

宫思诺, 翟英骁, 刘焕炜, 等. ZQ 开发区一水厂水质软化工程设计及净化效能[J]. 净水技术, 2026, 45(5): 45-53.

Gong S N, Zhai Y X, Liu H W, et al. Engineering design and treatment performance of a water quality softening project of WTP No. 1 at ZQ Development Zone[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(5): 45-53.

ZQ 开发区一水厂水质软化工程设计及净化效能

宫思诺¹, 翟英骁², 刘焕炜², 邴 颜³, 侯 将⁴, 吴顺祺⁴, 宋帅楠⁵, 赵联芳¹, 刘 成^{1,*}

(1. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098; 2. 章丘市市政公用工程安装有限公司, 山东济南 250200; 3. 江苏河清海晏环境有限公司, 江苏宿迁 223800; 4. 济南市章丘区自来水有限公司, 山东济南 250200; 5. 济南市市政工程设计研究院<集团>有限责任公司, 山东济南 250002)

摘要 【目的】 ZQ 开发区一水厂原水硬度超标问题日益突出, 仅靠调整供水井已无法从根本上解决。为此, 本文提出并实施了一套水质软化技改方案, 以期有效降低出水硬度、保障供水水质及管网运行稳定。【方法】 水厂采用以“一体式改良型诱晶软化+投加 CO₂ 回调 pH”为核心的水质软化技改方案。该工艺基于诱导结晶原理, 通过协同优化药剂与水力条件, 使钙离子以碳酸钙形式在晶核表面生长至约 1 mm 后排出, 将结垢过程提前转移至软化单元内完成。软化后投加食品级 CO₂ 调节 pH 至中性, 防止管道腐蚀。同时, 为平衡处理效果与工程投资, 采用处理水与未处理原水按体积比为 1:1 混合的调控运行方式。【结果】 连续运行监测显示, 软化药剂投加量为 60 mg/L 时, 改良型诱晶软化装置出水总硬度(以 CaCO₃ 计)由原水平均总硬度 450 mg/L 降至约 300 mg/L, 出厂水总硬度稳定控制在 390 mg/L 以内, 有效减少了“水垢”的生成。同时, 出水各项指标(pH、浊度等)均符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。工程处理成本约为 0.143 5 元/吨, 在保障高效去除硬度的同时兼具良好的运行经济性。【结论】 综上所述, 该工艺在有效降低水体硬度的同时, 改善了居民用水体验, 实现了出水稳定达标与低成本运行, 可为同类型供水工程的提升改造提供具有实用价值的参考。

关键词 饮用水 总硬度 水质提升 改良型诱晶软化 水垢

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)05-0045-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.05.007

Engineering Design and Treatment Performance of a Water Quality Softening Project of WTP No. 1 at ZQ Development Zone

Gong Sinuo¹, Zhai Yingxiao², Liu Huanwei², Bing Yan³, Hou Jiang⁴, Wu Shunqi⁴, Song Shuainan⁵, Zhao Lianfang¹, Liu Cheng^{1,*}

(1. College of Environmental, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Zhangqiu City Municipal Public Engineering Installation Co., Ltd., Jinan 250200, China;

3. Jiangsu Heqinghaiyan Environment Co., Ltd., Suqian 223800, China;

4. Jinan Zhangqiu District Water Supply Co., Ltd., Jinan 250200, China;

5. Jinan Municipal Engineering Design & Research Institute <Group> Co., Ltd., Jinan 250002, China)

Abstract [Objective] The problem of excessive raw water hardness at the No. 1 water treatment plant(WTP) in ZQ Development Zone is becoming increasingly prominent. Adjustment of water-supply wells alone can no longer fundamentally solve this problem. Therefore, this paper proposes and implements a set of water softening technical reconstruction schemes, aiming to effectively reduce the hardness of the finished water, ensure the water quality of the water supply and the stability of the pipeline operation. [Methods] The WTP adopted a water-quality softening retrofit process with "integrated modified induced crystallization softening and CO₂ dosing for pH readjustment" as the core. Based on the principle of induced crystallization, the process promoted the growth of

[收稿日期] 2025-11-03

[基金项目] 国家重点研发计划(2023YFC3208004)

[作者简介] 宫思诺(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为饮用水处理技术与理论, E-mail: 1598862253@qq.com。

[通信作者] 刘成(1977—), 男, 教授, 研究方向为城市饮用水安全保障等, E-mail: liucheng8971@hhu.edu.cn。

calcium ions as calcium carbonate on crystal nuclei to about 1 mm through coordinated optimization of chemical dosing and hydraulic conditions, and then discharged them, so that the scaling process was shifted in advance to the softening unit. After softening, food-grade CO₂ was dosed to adjust the pH to neutral and prevent pipeline corrosion. To balance treatment performance and engineering investment, treated water and untreated raw water were mixed at a volume ratio of 1 : 1. [Results] Continuous operation monitoring showed that, when the softening agent dosage was 60 mg/L, the total hardness of the finished water from the modified induced crystallization softening unit decreased from an average raw water hardness of 450 mg/L (as CaCO₃) to about 300 mg/L, and the total hardness of the finished water remains stably below 390 mg/L, effectively reducing scale formation. Meanwhile, all finished water quality indices, including pH and turbidity, all met the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749—2022). The treatment cost was about 0.143 5 yuan per ton, showing good operational economy while ensuring efficient hardness removal. [Conclusion] In conclusion, this process effectively reduces water hardness, improves residents' water use experience, and achieves stable compliance of finished water quality and low-cost operation. It can provide a practical reference for the upgrading and reconstruction of similar water supply projects.

Keywords drinking water total hardness water quality improvement modified induced crystallization softening scale

ZQ 开发区一水厂以当地地下水为水源,供水规模为 50 000 m³/d,主要为开发区内居民、企业供水。水源水质整体较好,但存在总硬度较高且日常煮沸过程中会产生“水垢”的问题,这在一定程度上影响了居民的使用,并导致部分居民对水质安全产生质疑。基于此问题,当地自来水公司对一水厂进行了水质提升改造,有效降低了当地饮用水中的总硬度、改善了居民用水体验。

1 总硬度去除方案

1.1 工程背景及概况

1.1.1 水厂现状

ZQ 开发区一水厂位于 S 省,厂区远期规划用地面积约为 600 m²,设计日供水量为 5 万 m³。原水经远距离输送后压力显著衰减,由源头 0.3 MPa 降至进厂时的 0.018 MPa。水源取自 Z 水源地与 D 水源地。该水源系统由 17 口管井构成,单井设计出水量约为 300 m³/h。原水经深井泵泵出,经由 2 根管径为 DN600 的原水管道输送至开发区一水厂。

鉴于水质整体较好,基本可满足现行《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)要求,水厂未设置水质净化设施,仅设置了调蓄供水水量的清水池(容积为 6 000 m³)、维持持续消毒作用的消毒设施以及满足实时供水水量需求的二次供水泵站。

1.1.2 水源水质特征与处理需求

2025 年水厂水源地 17 口水源井典型水质参数的数值范围如表 1 所示,近 6 年内 ZQ 地区一水厂进水总硬度变化如图 1 所示。

由表 1 可知,水源地各管井出水水质整体较好,但典型水质参数存在差异,部分管井出水总硬度超

过现行《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)限值要求(450 mg/L)。实际供水过程中,需要通过调配供水并确保水质满足要求。针对水源水中总硬度组成分析的结果表明,水源的总硬度以碳酸盐钙硬度为主体,占比高于 80%。由图 1 可知,总硬度近年来呈现增加趋势。此外,目前 ZQ 开发区实际供水量已经接近取水量许可限值,且近期远距离调水的难度较大。

由于 ZQ 开发区一水厂出水的总硬度持续上升,仅依靠调整供水井来保障水质达标的难度日益增大。水厂出水硬度偏高,导致居民日常用水时产生明显“水垢”^[1-3],影响居民用水体验,引发用户对水质安全的质疑,并致使相关投诉增多。因此,有必要采取有效措施,降低饮用水总硬度、抑制“水垢”生成,以提升用户满意度与用水信心。

1.2 水质软化技术选择

1.2.1 饮用水除硬度技术对比

目前,针对总硬度的去除与控制技术已得到广泛的研究与应用,实际工程中常见的方法主要有 4 类:药剂软化^[4-5]、阳离子交换^[6-7]、结晶软化^[8-11]、调酸曝气^[12]。其中,结晶软化技术是一类基于诱导结晶原理的重要方法。其基本过程是通过向体系中投加晶核材料并使其流化,促使水中的硬度离子(主要为 Ca²⁺)以 CaCO₃ 等形式在晶核表面定向生长与析出,形成易于沉降分离的颗粒,从而实现硬度的去除。该技术整体具有反应速率快、固液分离效果好、污泥密度高等优势。根据技术路线的不同,可进一步分为传统结晶软化与改良型诱晶软化 2 类。

表 1 17 口水源井水质 (单位:mg/L)

Tab. 1 Water Quality of 17 Water Source Wells (Unit: mg/L)

| 水源井编号 | 总硬度 (≤450) | 钙硬度 | 硫酸盐 (≤250) | 硝酸盐 (≤10) | 溶解性总固体 (≤1 000) |
|-----------|---------------|---------|---------------|--------------|--------------------|
| Z 水源地 1# | 489~550 | 356~402 | 178~191 | 2.7~3.2 | 720~850 |
| Z 水源地 2# | 468~510 | 331~377 | 157~178 | 4.2~5.2 | 670~830 |
| Z 水源地 3# | 456~485 | 319~349 | 145~172 | 4.3~6.1 | 670~760 |
| Z 水源地 4# | 450~478 | 315~341 | 154~172 | 5.3~6.3 | 670~760 |
| Z 水源地 5# | 453~483 | 318~345 | 140~188 | 5.6~6.7 | 690~750 |
| Z 水源地 6# | 446~465 | 314~332 | 132~180 | 2.5~7.4 | 630~750 |
| Z 水源地 8# | 470~525 | 338~386 | 180~197 | 2.2~5.2 | 650~790 |
| D 一水源地 1# | 426~448 | 292~313 | 150~180 | 4.0~5.6 | 580~730 |
| D 一水源地 3# | 453~505 | 319~367 | 152~170 | 5.0~5.8 | 650~820 |
| D 一水源地 4# | 436~472 | 303~339 | 146~168 | 5.1~5.6 | 595~720 |
| D 一水源地 5# | 460~499 | 327~361 | 140~171 | 5.0~5.8 | 650~800 |
| D 一水源地 7# | 458~499 | 324~364 | 156~189 | 5.0~5.6 | 620~830 |
| D 三水源地 1# | 424~458 | 291~322 | 140~149 | 5.2~6.0 | 580~690 |
| D 三水源地 2# | 424~439 | 289~308 | 124~150 | 5.4~6.3 | 620~660 |
| D 三水源地 3# | 421~442 | 287~309 | 129~153 | 5.2~6.2 | 560~650 |
| D 三水源地 5# | 417~436 | 283~305 | 131~151 | 5.2~6.0 | 600~700 |
| D 三水源地 6# | 424~443 | 289~311 | 127~157 | 5.3~6.3 | 620~670 |

注:括号内数值为《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中的限值。

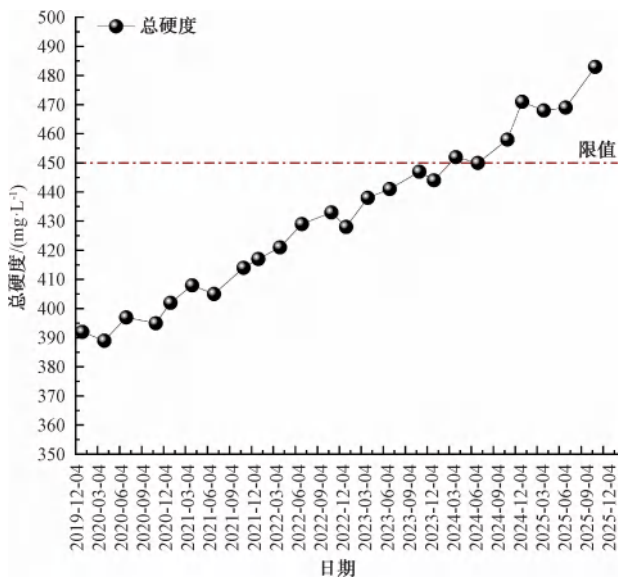
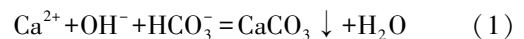


图 1 ZQ 一水厂近 6 年进水总硬度变化趋势

Fig. 1 Change Trend of Total Hardness in Raw Water from ZQ No. 1 WTP over the Past Six Years

传统结晶软化技术虽能有效去除硬度,但在工程实践中仍存在一定局限,例如晶核更换频繁、易板结、净化效果相对单一(以 Ca^{2+} 为主)、颗粒物去除能力较弱等,这在一定程度上限制了其应用。

为克服上述问题,改良型诱晶软化技术^[13-15]得以发展。该技术的创新在于对药剂体系、晶核特性、水力条件、设备结构与系统集成进行了协同优化,在装置内构建了高效的自诱导成核环境,使硬度离子以碳酸钙形式持续结晶生长于诱晶核表面,其具体作用机制为:氢氧化钠与水中碳酸氢根离子反应生成碳酸根离子,继而与 Ca^{2+} 结合形成 CaCO_3 [式(1)]; CaCO_3 晶体持续附着并生长于诱晶核表面,促使诱晶核体积逐步增大,当其整体粒径达到约 1 mm 时,流化性能无法满足系统运行要求,即判定为失效。这一过程本质上是将自然结垢过程中的 CaCO_3 析出现象,提前转移至诱晶软化处理单元内完成,进而实现沉淀物的快速高效分离^[2]。



通过上述机制,改良型诱晶软化技术形成了集结晶、生长与分离功能于一体的装置,显著简化了工艺流程,避免了独立的污泥脱水环节。同时,失效诱晶核经排渣管路完全外排,不进入后续饮用水处理单元,因此对饮用水卫生安全性无不良影响。

基于此,表 2 将上述 2 类结晶工艺与其他方法一并纳入,从经济指标、技术指标、废弃物及污染负

荷、运行维护这几个维度进行综合比较,以期为一水厂一水厂的工艺选择提供依据。

表 2 饮用水典型除硬度工艺对比
Tab. 2 Comparison of Processes for Typical Drinking Water Hardness Removal

| 对比项目 | 药剂软化法 (高密池+过滤) | 离子交换法 | 传统结晶法 | 纳滤 | 改良型结晶软化法 |
|-----------------------------|--|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 建设成本*/元 | 1 000 万~1 200 万 ^a | 1 500 万~1 600 万 ^b | 1 800 万~2 000 万 | 2 000 万~2 500 万 | 1 400 万~1 500 万 |
| 运行成本**/(元·m ⁻³) | 0.25~0.30 | 0.40~0.50 | 0.23~0.25 ^c | 0.40~0.50 ^d | 0.15~0.18 ^e |
| 占地面积*/m ² | 1 000~1 200 | 600~700 | 900~1 000 | 700~1 000 | 400~600 |
| 废水率 | 3.0%~5.0% | 5.0%~10.0% | 1.0%~2.0% | 15.0%~30.0% | ≤0.1% |
| 总用电负荷/kW | 50~80 | 40~50 | 70~80 | 150~200 | 50 |
| 废弃物及污染负荷 | 聚丙烯酰胺(PAM) ^e 污泥含量及药剂废 水率高 | 再生废液难处理、废 树脂需处置 | PAM ^e 污泥含量高需 最终处置 | 浓水需处理、废膜需 处置 | 结晶产物纯度高, 可回收 |
| 运行维护管理 | 需进行污泥处理及 处置 | 监控树脂再生、进水 水质防污染 | 需控制结晶条件(温 度、pH)、固液分离 单元要求高 | 监控膜污染、定期化 学清洗、浓水排放管 控 | 诱晶核需定期排 放、基本可实现自 动化运行 |

注: * 表示按 2.5 万 m³/d 净化规模考虑; ** 表示按 5 万 m³/d 净化规模考虑; ^c 表示含污泥处置设施; ^b 表示不含再生废液处理装置; ^e 表示未计失效诱晶核处置费用; ^d 表示未计浓水处置费用; ^e 表示在实际大规模水厂应用中,通常不投加 PAM,在此仅作理论对比参考。

5 种饮用水软化工艺的技术经济特性存在差异化表现:药剂软化法基于药剂混凝、过滤实现硬度去除,虽建设成本较低,但污泥处置流程复杂且产物无资源回收价值;离子交换法依托离子交换树脂的离子置换作用脱硬,具有占地面积小的优势,然而运行成本偏高,且再生过程易产生难处理的高盐废液;传统结晶法通过投加药剂诱导硬度离子结晶析出,运行成本与废水率均处于较低水平,但结晶条件控制及固液分离单元的运维要求较高;纳滤利用膜的筛分效应截留 Ca²⁺、Mg²⁺ 等硬度离子,出水硬度控制效果优异,不过浓水含盐量高、环境负荷大,且膜组件需定期化学清洗与更换;改良型结晶软化法通过自诱导成核机制实现硬度离子结晶脱除,失效诱晶核可定期排放并回收利用。实际水厂的工艺选型需结合项目现场用地条件、水压特征进行综合研判。

1.2.2 工艺选择

针对 ZQ 一水厂因出水总硬度持续升高引发的居民用水水垢问题,本文在系统检测水源水质的基础上,明确了其总硬度以碳酸盐钙硬度为主(占比>80%)的特征。结合工程可用面积仅约 600 m² 的客观限制,从常见软化技术中筛选出离子交换法与改良型诱晶软化法 2 种占地可行的候选工艺。通过吨水运行成本、废水率及运维复杂度等技术方面的综

合比选,发现改良型诱晶软化法成本更低、废水产生更少、维护更简便。此外,课题组在同类水质区域的中试研究^[16]表明,在软化药剂投加量为 80~110 mg/L 条件下,该工艺对总硬度去除率达 42%~50%,总碱度去除率达 68%~79%,充分验证了其在本地水质条件下的可行性。综上,本文最终选用改良型诱晶软化工艺作为核心软化技术。

2 水厂水质提升工程设计

2.1 工艺流程

基于改良型诱晶软化关键技术装置的性能参数及进、出水水质特征,考虑后续管网输配的基本需求,一水厂的净化工艺采用“一体式改良型诱晶+投加 CO₂ 回调 pH”的核心净化工艺,并配套相应的加压提升、加药装置、CO₂ 投加、专用诱晶核投加、失效结晶体排除及输送、自动控制等设施,基本工艺过程如图 2 所示。

2.2 主体工艺单元设计

2.2.1 改良型诱晶软化工艺单元

根据净化需求及现场调配需要,一水厂净化规模按照 25 000 m³/d 设置,并与其余未处理原水混合,确保最终出水水质满足设定目标要求。基于课题组前期结论^[13,16-17],一水厂共设置 3 组一体式改良型诱晶软化装置并联使用,单组设计初始净水能

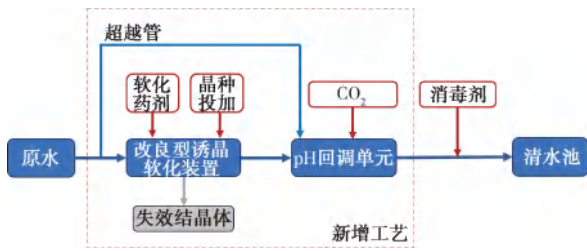


图2 水厂改造后工艺流程

Fig. 2 Process Flow of the WTP after Reconstruction

力为 $8\ 400\ \text{m}^3/\text{d}$, 运行过程中最大可扩容至 $10\ 000\sim 11\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ 。该装置通过内部结构设计优化上升流速为 $26\sim 60\ \text{m}/\text{h}$, 并采用变流速运行模式, 旨在维持诱晶核处于最佳流化状态, 既保证晶体与晶核的充分接触与附着生长, 又为失效诱晶核的沉降分离提供动力学条件。进水压力需维持在约 $0.1\ \text{MPa}$, 原系统压力不足, 故增设扬程 $15\ \text{m}$ 的管道加压泵。装置出水经集水槽收集后, 输送至 pH 回调单元。

2.2.2 pH 回调装置

设置 3 台 pH 回调装置串联运行, 可根据实际需求设置分级 pH 回调。装置内置专用气体扩散与溶解装置, 实现 CO_2 的快速溶解与混合, 从而降低出水 pH。系统前端设 DN500 原水超越管, 用于调节未处理原水掺混比例, 最终经 DN800 钢管输送至清水池。

2.2.3 投加系统

NaOH 投加采用撬装式加药装置, 药储量按 $6\sim 10\ \text{d}$ 设计。 CO_2 投加系统包含储罐、气化与计量调节单元, 满足 $50\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ 的 pH 回调需求。专用诱晶核通过撬装投加装置与软化装置连接, 实现定期补充。

2.2.4 失效晶核排放与系统集成

失效晶核排放及提升系统包括渣水分离器与刮板输送机(倾角约为 70° , 输送能力 $>3\ \text{m}^3/\text{h}$), 实现固渣有效分离与外运。厂区原输水管路增设三通, 设置旁路与新增净化系统连接, 可根据实际运行需要, 通过手动、电动阀门进行切换。自控系统基于可编程逻辑控制器(PLC)与触摸屏集成, 配备浊度、电导率、pH、总硬度在线仪表, 可用于在一定范围内自动调整运行参数, 保障运行稳定。

2.3 布置及配套厂房

基于现场条件及净化装置配置内容, 净化系统

按照图 3 的平面及高程进行布置, 并设置了相应的管沟用于管路的敷设。

鉴于水厂可利用水头较小以及净化出水输送至清水池所需的水头有限, 为节省水量提升所需能耗, 净水车间采用半地下式, 地面高度为 $-3.5\ \text{m}$, 净化工艺出水标高为 $2.0\ \text{m}$, 可满足清水池最高液位条件下水量的输送需求。

净水车间为钢筋混凝土结构、建筑面积约为 $547.4\ \text{m}^2$ 、设计尺寸为 $34.0\ \text{m}$ (长) $\times 16.1\ \text{m}$ (宽) $\times 10.8\ \text{m}$ (高)。车间内配备 $1\ \text{t}$ 电动葫芦、保温系统、药品储存间及配电间。整体布局实现了各处理单元的紧凑合理排布、有效节约了占地面积。

3 水质提升工程净化效果

3.1 处理效果

3.1.1 系统净化效能

项目建成运行过程中, 水中总硬度、钙硬度、浑浊度及 pH 等指标的变化情况如图 4 所示。

由图 4(a)~(b)可知, 本系统对水源水中的总硬度、钙硬度具有良好的控制效果。总硬度的去除主要通过钙硬度的降低实现, 且软化效能与药剂投加量密切相关。当软化药剂投加量分别为 $60\ \text{mg}/\text{L}$ 和 $140\ \text{mg}/\text{L}$ 时, 软化装置出水的总硬度依次降至 $300\ \text{mg}/\text{L}$ 和 $150\ \text{mg}/\text{L}$, 系统总出水总硬度则分别降低至 $390\ \text{mg}/\text{L}$ 、 $320\ \text{mg}/\text{L}$ 、 $290\ \text{mg}/\text{L}$ 左右。

由图 4(c)~(d)可知, 系统对浑浊度和 pH 具有良好的控制作用。尽管过量的 NaOH 会导致出水浑浊度上升和 pH 值超限 (8.5), 但系统通过曝气式投加 CO_2 有效降低了总出水 pH; 该过程还通过溶解部分 CaCO_3 微晶, 进而实现了对浑浊度的调控。

3.1.2 日常煮沸使用过程中的“水垢”控制效能

为评估改造后工艺出水的结垢情况, 我们对一厂的原水与清水池出水进行了煮沸试验, 并对比了水垢生成量, 结果如图 5 所示。

如图 5 所示, 水质提升技改工程实施后, 水垢生成量呈现大幅度降低的趋势。水厂原水在直接煮沸后, 水面上漂浮有较为明显的白色水垢(主要成分为 CaCO_3 、氢氧化镁); 经改良型诱晶软化装置处理后, 不同总硬度条件下的清水池出水中白色悬浮物或小颗粒状的沉淀物均明显减少, 实际结垢现象得

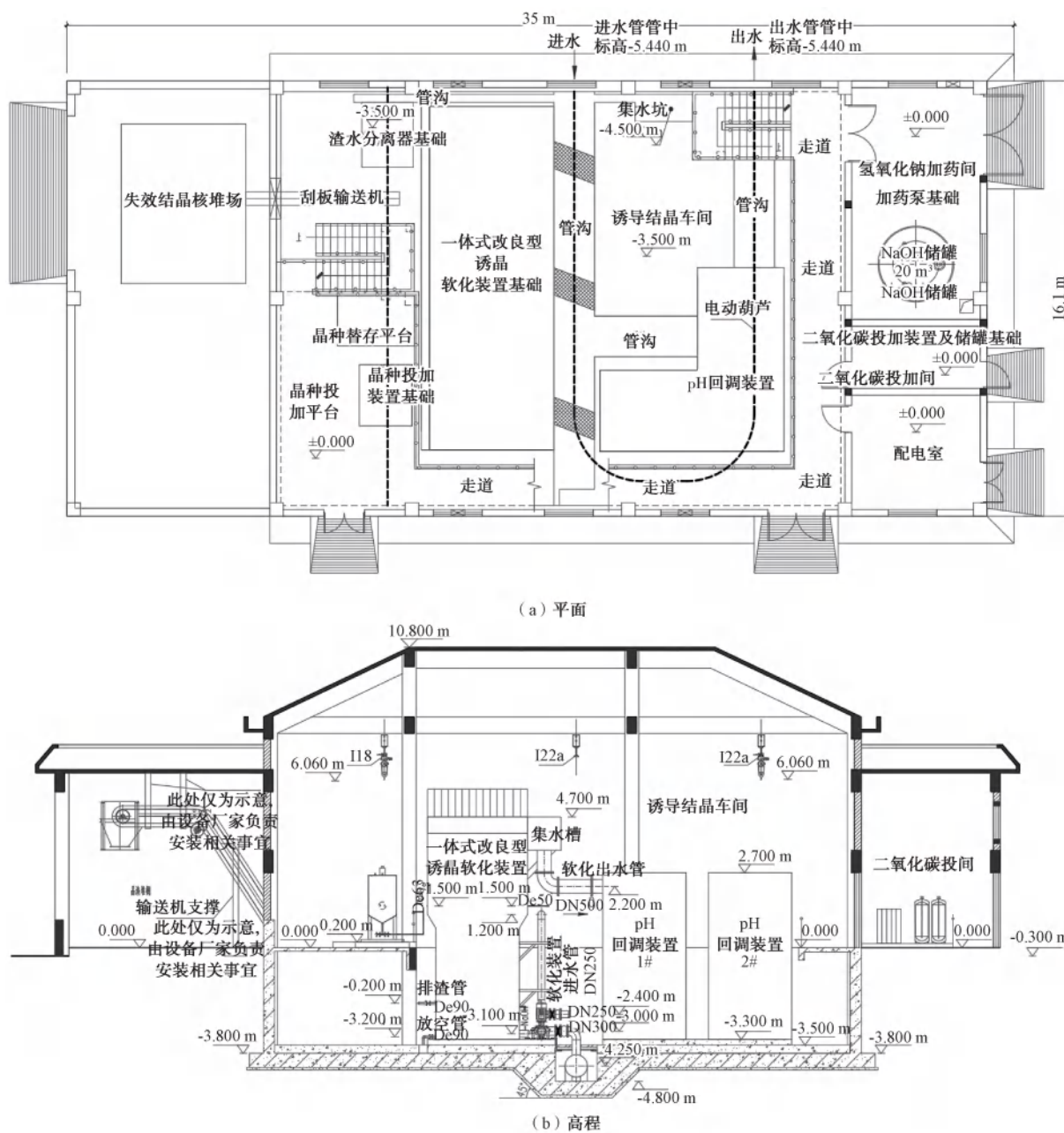


图3 净水车间布置图

Fig. 3 Layout Plan of Water Purification Workshop

到大幅度的缓解。

3.1.3 失效诱晶核的排放及专用诱晶核的补充

结合改良型诱晶软化装置运行过程中进水段压力、出水水质以及视窗中诱晶核颗粒变化情况确定失效诱晶核的排放周期,目前暂按照15~20 d排放一次考虑,单次排出量约为30 t (20 m³)左右。所排放颗粒粒径为1~3 mm(主体为1 mm左右),颜色纯白(图6),经初步成分

检测主体为CaCO₃,纯度均在95%以上,具有一定强度。

在水厂近半年的运行过程中,仅考虑了失效诱晶核的排放,并未进行新诱晶核的补充(除个别分格出现失效诱晶核被过度排除的情况外)。系统净化效果基本稳定,表明在实际运行中,系统可实现诱晶核的自发成核。因此,在正常工况下无需额外补充诱晶核,这不仅简化了操作流程,也降低了运行

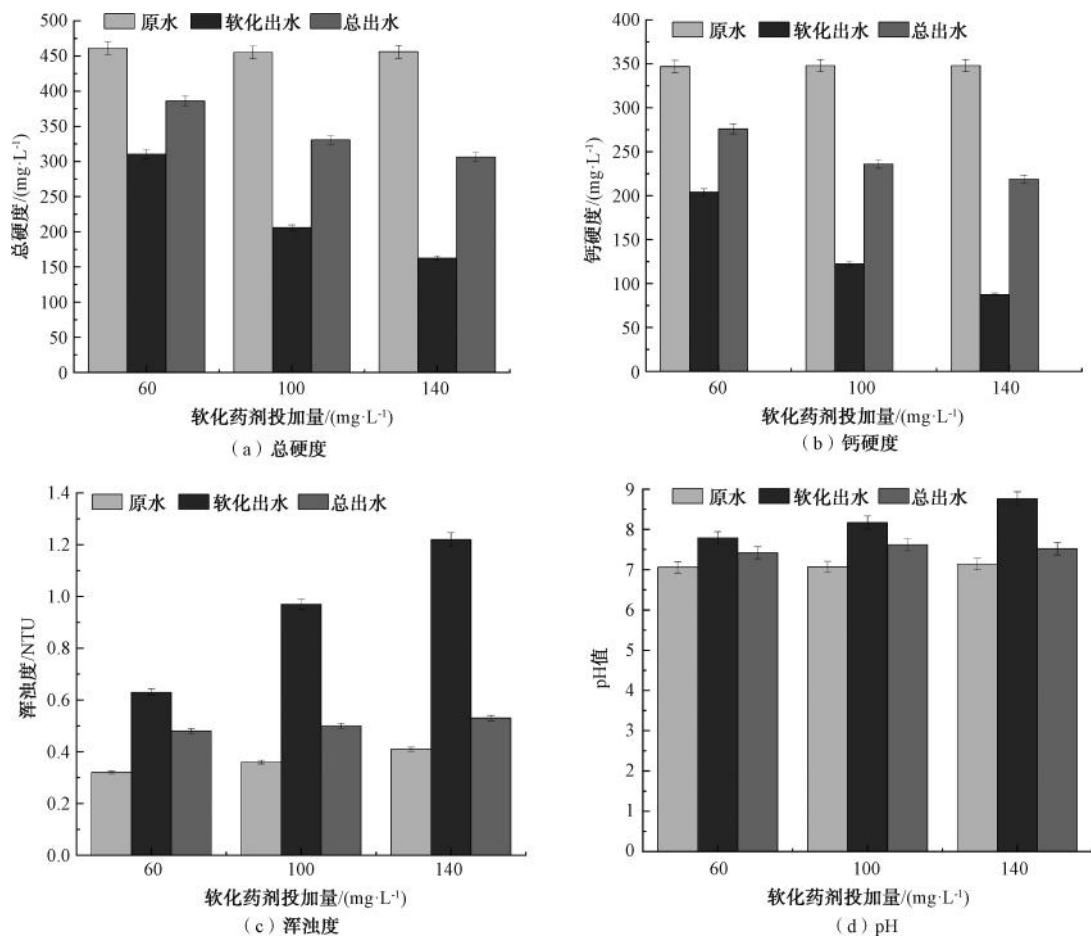


图4 系统净化效能

Fig. 4 Efficiency of System Purification

成本。

目前,课题组已开展多种失效诱晶核资源化途径的探索与应用尝试,涉及水厂、电厂超过30个。例如作为工业辅助原料用于电厂脱硫脱硝、作为工程填料替代部分砂垫层或作为土壤改良材料用于调节酸碱度等,并在部分项目中取得实践经验。然而,其大规模推广仍面临技术匹配性、长期环境影响等共性挑战,在实际应用中需结合具体场景进一步论证与优化。

3.1.4 产水率

在正常运行条件下,水厂本身不产生工艺废水,仅伴随失效诱晶核的排放过程产生少量废水,单次排放量为5~8 m³,可以忽略。即整体净化过程产水率接近100%。

3.2 工程经济性分析

一水厂初期建设投资约为1380万元,运行费用主要为药剂及电费,如下。

(1) 软化药剂费用

投加量平均为60 mg/L,每吨(折算为纯NaOH)为4200元,该部分费用为0.252元/m³;

(2) CO₂ 费用

回调pH宜采用食品级CO₂曝气的方式,投加量平均为0.36 L/min,每罐为500元(每罐约为200 kg),该部分费用约为0.02元/m³。

(3) 失效诱晶核处置费用

鉴于其主体成分为纯度高达95%以上的CaCO₃,可作为工业原料使用,有望实现一定程度成本回收,暂按零成本计算。

(4) 电耗

主体是进水管上管道泵的能耗,整体水损按2 m计,电耗约为0.015元/m³。

直接运行费用约为0.287元/m³,按照水厂整体规模5万m³/d考虑,则直接运行费用约为0.1435元/d(1:1掺混)。

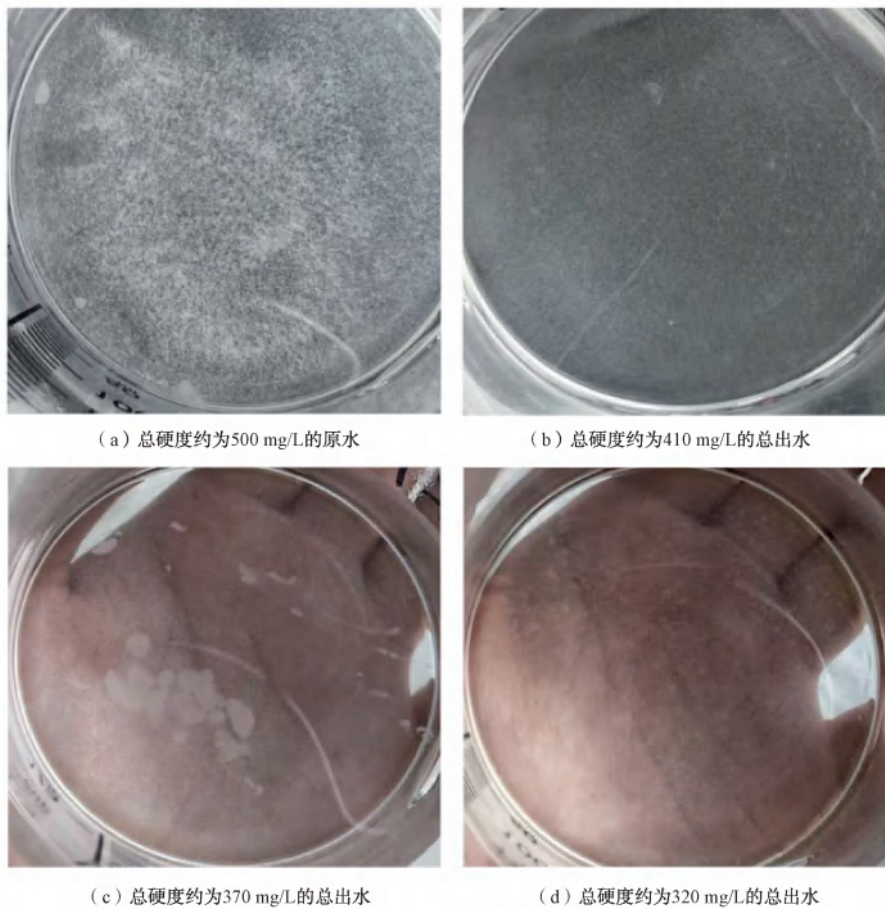


图5 原水处理前后的煮沸水垢变化

Fig. 5 Changes in Boiling Scale of Raw Water before and after Treatment

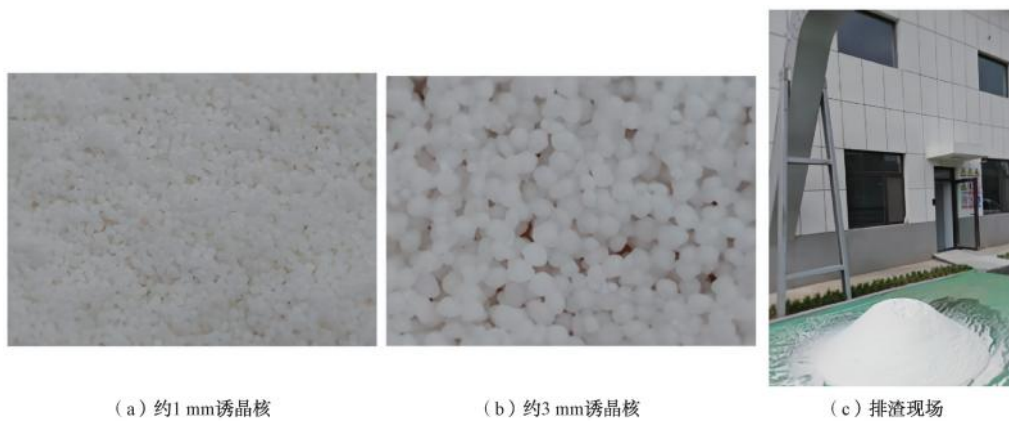


图6 诱晶核及排渣现场

Fig. 6 On-Site of Induced Crystal Nuclei and Slag Discharge

4 结论

ZQ 开发区一水厂的城市自来水水质提升工程实践表明,该工艺能有效去除总硬度,并保障出水 pH、浑浊度等指标满足现行《生活饮用水卫生标准》

(GB 5749—2022)的要求。同时,系统可显著降低“水垢”形成风险。在经济性方面,该工程运行成本优势明显,约为 0.143 5 元/吨。该技术方案兼具实用性与经济性,既适用于现有水厂的改造,也可作为

新建水厂的推荐技术路线。

参考文献

- [1] Li C G, Liu C, Xu W H, et al. Formation mechanisms and supervisory prediction of scaling in water supply pipelines: A review[J]. *Water Research*, 2022, 222: 118922. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118922.
- [2] 李长庚, 刘成, 武海霞, 等. 诱晶软化技术对饮用水结垢倾向的控制效能[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(13): 54-59.
Li C G, Liu C, Wu H X, et al. Control effect of induced crystal softening technology on drinking water scaling tendency [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(13): 54-59.
- [3] 刘成, 徐文蕙, 邴颜, 等. 饮用水总硬度去除需求分析及控制目标探讨[J]. *净水技术*, 2022, 41(2): 1-8, 80.
Liu C, Xu W H, Bing Y, et al. Discussion on the removal demand and control goal of total hardness in drinking water[J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(2): 1-8, 80.
- [4] 刘岩. 基于药剂软化法预处理高矿化度矿井水并研发双层颗粒式药剂[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2024.
Liu Y. Based on the pretreatment of highly mineralized mine water by chemical softening method, the double-layer granule reagent was developed [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2024.
- [5] 黄明珠, 董燕珊, 苏锡波, 等. 石灰软化法处理地下水源水硬度试验研究[J]. *给水排水*, 2012, 38(3): 26-29.
Huang M Z, Dong Y S, Su X B, et al. Study on the lime softening process for groundwater hardness treatment [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 38(3): 26-29.
- [6] Tang C, Rygaard M, Rosshaug P S, et al. Evaluation and comparison of centralized drinking water softening technologies: Effects on water quality indicators[J]. *Water Research*, 2021, 203: 117439. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117439.
- [7] 朱民, 陈百恒, 梁康强, 等. 锅炉补给水处理膜法和离子交换法的技术经济比较[J]. *工业用水与废水*, 2014, 45(5): 42-45.
Zhu M, Chen B H, Liang K Q, et al. Technical and economical comparison between membrane method and ion exchange method treating boiler feedwater [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2014, 45(5): 42-45.
- [8] Nijssen T M J, Kramer O J I, de Moel P J, et al. Experimental and numerical insights into heterogeneous liquid-solid behaviour in drinking water softening reactors [J]. *Chemical Engineering Science: X*, 2021, 11: 100100. DOI: 10.1016/j.cesx.2021.100100.
- [9] Li C G, Liu C, Xu W B, et al. Control approach and evaluation framework of scaling in drinking water distribution systems: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 948: 174836. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174836.
- [10] 胡瑞柱, 黄廷林, 文刚, 等. 造粒流化床反应器去除地下水中硬度试验研究[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(21): 39-44.
Hu R Z, Huang T L, Wen G, et al. Hardness removal of underground water in fluidized pellet bed reactor [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(21): 39-44.
- [11] Yue Y X, Hu R Z, Wang X W, et al. Pilot study on hardness removal from groundwater using a combined crystallization pellet-fluidized bed, ultrafiltration, and reverse osmosis process [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, 13(5): 117511. DOI: 10.1016/j.jece.2025.117511.
- [12] 吴东升, 崔红军, 苏俊峰, 等. 去除地下水暂时硬度方法研究[J]. *供水技术*, 2016, 10(1): 14-18.
Wu D S, Cui H J, Su J F, et al. Method research for the removal of groundwater temporary hardness [J]. *Water Technology*, 2016, 10(1): 14-18.
- [13] 李长庚, 刘成, 曹振桦, 等. 改良型诱晶软化技术对污水厂尾水结垢控制的效果[J]. *净水技术*, 2023, 42(10): 87-94, 104.
Li C G, Liu C, Cao Z H, et al. Effect of modified induced crystallization softening technology on scaling control for WWTP tailwater [J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(10): 87-94, 104.
- [14] Li C G, Liu C, Cao Z H, et al. Effect and mechanism of induced crystallization softening treatment on water quality in drinking water distribution system with high hardness water source [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(5): 110474. DOI: 10.1016/j.jece.2023.110474.
- [15] 李长庚, 刘成, 武海霞, 等. 结晶软化技术对地表水中总硬度的去除效能及应用[J]. *净水技术*, 2021, 40(12): 44-50.
Li C G, Liu C, Wu H X, et al. Efficiency and application of crystal softening technology in total hardness removal in surface water [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(12): 44-50.
- [16] 刘成, 雷声杨, 孙韶华, 等. 我国高硬度地下水源水的处理技术适用性分析[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(9): 38-43.
Liu C, Lei S Y, Sun S H, et al. Applicability analysis of typical technologies for groundwater hardness removal in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(9): 38-43.
- [17] 雷声杨. 基于诱晶原理的除硬度装置的构建及应用效能分析[J]. *地下水*, 2022, 44(6): 130-132.
Lei S Y. Construction and application efficiency analysis of hardness removal device based on crystal induction principle [J]. *Ground Water*, 2022, 44(6): 130-132.