

技术总结

针对高浊山溪水的除浊工艺构建与效能研究

张 帅^{1,2}, 赵志伟³, 丁昭霞¹, 刘 杰¹, 周继豪¹, 麦正军¹

(1. 中国人民解放军陆军勤务学院 军事设施系, 重庆 401331; 2. 海军 92267 部队, 山东青岛 266100; 3. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 针对西藏偏远农村地区山溪水雨季高浊问题, 利用微电解自絮凝和直接过滤等方法, 构建了无烟煤预过滤-微电解微絮凝-石英砂接触过滤组合工艺。考察了无烟煤预过滤单元在低滤速下的截污效果、微电解絮凝单元铁碳质量比对接触过滤单元浊度去除效果的影响, 以及滤速对工艺运行效能的影响。结果表明, 无烟煤预过滤单元截留了大部分 $3\ \mu\text{m}$ 以上的杂质颗粒, 预过滤后 96.4% 的杂质颗粒粒径集中在 $2\sim 3\ \mu\text{m}$; 当铁碳质量比为 5:5 和 6:4 时该工艺除浊效果较好, 浊度去除率分别为 95.57% 和 96.75%。在铁碳质量比为 6:4、水力停留时间为 3 min、滤速为 3 m/h 的条件下, 该工艺的有效过滤周期能达到 32 h, 是滤速为 6 和 9 m/h 的 2 倍以上。试验采用单独水洗的反冲方式, 反冲洗强度为 $20\ \text{L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$, 反冲洗时间为 8 min。

关键词: 山溪水; 高浊度; 铁碳微电解; 过滤

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)13-0038-05

Construction and Performance of Turbidity Removal Process for High Turbidity Mountain Streams

ZHANG Shuai^{1,2}, ZHAO Zhi-wei³, DING Zhao-xia¹, LIU Jie¹, ZHOU Ji-hao¹,
MAI Zheng-jun¹

(1. Department of Military Installations, Army Logistics University of PLA, Chongqing 401331, China; 2. Navy Unit 92267 of PLA, Qingdao 266100, China; 3. School of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In the remote rural areas of Tibet, to address the high turbidity in mountain streams during rainy season, an integrated filtration system using anthracite pretreatment - micro-electrolysis and flocculation - quartz sand contact filtration was constructed, based on the concepts of micro-electrolysis self-flocculation and direct filtration. The interception efficiency of the anthracite pre-filtration unit under low filtration rates, the effect of iron-carbon mass ratio of the micro-electrolysis flocculation unit on the turbidity removal in the contact filtration unit, and the influence of the filtration rate on the process efficiency were all investigated. The results showed that the anthracite pre-filtration unit retained most of the particles larger than $3\ \mu\text{m}$, and the particles with a particle size of $2\sim 3\ \mu\text{m}$ accounted for 96.4% of the total residual particles. When the mass ratio of iron to carbon was 5:5 and 6:4, the turbidity removal

efficiencies were as high as 95.57% and 96.75%, respectively. With an iron-carbon mass ratio of 6 : 4, a hydraulic retention time of 3 min, and a filtration rate of 3 m/h, the effective filtration cycle of the process reached 32 h, which was more than twice of that when using filtration rates of 6 or 9 m/h. The system was backwashed with 20 L/(s · m²) of water for 8 min.

Key words: mountain streams; high turbidity; iron-carbon micro-electrolysis; filtration

西藏亚东位于喜马拉雅山脉南侧,降水季节性变化大。旱季时当地村民的水源主要为山泉水、冰雪融水,每年5月—9月为雨季,山溪水水源出现持续性的高浊现象。由于雨季时间长,单一的沉砂工艺在短时间内无法满足出水水质要求。而高浊水容易滋生细菌,甚至导致介水疾病的暴发,同时浑水严重影响村民的生活^[1]。近年来铁碳微电解技术广泛应用于焦化废水、印染废水、电镀废水等工业废水处理领域^[2]。也有科研人员利用铁碳微电解技术处理饮用水,并在去除硝酸盐、Cr(VI)等方面取得了较好的效果^[3,4]。但依据铁碳微电解技术的絮凝机理来构建高浊饮用水处理工艺还鲜有报道。

笔者构建了无烟煤预过滤-微电解微絮凝-石英砂接触过滤组合工艺,在不投加混凝剂、靠重力驱动的条件下,将浊度降至《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)限值以下。同时考察了无烟煤预过滤单元的截污效能、微电解单元填料铁碳质量比对除浊效能的影响、滤速对除浊效能的影响,并确定了反冲洗参数,旨在为该组合过滤工艺的实际运用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 目标原水水质

目标原水为西藏亚东地区偏远农村雨季沉砂池出水,具体水质如下:温度为21~24℃,pH值为7.2~8.2,浊度为50~70 NTU, COD_{Mn}为2.30~3.01 mg/L, UV₂₅₄为0.031~0.035 cm⁻¹。取样时间为2016年6月27日—30日(该时间段当地降雨量较大)。

1.2 原水模拟

引起浊度升高的颗粒中有90%的粒径主要集中在2~40 μm^[5]。为了使模拟水样更具有代表性,本试验将沉砂池旁底泥与自来水进行混合后,采用75 μm的滤布进行湿法筛分^[5],再将混合后的水样浊度调整至50~70 NTU。采用该方法模拟的原水与目标原水颗粒粒径拟合曲线更相近,并且其COD_{Mn}指标稳定在2~3 mg/L。

1.3 新型铁碳微电解材料

新型铁碳微电解材料采用粘土、活性炭和单质铁烧制而成,以铁碳质量比为5:5的颗粒为例,其表面形貌和主要元素组成见图1。可以看出,新型铁碳材料为球状,元素组成主要有C、O、Fe、Si等。

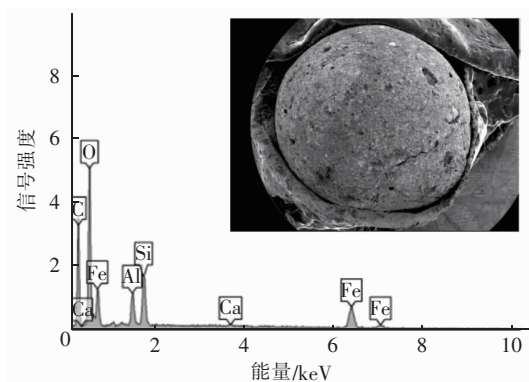


图1 铁碳颗粒表面形貌与元素组成

Fig.1 Surface morphology and element composition of iron-carbon particles

1.4 试验装置

试验流程如图2所示。

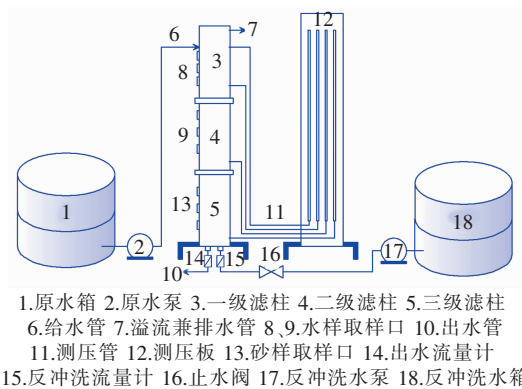


图2 试验流程

Fig.2 Flow chart of experiment process

原水经水泵进入滤柱,滤柱直径为100 mm,从上至下依次通过一、二、三级滤柱,各级滤柱之间设置有机玻璃格网。其中一级滤柱高为600 mm,滤料采用有效粒径为1 mm的无烟煤;二级滤柱填充粒径为3~5 mm的新型铁碳混合微电解材料,其高度

由水力停留时间与滤速共同决定;三级滤柱填充300 mm厚的石英砂滤料,有效粒径为0.4~0.5 mm。滤柱上端设置溢流管,侧面连接测压管,试验滤速通过出水流量计控制。

1.5 分析项目及方法

浊度:取样后,将样品暴露在空气中一定时间后用浊度仪检测,以保证检测过程中无过量铁离子氧化而引起浊度升高;水头损失:测压管;含泥量:水洗前后滤料干质量的差所占滤料质量的百分数;截留量:运行前后含泥量的差值;颗粒粒径分布:激光粒度仪;颗粒Zeta电位:电位分析仪。

2 结果与讨论

2.1 无烟煤预过滤单元的截污效能

原水通过无烟煤滤层后大颗粒的固体悬浮物在预过滤单元被截留,减缓了二、三级过滤单元的处理压力。图3为试验原水在3 m/h滤速下,运行18 h后无烟煤滤层的截留量。可以看出,表层截留量为4.57%,滤层深度为200 mm处的截留量仅为0.5%,在深度为400~600 mm范围内截留量降至0.2%以下。

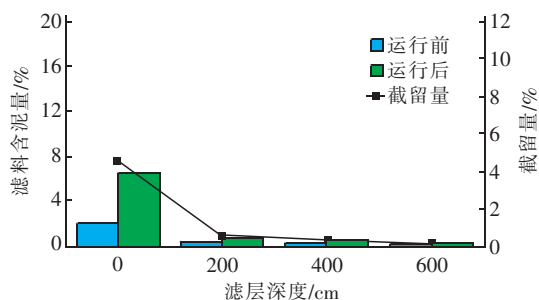


图3 滤料截留量随滤层深度的变化

Fig. 3 Change of filter material interception with filter depth

收集3 m/h稳定过滤周期范围内的预处理出水,分析颗粒粒径分布,结果表明预过滤前后绝大多数颗粒集中在2~3 μm ,预过滤前3 μm 以上的颗粒占总数的22.12%,预过滤后仅剩3.6%。可见,无烟煤预过滤截留了大颗粒的杂质,出水中96.4%的颗粒粒径集中在2~3 μm 。

2.2 铁碳质量比对过滤效能的影响

在水力停留时间为3 min、微电解层填料高度为150 mm、滤速为3 m/h条件下,不同铁碳质量比对组合工艺去除浊度的影响见图4。可知,在铁碳质量比为5:5、6:4、7:3、8:2条件下,当平均进水浊度为58.24 NTU时,组合工艺对浊度的平均去除

率分别为95.57%、96.75%、90.08%和58.37%。当铁碳质量比为8:2时,出水浊度稳定在21 NTU左右;当铁碳质量比为7:3时,运行5 h后出水水质稳定,平均出水浊度为5.16 NTU;当铁碳质量比为5:5时,出水浊度在6 h后降至1 NTU以下,但运行18 h后浊度超过1 NTU;当铁碳质量比为6:4时,出水浊度在14 h后降至1 NTU以下,稳定运行至46 h时突破1 NTU。根据GB 5749—2006对浊度的要求,铁碳质量比为5:5和6:4时产水浊度能降至1 NTU以下。但当铁碳质量比为5:5时,出水浊度较早地超过1 NTU。尽管铁碳质量比为6:4时滤层成熟期较长,但稳定运行时间达到32 h。实际工程应用中,可以通过增加第三级滤层高度来缩短出水达标时间。

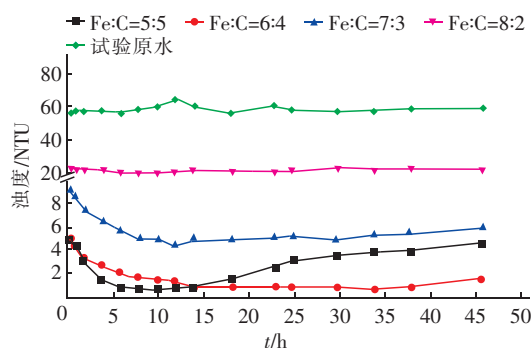


图4 铁碳质量比对出水浊度的影响

Fig. 4 Influence of iron-carbon mass ratio on effluent turbidity

试验还分析了铁碳质量比对总水头损失的影响。结果表明,不同铁碳质量比条件下,组合工艺的总水头损失相差很大。当铁碳质量比分别为5:5、6:4、7:3、8:2时,运行46 h后,组合工艺总水头损失分别为23、18.8、7.5和4.6 cm。

铁碳微电解工艺主要通过氧化还原、絮凝、吸附聚集等作用实现水质净化^[6],该工艺主要运用其中的絮凝功能。在一定pH值条件下,铁碳微电解工艺的反应强度取决于其形成的原电池数量^[7]。从图4可以看出,随着铁碳质量比的升高,除浊效果逐渐降低,这说明铁碳质量比为5:5的体系中所形成的原电池数量最多。同时分析了不同铁碳质量比反应后体系中颗粒物Zeta电位的变化,如图5所示。可知,随着铁碳质量比的升高,其Zeta电位值逐渐降低,其中铁碳质量比为7:3与8:2时,平均Zeta电位分别为-12和-14 mV。通常石英砂表面呈负电性,Zeta电位值越低其静电斥力越大,这从另一角

度解释了铁碳质量比为 7 : 3 与 8 : 2 时工艺除浊效果差的原因。

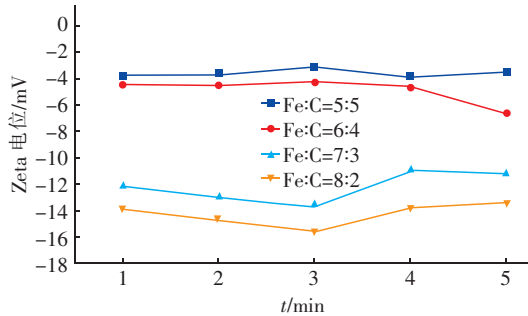


图 5 铁碳质量比对 Zeta 电位的影响

Fig. 5 Influence of iron-carbon mass ratio on Zeta potential

2.3 滤速对组合工艺除浊效能的影响

当铁碳质量比为 6 : 4、水力停留时间为 3 min 时,在组合工艺的滤速分别为 3、6 和 9 m/h,相应的二级微电解层填料高度分别为 150、300、450 mm 条件下,组合工艺对浊度的去除效果如图 6 所示。

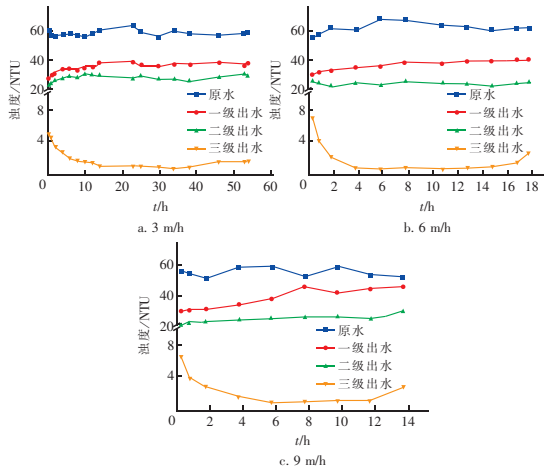


图 6 滤速对出水浊度的影响

Fig. 6 Influence of filtration rate on effluent turbidity

由图 6 可知,当滤速为 3 和 6 m/h 时,一级滤层的浊度去除率分别为 38.1% 和 39.0%。当滤速为 9 m/h 时,对浊度的去除率降低至 30.68%。试验原水中还含有未能沉降的颗粒泥沙,通过无烟煤滤层时,在沉淀与滤料的截阻作用下能够得到部分去除^[8]。随着滤层中截留的颗粒泥沙增多,泥沙之间存在的自然絮凝作用能够进一步强化固体颗粒物的去除^[9]。通过二级微电解单元后,在 3、6 和 9 m/h 的滤速下,其浊度去除率分别为 50.89%、57.99% 和 54.44%。通过三级砂滤单元后,浊度去除率分别为 97.38%、96.60% 和 95.57%。当滤速为 3 m/h 时,三级砂滤出水在 14 h 后降至 1 NTU 以下,并稳

定运行至 46 h 后超过 1 NTU。当滤速为 6 m/h 时,出水浊度在 3.8 h 后达到 1 NTU,并稳定运行至 15 h 左右时超过 1 NTU。当滤速为 9 m/h 时,出水浊度在 5.8 h 时达到 1 NTU,并稳定运行至 12 h 左右超过 1 NTU。

新型铁碳微电解填料的粒径较大,对小颗粒物的截留效果较差,因此二级滤层对浊度的去除效果并不显著。二级微电解单元经过原电池反应后,体系中会出现大量的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} ,在 pH 值为中性条件时,溶液中会生成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$,在溶解氧的作用下, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 会被氧化为 $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 具有很强的絮凝能力。悬浮固体颗粒物在二级微电解层的絮凝作用下集聚成大颗粒,通过三级滤层时被截留在滤层中。

同时在三级滤层中也有接触过滤的作用存在,能够强化浊度的去除。在石英砂滤层成熟期,铁碳微电解材料产生的絮体还未在石英砂表面形成良好的附着,仅仅依靠石英砂过滤,无法进一步降低浊度。随着运行时间的延长,石英砂表面附着的絮体能进一步强化接触过滤效果,微小的无机颗粒难以穿透滤层,强化了对浊度的去除。对于接触过滤而言,过高的滤速不利于接触絮凝,一般常规接触过滤的滤速宜控制在 5 m/h 以下。

2.4 反冲洗条件分析

由于西藏偏远地区的条件限制,本试验仅采用单独水冲洗,当反冲洗出水浊度为 20 ~ 30 NTU 时停止反冲洗。图 7 为不同反冲洗条件下的反冲效果。

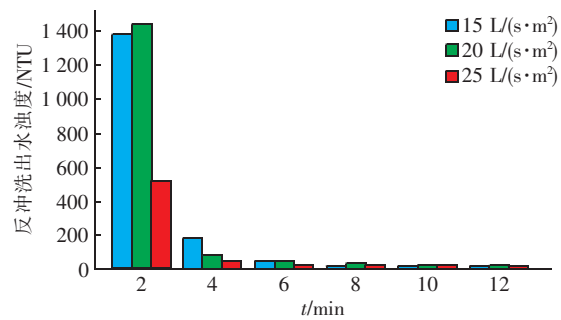


图 7 不同反冲洗条件下的反冲效果

Fig. 7 Backwashing effect under different conditions

由图 7 可知,不同反冲洗条件下,其反冲洗出水浊度均呈现下降趋势,且初期浊度较高。冲洗时间为 2 min 时,15 和 20 $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 反冲洗强度下,反冲洗出水浊度均在 1 400 NTU 左右;而在反冲洗强

度为 $25 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 下,反冲洗出水浊度为 500 NTU 左右。当反冲洗时间为 6~8 min 时,3 种反冲洗强度下的反冲洗出水浊度均为 20~30 NTU,因此将反冲洗时间确定为 8 min。当反冲洗强度为 $15 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 时,其反冲洗出水浊度与其他两种强度相比更低,这可能是由于复合过滤是三级串联工艺,此强度未能将铁碳层冲洗干净。综合比较 3 种反冲洗强度,确定 $20 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 较为合适。

3 结论

① 无烟煤预过滤单元截留了大部分 $3 \mu\text{m}$ 以上的杂质颗粒,预过滤后 96.4% 的杂质颗粒粒径集中在 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 。

② 该组合过滤工艺在铁碳质量比为 6:4 时能够稳定运行 32 h 并保持出水浊度在 1 NTU 以下,其清洁滤层成熟期时间略长,可以通过增加第三级石英砂滤料厚度来缩短滤层成熟期。

③ 在铁碳质量比为 6:4、铁碳层水力停留时间为 3 min 条件下,滤速为 3 m/h 的过滤周期是 6 和 9 m/h 过滤周期的 2 倍以上。且在该组合过滤工艺中,一级无烟煤滤料与铁碳微电解填料对浊度的去除率较低,浊度的去除主要取决于微电解层的絮凝脱稳与石英砂滤层的接触絮凝作用。

④ 最佳反冲洗强度为 $20 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 、反冲洗时间为 8 min。

参考文献:

- [1] Hasnain G, Khan Z. Treatment of high turbidity water through plain and coagulated up-flow roughing filter[J]. Desalination and Water Treatment, 2014, 52(4/6): 1035-1043.
- [2] Luo J, Song G, Liu J, et al. Mechanism of enhanced nitrate reduction via micro-electrolysis at the powdered zero-valent iron/activated carbon interface[J]. J Colloid Interface Sci, 2014, 435: 21-25.
- [3] 张懿文, 罗建中, 张喻翔, 等. 精确 pH 条件下微电解法去除饮用水中硝酸盐的研究[J]. 环境工程, 2015, 33(12): 35-38.
Zhang Yiwen, Luo Jianzhong, Zhang Yuxiang, et al. Study on removal of nitrate in drinking water by the micro-electrolysis under accurate pH conditions[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(12): 35-38 (in Chinese).
- [4] 李春霞, 罗建中, 邓俊强, 等. 铁碳微电解处理饮用水源中 Cr(VI) 污染[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5): 2471-2477.
- Li Chunxia, Luo Jianzhong, Deng Junqiang, et al. Iron-carbon micro-electrolysis method for removing Cr(VI) pollution in drinking water sources[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(5): 2471-2477 (in Chinese).
- [5] Rajapakse J, Millar G, Gunawardana C, et al. Applicability of pebble matrix filtration for the pre-treatment of surface waters containing high turbidity and NOM[J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(52): 24820-24832.
- [6] Zhang X B, Dong W Y, Sun F Y, et al. Degradation efficiency and mechanism of azo dye RR2 by a novel ozone aerated internal micro-electrolysis filter[J]. J Hazard Mater, 2014, 276(9): 77-87.
- [7] Zhang Q. Treatment of oilfield produced water using Fe/C micro-electrolysis assisted by zero-valent copper and zero-valent aluminium[J]. Environ Technol, 2015, 36(1/4): 515-520.
- [8] Dunnett S J, Clement C F. Numerical investigation into the loading behavior of filters operating in the diffusional and interception deposition regimes[J]. J Aerosol Sci, 2012, 53(17): 85-99.
- [9] 郭长城, 王国祥, 喻国华. 天然泥沙对富营养化水体中磷的吸附特性研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(9): 10-13.
Guo Changcheng, Wang Guoxiang, Yu Guohua. Study on adsorption of phosphorus in eutrophied water body by natural sediment[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(9): 10-13 (in Chinese).



作者简介: 张帅(1991-), 男, 湖南浏阳人, 硕士, 助理工程师, 主要从事军事给排水技术与装备研究。

E-mail: zhangshuai4182@163.com

收稿日期: 2017-12-27