



黄河流域长距离调水工程预处理方案设计

王全锋, 李政伟, 韩珊珊

(黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要:针对黄河水夏季高温高浊、冬季低温高浊的特殊水质特征,结合黄河流域岱海生态应急补水工程实际需求,解决预处理阶段沉沙池适配性设计问题至关重要。文章以岱海生态应急补水工程预处理方案设计为实例,对适用于黄河水季节化水质特点的沉沙池池型开展详细比选分析;基于取水口多年平均悬移质颗粒级配实测成果,进行数据梳理与规律研判,据此合理确定沉沙池核心容积参数,完成方案优化设计;通过数值模拟方法计算取水期沉沙量,精准分析池内淤积位置分布与淤积深度变化规律,进而制定间歇期清淤安排方案。结果表明:通过池型比选、容积优化与淤积模拟的系统研究,形成了适配黄河水季节水质特征的沉沙池设计方案,其容积参数与清淤安排充分结合水文泥沙特性,既保障了沉沙处理效率,又实现了后期运维管理的便捷性,为同类高温高浊、低温高浊水源的生态补水工程预处理系统设计提供了可行参考。

关键词:黄河流域;生态补水;沉沙池;池型比选;优化方案设计;沉沙量模拟

中图分类号:TV68

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)03-0042-06

doi:10.13402/j.gcjs.2026.03.029

Pretreatment scheme design of long-distance water diversion project in Yellow River basin

WANG Quanfeng, LI Zhengwei, HAN Shanshan

(Yellow River Engineering Consult Co., Ltd., Zhengzhou 450003, Henan, China)

Abstract: In view of the special water quality characteristics of the Yellow River water with high temperature and high turbidity in summer and low temperature and high turbidity in winter, combined with the actual needs of the Daihai ecological emergency water supply project in the Yellow River basin, the adaptability design problem of the desilting tank in the pretreatment stage is solved, which provides technical support for the efficient operation of the project and the later operation and maintenance management, and ensures the quality of ecological water supply and the stability of the project. Taking the pretreatment scheme design of Daihai ecological emergency water replenishment project as an example, firstly, the detailed comparison and analysis of the desilting basin type suitable for the seasonal water quality characteristics of the Yellow River water are carried out. Based on the measured results of the average suspended sediment particle gradation of the water intake for many years, the data are sorted out and the law is judged. Based on this, the core volume parameters of the sedimentation tank are reasonably determined, and the scheme optimization design is completed. The numerical simulation method is used to calculate the sediment deposition during the water intake period, and the distribution of the deposition position and the change rule of the deposition depth in the pool are accurately analyzed, and

收稿日期:2025-07-14

基金项目:水利部先进实用技术示范项目(SF-202206)

作者简介:王全锋(1984—),男,高级工程师,注册公用设备工程师(给水排水)、注册咨询工程师(投资),从事长距离调水工程设计。

通信作者:李政伟(1990—),男,博士,高级工程师,从事引调水方面的研究。

then the dredging arrangement scheme during the intermittent period is formulated. Through the systematic study of pool type selection, volume optimization and sedimentation simulation, a design scheme of desilting basin suitable for the seasonal water quality characteristics of the Yellow River is formed. The volume parameters and dredging arrangements fully combine the hydrological and sediment characteristics, which not only ensures the efficiency of sediment treatment, but also realizes the convenience of later operation and maintenance management. It provides a feasible reference for the design of ecological water supply project pretreatment system for similar high temperature and high turbidity, low temperature and high turbidity water sources.

Key words: Yellow River basin; ecological water replenishment; sedimentation basin; pool type comparison and selection; optimize scheme design; simulation of sedimentation rate

我国水资源时空分布极不均衡, 时间分布上年内和年际波动大, 空间分布上南多北少, 为解决缺水地区供需矛盾和保障国家经济发展, 长距离调水工程应运而生。泵站是长距离调水工程的重要组成部分, 通过提升水的能量, 实现水的定向输送和调控。我国泵站的规模和数量均居世界前列, 长期以来水泵过流部件泥沙磨损、汽蚀损害等问题较为突出, 其中黄河流域以黄河水为水源的高扬程提灌泵站水泵泥沙磨损问题尤为严重^[1]。黄河属于典型的高浊度河流, 在黄河流域修建的大中型泵站大都存在渠道淤积严重、水泵磨蚀等问题^[2], 因此对于高浊度水的预处理环节非常关键, 预处理主要通过沉淀将水中的大部分泥沙污染物去除, 从而减轻泥沙对水泵叶轮的磨蚀^[3]。真伟等^[4]研究了高效澄清技术对黄河原水悬浮物的去除效果, 悬浮物去除率可达 95% 以上, 悬浮物含量 $\leq 10 \text{ mg/L}$, 其他各项水质指标均满足工业生产用水水质的要求。王志强等^[5]采用混凝 + 机械过滤工艺预处理黄河自来水, 通过单因素变量分析及正交混凝试验, 确定最佳混凝工艺: PAM 和 PAC 最佳用量分别为 0.15 mg/L 和 3.0 mg/L , 混凝时间 8 min , 过滤速度 8 m/h , 产水水质稳定, 处理量较大。宋小三等^[6]综述了黄河高浊度的性质、技术现状和存在问题, 认为直接超滤技术在高浊水处理中具有较好的发展潜力和应用前景。

然而, 考虑到含沙量、占地和投资等因素, 在工程实践中, 高浊度水预处理常用的方式主要有辐流式沉沙、平流式沉沙和斜板(管)式沉沙, 本文对黄河流域长距离调水工程预处理方案进行详细说明, 提出黄河高浊度水预处理存在的问题和设计建议, 以期能够对同类工程项目提供设计参考。

1 工程概况

岱海生态应急补水工程自黄河干流取水向岱海补水, 以实现遏制岱海湖面面积急剧萎缩和改善湖水水质的目标。取水口设在托克托县的头道拐与清水河县的喇嘛湾之间黄河河段, 输水线路横跨呼和浩特市托克托县、和林格尔县以及乌兰察布市的凉城县, 全长约为 131.57 km 。设计引水流量为 $3.02 \text{ m}^3/\text{s}$, 年最大取水量为 $4\,466 \text{ 万 m}^3$ 。

工程采用“三级加压 + 两级重力”相结合的输水方式。自黄河岸边一级加压泵站取水至预沉池沉砂, 由二级加压泵站加压输送至 1[#] 无压输水隧洞, 重力自流至三级加压泵站, 经再次加压输送至 2[#] 无压输水隧洞, 最后经重力输水管线进入弓坝河, 最终汇入岱海。工程系统流程如图 1 所示。

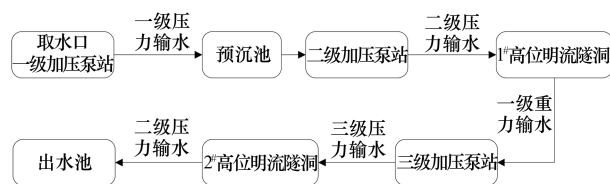


图 1 工程系统

2 预处理方案设计

黄河头道拐站多年平均含沙量为 2.62 kg/m^3 , 最大断面平均含沙量为 69.6 kg/m^3 , 最小断面平均含沙量为 0.048 kg/m^3 。泥沙年内分配不均匀, 冰期 12 月 ~ 翌年 2 月平均含沙量比较小, 一般为 $0.322 \sim 0.655 \text{ kg/m}^3$, 最小月份月平均含沙量为 0.140 kg/m^3 (1988 年 2 月), 最大月平均含沙量为 1.78 kg/m^3 (1989 年 12 月); 畅流期 (3 ~ 11 月) 一般在 $1.73 \sim 4.66 \text{ kg/m}^3$, 最小月份月平均含沙量为 0.259 kg/m^3 。

(2003 年 6 月),最大月平均含沙量为 8.60 kg/m^3 (1996 年 8 月);黄河泥沙主要集中在汛期(6~9 月),月平均含沙量在 $2.74\sim4.66\text{ kg/m}^3$,最小月平均含沙量 0.273 kg/m^3 (2001 年 7 月),最大月平均含沙量 8.60 kg/m^3 (1996 年 8 月)。工程取水期(8~9 月及 12 月~翌年 3 月)多年平均含沙量 2.59 kg/m^3 。

黄河夏季属于高温高浊度水,冬季属于低温高浊度水。根据该工程原水水质为高浊度水的特点,沉沙工艺的选择主要根据取水含沙量、取水流量等诸因素确定。

2.1 预沉池选型

高浊度水的特点集中表现在沉降特性的不同,其沉降过程将产生浑液面而具有界面沉降的特点。根据《高浊度水给水设计规范》(CJJ 40—2011)的规定,并结合我国黄河水净水工程经验和国内已建类似工程的设计运行经验,适用于高浊度水预沉淀的构筑物主要有辐流式沉沙池、平流式沉沙池和斜板(管)式沉沙池,具体各池型的优缺点详细比选如表 1 所示。

分析 3 种池型的优缺点:斜板沉沙池排泥困难,项目含沙量较多比重较大,会更加排泥不畅,因此不选用斜板(管)沉沙池;辐流式沉沙池是一种池深较浅的圆形构筑物,原水自池中心进入,沿径向以逐渐变小的速度流向周边,在池内完成沉淀过程后,通过周边集水装置流出,沉降在池底板的沉沙,采用机械方法排除,辐流式沉沙池可以连续排泥,有利于泥沙的排放,但工程沉沙池需在冬季运行,辐流式沉沙池在冬季无法运行;平流式沉沙池操作管理方便,施工简单,对原水浊度适应性强,潜力大,处理效果稳定,缺点是占地面积大。由于工程年平均运行期为 169 d,每年进行一次淤积沙清

理,可以有效解决这个问题,极大减少排泥水量,简化运行管理。

综合比较,并考虑本工程取水口黄河高浊度水的特点,结合本工程间歇式运行的特点以及已建类似工程的运行经验,本着安全、经济合理、运行管理方便的原则,工程推荐选用平流式沉沙池。

2.2 设计参数确定

为保证后续处理泵站的正常运行并储存部分事故用水量,在二级加压泵站前设置沉沙池,黄河头道拐水文站有 1969 年、1971 年—1986 年和 1991 年—2010 年泥沙粒径资料,经计算取水口多年平均粒径小于 0.016 mm 占 48.42%;小于 0.062 mm 占 85.34%;小于 0.25 mm 占 99.37%。多年平均粒径为 0.035 mm ,中数粒径(d_{50})为 0.017 mm ,头道拐站悬移质泥沙粒径见表 2。

统计头道拐 2000 年—2016 年取水期(8~9 月汛期,12 月~翌年 3 月凌汛期)实测泥沙颗粒级配,取水期多年平均泥沙颗粒级配成果如表 3 所示。取水口多年平均粒径小于 0.016 mm 占 37.0%,小于 0.062 mm 占 81.2%,小于 0.25 mm 占 99.4%。多年平均粒径为 0.036 mm ,中数粒径为 0.026 mm 。

取水期(8 月~9 月及 12 月~翌年 3 月)黄河头道拐多年平均含沙量为 2.59 kg/m^3 ,为提高沉沙池的沉沙效果,最大程度地减少出水含沙量,当进水含沙量大于等于 2.59 kg/m^3 时,启动应急加药系统,在沉沙池进口投加 PAC 和 PAM;进水含沙量小于 2.59 kg/m^3 时,采用自然沉降,设计出水含沙量小于等于 1.0 kg/m^3 ,设计沉沙效率大于等于 60%,由取水期头道拐站多年平均悬移质颗粒级配成果表可知,沉沙池能去除的颗粒粒径大于等于 0.016 mm ,在此基础上进行沉沙池容积的计算。

表 1 各池型优缺点比选结果

池型	优点	缺点	适用条件
辐流式沉沙池	1)管理方便、工作可靠;2)便于机械刮泥;3)如配合投加絮凝剂,净化效率较高	1)占地面积较大;2)投资大,施工较平流式困难;3)导流和配水条件较差	一般用于大、中型水厂的预沉
平流式沉沙池	1)水力条件好,管理方便;2)施工较简单;3)易与反应设备衔接	1)排泥困难,机械排泥设备维护较复杂;2)占地面积较大	一般用于大、中型水厂的预沉
斜板(管)沉沙池	1)水力条件好,沉淀效率高;2)体积小、占地少	1)排泥困难,机械排泥设备维护较复杂;2)材料消耗多,造价较高	用于各类水厂的预沉

表 2 头道拐站多年平均悬移质小于某粒径的颗粒级配

粒径/mm	0.002	0.004	0.008	0.016	0.031	0.062	0.125	0.250	0.500	1.000
占比/%	7.860	22.800	34.100	48.420	66.120	85.340	96.640	99.370	99.930	100.000

表 3 取水期头道拐站多年平均悬移质小于某粒径的颗粒级配

粒径/mm	0.002	0.004	0.008	0.016	0.031	0.062	0.125	0.250	0.500	1.000
8~9 月占比/%	8.400	16.400	26.900	40.100	58.900	83.200	97.000	99.500	99.900	100.000
12~3 月占比/%	5.500	11.200	18.800	30.1000	49.300	76.800	95.300	99.300	99.900	100.000
取水期占比/%	7.500	14.900	24.400	37.000	55.900	81.200	96.500	99.400	99.900	100.000

2.3 沉沙池设计

根据《水利水电工程沉沙池设计规范》(SL/T 269—2019)的规定,当粒径等于或小于 0.062 mm 时,粒径级沉速可采用斯托克斯公式进行计算:

$$\omega = \frac{g}{1800} \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) \frac{d^2}{\gamma} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{0.01775}{1 + 0.037t + 0.000221t^2} \quad (2)$$

式中: ω 为泥沙沉速, cm/s; γ 为水的运动黏滞系数, cm^2/s ; t 为水温, $^{\circ}\text{C}$; d 为泥沙粒径, mm; ρ_s 为泥沙密度, g/cm^3 ; ρ_w 为清水密度, g/cm^3 ; g 为重力加速度, cm/s^2 。

由上式计算可知,粒径为 0.016 mm 的泥沙颗粒在 10°C 时对应的泥沙沉速为 0.070 mm/s。设沉沙池有效水深为 4 m,为充分保证沉沙池的沉沙效果,沉沙池停留时间为 $T = H/\omega = 15.87 \text{ h}$,取 16.0 h。

根据 CJJ 40—2011 的规定,自然沉淀时水平流速宜为 5~10 mm/s,由于工程黄河水含沙量较高,水平流速本阶段取 5.02 mm/s。

沉沙池过水断面平均长度: $L = v \times T = 5.02 \times 16.0 \times 3600 \div 1000 = 289.15 \text{ m}$,取 290 m。

沉沙池过水断面有效容积: $V = Q \times T = 3.02 \times 16 \times 3600 = 173952 \text{ m}^3 = 17.40 \text{ 万 m}^3$;本阶段设置 1 座沉沙池,分两格;则单格沉沙池过水断面有效容积为 8.70 万 m^3 。

单格沉沙池过水断面面积: $A = V/H = 8.70/4 = 2.175 \text{ 万 m}^2$ 。

单格沉沙池过水断面平均宽度: $B = A/L = 2.175 \times 10000/290 = 75 \text{ m}$

水流从一级加压管线,进入 DN1200 进水管,

通过进水槽溢流方式流入沉沙池。沉沙池采用梯形断面形式,总平面尺寸为 300 m $\times$ 177 m,分为两池,单池开口尺寸为 300 m $\times$ 85 m,进水端总深 7.5 m(超高 0.5 m,有效水深 2.0 m,缓冲层深 1.0 m,积泥深度 4.0 m),出水端总深 6.5 m(超高 0.5 m,有效水深 4.85 m,缓冲层深 1.0 m,积泥深度 0.15 m),单座沉沙池有效容积为 17.40 万 m^3 ,最小停留时间 16.0 h。沉沙池边坡采用 1:2,池身进行防渗处理。沉沙池设计水位是 1056.50 m,池顶高程为 1057.00 m。为了便于池内泥沙排放,沉沙池底部自进水端向出水端倾斜向上布置,池底倾斜坡度为 1/272,沉沙池进口池底高程为 1049.50 m,出口池底高程为 1050.50 m。在沉沙池出水侧,紧邻中间池顶道路位置布置两条下池坡道,用于清沙,清沙道道路宽度为 5 m,坡度为 10%。沉沙池为了安全及维护运行的方便,在池身沿水流向坡面每侧布置两处下池台阶。

2.4 沉沙量计算

沉沙池取水期含沙量:8~9 月 4.13 kg/m^3 ,12~翌年 3 月 1.49 kg/m^3 ,多年平均含沙量为 2.59 kg/m^3 。沙容重按 1.3~1.4 t/m^3 取,年取水时间 169 d。

图 2、3 分别是 8~9 月连续运行的沉沙池含沙量分布模拟图和淤积量分布模拟图。由图 2 可知,8、9 月出水含沙量约为 0.85 kg/m^3 ,考虑数值模拟和实际沉沙之间存在一定误差,出水含沙量按 1.0 kg/m^3 控制。由图 3 可知,经过 8、9 月连续运行之后,沉沙池进口一侧存在较大淤积量,主要集中在进水槽后方斜坡和池底处,最大淤积深度接近 4 m。故而考虑沉沙池一年清淤两次,分别在 8~9 月、12~翌年 3 月运行后进行清理。经计算,沉沙池每年平均沉沙量为 7.1 万吨,泥沙容积为 5.07 万~5.46 万 m^3 。

2.5 管道布置

两格沉沙池进水端分别设有 1 根 DN1200 的进水管,在进水管上设有 1 套 DN1200 电动蝶阀,出水端分别设有 1 根 DN1400 的出水管,在出水管上设有 1 套 DN1400 电动蝶阀。沉沙池在初冬时期,冰层较薄时,通过溢流堰出水;在深冬时期,冰层较厚时(溢流出口结冰的情况下),将打开溢流水堰侧壁设置的 $\varnothing 1\ 400$ mm 的圆形附壁闸门出水。

工程取水期为 8~9 月及 12 月~翌年 3 月,工程所在地 10~11 月温度已经相对较低,不利于泥沙的自然晾晒,因此本阶段沉沙池暂定一年清理 1 次泥沙,在每年的 4~5 月对沉沙池泥沙进行清理。沉沙池外侧平行长度方向间隔一定距离设有 DN250 的法兰盘及短管,通过 DN250 的短管汇入 DN500 的排泥主管,通过吸泥船排泥,吸泥船的排泥能力为 $900\text{ m}^3/\text{h}$,每天工作时间 8~12 h,排泥水排入沉沙池西侧的排泥场内。

2.6 池身断面设计

根据托克托县气象站 1971 年—2000 年资料统计分析,多年平均气温为 $8.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,历年极端最高气温 $38.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2000 年 7 月 20 日),极端最低气温

为 $-36.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1971 年 1 月 21 日),沉沙池防渗结构从外至内依次布置 0.1 m 厚现浇混凝土板,复合土工膜(两布一膜),0.1 m 厚聚乙烯保温板、0.1 m 厚砂砾石垫层,现浇混凝土板强度等级为 C20W4F200,压顶及池内坡脚典型图见图 4。

沉沙池为避免雨水冲刷,致使池坡掏空,破坏池身衬砌及防渗,根据《渠道防渗衬砌工程技术标准》(GB/T 50600—2020)规定,在边坡衬砌顶部设置水平封顶板,板厚 0.10 m,封顶板宽度为 0.20 m,封顶板与边坡衬砌现浇为一体。封顶板旁设置压顶石,压顶石尺寸为 $0.30\text{ m}\times 0.65\text{ m}$ (宽 $\times$ 高)。为改善池底底板的受力条件,提高边坡衬砌的抗滑稳定能力,在坡脚处均设置齿墙,混凝土齿墙与边坡衬砌采用整体现浇。齿墙上顶水平宽度为 0.5 m,下底水平宽度为 0.25 m,齿墙高度为 0.3 m,坡度为 1:1。

2.7 进出水槽断面设计

进水管采用 DN1200 钢管引水,管中心高程为 1 053.50 m,水流流入进水槽,进水槽为钢筋混凝土矩型槽结构,单槽内部结构尺寸为 $3.5\text{ m}\times 3.2\text{ m}\times 60\text{ m}$ (宽 $\times$ 高 $\times$ 长),壁厚 0.5 m,槽底高程为 1 052.50 m,槽顶高程为 1 054.80 m,进出口槽横断面图如图 5 所示。

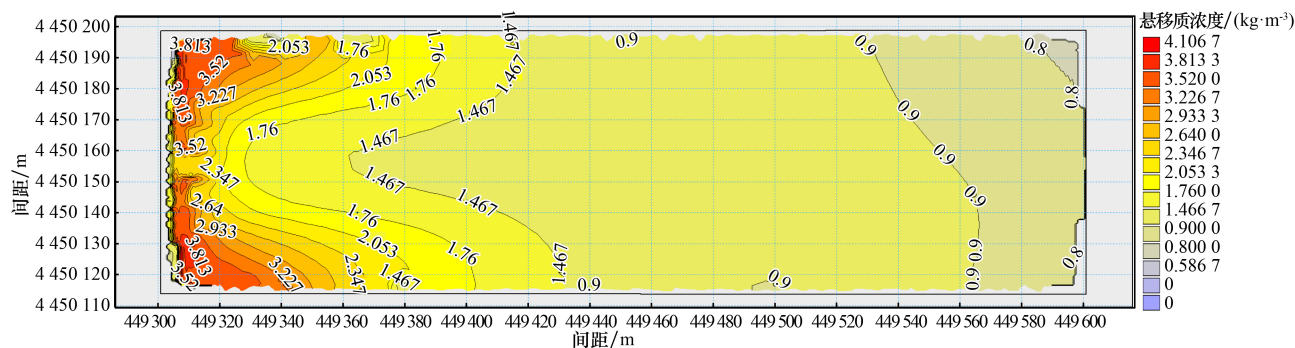


图 2 8~9 月连续运行后沉沙池内含沙量分布(单池)

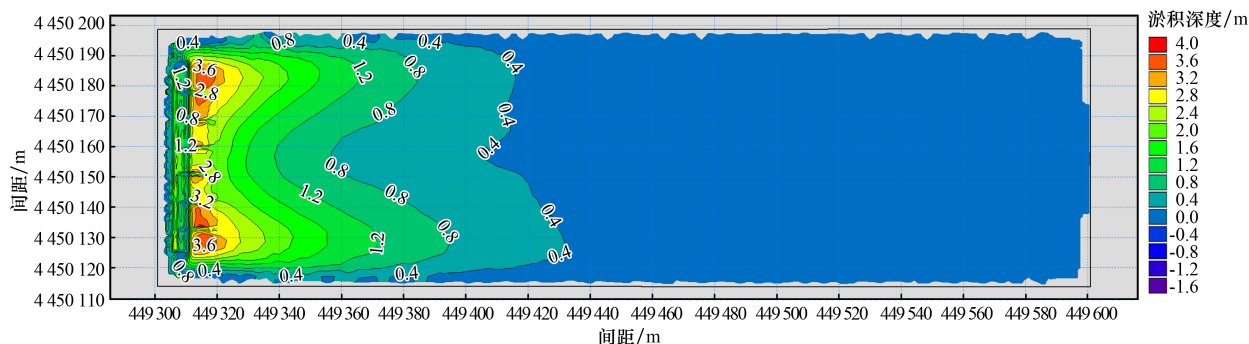


图 3 8~9 月连续运行后沉沙池内淤积量分布(单池)

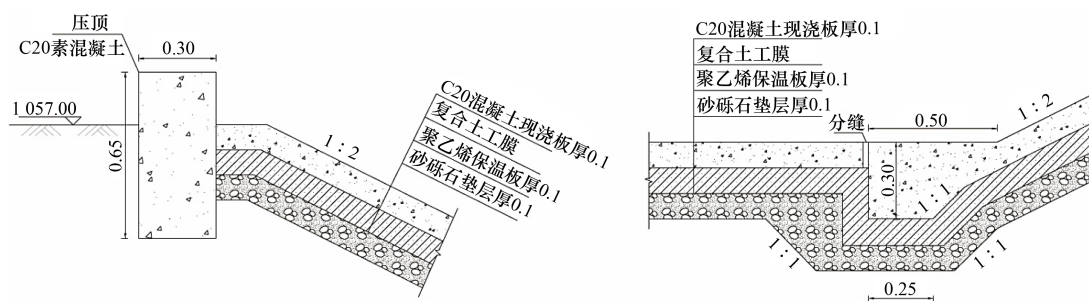


图 4 压顶及池内坡脚典型剖面

m

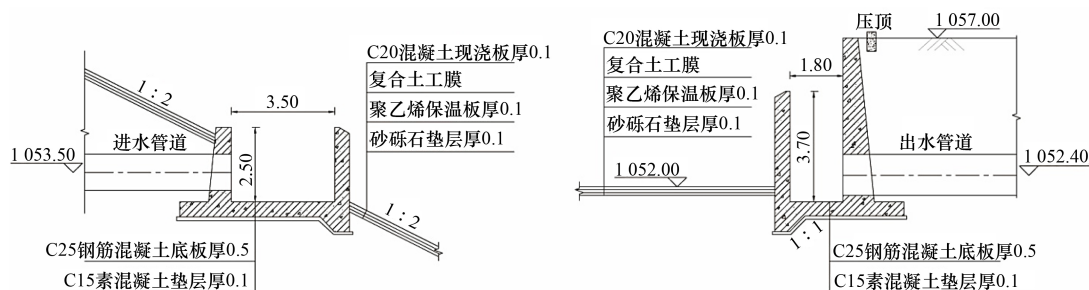


图 5 进出口槽横断面

m

水流采用溢流方式流入出口槽, 再通过槽内出水管流入二级加压泵站输水管道中。出水管采用 DN1400 钢管出水, 管中心高程为 1 052.40 m, 出水槽为钢筋混凝土矩型槽结构, 单槽内部结构尺寸为 4.0 m × 3.7 m × 35 m (宽 × 高 × 长), 壁厚 0.5 m, 槽底高程为 1 051.10 m, 槽顶高程为 1 054.80 m。考虑冬季运行情况, 若池内有冰冻现象, 为保证冬季能够正常取水, 在出水槽沿水流方向右侧侧壁上布置直径 1.4 m 的排水孔, 孔中心高程 1 052.70 m, 安装闸板阀。

3 结 论

(1) 通过对黄河水夏季高温高浊、冬季低温高浊的水质特点分析, 对常用的高浊水预沉构筑物进行详细比选, 从而选择符合本工程特点的平流式沉沙池。

(2) 根据对取水期头道拐站(取水口)多年平均悬移质颗粒级配成果统计, 为保证沉沙池的沉沙效

果, 在充分利用自然沉降前提下, 合理确定设计参数和加药方案, 从而实现在满足工程建设要求的前提下, 优化沉淀池设计。

参考文献:

- [1] 李娜, 许建中, 李端明. 我国沿黄高扬程提灌泵站水磨蚀问题及解决方案[J]. 中国农村水利水电, 2013(8): 178-180.
- [2] 赵林直, 刘桂芹, 冯小燕. 小浪底引黄工程中水泵泥沙磨损防护策略研究[J]. 水电站机电技术, 2025, 48(4): 12-15.
- [3] 程万达. 辐流沉淀池在高浊度水预处理中的应用[J]. 山西建筑, 2018, 44(9): 85-86.
- [4] 真伟, 高磊, 骆重阳. 高浊度黄河原水高效澄清技术的研究及应用[J]. 中国给水排水, 2013, 29(9): 42-48.
- [5] 王志强, 郝华伟. 黄河自来水混凝预处理的研究[J]. 广东化工, 2014, 41(12): 277-278.
- [6] 宋小三, 申庆超, 张永发, 等. 高浊度水处理技术的研究进展及挑战[J]. 应用化工, 2025, 54(5): 1302-1306.