

大型船闸基坑低碳环保水力施工新工艺

姚 平¹, 沈立龙^{2, 3, 4, 5}

(1. 中交二航局第三工程有限公司, 江苏 镇江 212003; 2. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 3. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040; 4. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040; 5. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司, 湖北 武汉 430040)

[摘要]针对船闸基坑常规机械开挖涉及装备多、噪声大、能耗高, 以及土方运输途经市区对环境、道路安全影响大和受市区交通管制易影响工期等问题, 依托京杭运河八堡船闸工程, 研发了基坑水力冲挖造浆、水泥浆远距离泵送、水泥浆三级沉淀、沉淀水体循环利用和渣土水路外运的成套基坑施工技术, 形成了大型船闸基坑绿色低碳水力施工新工艺。该工艺丰富了水运工程基坑施工技术, 实现了以绿色技术推动绿色低碳发展, 创造了显著的经济与社会效益。

[关键词] 大型船闸; 基坑; 低碳; 环保; 施工技术

[中图分类号] TU753; U615 [文献标识码] A [文章编号]

New low-carbon and Environmentally Friendly Hydraulic

Construction Technology of Large Ship Lock Foundation Excavation

YAO Ping¹, SHEN Lilong^{2, 3, 4, 5}

(1. The 3rd Construction Company of CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Zhenjiang, Jiangsu 212003, China; 2. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China; 3. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan, Hubei 430040, China; 4. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan, Hubei 430040, China; 5. CCCC Highway Bridge National Engineering Research Centre Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China)

Abstract: In response to the problems of conventional mechanical excavation of ship lock foundation excavation involving multiple equipment, high noise, high energy consumption, as well as the significant impact of earthwork transportation on the environment and road safety in the urban area, and the impact of urban traffic control on the construction period and so on, relying on Babao Ship Lock project of Beijing-Hangzhou Canal, a complete set of foundation excavation construction technology is developed, including hydraulic excavation and slurry making, long-distance pumping of cement slurry, tertiary sedimentation of cement slurry, recycling of sedimentation water bodies, and transportation of waste soil by waterway. A new green and low-carbon hydraulic construction technology is formed for large-scale ship lock foundation excavation. This process enriches the construction technology of water transportation engineering foundation excavation, achieves the promotion of green and low-carbon development through green technology, and creates significant economic and social benefits.

Keywords: large ship lock; foundation excavation; low carbon; environmental protection; construction

0 引言

大型船闸工程普遍涉及基坑施工, 基坑的土方开挖和运输是关键的分项工程, 挖掘运输方量巨大。现有的船闸基坑土方开挖在降水疏干后, 采用大型土方挖掘设备进行开挖施工, 运输车由

陆上外运至弃土场^[1-2], 此项工艺扬尘大、自卸车运输噪声高, 污染环境, 且车辆运输能耗高。若运输车途经市区, 则会受到市区交通管制影响, 造成工期延长、施工效率低下, 增加施工成本, 同时也对市政道路、交通安全造成较大影响。与

[作者简介] 姚 平, 总工程师, 高级工程师, E-mail: 30224908@qq.com

[收稿日期] 2023-09-18

《国家“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》^[3]及《绿色交通“十四五”发展规划》^[4]等关于节能低碳、生态保护、资源节约循环利用及绿色持续发展等理念不相符。

在航道疏浚、吹填造地、农田水利等领域，已有借助水力方法进行疏浚、输送土体的案例，该工艺具有效率高、速度快、成本低、节能环保等特点^[5-7]，但在大型船闸基坑施工领域鲜有应用，且船闸工程施工特点与之区别较大。

本文以京杭运河浙江段三级航道整治工程杭州段八堡船闸工程为背景，解决基坑常规机械开挖和土方途经市区运输面临的多项施工问题，研发大型船闸基坑绿色低碳水力施工成套工艺，丰富水运工程基坑施工关键技术。

1 工程概况

京杭运河浙江段三级航道整治工程杭州段八堡船闸工程（见图 1）为国家重点项目，也是杭州段建设的关键节点性工程，工程位于钱塘江北岸的杭州市下沙镇八堡村与头格村交界处，为京杭运河三级航道整治工程杭州段新开挖航道的终端。八堡船闸标段全部为新开挖航道，全长 2.973km，土方开挖量大，共计开挖方量 238 万 m³，其中外运方量为 167 万 m³，开挖纵线长，基坑最大开挖深度达 16.1m。



图 1 八堡船闸效果

Fig.1 Effect of Babao Ship Lock

八堡船闸工程地处钱塘江北岸冲海积平原区，地形平坦，施工区域地下水丰富，实测地下水位埋深 1.4~3.5m，年变化幅度在 0.50~1.50m。施工区域范围内共划分为 7 个工程地质层组、24 个工程地质层，其中船闸基坑开挖土层从上而下分别为①₀ 填土、①₁ 粉土、②₁₂ 粉土、②₁₃ 粉砂。

八堡船闸基坑原施工方案为机械开挖和土方陆上运输，但本工程濒临市区，环保要求高，土方运输车辆通行时间受到限制，运输效率低，且受当时即将举办杭州亚运会影响，陆上运力及周边消纳场地有限，基本趋于饱和。因此，土方出运成为项目面临的一大施工难题，亟待创新基坑施工工艺。

2 新工艺原理

大型船闸基坑低碳环保水力施工新工艺，包含基坑水力冲挖造浆、水泥浆远距离泵送、水泥浆三级沉淀、沉淀水循环利用、土方皮带机转运至运输船和水上运输等分项施工工艺，主要表现为：利用高压水泵从蓄水池内抽水，通过输水管道输送至船闸土方开挖区域，在开挖区域内的管道上设置多个分水管，每个分水管连接 1 把高压水枪，借助高压水枪喷出的高压水体切削、粉碎土体，形成可泵送运输的水砂混合液（水泥浆）。基坑内设置 1 台大功率泥浆泵，泥浆泵连接配套的输泥管道，用于泵送水泥浆，运距长时可在中间设置增压泵，直至将水泥浆泵送至三级沉淀池的第一级沉淀池内进行沉淀。经三级沉淀后，上层清水泵吸至蓄水池内循环利用。沉淀的渣土通过挖掘机转运到与皮带机连接的料斗内，由皮带机再次转运至停靠于临时码头的运输船上，然后由船舶通过水路运输至弃土点。八堡船闸泥砂泵送出土平面布置如图 2 所示。

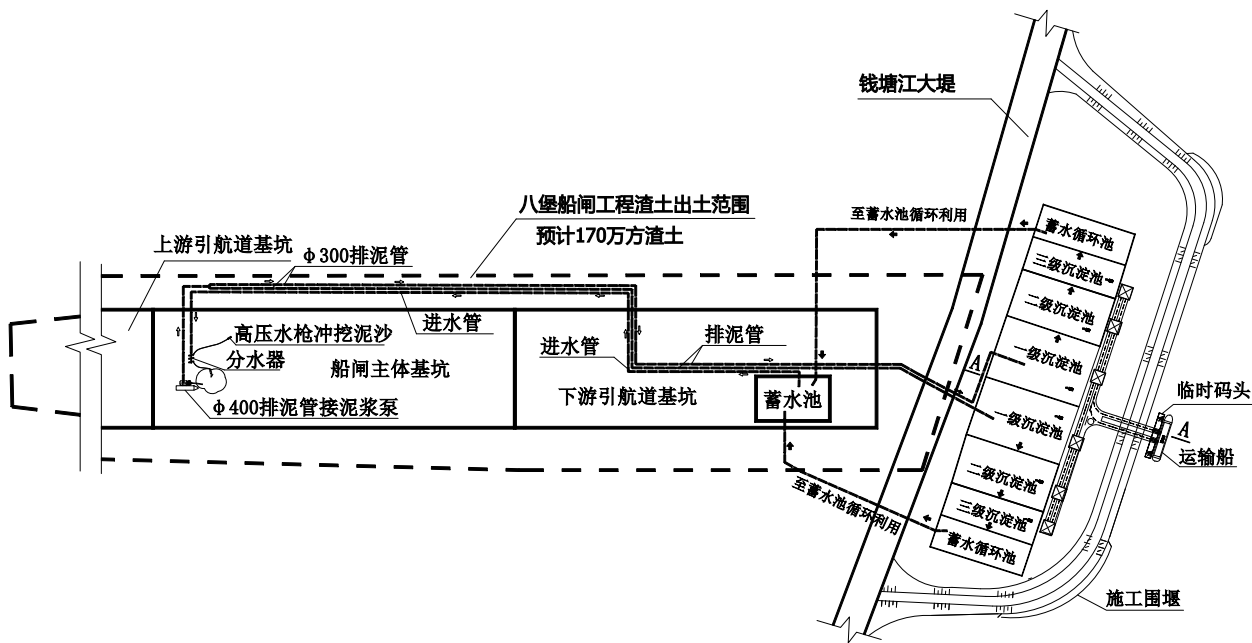


图 2 八堡船闸泥砂泵送出土平面布置

Fig.2 Plan layout of mud pump extraction for sediment at Babao Ship Lock

3 施工关键技术

大型船闸基坑低碳环保水力施工新工艺流程如图 3 所示。

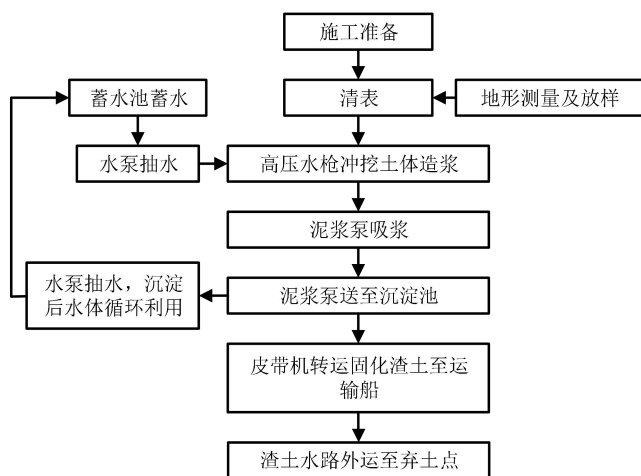


图 3 船闸基坑低碳环保水力施工新工艺流程

Fig.3 New process flow of the hydraulic construction with low carbon and environmental protection for ship lock foundation excavation

针对京杭运河八堡船闸工程基坑施工，主要施工技术如下。

3.1 施工准备

3.1.1 取土区域清表

在进行取土作业前，清除开挖区域表面树木、杂草及硬化路面的混凝土块、砖渣等影响水力冲挖的杂物，耕植土剥离厚度 $\geq 40\text{cm}$ ，直至挖出适

[作者简介] 姚 平，总工程师，高级工程师，E-mail: 30224908@qq.com

[收稿日期]2023-09-18

合水力冲挖的粉砂土表面层。

3.1.2 蓄水池、沉淀池修筑

根据现场计划投入机械设备，计算得出每天的最大冲挖土方量为 7200m^3 。为保障水力冲挖用水量，在下游引航道钱塘江大堤内侧开挖 $50\text{m}\times 50\text{m}\times 2\text{m}$ 蓄水池基坑。蓄水池首次蓄水采用水泵从钱塘江取水。

为保证输送的泥浆顺利排水固结且沉淀的水符合要求，在围堰内侧开挖三级沉淀池。

3.1.3 输泥管道设置

输泥管道采用环刚度大、不易破损、耐磨的 PE 管，管道直径 300mm ，每节管道 9m ，管与管间采用法兰连接。根据船闸开挖的部位及泥砂外排的地点合理进行输泥管道布置，八堡船闸工程沿开挖边线在距坡顶 5m 外铺设，便于日常巡查和检修，在过路及过堤时埋地敷设，采用钢管作为保护套管。

基于每天需出土的方量进行计算，泥浆泵送系统配置 1 台 160kW 泥浆泵、1 条直径 400mm 的输泥主管道、2 条直径 300mm 的输泥分管道。

由于开挖地点距离沉淀池最远达 1.5km ，输泥管道中间设 1 台 110kW 增压泵，确保泥砂顺利泵送到口门导堤围堰内侧的第一级沉淀池内。

3.1.4 临时出运码头建设

在围堰外侧江边新建 1 处临时出运码头（见图 4），临时出运码头由皮带机设备段和靠船墩等组成，两段平台均采用透空式钢结构，皮带机设备段上部设置 2 台卸料皮带机，与后方陆域作业

区用贝雷片栈桥进行连接。卸土口处设置防尘罩和垂向升降式卸料通道。

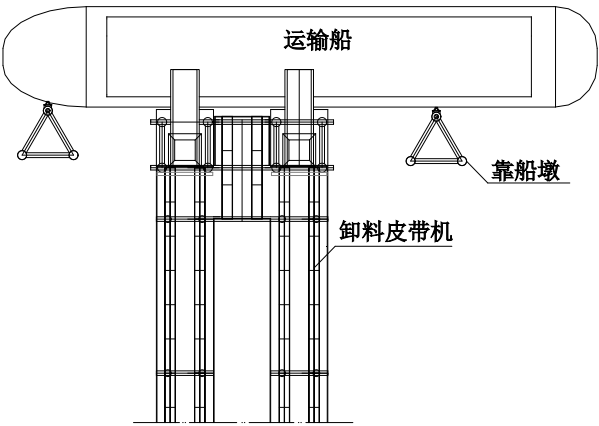


图 4 临时码头平面示意

Fig.4 Plan of temporary wharf

3.2 基坑水力冲挖造浆

根据船闸基坑开挖设计断面和范围，测量放出水力冲挖的基坑边线，准确控制开挖范围以免超挖。

通过 110kW 抽水泵及增压泵将清水由蓄水池输送到冲挖地点，输水管道通过分水管将 $\phi 300$ 水管分成多个 $\phi 65$ 软管，每个软管端头配 1 把高压水枪，压力约为 2MPa。由工人操作水枪对准需冲挖的土体将砂土切斜、粉碎，配制成 1:1（水与砂土体积比）泥砂混合浆液（见图 5）。

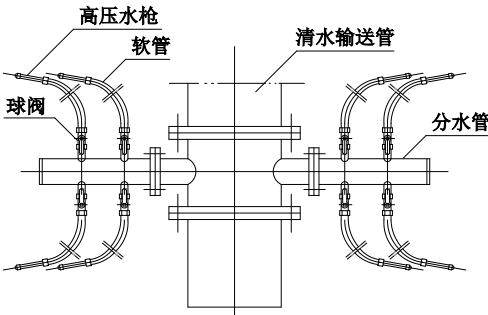
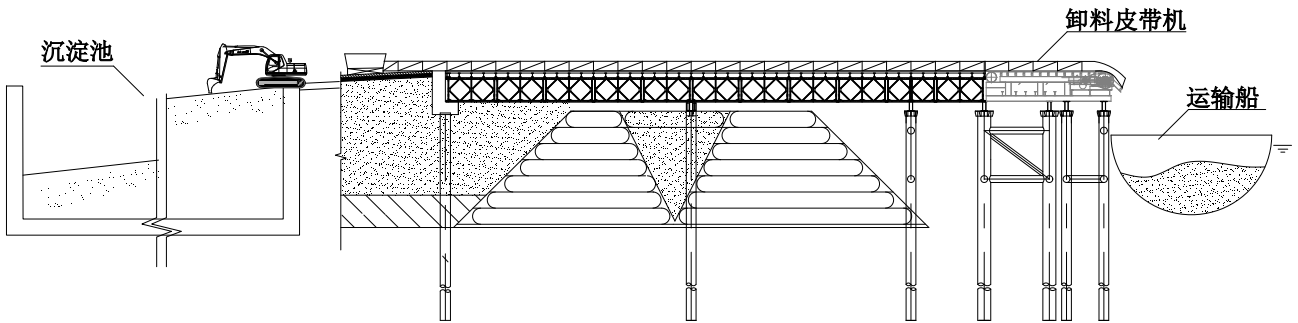


图 5 供水管道端头结构布置

Fig.5 Layout of water supply pipeline end structure



本工程采用分段分层的台阶法进行冲挖，分段长度为 40m、厚度为 3m，分段分层开挖过程中先进行基坑中心位置的水力冲挖作业，然后向四周扩大作业范围。

在冲挖作业过程中，由于水力冲挖的边线及底标高难以控制，稍有不慎便会出现部分区域超挖情况，为防止边坡超挖影响其稳定及基底超挖影响基槽质量，在基坑两侧需留出约 3m 进行机械修坡，基坑底预留约 1m 进行机械开挖，施工过程中，测量人员需经常测量开挖边线及高程以防止超挖。

3.3 泥砂远距离泵送

水力冲挖前在基坑开挖位置先用挖掘机开挖 1 个 10m×10m×2m 基坑，在基坑内设置 1 台 160kW 的大功率泥浆泵，泥浆泵与 $\phi 400$ 主管道连接，主管道通过三通分成 2 根 $\phi 300$ 管道，形成 2 条泥浆泵送路线，提高效率。泥浆泵快速将水力冲挖转化成的泥砂浆液吸至管道内，通过增压泵泵送至口门导堤围堰处三级沉淀池的第一级沉淀池内。

水力冲挖配制的泥浆液是通过 160kW 泥浆泵进行泵送运输，在泥浆泵送过程中需控制泥浆以外杂物靠近泥浆泵，如有杂物被吸入泥浆泵，需立刻切断泥浆泵电源，进行清理和维护，防止泥浆泵损坏而影响冲挖效率。

3.4 泥浆沉淀与沉淀水循环利用

泥砂浆液依次通过三级沉淀池，析出的泥砂沉淀在各级沉淀池底部，实测土体的含水率及天然密度，当满足含水率为 12%~15%、天然密度为 1.4~1.5 t/m³ 时可装船外运。

泥浆经三级沉淀后，排出的清水泵送至蓄水池循环利用。基坑冲挖完成后，蓄水池中的水经检测符合排放标准后排入江中。

3.5 泥砂转运与水路外运

泥砂浆液在沉淀池内沉淀固结，通过挖掘机将泥砂转运至连接皮带机的料斗内，由皮带机输送至停靠在临时码头的运输船，然后运输至弃土点（见图 6）。

图 6 沉淀渣土转运示意
Fig.6 Sediment muck transportation

4 新工艺工效与经济性

按下闸首区域水力冲挖出土效率与上闸首机械开挖出土效率比较(均按每日工作 10h 计算):下闸首水力冲挖施工过程中投入 20 台泥浆泵,每台泥浆泵工效为 30m³/h, 每台泥浆泵每天完成 300m³, 除去泥浆中的含水量, 每天完成 4 500 m³的吹填施工。

上闸首机械开挖施工过程中投入 2 台 2m³挖掘机和 1 台 1 m³的挖掘机。挖掘机每小时生产率公式如下:

$$P=(3600/t) \times Q \times (K_c / K_s) \times K_b \quad (1)$$

式中: Q 为挖掘机斗容量 (m³); K_c 为挖土机土斗充盈系数, 可取 0.95; K_s 为土的最初可松动系数, 取 1.2; K_b 为挖土机工作时间利用系数, 取 0.8; t 为挖掘机每一工作循环延续时间 (s), 取 25s。

则 1 台 2m³挖掘机生产率 $P=(3600/25) \times 2 \times (0.95/1.2) \times 0.8=182.4\text{m}^3/\text{h}$; 1 台 1m³挖掘机生产率 $P=(3600/25) \times 1 \times (0.95/1.2) \times 0.8=91.2\text{m}^3/\text{h}$ 。

根据生产率得出每天的理论出土方量为 $(2 \times 182.4 + 2 \times 91.2) \times 10=5472\text{m}^3$, 由于在人员密集的市区土方运输车辆通行时间受到严格限制, 运输效率低下。周边消纳场地无法满足出土量要求, 需寻找远距离消纳地, 每天的运输能力实际只能达到约 3 000 m³。

水力冲挖不同于机械开挖, 施工均在场内, 距离附近居民区较远, 施工噪声小, 不受时间限制, 每天可施工 15~16h, 其工效将达到机械开挖的 2.25 $(4500 \times 1.5 \div 3000)$ 倍。

采取新工艺施工, 降低了初期降水费, 降低了车辆租赁费、油耗等。经综合计算分析, 本工程降低成本 4930 万元。

5 新工艺适用范围与优点

“大型船闸基坑低碳环保水力施工新工艺”适用于粉砂地质下土方量大的深基坑开挖、河道疏浚等。相对于基坑机械开挖与陆上运输工艺, 该成套工艺优点总结如下。

1) 新工艺施工效率高, 受外界环境限制少, 水力冲挖通过大功率泥浆泵抽砂, 管道在场内直接输送泥砂至沉淀池内, 所有输送管道均在红线施工区域内, 不受外界干扰; 基坑水路出土较陆上运输受制约因素少, 施工工效高, 为机械施工

的 2.25 倍, 工期更有保障。

2) 新工艺绿色环保, 对环境影响小, 水力冲挖全程采用水枪进行泥浆配制, 开挖过程中基坑均处于潮湿状态, 管道输送也无任何扬尘污染, 相对于机械施工, 极大地降低了施工扬尘, 也无渣土车运输产生的扬尘、噪声、尾气污染等问题, 绿色环保。特别是位于市区或市周边的项目, 临近居民区, 新工艺极大地减小对附近居民的影响。

3) 新工艺能耗低, 产生综合效益高, 常规机械开挖设备、车辆运输设备均耗费大量柴油, 能耗高。水力冲挖过程中只需提供现场水泵与泥浆泵的电力花费, 尤其在早期的水力冲挖作业中, 无须布置降水井降水, 降低了施工成本; 土方船舶运输较渣土车运输能耗低; 施工用水经沉淀后可循环使用, 资源耗费少。

6 结语

1) 大型船闸基坑低碳环保水力施工新工艺, 集基坑水力冲挖造浆、水泥浆远距离泵送、水泥浆三级沉淀、沉淀水体循环利用和渣土水路外运于一体, 实现了船闸基坑绿色、节能、高效施工。有效避免了采用常规机械开挖涉及装备多、噪声大、能耗高, 以及土方运输途经市区对环境、交通安全影响大和运输时间受限易影响工期等多项问题。

2) 大型船闸基坑低碳环保水力施工新工艺, 在京杭运河浙江段三级航道整治工程杭州段八堡船闸工程获得成功应用, 经测算降低成本 4 930 万元, 工效为机械施工的 2.25 倍, 具有显著的经济和社会效益, 对类似工程具有重要借鉴意义。

参考文献:

- [1] 邱晓军, 张亚. 特殊软基地层条件下闸室基坑开挖施工技术[J]. 水运工程, 2015(8): 84-86, 89.
QIU X J, ZHANG Y. Construction technology for excavation of gate chamber foundation pit under special soft foundation conditions. [J]. Port & waterway engineering, 2015(8): 84-86, 89.
- [2] 黄茂松, 王卫东, 郑刚. 软土地下工程与深基坑研究进展[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 146-161.
HUANG M S, WANG W D, ZHENG G. Research progress on soft soil underground engineering and deep foundation pits. [J]. China civil engineering journal, 2012, 45(6): 146-161.

[作者简介] 姚平, 总工程师, 高级工程师, E-mail: 30224908@qq.com

[收稿日期] 2023-09-18

[3] 国务院.“十四五”现代综合交通运输体系发展规划(国发〔2021〕27号)[Z].2021.

The State Council.Development plan of “14th Five-Year” modern comprehensive transportation system[Z].2021.

[4] 交通运输部.绿色交通“十四五”发展规划[Z].2021.

Ministry of Transport.Green transportation “14th Five-Year” development plan[Z].2021.

[5] 郑刚,颜志雄,雷华阳,等.基坑开挖对临近桩基影响的实测及有限元数值模拟分析[J].岩土工程学报,2007(5):638-643.

ZHENG G, YAN Z X, LEI H Y, et al. Measurement and finite element numerical simulation analysis of the impact of excavation of foundation pits on adjacent pile foundations [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2007(5): 638-643.

[6] 朱进军,邵勇,马庆华.水力冲挖技术在海相软土场地中的应用[J].施工技术,2016,45(16):118-121.

ZHU J J, SHAO Y, MA Q H. The application of hydraulic excavation technology in marine soft soil sites [J]. Construction technology,2016,45(16):118-121.

[7] 孙坚固,顾建明.浅滩疏浚水力冲挖清淤施工技术及应用[J].中国水能及电气化,2019(9):10-14.

SUN J G, GU J M. Construction technology and application of hydraulic flushing and dredging for shallow beach dredging [J] . China water power & electrification, 2019(9):10-14.