

新型污水处理沉淀过滤技术研究进展*

金正宇 郑明霞 宫 徽 王凯军

(清华大学环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室 北京 100084)

摘要: 针对水处理工艺偏重生物技术、一定程度忽视固液分离技术开发的倾向,分类回顾常见分离技术以强调其地位与作用,着重介绍硅藻土、磁分离及微砂沉淀等三种新型沉淀技术和活性砂过滤、动态膜及滤布滤池等新型过滤技术,总结新型分离技术在污水处理中的研究、应用现状及发展前景,提出新技术在推广中应注意的问题。

关键词: 固液分离; 新型; 沉淀; 过滤; 污水处理;

DOI: 10. 13205 /j. hjgc. 201407003

DEVELOPMENT OF NOVEL PRECIPITATION AND FILTRATION TECHNOLOGIES IN WASTEWATER TREATMENT

Jin Zhengyu Zheng Mingxia Gong Hui Wang Kaijun

(State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Great emphasis has been placed in recent decades on the research of biological technologies in the area of wastewater treatment, while attention has not been paid enough on the role of solid-liquid separation technologies in the process of wastewater treatment. To evaluate importance of the solid-liquid separation technologies in a more comprehensive scale in wastewater treatment processes, several typical novel solid-liquid separation technologies were inclusively reviewed, including three precipitation technologies such as diatomite technology, magnetic separation technology and Actiflo technology, and rapid sand filtration technology, dynamic membrane technology and cloth-media filtration technology. The state of the art and future trend in above separation technologies were also summarized to guide field application.

Keywords: solid-liquid separation; novel technologies; precipitation; filtration; wastewater treatment

0 引言

目前,国内外主流污水处理工艺由生化处理部分(好氧或厌氧生物反应器)和固液分离部分(初沉池、二沉池)组成。近年来研究者们主要关注低能耗、低成本、低占地的高效生化处理单元开发,而在一定程度上忽视固液分离单元的研究。例如,当今生化反应与分离过程相结合的技术发展趋势引领了多目标、多功能的生化分离组合技术的综合开发,出现了三沟式氧化沟、SBR法、UNITANK工艺等反应沉淀一体化工艺,也出现了曝气生物滤池(BAF)和膜生物反应器(MBR)等一系列将生化反应与过滤技术有机结合的

新型高效污水处理工艺。固液分离是生化处理工艺中制约反应器生物特性、处理效率和出水水质的重要因素。随着高效生物技术的不断完善,传统固液分离技术对高效生化处理工艺功能扩展的限制正日益凸显^[1]。进入21世纪,许多新型沉淀和过滤技术更成为领域内的开发热点。本文分别从技术原理以及工程应用角度介绍几种发展较快的新型沉淀技术和新型过滤技术的研究进展。

1 新型固液分离技术的发展趋势

污水处理中,待分离体系的分离负荷和平均粒径大小决定了分离技术的选择及其成本(如图1所示)。传统沉淀过滤技术成本较低,但可承受负荷和分离精度也较低。膜技术分离精度高,出水水质好,但运行成本高,可承受负荷低。新型固液分离技术,

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07205-001); 环保公益性行业科研专项(201009017-02)。

收稿日期: 2013-10-27

如微砂沉淀、硅藻土、磁分离、动态砂滤、滤布滤池等，着眼于寻求分离效率、分离精度及运行成本之间的平衡，以实现综合效益最大化。

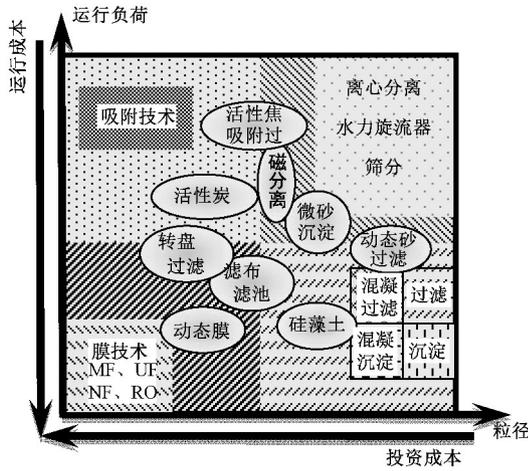


图 1 固液分离技术特性分析

Fig. 1 Characteristics of typical solid-liquid separation technologies

2 沉淀技术的进展

污水处理中沉淀过程用于实现进水颗粒物与水的分离。表 1 总结了主要沉淀技术的典型分离负荷，负荷值的提高代表了沉淀技术的进步。结合表 1 和图 1 可以看出：混凝技术提高了普通沉淀技术的分离精度，硅藻土技术进一步提升分离精度及负荷，而磁分离和微砂沉淀技术借助物理作用不仅使分离负荷提升了数十倍，分离精度较硅藻土也有加强。总体而言，随着污水成分日益复杂、污水排放要求更加严格，传统沉淀技术在截留污染物尺寸和分离效率等方面已无法满足要求。新型沉淀技术的开发研究目前主要集中在提升分离速度和去除率上，依靠高效凝聚药剂或物化方法提高固液密度差而达到目的。

表 1 典型沉淀技术处理负荷

Table 1 Hydraulic loadings of typical precipitation technologies

沉淀技术	废水类型	分离负荷/($m \cdot h^{-1}$)
传统(化学)沉淀	初级沉淀	1.5 ~ 3.3 ^[2-4]
	二次沉淀	0.5 ~ 1.3 ^[5-6]
硅藻土技术	二次沉淀	1.3 ~ 1.5 ^[7-8]
磁分离技术	初级沉淀	60 ~ 200 ^[9-10]
	二级出水	90 ~ 270 ^[11-12]
微沙加重絮凝沉淀(Actiflo®)	工业废水	31.5 ~ 100 ^[13-14]
	生活污水	53 ~ 147 ^[15-17]

2.1 硅藻土技术

硅藻土是一种由古地质时期的硅藻、放射虫或海

绵等遗体堆积并经初步成岩作用而成的硅质沉积岩，由具有多级、大量、有序排列微孔结构的硅质壁壳组成，主要利用水解后的静电作用促进体系中胶体脱稳凝集而实现沉淀分离。硅藻土的微孔结构还可吸附病毒、细微颗粒、重金属以及溶解性物质，特定装置中的硅藻土悬浮层还能实现部分过滤作用。

彭书传^[18]将活化硅藻土处理印染废水，COD 去除率达 74%，色度去除率达 94%。蒋小红等^[19]研究认为出水水质要求不高时改性硅藻土可单独处理城市生活污水，添加生物膜或氧化塘等生物后处理装置可进一步提高出水水质。河南永城市第一污水处理厂采用“A/O + 硅藻土”协同处理工艺，硅藻土投加量 40 mg/L，提高了污泥沉降性能，缩短了生化停留时间，节省占地面积，运行成本约 0.4 元/t，日处理污水量达 1 万 t，出水指标达 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准，并实现连续稳定运行^[20]。硅藻土技术在处理机理、影响因素及其控制、改性方式优化和硅藻污泥后处理等方面还有很多研究和发展空间。硅藻土技术提供了一条混凝吸附过程相结合的固液分离思路。

2.2 磁分离技术

磁分离技术是借助外加磁场并(或)利用磁性接种技术使水中不同磁凝聚性组分凝聚成较大团块以实现强化沉淀分离的一种新兴技术，20 世纪 60 年代开始应用于水处理工程。污水中部分微生物受到磁场抑制或激发作用，可提高水处理微生物活性，从而强化污水处理效果。分离后磁化污泥中的磁性接种物可经处理后回收再利用，剩余污泥另外单独处理。按照水处理工艺分，磁分离技术可分为直接磁分离法、间接磁分离法和微生物磁分离法 3 种；按照装置原理，又可分为磁絮凝聚、高梯度磁分离和磁盘分离 3 种。经 20 多年发展，磁分离技术主要应用于生活污水、食品废水、含油废水及印染废水等处理，具有处理效率高、设备体积小、结构简单、维护费用低、占地少等特点，工艺技术相对完整，并建立了磁过滤理论体系。图 2 所示为中国四川环能德美公司开发的 ReCoMagTM 磁分离工艺。

黄自力等^[12]研究高梯度磁分离技术对磷的去除，将沉淀时间缩短到化学沉淀的 1/48，具有药剂省、分离速度快的优点。陈文松等^[21]采用氧化-磁种混凝-高梯度磁分离技术对印染废水进行处理，反应稳定时磁粉投加量为 150 ~ 200 mg/L，色度和 COD

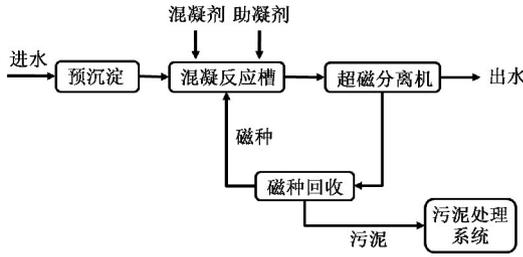


图2 ReCoMag™磁分离工艺流程

Fig. 2 Schematic diagram of the ReCoMag™ process

去除率均优于国家二级排放标准。磁分离与絮凝技术结合可提高系统分离效率。目前,美国有 15 000 t/d 市政污水处理采用磁絮凝沉淀技术^[22]。2010 年北京北小河污水处理厂采用超磁分离水体净化技术强化一级处理,SS、TP 平均去除率均大于 90%,BOD₅、COD 平均去除率均大于 60%,出水水质稳定,满足 GB 18918—2002 的三级排放标准,运行成本约 0.22 元/m³,具有一定的成本优势^[23]。

2.3 微砂沉淀技术

微砂沉淀工艺(Actiflo®)由法国 Veolia 集团 OTV 公司在 20 世纪 80 年代初开发,主要用于去除水中悬浮物、浊度、色度、藻类、铁、锰以及颗粒态有机物。该工艺利用微砂与高分子絮凝剂共同作用,使污染物与微砂聚合成直径 150 μm 以上的大颗粒絮体而加速沉淀分离,同时结合斜板沉淀原理减少沉淀池面积及沉淀时间,保持良好稳定的出水效果(如图 3 所示)。含微砂污泥沉淀后部分循环,在水力旋流器中实现泥砂分离和微砂回用。微砂沉淀工艺具有水力负荷高、占地面积小、启动快、SS 去除率高、抗冲击负荷能力强和出水水质稳定等特点。

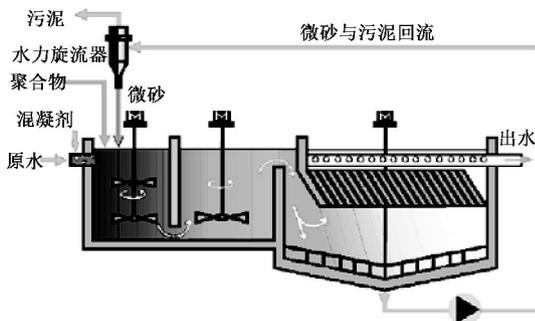


图3 Actiflo®工艺示意

Fig. 3 The outline of the Actiflo® process

针对城市合流制溢流污染,1992 年微砂沉淀工艺在 Colombes 市的 SIAAP 水厂建立了中试装置,试

验结果良好。目前,国内外有 560 多座工程使用微砂沉淀工艺处理市政污水和工业废水。2006 年北京市水源九厂利用 Actiflo 工艺对混凝池、聚合池、微砂投加池、絮体熟化池和斜管沉淀池进行改造,处理后出水浊度可控制在 1 NTU 以内^[24]。Actiflo 沉淀工艺还可以为后续过滤以及膜处理装置提供预处理,去除 SS 和磷,在多雨城市同初期雨水结合处理,充分挖掘优良的沉淀性能。Actiflo 工艺对不同水质的适应性、絮凝方式优化及其与污水相关的应用拓展可能是未来较为重要的研究方向。

3 过滤技术的进展

以砂滤技术为代表的传统过滤技术利用石英砂等粒状滤料层截留水中悬浮杂质,有较长应用历史。但由于受过滤介质和冲洗方式限制,长时间污水截留率有限、运行效率低、能耗大、更换周期短。表 2 总结了典型过滤技术的分离负荷。结合表 2 和图 1 分析,混凝技术也能提升传统过滤技术的分离精度,动态砂过滤技术通过实现连续过滤而将分离负荷提升至传统技术的 2 倍,动态膜和滤布滤池技术对分离效率和分离精度的提升作用均十分明显。膜技术的分离精度最高,但是分离负荷及处理成本成为了目前该技术广泛使用的限制因素。这也促使研究者们向过滤精度高、处理速度快的新型过滤技术展开诸多探索。

表 2 典型过滤技术处理负荷

Table 2 Hydraulic loadings of typical filtration technologies

过滤技术	废水类型	分离负荷/(m·h ⁻¹)
传统砂滤技术	二级出水	3~7 ^[25-26]
动态砂过滤	二级出水	6~12 ^[27-28]
滤布滤池	二级出水	5~15 ^[29-30]
动态膜	生活污水	0.02~0.15 ^[31-32]
膜技术	生活污水	0.01~0.06 ^[33-34]

3.1 传统过滤技术的改进——动态砂过滤技术

动态砂过滤系统是一种结合生物作用的改良连续砂滤器,通过同步过滤和反冲洗实现 24h 连续不停机工作,主要应用于各类给水过滤处理、污水深度处理和城市及工业水回用处理等。该系统主要利用逆流原理使进水通过底部布水器自下而上流经动态砂过滤床,滤床截留污染物,顶部溢流清水,脏砂借助气体在顶部洗砂器中紊流和机械碰撞作用实现反冲洗,洗净滤砂重力回流至砂床。其主要特点有:1) 立式结构紧凑且处理规模大;2) 过滤作用与生物净化作用结合;3) 连续自清洗,无需停机;4) SS 负荷适应性强,处理效果稳定;5) 运行成本低,维修保养少,高度

自动化。

王东等^[35]采用 DynaSand 活性砂过滤器对北京北小河污水处理厂二沉池出水进行深度处理中试,设计运行处理水量 $6 \text{ m}^3/\text{h}$, 滤速 8.5 m/h , 处理后各项指标优于 GB 18920—2002《城市杂用水水质标准》(2002 年征求意见稿)的要求。Hultman^[36]和 Plaza 等^[37]分别通过实验证明了 DynaSand 活性砂过滤器也是一种高效同步脱氮除磷装置,可将出水中总磷和总氮分别降到 $0.1 \sim 0.2 \text{ mg/L}$ 和 $2 \sim 3 \text{ mg/L}$ 。荷兰 De Groote Lucht 污水厂采用活性砂过滤进行脱氮处理,滤床内维持厌氧环境,投加甲醇作为碳源,反硝化细菌附着生长在砂粒表面和滤床细孔中^[38]。该厂从 1999 年开始连续运行,2002 年出水中 TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TSS 和 COD 质量浓度分别为 5.0 、 2.97 、 4.17 、 39.9 mg/L , 药剂费用 (0.68 欧元/kg) 和污泥处理费 (0.32 欧元/kg) 占总运行费用的 60%。动态砂过滤工艺在脱氮处理中寻求廉价外加碳源物质以及自碳源滤料的开发研究是重要的研究方向。

3.2 膜技术进展

膜分离技术近年来在国内污水处理领域发展迅速,主要使用压力差驱动膜分离过程。依据膜孔尺寸及分离物粒径范围可分为微滤 (Microfiltration, MF)、超滤 (Ultrafiltration, UF)、纳滤 (Nanofiltration, NF) 和反渗透 (Reverse Osmosis, RO) 4 种类型。

微滤 (MF) 和超滤 (UF) 是世界上开发应用最早的分离膜。目前,我国微滤和超滤技术大约占我国膜工业年产值的 $1/5$ ^[39]。微滤膜和超滤膜技术在生活污水和工业废水回用、MBR、深度预处理工艺等方面已有广泛应用研究。目前 MBR 工艺中基本使用微滤膜,MBR 也因具有出水水质良好、设备紧凑、运行管理方便、剩余污泥产量少等特点近年来得到迅速发展。

纳滤 (NF) 膜是在 20 世纪 80 年代末期发展起来的一种截留分子量为 $200 \sim 2000 \text{ Da}$ 的新型分离膜。反渗透 (RO) 膜是 20 世纪 50 年代开发的具有不对称结构、孔径 $< 2 \text{ nm}$ 的分离膜,操作压力在 $0.8 \sim 7.5 \text{ MPa}$ 。反渗透技术和纳滤膜技术多用来实现生活污水及工业废水的深度处理及回用、海水及苦咸水淡化和工农业废水有用资源浓缩回收等。

膜分离过程的优点在于物料无相变,能耗低,分离精度高,适用范围广,装置简单紧凑、占地小、易控制等,但被截留物质堵塞引起的膜污染问题及膜的使用维护成本是制约膜技术广泛应用的主要障碍。如

何有效降低膜技术使用成本、提升膜技术分离负荷决定了膜技术在未来污水处理领域的市场,也吸引了研究者的广泛关注。

3.3 平衡分离精度与负荷的新型过滤技术

3.3.1 动态膜技术

动态膜 (Dynamic Membrane, DM), 也称动态形成膜 (Dynamically Formed Membrane) 或原位形成膜 (Formed-in-place Membrane), 通过过滤含成膜物质溶液而在多孔基材表面形成。常见基材包括尼龙筛网、筛绢、无纺布、不锈钢网等,氟石、硅藻土、高岭土、页硅酸盐、熟石灰等矿物为常见的成膜物质。动态膜根据形成方式可分为预涂动态膜 (Pre-coated DM) 和自生动态膜 (Self-forming DM)。动态膜研究源自反渗透的预涂动态膜,至 20 世纪 90 年代开始有针对自生动态膜的超滤、微滤研究,主要用于生物、食品领域强化过滤效果。自生动态膜以其价格低廉、操作简便的优势逐渐成为研究主流热点。近年来,动态膜技术结合 MBR 的基本原理发展出了动态膜生物反应器技术,以活性污泥形成的动态膜取代传统微滤或超滤膜实现固液分离。动态膜基材主要采用微米级孔径的微网材料,与活性污泥平均粒径相仿,但动态膜形成后截留能力可达到微滤或超滤水平。常见的动态膜生物反应器均为自生动态膜过程。

Yosshiaki Kiso 等^[40]以尼龙网为基材,利用孔径 $100 \mu\text{m}$ 动态膜小试反应器处理合成废水,在连续进出水和曝气条件下出水 SS 和 BOD 分别小于 1.5 mg/L 和 5.0 mg/L ,在间歇曝气条件下 TN 去除率达 80%。范彬等^[41]利用普通筛绢为基材,动态膜生物反应器处理污水厂生活污水,SS 去除率近 100%,出水 COD 去除率大于 80%,氨氮去除率达 96% 以上。马强^[42]等利用无纺布为基材的动态膜生物反应器处理公路服务区生活污水,处理量达 $150 \text{ m}^3/\text{d}$,稳定运行 1 年后 SS 和 COD 去除率均达 95% 以上,氨氮去除率达 78%,出水水质符合 GB 8978—1996《污水综合排放标准》一级标准。动态膜反应器较传统 MBR 的优势在于: 1) 重力出水,节约能耗; 2) 出水通量高,水质良好; 3) 基材廉价易得,经济性好; 4) 易清洗再生。动态膜基材、运行过程控制的优化和动态膜形成机理等方面的研究是动态膜水处理领域未来较为重要的方向。

3.3.2 滤布滤池技术

滤布滤池 (Cloth-media Filtration) 又称为纤维转

盘过滤器,是一种过滤等级为 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 的表面过滤装置。滤布滤池系统比普通砂滤处理效果好,水质水量稳定,能耗低(高程损失仅为 0.3 m),反冲洗时间短,占地面积小(仅为常规工艺的 $1/2$),维护使用简便。一些欧美国家已将该工艺作为城市污水深度处理单元。我国江苏省在太湖流域城镇污水处理厂提标升级时曾大力推广该系统。

滤布滤池采用过滤转盘外包滤布来代替传统过滤介质,沿过滤方向分别为纤维毛层及大孔隙支撑层。过滤组件包括中心轴、过滤转盘、反冲洗系统、污泥去除系统、中心传动系统及支架支撑系统(如图4所示)。进水利用重力流入滤池并压过滤布,部分较轻的污泥吸附于滤布外侧形成泥饼从而可部分提升过滤效果,较重的污泥利用斗型池底排出滤池,滤布过滤阻力增加到一定液位时利用吸泥装置进行反冲洗。针对进水中含油或黏度高时对过滤介质的改进可能是这类滤池未来主要的研发方向。

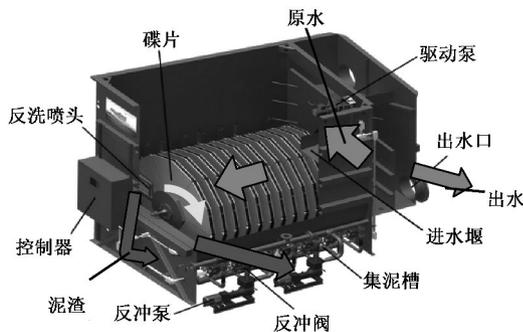


图4 滤布滤池过滤系统示意

Fig. 4 Components of a typical cloth media filter

孙士权等^[29]采用滤布滤池系统对污水处理厂二级出水进行深度处理,TP和COD平均去除率为 28.8% 和 8% 。混凝剂氯化铁强化处理后TP和SS平均去除率提高到 63.6% 和 70.7% 。司妮娜等^[43]采用混凝-微滤布过滤工艺(CMDF)处理二级出水用于中水回用,不加混凝剂直滤时,出水 $\rho(\text{SS})$ 为 3.1 mg/L ,水头损失 0.3 m ;筛选投加 40 mg/L 硫酸铝后,出水 $\rho(\text{SS})$ 、 $\rho(\text{COD})$ 、浊度分别为 3.1 mg/L 、 20 mg/L 和 0.8 NTU 。

4 总结

近年来,人们对高效率、低能耗、低成本和低占地等高性能指标的不断追求使污水处理技术不断创新、发展迅速。研究者们也同时不断追求新型高效、更符合可持续发展理念的沉淀与过滤技术。在技术推广

过程中,应注意以下问题:

1) 硅藻土、磁分离、微砂沉淀等沉淀技术和滤布滤池技术、动态砂过滤技术等过滤技术均有较大规模的实际生产应用试验。新型沉淀与过滤技术的开发既要注重技术细节也应重视挖掘技术的应用及产业化潜力。

2) 正视新型沉淀与过滤技术推广中的问题,理清新技术基本原理的正确性和适用性,建立试验体系予以支撑,完善工艺完整性,提供实际生产应用的理论基础。

参考文献

- [1] 王凯军. 可持续发展的新型高效废水处理技术[J]. 环境保护 2007 38(18):35-37.
- [2] 张敬健,徐婧静,李宝刚,等. 水力负荷对辐流式初沉池污染物去除效果的影响[J]. 环境科技 2011 24(4):5-7.
- [3] 陈洪斌,唐贤春,董滨,等. 市政污水处理厂工艺运行探讨[J]. 环境工程 2006 24(6):19-22.
- [4] Christoulas D G, Yannakopoulos P H, Andreadakis A D. An empirical model for primary sedimentation of sewage[J]. Environment International 1998 24(8):925-934.
- [5] 王旭,房安富,刘俊红,等. 污水厂二沉池运行控制中的计算方法[J]. 净水技术 2012 31(1):90-92.
- [6] 毕学军,宋军英,封永红. 活性污泥法二沉池表面积计算方法[J]. 青岛建筑工程学院学报 2004 25(1):45-48.
- [7] 张茜,陈永青. A/O+硅藻精土强化工艺在城镇小型污水处理项目的应用[J]. 给水排水 2011 37(S1):113-116.
- [8] 刘辉,吴晓翔,施汉昌. 硅藻精土技术在中小城镇污水处理中的应用[J]. 中国给水排水 2008 24(4):9-12.
- [9] 阚水铖. 加载絮凝磁分离技术在工业废水处理中的应用——以襄垣煤矿电厂工业废水处理工程为例[J]. 科技情报开发与经济 2011 21(6):197-201.
- [10] 熊仁军. 城市污水磁种絮凝-高梯度磁分离净化工艺及其理论机理研究[D]. 武汉:武汉理工大学 2004.
- [11] 颜幼平,康新宇,周为吉. 高梯度磁分离技术在给水排水处理中的应用[J]. 北方环境 1999(3):30-32.
- [12] 黄自力,胡岳华. “磁种-高梯度磁分离”污水除磷技术的研究[J]. 环境污染治理技术与设备 2003 4(5):70-73.
- [13] 威立雅水务技术市政工程. ACTIFLO® 超高效沉淀池[EB/OL]. 2011, <http://www.veoliawaterst.com/process/lib/pdfs/productbrochures/chinese/Z217syy4DBOAJIFCDV665igz.pdf>.
- [14] 潘绮,曹祺,戴海润,等. Actiflo工艺应用于印染废水深度处理研究[J]. 给水排水 2011 37(11):136-138.
- [15] 李伟进,唐孝国,平文凯. 新型 Actiflo 加砂高速沉淀池及其工程应用[J]. 中国给水排水 2010 26(6):55-57.
- [16] 由小卉,平文凯,陈晓华. Actiflo 高效沉淀工艺在 CSO 处理中的应用[J]. 中国给水排水 2010 26(20):49-52,58.
- [17] 李天琪. Actiflo 微砂加重絮凝高效沉淀工艺设计介绍[J]. 给

- 水排水 2009, 35(4):11-13.
- [18] 彭书传. 硅藻土复合净水剂处理印染废水[J]. 环境科学与技术, 1998(1):24-25, 49.
- [19] 蒋小红, 曹达文, 周恭明, 等. 硅藻土处理城市污水技术[J]. 重庆环境科学 2003(11):73-76.
- [20] 徐行勋, 刘振肖, 黄丽. A/O + 硅藻土强化脱氮工艺处理城市污水试验研究[J]. 三峡环境与生态 2011, 33(2):24-26, 37.
- [21] 陈文松, 韦朝海. 磁种混凝-高梯度磁分离技术的印染废水处理[J]. 水处理技术 2006 32(11):58-60, 65.
- [22] 蒋海, 安琳, 欧芳. 磁混凝沉淀技术在城市污水处理中的应用[J]. 市政技术 2012 30(1):108-110, 113.
- [23] 周建忠, 靳云辉, 罗本福, 等. 超磁分离水体净化技术在北小河水厂的应用[J]. 中国给水排水 2012 28(6):78-81.
- [24] 张素霞, 徐扬, 刘永康, 等. ACTIFLO® 微砂加重絮凝斜管高效沉淀技术[J]. 中国给水排水 2006 22(8):26-31.
- [25] 刘继凤, 刘继永. 焦化污水处理回用技术研究[J]. 环境科学与管理 2008 33(6):59-61, 86.
- [26] 陈洪斌, 朱冠楠, 张东宇, 等. 石化废水深度处理及脱盐的中试研究[J]. 中国环境科学 2009 29(9):929-934.
- [27] 刘雷斌, 戴前进, 方先金, 等. 城市污水处理厂二级出水深度脱氮(TN≤5 mg/L) 试验研究[J]. 水工业市场 2012(7):48-51.
- [28] 张志扬, 魏铮, 田泽祥, 等. 高密度沉淀-活性砂过滤工艺在钢铁工业废水处理中的应用[J]. 城市环境与城市生态 2012, 25(3):40-42.
- [29] 孙士权, 刁钟颖, 郭文文, 等. 滤布滤池强化处理城市二级出水中试研究[J]. 环境工程学报 2009 3(7):1223-1227.
- [30] Keith N B, Joe Riess, George Tchobanoglous, et al. Performance evaluation of a cloth-media disk filter for wastewater reclamation [J]. Water Environment Research 2003 75(6):532-538.
- [31] 刘宏波. 自生生物动态膜反应器在城市污水处理中的应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学 2006.
- [32] 李晓波, 胡保安, 顾平. 动态膜分离技术研究进展[J]. 膜科学与技术 2007 27(4):91-95.
- [33] 陈卫玮. MBR 膜生物处理技术及其在废水回用中的应用和进展[J]. 中国建设信息(水工业市场) 2007(8):52-57.
- [34] Reeta Rani Singhania, Gwendoline Christophe, Geoffrey Perchet, et al. Immersed membrane bioreactors: An overview with special emphasis on anaerobic bioprocesses [J]. Bioresource Technology, 2012, 122:171-180.
- [35] 王东, 马景辉, 张红丽, 等. DynaSand 活性砂过滤器在市政中水回用中的应用[J]. 工业水处理 2006 26(9):59-61.
- [36] Jönsson K, Hultman E B. Combined nitrogen and phosphorus removal in a full-scale continuous up-flow sand filter [J]. Water Science and Technology, 1994 29(10/11):127-134.
- [37] Jösson K, Hultman B, Plaza E. Nutrient removal from municipal wastewater by continuous up-flow filters [C]//New and Emerging Environmental Technologies and Products Conference for Wastewater and Stormwater Collection. Toronto, Canada: Water Environment Federation, 1995:11-39.
- [38] Kramer J P, Wouters J W, Rosmalen P Van. 帕克活性生物砂滤脱氮工艺的设计与运行[J]. 中国给水排水 2007 23(6):50-52.
- [39] 郭有智. 中国膜工业现状与前景 膜分离技术[C]//大连: 中国化工学会、(社) 日本化学工业协会、(财) 日本海外技术者研修协会 2001:125-140.
- [40] Yoshiaki Kiso, Jung Yongjun, Takashi Ichinari, et al. Wastewater treatment performance of a filtration bio-reactor equipped with a mesh as a filter material [J]. Water Research, 2000, 34(17):4143-4150.
- [41] 范彬, 黄霞, 文湘华. 动态膜-生物反应器对城市污水的处理[J]. 环境科学 2002 23(6):51-56.
- [42] 马强, 聂荣, 石峻青, 等. 动态膜生物反应器处理公路服务区污水[J]. 中国市政工程 2008(3):44-45.
- [43] 司妮娜. 混凝-微滤布过滤工艺应用于中水回用的研究[D]. 北京: 北京交通大学 2007.

第一作者: 金正宇(1986-) 男, 博士研究生, 主要从事污水处理技术相关研究。

通讯作者: 王凯军(1960-) 男, 研究员, 博士, 主要从事污水和污泥处理技术相关研究。wkj@tsinghua.edu.cn

(上接第 53 页)

- [15] Lee S C, Wang B. Characteristics of emissions of air pollutants from burning of incense in a large environmental chamber [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38: 941-951.
- [16] See S W, Balasubramanian R. Characterization of fine particle emissions from incense burning [J]. Building and Environment, 2011, 46, 1074-1080.
- [17] 汪晓军, 占永革, 胡贵平. 除湿机冷凝水中亚硝酸盐的浓度与大气环境质量的关系探讨 [J]. 中国环境监测, 2003, 19(6):47-49.
- [18] Lu C S, Niu S J, Tang L L, et al. Chemical composition of fog water in Nanjing area of China and its related fog microphysics [J]. Atmospheric Research, 2010, 97: 47-69.
- [19] Cini R, Prodi F, Santachiara G, et al. Chemical characterization of cloud episodes at a ridge site in Tuscan Apennines, Italy [J]. Atmospheric Research, 2002, 61: 311-334.

第一作者: 夏青(1988-) 男, 硕士研究生, 主要从事空气水资源研究及水资源处理。qingxia12@gmail.com

通讯作者: 耿旭 男, 教授, 主要从事农业环境、环境生态及模拟模型的研究 特别是全球环境变迁风险评估及水资源的管理利用。gengxu@pkusz.edu.cn