

华海洁, 李建, 吴倩, 等. 西北地区某超大型水厂设计关键问题及工艺设计探讨[J]. 净水技术, 2025, 44(6): 172-181.

HUA H J, LI J, WU Q, et al. Key design issues and technological process design discussions of a large WTP in northwest region [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(6): 172-181.

西北地区某超大型水厂设计关键问题及工艺设计探讨

华海洁^{1,*}, 李 建¹, 吴 倩¹, 杨 杰², 伍志刚¹, 古建国¹

(1. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃兰州 730000; 2. 中铁一局集团市政环保工程有限公司, 甘肃兰州 730030)

摘 要 【目的】针对兰州市单一水源污染隐患及突发性水污染风险,通过水源地建设工程保障城区供水安全。新建水厂设计重点解决原水冬季低温低浊、夏季短时高浑浊度难题,协调新老水厂运行,特殊地质场地处理,优化管网匹配及突发事件应对能力。【方法】新建的彭家坪特大型水厂近期规模为 75 万 m³/d,远期规模为 100 万 m³/d,采用强化混凝+复合沉淀池+V 型滤池+紫外与次氯酸钠联合消毒工艺;水处理间为集混合、絮凝、沉淀、过滤、反冲洗等多功能一体的集成水处理构筑物,污泥处理间为上下叠合的废水、污泥处理构筑物;基于水力模拟优化混合池速度梯度与搅拌机功率,合理选取反冲洗鼓风机参数,改进折板安装方式与复合沉淀池排泥廊道设计,及智慧水务系统应用等。【结果】工程建设及运行结果证明,选用的工艺对冬季低温低浊和夏季短时高浑浊度具有较好的处理效果,出水浑浊度常年稳定为 0.3 NTU 以下,水厂实现了高效集约布局,能耗较低且运行管理方便;通过管网匹配与应急措施提升供水系统韧性。【结论】强化混凝+复合沉淀池+V 型滤池工艺能有效应对低温低浊水处理难题,其中复合沉淀池在占地面积、初期投资成本、运营成本以及抗冲击负荷能力等方面表现出显著优势,通过工艺参数优化和构筑物集成化设计等,可以节省电耗和占地,给类似工程提供参考。

关键词 超大型水厂 关键技术问题 工艺设计 复合沉淀池 集成水处理构筑物

中图分类号: TU991 文献标志码: B 文章编号: 1009-0177(2025)06-0172-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.06.021

Key Design Issues and Technological Process Design Discussions of a Large WTP in Northwest Region

HUA Haijie^{1,*}, LI Jian¹, WU Qian¹, YANG Jie², WU Zhigang¹, GU Jianguo¹

(1. CSECE Aecom Consultants Co., Ltd., Lanzhou 730000, China;

2. Municipal and Environmental Protection Engineering Co., Ltd., China Railway First Group Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract [Objective] To address the pollution risks associated with the single water source in Lanzhou City and potential sudden water contamination events, a water source construction project was implemented to ensure urban water supply security. The project focuses on resolving challenges such as raw water characteristics of low temperature and low turbidity in winter, short-term high turbidity in summer, coordination between new and existing water treatment plants, special geological site conditions, optimization of pipeline network compatibility, and emergency response capabilities. [Methods] A large-scale Pengjiaping water treatment plant was constructed with a current capacity of 750 000 m³/d and a future capacity of 1 000 000 m³/d. The treatment process adopted enhanced coagulation + composite sedimentation tank + V-type filter + ultraviolet and sodium hypochlorite combined disinfection. The water treatment room is a multi-functional water treatment structure that integrates multiple functions such as mixing, flocculation, sedimentation, filtration, and backwashing. The sludge treatment room is a superimposed wastewater and sludge treatment structure. Hydraulic simulation is utilized to optimize the velocity gradient and mixer power in the mixing tank. Parameters for backwash blowers are carefully selected, and improvements are made to the baffle installation method and the sludge discharge corridor design in the composite sedimentation tank. Additionally, smart water management systems are integrated. [Results] The project demonstrates that the selected process effectively treated raw water with seasonal variations, achieving stable outflow turbidity below 0.3 NTU year-round.

[收稿日期] 2024-05-31

[基金项目] 甘肃省科技计划企业研发机构能力建设专项(22CX8JA093)

[通信作者] 华海洁(1975—),女,正高级工程师,主要从事给排水设计、咨询等工作,E-mail:46231226@qq.com。

The water treatment plant achieves a highly compact layout, reduces energy consumption, and simplifies operation and maintenance. Enhanced resilience of the water supply system is realized through optimized pipeline network compatibility and emergency measures.

[**Conclusion**] The enhanced coagulation + composite sedimentation tank + V-type filter process proved highly effective in addressing low-temperature, low-turbidity water treatment challenges. The composite sedimentation tank exhibits significant advantages in terms of land occupation, initial investment, operational costs, and shock load resistance. By optimizing process parameters and adopting integrated structure designs, the project reduces energy consumption and land requirements, providing valuable insights for similar engineering applications.

Keywords large scale WTP key technical problem process design composite sedimentation tank integrated water treatment structure

兰州市中心城区供水主要以黄河西柳沟段地表径流为主,第一水厂通过取水泵站从黄河中取水,主要生产工业一次水及向西固区第二水厂输送预处理水,第二水厂主要负责兰州市的生产生活用水。第二水厂承担着中心城区 95% 以上的供水。鉴于兰州市自来水供水源单一、取水口上游及周边布局有中石油公司等数十家企业的现状,加上湟水河和大通河等支流汇入,水源污染隐患一直是城区供水安全的主要问题和突出矛盾。为防范和应对兰州市突

发性水污染事件,保证城区供水安全能力,提升供水安全、质量,优化供水结构,确保群众生活健康,兰州市亟待开辟第二水源,由此,2014 年兰州市政府启动兰州市水源地建设工程。工程由取水工程、输水工程、分水工程、净水工程及配水工程 5 部分组成,从刘家峡水库大坝上游约 4 km 的右岸岸边取水,包括竖井式取水口、输水隧洞主洞、分水井、水厂输水支线、调流调压站、发电站、2 座水厂和配水管线等,如图 1 所示。

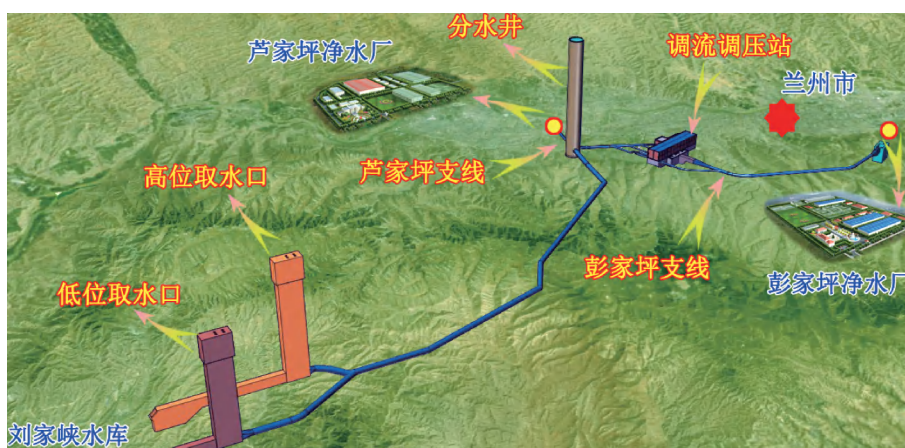


图 1 工程总体布置

Fig. 1 General Layout of the Project

新建 2 座水厂的原因首先是人口增长而用水量逐年增加,第二水厂部分设备设施超期服役存在安全隐患并导致产水能力不足无法满足生活用水需求。根据第 6 次和第 7 次人口普查数据,兰州市中心城区(西固区、城关区、七里河区、安宁区)常住人口由 244.52 万人增加至 304.3 万人。第二水厂现有第 1 系列设计供水能力为 46.4 万 m^3/d ,建于 20 世纪 50 年代末,已运行 60 多年;第 2 系列处理构筑物建于 20 世纪 80 年代初,已使用 30 多年,早期建设的构筑物因年代久远,多次出现设备故障和构筑物结构裂缝等安全问题,第二水厂设计处理能力为

85 万 m^3/d ,实际产水能力只有 60 万 m^3/d ^[1],供水能力不足造成部分区域尤其是高坪地区用水严重短缺等问题。其次是为了充分利用水源水压力并优化供水格局。兰州市地形东西长、南北窄,城市分布在黄河两岸的阶地上,形成以河道为轴的串珠状地形,兰州市中心城区面积约为 213 km^2 ,2021 年共有 50 个街道,其中人口最多的是东面城关区有 25 个街道^[2],第二水厂(高程为 1 545 m)作为唯一的水源位于城市最西端,兰州市供水主要解决的问题是向主城区东面调水和南北两侧高坪地区供水,现状通过第二水厂、小西湖中途加压泵站等加压至东面主城

区和高坪地区。刘家峡水库正常蓄水位为 1 735 m,兰州市主城区高程为 1 500~1 580 m,为就近向用户供水,在城市东、西高地新建 2 座水厂。西面芦家坪水厂位于西固区柳泉乡芦家坪,厂区高程为 1 672 m,远期规模为 50 万 m³/d,近期规模为 25 万 m³/d,向西固区、沙中组团和河口南组团供水。东面彭家坪水厂位于七里河区彭家坪,厂区高程为 1 605 m,远期规模为 100 万 m³/d,近期建设规模为 75 万 m³/d,向城关区、安宁七里河区、盐场九州组团、定远组团等片区供水。水源水可重力自流入水厂,为匹配管网压力,处理后水需减压后自流入主管网,取水泵站和部分中途加压泵站均可停用,节省了大量电耗,并优化了供水格局。

1 工程概况

彭家坪水厂位于七里河区彭家坪,厂区高程为 1 605 m,西邻小金沟、南邻南山路,北临 330 kV 变电站,远期规模为 100 万 m³/d,近期建设规模为 75 万 m³/d。

彭家坪水厂总占地面积为 2.6×10⁵ m²,近期占地面积为 2.147×10⁵ m²(含预留深度处理用地)。近期主要工程内容为:(1)生产性构(建)筑物—格栅及配水井 1 座、水处理设施间 2 座、紫外(UV)消毒间 1 座、清水池 4 座、吸水井及送水泵房 1 座、加氯加药间 1 座、污泥浓缩池及投配泵房 1 座、泥水调节池及脱水机房 1 座;(2)附属建筑物—综合办公楼、机修间及仓库、宿舍楼、变配电间各 1 座,大门及传达室 2 座。

彭家坪水厂新建 2 根 DN1600~DN1800 配水管道接至西津西路、南滨河路主干管,长度为 13.23 km。芦家坪水厂新建 2 根 DN1400 配水管道接至西

固中路、广河路主干管,长度为 9.92 km;新建 1 根 DN1400 原水联络管至第二水厂,长度为 2.62 km。

2 水源地概况

刘家峡水库调节库容为 41.5 亿 m³,即使考虑水库淤积,2003 年汛后实测调节库容也能达到 34.4 亿 m³,水源充足,可满足调水需求,水库正常水位、死水位分别为 1 735、1 694 m。兰州市水源地建设工程取水口位于临夏回族自治州东乡县境内,距离刘家峡水库大坝上游约 4 km 处的水库右岸岸边,上距折达公路祁家渡大桥约 380 m,下距洮河口约 2.4 km 处。考虑到库区淤沙高程,取水口分 2 层引水,低位取水口岩塞进口底高程为 1 692 m,高位取水口岩塞进口底高程为 1 706 m,均采用岩塞爆破方式形成,取水口闸室为竖井式。取水工程规模为大(1)型,工程等别为 I 等,取水口、输水隧洞、分水井、调流调压站及出口建筑物等主要建筑物级别为 1 级。

刘家峡水库库容较大,设计供水保证率为 97%,库区洮河汇入口以上受污染程度低,水质好,含沙量低,除总氮较高外,其余均符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中 I 或 II 类水体标准,溶解氧、氨氮、高锰酸盐指数、总磷等几个指标达到 I 类标准^[3-4],是作为生活用水的理想水源。第二水厂原水为兰州黄河段岸门桥处取水泵站,为 II 类水体,黄河兰州段综合污染指数在春、冬季高于夏、秋季,2014 年后黄河干流兰州段水质经历了缓慢提升(2014 年—2017 年)和显著提升(2018 年—2019 年)2 个阶段^[5]。2022 年—2023 年刘家峡水库水和第二水厂原水水质与《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)基本项目主要指标对比如表 1 所示。

表 1 原水水质对比
Tab. 1 Comparison of Raw Water Quality

项目	单位	I 类	II 类	第二水厂原水水质	刘家峡水库原水水质
pH 值	—	6~9	6~9	8.22~8.48	8.25~8.44
浑浊度	NTU	—	—	4~59 220	1.3~190.0
溶解氧	mg/L	7.5	≥6	7.50~12.39	7.0~10.2
高锰酸盐指数	mg/L(以 O ₂ 计)	≤2	≤4	1.4~3.4	1.5~1.9
化学需氧量(COD)	mg/L	≤15	≤15	16~17	<16
五日生化需氧(BOD ₅)	mg/L	≤3	≤3	2.0~3.5	<2.0
氨氮	mg/L(以 N 计)	≤0.15	≤0.50	0.10~0.49	<0.1
总磷	mg/L(以 P 计)	≤0.020(湖库 0.010)	≤0.100(湖、库 0.025)	0.02~0.05	<0.02
总氮	mg/L(以 N 计)	≤0.2	≤0.5	1.21~2.27	0.96~1.17
粪大肠菌群	个/L	≤200	≤2 000	220~720 000	10~160

3 彭家坪水厂设计关键技术问题及对策

3.1 关键技术问题分析

3.1.1 原水水质特性的应对问题

影响本项目的关键敏感性因素是原水水质,也是确定水处理工艺的主导因素。依据原始资料,刘家峡水库在冬季水温常态性地低于 5°C ,这种情况属于较难处理的低温、低浑浊度水范畴。在夏季洪水季节,异重流等因素的影响,可能会导致短时高浊。2022年8月、9月最高浑浊度分别为160、190 NTU,2023年进水浑浊度最高是在7月份,为58.1 NTU,每次持续时间约为12 h。

3.1.2 新建水厂和原有水厂的关系问题

现状西固二水厂设计供水处理总能力为 $71.4\text{万 m}^3/\text{d}$ 。新水厂建成后,如何和原来的水厂协同供水是重点考虑的问题。

3.1.3 新建水厂与管网匹配、碰接问题

兰州市东西狭长,第二水厂位于城区最西侧,输水管道自西向东长距离配水。新建水厂厂址如何和现有管网匹配,达到供水合理又对现有管网冲击最小、节约投资,是关键技术问题之一。

受地形、道路下各种市政管线密布、铁路、黄河东西向贯穿城区等因素制约,新建水厂与现有管网碰接线路问题也是设计难点。

3.1.4 突发事件的应对问题

饮水安全问题是关系到全体人民的生命线问题,是始终贯穿于设计中要考虑的关键问题,如何应对水源水可能出现的突然污染等突发事件,如何以最快的速度应对等都是需要解决的问题。

3.1.5 水厂自动化运行管理等问题

大型水厂药剂用量大、运行管理复杂、安全要求高,如何能科学管控、节约运行成本,使日常维护管理简单是设计的重难点问题。

3.1.6 特殊地质下的场地处理问题

场地中部有1条南北向宽为80~120 m、深为16~25 m的冲沟,并局部回填。由于沟谷回填时段不同、回填物质差异极大,既有黄土状粉土为主的松填素填土,也有以建筑垃圾和生活垃圾为主的杂填土,还有以工业废渣为主的填土。且厂位于厚度大于50 m的大厚度黄土地区,属Ⅳ级自重湿陷性场地,场地平整、地基处理方案是本工程的难点。

3.2 解决对策

3.2.1 针对原水水质选择处理工艺

水厂的关键技术问题首先是水处理工艺的选择。针对原水的水质特点,推荐的水处理工艺方案为机械混合+折板絮凝+复合沉淀池+V型滤池。针对低温低浊水絮凝困难的特点,采用二级机械搅拌强化混凝,变频调整搅拌器转速,混凝试验调整碱式氯化铝(PAC)、聚丙烯酰胺(PAM)投量,采用了较长的絮凝时间(约为28 min),并采用平流和斜管的组合工艺即复合沉淀池进行处理。

复合沉淀池是在斜管沉淀池前增设长为15~25 m的平流沉淀池,停留时间为12~23 min,絮凝后产生的大量矾花与污泥在前端平流段沉淀,运行初期能看到前端有明显的泥水沉降分界曲线^[6],可以避免前端斜管的积泥和损坏,通过降低斜管沉淀池的泥量负荷来延长斜管使用寿命。相较于单一沉淀池,复合沉淀池在占地面积、初期投资成本、运营成本以及抗冲击负荷能力等方面表现出显著优势^[7],有效解决了低温低浊、大流量高浑浊度水难处理的问题。根据已有类似工程实例,沉淀池出水浑浊度在2 NTU以下,出厂水浑浊度常年稳定在0.5 NTU以下。

3.2.2 新、老水厂联合供水

新建水厂建成后将作为兰州市的主供水源,与现状水厂联合供水,现状水厂作为热备水厂,具体供水量可根据用水需求统一调度。现状水厂2022年至今日均供水量为12万 m^3 ,系列轮转运行,当新建水厂发生事故时,可开启全部供水能力保障生活用水。

3.2.3 厂址合理,优化供水系统

水厂选址根据原水水位、现状管网布局、用水集中地区等情况,分别在西固区、七里河区地势较高处新建2座水厂,全部重力自流就近接入现状主管。经管网平差,使新建输水管道和现有管道压力匹配,降低管网改造规模;同时,废除部分中途加压泵站,从而降低电力消耗,实现显著的经济效益。水厂配水管线穿越南山路、兰新铁路、高铁线路、铁路场站等,并跨越小金沟洪道。周边复杂的地形及基础设施是输水管线线路选择的决定因素,经反复踏勘选定S229#—T201#—S183#—南滨河路和S229#路—南山路—七里河洪道—南滨河路2条线路与供水主管碰接。配水管线跨越小金

沟洪道采用管桥敷设,在南山路等市政道路下采用直埋或顶管通过,穿越兰新铁路、高铁线路等采用顶管、涵洞等方式通过。

3.2.4 多重保障、高效应对突发事件

在取水口采用发光细菌综合毒性检测技术和水质在线实时监测系统,监测项目包括水温、pH、浊度、有机物,并设置活性炭、高锰酸钾应急投加系统,以应对突发水源污染事件。如遇彭家坪水厂突然失电或输水隧洞检修造成新建水厂停产,启动第一、第二水厂全系列运行,并启用加压泵站来保障用水。

3.2.5 采用新设备、新技术的智慧工程

水厂设计融入智慧水务自控系统,采用 UV+电解食盐水生成次氯酸钠复合方式消毒,UV 照射可能会改变水中溶解性有机物的特征^[8],在水源水 pH 较高时,单一的次氯酸钠消毒会进一步提高 pH,UV+次氯酸钠联合消毒能够有效缓解 pH 的上升,也可以抑制三卤甲烷的碱催化生成过程,能去除大部分的细菌和病毒以及部分有机污染物,消毒副产物(DBPs)生成量明显下降^[9];加药系统实现全自动无人操作;取水口采用发光细菌综合毒性检测技术;取水头部设置水质在线实时监测系统,高锰酸钾和活性炭应急投加系统,应对突发水污染事件能力强;供水管网采用 AQUIS 水力建模工具,自动集成模型和监控与数据采集系统(SCADA),实现最优化的管道压力控制决策,迅速解决管道泄漏和爆管问题;管道也配备漏损声音监测,在线沉降监测等;调流调压

站设置电机;将德国工业 4.0 理念与物联网技术引入,从而使软件、通讯以及数字化等现代技术得以与工程项目紧密结合,最终实现一个全流程高度智能化的智慧工程。

3.2.6 场地整治及湿陷性场地地基处理

将场地中部冲沟内回填的生活垃圾、工业废渣等全部清除运移,对原状地基强夯处理后将场地冲沟北段已回填区域的土进行分选,剔除大块的建筑垃圾,采用振动碾分层碾压回填,沟内的虚填土处理完后,用场地表面的虚填土和池体施工开挖的废弃土回填至设计标高。厂区平面布置上,把预留的深度处理用地布置在冲沟回填处,经多年自然沉降后再使用能节省地基处理费用。

为满足厂区建(构)筑物及管线、道路等使用及沉降要求,地基处理采用沉管挤密法对场地整片处理,并在施工和使用期间做高填方地基沉降检测,甲类建筑及重要乙类建筑的局部布置沉降监测点,效果良好。

4 彭家坪水厂工艺设计

4.1 处理工艺及出水水质

根据刘家峡库区水冬季低温低浊,夏季降雨时出现短时高浑浊度的情况,参照类似工程案例,选定的水处理流程为二级机械搅拌混合+折板絮凝+复合沉淀池+V 型滤池+UV 和次氯酸钠消毒。工艺流程如图 2 所示。处理后的出水水质符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),出水浊度控制目标 ≤ 0.5 NTU。

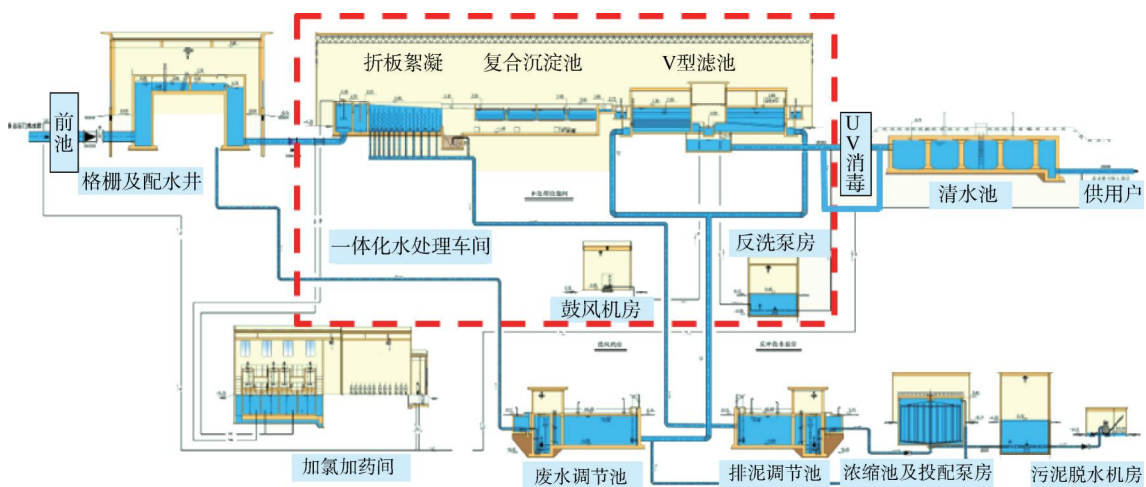


图 2 工艺流程

Fig. 2 Process Flow

4.2 水厂总体布局

厂区平面布局按工艺流程顺着地势由西南向东北,按功能分为生产附属区、生产区和预留深度处理区三大区域,预留深度处理区位于厂区中部(场地

内的生活垃圾等回填区),生产附属区位于厂区西北侧,临近南山路设入厂主路,生产区位于深度处理区两侧,各区之间有道路和绿化带相隔,如图3所示。



图3 水厂总平面布置

Fig. 3 General Plan of WTP

4.3 核心处理构筑物工艺设计

4.3.1 格栅及配水井

格栅是水厂首道工艺,主要截留原水中漂浮物与部分粗颗粒泥砂,保证后续工艺正常运行,同时起到配水作用。格栅渠道8格,选用回转式格栅机,单格栅槽宽为2 m,过栅流速为0.86 m/s。

4.3.2 水处理设施间

水处理设施间共设2座,1号、2号水处理设施间规模分别为 2.5×10^5 、 $5.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,是集混合、絮凝、沉淀、过滤、反冲洗多功能为一体的集成水处理构筑物。外围护为钢结构厂房,占地尺寸分别为 $177.2 \text{ m} \times 62.8 \text{ m}$ 、 $177.2 \text{ m} \times 124.8 \text{ m}$ 。2座水处理间共分3组6个系列,每个系列处理规模为 $1.25 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

(1)混合池

混合时间为30 s,两级机械搅拌混合,絮凝剂采用PAC,投加地点在进混合池之前的管道上,助凝剂采用PAM,投加在混合池内。每组混合池前设电动调节蝶阀和流量计,以应对各系列可能存在的处理效果差异和处理水量变化,日常运行中,经常通过

调整阀门开度来调控水量变化,效果良好。

混凝池搅拌机设计电机功率为7.5 kW,速度梯度(G)值为 400 s^{-1} ,供货商按运行经验和水力模拟,采用的电机功率为5.5 kW, G 值为 274 s^{-1} ,现场实际使用效果良好,每年可节省电耗约为21万 $\text{kW} \cdot \text{h}$,电费为10.5万元。

(2)絮凝反应池

采用单通道折板反应池,为便于安装及拆卸,不锈钢折板采用活动式安装。考虑冬季低温低浊,絮凝时间为28 min。折板分3段,各段流速为0.25、0.17、0.10 m/s。反应池排泥采用单根长为11.6 m的穿孔排泥管排至排泥渠,每根排泥管设手动和气动浆液阀,定期排泥。由于折板反应池总高为7.15 m,土建施工时各廊道宽度存在差异,要求折板按廊道实际跨度生产加工,避免出现其他工程中遇到的折板安装困难等情况。

(3)复合沉淀池

平流沉淀池+斜管沉淀池的组合,在前段设置长为20 m的平流段,沉淀时间为18 min,泥渣在该段大部分自由沉降,有明确的泥水沉降分界曲线,沉

淀效率高。平流段后设置上向流斜管沉淀池,进水为迎水流方向全断面配水,表面负荷为 $5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。复合沉淀池出水浑浊度保持在 2 NTU 以下,为滤池出水保证提供了可靠条件。每组沉淀池宽约为 50 m,在平流段前端设 16 个排泥斗,采用向下的喇叭管排泥,每 2 个排泥斗合成一根排泥管。常规做法是池体两侧排泥,本次单组沉淀池宽度较大造成中间泥斗的排泥管较长且管长差异较大影响排泥效果,故在混凝池后端、沉淀池的穿孔花墙前增加排泥廊道,每根排泥管管长为 5 m,就近排至排泥廊道,通过排泥渠向两侧和絮凝池排泥渠汇合后经管道排至排泥调节池,排泥廊道内设通风、照明等设施用于检修,实际运行中人员检修方便,实际运行中排泥效果较好。

(4) V 型滤池

1 号水处理间内 14 格滤池,双排布置,中间为管廊间,单格滤池过滤面积为 112 m^2 ,正常滤速为 6.91 m/h ,强制滤速为 7.44 m/h 。气冲洗强度为 $15 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$;气水联合水冲洗强度为 $2.5 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$,单独水冲洗强度为 $5 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$,表面扫洗强度为 $2.22 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 。表面扫洗孔高程接近中央排水槽的堰顶高程,反冲洗风机出口升压计算值为 43.6 kPa (其中富裕风压为 4.9 kPa),采用罗茨鼓风机 3 台,2 用 1 备,单台风量(Q) = $54 \text{ m}^3/\text{min}$,风机风压可按 39.2 kPa 、功率为 55 kW 或 49 kPa 、功率为 75 kW 选型,通过回访类似工程实际反洗风压和反冲洗效果,采用出口升压为 39.2 kPa ,由于降低了风压,风机用电功率减小了约 30%,降低了气反冲的能耗,建成后实际使用效果良好,砂滤料损耗较少。

滤池出水阀根据过滤水位的变化通过气动调节蝶阀自动调整开启度来确保整个过滤过程中出水量均衡,通过阀门开启度变化来控制过滤过程中过滤水头实现匀速过滤。水处理间二级机械搅拌混合采用变频电机,可调整混合强度达到最佳效果,复合沉淀池抗冲击负荷能力强,V 型滤池运行稳定水质良好,该工艺具有较高的自动化程度,并且管理维护简单便捷。在原水水质较好时可直接超越沉淀进行微絮凝过滤,减少运行成本。

4.3.3 UV 消毒间

UV 消毒能有效防止人们遭受各类微生物的侵害,包括对氯剂具有耐药性的微生物如隐孢子虫和

贾第虫。相较于其他消毒手段,UV 具有较高的消毒效能,对两虫具有明显的抑制作用,且不会产生 DBPs。UV 消毒反应器选用中压高强紫外灯,近期 11 台,9 用 2 备,远期增加 3 台设备,实际运行中,UV 辐射照度为 $35 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 左右,运行剂量为 $49 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。每台反应器内灯管数量为 6 支,每台反应器设 1 台电控柜,需要的供电参数为 380 V 、 50 Hz 、3 相 3 线 78 kVA ,总装机容量为 858 kVA 。

4.3.4 清水池

清水池近期建 4 座,远期再增加 1 座。单座的有效容积为 $30\,000 \text{ m}^3$,为水厂供水规模的 16%。单座清水池尺寸为 $96 \text{ m} \times 64 \text{ m} \times 7.0 \text{ m}$,有效水深为 5.5 m 。池内设有导流墙。滤后水消毒最大加氯量为 1 mg/L ,根据每座清水池进水量计作为前馈,余氯作为反馈进行复合环投加。

4.3.5 吸水井及加压泵房

为了给彭家坪周边等地势较高处的住户和企业供水,根据水量分区计算及管网平差结果,厂内设 1 座加压泵房,近期加压规模为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,时变化系数为 1.4。

4.3.6 加氯加药间

加氯加药间共 1 座,土建按 $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ 处理规模一次建成,设备按近期一期 $7.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 配置。

(1) 加氯间

采用电解食盐水生成次氯酸钠消毒。前加氯、后加氯、滤前加氯分别按最大投加量为 2、1、1 mg/L 设计。近期设次氯酸钠发生器为 4 台,3 用 1 备,单台投加能力为 45 kg/h 。运行中定期开启前加氯和滤前加氯,有效解决藻类与微生物滋生问题,降低消毒的氯剂量,削减了次生污染物(如 DBPs)的生成^[10-11]。实际运行中 UV+次氯酸钠联合消毒与单一次氯酸钠消毒相比,加氯量下降了 30%~50%。

(2) 加药间

根据原水水质情况和现状第二水厂的经验^[12],采用 PAC 作为混凝剂,PAM 作为助凝剂。PAC 按最大投加能力为 20 mg/L 选取投加设备,平均投加量按 12 mg/L 计,投加质量分数为 5%;PAM 投加量为 0.1 mg/L ,PAM 短期投加量可达 0.2 mg/L 。加药间设混凝剂溶解池 2 座,总有效容积为 60 m^3 ,溶液池 8 座,单座尺寸为 $3.4 \text{ m} \times 3.4 \text{ m} \times 3.3 \text{ m}$,按每天配制药液 1~2 次。采用自动投药系统,投药的控制

由可编程逻辑控制器(PLC)完成。加药泵及管路均进行了备用设计。

4.3.7 污泥浓缩池及投配泵房

污泥浓缩池是用重力方式将含水率为 99.5% 的排泥水浓缩至 97%, 设 2 座直径为 30 m 的重力浓缩池, 采用半桥式周边传动浓缩机, 固体通量为 $0.83 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

浓缩后污泥重力排放至调理池加 PAM 药剂调理, 出泥排放至储泥池经螺杆泵提升至脱水机房高压双隔膜压滤机。

4.3.8 泥水调节池及脱水机房

(1) 废水调节池

用于接纳滤池反洗水和浓缩池上清液, 并设潜污泵提升至格栅前端重新处理, 以实现节约水资源的目标。全厂近期 42 格滤池, 反冲洗排水量为 $18\,102.87 \text{ m}^3/\text{d}$, 2 座浓缩池上清液排水量为 $4\,666.67 \text{ m}^3/\text{d}$, 生产废水回流量为 $22\,769.54 \text{ m}^3/\text{d}$ 。共设 1 座分 2 格, 总有效容积为 $4\,800 \text{ m}^3$ 。

(2) 排泥调节池

用于接纳絮凝池和沉淀池的排泥, 并设潜污泵提升至重力浓缩池, 以实现污泥减量化。共设 1 座分 2 格, 总有效容积为 $2\,700 \text{ m}^3$ 。

(3) 污泥脱水机房

污泥脱水机房叠合在废水调节池和排泥调节池上部。近期日产生绝干污泥为 28 t DS, 远期日产生绝干污泥为 36 t DS。采用高压双隔膜压滤机, 污泥

经处理后含水率降至 60% 以下。近期 3 台高压双隔膜压滤机, 单台压滤机处理量 2.38 t DS/批次, 过滤面积为 357 m^2 , 每天工作 15 h (每台工作 6 批次, 144 min/批次)。具有投资省、运行费用低、占地小、操作简单等特点。

4.3.9 取水头部应急加药站

在取水口设置应急加药站 1 座, 设粉末活性炭投加、高锰酸钾应急投加设备各 1 套。设置流量、浑浊度、温度、pH、电导率、氨氮、在线生物毒性仪等检测仪表。当原水氨氮超标、生物毒性仪报警时, 立即联动取水头部闸门进行关阀并报警; 当浑浊度、pH 超标, 可根据设定值进行活性炭投加。应急加药站设有原水在线监测及视频监控系统, 所有数据传输至彭家坪水厂。

粉末活性炭采用湿式投加, 最大投加量按 20 mg/L 计, 采用液体方式投加, 投加质量分数为 5%, 加药用水采用水箱和槽车应急供水。高锰酸钾投加量按 1 mg/L 计, 投加质量分数为 2%。

4.4 水厂投资及运行情况

彭家坪水厂 (包括取水头部应急加药站, 不包括配水管道) 概算工程费为 10.2 亿元, 千吨水电耗为 $76.43 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。水厂已经通水 4 年多, 运行稳定, 维护管理方便, 运行成本较低, 2022 年 8 月、9 月最高浑浊度分别为 160、190 NTU, 2023 年进水浑浊度最高 7 月份为 58.1 NTU, 2 年进、出水浑浊度如图 4 所示。

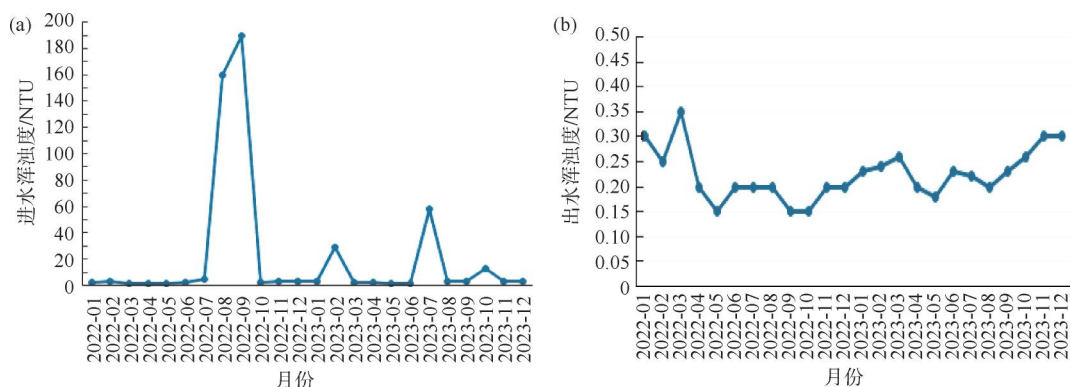


图 4 2022 年—2023 年进、出水浑浊度

Fig. 4 Inflow and Outflow Turbidity from 2022 to 2023

2022 年—2023 年出水色度小于 5, 氨氮小于 0.1 mg/L , 高锰酸盐指数为 $0.9 \sim 1.5 \text{ mg/L}$, 总硬度为 $210 \sim 230 \text{ mg/L}$, 溶解性总固体为 $267 \sim 335 \text{ mg/L}$, 硫酸盐为 $53 \sim 90 \text{ mg/L}$, 氯化物为 $21 \sim 29 \text{ mg/L}$ 。出

水各项水质均符合且大部分指标远低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022) 的要求。

从运行情况可以看出, 彭家坪水厂从处理工艺选择、工艺参数选取到各构筑物池型设计等方面, 均

较为合理、可靠。

5 结语

工程自 2015 年 10 月开工建设,2020 年初建成后开始试运行,距今已运行了 4 年多,现状水厂水源也从黄河兰州段取水改为刘家峡水库水,作为热备水厂主供西固区生产企业用水,彭家坪水厂出水浑浊度常年稳定为 0.3 NTU 以下,出水水质优。为兰州市人民提供安全放心的高品质生活饮用水,提高人民的幸福指数。本项目提升了兰州市供水安全、优化了供水结构,从水源水特性、设计关键技术问题及对策、水厂工艺设计、运行情况等方面进行了介绍。为类似工程案例提供参考和示范。

(1) 针对原水冬季低温低浊,夏季短时高浊等特性,采用强化混凝+复合沉淀池+V 型滤池+UV 和次氯酸钠联合消毒工艺。其中复合沉淀池在占地面积、初期投资成本、运营成本以及抗冲击负荷能力等方面表现出显著优势,沉淀池出水浑浊度稳定在 2 NTU 以下。

(2) 水厂选址根据原水水位、现状管网布局、用水集中地区等情况,分别在西固区、七里河区地势较高处新建 2 座水厂,可全部重力自流并经调流调压阀减压后接入现状主管并实现压力匹配,降低管网改造规模,同时停用部分中途加压泵站,从而降低电力消耗,实现显著的经济效益。

(3) 根据已有工程案例,通过合理的技术措施,对混合池电机功率、反冲洗鼓风机扬程、折板安装、复合沉淀池排泥、消毒方式等进行了优化,可以节省电耗、药耗,利于施工和运行管理,提供更优质的出水水质。

参考文献

- [1] 王海梅,王斌. 涵盖取、输、净、配系统的兰州市水源地建设工程[J]. 中国给水排水, 2018, 34(6): 16-21.
WANG H M, WANG B. Construction project of Lanzhou water source covering the system of intake, diversion, purification, distribution[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(6): 16-21.
- [2] 张文斌,张志斌. 基于扩展生态位理论的居住空间分异研究—以兰州市为例[J]. 干旱区地理, 2023, 46(8): 1376-1386.
ZHANG W B, ZHANG Z B. Residential spatial differentiation based on extended niche theory: A case of Lanzhou City[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(8): 1376-1386.

- [3] 杜岩岩,廖传松,杨濯羽,等. 刘家峡水库浮游植物群落结构与环境因子的关系[J]. 水生生物学报, 2021, 45(6): 1299-1307.
DU Y Y, LIAO C S, YANG Z Y, et al. Community structures of phytoplankton and its relationship with environmental Liujiaxia reservoir[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(6): 1299-1307.
- [4] 王昱,王旭,冯起,等. 黄河甘肃段底栖动物群落结构及水质评价[J]. 中国沙漠, 2023, 43(4): 146-156.
WANG Y, WANG X, FENG Q, et al. Macrobenthos community structure and water quality evaluation in Gansu section of Yellow River Basin[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(4): 146-156.
- [5] 徐发凯,何丽,王一帆,等. 2010-2019 年黄河干流兰州和白银段水质时空变化特征[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 44-50.
XU F L, HE L, WANG Y F, et al. Temporal and spatial variation characteristics of water quality in Lanzhou and Baiyin section of the Yellow River mainstream from 2010 to 2019[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 44-50.
- [6] 白华清,郑爽,李煜,等. 净水厂应对高浊度原水的优化设计[J]. 中国给水排水, 2020, 36(12): 86-90.
BAI H Q, ZHENG S, LI Y, et al. Optimized design for high turbidity raw water in waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(12): 86-90.
- [7] 李建,王海梅,白筱莉,等. 复合沉淀池的衍变及工程应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 31-35.
LI J, WANG H M, BAI X L, et al. Development and engineering application of composite sedimentation tank [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 31-35.
- [8] SONG Z M, YANG L L, LU Y, et al. Characterization of the transformation of natural organic matter and disinfection byproducts after chlorination, ultraviolet irradiation and ultraviolet irradiation/chlorination treatment [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 426: 131916. DOI: 10. 1016/j.cej. 2021. 131916.
- [9] 张刚,刘浩东,吴辉,等. 紫外消毒技术在水厂的应用及工程实例[J]. 净水技术, 2024, 43(6): 196-203.
ZHANG G, LIU H D, WU H, et al. Application and engineering cases of UV disinfection technology in WTPs [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 196-203.
- [10] 周子翀,杨旭,肖融,等. 应对高藻原水的水厂多点加氯技术原理与应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 109-115.
ZHOU Z C, YANG X, XIAO R, et al. Technical principle and application of multi-point chlorination in high algae water treatment[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 109-115.
- [11] ZHANG Y M, CHU W H, YAO D C, et al. Control of aliphatic halogenated DBP precursors with multiple drinking water

- treatment processes: Formation potential and integrated toxicity [J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 58: 322–330. DOI: 10.1016/j.jes.2017.03.028.
- [12] 闫晓涛, 李杰, 冯淑琪, 等. 响应面法优化混凝处理黄河兰州段低温低浊水[J]. 水环境与水工程学报, 2018, 29(6): 68–74.
- [31] PATRICIA B, D L G, LEONARDO E, et al. Genome-centric metagenomic insights into the role of *Chloroflexi* in anammox, activated sludge and methanogenic reactors [J]. BMC Microbiology, 2023, 23(1): 45–45.
- [32] SPIECK E, SPOHN M, WENDT K, et al. Extremophilic nitrite-oxidizing *Chloroflexi* from Yellowstone hot springs[J]. The ISME Journal, 2020, 14(2): 364–379.
- [33] YOU F Y, TANG M G, ZHANG J M, et al. Benzethonium chloride affects short chain fatty acids produced from anaerobic fermentation of waste activated sludge: Performance, biodegradation and mechanisms [J]. Water Research, 2024, 250: 121024. DOI:10.1016/j.watres.2023.121024.
- [34] XU Y, GENG H, CHEN R J, et al. Enhancing methanogenic fermentation of waste activated sludge via isoelectric-point pretreatment: Insights from interfacial thermodynamics, electron transfer and microbial community [J]. Water Research, 2021, 197: 117072. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117072.
- [35] MUIASE J, ITOH K, KANA M, et al. Molecular analysis of β -proteobacterial ammonia oxidizer populations in surface layers of a submerged paddy soil microcosm [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2003, 49(6): 909–913.
- [36] AO X, ZHANG X, SUN W J, et al. What is the role of nitrate/nitrite in trace organic contaminants degradation and transformation during UV-based advanced oxidation processes? [J]. Water research, 2024, 253: 121259. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121259.
- [37] SHARF T, O'GUINN M L, KEANEOA, et al. Biologics and the timing of operative management of pediatric inflammatory bowel disease[J]. Journal of Pediatric Surgery Open, 2023, 4: 100084. DOI: 10.1016/j.yjps.2023.100084.
- [38] NITTAMI T, SHOJI T, KOSHIBA Y, et al. Investigation of prospective factors that control *Kouleothrix* (type 1851) filamentous bacterial abundance and their correlation with sludge settleability in full-scale wastewater treatment plants[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 124: 137–142. DOI: 10.1016/j.psep.2019.02.003.
- YAN X T, LI J, FENG S Q, et al. Optimization of coagulation treatment of low-temperature and low-turbidity water in Lanzhou section of the Yellow River by response surface method [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(6): 68–74.
- [39] TADASHI N, RISA K, TOSHIMASA K, et al. Exploring the operating factors controlling *Kouleothrix* (type 1851), the dominant filamentous bacterial population, in a full-scale A2O plant[J]. Scientific reports, 2020, 10(1): 6809.
- [40] 周晓雅, 王润锴. 沸石粉基聚氨酯海绵在序批式生物膜反应器中去除氨氮废水性能探究[J]. 生物过程, 2022, 12(3): 155–169.
- ZHOU X Y, WANG R K. Performance of zeolite powder-based polyurethane sponges for the removal of ammonia nitrogen from wastewater in a sequencing batch biofilm reactor[J]. Bioprocess, 2022, 12(3): 155–169.
- [41] CAO Q, LI X Z, XIE Z J, et al. Compartmentation of microbial communities in structure and function for methane oxidation coupled to nitrification-denitrification [J]. Bioresource Technology, 2021, 341: 125761. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125761.
- [42] JIAYU Z, WEI Z, QINGAN M, et al. Denitrifying phosphorus removal (DPR) performance and metabolic mechanisms of *Tetrasphaera* at long-term nitrite exposure [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 475: 146249. DOI: 10.1016/j.cej.2023.146249.
- [43] CHAO H, HAIZHEN W, GENGRUI W, et al. Simultaneous decarbonization and phosphorus removal by *Tetrasphaera elongata* with glucose as carbon source under aerobic conditions [J]. Bioresource Technology, 2023, 393: 130048. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.130048.
- [44] 潘婷, 张淼, 范亚骏, 等. 基于碳源优化的反硝化除磷及微生物特性[J]. 中国环境科学, 2020, 40(7): 2901–2908.
- PAN T, ZHANG M, FAN Y J, et al. Denitrifying phosphorus removal and microbial characteristics based on the optimization of carbon sources [J]. China Environmental Science, 2020, 40(7): 2901–2908.
- [45] WANG D, ZHENG W, LIAO D, et al. Effect of initial pH control on biological phosphorus removal induced by the aerobic/extended-idle regime[J]. Chemosphere, 2013, 90(8): 2279–2287.

(上接第 99 页)