

首座大型生物除铁除锰水厂的实践

李冬, 杨宏, 张杰

(北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022)

[摘要] 以生物固锰除锰理论为指导, 设计了弱曝气一级过滤生物除铁除锰简缩流程。采集了土著除锰菌扩增后接种于除铁除锰滤层, 再经2~3个月的滤层培养, 取得了强劲的除锰能力。当原水 Mn^{2+} 为1~3 mg/L, Fe^{2+} 为0.1~0.5 mg/L, 在正常滤速下, 滤后水 Mn^{2+} 减至0.05 mg/L, 总铁为痕量, 优于国家标准。该厂出水常年良好稳定, 满足了高新产业优良用水之需。生物固锰除锰理论的工程实践解决了半个世纪以来水质净化工程上除锰的难题, 创建了我国乃至世界上首座大型生物除铁除锰水厂。

[关键词] 生物固锰除锰; 弱曝气; 简缩流程; 同时去除

[中图分类号] X505 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)07-0053-05

迄今为止, 含铁含锰地下水的净化都是以化学接触氧化为基础设计的^[1]。作者与中国市政工程东北设计研究院除铁除锰项目组经多年研究与实践, 提出并完善了生物固锰除锰理论和生物除铁除锰技术, 用其指导了沈阳经济开发区大型除铁除锰水厂的设计和运行, 取得了满意的成果, 达到了预期目的, 创建了我国首座大型生物除铁除锰水厂。

1 生物固锰除锰的理论基础

生物固锰除锰理论的主要内容有以下几点:

1) 在 pH 中性条件下, 地下水中溶解态 Mn^{2+} 不能通过化学氧化而去除, 只有在滤层中以锰氧化菌为核心的生物群系增长并达到平衡时, Mn^{2+} 在除锰菌体外酶的催化作用下, 才能被氧化成 Mn^{4+} 沉积黏附于滤料表面而被去除^[2,3]。

2) 水中 Fe^{2+} 虽然很容易在溶解氧存在的条件下发生化学氧化, 但在生物滤层中, Fe^{2+} 的自催化氧化也参与了除锰菌的代谢过程。所以 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 离子可以在同一滤层中共同去除。同时, 生物滤层对进入滤层前已氧化成的 Fe^{3+} 离子所形成的胶体颗粒, 也有很好的截留作用^[4]。

3) 成熟的生物滤层中存在着大量的锰氧化菌和其他细菌所组成的微生物群系, 这一微生物群系的平衡和稳定是 Mn^{2+} 氧化活性之所在^[5]。

4) 生物滤层中生物群系的稳定是需要进水质等各种运行条件来维系的。特别需要 Fe^{2+} 的参与, 若只含 Mn^{2+} 不含 Fe^{2+} 的原水长期进入滤层, 滤层中以 Mn^{2+} 氧化菌为核心的微生物群系的平衡就会遭到破坏, 进而削弱和丧失 Mn^{2+} 的氧化活性^[6]。

生物固锰除锰理论冲出了传统化学氧化思路的束缚, 从生物学角度开创了除铁除锰技术发展的新时期^[7]。

2 沈阳经济开发区除铁除锰水厂设计

位于沈阳市西南部的张士开发区是沈阳市城市建设和经济发展的重要组成部分, 也是沈阳市对外开放的窗口。该区采用地下深井水为水源, 经消毒后直接供给生活和工业使用。由于地下水中含有过量的 Mn^{2+} 和少许的 Fe^{2+} , 而给用户带来诸多不便, 其结果使某些工厂产品质量下降, 甚至报废, 于是纷纷提出抗议和索赔。许多意欲在开发区建厂

的投资商也不得不望而却步。故供水水质的改善势在必行。

2.1 供水水源与原水水质

除铁除锰水厂总规模为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，分两期建设。水源是沈阳西南部地区的地下水，现有水源井 11 眼，井深均为 100 m 左右，水温常年 9°C ，单井开采量约为 $3\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。除 10# 井外（有微污染），其余各井只有 Fe、Mn 二项超标，进入供水厂的混合水中 Fe^{2+} 含量在 $0.1 \sim 0.5 \text{ mg/L}$ 之下， Mn^{2+} 的含量为 $1 \sim 3 \text{ mg/L}$ 。

2.2 含铁锰地下水的净化路线与设计原则

Mn^{2+} 的氧化还原电位很高，在天然水 pH 中性范围内，不能被溶解氧所氧化^[7]。所以按我国现行有关规范和传统工艺所设计的曝气接触氧化除铁，再曝气接触氧化除锰的净化流程，除铁是有效的，而除锰往往是徒劳的。本工程以生物固锰除锰机制为基础，坚持生物除铁除锰技术路线。

1) 弱曝气。采用一级跌水曝气池，跌水高度仅 0.6 m。曝气溶氧水尽快进入滤层，尽可能避免 Fe^{2+} 的滤前氧化。

2) 一次过滤。接种培养生物滤层， Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 在同一生物滤层中共同去除。

3) 简缩净化工艺流程，压缩基建投资与维护费用。

4) 目标水质定为： $T_{\text{Fe}} \leq 0.05 \text{ mg/L}$ ， $\text{Mn} \leq 0.05 \text{ mg/L}$ 。优于国家饮水标准（ $T_{\text{Fe}} \leq 0.3 \text{ mg/L}$ ， $\text{Mn} \leq 0.1 \text{ mg/L}$ ）。

设计工艺流程见图 1，主要构筑物见表 1。

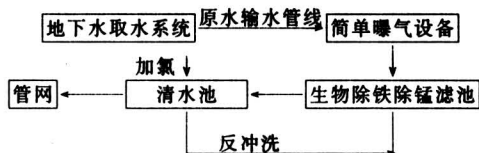


图 1 工艺流程图

Fig.1 Treatment process

3 生物除铁除锰滤池接种培养与成熟

2001 年 9 月 15 日，1# 滤池正式接种，单池接种种泥量为 2 400 L。采取低滤速，弱反冲洗强度，通过适当的控制运行，使大量与锰氧化有关的细菌进入滤池内部，进行生物滤层的人工培养。1# 滤池进出水水质的跟踪检测结果见图 2、图 3。由图中的曲线可见，原水水质变化幅度较大，进水锰含

量最低为 0.575 mg/L ，最高为 3.05 mg/L 。进水铁含量最低为 0.01 mg/L ，最高为 0.5 mg/L 。运行初期出水中锰含量严重超标。随着滤层中生物量的增加与生物活性的增强，出水水质有了明显的改善，至 9 月 25 日，1# 滤池除锰能力开始出现，两个月以后出水锰含量已降至 0.12 mg/L ，此时滤池已经成熟但运行并不稳定，出水水质仍有小幅度的波动。3 个月以后出水中锰的浓度小于 0.05 mg/L ，完全达标且运行稳定。利用 1# 滤池所得到的工程经验，对其余的 5 个滤池进行接种，并将 2# 滤池的级配滤料更换为均质滤料。各滤池与 1# 滤池一样，经 2~3 个月后，出水水质均达到目标水质，而且运行稳定。其中 2# 滤池进出水水质的跟踪检测结果见图 4、图 5。

表 1 主要构筑物一览表

Table 1 Details of main constructions

构筑物	结构	尺寸/m	数量/座	设计运行参数及备注
跌水曝气池	钢混	$\phi 10.5 \times 0.60$	2	单宽流量 $40.92 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$ ，跌水高度 0.84 m
生物除铁除锰滤池	钢混	$7.5 \times 6.2 \times 3.7$	12	一期 6 座滤池，滤速 6.0 m/h
清水池	钢混	$43 \times 31 \times 3.9$	2	
反冲洗水塔	钢混	$V = 540 \text{ m}^3$ 高 13.5 m	1	反冲洗强度 $15 \text{ L}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$

4 生物除铁除锰滤池的正常运行

从 2001 年 9 月对 1# 滤池进行接种和培养，到 12 月末为止，一期工程 6 座滤池先后培养成熟并投入正常运转。表 2 为 2002 年 1# 和 2# 滤池各月出水水质平均值。从表中可知，出水总铁达到痕量，锰也达到 0.05 mg/L 的水平。均优于国家生活饮用水标准。

5 问题与讨论

5.1 菌种来源

所谓生物除铁除锰滤层的成熟，就是在滤层中逐渐培养出足够强盛的以除锰菌为核心的微生物群系的过程。所以菌种的选择对于生物除铁除锰工程的成败是至关重要的。本工程从当地地下水供水系统中采集土著菌，进行纯化和培养后接种于滤层。然后进行动态培养，使滤层臻于成熟投入生产。工

程实践证明，这样的生物滤层运行稳定，出水水质长期良好。这是因为各地气象和地质条件不尽相同，而导致地下水水质有着千差万别的微细变化。

在开放的环境条件下，除锰菌和微生物群系最终总要和他们生活的微观环境相适应。土著自然菌的可取之处就在这里。

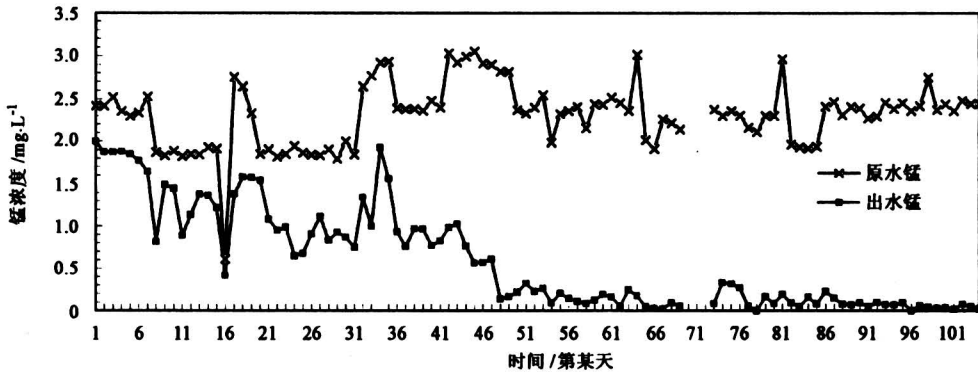


图2 1#滤池逐日进出水中锰含量变化

Fig.2 Manganese in produced water and raw water of filter 1

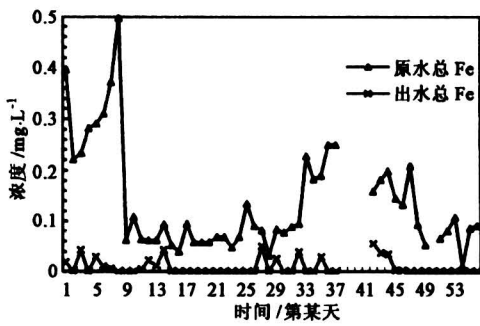


图3 1#滤池逐日进出水中铁含量变化

Fig.3 T_{Fe} in produced water and raw water of filter 1

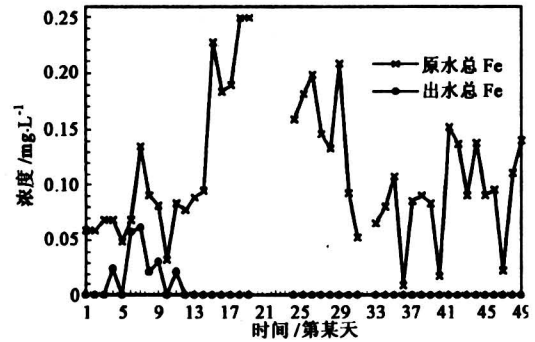


图4 2#滤池逐日进出水中铁含量变化

Fig.4 T_{Fe} in produced water and raw water of filter 2

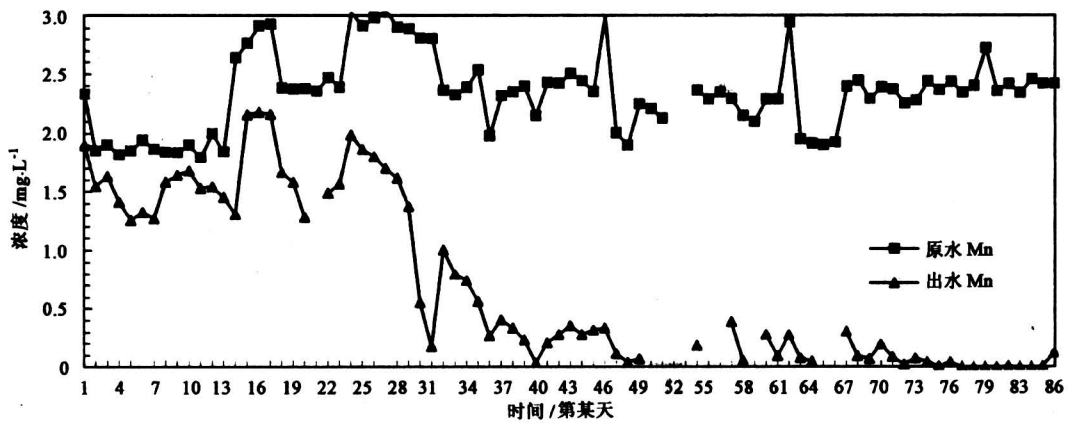


图5 2#滤池逐日进出水中锰含量变化

Fig.5 Manganese in produced water and raw water of filter 2

表2 2002年生物除铁除锰滤池稳定运行数据

Table 2 Data of biological filter on stable run mg/L

月份	原水		1#滤池		2#滤池	
	T _{Fe}	Mn	T _{Fe}	Mn	T _{Fe}	Mn
01	0.515	1.402	0.055	0.074	痕量	0.010
02	0.082	1.532	痕量	0.046	痕量	0.010
03	0.110	1.214	痕量	0.070	痕量	0.010
04	0.064	1.631	痕量	0.081	痕量	0.007
05	0.093	0.849	痕量	0.021	痕量	0.042
06	0.167	2.375	痕量	0.079	痕量	0.022
07	0.198	1.721	痕量	0.060	痕量	0.040
08	0.082	1.683	痕量	0.055	痕量	0.028
09	0.071	1.192	痕量	0.050	痕量	0.010
10	0.058	1.337	痕量	0.050	痕量	0.021
11	0.067	1.363	痕量	0.045	痕量	0.021
12	0.074	1.123	痕量	0.046	痕量	0.014

注：表中数据为月平均值

5.2 滤层结构

在水厂试运行中作者把2#滤池换成粗粒均质滤层，以期比较与其他级配滤层的净化能力。在培养期，1#和2#滤池的去除率随运行时间的增长曲线见图6、图7。由图可知均质滤料滤池的成熟期略短于级配滤料，从表2也可看出2#滤池铁锰的去除效果优于1#滤池。可见粗粒均质滤层更适应生物除铁除锰滤池。这主要是因为采用均质滤料加大了有效生物层厚度，提高了过滤空间的有效生物总量，使生物滤层的处理能力大大加强。从操作运行中可知，在保证出水水质合格的条件下，均质滤料在很大程度上克服了铁锰在滤层表面集中去除的现象，从而缓解了水头损失的增加，延长了过滤周期，在一定程度上减轻了级配滤料表层铁泥的胶结现象，使反冲洗更加彻底。

5.3 反冲洗

生物滤池培养成熟以后，稳定运行是运转的核心工作，滤速与过滤周期，反冲洗强度与反冲洗历时都是滤池稳定运行的重要技术经济参数。一个稳定的生态系统中某一种群数量的维持需要有一定的基本个体数量，否则在这一生态系统中该种类的种群优势就会丧失，从而导致生态系统性质的改变。生物滤层当中细菌的分布不仅是附着在滤料的表面，而大量细菌是存在于滤层空间的铁泥中，这部分细菌的生化能力占整个成熟滤层生化能力的一半

以上，因此在培养期采用弱反冲洗强度，在滤层成熟后，可根据运行效果适当提高反冲洗强度。

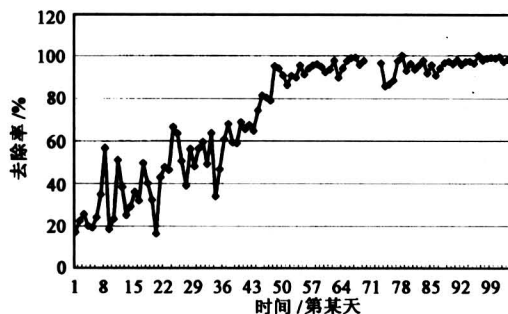


图6 1#滤池锰的去除率增长曲线

Fig.6 Manganese removal efficiency of filter 1

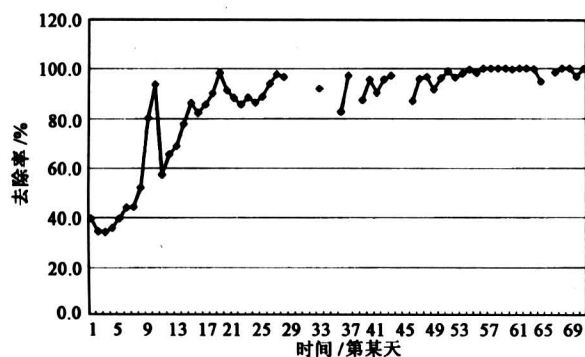


图7 2#滤池锰的去除率增长曲线

Fig.7 Manganese removal efficiency of filter 2

5.4 原水水质

对于某些微污染源，地下水中含有一定的有机物和氨氮，以往的经验表明生物滤层对此均有很好的去除效果。

生物滤层适应的原水的 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 浓度极限是作者正在研究的课题之一。现有的成果表明：在一般地下水水质 Fe^{2+} 为 $5\sim 10\text{ mg/L}$ ， Mn^{2+} 为 $0.5\sim 1.0\text{ mg/L}$ 条件下，经生物除铁除锰滤层都可以很好地去除。本工程原水水质非常特殊， Fe^{2+} 很低，为 $0.1\sim 0.5\text{ mg/L}$ ，而锰 Mn^{2+} 很高，为 $1\sim 3\text{ mg/L}$ ，经较长时期的培养，生物滤池仍发挥了很好的作用。

6 结论

1) 沈阳市开发区水厂是我国首座在生物固锰除锰理论指导下建立的大型除铁除锰水厂。其良好的运行效果从根本上改善了该区的供水水质。驻区因水质问题而一度停产的企业也恢复了生产。

2002年9月沈阳市政府决定将张士开发区建成大型工业区,铁西区的所有大中型企业将全部迁入开发区。目前搬迁工作和招商引资正在积极进行中。水质的改善无疑是促成这一举措的重要因素,也是推动沈阳市经济繁荣发展的根本保障。

2) 该工程出水水质稳定,铁锰都得到深度去除。用生产实践证实了生物固锰除锰机理和铁锰可以在同一滤层中去除的试验成果,从而解决了半个世纪以来地下水除锰的难题。

3) 由于生物技术的应用,减缩了净化流程。本工程与传统的两级曝气两级过滤流程相比,基建费用投资节省了3000万元,相当于总投资的30%,年运行费用节省20%。有着显著的经济效益和社会效益。

参考文献

- [1] 李圭白,刘超.地下水除铁除锰[M].北京:中国建筑工业出版社,1989
- [2] 张杰,杨宏,徐爱军.生物固锰除锰技术的确立[J].给水排水,1996,22(5):5~10
- [3] 张杰,杨宏,徐爱军. Mn^{2+} 氧化细菌的微生物学研究[J].给水排水,1997,23(1):19~23
- [4] 李冬,杨宏,张杰.生物滤层同时去除地下水中铁锰离子的实验研究[J].中国给水排水,2001,17(8):1~5
- [5] 鲍志戎.自来水厂除锰滤砂的催化活性分析[J].环境科学,1997,18(1):38~41
- [6] 张杰,杨宏,李冬.生物滤层中 Fe^{2+} 的作用及对除锰的影响[J].中国给水排水,2001,17(9):14~16
- [7] 张杰,戴镇生.地下水除铁除锰现代观[J].给水排水,1996,22(10):13~20

Realization of the First Water Plant with Biological Removal of Iron and Manganese

Li Dong, Yang Hong, Zhang Jie

(Beijing University of Technology, Department of Architecture and Civil Engineering, Beijing 100022, China)

[Abstract] The project was designed according to the theory of biological fixation and removal of manganese. The process included weak aeration and one filtration. Inoculating the aboriginal manganese removal bacteria from raw water, after 2~3 months culture, the filter obtained the strong manganese removal ability. Under the condition of usual filtrating rate, manganese in treated water was 0.05 mg/L, and T_{Fe} was trace which were superior to the national standard although the manganese in raw water was 1~3 mg/L and T_{Fe} was 0.1~0.5 mg/L. The quality of the treated water was stable and met the industry requirement. This theory solved the difficulty of manganese removal over the past half of century and built the first biological removal of iron and manganese water plant in the world.

[Key words] biological fixation and removal of manganese; weak aeration; economic process; simultaneous removal