

# 基于酸碱平衡曝气法的除垢设备开发及效果评价

黄传昊<sup>1</sup>, 卢金锁<sup>1</sup>, 王峰慧<sup>2</sup>, 刘昆善<sup>2</sup>, 曾 军<sup>2</sup>, 王贵安<sup>2</sup>, 苏林东<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安自来水有限公司, 陕西 西安 710082; 3. 西安益维普泰环保股份有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘 要:** A、B两个地下水厂的供水水质满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求,但烧开后冷开水浊度高达15.8 NTU。基于酸碱平衡曝气法开发了用于居民小区供水系统的水垢去除设备,在A、B两个地下水厂验证了设备除垢效果的稳定性及水质安全性,并优化了投药量和气水比等关键运行参数。结果表明,以酸碱平衡曝气法为核心的水垢去除设备能有效去除水垢,可将冷开水浊度长期稳定降至1 NTU之下,水质106项全分析报告证明设备出水水质完全满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。工艺原理表明,投药量越高,设备出水碱度、pH值和冷开水浊度越低;气水比越高,设备出水pH值越高。优化结果表明,设备在A、B两水厂投药量分别为0.20%~0.23%和0.14%~0.16%、气水比分别为6:1~7:1和5:1~6:1时,冷开水浊度可稳定保持在1 NTU以下,出水pH值基本与水厂原出水相同。某新建1 000户居民区的地下水独立供水系统,供水水质达标但水垢多,对此提出和设计了水垢去除设备及系统改造方案,估算改造成本为25~30万元,设备运行成本为0.16~0.19元/m<sup>3</sup>。

**关键词:** 水垢; 除垢设备; 酸碱平衡曝气法; pH值; 碱度; 浊度

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)05-0043-05

## Development and Evaluation of Limescale Removal Equipment Based on Acid-base Balance Method

HUANG Chuan-hao<sup>1</sup>, LU Jin-suo<sup>1</sup>, WANG Feng-hui<sup>2</sup>, LIU Kun-shan<sup>2</sup>, ZENG Jun<sup>2</sup>,  
WANG Gui-an<sup>2</sup>, SU Lin-dong<sup>3</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Xi'an Tap Water Co. Ltd., Xi'an 710082, China; 3. Xi'an Putai Environmental Protection Co. Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The quality of finished water from plants A and B met *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2006), but the turbidity of cooled boiled water was 15.8 NTU. A limescale removal equipment based on the acid-base balance method was developed for the water supply systems in residential areas, to treat the water from plants A and B. The treated water was tested, and the key operation parameters (limescale inhibitor dosage and gas-water ratio) were optimized. The results showed that, the limescale removal equipment could effectively remove the limescale, and the cooled boiled water turbidity was decreased to below 1 NTU in long term. All 106 indexes of the treated water met the

基金项目: 陕西省教育厅服务地方专项计划项目(17JF016)

通信作者: 卢金锁 E-mail: lujinsuo@163.com

*Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749 - 2006). The process principle showed that the alkalinity and pH of treated water, the turbidity of cooled boiled water all decreased as the increase of the limescale inhibitor dosage; additionally, the pH of treated water was increased when the gas-water ratio was increased. In the optimization tests, when the dosage was about 0.20% - 0.23% and 0.14% - 0.16% and the gas-water ratio was in the range of 6 : 1 - 7 : 1 and 5 : 1 - 6 : 1 respectively at plants A and B, the turbidity of cooled boiled water was maintained below 1 NTU, the pH of treated water was close to original treated water. In a separated groundwater supply system for 1 000 residents, the turbidity of the cooled boiled water was high although the quality of supplied water met the standards. A limescale removal experiment was proposed and designed, and the optimization scheme for the groundwater supply system was presented. The cost of optimization was about 250 - 300 thousand yuan, and the equipment operation cost was about 0.16 - 0.19 yuan/m<sup>3</sup>.

**Key words:** limescale; limescale removal equipment; acid-base balance method; pH; alkalinity; turbidity

饮用水的水垢多,会使得居民用水感官性差,给居民生活带来诸多不便<sup>[1]</sup>。我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)规定水的总硬度(以 CaCO<sub>3</sub>计,下同)不得超过 450 mg/L<sup>[2]</sup>,多数以地下水为水源的供水系统,其供水总硬度在 300 ~ 450 mg/L 之间,并不需要做进一步处理。为了解决用户用水需求与供水系统供水总硬度达标之间的矛盾,需要在水厂与用户之间的调节构筑物或小区、公共建筑加压泵站的贮水池等供水终端嵌入一种能够去除水垢的设备。

目前去除水垢的方法主要有两种:一种是针对水中钙、镁离子的软化处理,主要有石灰软化、离子交换法、膜法等,这些工艺能够全部或部分去除钙、镁离子,减少钙、镁离子与碳酸根离子形成沉淀,从而降低水垢产生<sup>[3-6]</sup>,但该方法在实际应用中存在运行费用高、系统管理复杂等问题<sup>[7]</sup>;另一种方法是酸碱平衡曝气法,通过向水中投加强酸配比组合的阻垢药剂,控制碳酸氢根离子以改善结垢现象,同时利用曝气技术使出水 pH 值与原水接近<sup>[8]</sup>。显然对于总硬度满足我国《生活饮用水卫生标准》的水源水,后者的处理工艺更为适宜。

笔者以酸碱平衡曝气法为基本原理,将酸碱平衡曝气工艺中的药剂投加单元、水力混合单元、酸碱反应工艺段、鼓风曝气单元进行整合,设计和加工了 1 套一体化的小型水垢去除设备,并在陕西省 A、B 两个水垢多的地下水厂进行了连续运行试验,验证该设备去除水垢的效果以及稳定性,同时进一步分析和优化设备运行关键参数。最后,以陕西省某新

建小区为例,改造了水垢去除设备及供水系统,并估算了运行成本和改造成本。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 地下水水质

试验先后在陕西省 A、B 两个以地下水为水源且结垢较为严重的地下水厂进行,其中 A 水厂出水的总硬度为 380 ~ 420 mg/L、碱度为 230 ~ 260 mg/L、pH 值为 7.54 ~ 7.65、浊度为 0 ~ 0.20 NTU、暂时硬度为 75.28 ~ 82.36 mg/L,其冷开水浊度(烧开水后,停止加热,自然冷却至 40 ~ 45 ℃,在烧杯中取样测定浊度)为 9.6 ~ 15.8 NTU;B 水厂出水的总硬度为 290 ~ 300 mg/L、碱度为 200 ~ 220 mg/L、pH 值为 7.62 ~ 7.78、浊度为 0 ~ 0.37 NTU、暂时硬度为 62.66 ~ 69.80 mg/L,其冷开水浊度为 8.8 ~ 11.2 NTU。可知,两水厂的供水水质均能满足我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中对于总硬度的规定,但仍出现了烧开后水垢较多的现象,表层有明显的漂浮物。

### 1.2 试验设备

酸碱平衡曝气法,是一种通过向水中投加以强酸为主要成分的阻垢酸剂,使碳酸氢根转化为二氧化碳和水,减少碳酸氢根离子与钙、镁离子结合生成碳酸钙的可能,以此改善结垢现象,同时利用曝气技术使出水 pH 值与原水接近<sup>[8]</sup>的工艺技术。

设计制作的水垢去除设备见图 1。设备整体高为 0.9 m,宽为 0.66 m,长为 1 m;加药箱体积为 25 L;设备吹脱曝气单元直筒结构的内径为 0.6 m、高为 0.74 m。设备外接原水(水厂出水),原水由进水

管流入,随后蠕动泵将阻垢剂加入进水管内,原水与阻垢剂在静态混合器中充分混合,然后进入直筒体结构即鼓风曝气单元,经曝气处理后的水由出水管排出,曝气产生的含有高浓度二氧化碳的气体通过排风扇排出。加药量和曝气量由具体试验确定。

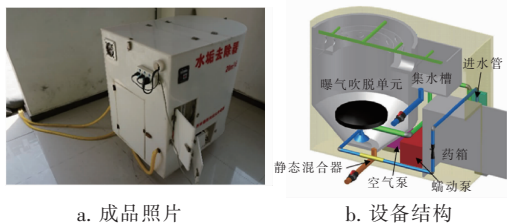


图1 水垢去除设备

Fig.1 Limescale removal equipment

加药泵为 BT100-02/YZ1515 型蠕动泵,鼓风机为 ACO-009 电磁式空气泵,设备设计处理水量为  $10 \sim 20 \text{ m}^3/\text{d}$ ,空气泵的调节范围为  $0 \sim 8 \text{ m}^3/\text{h}$ ,蠕动泵的调节范围为  $0 \sim 25 \text{ mL}/\text{min}$ 。

### 1.3 分析项目及方法

pH 值: PHS-3c 型 pH 计;浊度: WZS-180A 浊度计;碱度: 酸碱滴定法;硬度: EDTA 滴定法。暂时硬度的测定方法主要有煮沸法和碱度法,本试验采用碱度法。因为试验过程中 pH 值一般低于 8.4,检测水中的碱度时,确定水中的碳酸盐碱度基本为零,所以只对重碳酸盐碱度进行分析<sup>[2]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 投药量对设备出水碱度及冷开水浊度的影响

以 A 水厂出水为例,研究投药量为 0.18% ~ 0.24% 时设备出水碱度以及冷开水浊度的变化情况,结果见图 2。

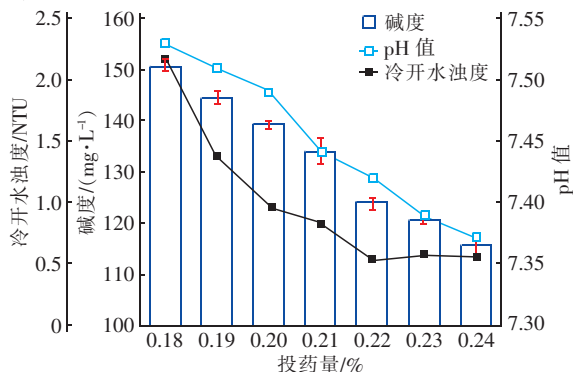


图2 投药量对设备出水水质的影响

Fig.2 Influence of limescale inhibitor dosage on effluent quality of limescale removal equipment

由图 2 可知,投药量对出水碱度及冷开水浊度有显著影响,二者均随投药量的增加而减少,设备在 B 水厂运行时亦得到此结论。煮沸后发现,当投药量大于 0.20% 时,可见物较少且冷开水浊度小于 1 NTU;当投药量为 0.23% 时,几乎没有肉眼可见的漂浮物。相同的停留时间和气水比条件下,对开水的感官性状要求越高则加药量越大,设备运行成本越高,出水 pH 值越低,对管道的腐蚀越严重。因此,在可以接受的感官条件下,投药量选取 0.20% ~ 0.23% 较为适宜。同样在 B 水厂,当投药量大于 0.14% 时,冷开水浊度基本小于 1 NTU,其经济投药量为 0.14% ~ 0.16%。

### 2.2 气水比对设备出水 pH 值的影响

曝气吹脱单元的作用是脱出碳酸氢根与酸阻垢剂混合产生的游离二氧化碳,从而提高设备出水 pH 值。以 B 水厂为例,在相同的投药量下讨论气水比为 4:1、5:1、6:1、7:1 时设备出水 pH 值的变化,并以不同的投药量作为对比,结果见图 3。

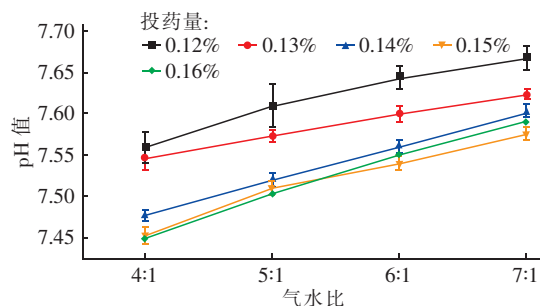


图3 气水比对设备出水 pH 值的影响

Fig.3 Influence of gas-water ratio on effluent pH of limescale removal equipment

从图 3 可以看出,设备曝气量越大则出水 pH 值越高,这与设备在 A 水厂的运行结果相同。但投药量为 0.12%、0.13% 和 0.15% 时,在气水比逐渐增加的过程中曲线趋于缓和,这说明增加曝气量对提高出水 pH 值的作用是有限的。要求的出水 pH 值越大,所需的气水比越大,成本也随之增高。随着投药量的逐渐增大,气水比在 5:1 ~ 6:1 时,出水 pH 值较接近原水 pH 值。对于 A 水厂,当气水比为 6:1 ~ 7:1 时,设备出水 pH 值较接近原水 pH 值。

### 2.3 设备运行稳定性及效果评价

为了验证设备长时间运行效果及出水稳定性,需要选取合适的运行参数分别在 A、B 水厂进行长时间连续运行,每小时对设备出水碱度、pH 值以及

冷开水浊度进行检测。根据上述运行参数,A水厂投药量为0.22%、气水比为7:1,B水厂投药量为0.16%、气水比为6:1。经过长期运行,选取其中10 h连续运行数据进行分析,结果如图4所示。可以看出,设备在A水厂连续运行时出水碱度稳定在120~125 mg/L之间,pH值稳定在7.47~7.53之间;煮沸后水样比较清澈,无沉淀和漂浮物,冷开水浊度基本小于1 NTU。设备在B水厂连续运行时出水碱度稳定在145~148 mg/L,出水pH值稳定在7.55左右;煮沸后水样比较清澈,无沉淀和漂浮物,冷开水浊度基本小于1 NTU。对设备出水进行水质全检测分析,结果表明106项水质指标全部满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。

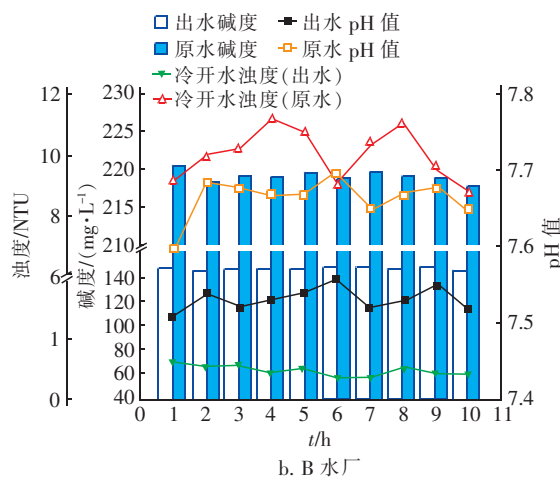
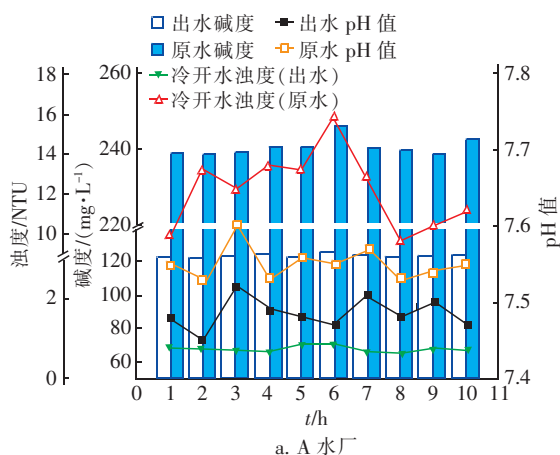


图4 除垢设备连续运行效果

Fig. 4 Continuous operation effect of limescale removal equipment

## 2.4 案例分析

某地区一个约1 000户规模的居民区远离市

区,市政供水范围难以覆盖,用户普遍采用自打井的方式建立一个独立的供水系统来解决生活饮用水的供应问题,长期以来,居民普遍反映水壶煮沸水后有大量水垢形成,底部能看见明显沉淀,水面有类似“油状”漂浮物<sup>[9]</sup>。该居民区供水系统的水质检测情况如下:总硬度为312~324 mg/L、碱度为222~240 mg/L、pH值为7.64~7.68、浊度为0~0.47 NTU、暂时硬度为66.7~67.9 mg/L,其冷开水浊度为6.45~12.82 NTU。可以看出,该居民区供水系统水质与A、B两水厂的水质情况相类似,其总硬度虽然满足我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的规定,但暂时硬度和冷开水浊度较高,适合采用以酸碱平衡曝气法为工艺设计制作的除垢设备对该供水系统进行改造。根据设备在A、B两水厂试验结果及该居民区供水系统的水质情况,改造后的运行基本参数应该与A、B两水厂优化参数相似。笔者调查过该居民区的供水系统的详细情况后,提出将水垢去除设备嵌入其供水系统的清水池前,消毒单元出水先经水垢去除设备处理后再进入清水池贮存。

具体改造流程如图5所示。

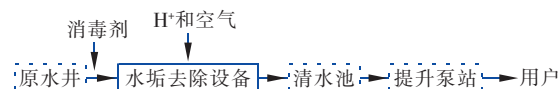


图5 某居民区供水系统改造流程

Fig. 5 Flow chart of water supply system transformation in a residential district

根据分区及城市规模,按每户3人,居民生活用水定额以100 L/(人·d)计,则需2~4台除垢设备。考虑到要对居民区供水系统原有的管线进行改造以及设备的加工成本,估算系统改造成本为25~30万元,设备运行成本为0.16~0.19元/m³。目前常用的软化处理方法中,膜处理的运行成本为1.05~1.68元/m³<sup>[10]</sup>,离子交换法的成本约为1.79元/m³,石灰法的药剂成本约为1.33元/m³<sup>[11]</sup>,可见该除垢设备的运行成本相对较低。

## 3 结论

① 基于酸碱平衡曝气法设计制作的水垢去除设备能较好地改善A、B两水厂冷开水结垢现象。在相同的停留时间和气水比条件下,设备出水碱度和冷开水浊度随投药量的增加而减少,对开水的感



官性状要求越高则投药量越大,出水 pH 值越低;设备出水 pH 值随气水比的增加而增大。优化结果表明,设备在 A 水厂的投药量为 0.20% ~ 0.23%、气水比为 6:1 ~ 7:1,在 B 水厂的投药量为 0.14% ~ 0.16%、气水比为 5:1 ~ 6:1 时,冷开水浊度可稳定保持在 1 NTU 以下,出水 pH 值基本与水厂原出水相同。

② 在优化工况下,设备在 A、B 两水厂连续运行时出水 pH 值及其碱度波动较小,沸后水比较清澈,没有明显的沉淀和漂浮物,冷开水浊度小于 1 NTU,运行效果比较稳定、可靠,设备出水的 106 项水质指标全部满足我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。

③ 对某居民区的供水情况进行调查后,提出使用该除垢设备对其供水系统进行改造,并根据 A、B 两水厂试验结果估算出该供水系统的改造费用为 25 ~ 30 万元,运行成本为 0.16 ~ 0.19 元/m<sup>3</sup>,低于离子交换法、膜法和石灰法的运行成本。

#### 参考文献:

- [1] 陈涛. 用石灰软化—絮凝法处理地下水水源硬度试验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.  
Chen Tao. Study on Treatment of Hardness of Underground Water Source Using Lime Softening - Flocculation Process[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012(in Chinese).
- [2] 张程,刘成,胡伟. 复配药剂软化法对地下水中硬度的去除效能研究[J]. 中国给水排水,2014,30(7): 43 - 46.  
Zhang Cheng, Liu Cheng, Hu Wei. Performance of combined chemicals in decreasing hardness of groundwater[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(7): 43 - 46(in Chinese).
- [3] 杨云龙,卢建国,韩瑾. 饮用水硬度去除效果试验研究[J]. 山西建筑,2007,33(36): 11 - 13.  
Yang Yunlong, Lu Jianguo, Han Jin. Experimental investigation of removing hardness from drinking water [J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(36): 11 - 13 (in Chinese).
- [4] Wu D J, Tie Z Y, Wang L, et al. Process design of water treatment plant on groundwater with high hardness in Yucheng[J]. Desalination & Water Treatment, 2013, 51(19/21): 3715 - 3720.
- [5] Turker R. Achieving environmental compliance via ion exchange resin regeneration: ACM technologies turns industrial wastewater into a revenue stream[J]. Metal Finishing, 2008, 106(11): 41 - 45.
- [6] Anim-Mensah A R, Krantz W B, Govind R. Studies on polymeric nanofiltration-based water softening and the effect of anion properties on the softening process[J]. European Polymer Journal, 2008, 44(7): 2244 - 2252.
- [7] Ghizellaoui S, Taha S, Dorange G, et al. Softening of Hamma drinking water by nanofiltration and by lime in the presence of heavy metals[J]. Desalination, 2005, 171(2): 133 - 138.
- [8] 华家,卢金锁,闫涛. 酸碱平衡法对地下水暂时硬度的去除试验研究[J]. 中国给水排水,2016,32(17): 39 - 42.  
Hua Jia, Lu Jinsuo, Yan Tao. Removal of temporary hardness of groundwater using acid-alkali balance method[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(17): 39 - 42(in Chinese).
- [9] 黄明珠,董燕珊,苏锡波,等. 石灰软化法处理地下水水源硬度试验研究[J]. 给水排水,2012,38(3): 26 - 29.  
Huang Mingzhu, Dong Yanshan, Su Xibo, et al. Study on the lime softening process for groundwater hardness treatment[J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(3): 26 - 29(in Chinese).
- [10] 闫光明. 纳滤膜处理中低压锅炉软化水可行性研究[D]. 北京:北京工业大学,2000.  
Yan Guangming. Feasibility Study on Middle & Low Pressure Boiler Feed Water Using Nanofiltration[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2000 (in Chinese).



作者简介:黄传昊(1992 - ),男,山东滕州人,硕士研究生,研究方向为饮用水处理技术。

E-mail: huangleft@163.com

收稿日期:2018 - 07 - 03