

微污染期沉淀/气浮串联工艺的生产性试验研究

时玉龙¹, 马军¹, 杨家轩¹, 翟学东¹, 曹平², 李爽³, 韩伟³,
王凤梅², 潘芹²

(1. 哈尔滨工业大学 城市水资源开发利用 <北方> 国家工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150090;
2. 淮南首创水务有限责任公司, 安徽 淮南 232001; 3. 北京首创水务集团公司, 北京 100028)

摘要: 将沉淀/气浮串联工艺应用到给水厂的升级改造中,并在淮河流域某水厂建成了处理能力为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的示范工程。对微污染期的处理效果进行了测定,除常规指标外,还分析了原水以及沉淀、气浮出水中颗粒物粒径分布及对不同粒径范围内颗粒物的去除特性。研究表明,当水厂原水处于微污染期时,沉淀/气浮强化常规处理工艺能有效削减污染物,并表现出较强的抗冲击负荷能力,对保障后续臭氧高级氧化工艺和生物活性炭滤池的正常运行发挥了重要作用。

关键词: 水厂升级改造; 斜管沉淀; 平流气浮; 微污染期; 粒径分布

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2014)01-0034-05

Demonstration Project for Upgrading Water Treatment Plant by Combined Process of Sedimentation and Dissolved Air Flotation: Removal of Pollutants during Low Pollution Period

SHI Yu-long¹, MA Jun¹, YANG Jia-xuan¹, ZHAI Xue-dong¹, CAO Ping²,
LI Shuang³, HAN Wei³, WANG Feng-mei², PAN Qin²

(1. National Engineering Research Center of Urban Water Resources, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Huainan Capital Water Co. Ltd., Huainan 232001, China; 3. Beijing Capital Co. Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: The combined process of sedimentation and flotation was developed to upgrade a conventional water treatment plant with a capacity of $20\,000 \text{ m}^3/\text{d}$. The operation results during the low pollution period were determined. The common water quality indexes, the particle size distribution in the raw water, settled water and flotation-treated water as well as the particles removal characteristics were analyzed. The combined process could effectively reduce pollutants during the low pollution period, show high resistance to impact loading, and play an important role to ensure normal operation of the subsequent O_3/BAC processes.

Key words: upgrading of water treatment plant; inclined tube settler; horizontal flotation; low pollution period; particle size distribution

本课题组长期以来一直致力于气浮分离技术在 水处理领域的应用研究,并取得了一些成果^[1,2],其

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07424-006)

中沉淀与气浮耦合技术已经在供水厂中得到了应用^[3]。

在淮河流域某自来水管厂的升级改造中, 将沉淀/气浮串联工艺作为后续“臭氧高级氧化/生物处理”的前处理工艺, 并建成了处理能力为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的示范工程。水厂改造前采用“混凝/沉淀/过滤/消毒”的传统工艺, 升级改造之后, 形成以“沉淀/气浮串联强化常规处理 + 高级氧化/复合滤料生物处理”为主体的新工艺。示范工程的工艺流程及运行参数见文献^[4]。笔者考察了沉淀/气浮工艺在微污染期的处理效果。

1 原水水质

淮河原水的水质存在明显的季节性和阶段性波动, 依据 COD_{Mn} 和氨氮含量的高低将其划分为重污染期与微污染期, 其中微污染期的典型月份为 2013 年 5 月—6 月, 相应的水质见表 1。

表 1 微污染期的原水水质

Tab. 1 Raw water quality during low pollution period

项目	$\text{COD}_{\text{Mn}} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{NH}_3 - \text{N} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	浊度 / NTU	色度 / 倍	pH 值	$\text{UV}_{254} / \text{cm}^{-1}$	水温 / $^{\circ}\text{C}$
数值	2~4	0.5~1.5	3~10	9~20	7.4~7.6	0.05~0.07	19~21

2 对常规指标的去除

COD_{Mn} 反映了水中有机物浓度的水平。图 1 为微污染期原水及沉淀、气浮出水 COD_{Mn} 的变化情况。

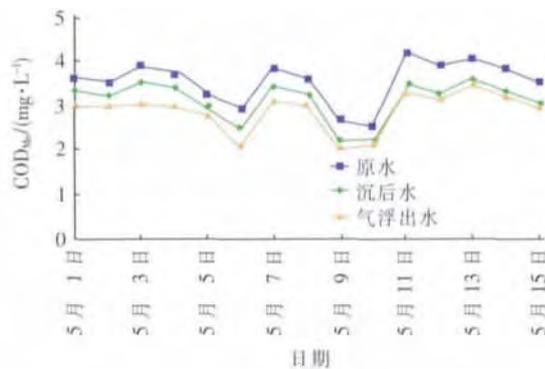


图 1 微污染期原水及沉淀、气浮出水的 COD_{Mn}

Fig. 1 COD_{Mn} of raw water and effluent of sedimentation and flotation during low pollution period

与重污染期相比, 微污染期的原水 COD_{Mn} 下降了 2~4 mg/L, 气浮出水 COD_{Mn} 大多维持在 3 mg/L 左右, 沉淀/气浮工艺对 COD_{Mn} 的去除率主要集中在 15%~20%, 少数天数能达到 27%。其中, 沉淀过

程对 COD_{Mn} 的去除率约为 12%, 气浮工艺对 COD_{Mn} 的去除率为 7% 左右。相比重污染期, 沉淀及气浮工艺对 COD_{Mn} 的去除率均有所下降, 但仍能够满足后续臭氧高级氧化体系对进水 COD_{Mn} 浓度的要求。

试验期间原水氨氮回落到 1.5 mg/L 以下, 接近于地表水 III 类水体标准。沉淀/气浮串联工艺对氨氮的去除率约为 15%, 其中沉淀过程对氨氮的去除率为 7% 左右, 与气浮工艺的相当。与重污染期相比, 虽然沉淀、气浮强化常规处理工艺对氨氮的去除率降低了, 但是出水氨氮只有 0.9 mg/L (见图 2), 明显低于重污染期气浮出水的 (1.5 mg/L), 因而还是在很大程度上缓解了后续臭氧高级氧化单元和生物活性炭滤池的运行压力。

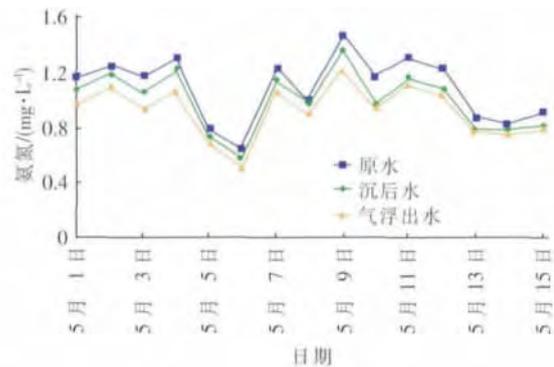


图 2 微污染期原水及沉淀、气浮出水氨氮浓度

Fig. 2 $\text{NH}_3 - \text{N}$ of raw water and effluent of sedimentation and flotation during low pollution period

UV_{254} 是衡量水中有机物指标的一项重要参数。试验期间, 原水的 UV_{254} 为 0.05~0.07 cm^{-1} , 沉淀/气浮强化常规处理工艺对其去除率为 15%~25%, 较重污染期明显下降, 但是微污染期的气浮出水 UV_{254} 为 0.05 cm^{-1} , 还是要优于重污染期气浮出水的 (0.07 cm^{-1})。

色度是饮用水处理过程中优先控制的感官性状指标。试验期间原水色度在 15~20 倍之间, 气浮出水色度约为 8 倍, 明显优于新国标中 15 倍的限值。

浊度是反映水中颗粒物浓度的一个重要指标, 对浊度的去除通常会对水中其他污染指标的削减产生协同促进作用。由于试验期间恰逢春末夏初, 雨季正式到来之前, 原水浊度较低。沉淀/气浮串联强化常规处理工艺对浊度的去除率维持在 80% 左右, 气浮出水浊度接近 1.6 NTU (见图 3)。由此可见, 沉淀/气浮工艺去除了原水中绝大部分的颗粒物, 既

使水质得到净化,又有效地避免了后续臭氧接触氧化反应池中非均相催化剂的堵塞问题。

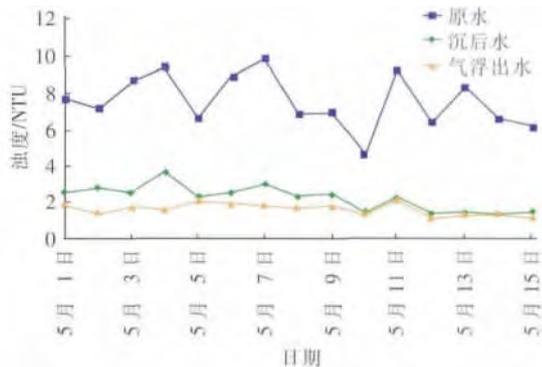


图3 微污染期原水及沉淀、气浮出水浊度

Fig.3 Turbidity of raw water and effluent of sedimentation and flotation during low pollution period

由于微污染期水厂原水浊度较低,使得沉淀出水浊度达到2.24 NTU,明显低于重污染期沉淀出水浊度(4.42 NTU),这直接导致气浮段来水浊度和颗粒物数量的降低,使得气浮对浊度的去除效果下降,这一点在5月10日—15日表现得尤为明显。在前9 d,气浮工艺对浊度的平均去除率为10%左右,而后6 d仅为3%。这一现象也体现在对其他常规指标的去除上,如前9 d气浮工艺对 COD_{Mn} 、氨氮、 UV_{254} 的平均去除率分别为9%、8.8%、9.2%,而后6 d的去除率依次为2.5%、2.8%、2.2%。

3 对颗粒物的去除

3.1 对总颗粒物的去除

图4为原水及沉淀、气浮出水的总颗粒物数。

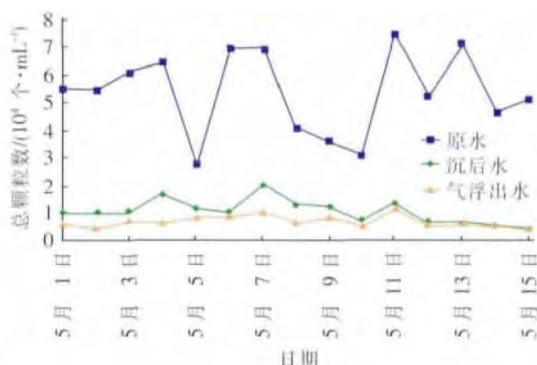


图4 微污染期原水及沉淀、气浮出水总颗粒物数

Fig.4 Total particle number of raw water and effluent of sedimentation and flotation during low pollution period

IBR VersaCount™ 颗粒分析仪可以测量直径在2~400 μm 范围内的颗粒物,并按(2~3)、(3~5)、

(5~7)、(7~10)、(10~15)、(15~20)、(20~25)、(25~400) μm 等8个区间给出分析结果。可以看出,原水中的总颗粒物波动较大,为30 000~75 000个/mL,沉淀工艺对颗粒物的去除效果明显,并且沉淀出水总颗粒物波动较小。气浮能进一步削减总颗粒物,其出水值维持在4 000~8 000个/mL,沉淀/气浮工艺对总颗粒物的去除率维持在90%左右。

3.2 对不同尺寸区间颗粒物的去除

沉淀/气浮工艺对8个区间颗粒物的去除率分别为84.2%、85.5%、88.5%、88.8%、88.7%、88.8%、88.5%、88.3%,且各区间原水及沉淀、气浮出水颗粒数的变化趋势相似。沉淀/气浮工艺出水颗粒数较稳定,说明该工艺具有较强的抗冲击负荷能力。进一步分析发现,该工艺对大尺寸颗粒的去除率要高于小尺寸颗粒,但是小尺寸颗粒的去除数量却远远高于大尺寸颗粒的去除量。并且随着颗粒尺寸的增大,沉后水与气浮出水的颗粒数差距增大,表明气浮对沉淀出水中这部分尺寸范围的颗粒物的去除率在提高,尤其是在颗粒尺寸 $>10 \mu\text{m}$ 的条件下。有研究表明,气浮工艺对与微气泡尺寸接近、尺寸较大的颗粒物有较好的去除效果^[5]。经核算,本研究中气浮泵微气泡发生系统产生的微气泡的平均尺寸集中在10~15 μm ,恰好与去除效果较高的颗粒物尺寸区间相重叠。

3.3 不同尺寸颗粒物所占比例的变化

原水及沉淀、气浮出水中不同尺寸范围颗粒数所占比例见图5。可以看出,无论是在原水还是在沉淀、气浮出水中,小尺寸颗粒物的数量均占有绝对优势,随着颗粒尺寸的增加,其所占比例减小,原水中尺寸为2~5 μm 的颗粒数占了总颗粒数的74.4%,而尺寸在2~10 μm 范围内的颗粒数更是占了总颗粒数的96.2%,尺寸在10~400 μm 范围内的颗粒数却只占总颗粒数的3.8%;沉淀出水中尺寸为2~5 μm 范围内的颗粒数占总颗粒数的75.6%,尺寸在2~10 μm 范围内的颗粒数占总颗粒数的94.6%,比原水中该尺寸范围颗粒数所占比例略有降低,尺寸在10~400 μm 范围内的颗粒数也只占了总颗粒数的5.4%,相对于原水中该尺寸范围颗粒数所占比例略有升高;气浮出水中尺寸为2~5 μm 范围内的颗粒数占了总颗粒数的81.7%,而尺寸在2~10 μm 范围内的颗粒数更是占了总颗粒数的97.6%,比沉后水中该尺寸范围颗粒数所占

比例有所升高, 尺寸在 10 ~ 400 μm 范围内的颗粒数仅占总颗粒数的 2.4%, 相对于沉后水中该尺寸范围颗粒数所占比例明显降低。

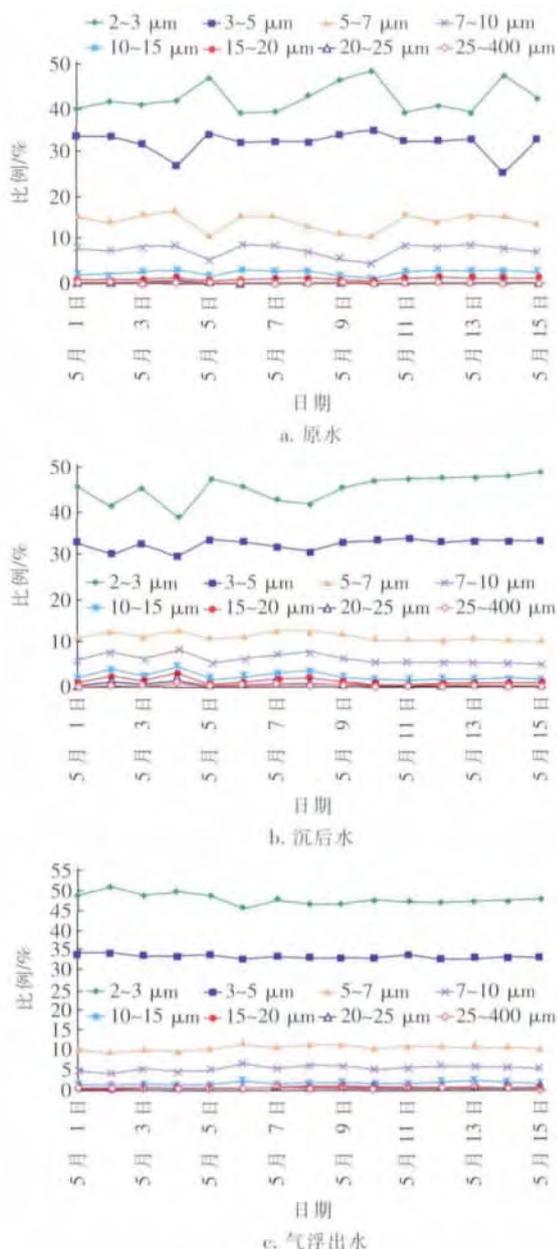


图 5 原水及沉淀、气浮出水中不同尺寸颗粒所占比例

Fig. 5 Proportion of different size range particles in raw water and effluent of sedimentation and flotation

这表明混凝沉淀过程是水中细小颗粒、胶体、溶解态物质在混凝剂作用下尺寸由小增大并下沉的过程, 这就导致小尺寸颗粒所占比例下降, 而大尺寸颗粒所占比例上升。而气浮则是水中存在的已成型颗粒与微气泡发生粘附进而被去除的过程,

与微气泡尺寸接近的较大颗粒物优先被去除, 而比微气泡尺寸小的细小颗粒物则较难被去除, 因此小尺寸颗粒物所占比例有所上升, 而大尺寸颗粒物所占比例明显下降。

4 三维荧光分析

三维荧光扫描结果表明, 原水存在三个荧光峰: 荧光峰 A 为可见光区类富里酸荧光 ($E_x/E_m = 310 \sim 330 \text{ nm}/410 \sim 450 \text{ nm}$), 荧光峰 B 为类蛋白荧光 ($E_x/E_m = 270 \sim 290 \text{ nm}/300 \sim 350 \text{ nm}$)^[6,7], 以及与微生物降解产生的类蛋白质有关的荧光峰 C。与重污染期水厂原水的荧光扫描图谱进行对比后, 发现荧光峰 A 明显变弱, 荧光峰 B 与 C 的峰面积也明显减小, 荧光强度也在很大程度上衰减。原水经过沉淀和气浮处理后, 荧光峰 A 的强度逐渐弱化, 荧光峰 B、C 的峰面积逐渐缩小、荧光强度也明显减弱, 表明沉淀/气浮强化常规处理工艺能够对原水中的有机物进行有效削减。

5 结论

① 在微污染期, 沉淀/气浮强化常规处理工艺能够有效去除 COD_{Mn} 、氨氮、 UV_{254} 、色度, 尽管与重污染期相比, 对各指标的去除率有所下降, 但是气浮工艺出水各项指标还是普遍优于重污染期气浮出水的。其中, 气浮出水 COD_{Mn} 维持在 3 mg/L 左右, 氨氮平均含量为 0.9 mg/L, UV_{254} 约为 0.05 cm^{-1} , 色度降至 8 倍, 浊度保持在 1.6 NTU 左右, 在很大程度上减轻了后续臭氧高级氧化环节的运行压力, 为后续工艺的平稳、高效运行提供了强有力的保障。

② 在水厂原水以及沉淀、气浮出水中 2 ~ 10 μm 的小尺寸颗粒物占总颗粒物的比例均达到了 94% 以上, 占有绝对优势。沉淀/气浮强化常规处理工艺对总颗粒物的去除率可达 90%, 对 8 个不同尺寸区间的颗粒物的去除率相近, 为 84.2% ~ 88.8%, 并且该工艺具有较强的抗冲击负荷能力。

③ 当沉淀出水总固体含量降低时, 伴随着非溶解性固体含量的下降, 会导致气浮工艺对浊度和颗粒物的去除效果变差, 并直接影响到气浮对有机颗粒物以及与颗粒物表面赋存有机物的去除率。建议当原水浊度 < 10 NTU, 且沉淀出水浊度 < 3 NTU 时, 气浮工艺可以暂时停运, 否则就要考虑在气浮前是否需要二次投加混凝剂, 来强化气浮对污染物的去除效果。

(下转第 42 页)

- ral organic matter from selected Turkish source waters using magnetic ion exchange resin (MIEX) [J]. *React Funct Polym* 2007 67(12):1495-1504.
- [3] Bolto B, Dixon D, Eldridge R *et al.* Removal of natural organic matter by ion exchange [J]. *Water Res* 2002 36(20):5057-5065.
- [4] 潘若平, 邓慧萍. 磁性离子交换树脂在饮用水预处理中的应用 [J]. *工业用水和废水* 2009 40(2):63-67.
- [5] Johnson C J, Singer P C. Impact of a magnetic ion exchange resin on ozone demand and bromate formation during drinking water treatment [J]. *Water Res* 2004, 38(17):3738-3750.
- [6] Singer P C, Bilyk K. Enhanced coagulation using a magnetic ion exchange resin [J]. *Water Res* 2002 36(16):4009-4022.
- [7] 魏群山, 王东升, 余剑锋 等. 水体溶解性有机物的化学分级表征原理与方法 [J]. *环境污染治理技术与设备* 2006 7(10):17-21 82.
- [8] Baker A. Fluorescence excitation - emission matrix characterization of some sewage-impacted rivers [J]. *Environ Sci Technol* 2001 35(5):948-953.
- [9] Senesi N, Miano T M, Provenzano M R, *et al.* Fluorescence Spectroscopy as a Means of Distinguishing Fulvic and Humic Acids from Dissolved and Sedimentary Aquatic Sources and Terrestrial Sources [M]. New York: Springer, 1991.
- [10] Boyer T H, Singer P C. A pilot-scale evaluation of magnetic ion exchange treatment for removal of natural organic material and inorganic anions [J]. *Water Res*, 2006 40(15):2865-2876.



作者简介:廖日红(1974-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 教授级高工, 主要研究方向为水污染控制工程。曾参与完成国家级与省部级重大科技项目十余项, 并荣获北京市科技二等奖、北京市工程咨询二等奖等。

E-mail:lrh@bwsti.com

收稿日期:2013-07-23

(上接第37页)

参考文献:

- [1] 马军, 刘芳, 王静超. 沉淀气浮串联组合固液分离装置 [P]. 中国专利:CN 1593710A 2005-03-16.
- [2] 马军, 孙志民, 赵洪宾 等. 气浮与沉淀固液分离装置 [P]. 中国专利:CN 1600695A 2005-03-30.
- [3] 刘芳, 马军, 王静超 等. 沉淀/高速气浮联用技术用于给水厂改造 [J]. *中国给水排水* 2009 25(12):69-71.
- [4] 时玉龙, 马军, 杨家轩 等. 重污染期沉淀/气浮串联工艺的生产性试验研究 [J]. *中国给水排水* 2013 29(23):5-9.
- [5] Edzwald J K. Dissolved air flotation and me [J]. *Water Res* 2010 44(7):2077-2106.
- [6] Leenheer J A, Jean-Philippe C. Characterizing aquatic dissolved organic matter [J]. *Environ Sci Technol* 2003, 37(1):18A-26A.
- [7] Baker A. Fluorescence excitation - emission matrix characterization of some sewage-impacted rivers [J]. *Environ*

Sci Technol 2001 35(5):948-953.



作者简介:时玉龙(1986-), 男, 山东德州人, 博士研究生, 主要从事气浮分离技术在水处理领域的应用研究。

E-mail:yuchengshihit@163.com

通讯作者:马军

收稿日期:2013-08-12