

烟台永福园地下水库水生物除铁锰工程设计

孙卫东¹, 周彦合²

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 2. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘要: 烟台市宫家岛水厂水源分为门楼水库及地下水水源两部分, 为保证在门楼水库大坝维修期间城市供水的安全及可靠性, 以地下水作为应急备用水源, 经检测地下水中铁、锰超标。为解决地下水铁锰超标的问题, 决定建设永福园地下水库水除铁锰工程。该工程处理规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 采用跌水曝气 + 生物除铁锰过滤工艺, 处理出水 $\text{Fe}^{2+} \leq 0.3 \text{ mg/L}$, $\text{Mn}^{2+} \leq 0.1 \text{ mg/L}$, 满足生活饮用水水质标准。

关键词: 自来水厂; 生物除铁除锰; 曝气生物滤池

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)14-0109-04

Design of Biological Iron and Manganese Removal Project of Yongfuyuan Reservoir in Yantai

SUN Wei-dong¹, ZHOU Yan-he²

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The water source of Yantai Gongjiadao Waterworks consists of two parts: Menlou reservoir and groundwater source. In order to ensure the safety and reliability of urban water supply during the maintenance of Menlou reservoir dam, groundwater is used as an emergency water source. In order to solve the problem of over-standard iron and manganese in groundwater, the Yongfuyuan underground iron and manganese removal project with the treatment capacity of $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ was built. Drop aeration and biological iron and manganese filter technology was adopted. The Fe^{2+} concentration in treated water was less than 0.3 mg/L and the Mn^{2+} concentration was less than 0.1 mg/L , which could meet the drinking water quality standards.

Key words: waterworks; biological iron and manganese removal; biological aerated filter

1 工程概况

烟台市区目前由一座地表水厂、两座地下水厂向城市供水, 其中宫家岛水厂为地表水厂, 设计供水能力为 $17.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 陌堂、套口水厂在增打水源井后设计供水能力均达到 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 总设计供水能力在 $23 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右。近年来城市需水量接近供水能力上限 ($23.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$), 为提高城市供水的安全性, 保证门楼水库大坝在维修期间城市的

供水量, 该市水利局在大沽夹河宫家岛水厂附近打了 25 眼地下水井, 并配备深井泵, 总供水量为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。该地下水中铁、锰超标, Fe^{2+} 浓度为 $0.2 \sim 2.0 \text{ mg/L}$, Mn^{2+} 浓度为 $0.1 \sim 1.0 \text{ mg/L}$, 其他指标满足供水水质要求。为满足生活饮用水水质要求, 烟台市自来水公司开始筹建永福园地下水库除铁除锰工程。工程范围包括净车间、清水池及配套设施, 送水泵站利用宫家岛水厂现有泵站。

1.1 厂址

根据地下水抽水井位置及深井泵总汇水管在宫家岛水厂西北侧进入厂区的情况,考虑到目前宫家岛周围可征用土地在水厂的西北侧,工程选址在宫家岛水厂西北侧的空地上,总占地约1.283 hm²。为

与宫家岛水厂区别,命名为“烟台市永福园地下水水库水除铁锰工程”。

1.2 设计进、出水水质

① 设计进水水质

应急深井测得的水质情况见表1。

表1 应急深井水质监测结果

Tab.1 Monitoring results of water quality in emergency well

项 目	锰/ (mg·L ⁻¹)	铁/ (mg·L ⁻¹)	浊度/ NTU	氯化物/ (mg·L ⁻¹)	硫酸盐/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	pH 值	总硬度/ (mg·L ⁻¹)
水源水标准值	≤0.1	≤0.3	≤3	<250	<250	≤0.5	6.5~8.5	≤350
实测平均值	0.56	0.54	6.57	201.92	117.86	0.34	7.22	267.38

由表1可以看出,部分深井的铁、锰、浊度指标均超过供水标准,而其中浊度超标可能是由于深井刚打完,扰动了土层造成的,这显然不是正常地下水浊度指标。根据目前运行的其他地下水厂浊度很低的情况,对于浊度本工程暂不考虑去除。因此本工程主要目标为除铁除锰。为保证处理系统的安全可靠性,本工程进水铁、锰指标值均定为1 mg/L。

② 设计出水水质

设计出水水质应符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),即 Fe²⁺ ≤0.3 mg/L, Mn²⁺ ≤0.1 mg/L,出厂水浊度 ≤0.5 NTU,特殊情况下浊度 ≤1.0 NTU。

1.3 设计水压

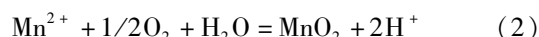
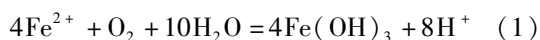
由于该工程为改造工程,其净水出水要求与现有清水池连通并联运行,且与送水泵吸水管相连,因此工程出水水面标高应不低于现有清水池的最高水位,清水池池底应不低于现有清水池池底。现有清水池高水位为6.40 m,池底标高为2.60 m。清水池最高水位定为6.60 m,池底标高为2.60 m。

2 处理工艺的选择

2.1 除铁除锰技术概况

地下水是我国城镇和工矿企业的重要水源,主要分布在东北、华北、西北地区。地下水水质较好,但铁、锰含量高较为普遍。

地下水中碳酸溶解岩层中的二价铁、锰氧化物,使铁、锰分别以 Fe²⁺、Mn²⁺ 的形式析出;此外,还有些高价铁、锰的氧化物(如 Fe₂O₃、MnO₂ 等),在地下水所处地层缺氧的还原环境中,能被地下水中硫化氢等还原为 Fe²⁺、Mn²⁺ 的形式。地下水中 Fe²⁺、Mn²⁺ 与空气中的氧接触后发生如下反应:



铁、锰含量高可导致水中色度升高,给生活和生产带来诸多不便,水中含有过量的铁、锰可导致慢性中毒或引发一些地方病。

铁、锰均是过渡性金属元素,其标准氧化还原电位分别为 $\Psi^0(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}) = 0.177 \text{ V}$ 及 $\Psi^0(\text{MnO}_2/\text{Mn}^{2+}) = 1.123 \text{ V}$, 锰的氧化还原电位高于铁, Mn²⁺ 比 Fe²⁺ 难以氧化。

地下水经曝气后 pH 值一般为 6.0~7.5, Fe²⁺ 在这一 pH 值范围内自然氧化速度已较快, Mn²⁺ 则需将 pH 值提高到 9.5 以上时自然氧化速度才明显加快,在实际应用中甚至通过强曝气设施,尽最大可能地去除地下水中 CO₂ 来提高 pH 值也不能达到这一条件,同时因 Mn²⁺ 比 Fe²⁺ 难以氧化,对于铁锰共存地下水(尤其铁含量较高时),锰的去除极有可能受到铁快速氧化的干扰,进一步增加了去除难度。锰难以去除一直是困扰工程界的问题,也是地下水除铁除锰技术所要解决的焦点问题。

地下水除铁除锰技术经历了不同发展阶段:从早期的空气自然氧化除铁的尝试、氯化氧化除铁的发展到接触氧化除铁的成功;从单纯除铁滤池的建立到综合除铁除锰工艺的探索;从传统物理化学方法除铁除锰的应用到生物固锰除锰技术的确立,标志着人们在这一领域不断进行的探索和取得的成果^[1~7]。

2.2 工艺方案的选择

地下水除铁技术发展至今已有多多种方法。如:接触过滤氧化法、曝气氧化法、药剂氧化法(如加氯或高锰酸钾)等。工程中最常用也是最经济的工艺是接触过滤氧化法。

接触过滤氧化法是以溶解氧为氧化剂的自催化

氧化法。反应生成物是催化剂本身不断地披覆于滤料表面,在滤料表面进行接触氧化除铁反应。曝气只是为了充氧,充氧后应立即进入滤层,避免滤前生成 Fe^{3+} 胶体粒子穿透滤层。设计时应使曝气后的水至滤池的中间停留时间越短越好。实际工程中在3~5 min之内不会影响处理效果。

当原水含铁量 $<6\text{ mg/L}$ 、含锰量 $<1.5\text{ mg/L}$ 时,采用曝气和一级过滤,可在除铁的同时将锰去掉,主要原理为生物除铁除锰。

当原水含铁量、含锰量超过上述数值时,应通过试验研究,必要时可采用两级曝气、两级滤池过滤工艺,以达到铁锰深度净化的目的,先除铁而后除锰。

根据该工程铁、锰指标值,进水中 Fe^{2+} 浓度值超标3~4倍, Mn^{2+} 浓度超标约10倍,均不是太高,根据《室外给水设计规范》(GB 50013—2006),本工程可采用跌水曝气+单级过滤的除铁除锰工艺。

为慎重起见,设计前对沈阳第七水厂及浑南第二水厂地下水除铁除锰系统进行了考察,其中沈阳市第七水厂进水 Fe^{2+} 及 Mn^{2+} 的浓度分别为 6 mg/L 及 $2.0\sim2.5\text{ mg/L}$,浑南第二水厂进水 Fe^{2+} 浓度为 $0.2\sim0.7\text{ mg/L}$, Mn^{2+} 浓度为 $0.7\sim1.2\text{ mg/L}$,两厂均采用原水跌水曝气+单级过滤工艺,其出水铁锰指标均达到供水指标要求。考虑到本工程的进水水质与上述两厂基本相同甚至更低的情况,最终确定除铁除锰采用跌水曝气+单级生物滤池过滤工艺(见图1),处理水进入清水池由现有加氯机进行加氯消毒处理,再由现有送水泵送至厂外管网,反冲洗水进入现有水厂生产排水管道系统。

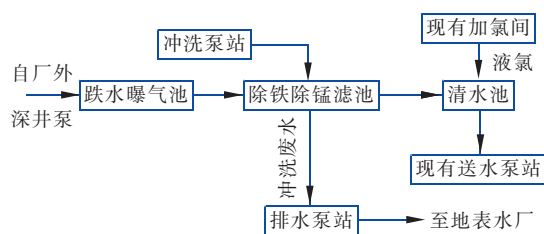


图1 除铁除锰工艺流程

Fig. 1 Flow chart of iron and manganese removal process

3 主要构筑物及设计参数

该工程设计处理规模为 $5\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$,自用水系数为5%,最大处理能力为 $7\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ (远期)。设计流量为 $0.608\text{ m}^3/\text{s}$ 。该工程新增构筑物包括除铁除锰净水间及清水池,另外还包括对现有加氯间的

改造。其中除铁除锰净水间包括跌水曝气池、除铁除锰滤池排水泵站、反冲洗泵站、配电及控制室及机修间等,滤池部分为滤站的主体,单排排列,跌水曝气池设于中部,中部及管廊部分为二层建筑,上层为操作层,下层为管廊层。在滤池边上设一座反冲洗泵房和控制室,反冲洗水泵在底层。净水间的总平面尺寸($B\times L$)= $34\text{ m}\times82\text{ m}$ 。

① 跌水曝气池

跌水曝气池对原水进行跌水曝气,满足后续铁锰氧化对DO的要求,跌水后DO达到 $3\sim5\text{ mg/L}$ 。2座,尺寸: $6\text{ m}\times6\text{ m}\times2.4\text{ m}$,为节省占地,充分利用进水泵富余扬程,采用三级跌水。单宽流量为 $50\text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$ 。主要设备:2台DN1000电动双偏心软密封蝶阀,2台DN800电动双偏心软密封蝶阀。

② 除铁除锰滤池

除铁除锰滤池的悬浮液流经锰砂滤料去除铁及锰离子,并进一步去除水中的微小颗粒,以保证最终的出水水质。半地下式钢筋混凝土结构(设于净水间内),2组,每组5池。设计滤速为 3.1 m/h ,强制滤速为 3.85 m/h ,总过滤面积为 720 m^2 ,水冲强度为 $65\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,冲洗时间为 $10\sim15\text{ min}$,反冲洗周期为 $24\sim36\text{ h}$ 。主要设备:反冲洗水泵3台,2用1备(2台变频), $Q=2350\text{ m}^3/\text{h}$, $H=180\text{ kPa}$;滤料总厚度为 1.2 m ,粒径为 $0.6\sim0.8\text{ mm}$ 的厚 400 mm , $k_{80}=1.2$;粒径为 $0.8\sim1.2\text{ mm}$ 的厚 600 mm , $k_{80}=1.4$;粒径为 $1.2\sim1.5\text{ mm}$ 的厚 200 mm , $k_{80}=1.1$ 。锰砂承托层总厚度为 450 mm ,粒径为 $2\sim4\text{ mm}$ 的厚 100 mm ,粒径为 $4\sim8\text{ mm}$ 的厚 100 mm ,滤池砂垫层滤料采用石英砂,有效粒径为 $8\sim16\text{ mm}$ 的厚 100 mm ,粒径为 $16\sim32\text{ mm}$ 的厚 150 mm 。过滤过程由PLC自动控制。根据滤池水位变化自动调节出水管上阀门开启度,以达到恒位恒速过滤,当滤池过滤达到时间或水头损失设定值时,自动进行反冲洗。

③ 排水泵站

排水泵站把反冲洗水送至 $10\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 系统回用。1座,地下式钢筋混凝土结构(设于净水间内),尺寸: $13\text{ m}\times18\text{ m}\times5\text{ m}$ 。主要设备:潜水泵3台(2用1备), $Q=710\text{ m}^3/\text{h}$, $H=130\text{ kPa}$;搅拌器4台, $N=6.5\text{ kW}$ 。

④ 清水池

清水池主要用于水量调节及满足消毒停留时间

要求。半地下式钢筋混凝土结构,2座,根据厂地情况及送水泵站要求,总池容为5 640 m³。

⑤ 加氯间

加氯间主要给新系统加液氯,设于现有加氯间内。加氯量为2 mg/L。主要设备:复合环壁挂式加氯机2台(1用1备),加氯量为7 kg/h。

4 运行效果及经济分析

该工程建成投产稳定运行后,有关部门对水库水中的铁、锰指标进行抽检(结果见表2),均达到国家饮用水标准。

表2 工程稳定运行后铁锰检测结果

Tab.2 Monitoring results of iron and manganese concentration after stable operation mg · L⁻¹

检测时间	铁		锰	
	标准值	检测值	标准值	检测值
2017-03-21	0.3	0.057	0.1	0.021
2017-09-19		<0.020		<0.020

该工程总投资约为5 588万元,资金来源为财政拨款。经测算,单位运行成本为0.247元/m³,单位经营成本为0.100元/m³。

5 结论

烟台市永福园地下水库水除铁除锰工程采用跌水曝气+单级生物滤池过滤工艺,处理水进入清水池由现有加氯机进行加氯消毒处理,再由现有送水泵泵送至厂外管网,反冲洗水进入现有水厂生产排水管道系统。该工程建成投产后,水中铁锰含量均稳定达标,大大提高了供水的安全性及可靠性,达到了预期工程效果。

参考文献:

- [1] 李圭白. 天然锰砂除铁滤层的设计和计算[J]. 建筑技术通讯,1973,(6):36-42.
Li Guibai. Design and calculation of iron removal layer for natural manganese sand[J]. Construction Technology, 1973,(6):36-42(in Chinese).
- [2] 李圭白. 关于用自然形成的锰砂除锰的研究[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报,1979,(1):60-65.
Li Guibai. Study on removing manganese from natural manganese sand[J]. Journal of Harbin Institute of Architectural Engineering, 1979,(1):60-65(in Chinese).
- [3] 李冬,杨昊,李相昆,等. 无烟煤滤料在生物除铁除锰水厂中的应用[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2007,23(5):818-821.

Li Dong, Yang Hao, Li Xiangkun, et al. The application of anthracite removal of iron in water plant for biological and manganese[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2007, 23(5):818-821(in Chinese).

- [4] 曾辉平,李冬,高源涛,等. 生物除铁除锰滤层的溶解氧需求及消耗规律研究[J]. 中国给水排水,2009,25(21):37-40.
Zeng Huiping, Li Dong, Gao Yuantao, et al. Demand and consumption of dissolved oxygen in biofilter for manganese and iron removal[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(21):37-40(in Chinese).
- [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.
Gao Jie, Liu Zhixiong, Li Biqing. Technical design and performance of waterworks for iron and manganese removal by microorganism[J]. Water & Wastewater Engineering, 2003, 29(11):26-28(in Chinese).
- [6] 李冬,张杰,陈立学,等. 生物除铁除锰在地下水处理厂的应用[J]. 中国给水排水,2004,20(12):85-88.
Li Dong, Zhang Jie, Chen Lixue, et al. Application of biological removal of iron and manganese from groundwater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2004, 20(12):85-88(in Chinese).
- [7] 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.
Li Guibai, Liu Chao. Removal of Iron and Manganese from Groundwater[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1989(in Chinese).



作者简介:孙卫东(1973-),男,山东威海人,硕士,高级工程师,主要从事市政给水厂、污水厂以及污泥处理工程设计工作。

E-mail:13512070300@163.com

收稿日期:2018-04-01