贫营养条件下生物除铁除锰滤池生态稳定性研究

杨宏 熊晓丽 段晓东 宋立新 于萍波 李威 张杰

(北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复工程重点试验室,北京 100124)

摘要:采用将反冲洗排水回流至生物除铁除锰滤池的方式补给滤层细菌数量、回流可利用营养物质.试验从滤池整体除铁除 锰效果、微生态特性及优势细菌数量分布3方面考察滤池的生态稳定性.结果表明,在高滤速(10~13.9 m/h)、高锰浓度(3.5~ 4.5 mg/L)条件下生物滤池对铁锰的去除率达98.9%以上,滤池具有较强的抗负荷冲击能力.铁、锰氧化细菌为滤层的优势菌 群,数量达10°数量级,它们既附着在滤料表面上(4.3×10°个/mL)形成致密的生物膜,又存在于滤料间(6.5×10°个/mL)形成 以细菌为主体的悬浮絮体,此絮体对铁锰的彻底去除至关重要.经过近5年的连续运行,在不投加营养盐的前提下生物滤池实 现了稳定运行,保持了高除铁除锰效率.

关键词 :贫营养 ;反冲洗排水回流 ;生态稳定 ;生物滤池 除锰 中图分类号 :X703.1 文献标识码 :A 文章编号 10250-3301(2010)01-0099-05

Ecological Stability on Biological Removal of Iron and Manganese Filter Under Poor Nutritional Conditions

YANG Hong , XIONG Xiao-li , DUAN Xiao-dong , SONG Li-xin , YU Ping-bo , LI Wei , ZHANG Jie

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

Abstract To supply necessary bacteria and available nutrients, a method of returning backwashing wastewater to the bio-filter for removal of iron and manganese was used. The ecological stability of bio-filter was investigated from 3 aspects : iron and manganese removal efficiency, micro-ecological characteristics and the quantity distribution of dominant bacteria. The results indicated that, the bio-filter held strong anti-shock loading capability, when the system was operated at high filtration rate (10-13.9 m/h) and high manganese concentration (3.5-4.5 mg/L), a removal rate more than 98.9% of iron and manganese was achieved. Iron and manganese oxidizing bacteria are the dominant microflora in biological filtering layer, they not only adhere on filter sand materials (4.3×10^6 MPN/mL) to form compact biofilm, but also exist among filter materials void (6.5×10^6 MPN/mL) to form suspended flocs, which is very important to complete removal of iron and manganese. In the past 5 years, the bio-filter realized a continuous and stable operation and kept a high removal efficiency of iron and manganese without adding any nutrients.

Key words poor nutrition ; backwashing wastewater return ; ecological stability ; biological filter ; manganese removal

我国有 400 多个城市开采利用地下水,其中华 北、西北城市利用地下水的比例分别高达 70% 和 60%以上^[1],在全国范围内受地下水锰影响的人口 数量达 3.31亿.地下水锰在 pH 中性域条件下,多以 Mn²⁺离子形式存在,很难发生自然氧化且难被去 除 这是一个在世界范围内存在的共性问题.文献 [2,3]提出了"生物固锰除锰"理论,以该理论为指导 提出了简洁的地下水生物除铁除锰工艺,使广泛存 在的地下水除锰问题得到了较好地解决,并在我国 成功地建设了多座地下水生物除铁除锰水厂^[4-6]. 随之,在欧洲、日本也出现了慢滤池和多级过滤生物 除铁除锰工艺^[7-9].

地下水生物除铁除锰系统的核心是生物滤池, 其运行成败的关键在于能否在滤层内创造出适宜 铁、锰氧化细菌生存、繁殖的良好微环境,进而获得 铁、锰氧化细菌数量的最大限度增殖与稳定^[10].微 生物机体为了生长、繁殖和完成各种生理活动,必须 从环境中摄取营养物质¹¹¹.而对于地下水贫营养环 境来说,其氮、磷等含量均很低,制约了微生物的生 长、增殖和正常的新陈代谢功能.因此,探讨如何在 低营养基质条件下,保持生物除锰滤池一定的优势 细菌量使其高效正常运行,是保障除铁除锰水厂出 水铁、锰达标的关键.本试验采用将反冲洗排水沉 淀、生物泥制成菌悬液回流至滤池的方式,实现了贫 营养条件下滤池的稳定高效运行.

- 1 材料与方法
- 1.1 试验装置

试验装置由4部分组成:原水配制部分、生物滤

收稿日期 2009-02-26 ,修订日期 2009-05-04

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z308)

作者简介 杨宏(1963~),男,教授,博士生导师,主要研究方向为水 污染控制,E-mail ;yhong@bjut.edu.en

池、反冲洗部分、反冲洗水回收及菌悬液制备部分, 整个试验系统组合见图1.

原水配制部分:由3个水箱组成,水箱1储备自 来水(单独设立目的是保持一定的停留时间以便自 来水中余氯的散除),水箱2为高浓度 MnSO₄ 溶液, 水箱3为高浓度 FeSO₄ 溶液,试验用原水由上述3 部分液体按比例经静态混合器混合制成.

生物滤池 滤池由有机玻璃制成,直径220 mm, 高3000 mm,石英砂滤料粒径为0.5~1.0 mm,滤层 厚1200 mm.卵石承托层粒径为2.0~30.0 mm,厚为 400 mm.在滤柱侧壁每隔100 mm距离设取样口,共 20个.充氧采用原水喷淋曝气方式,滤池运行为正 向过滤.

反冲洗部分:反冲洗水为滤后水,由反冲洗水箱 4和反冲洗水泵组成.

反冲洗水回收及菌悬液制备部分:由有机玻璃 制成,直径500mm,高1500mm,在设备侧壁,分别设 置了反冲洗上清液回流口、菌悬液回流口,在底部积 泥区设沉淀物排放口.





Fig.1 Schematic diagram of experimental equipment

1.2 试验方法

地下水是贫营养水源,地下水除铁除锰滤池中 细菌的生存依赖于源水中存在的营养物质.在滤池 运行中,反冲洗过程在实现滤层所截留 MnO₂、 Fe(OH),排除系统的同时,也把大量滤层所存在的 细菌冲出系统.这对于生物滤池以细菌数量为前提 的高效率运行是非常不利的.为此,本研究将反冲洗

排出的混合液经初步沉淀,使上层上清液(约60%) 回流至系统,实现节水,剩余的沉淀部分,排除下层 (约10%)的无机沉淀物和细菌细胞残体,保留中间 (约30%)的部分进行曝气.曝气打碎了细菌絮体, 使细菌呈分散状态 形成菌悬液 同时在这部分溶液 中还含有一定量的碳、氮、磷等营养物质.这是因为: 一方面 滤池在反冲洗时会排出部分营养物质 另一 方面 反冲洗时流失的大量细菌在菌悬液制备器内 很快会进入内源呼吸期,将自身的碳、氮、磷等部分 营养物质释放出来 这样经过曝气后的反冲洗沉淀 液就制成了含有一定量营养物质的菌悬液,那么,在 一个过滤周期内缓慢回流"菌悬液"至系统中,就实 现了可利用营养物质的回流 同时 大量的活细菌也 同样被回流至滤池层,即达到了在贫营养条件下,充 分利用源水营养物质维持生物滤层的目的,又实现 了滤层细菌的补充。回流装置见图 2. 试验中通过研 究整个生物滤层对铁、锰的去除效果、生物膜特性及 优势菌群数量等来考察滤池的生态稳定性.



图 2 回流装置示意 Fig.2 Schematic diagram of reflux equipment

1.3 试验原水水质及运行参数

原水水质 :Fe²⁺ 0.1 ~ 1.0 mg/L ;Mn²⁺ 0.5 ~ 4.5 mg/L ;TN≤6 mg/L ;TC≤45 mg/L.

运行参数 滤速 5.0 ~ 13.9 m/h ,进水 pH 值 6.5 ~7.5 温度 12℃ ~ 18℃ ,反冲洗强度 12L(s·m²),反 冲洗历时 5 min ,工作周期 96 h.

1.4 测定项目及分析方法

总铁、总锰的检测采用原子吸收分光光度法 检

测仪器为 AAS vario 6 型原子吸收仪 ;Fe²⁺ 用邻菲罗 啉分光光度法 ,Mn²⁺ 用甲醛肟分光光度法 ,上述测 定均采用国家标准分析方法^[12].滤料表面形态特征 通过光学显微镜 OLYMPUS ; BX41 观察 ,铁、锰氧化 细菌数量采用 MPN(Most Probable Number)法^[13],所 用培养基为 PYCM 培养基^[14],总细菌量用血球板计 数法^[12].

2 结果与分析

2.1 对铁、锰的去除效果

滤池在培养初期通过投加 C₆H₁₂ O₆、NaNO₃、 (NH₄)₂CO₃、K₂HPO₄ 等来提供 C、N、P 等营养源,成 熟后不再投加,同时开始实施反冲洗菌悬液回流.滤 池连续运行近5年.图3~5 是整个5年试验运行期 间的典型数据.





第1数据段为常规运行条件下滤池的铁锰去除 效果,结果见图3.该部分试验平均滤速5m/h,进水 Mn²⁺浓度为0.5~2.0mg/L,Fe²⁺浓度为0.3~1.0 mg/L.从图3可以看出,99d中出水总锰量均小于 0.05mg/L,总铁量均小于0.1mg/L或痕量,这说明 铁、锰能在同一生物滤池中被氧化去除,且去除很 彻底.

第2数据段控制进水 Fe²⁺浓度(0.3~1.0



mg/L) Mn²⁺ 浓度(0.5~2.0 mg/L)的同时不断提高 滤速 59 d 中将滤速从 5.0 m/h提至 13.9 m/h,考察 整个滤层对铁、锰的去除效果,结果见图 4. 第 3 数 据段为期 37 d,考察高滤速(10~13.9 m/h)、高锰浓 度(3.5~4.5 mg/L)条件下滤池对锰的去除,结果见 图 5. 从图 4、图 5 可以看出,不断提高滤速至 13.9 m/h(图 4)将滤速稳定在 10 m/h以上并加大锰含量 的情况下(图 5),出水铁、锰均达标(其中铁为痕量 图中未标出).在如此高滤速和高进水锰负荷的条件 下滤池除铁除锰能力未受到影响,说明成熟生物滤 池内生态系统稳定且具有一定的抗冲击能力.

从图 3~5 不难发现,生物除铁除锰滤池对铁、 锰的去除能力是高效、稳定的,滤柱出水的铁、锰含 量可长期维持在 0.1 mg/L、0.05 mg/L以下.本试验的 生物除铁除锰滤池之所以有如此高效、稳定、快速的 除铁除锰效果,有以下两方面的原因:①由于"菌悬 液 的不断回流 使生物滤层内细菌数量得到了最大 可能的及时补充.在生物除铁除锰滤层中,细菌对于 锰的去除遵循这样一个规律:首先 细菌细胞体对水 中锰离子完成吸附 这完全是一个物理吸附过程 然 后 被吸附的锰离子在细菌细胞体表面实现生物氧 化 氧化所形成的高价锰氧化物 ,即 MnO, 附着在细 菌细胞体表面,从而实现锰与水的分离,另外新生态 MnO, 出现的同时其本身对水中的 Mn²⁺ 离子还具有 极强的吸附能力(这一点在笔者过去的试验研究中 已经得到证实 最近几年该现象在其他同行的试验 研究中也得到证实^{15,16]},并且新生态 MnO₂ 的吸附 性能已经被应用在新型絮凝剂的研制中[17~19]).最 后 老化的生物膜和细菌协同大量的高价锰氧化物 一起随反冲洗水冲出系统:" 菌悬液 "的不断回流 ,在 一定程度上弥补了反冲洗所造成的细菌菌体的损 失 ②生物滤层细菌的繁殖营养源的来源完全依赖 于原水所带进系统的营养,同样由于"菌悬液"的不 断回流,使系统的营养物质得到了充分反复的利用, 使细菌增殖的营养条件得到了改善.以上两方面的 综合作用,从根本上保持了此贫营养条件下的生物 滤层生态稳定,使其具有较强的抗冲击能力,而不像 其他的人工生态系统那样脆弱.

2.2 滤池微生态特性

生物除铁除锰滤池是一个典型的以铁、锰氧化 细菌为核心的人工微生态系统.在滤池运行的不同



(a) 滤料表面的铁、锰氧化细菌(100×)

时期,滤层内生态系统的组成和结构是不同的.在 滤层的培养期,接种到滤层内的铁、锰氧化细菌是以 游离状态存在于滤层中,此时的生态系统主要是由 游离细菌及其周围环境所形成的,系统稳定性差,且 比较脆弱.随着滤池的成熟,滤层中的大部分铁、锰 氧化细菌也由最初的悬浮游离状态转变为滤料表面 的固定附着形式,逐渐在滤料表面形成生物膜,见 图 6.



(b) 游离态铁、锰氧化细菌(400×)

图 6 生物滤层内的铁、锰氧化细菌

Fig.6 Iron and manganese oxidizing bacteria in biological filter

从图 ((a)可以看出,生物除铁除锰滤层滤料表 面丝状物浓密且较厚,这种丝状物是由铁、锰氧化细 菌细胞体相连而形成的,在地下水贫营养条件下, 铁、锰氧化细菌属贫营养微生物,这种微生物具有很 大的比表面积,很小的比增长速率、较低的内源呼吸 速率常数(b)和很小的饱和常数(K_s)⁷¹. Ahmad 等^[20]研究认为:由于细菌为疏水性胶体,可以通过 水合作用力牢固地黏附在滤料上,反冲洗时也不易 从滤料表面脱落.铁、锰氧化细菌为提高在极低营养 环境中存活的潜能,细菌细胞可以形成多细胞丝状 体,并附着于表面伸展,使细胞能在更大的范围内共 享营养,最大限度地相互依赖,以最小的代价维持种 群的生存与稳定,形成如图6所示的丝状.这部分固 着形成生物膜的细菌,在生物滤层的细菌再生增殖 中起着至关重要的作用.

另外从图 (d b)中可以明显看出,滤层中的细菌 并不是完全固定在滤砂上的,在滤料之间的孔隙空 间里,也有大量的以悬浮絮体形式存在的细菌,它们 同铁、锰氧化物及其他的悬浮杂质物质形成"絮体 菌泥"填充了除滤料之外的生物滤层空间.该部分 细菌数量庞大,具有较强的生化效能,对整个滤池的 除铁除锰效能的体现也起着至关重要的作用.同时, 该部分悬浮絮体具有很强的截污能力和水的透过 性,这是生物滤池对铁、锰氧化物,尤其是对由化学 氧化形成的微小铁氧化微粒去除比较彻底的原因.

2.3 优势菌群数量

在除铁除锰滤层生态系统中,具有目标活性的 优势菌种数量是生态系统稳定的保证¹³¹.为此本研 究对细菌总数和具有铁、锰氧化能力细菌的数量进 行了检测.结果见表 1.

表1 细菌数量

Table 1 Population of the bacteria			
细菌来源	滤料表面	滤层的' 悬 浮絮体 '中	反冲洗 排水中
总菌数/个⋅mL⁻¹	6.8×10^6	9.3×10^{6}	2.7×10^5
具有铁锰氧化能力的 细菌数/个·mL⁻¹	4.3×10^{6}	6.5×10^{6}	1.3×10^{5}

从表 1 可以看出,在成熟滤料表面存在着不少 于 10⁶ 数量级(每 mL 滤砂)的细菌,其中至少有相同 数量级的细菌具有铁锰氧化能力.同时笔者在滤层 的' 悬浮絮体 '中测得的铁锰氧化细菌量也达到 10⁶ 数量级,且为 6.5×10⁶个/mL,明显高于滤料表面的 具有铁锰氧化能力的细菌量(4.3×10⁶个/mL),即培 养成熟的滤层 ; 悬浮絮体 "中存在的细菌数量要大 于滤料表面附着的细菌量,而在反冲洗过程中这部 分细菌很容易流失,反冲洗排水中测得的细菌量也 高达 10⁶ 个数量级,这说明了对反冲洗排水所制成 的' 菌悬液 '进行回流的重要性,同时也说明了具有 铁锰氧化能力的细菌为此生物滤层的优势菌群,且 它们在此微生态系统中维持一定的基本数量,这是 出水水质达标和生态稳定的关键.

3 试验工艺分析

研究所采用的是模拟生产弱曝气结合一级过滤 同时除铁除锰的工艺,流程见图 7. 此单级过滤工艺 流程短、占地面积小、投资省、处理效果好,我国多数 地下水生物除锰的水厂均采用这种工艺^[4~6].



图 7 生物除铁除锰工艺流程

Fig.7 Process chart of biological removal of iron and manganese

此工艺的关键是将反冲洗排水收集、沉淀、曝气 后制成"菌悬液"回流至滤池.试验中"菌悬液"回流 是在一个反冲洗周期(96h)内缓慢完成的,此回流对 滤池过滤水头损失增加的贡献值很小,经测定在一 个过滤周期内的水头损失因回流的增加量仅为5~ 10 cm.在连续运行此工艺的近5年中,笔者很好地 保持了地下水贫营养条件下生物除铁除锰滤池的生 态稳定性,使之具有强而稳定的除铁除锰效果.

此法不仅可以用于地下水这种贫营养条件下生 物除铁除锰滤池生态稳定性的保持,还可用于生物 滤池处理微污染饮用水源水和污水深度处理生物滤 池的生态稳定性保持.其优点:①在不改变现有生物 滤池结构的情况下,既补充生物生长所需要的营养 基质,又降低了额外连续投加营养基质的成本,②降 低了污泥处理负荷,减少了污泥外排对环境造成的 影响,③在操作方便、简单可行的前提下,最大可能 地保持了贫营养基质条件下,生物滤池内部微生物 生态系统的稳定,从而保障了生物滤池的运行效果.

4 结论

(1)地下水生物除铁除锰滤池生态系统的稳定需 要各种条件的维系,运用单级过滤工艺,对反冲洗排 水进行收集、沉淀、曝气后"菌悬液"回流的方式实现 了滤层细菌数量的不断补给和系统营养物质的循环 利用,保持了贫营养条件下此滤层生态系统的稳定.

(2)成熟的生物除铁除锰滤池通过"菌悬液"的 回流,提高了生物滤层抗负荷冲击的能力.不断提高 滤池滤速至13.9 m/h,在高滤速(10~13.9 m/h)、高 锰浓度(3.5~4.5 mg/L)条件下,滤池出水铁、锰含 量可长期维持在0.1 mg/L、0.05 mg/L以下.

(3) 在成熟的生物除铁除锰滤池中,铁、锰氧化 细菌为滤层的优势菌群,数量达10⁶数量级,它们 既附着在滤料表面上(4.3×10⁶个/mL)形成致密的 生物膜,又存在于滤料间的菌泥中(6.5×10⁶个/mL) 形成以细菌为主体的悬浮絮体,此絮体对铁、锰的彻 底去除至关重要.

参考文献:

- [1] 狄效斌.浅析地下水污染研究[J].科技情报开发与经济, 2008,18(22):131-132.
- [2] 张杰,杨宏,徐爱军,等,生物固锰除锰技术的确立[J].给 水排水,1996,22(11):5-10.
- [3] 张杰,戴镇生. 地下水除铁除锰现代观J]. 给水排水, 1996, 22(10):13-16.
- [4] 李冬,杨宏,张杰.首座大型生物除铁除锰水厂的实践[J]. 中国工程科学,2003,5(7):53-57.
- [5] 高洁,刘志雄,李碧清.生物除铁除锰水厂的工艺设计与运 行效果[J].给水排水,2003,29(11):26-28.
- [6] Li D, Zhang J, Wang H T, et al. Operational performance of biological treatment plant for iron and manganese removal [J]. J Water Supply Res Technol-AQ, 2005, 54(1):15-24.
- [7] Gouzinis A, Kosmidis N, Vayenas D V, et al. Removal of Mn and simultaneous removal of NH₃, Fe and Mn from potable water using a trickling filte[J]. Wat Res, 1998, 32(8):2442-2450.
- [8] Katsoyiannis I A, Zouboulis A I. Biological treatment of Mr([]) and Fe([]) containing groundwater — kinetic considerations and product characterization[] J]. Wat Res, 2004, 38(7):1922-1932.
- [9] Stembal T, Markic M, Ribicic N, et al. Removal of ammonia, iron and manganese from groundwater of northern Croatia — pilot plant studies[J]. Process Biochem, 2005, 40(1): 327-335.
- [10] Madoni P, Davoli D, Cavagnoli G, et al. Microfauna and filamentous microflora in biological filters for tap water production [J]. Wat Res, 2000, 34(14): 3561-3572.
- [11] 王国惠,周少奇,于鲁冀.环境工程微生物学原理及应用 [M].北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M].(第四版). 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [13] 张杰,李冬,杨宏,等.生物固锰除锰机理与工程技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [14] 鲍志戎,孙书菊,王国彦,等. 自来水厂除锰滤沙的催化活性 分析[J]. 环境科学,1997,18(1):38-41.
- [15] 余建. 生物过滤去除饮用水中有机物、铁和锰的特性与机理 研究 D]. 长沙:湖南大学 2005.
- [16] 秦松岩,马放,杨基先,等. 生物固定化锰砂/石英砂滤柱的 除铁除锰效能比较 J]. 中国给水排水 2008 24(7) 38-41.
- [17] 张立珠,陈忠林,马军,等.水溶液中新生态 MnO₂ 对苯酚的 氧化作用及机理研究 J].环境科学,2006,27(5):941-944.
- [18] 郭瑾,马军,施雪华.原子力显微观测新生态水合二氧化锰 与天然有机物的微观吸附形貌[J].环境科学,2006,27(5): 945-949.
- [19] 张永吉,周玲玲,李伟英,等.高锰酸盐复合剂强化混凝对水 中天然有机物的去除机制研究[J].环境科学,2009,30(3): 761-764.
- [20] Ahmad R, Amirtharajah A, Al-Shawwa A, et al. Effects of backwashing on biological filters [J]. J Amer Water Work Assn, 1998, 90(12):62-73.