

# 新型陶瓷填料用于曝气生物滤池可行性试验研究

王炜亮<sup>a,b</sup>

(山东师范大学 a. 人口·资源与环境学院; b. 化学化工与材料科学学院, 济南 250014)

**摘要:**对装填新型陶瓷填料和生物陶粒的 2 个曝气生物滤池系统进行了平行对比试验研究。分析了新型陶瓷填料用于曝气生物滤池处理生活污水的可行性及其优缺点,优化了曝气生物滤池系统运行参数。试验结果表明:在好氧区水力停留时间为 1.5 h,进水 COD<sub>cr</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP 分别为 135.6 mg/L、42.1 mg/L、0.69 mg/L 时,新型陶瓷填料 BAF 相应指标去除率依次为 81.2%、99.8%、68.1%,生物陶粒 BAF 相应指标去除率依次为 80.8%、99.5%、66.7%,在相同运行条件下,新型陶瓷填料反冲洗耗水量小、冲洗效果好、运行成本低。

**关键词:**污水;曝气生物滤池;填料;新型陶瓷填料;生物陶粒;反冲洗

**中图分类号:**X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)03-0138-07

## Feasibility Analysis on New Ceramic Fillers Loading in Biological Aerated Filter

WANG Wei-liang<sup>a,b</sup>

(a. College of Population, Resources and Environment; b. College of Chemistry, Chemical Engineering and Materials Science, Shandong Normal University, Jinan 250014, P. R. China)

**Abstract:** The BAF for wastewater treatment loaded with new ceramic fillers was investigated in comparison with the BAF loaded with biogenic ceramisite agitator. The feasibility and features of the new ceramic fillers had been analyzed by comparing the two fillers and the operational parameters had been analyzed and determined at the same time. It is shown that when the average influent COD<sub>cr</sub> is 135.6 mg/L, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 42.1 mg/L and TP 0.69 mg/L, the removal efficiencies of The BAF loaded with new ceramic fillers and ceramisite agitator are 81.2%, 99.8%, 68.1% and 80.8%, 99.5%, 66.7% respectively at the condition of the HRT=1.5 h. New ceramic fillers required less water to backwash and had better effect than biogenic ceramisite agitator at the same condition, what is more, the running costs of the BAF loaded with new ceramic fillers were less than that of the BAF loaded with ceramisite agitator.

**Key words:** wastewater; BAF; fillers; new ceramic fillers; ceramisite agitator; backwash

曝气生物滤池(biological aerated filter,BAF),是在普通生物滤池的基础上,借鉴给水滤池工艺原理而开发的一种污水处理工艺,具有去除 SS、COD、BOD、AOX(有害物质)和脱氮除磷等功能,其去除机理主要有过滤、吸附和生物代谢。曝气生物滤池因其具有体积小、处理效率高、出水水质好、流程简

单,不需设置二沉池等优点而倍受广大研究者关注。Ryu 等<sup>[1]</sup>运用 4 阶段(吸附、硝化、反硝化和深度净化)曝气生物滤池处理低 C/N 比城市污水,强化脱氮效果,氨氮平均去除率为 95%~96%。Liu 等<sup>[2]</sup>发现,上向流曝气生物滤池用于纺织废水二级处理后出水的深度处理时,保持溶解氧浓度 4 mg/L,水

收稿日期:2009-12-04

基金项目:山东省环境保护局资助项目(2002-08)

作者简介:王炜亮(1979-),男,博士后,主要从事水污染控制研究,(E-mail)sunboyhood@163.com。

力负荷从  $0.13 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  提高至  $0.78 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , COD、氨氮和总氮去除率分别从 52%、90% 和 45% 降至 38%、68% 和 33%; 溶解氧浓度从  $2.4 \text{ mg/L}$  提高到  $6.1 \text{ mg/L}$  时, COD 和氨氮去除率分别从 39% 和 64% 提高至 53% 和 88%, 但总氮变化不明显; 试验还发现参与净化的微生物包含自养菌和异养菌, 并存在同步硝化反硝化现象。郝晓地等<sup>[3]</sup> 试验发现, 内循环可以显著提高曝气生物滤池反硝化效果, 在内循环比为 150% 时, 硝化过程中产生的  $\text{NO}_3^-$  几乎均能被反硝化完全去除, 且增加内循环对 COD、SS、浊度等去除效果影响不大。Pujol 等<sup>[4]</sup> 发现, 上向流曝气生物滤池可高效去除污水中 SS、COD、BOD、氨氮, 即使在  $10 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$  的高负荷条件下, SS 的去除率仍在 60 以上。CHENG 等<sup>[5]</sup> 用曝气生物滤池处理富含水溶性 VOCs 的电子加工企业废水并评估挥发量, 结果发现, 容积负荷为  $2.76 \text{ kgBOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  时, 可有效去除 COD 和甲苯、异丙醇(IPA) 等 VOCs, COD 去除率超过 90%, 部分 VOCs 挥发到大气中, 异丙醇的挥发量小于 0.1%, 甲苯的挥发量为 30%~40%, 二者挥发速率分别为  $0.003 \text{ kg/d}$  和  $0.007 \text{ kg/d}$ 。

填料是曝气生物滤池污水处理工艺的核心, 新型曝气生物滤池填料开发应用及其机理探讨是近年来的研究热点。胡涛等<sup>[6]</sup> 指出 BAF 工艺中生物滤料的性能是关键, 应多考虑用价廉易得的无机矿物原料和工业废料开发高效廉价的滤料。徐竟成等<sup>[7]</sup> 发现悬浮滤料对氨氮的降解能力较强, 但由于对微小絮体的截留能力不足而导致出水 COD 较高, 轻质滤料的截留效果较好但反冲洗难度较大, 以悬浮滤料和轻质滤料组成复合滤料层曝气生物滤池是最佳组合。王萍等<sup>[8]</sup> 利用天然黏土和粉煤灰为主要原料制备的曝气生物滤池陶粒滤料比表面积为  $4.26 \sim 7.24 \text{ m}^2/\text{g}$ , 容重为  $0.73 \sim 0.74 \text{ cm}^3/\text{g}$ , 表面粗糙, 物理化学稳定性好。李善评等<sup>[9]</sup> 以高炉瓦斯灰为主要原料、粘土和硅酸钠为添加剂制备了曝气生物滤池填料并将其用于处理酱油废水, 在水力停留时间为 4 h、气水比 6:1、滤层高度为 100 cm 的情况下, COD 的去除率达到 70.3%, 氨氮的去除率达到 74%, 色

度的去除率达到 60%。Francisco 等<sup>[10]</sup> 将固体废弃物制成填料用于双层淹没曝气生物滤池, 其上层填料是将陶瓷工业废料碾磨成 2~5 mm 的颗粒, 其相对密度为  $2.18 \text{ g/cm}^3$ , 下层填料是由聚乙烯废塑料经粉碎、淘洗、挤压成型加工制成, 其直径为 5 mm, 相对密度为  $0.92 \text{ g/cm}^3$ 。该曝气生物滤池在  $4.87 \text{ kgBOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,  $3.0 \text{ kgSS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  时, 出水 BOD 浓度低于  $20 \text{ mg/L}$ , SS 低于  $25 \text{ mg/L}$ 。葛伟青等<sup>[11]</sup> 用曝气生物滤池处理豆制品加工废水, 试验发现在海绵铁与陶粒混合质量比为 1:3、HRT=1.0 h 时其对 COD 和色度的去除效果均能达到 40% 以上, 向海绵铁中加入陶粒可有效地避免填料板结。SHEN 等<sup>[12]</sup> 将丙烯酰胺亲水链嫁接到填料表面, 提高了填料表面润湿性能和生物膜附着能力, 在进水流量  $5 \text{ L/h}$ , 水力停留时间 9 h, 气水比 10:1, 表面改性填料曝气生物滤池 COD 和氨氮去除率分别为 83.64% 和 96.25%, 比未改性填料曝气生物滤池去除率高 5%~20%。Zhao 等<sup>[13]</sup> 发现, 污泥飞灰陶瓷颗粒填料曝气生物滤池对 COD 和氨氮的去除效果优于粘土陶瓷颗粒曝气生物滤池, 而且, 前者具有较好的抗冲击能力和较快的生物活性恢复能力。Chang 等<sup>[14]</sup> 实验发现, 曝气生物滤池工艺处理纺织废水中氨氮时, 沸石填料优于砂和颗粒活性炭, 去除机理主要包括硝化作用、离子交换和同化合成。

曝气生物滤池新型填料研发尚处于起步阶段, 新型填料应用于曝气生物滤池的运行参数还有待进一步优化, 运行过程机理有待深入探索, 且现有研究缺乏对运行成本的核算, 传统的曝气生物滤池填料比重大、机械强度差、不利于反冲洗, 因此, 亟须研发新型高效经济实用的曝气生物滤池填料。该研究最大特点是使用了一种新型粒状陶瓷填料, 并将新型陶瓷填料和生物陶粒进行平行对比试验研究, 而且进行了运行成本比较。

## 1 试验条件和方法

### 1.1 进水水质

曝气生物滤池进水取自某污水处理厂硅藻精土强化一级处理系统出水, 进水水质见表 1。

表 1 进水水质/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$

COD <sub>cr</sub>	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	TP
96.5~180.7	60.1~101.8	61.8~104.6	28.9~47.6	0.2~0.9	0.4~1.3

### 1.2 两种填料性能参数对比

试验采用 2 套并行的曝气生物滤池系统, 分别

装填球形生物陶粒和新型陶瓷填料。球形生物陶粒以粘土(主要成分为偏铝硅酸盐)为主要原材料, 加

入适当的化工原料作为膨胀剂,经高温烧制而成,其外观成球形,表面粗糙、比表面积大。新型陶瓷填料主要成分是氧化铝和氧化硅,机械强度高,耐摩擦性

能好,表面粗糙,且带一定的正电荷,比重较小。因此,新型陶瓷填料有利于微生物吸附生长和曝气生物滤池系统反冲洗。二者的主要性能参数见表 2。

表 2 生物陶粒和新型陶瓷填料主要性能参数

填料	粒径/mm	堆积密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	比表面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	外部空隙率
球形生物陶粒	4~6	0.89	1.56	4.11	0.339
新型陶瓷填料	4~6	0.05	1.12	4.59	0.384

### 1.3 工艺流程和试验装置

曝气生物滤池由透明有机玻璃柱加工而成,柱内径为 0.15 m,高 2.8 m,底部为气水混合室,填料高度 1.5 m,柱侧壁设有取水口,间距为 0.2 m。工艺流程如图 1 所示。

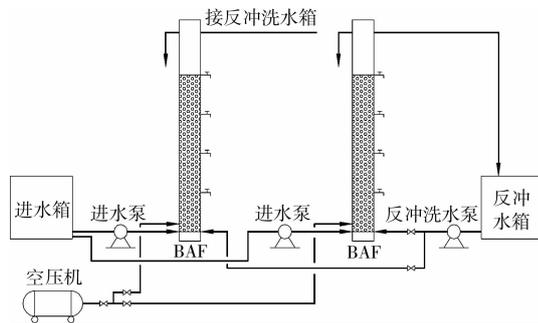


图 1 曝气生物滤池系统工艺流程图

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 2 种填料挂膜过程分析

微生物在载体表面的附着过程是生物膜形成的关键一步,它将直接影响生物膜的生物及生理功效以及生物膜反应器的启动运行周期,且挂膜过程中,好氧异养菌的增殖速度较快,硝化菌增殖较慢<sup>[15-16]</sup>。

本试验通过接种某污水处理厂回流污泥,采用间歇进水方式,对曝气生物滤池进行闷曝挂膜培养。2 周后发现,两柱内填料表面均生长形成半透明状微生物膜,进水方式调为连续进水,进水水量均为 4.4 L/h。

表 3 显示连续进水第 3 d 和第 7 d 两系统的运行结果。连续进水第 7 d 和第 3 d 时相比,新型陶瓷填料曝气生物滤池  $\text{COD}_{\text{cr}}$  去除率由 52.3% 提高至 76.9%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率由 47.8% 提高至 97.3%;生物陶粒曝气生物滤池  $\text{COD}_{\text{cr}}$  去除率由 51.3% 提高至 76.6%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率由 47.1% 提高至 97.1%。2 个曝气生物滤池系统在相同的挂膜条件下,填料表面的微生物膜均生长良好,挂膜成功,且两者处理效果相当。

### 2.2 最佳水力停留时间的研究

在进水水质、曝气量、反冲洗周期等均相同的条件下,2 个曝气生物滤池系统的水力停留时间分别为 3 h、2 h、1.5 h 和 1 h,即新型陶瓷填料 BAF 工况 1-1、工况 1-2、工况 1-3 和工况 1-4,生物陶粒 BAF 工况 2-1、工况 2-2、工况 2-3 和工况 2-4,各工况工艺参数详见表 4。

表 3 两种填料挂膜过程分析

工况	生物陶粒 BAF			新型陶瓷填料 BAF			
	$\text{COD}_{\text{cr}}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{COD}_{\text{cr}}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	
连续进水 第 3 d	进水/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	123.5	41.2	0.1	123.5	41.2	0.1
	出水/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	58.9	21.5	9.9	60.1	21.8	9.5
	去除率/%	52.3	47.8		51.3	47.1	
连续进水 第 7 d	进水/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	120.9	41.4	0.1	120.9	41.4	0.1
	出水/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	27.9	1.1	28.3	28.3	1.2	27.9
	去除率/%	76.9	97.3		76.6	97.1	

表4 新型陶瓷填料和生物陶粒对比试验各工况工艺参数

参数	工况 1-1	工况 1-2	工况 1-3	工况 1-4
	工况 2-1	工况 2-2	工况 2-3	工况 2-4
水温/ $^{\circ}\text{C}$	18-25	18-25	18-25	18-25
流量/ $(\text{L} \cdot \text{h}^{-1})$	8.8	13.3	17.7	26.5
水力停留时间/h	3	2	1.5	1
容积负荷 I/ $(\text{kgCOD} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1})$	0.86	1.18	1.76	2.03
容积负荷 II/ $(\text{kgCOD} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1})$	0.85	1.18	1.76	2.03
滤速/ $(\text{m} \cdot \text{h}^{-1})$	0.5	0.75	1	1.5
反冲洗周期/d	2	2	2	2
溶解氧/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	3	3	3	3

表5显示新型陶瓷填料和生物陶粒对比试验运行结果,各工况反冲洗周期均为2d,溶解氧均为3mg/L。水力停留时间为3h、2h和1h时,新型陶瓷填料曝气生物滤池 $\text{COD}_{\text{cr}}$ 去除率分别为83.8%、81.4%和70.6%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率分别为100%、100%和74.6%;生物陶粒曝气生物滤池 $\text{COD}_{\text{cr}}$ 去除率分别为83.6%、81.6%和70.8%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率分别为100%、100%和73.8%。可见,2系统工艺条件相同时,对有机污染物质、氮、磷等去除效果相当。

停留时间为3h和2h时,2系统出水各指标除 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 外,其他均达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级标准A标准,处理效果较好,但停留时间长,污水处理系统的基建投资和管理费用高;停留时间为1.5h时,2系统 $\text{COD}_{\text{cr}}$ 去除率均在80%以上, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率接近100%,处理效果和停留时间为2h时相当;停留时间降至1h时,2系统出水 $\text{BOD}_5$ 、SS、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 超过10mg/L,各指标去除率明显下降。可见,最佳停留时间为1.5h。

表5 新型陶瓷填料和生物陶粒对比试验各工况运行结果

指标		工况 1-1	工况 1-2	工况 1-3	工况 1-4	工况 2-1	工况 2-2	工况 2-3	工况 2-4
$\text{COD}_{\text{cr}}$	进水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	128.3	120.5	135.6	119.6	128.3	120.5	135.6	119.6
	出水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	20.8	22.4	25.6	35.2	21.1	22.2	26.1	34.9
	去除率/%	83.8	81.4	81.2	70.6	83.6	81.6	80.8	70.8
$\text{BOD}_5$	进水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	82.6	70.2	78.6	74.5	82.6	70.2	78.6	74.5
	出水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	5.1	5.4	6.2	10.3	4.9	5.3	6.1	11.2
	去除率/%	93.8	92.3	92.1	86.2	94.7	92.5	92.2	85.0
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	进水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	41.9	40.3	42.1	41.3	41.9	40.3	41.1	41.3
	出水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0	0	0.1	10.5	0	0	0.2	10.8
	去除率/%	100	100	99.8	74.6	100	100	99.5	73.8
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	进水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.45	0.40	0.51	0.44	0.45	0.40	0.51	0.44
	出水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.14	0.15	0.20	0.29	0.11	0.13	0.19	0.30
	去除率/%	68.8	62.5	60.8	34.1	75.6	67.5	62.7	31.8
TP	进水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.71	0.73	0.69	0.72	0.71	0.73	0.69	0.72
	出水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.15	0.17	0.22	0.31	0.14	0.16	0.23	0.31
	去除率/%	78.9	76.7	68.1	56.9	80.3	78.1	66.7	56.9
SS	进水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	83.8	85.6	81.9	85.2	83.8	85.6	81.9	85.2
	出水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	6.7	7.2	7.9	14.1	7.1	7.4	7.9	13.9
	去除率/%	92.0	91.6	90.3	83.4	91.5	91.4	90.4	83.7
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	进水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.10	0.11	0.11	0.12	0.10	0.11	0.11	0.12
	出水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	30.2	30.0	29.8	20.4	30.5	30.2	29.6	20.6
$\text{NO}_2^- - \text{N}$	进水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.19	0.20	0.21	0.20	0.19	0.20	0.21	0.20
	出水/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.43	0.45	0.41	0.58	0.49	0.40	0.45	0.52

### 2.3 填料高度对污染物质的去除效果考察

图 2 显示新型陶瓷填料 BAF 不同水力停留时间下沿填料高度对 COD<sub>cr</sub> 的去除效果。3 种工况 COD<sub>cr</sub> 变化趋势相同,前 0.7 m 填料的 COD<sub>cr</sub> 去除率很高, COD<sub>cr</sub> 浓度降至约 40 mg/L。可见,新型陶瓷填料 BAF 对 COD<sub>cr</sub> 的去除主要集中在填料高度的前 0.7 m。

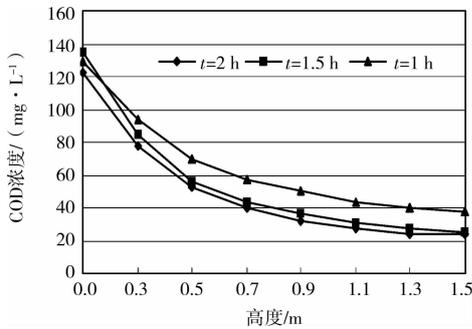


图 2 不同水力停留时间下沿填料高度对 COD 的去除效果

图 3 显示新型陶瓷填料 BAF 不同水力停留时间下沿填料高度对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除效果。可见,前 0.7 m 填料 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除不明显, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度降至约 30 mg/L, 填料高度超过 0.7 m 后, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度显著下降。结合沿填料高度 COD<sub>cr</sub> 浓度变化趋势可知,在填料高度的前 0.7 m 好氧异养微生物占优,好氧自养硝化细菌和好氧异养细菌竞争营养物质和氧气时处于劣势;填料高度超过 0.7 m 后硝化菌逐渐取得优势。试验期间发现新型陶瓷填料 BAF 可以截留污染物质,在填料间生成生物絮体,因此,新型陶瓷填料 BAF 集填料截留和生物吸附于一身,具有微生物量大、活性高和传质速率快等优点。

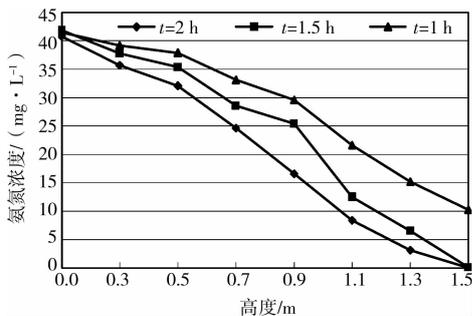


图 3 不同水力停留时间下沿填料高度对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除效果

图 4 显示新型陶瓷填料 BAF 不同水力停留时间下 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度沿填料高度变化趋势。可见, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的硝化反应主要发生在填料高度超过

0.7 m 后。结合图 3 分析可知,停留时间为 1 h 时,出水中仍有 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 剩余;停留时间为 2 h 和 1.5 h 时,出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度接近 0 mg/L,而出水 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度为 30 mg/L,低于进水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度,是因为部分 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 被微生物同化作用所利用,另外还可能存在同步硝化反硝化作用。

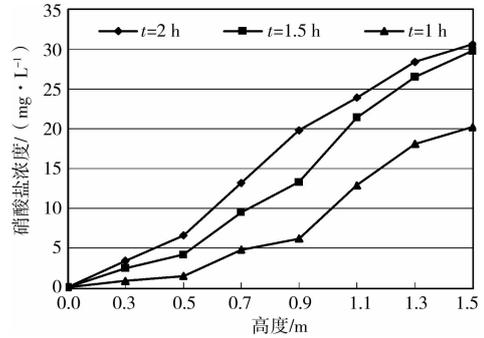


图 4 不同水力停留时间下沿填料高度 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度变化

### 2.4 新型陶瓷填料 BAF 反冲洗试验研究

与曝气生物滤池底部相通的测压管显示,曝气生物滤池运行过程中水头损失很小,因此用出水水质确定最佳反冲洗周期。水力停留时间为 1.5 h,反冲洗周期为 3 d 时,新型陶瓷填料 BAF 反冲洗后出水水质变化情况见表 6。可见,出水水质在反冲洗后第 3 d 开始恶化,因此确定最佳反冲洗周期为 2 d。

表 6 反冲洗后出水水质变化表/(mg·L<sup>-1</sup>)

指标	反冲洗后第 1 d	反冲洗后第 2 d	反冲洗后第 3 d
COD <sub>cr</sub>	24.2	25.9	39.6
BOD <sub>5</sub>	6.1	6.5	11.9
SS	7.8	8.5	17.5
TP	0.21	0.23	0.31
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0	0.2	2.1
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	29.9	29.8	27.6

生物陶粒和新型陶瓷填料密度分别为 1.56 g/cm<sup>3</sup> 和 1.12 g/cm<sup>3</sup>。反冲洗时,生物陶粒在气水流的作用下,呈板结团状上移,很难散开;新型陶瓷填料呈分散流化状态上移,利于反冲洗。在反冲洗水量和风量均相同,新型陶瓷填料膨胀度为 30% 时,生物陶粒膨胀度却不足 20%;停留时间为 1.5 h,反冲洗周期为 2 d 时,达到同样的反冲洗效果,生物陶粒 BAF 每次反冲洗耗水量为 90 L,而新型陶瓷填料 BAF 耗水量为 60 L。可见,新型陶瓷填料由于其比重小而显示出明显优势:反冲洗耗水量小、冲洗效果好、反冲洗容易、可以节省能耗。

整个试验历经6个月,试验前2系统填料高度均为1.5 m,试验后期生物陶粒粒径明显变小,填料高度降低,降幅为5%,而新型陶瓷填料BAF填料高度降低非常小,降幅为1%。可见,在机械强度方面,新型陶瓷填料优于生物陶粒。

## 2.5 生物陶粒BAF和新型陶瓷填料BAF运行成本比较

根据试验数据,进行生物陶粒BAF和新型陶瓷填料BAF运行成本比较。按日处理水量1000 m<sup>3</sup>计算,电费0.65元/度,生物陶粒400元/m<sup>3</sup>,新型陶瓷填料600元/m<sup>3</sup>,曝气生物滤池气水比3.5:1,二者处理每吨水曝气电耗均为0.047元。生物陶粒BAF和新型陶瓷填料BAF气水联合反冲洗每次反

冲洗耗水量分别为90 L和60 L,反冲洗气体流量分别为15 L/(m<sup>2</sup>·s)和10 L/(m<sup>2</sup>·s),反冲洗用时均为20 min,反冲洗周期2 d,生物陶粒BAF和新型陶瓷填料BAF处理每吨水反冲洗水泵电耗分别为0.00024元和0.00017元,反冲洗气泵电耗分别为0.0065元和0.0048元。生物陶粒每年补充10%,新型陶瓷填料每年补充2%,生物陶粒BAF和新型陶瓷填料BAF处理每吨水填料补充费用分别为0.0073元和0.0022元。生物陶粒BAF和新型陶瓷填料BAF处理每吨水运行成本合计分别为0.061元和0.054元,该成本不包括固定资产折旧和设备大修。生物陶粒BAF和新型陶瓷填料BAF运行成本比较见表7。

表7 生物陶粒BAF和新型陶瓷填料BAF运行成本比较

BAF	曝气电费/ (元·m <sup>-3</sup> )	反冲水泵电费/ (元·m <sup>-3</sup> )	反冲气泵/ (元·m <sup>-3</sup> )	填料补充/ (元·m <sup>-3</sup> )	合计/ (元·m <sup>-3</sup> )
生物陶粒BAF	4.7×10 <sup>-2</sup>	2.4×10 <sup>-4</sup>	6.5×10 <sup>-3</sup>	7.3×10 <sup>-3</sup>	6.1×10 <sup>-2</sup>
新型陶瓷填料BAF	4.7×10 <sup>-2</sup>	1.7×10 <sup>-4</sup>	4.8×10 <sup>-3</sup>	2.2×10 <sup>-3</sup>	5.4×10 <sup>-2</sup>

## 3 结论

1)新型陶瓷填料BAF和生物陶粒BAF最佳水力停留时间均为1.5 h。最佳工况运行,进水COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP分别为135.6 mg/L、42.1 mg/L、0.69 mg/L时,新型陶瓷填料BAF相应指标去除率依次为81.2%、99.8%、68.1%,生物陶粒BAF相应指标去除率依次为80.8%、99.5%、66.7%。

2)在相同运行条件下,新型陶瓷填料反冲洗耗水量小、滤料流化状态好、冲洗效果好、反冲洗容易,运行成本低。因此,新型陶瓷填料作为生物陶粒的优化替代产品,是可行的。

3)试验发现新型陶瓷填料BAF对COD<sub>Cr</sub>的去除主要集中在填料高度的前0.7 m,对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除主要集中在填料高度超过0.7 m后。

### 参考文献:

[1] HONG-DUCK RYU, DAEKEUN KIM, HEUN-EUN LIM, et al. Nitrogen removal from low carbon-to-nitrogen wastewater in four-stage biological aerated filter system[J]. *Process Biochemistry*, 2008, 43(7): 729-735.

[2] FANG LIU, CHAO-CHENG ZHAO, DONG-FENG ZHAO, et al. Tertiary treatment of textile wastewater with combined media biological aerated filter (CMBAF) at different hydraulic loadings and dissolved oxygen concentrations[J]. *Journal of Hazardous Materials*,

2008, 160(1): 161-167.

[3] 郝晓地,魏丽,仇付国. 火山岩填料曝气生物滤池内循环强化脱氮试验研究[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(2): 239-245.

HAO XIAO-DI, WEI LI, QIU FU-GUO. Experimental study on enhancing nitrogen removal by effluent recirculation in a BAF reactor with crushed lava packed as carriers [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(2): 239-245.

[4] PUJOL R, LEMMEL H, GOUSAILLES M. A keypoint of nitrification in an upflow biofiltration reactor[J]. *Wat Sci Tech*, 1998, 38(3): 43-49.

[5] CHENG WEN-HSI. Using a biological aerated filter to treat mixed water-borne volatile organic compounds and assessing its emissions[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(11): 1497-1502.

[6] 胡涛,朱斌,马喜军,等. 曝气生物滤池中滤料的应用研究进展[J]. *化工环保*, 2008, 28(6): 509-513.

HU TAO, ZHU BIN, MA XI-JUN, et al. Progresses in the application of biological aerated filtering materials [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2008, 28(6): 509-513.

[7] 徐竟成,徐立,鲁敏. 三种曝气生物滤池滤料处理城市污水的对比研究[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(1): 93-96.

XU JING-CHENG, XU LI, LU MIN. Study on urban domestic sewage treatment by three kinds of filtering materials in biological aerated filter[J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(1): 93-96.

[8] 王萍,李国昌. 曝气生物滤池陶粒滤料制备及其性能

- [J]. 非金属矿, 2006, 29(5): 53-58.
- WANG PING, LI GUO-CHANG. Preparation of biological aerated ceramsite filter medium and its performance[J]. Non-Metallic Mines, 2006, 29(5): 53-58.
- [9] 李善评, 张启磊, 付敬, 等. 高炉瓦斯灰曝气生物滤池填料的制备及其性能研究[J]. 山东大学学报: 理学版, 2007, 42(11): 1-5.
- LI SHAN-PING, ZHANG QI-LEI, FU JING, et al. Preparation and performance study of filter media made by blast furnace dust for a biological aerated filter[J]. Journal of Shandong University: Natural Science, 2007, 42(11): 1-5.
- [10] FRANCISCO OSORIO, ERNESTO HONTORIA. Wastewater treatment with a double-layer submerged biological aerated filter, using waste materials as biofilm support [J]. Journal of Environmental Management, 2002, 65(1): 79-84.
- [11] 葛伟青, 王益民, 刘艳娟, 等. 海绵铁和陶粒填料曝气生物滤池处理豆制品废水[J]. 工业水处理, 2008, 28(5): 57-59.
- GE WEI-QING, WANG YI-MIN, LIU YAN-JUAN, et al. Study on the biological aerated filter used for treating bean wastewater with spongy iron and argil granules[J]. Industrial Water Treatment, 2008, 28(5): 57-59.
- [12] YING-JIE SHEN, GUANG-XIA WU, YAO-BO FAN, et al. Performances of biological aerated filter employing hollow fiber membrane segments of surface-improved poly (sulfone) as biofilm carriers[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(7): 811-817.
- [13] YAQIN ZHAO, QINYAN YUE, RENBO LI, et al. Research on sludge-fly ash ceramic particles (SFPC) for synthetic and municipal wastewater treatment in biological aerated filter (BAF) [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(21): 4955-4962.
- [14] WON- SEOK CHANG, HUNG-THUAN TRAN, DOO-HYUN PARK, et al. Ammonium nitrogen removal characteristics of zeolite media in a Biological Aerated Filter (BAF) for the treatment of textile wastewater[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2009, 15(4): 524-528.
- [15] 李小琴, 汪永辉, 周建冬. 沸石滤料曝气生物滤池的挂膜启动研究[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(9): 91-93.
- LI XIAO-QIN, WANG YONG-HUI, ZHOU JIAN-DONG. The research of the film formation and start-up of zeolite biological aerated filter [J]. Environmental Science and Management, 2008, 33(9): 91-93.
- [16] 曾正中, 王厚成, 李勃, 等. 曝气生物滤池两种填料挂膜的对比试验[J]. 环境工程, 2008, 26(1): 21-23.
- ZENG ZHENG-ZHONG, WANG HOU-CHENG, LI BO, et al. Comparative test on the start-up of two kinds packing materials in biological aerated filter[J]. Environmental Engineering, 2008, 26(1): 21-23.

(编辑 王秀玲)

(上接第 137 页)

- [11] SMITH K M. Sewage sludge-based adsorbents: A review of their production, properties and use in water treatment applications [J]. Water Research, 2009, 43(10): 2569-2594.
- [12] XU G R. Recycle of Alum recovered from water treatment sludge in chemically enhanced primary treatment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 116(2/3): 663-669.
- [13] 闫嘉钰. 基于灰色综合关联度的数控机床热误差测点优化新方法及应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(2): 160-164.
- YAN JIA-YU. Application of a New Optimizing Method for the Measuring Points of CNC Machine Thermal Error Based on Grey Synthetic Degree of Association [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40(2): 160-164.
- [14] TONY M A. Conditioning of aluminium-based water treatment sludge with Fenton's reagent: Effectiveness and optimising study to improve dewaterability [J]. CHEMOSPHERE, 2008, 72(4): 673-677.
- [15] 穆瑞, 张家泰. 基于灰色关联分析的层次综合评价[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 10: 125-130.
- MU RUI, ZHANG JIA-TAI. Research of hierarchy synthetic evaluation based on grey relational analysis [J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2008, 10: 125-130.

(编辑 胡玲)