高维护费用和制水成本的前提下,去除了营养物质磷,提高了污水二级处理程度,而且由于厌氧段的存在,抑制了丝状菌繁殖,避免了活性污泥膨胀,使运行更为稳定,在 SS、COD、BOD₅ 等出水水质指标上都有一定的改善,取得了比普通活性污泥法更好的水质;其特点之二是把除磷任务放在二级处理过程中,生物自养脱氮任务置于深度处理的生物膜过滤的过程内;其特点之三是脱氮工艺采用了半亚硝化/厌氧氨氧化经济高效新型生物自养脱氮技术,曝气量低,无需外加碳源,污泥产量少,并避免了二次污染的产生。

3.2 A/O 除磷-短程硝化/反硝化脱氮污水再生流程

原污水经过沉砂沉淀预处理,去除颗粒固体和部分悬浮物后,进入厌氧/好氧池,进行生物除磷,同时降解有机物,出水经过二沉池沉淀后,再引入短程硝化/反硝化系统进行生物脱氮,最后进入末端好气滤池,进一步去除有机物、氮和悬浮物等污染负荷。其流程见图 3。

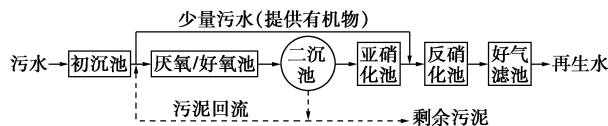


图 3 A/O 除磷-短程硝化/反硝化脱氮污水再生流程

3.3 反硝化除磷-好气滤池污水再生流程

污水经初沉池首先进入厌氧池,与富含 DPAOs 的回流污泥相遇,DPAOs 经充分释磷后,混合液再进入缺氧池,在这里与由好气滤池回流来的硝化液充分混合,DPAOs 以 NO₃⁻ 为电子受体大量吸磷,完成了反硝化吸磷的使命。小曝气吹脱是为了吹脱活性污泥颗粒上黏附的氮气气泡。之后,混合液进入二沉池进行泥水分离,污泥回流至厌氧池,并定期排除剩余污泥。上清液进入好气滤池,在这里进行 NH₄⁺-N 的硝化,硝化液回流至缺氧池。在好气滤池反应器中也进一步降解了难生物氧化的有机物,提高出水水质水平。其流程如图 4 所示。

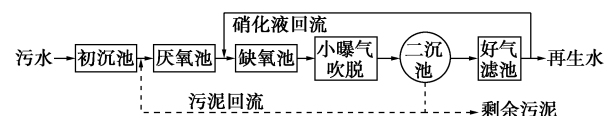


图 4 反硝化除磷-好气滤池污水再生流程

将反硝化除磷与好气滤池结合开发简捷污水再生全流程,从根本上解决了传统工艺中聚磷菌和反硝菌争夺碳源这一主要矛盾。同时由于大部分有机物在厌氧段降解,因此也降低了曝气能耗。

4 结语

现有污水处理厂升级改造面临着巨大的挑战,基于城市污水再生全流程优化新理念,利用百年来污水生化处理经典技术以及厌氧-好氧时空交替生化处理技术和微生物学上近期发现的各种硝化、脱氮、聚磷新的种群及工程技术,因地制宜地设计各种污水再生全流程系统,努力降低再生水处理成本,推进污水再生、再利用、再循环事业的发展。

参考文献

- [1] 张杰,李冬.人类社会用水健康宣言[J].给水排水,2008,34(5):129-136.
- [2] Miquel Salgot. Water reclamation, recycling and reuse: Implementation issues[J]. Desalination, 2008, 218(1/2/3): 190-197.
- [3] 郭晓,丛广治,张杰.城市污水再生全流程概念与方案优选[J].中国给水排水,2005,21(9):89-91.
- [4] 李军生,程海涛.2008年日本绿色和可持续发展化学奖获奖项目评述[J].现代化工,2008,28(8):84-86.
- [5] 王建龙,王淑莹,高永青.工艺强化反硝化除磷及控制参数[J].北京工业大学学报,2008,34(2):178-183.
- [6] 陈光秀,袁林江,韩玮.生物脱氮系统中无厌氧释磷的生物除磷工艺[J].环境科学学报,2008,28(9):1800-1806.
- [7] Zeng Wei, Peng Yongzhen, Wang Shuying, et al. Process control of an alternating aerobic-anoxic sequencing batch reactor for nitrogen removal via nitrite[J]. Chem Eng Technol, 2008, 31(4): 582-587.
- [8] Kieling D D, Valéria Reginatto, Willibaldo Schmidell, et al. Sludge wash-out as strategy for anammox process start-up[J]. Process Biochemistry, 2007, 42(12): 1579-1585.
- [9] 康淑琴,张少辉.厌氧氨氧化反应器的启动及其稳定性研究[J].武汉理工大学学报,2008,30(2):101-104.
- [10] 张冰,周雪飞,任南琪.新型城市污水脱氮除磷工艺的试验研究与优化设计[J].环境科学,2008,29(6):1518-1525.
- [11] 高大文.污水生物脱氮新技术研究现状与发展方向[J].现代化工,2004,24(增刊1):202-206.
- [12] 高大文,彭永臻,王淑莹.交替好氧/缺氧短程生物脱氮工艺抗冲击负荷能力[J].化学工程,2006,34(7):38-41.
- [13] 蒋山泉,翟俊,肖海文,等.序批式生物膜(SBBR)工艺同步脱氮除磷研究[J].四川大学学报:工程科学版,2008,40(1):64-68.
- [14] 孙翠,杨凤林,胡绍伟,等.炭管曝气膜强化厌氧折流板反应器功能的研究[J].环境科学,2008,29(5):1216-1220.
- [15] 张志超,黄霞,肖康,等.脱氮除磷膜-生物反应器的除磷效果及特性[J].清华大学学报:自然科学版,2008,48(9):1472-1474.
- [16] 徐伟锋,顾国维,张芳.混合液回流比对 A/A/O 工艺反硝化除磷的影响[J].化工学报,2007,28(10):2619-2623.

(下转第 65 页)

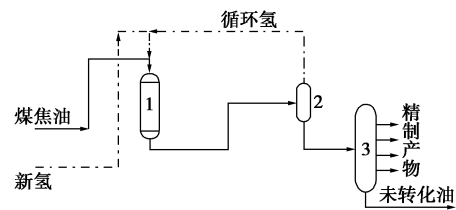
号的商业加氢裂化催化剂,研究发现导致石油馏分产品分布差别很大的催化剂,在煤焦油加氢裂化测试中差别不大。究其原因在于煤焦油与石油馏分组成分布和分子结构的显著差异上,为此 XSun 技术专门根据以下设计思路对催化剂进行了针对性设计并研制了煤焦油专用加氢裂化 CN 系催化剂:①针对煤焦油质量分数高达 1% 以上的氮,考虑新 CN 催化剂必须具有强的抗氮中毒能力,为此,对催化剂使用的分子筛进行特殊改性处理来调整催化剂的酸中心密度和酸强度;②针对煤焦油芳烃质量分数高达 90% 以上的特点,且大部分是三环萘系物质,考虑催化剂必须具有强的芳烃处理能力,包括芳烃吸附、扩散以及其更有效的加氢反应和开环反应,为此不仅在催化剂配方上调变不同孔径的孔道比例并对分子筛进行特殊改性处理来大幅提高分子筛二次孔,同时从研究机理出发,设法解决好加氢与裂解开环平衡匹配的问题;③针对煤焦油高芳烃窄馏分特点,且目的产品要求得到更多轻质产物的要求,考虑催化剂必须具有很好的开环活性,在方式上不是单纯增加催化剂的裂解活性中心而是要平衡 B、L 两类活性中心搭配,通过 L 酸对共轭体系分子的锚定作用配合 B 酸实现对芳烃的开环,为此,催化剂配方需要配置特制高酸性硅铝来配合酸性分子筛;④针对煤焦油胶质含量高、催化剂加氢性能不足可能导致的积炭失活问题,按照加氢-开环-加氢-再开环的机理,采用新的金属承载概念,改善和调整了加氢中心和裂解中心的配合问题,设法使催化剂体相中更均匀地分布加氢中心,减少加氢中心与开环裂解中心的分子扩散距离,以强化萘系物在开环裂解过程中所需要的快速加氢历程,以便更符合加氢-开环反应历程的要求。

1.2 煤焦油联合加氢裂化应用流程设计

图 1 给出了煤焦油普通一段加氢工艺流程图,图 2 至图 4 给出了 XSun 的 3 种典型的煤焦油联合加氢裂化工艺流程图或工艺操作方案,它们结合 XSun 系煤焦油专用加氢裂化催化剂,可以很好地实现从劣质重质煤焦油制取高附加值轻质油品。

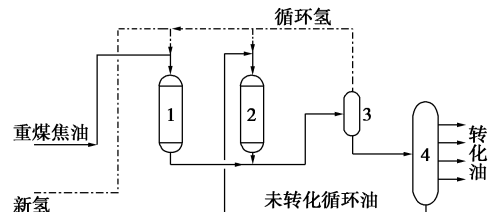
(上接第 63 页)

- [17] 徐伟锋,陈银广,张芳,等.污泥龄对 A/A/O 工艺反硝化除磷的影响[J].环境科学,2007,28(8):1693-1696.
- [18] Fernández I, Vázquez-Padín J R, Mosquera-Corral A, et al. Biofilm and granular systems to improve anammox biomass retention[J]. Biochemical Engineering Journal, 2008, 42(3): 308-313.
- [19] Lamsam Apipong, Laohaprapanon Sawanya, Annachatre Ajit P. Combined



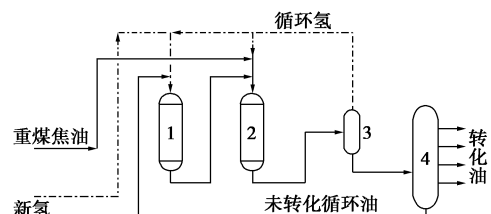
1—精制反应器;2—分离器;3—分馏系统

图 1 煤焦油普通一段加氢工艺流程图



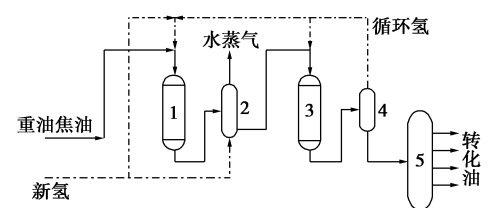
1—精制反应器;2—裂化反应器;3—分离器;4—分馏系统

图 2 XSun 全循环煤焦油联合加氢裂化工艺流程图



1—精制反应器;2—裂化反应器;3—分离器;4—分馏系统

图 3 XSun 逆序煤焦油联合加氢裂化工艺流程图



1—精制反应器;2—热蒸汽提器;3—裂化反应器;4—分离器;
5—分馏系统

图 4 XSun 优化的生产化工原料的煤焦油联合加氢裂化工艺流程图

1.3 工艺试验及其评价原料油

本文中涉及的工艺试验都是在模仿工业装置的固定床重油小型评价装置上进行,采用真实原料,

activated sludge with partial nitrification(AS/PN) and anammox processes for treatment of seafood processing wastewater[J]. Journal of Environmental Science and Health: Part A, 2008, 43(10): 1198-1208.

- [20] 曹相生,孟雪征,张杰.好气滤池与粗均滤料深床快滤池的性能比较[J].哈尔滨工业大学学报,2007,39(12):1979-1983.
- [21] 张杰,陈秀荣,李峰.扩展流好气滤池提高再生水水质的试验研究[J].哈尔滨工业大学学报,2004,36(12):1655-1658. ■