

改性河砂过滤处理高锰地下水

张凤君¹, 朱树阳¹, 钟爽¹, 苏可佳¹, 卫达²

1. 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 长春 130026
2. 中国天辰工程有限公司, 天津 300400

摘要 以改性河砂为除锰滤料, 对模拟地下水进行过滤处理, 研究了水力停留时间、pH 值、溶解氧含量、 Mn^{2+} 质量浓度等对除锰效率的影响。结果表明, 水力停留时间为 24min、溶解氧为 7mg/L、中性及弱碱性、原水 Mn^{2+} 质量浓度不大于 2mg/L 等条件下, 改性河砂过滤可使出水 Mn^{2+} 质量浓度持续稳定在 0.1mg/L 以下, 符合国家饮用水标准。通过对改性河砂表面滤膜的电镜扫描和 X 射线能谱分析, 初步确定了改性河砂表面滤膜对除锰发挥了重要作用, 主要机理为吸附和自催化作用。

关键词 改性河砂; 过滤; 除锰; 吸附; 自催化

中图分类号 X523

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.05.003

Filtration Treatment on Groundwater with High Manganese for Modified River Sand

ZHANG Fengjun¹, ZHU Shuyang¹, ZHONG Shuang¹, SU Kejia¹, WEI Da²

1. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130026, China
2. China Tianchen Engineering Corporation, Tianjin 300400, China

Abstract In order to ameliorate the inferior efficiency of manganese removal and the lengthy period of maturation concerned in the common filter medium, the filter media for manganese removal were prepared by modifying the original river sand. The effects of hydraulic retention time, pH value, DO, and Mn^{2+} concentration on manganese removal efficiency were studied by the filtration test of simulation groundwater. The mechanism of manganese removal was also preliminarily discussed in the test. The results show that the Mn^{2+} concentration of effluent is constantly lower than 0.1mg/L, which conforms with the state standards for drinking water; under the optimum conditions, the water residence time is about 24min, the content of dissolved oxygen is about 7mg/L, the pH value of the inflow is neutral or alkaline, and the concentration of manganese is no more than 2mg/L. The membrane of modified river sand surface plays a crucial role. The mechanism of manganese removal that is adsorption and self-catalysis processes is preliminary confirmed based on scanning electron microscopy and X-ray spectrum analysis for the filtration membrane of modified river sand surface.

Keywords modified river sand; filtration; manganese removal; adsorption; self-catalysis

0 引言

中国铁锰超标的地下水占地下水总量的 20%, 且主要集中在松花江流域和长江中下游地区, 黄河流域、珠江流域等部分地区也有分布^[1-3]。尤其在中国北方地区, 如东北、华北和西北地区, 地下水中 Mn^{2+} 质量浓度多数在 1.5mg/L 以下, 有少数超过 3mg/L, 但一般不会超过 5mg/L^[1-3]。过量的锰(本文主要研究 Mn^{2+})会造成地下水色度大、异味高, 污染生活器具。

锰的过量摄入对人体有慢性毒害, 会造成某些器官病变^[1,4]。常用的传统除锰工艺有自然氧化法、强氧化剂氧化法、接触氧化法、生物接触氧化法等^[1-5]。这些除锰工艺存在以下问题: 自然氧化法需要将原水 pH 值调整到 9.5 以上, 系统复杂; 强氧化剂氧化法造价相对较高; 接触氧化法滤膜成熟期较长; 生物接触氧化法滤池启动周期较长^[6]。因此研发廉价、高效的地下水除锰技术, 仍是一个急需解决的问题。

收稿日期: 2011-08-11; 修回日期: 2012-01-30

基金项目: 环保公益性行业科研基金重大项目(201009009)

作者简介: 张凤君, 教授, 研究方向为水处理技术, 电子信箱: zhangfengjun@jlu.edu.cn

改性滤料是近年来滤料研究的新热点,它是通过对载体滤料表面涂以金属氧化物或氢氧化物,在载体表面制成一层薄膜。改性滤料由于这层薄膜的存在,比表面积增大,等电点变化从而表面带有电荷,同时薄膜具有特殊的化学性质,使得改性滤料具有更强的去除能力^[7-9]。本试验以廉价河砂为原料,用高锰酸钾对其进行改性,作为地下水除锰的一种滤料,试验研究了动态条件下水力停留时间、溶解氧含量、pH 值及原水 Mn^{2+} 质量浓度等因素对其除锰效果的影响。通过对河砂改性前后的微观结构观察、表面元素分析,探讨了改性河砂的除锰机理。

1 试验材料、装置和方法

1.1 改性河砂滤料及其制备

河砂采用长春市伊通河河砂,经过筛分粒径为 0.85—1.00mm 的河砂。经过 X 射线衍射分析后,得其主要成分为:石英 60%,碱性长石 21%,斜长石 17%,伊蒙混层 2%。

改性河砂滤料的制备。经过优化比较,采用如下工艺^[10-12]:将 800g 河砂用自来水洗净,105℃烘干,然后用 1mol/L 的盐酸 400mL 浸泡 24h,用自来水洗至近中性,105℃烘干备用。将预处理好的河砂 800g 用 400mL 的 1%的 $KMnO_4$ 溶液搅拌均匀,浸泡 24h,倒去上层液,105℃烘干 5h。再用自来水将其冲洗干净。烘干后装填到试验装置中。

1.2 试验装置

试验装置为内径 30mm,高 35cm 的有机玻璃柱;有机玻璃柱底部装填 2cm 高的粒径为 3—5mm 普通河砂作为承托层,填装改性滤料高度为 25cm,淹没水位为 5cm。试验装置如图 1 所示。

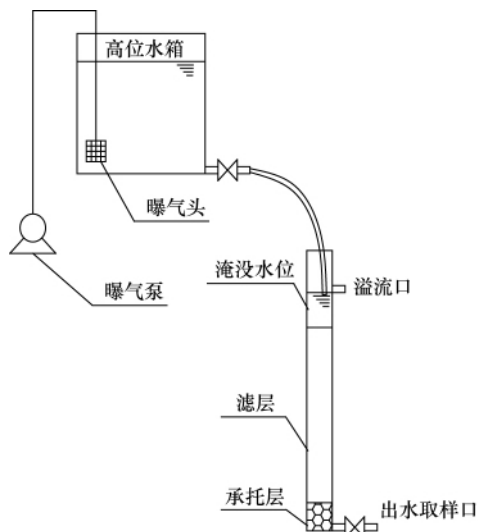


图 1 试验装置图

Fig. 1 Scheme for experimental facility

1.3 试验方法

过滤试验中,所用的原水为吉林大学校园内符合饮用水

标准的地下水并加入 $MnCl_2$ 配置的模拟高锰地下水。通过调整出水取样口的出水流速,控制原水在滤柱中的水力停留时间(水力停留时间为滤层厚度与出水流速的比值),本试验特指砂柱填充完改性河砂后含 Mn^{2+} 水在滤层中的水力停留时间;通过调整高位水箱中的曝气量,控制原水中的溶解氧量;用 0.1mol/L 的 HCl 和 0.1mol/L 的 NaOH 溶液,调节原水 pH 值;通过调整加入高位水箱中的 $MnCl_2$ 的量,控制原水 Mn^{2+} 质量浓度。为排除自然氧化对试验的干扰,原水浓度为砂柱进水浓度实测值。以上试验按每个影响因素的 4 个不同值取 4 个砂柱做平行对比试验,研究下一个影响因素时重新装填 4 个砂柱中的改性河砂滤料。

1.4 测试方法

Mn^{2+} :高碘酸钾分光光度法^[13];溶解氧(DO):溶解氧仪测定法(JPSJ-605 型便携式溶解氧仪);pH 值:玻璃电极法^[14](pHS-25 型 pH 计)。

2 结果与讨论

2.1 水力停留时间对除锰效果的影响

采用如图 1 的试验装置,以改性河砂为填料,选定试验进水中 Mn^{2+} 质量浓度 2mg/L, pH 值 7,溶解氧含量 7mg/L。分别考察了不同水力停留时间 12, 18, 24, 48min 条件下对除锰效果的影响。结果如图 2 所示。

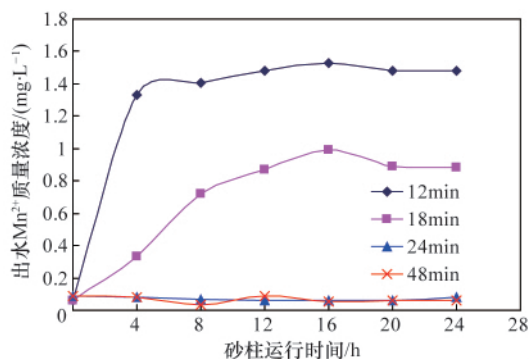


图 2 水力停留时间对除锰效果的影响

Fig. 2 Effect of water residence time on manganese removal efficiency

由图 2 可知,当水力停留时间 ≤ 18 min 时,除锰效率下降,出水 Mn^{2+} 质量浓度显著增大。当水力停留时间为 12min 时,在过滤初期的 4h 内,出水 Mn^{2+} 质量浓度随时间迅速增加,之后基本稳定在 1.5mg/L 左右,这是由于在水力停留时间较短时,改性滤料表面薄膜的吸附点位在过滤初期被迅速占据,催化氧化机会较少,没有足够的时间生产新的滤膜,致使出水浓度不断增高。经过一定时间后,过程达到了动态平衡,出水浓度相对稳定但很高;当水力停留时间 ≥ 24 min 时,水力停留时间对除锰效果影响不大,在整个除锰周期内,出水 Mn^{2+} 质量浓度均能保持在 0.1mg/L 以下,达到了国家饮用水标准^[15]。这说明水力停留时间越长,除吸附作用之外,主要的

是改性河砂充分发挥了其催化氧化作用,实现持续除锰。因此后续试验选择水力停留时间为 24min。

2.2 溶解氧对除锰效果的影响

试验进水中 Mn^{2+} 离子质量浓度 2mg/L、pH 值为 7、水力停留时间 24min。分别考察了 DO 值为 5,6,7,8mg/L 的条件下对除锰效果的影响。结果如图 3 所示。

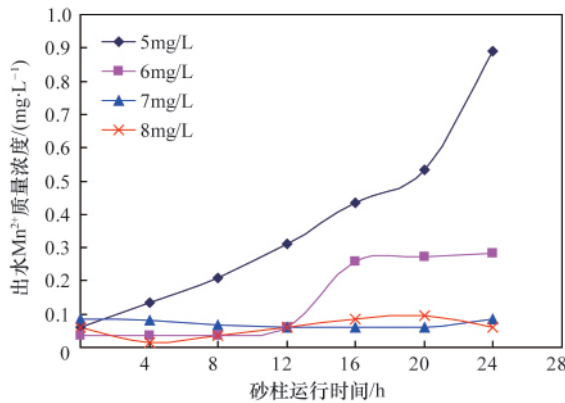


图 3 溶解氧对除锰效果的影响

Fig. 3 Effect of DO on manganese removal efficiency

由图 3 可知,当 $DO < 7\text{mg/L}$ 时,原水中溶解氧含量对改性河砂除锰的影响较大,溶解氧值越大,除锰效果越好。当 $DO = 5\text{mg/L}$ 时,出水 Mn^{2+} 质量浓度随砂柱运行时间的增加不断增大; $DO = 6\text{mg/L}$ 时,在前 12h 出水 Mn^{2+} 质量浓度稳定在 0.1mg/L 以下,随后出水 Mn^{2+} 质量浓度随过滤时间的增加而增大,过滤 16h 后,则稳定在 0.3mg/L 左右,这是由于过滤初期 12h 内,改性河砂原有滤膜在发挥吸附和催化氧化的作用,并不断消耗溶解氧,但新生成的滤膜量不足,因此 12h 后出水 Mn^{2+} 质量浓度增加,过滤 16h 后新生成的滤膜量与消耗的滤膜量相对稳定,从而使出水稳定在 0.3mg/L 的水平上;当 $DO \geq 7\text{mg/L}$ 时,出水 Mn^{2+} 质量浓度始终低于 0.1mg/L,符合国家饮用水标准。因此选择原水溶解氧含量为 7mg/L。

2.3 pH 值对除锰效果的影响

选定试验进水中 Mn^{2+} 质量浓度为 2mg/L、DO 值为 7mg/L、水力停留时间为 24min。分别考察了不同原水 pH 值为 5,6,7,8 的条件下对除锰效果的影响。结果如图 4 所示。

由图 4 可知,随着原水中 pH 值的增加,除锰效果得到加强。当 pH 值为 5 时,过滤初期还有一定的除锰效果,随着过滤时间的延长,出水 Mn^{2+} 质量浓度迅速增加,并且出现了高于原水 Mn^{2+} 质量浓度的现象。这是由于过滤初期滤料具有一定的吸附作用,使出水 Mn^{2+} 质量浓度降低,随着过滤时间的增加,在偏酸性水中,滤料吸附截留的锰会部分释放,使出水 Mn^{2+} 质量浓度高于原水浓度。当 pH 值为 6 时,出水 Mn^{2+} 质量浓度保持相对稳定,基本能达到国家饮用水标准。当 pH 值为 7—8 时,出水 Mn^{2+} 质量浓度始终保持稳定,达到国家饮用水标准。可见改性河砂在中性及弱碱环境条件下,除锰效果更好。

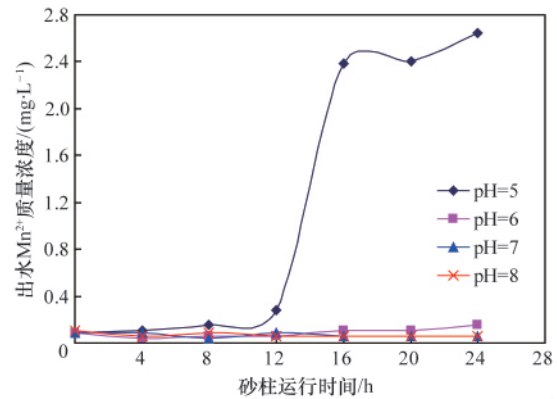


图 4 pH 值对除锰效果的影响

Fig. 4 Effect of pH value on manganese removal efficiency

2.4 原水 Mn^{2+} 质量浓度对除锰效果的影响

在上述选定的最佳试验条件下(水力停留时间为 24min、 $DO = 7\text{mg/L}$ 、 $pH = 7$)，分别考察了原水 Mn^{2+} 质量浓度为 1,2,4,8mg/L 的条件下对除锰效果的影响。结果如图 5 所示。

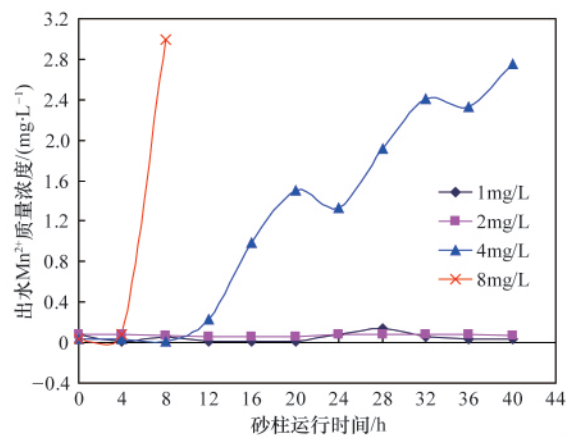


图 5 原水 Mn^{2+} 质量浓度对除锰效果的影响

Fig. 5 Effect of original manganese concentration on manganese removal efficiency

由图 5 可知,原水 Mn^{2+} 质量浓度越低,除锰效果越好。当原水 Mn^{2+} 质量浓度 $\geq 4\text{mg/L}$ 时,在过滤初期 4h,出水维持在 0.1mg/L 以下,但随过滤时间的延长,出水 Mn^{2+} 质量浓度迅速增加。其原因是在原水浓度较高时,改性河砂表面薄膜的吸附点位不断吸附趋于饱和,而催化氧化作用的机会较少,不能生成足够多的新滤膜,因此出水 Mn^{2+} 质量浓度不断增高。当原水 Mn^{2+} 质量浓度 $\leq 2\text{mg/L}$ 时,在整个过滤周期内,出水 Mn^{2+} 质量浓度均保持相对稳定,均小于 0.1mg/L,满足国家饮用水标准。说明本试验条件下,改性河砂滤料在处理原水 Mn^{2+} 质量浓度 $\leq 2\text{mg/L}$ 时,能达到很好的处理效果。

2.5 普通河砂与改性河砂除锰效果对比

在上述选定的工艺参数:水力停留时间 24min、 $DO = 7\text{mg/L}$ 、 $pH = 7$ 、 Mn^{2+} 质量浓度 2mg/L 条件下,对普通河砂滤料与改

性河砂滤料的除锰效果进行了对比研究。结果如图 6 所示。

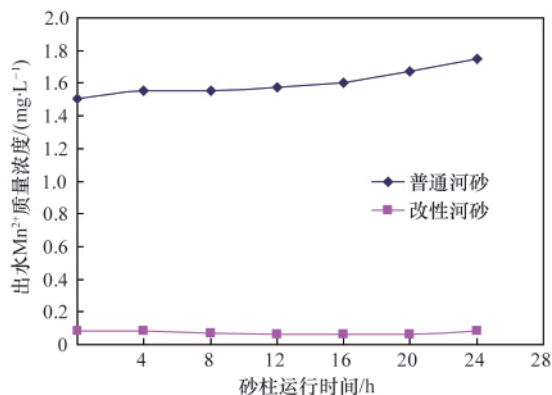


图 6 普通河砂与改性河砂除锰效果对比

Fig. 6 Comparison of manganese removal efficiency between original sand and modified river sand

由图 6 可知,在砂柱运行 24h 时间内,普通河砂具有一定的除锰效果,但效果很差,出水 Mn²⁺质量浓度保持在 1.50—1.75mg/L 之间,并且随时间延长有增加的趋势;而改性河砂在试验时间内,除锰效果很好,出水 Mn²⁺质量浓度始终保持在 0.1mg/L 以下,达到国家饮用水标准。说明改性河砂的除锰效果明显优于普通河砂。

3 改性河砂处理高锰地下水机理研究

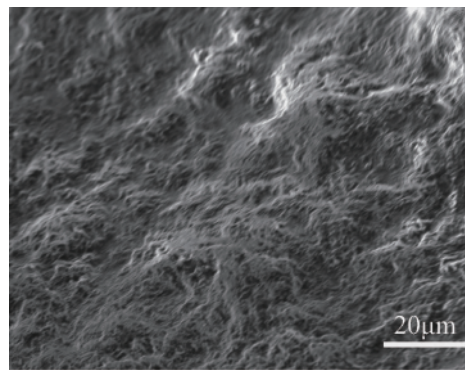
3.1 改性过程机理

普通河砂通过高锰酸钾溶液的浸泡、搅拌和烘干等步骤,发生了一系列物理化学变化。其中一部分高锰酸钾吸附在河砂表面形成薄膜;也会有一部分高锰酸钾在溶液中缓慢分解,形成少量的 Mn²⁺等中间价态产物,这些物质会诱导高锰酸钾继续分解,生成以 MnO₂ 为主的锰氧化物,在河砂表面形成二氧化锰薄膜。分解反应:



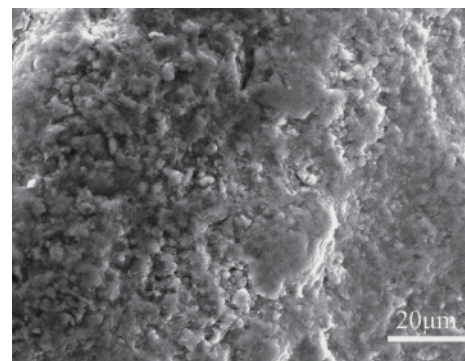
3.2 改性河砂滤料表面特性分析

图 7 为扫描电镜下的放大 1000 倍的普通河砂、改性河砂及改性河砂过滤后的表面形态。从图 7(a)中可以看出,经酸洗后未负载的普通河砂表面比较清洁,无附着物,同时表面具有一定程度的凹凸沟槽,这不仅为改性剂提供了更多的负载面积,而且一定程度上提高了改性剂与河砂的附着强度;从图 7(b)中可以看出,经过 KMnO₄ 改性的河砂表面形成了一层均匀的薄膜,这层薄膜使河砂表面更加粗糙,同时由于河砂表面覆盖了改性过程中的产物二氧化锰,因此也具有二氧化锰的化学性质。由于负载前后河砂的粒径和密度几乎没有发生改变,因此改性河砂在过滤的过程中保留了河砂的过滤截留功能,同时由于负载的这层薄膜,为 Mn²⁺ 的去除提供了更多的吸附活性位和更多发生催化氧化的机会;从图 7(c)中可以看出,改性河砂在最佳条件下过滤除锰后,存在新的一层厚实粗糙的滤膜,滤柱中肉眼也能观察到改性河砂表面



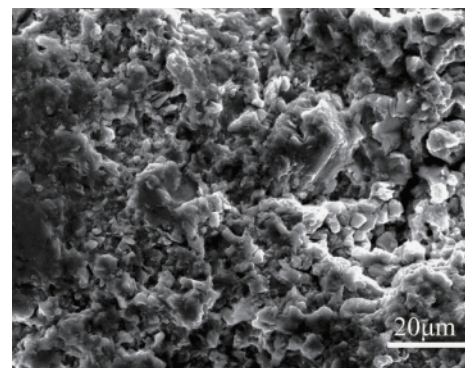
(a) 普通河砂表面微观结构

(a) Surface micro-structure of original river sand



(b) 改性河砂表面微观结构

(b) Surface micro-structure of modified river sand



(c) 改性河砂过滤后表面微观结构

(c) Surface micro-structure of modified river sand after filter

图 7 普通河砂与改性河砂电镜扫描

Fig. 7 SEM of original river sand and modified river sand

覆盖大量黑色絮状物质,说明改性河砂能实现持续催化氧化除锰。

采用 X 射线能谱分析普通河砂和改性河砂及其过滤后的表面物质组成,结果见图 8 及表 1。从图 8(a)和(b)中可以看出,改性河砂的表面物质组成与普通河砂的物质组成有较大的区别。对河砂改性前后进行对比,负载后的河砂表面原素组成发生了变化,增加了 Mn 元素的吸收峰。从表 1 看出,比较改性前后 K 元素和 Mn 元素的变化,K 元素比例增加 0.19%,Mn 元素增加 0.36%,滤膜中除含有一部分高锰酸钾外

(约 0.19%),还有一部分二氧化锰(约 0.14%)。从图 8(c)看出,改性河砂过滤后与过滤前相比较,K 元素减少至和改性前相近,Mn 元素(0.24%)相比过滤前二氧化锰的比例(0.14%)有所增加。可以发现经过动态过滤,改性河砂滤膜中的 KMnO_4 参加了反应而减少,滤膜中的二氧化锰因为过滤过程而增加。这层滤膜在过滤的过程发挥持续催化除锰的作用。

从图 8 及表 1 中还可以看到负载后的河砂出现的 Fe 元素占 0.86%,过滤后 Fe 元素增加到 2.00%,这可能是由于在改性过程用的自来水及过滤原水中采用的地下水均含有一定的 Fe 元素,说明改性河砂滤膜对 Fe 元素有很好的去除效果,因此在地下水除铁除锰中,应考虑首先除铁,以减小其对除锰的影响。

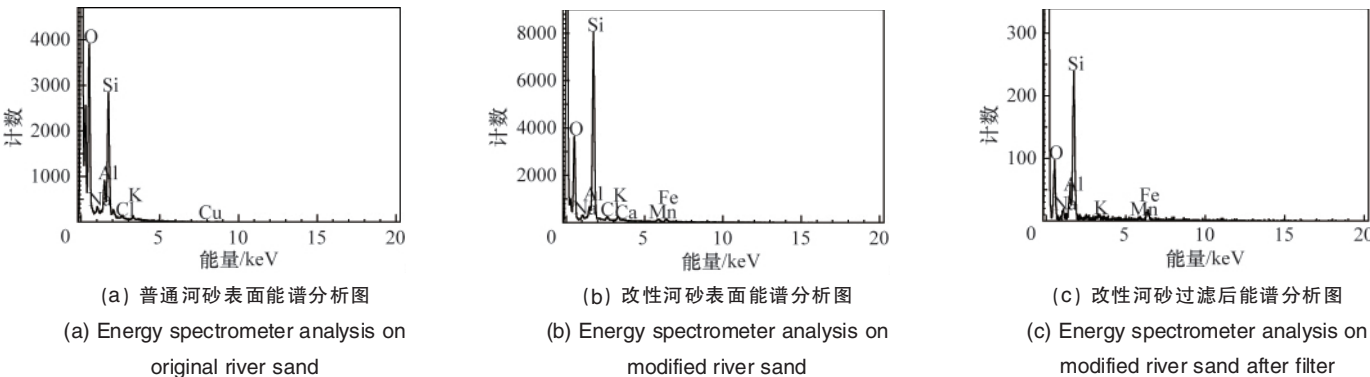


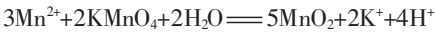
图 8 普通河砂及改性河砂表面物质组成能谱
Fig. 8 Energy spectrometer analyses on original river sand and modified river sand

表 1 改性河砂改性前后表面物质元素原子百分比
Table 1 Atomic percentage of elements in the surface of original river sand and modified river sand

	表面物质元素原子百分比/%								
	O	Na	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe	Cl
普通河砂	84.03	1.73	2.57	11.19	0.28	0.00	0.00	0.00	0.20
改性河砂	75.40	1.25	0.97	20.16	0.47	0.09	0.36	0.86	0.44
改性河砂过滤后	84.58	0.00	1.78	11.16	0.24	0.00	0.24	2.00	0.00

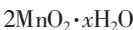
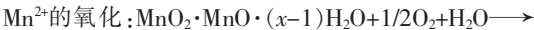
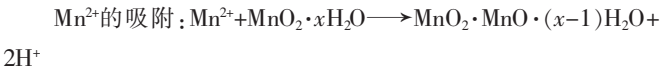
3.3 改性河砂除锰过程分析

改性河砂表面滤膜中的高锰酸钾是强氧化剂,水中的二价锰可被高锰酸钾迅速氧化为四价锰——新生态水合二氧化锰 $\text{MnO}(\text{OH})_2$,同时 KMnO_4 本身也还原为 $\text{MnO}(\text{OH})_2$,反应式为:



这些新生态水合二氧化锰作为一种中间价态的产物,既具有一定的催化氧化性,同时又由于其在水中的溶解度很小,且具有较大的比表面积,具有一定的吸附性,可去除部分锰离子^[16-18]。

改性河砂在改性过程中,经过高锰酸钾的浸泡和烘干,滤膜中含有高锰酸钾分解产物锰的氧化物 $\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$,以二氧化锰为主。含有锰氧化物的滤膜具有很强的吸附性能和自催化作用^[1,19]。水中的 Mn^{2+} 在滤膜的吸附和催化作用下,被氧化为 MnO_2 。其反应为自催化反应。



从不同水力停留时间、不同溶解氧量、不同 pH 值、不同原水 Mn^{2+} 质量浓度等对改性河砂除锰效果的影响中,都能看到两种作用:强吸附性和自催化作用。当水力停留时间较短、溶解氧较低、原水 pH 值较低条件下,改性河砂滤膜吸附作用表现较为明显,自催化作用较弱;而在水力停留时间足够长、溶解氧较高、中性和弱碱性条件下,由于滤膜的吸附和自催化双重作用,能使出水锰浓度持续保持在 0.1mg/L 以下,达到国家饮用水标准,实现持续高效除锰。

4 结论

(1) 经过 1%高锰酸钾溶液的浸泡、搅拌和烘干等步骤而制得的改性河砂,除锰效果明显优于普通河砂,大大缩短了滤料的成熟期,加快了启动的时间,出水达到 0.1mg/L 以下。

(2) 确定改性河砂除锰的最佳工艺参数:水力停留时间为 24min, $\text{DO}=7\text{mg/L}$, $\text{pH}=7$,及原水 Mn^{2+} 质量浓度不大于 2mg/L。

(3) 改性河砂表面覆盖了一层均匀的以 MnO_2 为主的锰的氧化物的薄膜,该薄膜具有强吸附和自催化作用,具有持

续除锰作用。

参考文献 (Reference)

- [1] 李圭白, 刘超. 地下水除铁、除锰[M]. 第2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
Li Guibai, Liu Chao. Removing iron and manganese from groundwater [M]. 2nd. Beijing: China Architecture & Building Press, 1989.
- [2] 中国环境与发展国际合作委员会. 中国自然资源定价研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
China Council for International Cooperation on Environment and Development. The Chinese natural resources price researched [M]. Beijing: Chinese Environment Press, 1997.
- [3] 朱秀芹, 李灿波. 地下水除铁除锰技术发展历程及展望 [J]. 黑龙江水利科技, 2008, 36(6): 121-122.
Zhu Xiuqin, Li Canbo. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2008, 36(6): 121-122.
- [4] 钟爽, 吕聪, 王斯佳, 等. 接触氧化除锰滤池的快速启动[J]. 化工学报, 2011, 62(5): 1435-1440.
Zhong Shuang, Lu Cong, Wang Sijia, et al. CIESC Journal, 2011, 62(5): 1435-1440.
- [5] 张凤君, 王斯佳, 钟爽, 等. 锰细菌的选育及其固定化除锰 [J]. 科技导报, 2011, 29(9): 26-30.
Zhang Fengjun, Wang Sijia, Zhong Shuang, et al. Science and Technology Review, 2011, 29(9): 26-30.
- [6] 陈丽芳, 李敏. 我国地下水除铁除锰技术研究概况 [J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2009, 25(5): 112-117.
Chen Lifang, Li Min. Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition, 2009, 25(5): 112-117.
- [7] Han R P, Zou W H, Zhang Z P, et al. Removal of copper(II) and lead(II) from aqueous solution by manganese oxide coated sand I. characterization and kinetic study[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(1): 384-395.
- [8] Eren E, Afsin B, Onal Y. Removal of lead ions by acid activated and manganese oxide-coated bentonite [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161(2-3): 677-685.
- [9] Mansoor A M, Meera V. Metal oxide/hydroxide-coated dual-media filter for simultaneous removal of bacteria and heavy metals from natural waters[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 181(1-3): 788-793.
- [10] Silvio R T, Jorge R. Removal of Mn^{2+} from aqueous solution by manganese oxide coated zeolite [J]. Minerals Engineering, 2010, 23(14):

- 1131-1138.
- [11] 何绪文, 周波, 邵立南, 等. 改性滤料处理高浊高铁锰矿井水效能和机制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(5): 724-728.
He Xuwen, Zhou Bo, Shao Linan, et al. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(5): 724-728.
- [12] 李福勤, 王锦, 秦宇, 等. 改性滤料强化接触氧化法处理高锰矿井水的研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(13): 31-33.
Li Fuqin, Wang Jin, Qin Yu, et al. China Water & Wastewater, 2008, 24(13): 31-33.
- [13] 国家环境保护局. GB 11906-1989 水质锰的测定高碘酸钾分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
Ministry of Environmental Protection. GB 11906-1989 Water quality-determination of manganese-potassium periodate spectrophotometric method[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [14] 国家环境保护局. GB 6920-1986 水质 pH 值的测定玻璃电极法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.
Ministry of Environmental Protection. GB 6920-1986 Water quality-determination of pH value-glass electrode method[S]. Beijing: Standards Press of China, 1987.
- [15] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB 5749-2006 生活饮用水卫生标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
Ministry of Health of People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB 5749-2006 Standards for drinking water quality[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [16] Knoke W R, Hamon J R. Soluble manganese removal on oxide-coated filter media [J]. Journal American Water Works Association, 1988, 80(12): 65-70.
- [17] 袁德玉, 杨开, 杨小俊, 等. 高锰酸钾去除地表水中锰的生产试验[J]. 工业用水与废水, 2005, 36(3): 13-15.
Yuan Deyu, Yang Kai, Yang Xiaojun, et al. Industrial Water & Wastewater, 2005, 36(3): 13-15.
- [18] Phatai P, Wittayakun J, Grisdanurak N, et al. Removal of manganese ions from synthetic groundwater by oxidation using $KMnO_4$ and the characterization of produced MnO_2 particles [J]. Water Sci Technol, 2010, 62(8): 1719-1726.
- [19] 张杰, 戴镇生. 强氧化剂除锰原理与应用[J]. 给水排水, 1997, 22(3): 16-18.
Zhang Jie, Dai Zhensheng. Water & Wastewater Engineering, 1997, 22(3): 16-18.

(责任编辑 张军, 岳臣)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上, 全面、深入、系统地论述该领域的问题, 并对所综述的内容进行归纳、分析、评价, 以反映作者的观点和见解。在线投稿: www.kjdb.org。