混凝滤布过滤-缺氧滤池/生物滴滤工艺处理生活污水

赵庆良[1], 李江雯[1,2], 魏亮亮[1], 王 琨[1], 李 伟[1]

(1.哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨; 2.铁道第三勘察设计院集团有限公司, 300142 天津)

摘 要: 为实现小城镇污水高效、节能、低耗处理,建立混凝滤布过滤-缺氧滤池/生物滴滤污水处理组合工艺.在优选实验装置及材料的基础上,探究各部分工艺最优运行参数. 在研究系统对常规污染物去除的同时,重点分析生物滤池启动过程对氨氮和总氮的去除能力.结果表明:当粉煤灰基混凝剂投加量为 1 mL/L 时,混凝-滤布过滤对 COD_{cr} 的去除率可达 54%,对 TP 的去除率达 81%,且具有工作周期长、耗能少等特点;生物滤池在水力负荷为 15 L/d、硝化液回流比为 150% 时运行效果最好,可保证系统出水氨氮、COD_{cr}、TP、TN 均达到 GB18918—2002 的一级 A 标准.

关键词: 小城镇;污水;混凝-滤布过滤;生物滴滤池;脱氮

中图分类号: X703 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2014)08-0021-06

Treatment of domestic wastewater by combined processes of coagulation cloth media filtration-anaerobic filter/trickling filter

ZHAO Qingliang[1], LI Jiangwen[1,2], WEI Liangliang[1], WANG Kun[1], LI Wei[1]

(1.School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
2. The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, 300142 Tianjin, China)

Abstract: In order to treat the small town sewage wastewater with high efficiency, energy saving and low power consumption, a combined coagulation cloth media filtration-anaerobic filter/trickling filter system was established at experimental condition. Via the experimental optimization of equipments and materials, the optimal operation parameters of each part, especially the nitrogen removal ability during the start-up of the trickling filter had been investigated. Experimental results showed that at 1 mL/L fly ash coagulant dosage, 54% removal of COD_{cr} and 81% of TP would be removed by the combined system. The optimal hydraulic loading was 15 L/d and the optimal reflux ratio was 150%, which would guarantee the effluent ammonia, COD_{cr}, TP reach A standard.

Keywords: small town; domestic sewage; coagulation-cloth media filtration; trickling filter; nitrification

小城镇污水[1]的常用处理方法有好氧活性污泥法和以稳定塘、人工湿地为代表的自然处理方法[2].前者成本较高、占地面积大、能耗高,并不适宜小城镇污水水量小、水质波动大的特点;而后者需要占用较大的土地资源,不能很好地解决污水中氮的去除问题,且容易引起水体的富营养化.因此,开发适合小城镇污水处理特征的新型工艺已成为解决小城镇污水处理问题的必由之路.

化学强化一级处理(CEPT)常用作污水的一级强化处理或者二级预处理,相对于常规生化处理工艺,强化混凝技术可节省工程投资、减少水处理成本,对导致水体富营养化元素之一的总磷去除率达 90%以上,但存在混凝剂成本高等特点[3].近年来发展起来的混凝滤布过滤技术能够替代传统沉淀池,具有结构紧凑、水头损失小、占地面积

收稿日期: 2013-04-20.
基金项目: 国家创新研究群体科学基金资助项目(51121062);
黑龙江省博士后基金资助项目(AUGA411002401).
作者简介: 赵庆良(1962—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 魏亮亮,weill333@163.com.

少、处理费用低等特点,已广泛应用于污水处理厂深度处理[4-7],但较少应用于污水一级处理. 本文提出以混凝滤布过滤工艺作为一级处理工艺,去除生活污水中的SS、TP和部分COD_{cr}.

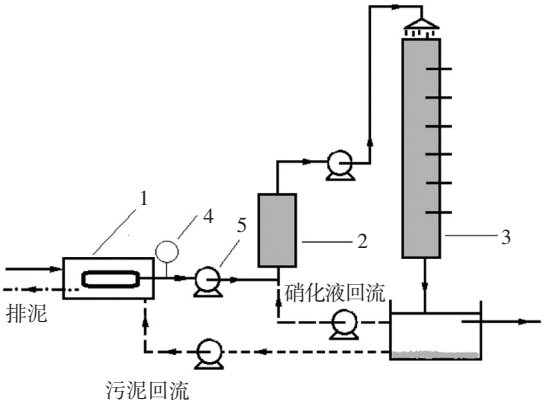
以活性污泥法衍生工艺为主的脱氮除磷工艺需要较大的曝气量,曝气能耗占污水处理总能耗的一半以上.生物滴滤池作为附着生长(生物膜)的一种工艺形式,通过合适的载体和反应器构型设计,可依靠自然通风供氧,节省曝气费用,大幅提高硝化细菌在处理系统中的停留时间[8].目前,国内外研究者针对滴滤池脱氮已开展了大量研究. Persson等[9]指出,随着滤池深度的增加,硝化细菌在硝化滴滤池生物膜中所占比例下降,但硝化潜力并未减少; Akker等[10]指出硝化滴滤池在处理微污染饮用水时,进水COD_{cr}的增加会对滴滤池的硝化能力产生抑制作用;戴世明等[11]利用滴滤池/人工湿地组合工艺处理农村生活污水的研究表明,滴滤池对氨氮去除率为89.5%,但TP的去除主要发生在人工湿地内.因此,提出以混凝-滤布过滤系统作为生物滴滤池的预处理工艺,以解决生物滤池系统对污水中的悬浮颗粒、TP和部分有机物去除不佳的问题,实现污水中N、P在系统内不同阶段的高效去除.

1　实　验

1.1　实验装置

工艺流程如图1所示,污水经混凝后直接进入滤布过滤装置,滤布材料为尼龙,400目,孔径38 μm,过滤膜组件尺寸为17 cm×6 cm×4 cm,有效过滤面积为200 cm^2,由真空抽吸泵(AP-01D,天津)控制出水流量.当滤布过滤装置内外压差达0.02 MPa时,对滤布进行反冲洗(反冲洗流量为500 mL/min,反冲洗时间为4 min),反冲洗水为滴滤池出水,反冲洗后产生的污水回流至进水端进行处理.混凝过滤后出水进入缺氧生物滤池,缺氧滤池出水进入滴滤池.滴滤池出水回流至缺氧段,回流比为150%.生物滴滤池高1.8 m,直径80 mm,自顶端起每隔30 cm设置1个取样孔,滤池内填充火山岩作为填料,相关参数见表1.缺氧滤池直径与滴滤池相同,高0.6 m,其填料与滴滤池相同,粒径为2~3 cm,略大于滴滤池粒径,缺氧滤池与滴滤池容积比为1∶3.

滴滤池出水进入沉淀池,经过沉淀后上清液排放,沉淀污泥回流至滤布过滤装置,组合工艺每天排泥一次(排泥量为0.04~0.06 L/d,污泥含水率为96%).装置处理规模为15 L/d,滤池水力负荷为3 $m^3/(m^2 \cdot d)$.



1—过滤装置; 2—缺氧滤池; 3—滴滤池;
4—压力表; 5—污泥回流泵

图1　工艺流程示意

表1　火山岩填料性质

滤池	粒径/cm	堆积密度/($g \cdot cm^{-3}$)	比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)	表观密度/($g \cdot cm^{-3}$)	外部孔隙率/%
滴滤池	1~2	0.71	6~13	1.67	57
缺氧滤池	2~3	0.65	6~13	1.67	63

1.2　实验用水

待处理污水取自某家属区地下排水管道,水质指标见表2.

表2　实验用污水水质

水质参数	COD_{cr}/($mg \cdot L^{-1}$)	ρ(TP)/($mg \cdot L^{-1}$)	$\rho(NH_4^+-N)$/($mg \cdot L^{-1}$)	ρ(TN)/($mg \cdot L^{-1}$)	pH	t/℃
范围	170~350	1.5~5.2	30~45	35~50	6.5~7.5	18~22

1.3　实验方法

生物滴滤池由上至下每隔30 cm设置一个取样口,定期从每个取样口取水样测定COD_{cr}、氨氮、NO_3^--N、溶解氧等指标.COD_{cr}、氨氮、NO_3^--N、TN及TP等指标均采用国家标准分析方法测定[12].

1.3.1　混凝实验

混凝实验参考国家标准水的混凝、沉淀烧杯试验方法(GB/T 16881—2008)进行.以生活污水作为原水,选取一级化学强化处理常用的3种混凝剂氯化铁$FeCl_3$、硫酸铝$Al_2(SO_4)_3$及粉煤灰基混凝剂[13],在原水中分别投加不同剂量的混凝

剂，先以 200 r/min 的转速快速搅拌 3 min，再以转速 60 r/min 慢速搅拌 10 min 后停止搅拌，静沉 30 min 后取上清液测定 COD_{cr}、TP、氨氮.

1.3.2　过滤实验

选用 400 目尼龙滤布，将原水经混凝后（不需沉淀）直接进入滤布滤池，滤池内设密封的滤布过滤组件，过滤组件一端设出水口与抽吸泵相连，抽吸泵流量恒定为 30 L/h，过滤组件与抽吸泵之间安装真空压力表，测定在恒定通量下过滤前后进出水压差，在实验过程中取进、出水水样分析 COD_{cr} 及 TP.

1.3.3　生物滤池的挂膜启动

生物滤池污泥培养采用接种挂膜法[14]，好氧接种污泥取自某城市污水处理厂（A/O 工艺）好氧段活性污泥.为使污泥均匀分布于生物滤池的填料内，以 25 L/d 的流量将污泥循环打入生物滤池中，共历时 4 d.

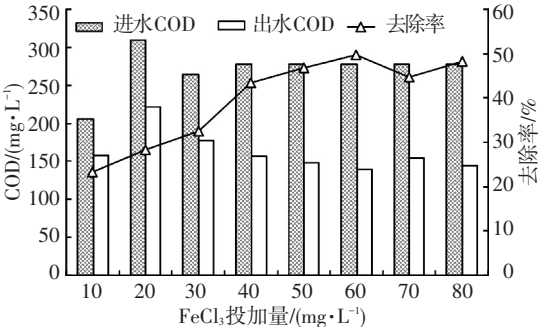
接种污泥后进行连续培养.为防止培养初期水量过大填料内污泥脱落，在连续培养初期采用低流量进水，然后逐步增加流量的培养方式.生物滤池初始进水量为 10 L/d，随后以每天 1 L 的速度递增，直到 15 L/d.

滴滤池启动完成后，启动缺氧生物滤池.缺氧滤池接种污泥取自某城市污水处理厂（A/O 工艺）缺氧段污泥，缺氧滤池进水方式为上升流，底部进水，顶部出水. 为避免初期污泥流失，缺氧生物滤池初始回流比为 30%，之后每天回流比增大 10%，10 d 后达到设计的运行回流比 150%.

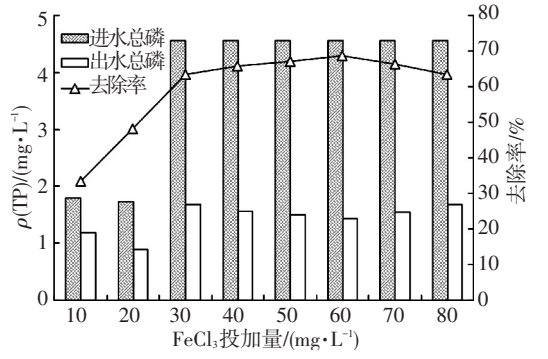
2　结果与讨论

2.1　混凝剂的优选及其混凝效果

选用生活污水一级化学强化处理常用的 3 种混凝剂氯化铁 $FeCl_3$、硫酸铝 $Al_2(SO_4)_3$ 和粉煤灰基混凝剂，进行混凝烧杯实验，以确定实验所用混凝剂及该混凝剂的最佳投药量.3 种混凝剂混凝实验结果如图 2~4 所示.可以看出，同一混凝剂不同投加量下，COD_{cr} 和 TP 的去除效果随投加量变化的情况较一致.随着混凝剂投加量的增加，3 种混凝剂对污水混凝效果均有不同程度提升，但达到某一去除率峰值后便不再继续升高.氯化铁、硫酸铝、粉煤灰基混凝剂（悬浊液）最佳投量分别为 60 mg/L、60 mg/L 和 1 mL/L，3 种混凝剂在最佳投量下对 COD_{cr} 的去除率分别为 50%、64%、54%，对 TP 的去除率分别为 70%、90%、80%，混凝对氨氮的去除率非常低，在 2% ~ 5%.

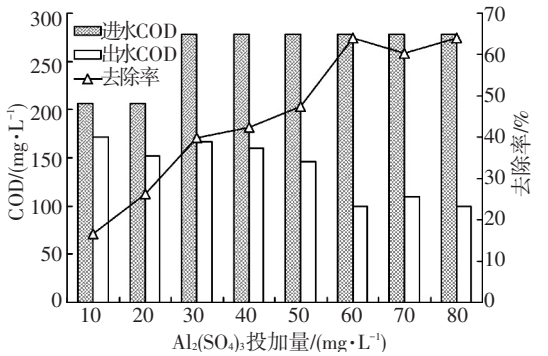


(a) COD_{cr}

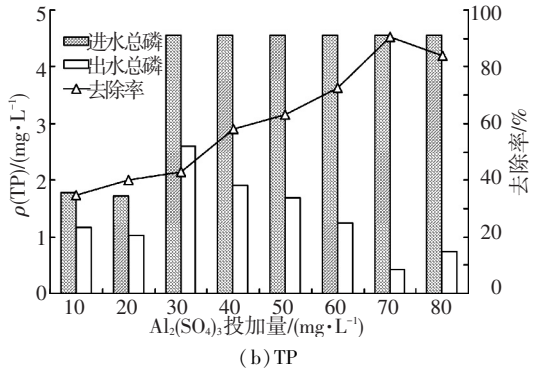


(b) TP

图 2　$FeCl_3$ 混凝剂对 COD_{cr} 和 TP 去除效果



(a) COD_{cr}



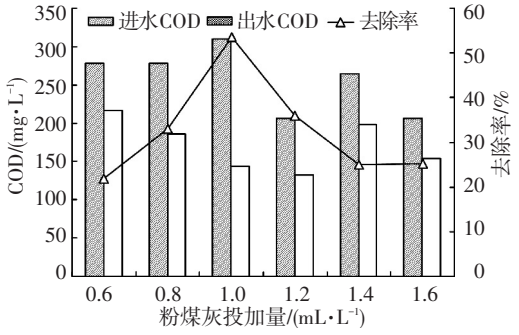
(b) TP

图 3　$Al_2(SO_4)_3$ 混凝剂对 COD_{cr} 和 TP 去除效果

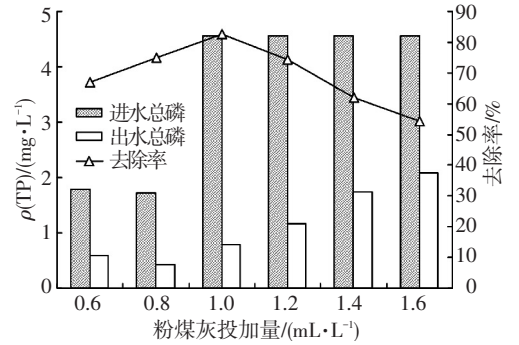
2.2　滤布过滤压差变化

在各混凝剂的最佳投加量下，将混凝后的混合液直接进入滤布进行过滤实验，过滤装置内外压力差随时间变化如图 5 所示.可以看出，投加氯化铁和硫酸铝混凝的污水，过滤 3 min 后过滤装置内外压差开始增加，13 和 15 min 后压差可达

0.02 MPa,需要进行反冲洗.而投加粉煤灰混凝剂的污水,在过滤进行11 min后压差才开始升高,过滤50 min后压差方达0.02 MPa.可见经氯化铁和硫酸铝混凝的污水对滤布的污染速度远远大于粉煤灰混凝的污水.综合考虑粉煤灰是燃煤电厂排出的主要固体废物,其价格低廉,而且解决了粉煤灰回收利用问题,故选用粉煤灰混凝剂作为实验用混凝剂.



(a) COD_{cr}



(b) TP

图4　粉煤灰混凝剂对 COD_{cr} 和 TP 去除效果

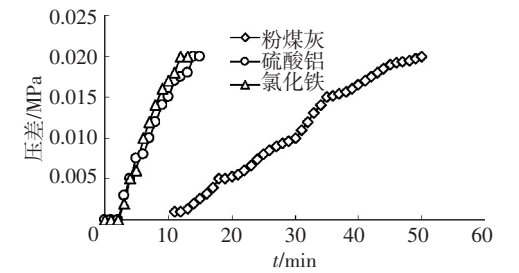


图5　不同混凝剂处理污水时过滤压差随时间变化

2.3　混凝-滤布过滤对 COD_{cr} 和 TP 的去除

在混凝-滤布过滤实验中,COD_{cr} 和 TP 去除效果与混凝后沉淀效果的对比见表3.可以看出,在氯化铁和硫酸铝的最优投加量下,不经沉淀直接进行滤布过滤过程对 COD_{cr} 的去除率均小于在相同条件下经过静止沉淀的去除率;而投加粉煤灰混凝剂的污水经混凝-滤布过滤后对 COD_{cr} 和 TP 的去除与混凝后沉淀的效果几乎相同.由于使用粉煤灰作为混凝-滤布过滤的混凝剂处理污水时具有更长的工作周期(参见图5),确定采用粉煤灰基混凝剂作为混凝-滤布过滤的混凝剂,最佳投加量为1 mL/L,其对 COD_{cr}、TP 的去除率分别为55%和81%.

表3　混凝沉淀与混凝过滤对 COD_{cr} 和 TP 的去除率

混凝剂	最佳投量	COD_{cr} 去除率/%		TP 去除率/%	
		混凝沉淀	混凝过滤	混凝沉淀	混凝过滤
氯化铁	60 mg·L^{-1}	50	40	70	60
硫酸铝	60 mg·L^{-1}	64	50	90	85
粉煤灰	1 mL·L^{-1}	54	55	80	81

2.4　滴滤池启动

滴滤池经过4 d的污泥接种后进入连续培养阶段.在连续培养初期,为研究生物滤池的启动情况及其脱氮效果,定期测定进、出水的 COD_{cr} 和氨氮质量浓度.生物滴滤池进水为混凝-滤布系统出水,其总磷在0.5 mg/L以下,滴滤池出水总磷能够保持在0.5 mg/L以下.进、出水 COD_{cr} 变化见图6.反应器启动初期 COD_{cr} 去除率即达50%以上,因为填料表面虽然并未形成生物膜,但附着许多接种活性污泥,对污水中的污染物有一定的吸附和截留作用.在水力的冲刷作用下,附着并不牢固的活性污泥在水力剪切作用下部分脱落,所以,在启动的前10 d内,出水 COD_{cr} 随进水变化较明显,启动10 d后出水 COD_{cr} 稳定在50 mg/L以下.

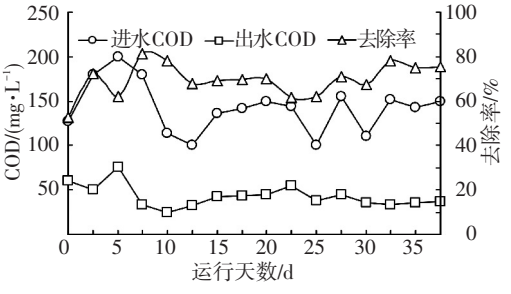


图6　滴滤池启动期间进出水 COD_{cr} 随时间变化

生物滤池挂膜启动后的连续培养阶段,在测定进出水氨氮的同时测定了生物滤池各采样口的氨氮质量浓度,将生物滤池分为上层(0~60 cm)、中层(60~120 cm)、下层(120~180 cm)3个部分,各部分在连续培养过程氨氮出水情况如图7所示.通过生物滤池沿程氨氮分析可知,生物滤池启动初期氨氮的去除率达20%,与王建华等[16]采用快速排泥挂膜法和自然挂膜法相结合的复合挂膜法研究结果一致.滴滤池运行至13 d时,氨氮去除率稳定在70%以上,但此阶段生物滴滤池对氨氮的去除主要集中于生物滤池上段,中段对氨氮的去除作用较弱,主要是因为在启动初期,上层氮源丰富,启动较快完成,导致中段生物滤池中剩余氨氮质量浓度较低,影响了中下段生物滤池的

启动，在此期间中段几乎对氨氮没有去除作用.随着运行时间的延长，中段滤池的氨氮质量浓度也得以提升，逐步完成启动过程，最终达到与上段生物滤池同样的脱氮能力.

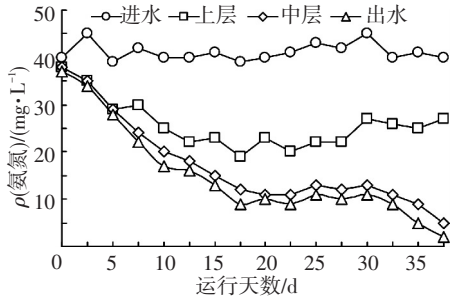


图 7　滴滤池启动期间沿程出水氨氮随时间变化

2.5　缺氧生物滤池启动

滴滤池处于好氧状态，对反硝化作用较弱，对 TN 去除能力很低. 为使出水 TN 达标，在滴滤池前设置淹没式缺氧滤池，其填料为与滴滤池相同的火山岩，填料粒径为 2～3 cm，略大于滴滤池粒径，缺氧滤池与滴滤池容积比为 1∶3.

当缺氧滤池回流比从 30%增加至 150%的过程中，缺氧滤池的反硝化生物膜逐渐增长，在此过程中每日取进、出水水样测定其总氮，结果如图 8 所示.

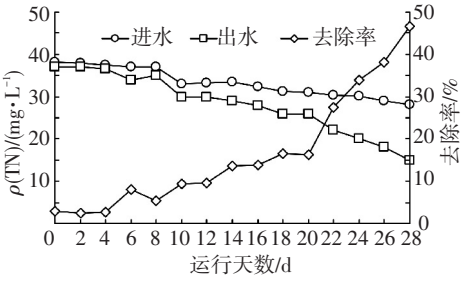


图 8　缺氧滤池启动期间进出水 TN 随时间变化

在缺氧滤池运行初期，进出水 TN 质量浓度并未有明显变化(1～8 d)，主要是由于初期硝化液回流量较少.随着回流量不断增加，反硝化细菌开始累积，TN 去除率不断提高.第 10 天回流比达 150%后，去除率开始逐渐增加，直至运行到第 28 天 TN 去除率达 45%，出水 TN 质量浓度降至15 mg/L，达到 GB18918—2002 的一级 A 标准要求.

2.6　混凝-滤布过滤-生物滤池组合工艺运行效果及能耗分析

生物滤池启动完成后，将其与混凝滤布结合，形成混凝滤布过滤-缺氧生物滤池/滴滤池组合工艺.混凝-滤布系统对原水 COD_{cr} 去除率为 50%，TP 去除率为 81%，对氨氮几乎没有去除作用；生物滤池进水 COD_{cr} 稳定维持在 200～80 mg/L，出水 COD_{cr} 稳定在 50 mg/L 以下，对氨氮去除率达 90%，TN 的去除率达 45%以上.

与活性污泥法相比，本工艺无需曝气，可以节约能耗(表 4).生物滴滤池在有机负荷为 0.8～1.2 kg/(m^3·d)内运行效果良好，远大于活性污泥法的有机负荷(0.10～0.17 kg/(m^3·d))，可以减少池容.组合工艺污泥产量与活性污泥法的比较见表 4.以混凝过滤为前处理的生物滴滤池工艺，污泥主要产生在混凝-滤布过滤阶段，所产生化学污泥含水率为 94%，污水一级处理工艺的污泥产量取决于污水中悬浮物浓度，所以，混凝-滤布过滤阶段污泥产量与活性污泥法初沉污泥产量相差不大；而生物处理阶段，与活性污泥法相比，滴滤池微生物增殖速度较慢，污泥产量与传统活性污泥法相比减小很多，滴滤池剩余污泥的含水率则为 98.5%.混凝-滤布过滤对原水中 COD_{cr} 去除率为 50%，组合工艺在相同的有机负荷条件下节约了生物滴滤池的池容.

混凝使用药剂为实验室自制粉煤灰混凝剂，粉煤灰来源为电厂固体废弃物，与市售混凝剂相比成本极低.反冲洗水量占处理总水量的 1.0%～7.2%.滤布滤池运行电耗为 0.012～0.060 kWh/m^3[4-6].滴滤池能耗主要来自污水提升泵和硝化液回流泵，电耗为 0.06～0.10 kWh/m^3[17-19].组合工艺吨水处理电耗为 0.072～0.160 kWh/m^3，由于工艺无需曝气，能耗小于活性污泥法处理污水电耗(0.263 kWh/m^3).

表 4　与其他处理工艺比较

项目类型	污泥产率/(kg·m^{-3})		BOD 容积负荷/(kg·(m^3·d)$^{-1}$)	处理吨水电耗/(kWh·m^{-3})
	一级[1]	二级[2]		
混凝过滤-滴滤池组合工艺	0.10～0.11	0.01～0.02	0.80～1.20	0.072～0.160
活性污泥法	0.10～0.12	0.04～0.06	0.10～0.17	0.263

1. 混凝过滤-滴滤池组合工艺一级处理为混凝-滤布过滤，活性污泥法一级处理为初沉池；

2.混凝过滤-滴滤池组合工艺二级处理为滴滤池，活性污泥法二级处理为曝气池.

3 结 论

1)采用混凝-滤布过滤处理生活污水,当粉煤灰基混凝剂投加量为1 mL/L时,对COD_{cr}去除率为50%,TP去除率达81%.

2)经过混凝-滤布过滤处理后的生活污水进一步经过生物滤池处理,滴滤池出水硝化液回流至缺氧滤池,回流比为150%,出水氨氮、TN、COD_{cr}及TP均达到GB81918—2002中的一级A标准.

3)混凝-滤布过滤段对生物污水中磷的高效去除、缺氧滤池/生物滴滤池对总氮、氨氮的高效去除可解决传统活性污泥法同步脱氮除磷的难题,适合于小城镇污水处理.

参考文献

[1] 国务院办公厅关于印发"十二五"全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划的通知[R].北京:国务院办公厅,2012.

[2] 李伟,徐国勋,鲁剑,等.小城镇污水处理设施的特点及对策[J].中国给水排水,2012,28(6):29-32.

[3] 梁冠亮, 赵庆良. 化学强化一级处理-人工湿地处理生活污水效果[J].环境科学与技术,2009,32(8):134-137.

[4] 马小杰.滤布滤池在污水处理厂深度处理中的应用[J].中国市政工程,2010,146(3):30-31.

[5] 洪俊明.滤布滤池系统在城市污水深度处理的中试研究[J].环境工程学报,2008,10(2):1361-1364.

[6] 司妮娜,于晓华,曲颂华,等.混凝-微滤布过滤工艺深度处理污水厂二级出水[J].中国给水排水,2008,24(3):106-108.

[7] 孙士权,刀钟颖,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,2009,7(3):1223-1227.

[8] OGA T, SUTHERSAN S, GANCZARCZYK J. Some properties of aerobic biofilms [J]. Environmental Technology,1991,12(5): 431-440.

[9] PERSSON F, WIK T, SORENSSON F, et al. Distribution and activity of ammonia oxidizing bacteria in a large full-scale trickling filter[J]. Water Research, 2002 (36): 1439-1448.

[10] AKKER VAN DEN B, HOLMES M, PEARCE P, et al. Structure of nitrifying biofilms in a high-rate trickling filter designed for potable water pre-treatment [J]. Water Research, 2011(45): 3489-3498.

[11] 戴世明,白永刚,吴浩汀,等.滴滤池/人工湿地组合工艺处理农村生活污水[J].中国给水排水,2008,24(7): 21-24.

[12] 魏复盛.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.

[13] 李亚强,胡凯,赵庆良,等.酸浸粉煤灰制备复合混凝剂及其处理生活污水的效果研究[J].环境科学,2007,28(11):2507-2514.

[14] 李先宁,李孝安.冬季溅水充氧滴滤池处理农村生活污水的启动研究[J].环境工程学报,2007,1(8):26-30.

[15] MOREAU M, LIU Y. Kinetic behavior of heterotrophic and autotrophic biofilms in wastewater treatment processes[J]. Water Science and Technology, 1994, 29 (10/11): 385-391.

[16] 王建华,陈永志,彭永臻. A~2O-BAF工艺处理低C/N值生活污水的快速启动[J].中国给水排水,2010,26(15):32-35.

[17] 陈蒙亮,王鹤立,陈晓强. 新型生物滴滤池处理生活污水的中试研究[J].水处理技术,2012,38(8): 84-87.

[18] 余珍,孙扬才,邱江平,等.新型滴滤池处理餐饮废水[J].水处理技术,2006,32(7):64-66.

[19] 吴磊,吕锡武,吴浩汀,等.水解/脉冲滴滤池/人工湿地工艺处理农村生活污水[J].东南大学学报,2007,37(5):878-882.

(编辑 刘 彤)