

给水处理

生物滤池处理微污染水源水试验研究

张亮^{1,3}, 张玉先¹, 包卫彬¹, 费杰², 任基成²

(1. 同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. 宁波自来水总公司, 浙江 宁波 315040; 3. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002)

摘要: 通过中试试验, 探讨了在春季温度较低的情况下, 不同滤料介质的生物滤池对于姚江微污染水源水的处理效果。研究表明, 双层生物滤料滤池能够有效地去除浊度、有机物、氨氮等污染物质, 适合于传统滤池的改造。采用颗粒活性炭-石英砂滤料滤池的综合处理效果优于同类型的沸石-石英砂滤料滤池, 通过加入一定量的臭氧(1.50 mg/L)可以进一步提高生物滤池的处理效果。

关键词: 生物滤池; 颗粒活性炭; 沸石; 臭氧; 给水处理

中图分类号: TU991.24; R123 文献标识码: A 文章编号: 1009-2455(2007)05-0024-05

Treatment of slightly- polluted raw water by biofilter

ZHANG Liang^{1,3}, ZHANG Yu-xian¹, BAO Wei-bin¹, FEI Jie², REN Ji-cheng²

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Ningbo Municipal Waterworks Co.Ltd., Ningbo 325040, China; 3. East China Architectural Design and Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The effect of biofilters with different filter media on treatment of Yao-jiang slightly- polluted water in spring lower temperature was discussed through the pilot- scale experiment. The results showed that, dual- media biofilter could effectively remove the turbidity, organic matters, ammonia nitrogen and some other pollutants, which is fit for the traditional filter modification. The comprehensive treatment effect of the slightly- polluted water by the filter with granular activated carbon- quartz sand as filter media was superior to that by the filter with zeolite- quartz sand as filter media, and the treatment effect could be further improved by adding certain amount of ozone(1.50 mg/L).

Keywords: biofilter; granular activated carbon; zeolite; ozone; water supply treatment

本试验在宁波市梅林水厂进行, 该水厂位于宁波市江北区, 原水取自姚江微污染水源水, 砂滤池均为虹吸滤池, 滤料是粒径为 0.6 ~ 0.9 mm 的石英砂, 滤层厚度为 800 mm。水厂设计供水能力为 10 万 m³/d。近来, 由于梅林水厂的服务规划产生变化, 在两年之后将转变成工业用水厂, 因此, 为了满足现阶段的供水要求, 本研究试图将滤料的拦截作用和生物氧化作用融为一体, 开展在传统虹吸滤池中多层滤料运行的技术研究, 通过考察双层生物滤料去除 NH₃-N、COD_{Mn} 等污染物效果的变化, 进而比较不同的生物滤料去除污染物的效果, 从而为一些类似的老水厂进行滤池滤料的改造提供可行的方案。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验中所采用的原水为梅林水厂沉淀池的出水, 用水泵提升进入 3 个平行的滤柱。由于水厂采用前加氯的预处理工艺, 为了避免原水中余氯对生物滤池产生不利影响, 本试验在进入滤池前, 增加了药剂(亚硫酸钠)脱氯措施, 保证进水余氯的质量浓度在 0.2 mg/L 以下。

试验装置的工艺流程如图 1 所示, 其中 1# 和 2# 滤柱直径均为 200 mm, 3# 滤柱直径为 500 mm, 并模拟水厂虹吸滤池滤料层厚度, 3 个滤柱采用不

基金项目: 小城镇科技发展重大项目经费资助(2003BA808A17)

收稿日期: 2007-03-29; 修回日期: 2007-05-15

同滤料组合: 1#、3# 滤柱: 上层颗粒活性炭 400 mm, 下层石英砂 400 mm; 2# 滤柱: 上层沸石 400 mm, 下层石英砂 400 mm。

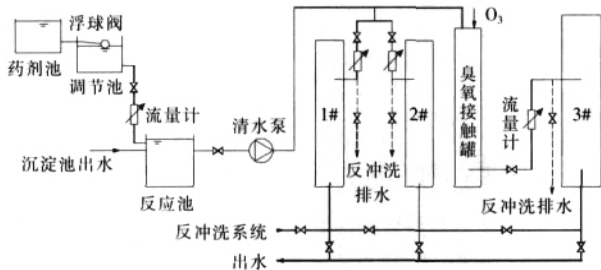


图 1 中试试验工艺流程
Fig. 1 Technical flow of pilot test

颗粒活性炭的粒径范围 0.64 ~1.28 mm, 沸石的粒径范围 0.80 ~1.60 mm, 石英砂的粒径范围 0.60 ~0.90 mm, 各滤柱的反冲洗强度为 15 L/(s·m²), 冲洗时间为 10 min, 另外, 只有 3# 滤柱进水加臭氧处理。

本试验中所采用的活性炭性能和沸石(为浙江缙云斜发沸石)的主要成分如表 1 与表 2 所示。

表 1 活性炭主要性能参数指标
Tab. 1 AC main performance parameters

碘值 / (mg·L ⁻¹)	亚甲基 兰值 / (mg·L ⁻¹)	堆密度 / (g·L ⁻¹)	强度 / %	比表面 积 / (m ² ·g ⁻¹)	比孔容 / (mL·g ⁻¹)	30 Å 以 下微孔 / %
861	166	594	90	764	0.40	72.3

表 2 沸石主要化学成分
Tab. 2 Main chemical constituents of zeolite %

w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(Fe ₂ O ₃)	w(CaO)	w(MgO)	w(K ₂ O)	w(Na ₂ O)
69.58	12.2	0.87	2.59	0.13	1.13	2.59

臭氧接触罐为不锈钢材质, 根据气体扩散、对流、质量迁移溶解原理, 本试验采用了单级的压力式的 O₃ 接触溶解装置来提高 O₃ 化氧气的溶解, 达到 O₃ 化气体充分利用不污染环境的目的^[1]。

1.2 进水水质

运行期间生物滤池进水水质状况如表 3。

2 结果与讨论

本试验采用下向流过滤方式全天 24 h 运行, 起始滤速为 5 m/h, 挂膜成功后逐步增大到 8 m/h, 平均停留时间为 8 min 左右。全部生物滤柱从 2006 年 3 月 5 号正式启动, 运行时间约为 70 d。期间水温变化幅度从 12 到 23 , 平均 16.8 。

众多的研究显示, 硝化菌和亚硝化菌适应的温

表 3 运行期间进水水质情况
Tab. 3 Influent water quality during operation

测试项目	变化范围	平均值
浊度 /NTU	0.588 ~1.380	0.881
ρ(COD _{Mn}) / (mg·L ⁻¹)	3.86 ~6.94	4.76
ρ(氨氮) / (mg·L ⁻¹)	1.40 ~2.50	1.81
ρ(亚硝酸盐) / (mg·L ⁻¹)	0.008 ~0.020	0.012
色度 /倍	8 ~16	12
UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	0.090 ~0.107	0.095
ρ(DOC) / (mg·L ⁻¹)	3.799 ~4.668	4.251
未加臭氧时 ρ(DO) / (mg·L ⁻¹)	7.21 ~8.95	8.21
加臭氧后 ρ(DO) / (mg·L ⁻¹)	11.03 ~13.78	12.54
pH 值	6.7 ~7.0	6.8

度范围为 5 ~40 。同时和水中 NH₃-N、COD_{Mn} 等生物营养源浓度有关。本研究期间, 当进水 NH₃-N 的质量浓度在 1.00 mg/L 以上时, 可在 1 ~2 周后具有很好的生物氧化作用, 即认为生物膜生成。通过镜检可以发现致密的菌胶团和一些指示微生物存在。

3# 滤柱在挂膜初期的臭氧投加量不宜过大, 以免臭氧对于初期生长的微生物造成损害, 而且, 进水的溶解氧的质量浓度均在 7 mg/L 以上, 因此挂膜期间臭氧投加量在 0.6 ~0.8 mg/L, 当挂膜成功后投加量控制在 1.50 mg/L 左右。

2.1 浊度去除效果

本研究的主要目的是在不影响去除浊度的同时, 尽量提高除污染能力。所以, 良好的浊度去除效果是作为本次研究生物滤池所必备的性能。试验结果见图 2。

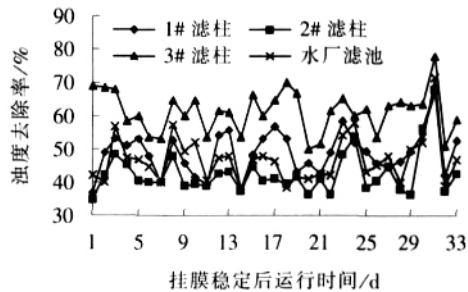


图 2 各滤柱去除浊度对比

Fig. 2 Contrast of turbidity removal of various filter columns

启动初期时, 3 个滤柱的出水浊度均能始终保持低于 1 NTU, 挂膜成功之后, 各个生物滤柱浊度的去除率均明显上升, 这是由于随着作为微生物营养物质氨氮的增加, 在生物填料的表面上逐步有贫营养微生物膜生成, 水中的悬浮固体、胶体以及游

离的生物体在填料颗粒之间形成了具有一定活性的生物絮体, 这些生物絮体对水中的悬浮物具有一定的吸附截留作用。也就是说, 生物滤料滤池对浊度的去除是依靠颗粒滤料的机械截留和表面的生物絮凝的共同作用^[2]。由图 2 可看出, 3# 滤柱通过投加臭氧, 改善了滤柱进水水质的可生化性能, 生物絮体的作用更加明显, 其浊度去除率均优于其余各滤柱和虹吸滤池。1# 滤柱的浊度去除率也接近并

且超过了虹吸滤池, 而由于 2# 滤柱的上层滤料采用的是粒径较大且颗粒形状不规则的沸石滤料, 其机械截留水中杂质的能力不及其他的生物滤柱, 造成了其出水的浊度偏高, 不过出水仍然可以保持在 1 NTU 以下。

2.2 有机物去除效果

试验稳定后各滤柱的有机物去除效果如表 4。

生物滤池对有机物的去除效果明显优于普通的

表 4 运行稳定后各滤柱出水有机物去除效果对比

Tab. 4 Contrast of organics removal in effluent water from various filter columns after stable operation

滤柱类别	COD _{Mn} 去除效果			UV ₂₅₄ 去除效果			DOC 去除效果		
	进水 / (mg·L ⁻¹)	出水 / (mg·L ⁻¹)	去除率 / %	进水 / (mg·L ⁻¹)	出水 / (mg·L ⁻¹)	去除率 / %	进水 / (mg·L ⁻¹)	出水 / (mg·L ⁻¹)	去除率 / %
1#	4.90	3.94	19.6	0.097	0.083	14.4	4.113	3.788	7.9
2#	4.90	4.42	9.8	0.097	0.089	8.2	4.113	4.012	2.5
3#	4.90	3.51	28.4	0.097	0.064	34.0	4.113	3.606	12.3
水厂石英砂滤池	4.90	4.59	6.3	0.097	0.094	3.1	4.113	4.071	1.0

虹吸滤池, 另外未加臭氧的活性炭在刚投入使用时, 对 COD_{Mn} 的去除率也很高, 去除率高达 60% 以上, 此后逐渐下降, 最后稳定在 15% ~ 22% 左右, 1# 滤柱的平均去除率可达 19.6%。3# 生物滤池的去除率最高, 平均去除率可达 28.4%, 这是因为投加的强氧化剂臭氧会对有机物有去除作用, 而且通过臭氧对于大分子有机物质的氧化, 使得后面的生物滤池能够发挥出更加优异的处理作用。但要注意的是, 由于沸石本身对于 COD_{Mn} 的去除效果有限, 因此, 沸石生物滤柱与传统的石英砂虹吸滤池相比较, 去除效果的提高并不大。

在低温运行阶段, 生物滤料滤池对于 UV₂₅₄ 的去除效果较好, 尤其是 3# 滤柱的去除率达到了 30% 以上。常规处理主要去除大分子区间的有机物, 而对于小分子有机物的去除效果较差。臭氧处理则是氧化大分子有机物, 但对小分子有机物的氧化效果较差。而活性炭对于疏水性、紫外吸收强的苯类化合物和相对分子质量小的腐殖质类有机物, 以及相对分子质量在 $500 \times 10^3 \sim 1\,000 \times 10^3$ 的腐殖质具有良好的吸附去除作用。试验结果表明, 对于姚江的水源水质, 运用臭氧和活性炭联用的工艺, 可以充分发挥它们两者去除有机物的互补性, 3# 滤柱的 UV₂₅₄ 去除率可达到 34.0%。不过, 沸石生物滤柱的处理效果, 虽然明显好于传统的石英砂虹吸滤池, 但依然不及活性炭生物滤柱。

本研究显示, 生物滤料滤池对于 DOC 的去除

均优于传统石英砂滤池, 臭氧处理后的生物滤池能降低水中的 DOC 达 10% 以上, 这表明经过 O₃ 处理后, 水中有一部分生物不可降解的有机物被转变成成为生物可降解物质。

2.3 氮的去除效果

各滤柱去除氨氮的效果见图 3。

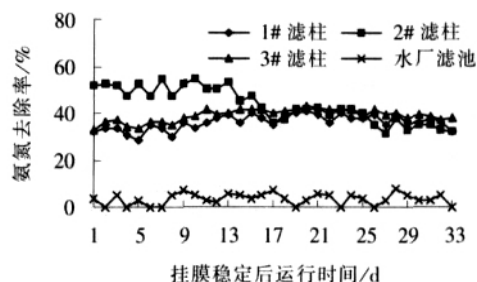


图 3 各滤柱去除氨氮对比

Fig. 3 Contrast of NH₃-N removal in various filter columns

由图 3 可以看出, 1# 和 3# 滤柱除氨氮的效果比较接近, 分析原因也许在于臭氧的投加对于氨氮的去除效果并不突出; 另外一方面, 2# 滤柱的去除率明显高于其他滤柱的原因可能为: 2# 滤柱采用的是活性炭-沸石滤料, 而沸石对于氨氮的去除能力较高。采用沸石除氨是利用沸石对阳离子的选择性交换能力^[3]。随着 2# 滤柱的沸石滤料去除氨氮达到饱和之后, 由于并未采取沸石再生措施, 其去除率逐步下降, 从而去除效果接近于 1# 和 3# 滤柱。

在试验运行阶段中, 进水亚硝酸盐氮的质量浓

度比较低, 均在 0.020 mg/L 之下, 平均值为 0.012 mg/L, 各个滤柱的处理情况见图 4。

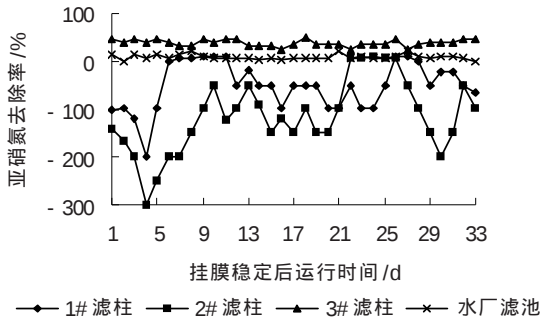


图 4 各滤柱去除亚硝酸盐对比

Fig. 4 Contrast of nitrite removal in various filter columns

试验表明, 氨氮的去除比亚硝酸盐氮的去除先达到稳定, 这可能是因为组成硝化细菌菌群的亚硝化菌和硝化菌中, 后者的生长速率小于前者, 且在生态学上存在以硝化菌为受利方的偏生互利关系, 需要在亚硝化细菌作用下、积累了足够硝化作用所需要营养物质之后, 硝化菌才会从生长延迟期进入对数增长期, 从而较好地发挥硝化作用^[4]。

对于在试验中所出现的亚硝酸盐氮的累积现象, 是由于运行开始时进水中硝化细菌的营养物质氨氮浓度非常低, 而亚硝化细菌并不具有优势, 随着氨氮浓度迅速增加, 亚硝化细菌经过一个星期的挂膜也增长到一定数量, 因此造成亚硝酸盐氮有了一定数量的累积, 但是由于硝化菌的世代时间长, 数量比较少, 难以有效将亚硝酸盐氮完全氧化, 使得亚硝酸盐氮的浓度迅速累积^[5], 亚硝酸盐氮去除率基本上为负值。从图 3 与图 4 的对比中不难发现, 氨氮去除率较高的 2# 滤柱, 其亚硝酸盐累积值也越大, 而且最晚达到对亚硝酸盐氮的有效去除平衡。而通过臭氧处理后, 3# 滤柱亚硝酸盐的累积值较小, 且更早地达到对亚硝酸盐的有效去除平衡。运行后期出水亚硝酸盐浓度开始趋于稳定, 出水亚硝酸盐质量浓度在 0.005 mg/L 以下。然而在运行后期各滤柱又相继发生亚硝酸盐的累积现象, 虽然其出水的亚硝酸盐的质量浓度均在 0.030 mg/L 以下, 但仍有必要在今后滤池的运行中加以关注。

2.4 色度的去除效果以及 pH 值的变化

臭氧有很好的脱色功能, 新鲜活性炭本身的吸附能力也很强, 色度的去除率均在 50% 以上, 但是随着运行时间的增加, 各滤柱色度去除率均迅速下降, 之后趋于稳定, 见表 5。

表 5 运行稳定后各滤柱出水色度去除效果对比
Table 5 Contrast of effluent colourity removal in various filter columns after stable operation

滤柱类别	色度去除效果		
	进水平均值 / 度	出水平均值 / 度	平均去除率 / %
1#	11.9	8.9	25.2
2#	11.9	10.0	16.0
3#	11.9	5.6	52.9
水厂石英砂滤池	11.9	10.3	13.4

一般来说, 氨氮硝化会消耗碱度, 导致出水 pH 值偏低, 但是由于本试验中氨氮浓度不是很高, 硝化反应程度并不是很强烈, 因此, 各个生物滤柱进出水的 pH 值约降低 0.2 ~ 0.3, pH 值范围在 6.7 ~ 7.1, 基本为中性。

2.5 臭氧投加量影响研究

臭氧有效投加量与臭氧活性炭工艺对 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除率的相关性如图 5 所示。

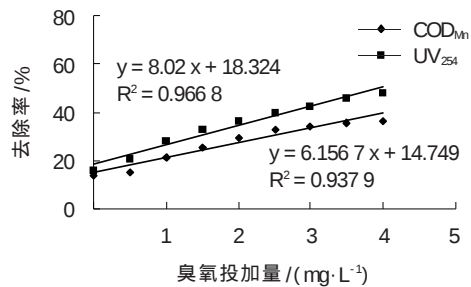


图 5 臭氧投加对有机物去除影响

Fig. 5 Effect of ozone dosage on organic matter removal

由图 5 可知, 臭氧有效投加量与臭氧活性炭工艺对 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除率可拟合成线性关系, 相关性分别达 0.937 9 和 0.966 8。由拟合公式可知增加有效臭氧投加量, 会提高臭氧活性炭工艺对 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除, 但是提高臭氧有效投加量会增加成本。本试验中, 在当臭氧投加量增大为 3.0 mg/L 时(臭氧传质效率约 70%)已经可以使得出水 COD_{Mn} 的质量浓度降低至 3.0 mg/L 左右, 满足饮用水水质标准。

2.6 进水氨氮影响研究

生物活性炭柱对氨氮的去除率与进水氨氮浓度的相关性如图 6 所示。

图 6 表明生物活性炭单元对于氨氮的去除率与炭柱进水氨氮浓度有关, 可拟合成二次函数关系, 相关性系数达 0.721 1; 自养菌对于氨氮的去除受到基质浓度的影响, 进水氨氮浓度很低时, 微生物

的生长繁殖受到限制, 生物量比较少, 导致炭柱对氨氮的去除率也很低; 随着进水氨氮浓度升高, 硝化菌和亚硝菌营养丰富, 炭柱对于氨氮的去除率升高; 由图 6 可知, 进水氨氮的质量浓度为 1.00 ~ 1.50 mg/L 时, 活性炭柱对氨氮的去除率达到最高, 随后去除率开始下降, 这是因为受到炭柱中溶解氧浓度的限制; 因此为了保证臭氧活性炭工艺出水氨氮的质量浓度低于 0.5 mg/L 的饮用水水质标准, 必须控制本工艺进水氨氮的质量浓度尽量不超过 1.50 mg/L, 冬天建议控制在 1.00 mg/L 以下。

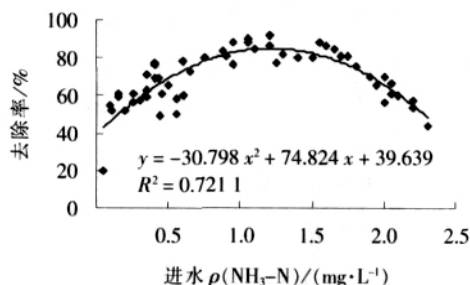


图 6 进水氨氮与去除率的相关性

Fig. 6 Correlation between influent $\text{NH}_3\text{-N}$ and its removal

3 结论

双层生物滤料滤池即便在低温环境下, 对于有机物, 尤其是 COD_{Mn} 和 UV_{254} 去除效果依然良好, 相对于传统虹吸滤池(单一石英砂或无烟煤-石英砂滤料)有明显优势。

当生物滤池挂膜成熟后, 可以通过生物镜检观察到膜上致密的菌胶团和一些指示性微生物, 而且生物滤池对于氨氮、 COD_{Mn} 去除率达到稳定, 需要注意的是, 亚硝酸盐出水浓度可能会上升。

臭氧投加量与进水氨氮浓度是影响双层生物滤料滤池正常运行的重要因素。

用颗粒活性炭-石英砂滤料滤柱的综合处理效果优于同类型的沸石-石英砂滤料滤柱。加少量臭氧就可以提高生物滤池的去除效果, 但臭氧投加量的最佳成本效益点仍有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 包卫彬. 姚江微污染源水处理试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [2] 于鑫, 乔铁军, 张晓健, 等. 饮用水生物滤池中亚硝酸盐氧化细菌的生长规律[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(3): 318-321.
- [3] 施锦岳. O_3 -生物沸石-活性炭处理姚江微污染源水研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [4] 杨弦, 吕锡武. 生物强化活性滤池低温运行效果分析[J]. 净水技术, 2005, 24(5): 7-11.
- [5] 贺道红, 高乃云, 曾文慧, 等. 生物活性炭深度处理工艺挂膜研究[J]. 工业用水和废水, 2006, 37(2): 16-19.

作者简介: 张亮(1980-), 男, 上海人, 硕士生, 研究方向为给水处理技术, (电子信箱)leon22chang@163.com。