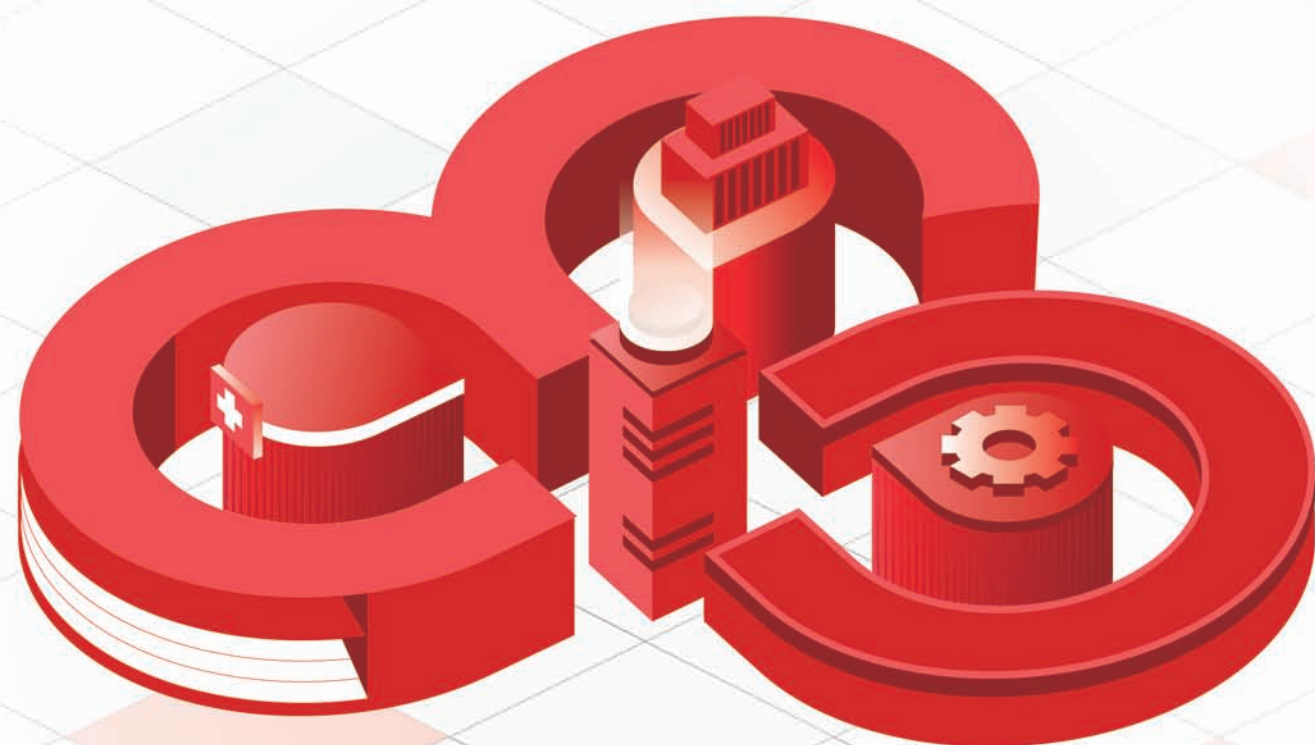




# 联通云

## 可信数智云



安全可靠 · 云网一体 · 专属定制 · 多云协同



WWW.CUCLOUD.CN  
扫码关注联通云

[ 期刊基本参数 ] CN 11-4446/TV\*1980\*m\*A4\*84\*zh\*P\*¥20.00\*17000\*16\*2022-10

广告

Vol.42 No.10 2022

ISSN 2097-0528  
CN 11-4446/TV

《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊  
《中文科技期刊数据库》收录期刊  
《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊  
《中国学术期刊网络出版总库》收录期刊  
《中国知识资源总库》收录期刊

2022 **10** 第42卷

# 水利建设与管理

WATER CONSERVANCY CONSTRUCTION AND MANAGEMENT

水利建设与管理

广告

二〇二二年 第四十二卷 第十期



河南省水利第二工程局集团有限公司

河口村水库工程

ISSN 2097-0528



国内邮发代号: 2-781  
定价: 20.00 元

中国水利工程协会主管  
Directed by China Water Engineering Association  
中国水利工程协会主办  
Sponsored by China Water Engineering Association



2019—2020年度中国水利工程优质（大禹）奖获奖工程展示

云南省牛栏江—滇池补水工程



2019—2020年度中国水利工程优质（大禹）奖获奖工程展示

宁夏固原地区城乡饮水安全水源工程





# 水利建设与管理

SHUILI JIANSHE YU GUANLI

原刊名 水利管理技术 (1980 年创刊)

月 刊

2022 年 第 42 卷 第 10 期

(总第 352 期)

2022 年 10 月 23 日 出版

主管单位 中国水利工程协会  
主办单位 中国水利工程协会  
编辑出版 《水利建设与管理》杂志社有限公司

主 编 安中仁  
副 主 编 任京梅 吴香菊  
责任编辑 吴晓玉

地 址 北京市西城区南滨河路 27 号小区  
7 号楼 11 层 1116 号(贵都国际中心 B 座 1116 室 编 1105)

邮 编 100055

网 址 www.sljsygl.com

在线投稿 www.sljsygl.com/home/login

邮 箱 water6346@163.com

联系电话 010-63305220 (发行)

010-63305239 (投稿)

010-63305258 (广告)

印刷单位 北京博海升彩色印刷有限公司

发行范围 公开发行

订 阅 全国各地邮局

国内发行 中国邮政集团公司北京市报刊发行局  
本刊发行部

国内邮发代号 2-781

国外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

国外发行代号 MO3713

广告发布登记 京西市监广登字 20170082 号

中国标准连续出版物号 ISSN 2097-0528  
CN 11-4446/TV

定 价 20.00 元

## 目次 2022年第10期

### 引汉济渭工程专栏

- 1 秦岭复杂地质环境隧洞 TBM 快速掘进技术研究  
鹿俊皓 王 江 柯贤博
- 8 黄金峡水利枢纽泵站厂房温控措施研究 董航凯 晏安平 唐 寅
- 16 监控量测技术在秦岭长隧洞中的应用技术研究  
齐国庆 王 亮 田 睿

### 特别策划

- 21 黄河上游干旱区祖厉河流域生态发展模式研究  
王小娥 魏 智 吴锦奎

### 科研设计

- 25 基于均衡法及数值模拟法的乔诺地下水库资源量论证计算  
王友年
- 32 西河泵站工程出水渠道优化设计  
付爱华
- 38 感潮河段适应水位变化自升降拦污设施应用研究  
孙超君 张宜亮 张 辉

### 工程施工

- 43 高原地区大坝基础振冲碎石桩施工研究  
赵如阳 贾洪波
- 48 地下水封洞库灌浆止水施工技术及应用  
吴 波 王 凯 郭 钊
- 52 膏浆灌浆技术在矿山酸水库大坝防渗工程中的应用  
王绍平 黄 磊 刘 兵
- 57 不良地质段地下厂房岩锚梁开挖技术探究  
王淑莹

### 建设管理

- 62 对进一步完善代建制管理的政策建议  
王诗祥 余智囊

### 运行管理

- 66 长距离输水管道水压试验方法及验收标准探析  
马志华
- 70 白蚁监测诱杀 IPM 技术在鲁班水库中的应用研究  
赵 川 肖 翔 罗思敏

## 工程检测

75 浅析基于分布式光纤传感的 PCCP 监测技术应用

孙 钰 封 皓 沙 洲

80 水下测量系统在预制构件安装定位中的研发与应用 徐立军

## 行业动态

• 9月16日,黑龙江林海水库开工建设。该工程是国务院部署实施的150项重大水利工程之一,也是今年重点推进的55项重大水利工程之一。工程位于海浪河上游,是一座以供水为主,结合防洪和灌溉,兼顾发电等综合利用的大Ⅱ型水库,总库容1.76亿立方米,配套电站装机容量22兆瓦,总工期48个月,总投资26.53亿元。

(来源:水利部网站,网址:[http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202209/t20220916\\_1595985.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202209/t20220916_1595985.html),日期:2022年9月16日)

• 9月13日,海南省牛路岭灌区工程开工建设。该工程是国务院部署实施的150项重大水利工程,也是2022年国务院确定的今年重点推进开工建设的6大灌区之一,总投资30.55亿元,建设工期50个月。

(来源:水利部网站,网址:[http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202209/t20220914\\_1595507.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202209/t20220914_1595507.html),日期:2022年9月13日)

## 宣传与广告

封面 河南省水利第二工程局集团有限公司

封二 云南省牛栏江—滇池补水工程

封三 宁夏固原地区城乡饮水安全水源工程

封底 中国联通

## 《水利建设与管理》

### 编 委 会

主 任: 孙继昌

副主任: 安中仁 任京梅

委 员 (按姓氏笔画排序)

王爱国 石小强 许文海 孙公新

李坤刚 张利新 陈明忠 宗敦峰

祖雷鸣 唐传利 董红元 蒲朝勇

### 本刊声明:

1. 本刊为公开发行人物,作者投稿须遵守国家有关保密的法律法规,并对此负完全责任。
2. 本刊刊发的文字、图片等所有内容,本刊拥有网络电子版权,未经许可不得转载。作者若有异议,请在来稿时声明。
3. 本刊已许可中国知网、万方数据、维普资讯、超星域出版、中邮阅读网及其系列数据库产品中,以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该著作权使用费及相关稿酬,本刊均用于作者文章发表、出版、推广交流(含信息网络)以及赠送样刊,即不再另行向作者支付。
4. 凡作者向本刊提交文章发表之行为即视为同意上述声明。



中国水利工程协会  
公众号



《水利建设与管理》  
杂志社公众号

# WATER CONSERVANCY CONSTRUCTION AND MANAGEMENT

Vol. 42 No. 10 2022

## CONTENTS

### **Special Column of Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project**

- 1 Study on TBM rapid tunneling technology of the tunnel with complex geological environment in Qingling  
LU Junhao, WANG Jiang, KE Xianbo
- 8 Study on the temperature control measure of pumping station house of Huangjinxia Water Conservancy Project  
DONG Hangkai, YAN Anping, TANG Yin
- 16 Research on application technology of monitoring and measuring technology in Qinling long tunnel  
QI Guoqing, WANG Liang, TIAN Rui

### **Special Planning**

- 21 Study on ecological development model of Zuli River Basin of arid area in the upper reaches of the Yellow River  
WANG Xiao'e, WEI Zhi, WU Jinkui

### **Scientific Design**

- 25 Demonstration calculation of resources in Qiaonuo Groundwater Reservoir based on equilibrium method and numerical simulation method  
WANG Younian
- 32 Optimal design of outlet flow channel of Xihe Pumping Station Project  
FU Aihua
- 38 Study on the application of self-lift trash interception facility adapting to water level changes in tidal reach  
SUN Chaojun, ZHANG Yiliang, ZHANG Hui

### **Project Construction**

- 43 Study on vibroflotation gravel pile construction of dam foundation in plateau area  
ZHAO Ruyang, JIA Hongbo
- 48 Construction technology and application of grouting and water stop for underground water-sealed cave depot  
WU Bo, WANG Kai, GUO Zhao
- 52 Application of paste grouting technology in anti-seepage project of mine acid reservoir dam  
WANG Shaoping, HUANG Lei, LIU Bing
- 57 Study on excavation technology of rock anchor beam of underground powerhouse in undesirable geological section  
WANG Shuying

### **Construction Management**

- 62 Policy recommendations for further improving the agent construction management  
WANG Shixiang, YU Zhinang

## Operation Management

- 66 Analysis of hydraulic pressure test method and acceptance standard for long-distance water conveyance pipeline  
MA Zhihua
- 70 Application of IPM technology for termite monitoring and trapping in Luban Reservoir  
ZHAO Chuan, XIAO Xiang, LUO Simin

## Engineering Inspection

- 75 Application of PCCP monitoring technology based on distributed optical fiber sensing  
SUN Yu, FENG Hao, SHA Zhou
- 80 Development and application of underwater measurement system in prefabricated component installation and  
positing  
XU Lijun

## 行业动态

● 9月16日,安徽省巢湖流域水生态修复与治理工程——十八联圩生态湿地蓄洪区工程开工建设。该工程是国务院部署实施的150项重大水利工程之一,也是今年重点推进的55项重大水利工程之一。工程主要建设内容分为蓄洪区建设和生态湿地修复两部分,其中蓄洪区建设工程包括新建进(退)洪闸1座,改建、新建排涝泵站,外河及保庄圩堤防加固,设计蓄洪库容1.09亿 $\text{m}^3$ ;生态湿地修复工程包括新建湿地总进水闸1座,修复13.6平方公里生态湿地等。工程总工期22个月,总投资9.72亿元。

(来源:水利部网站,网址:[http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202209/t20220916\\_1595988.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202209/t20220916_1595988.html),日期:2022年9月16日)

● 9月13日,水利部党组书记、部长李国英出席中共中央宣传部“中国这十年”系列主题新闻发布会,介绍党的十八大以来水利发展情况,并与相关司局负责人回答记者提问。中宣部对外新闻局局长、新闻发言人陈文俊主持发布会。

李国英指出,党的十八大以来,以习近平同志为核心的党中央高度重视水利工作。习近平总书记站在中华民族永续发展的战略高度,提出“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水思路,确立国家“江河战略”,擘画国家水网等重大水利工程,为新时代水利事业提供了强大的思想武器和科学行动指南,在中华民族治水史上具有里程碑意义。在习近平总书记掌舵领航下,在习近平新时代中国特色社会主义思想科学指引下,社会各界关注治水、聚力治水、科学治水,解决了许多长期想解决而没有解决的水利难题,办成了许多事关战略全局、事关长远发展、事关民生福祉的水利大事要事,我国水利事业取得历史性成就、发生历史性变革。

(来源:水利部网站,网址:[http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202209/t20220913\\_1595457.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202209/t20220913_1595457.html),日期:2022年9月13日)

# 秦岭复杂地质环境隧洞 TBM 快速掘进技术研究

鹿俊皓<sup>1</sup> 王江<sup>2</sup> 柯贤博<sup>1</sup>

- (1. 陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710024;  
2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

**【摘要】** 针对引汉济渭秦岭大埋深隧洞 TBM 施工段存在的高地应力、强耐磨性硬岩、常态化岩爆、长距离等复杂地质环境, 通过对 TBM 设备掘进模式选择及操作控制、超前地质预报、导向测量、姿态控制与调整等一系列技术措施进行研究, 提高了 TBM 设备在该类洞段施工的工效和适应能力, 实现了 TBM 快速施工。由此积累的施工技术可对今后类似的 TBM 施工有一定的参考意义。

**【关键词】** 大埋深; 地质环境; 模式选择; 姿态控制; 快速施工

中图分类号: TV672+.1

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)10-001-07

## Study on TBM rapid tunneling technology of the tunnel with complex geological environment in Qingling

LU Junhao<sup>1</sup>, Wang Jiang<sup>2</sup>, KE Xianbo<sup>1</sup>

- (1. Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Xi'an 710024, China;  
2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

**Abstract:** In view of the complex geological environment such as high ground stress, hard rock with strong abrasive resistance, normal rock burst and long distance existing in the TBM construction section of Qingling deep-buried tunnel of Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project, a series of technical measures such as TBM equipment tunneling model selection and operation control, advance geological prediction, guiding measurement, attitude control and adjustment are studied so as to improve the construction efficiency and adaptability of TBM equipment in such type of tunnel section and achieve rapid TBM construction. The accumulated construction technology can be used as a reference for similar TBM construction in the future.

**Keywords:** deep-buried; geological environment; model selection; attitude control; rapid construction

TBM 工法是一种快速、高效、安全、机械化程度很高的施工技术。它以 TBM 掘进为核心, 完成开挖、支

收稿日期: 2022-01-24

基金项目: 2016 年国家十三五重点研发计划“水资源高效利用专项”——高压水害等不良地质条件下深埋长隧洞施工灾害处治和成套技术研究(2016YFC0401805); 陕西省水利科技计划项目“复杂地质条件深埋长隧洞 TBM 掘进关键技术研究”(2017SLKJ-26)

作者简介: 鹿俊皓(1990—), 男, 本科, 主要从事水利水电工程施工过程管理。



护、渣土输送、地质预报等工作,被广泛地应用于矿山、铁路、城市地下空间、水利水电等工程领域。TBM掘进和传统的钻爆法相比,具有快速、安全、环保、高效等优点。我国于1997年从国外引入TBM设备,已在中天山、磨沟岭、西秦岭等隧洞工程施工中得到了应用,是国内隧道施工技术的一次重大飞跃<sup>[1]</sup>,很好地提升了隧道施工的机械化程度。但针对不良地质环境,TBM设备的掘进工效低,适应性相对较差,并由于TBM设备的施工措施不合理而产生重大事故,如我国台湾地区坪林公路隧洞工程、云南省掌鸠河输水工程的上公山隧道等<sup>[2]</sup>,大多数都是TBM设备通过复杂地质环境地段产生塌方、卡机等一些工程事故,严重影响工程的质量、安全、进度等。因此,对复杂地质环境下TBM掘进隧洞的施工关键技术研究特别重要。

引汉济渭秦岭大埋深隧洞是人类第一次从底部穿越秦岭,TBM施工段存在的高地应力、强耐磨性硬岩、高地温、常态化岩爆等复杂地质环境,综合施工难度堪

称世界第一。复杂的地质环境对TBM设备的掘进过程提出了较大的挑战。为了确保TBM设备安全顺利通过该地段,对TBM设备快速掘进的关键技术和应对措施的研究就特别重要。在施工过程中,通过对TBM设备掘进模式选择及操作控制、超前地质预报、导向测量、姿态控制与调整等一系列技术措施研究<sup>[3]</sup>,提高了TBM设备在该类洞段施工的工效和适应能力,实现了TBM快速施工。

## 1 工程概况

引汉济渭工程秦岭隧洞TBM掘进段位于陕西省宁陕县四亩地镇境内,工程自3号支洞进入主洞延伸段下游1942m开始,标段全长18.275km,施工桩号为K28+085~K46+360,采用一台由罗宾斯提供的 $\phi 8.02\text{m}$ 敞开式硬岩掘进机施工,TBM掘进段隧洞综合坡度 $-1/2472.555$ ,隧洞底部铺设仰拱块,采用皮带机出渣,具体段落划分见图1。

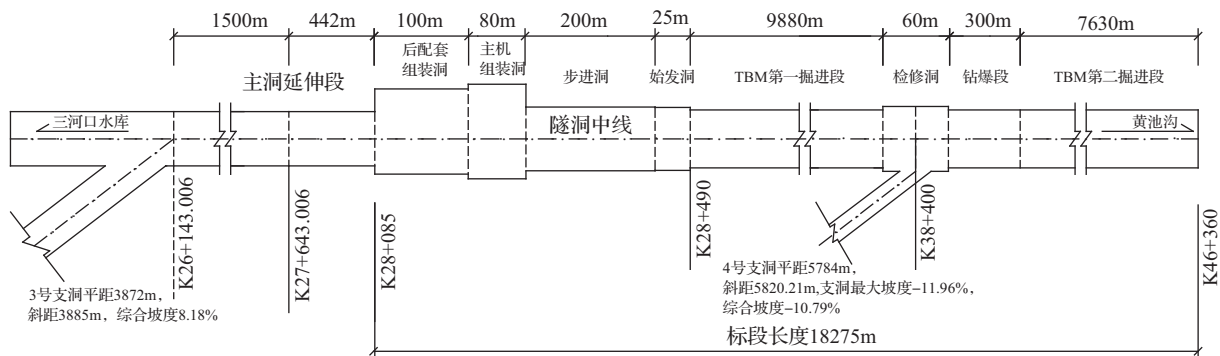


图1 工程平面布置

## 2 掘进模式选择及操作控制

若围岩较硬,掘进推力先达到额定值,此时应以推力变化为参照,选择掘进参数,控制推进压力不超过额定值;若围岩节理发育、裂隙较多或遇破碎带、断层带等情况时,主要以扭矩变化并结合推进力参数选择掘进参数。特别是在岩石软弱条件下一般采用扭矩和贯入度控制掘进,同时兼顾各种参数变化<sup>[5]</sup>。

变化的岩石条件反映在与TBM设备和掘进进度有关的各参数变化中,如刀盘主驱动电流增大一般表

明刀盘超载或刀盘前面出现松散孤石和破碎岩石;刀盘出渣超载一般表明工作面可能出现塌陷;刀盘旋转速度降低一般伴随刀盘主驱动电流增加或刀盘出渣超载;TBM贯入度降低总是表明异常的工作面条件;TBM撑靴油缸压力变化反映围岩变化;渣土碎块尺寸和数量参数为岩石条件变化提供信息;TBM皮带机工作压力高表明皮带机超载,可能正在非常破碎的岩体中开挖等。TBM主司机通过观察及时调整控制这些参数,同时,这些关键参数将被自动记录和存储,以便于随后的调取查询。



主控室是 TBM 的心脏,设备上 90% 的指令在主控室内操作,其内部安装有操作盘,显示仪(包括参数显示、仪表显示、故障显示、状态显示及指示等),PLC 系统、调向显示设备等。操作盘上有操作按钮及手柄,控制不同部位设备的运转。只有全面了解设备状态,掌握正确操作规则的人才能担当主司机。

a. 上机前操作要点。详细了解上一班运转情况及遗留问题,观察各仪表显示是否正常,检查风、水、电润滑系统的供给是否正常,观察分析围岩类别,选择合理的掘进参数,了解上一班开挖中线标高偏差和支护完成情况。

b. 掘进时的操作要点。启动主泵站,包括供水系统、通风除尘系统,选择刀盘的转速,依次启动皮带输送机,待主电机全部运转正常后,接合离合器转动刀盘,选择合理的掘进参数进行掘进,操作顺序不能更改,由 TBM 操作程序控制一大部分,其余则由 TBM 主司机控制,否则会损坏设备。

c. 停机时的操作要点。正常情况下的停机,应与掘进时的操作相反。先停止掘进,后退刀盘 2~3cm,让刀盘空转 1min 左右,停止刀盘转动,停止电机转动,停止皮带机运行,调整掘进方向,换步进行下一循环的作业。

d. 紧急情况下操作要点。发现刀具金属件损坏脱落,从皮带机上输出、卸渣斗出现故障,液压系统出现故障,脂润滑故障等,要立刻停止掘进,后退刀盘 2~3cm,立即停止刀盘转动,依次停止各系统的工作,对故障部位进行检查,最好不按紧急停机按钮,以免损坏设备。若遇紧急情况,如皮带机皮带断裂或危及人身安全,方可按紧急按钮。

### 3 采取超前地质预报探测前方围岩情况

TBM 掘进过程中将超前地质预报纳入施工工序管理,以第三方超前地质预报成果为依据,结合掘进参数、出渣情况和成洞质量对掌子面围岩作出较为准确的判断,从而为下一步掘进施工措施的选择提供可供借鉴的依据<sup>[6]</sup>。

TBM 施工超前地质预报一般有 TRT、TSP、HSP-T

水平声波超前地质预报系统探测,高分辨电法探测,红外探测,地质雷达等超前探测方式。本工程采用 TSP203 + 超前探测,结合超前地质素描、超前红外探水以及地质展示的方式来进行超前地质预报。TSP203 工作原理见图 2。每次探测长度大约可达 200m,但精度也会随距离的增加而有所降低。

在 TBM 掘进施工过程中,超前地质预报应连续无中断,在每次超前地质预报完成后,及时分析,提供预报成果,并根据预报成果拟定施工技术交底文件,下发到作业班组,以此来指导现场施工生产。在实际施工过程中,还应对预报成果进行检验,收集整理地质资料,并进一步分析,为超前地质预报的相关参数修正提供依据与基础,逐步提升其准确性。

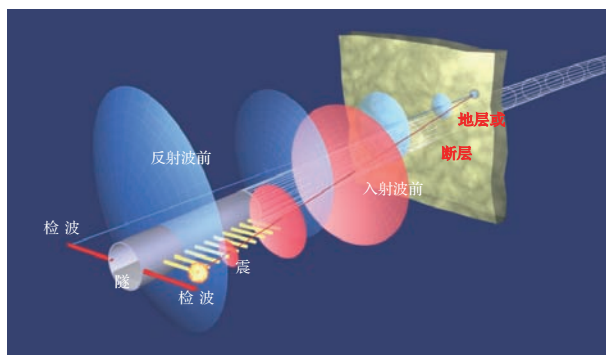


图 2 TSP 203 工作原理

## 4 TBM 掘进导向测量

### 4.1 导向系统简介

本工程采用演算工坊导向系统进行隧洞轴线控制。演算工坊导向系统是目前 TBM 掘进施工常用的导向系统之一,设计的目的是使 TBM 操作人员用最少的注意力获得最多的 TBM 位置信息。本套导向系统用三维空间坐标自动确定 TBM 确切的位置和方向,从而给 TBM 主司机提供 TBM 轴线相对于设计中线偏差所有必需的信息。同时,如果 TBM 偏离轴线,导向系统将随时给 TBM 主司机提供一个虚拟的设计行走线路,指导主司机及时调向使 TBM 回到设计轴线位置。

### 4.2 演算工坊导向系统的组成及其功能

a. 马达全站仪。全站仪是演算工坊导向系统的

主机。在系统计算机的控制下可以自动搜寻并测量后视棱镜完成自动定向洞轴线、测量 TBM 上的两个马达棱镜的定位以及高精度的双轴电动倾斜仪的正常工作状况。

**b. 倾斜仪。**在 TBM 前部有一个高精度的倾斜仪用来检测 TBM 的倾斜和滚动状况,并将检测数据传输到计算机控制系统中,通过倾斜及滚动改正,得出 TBM 准确的走向位置。

**c. 系统计算机。**系统计算机是演算工坊系统的控制单元,通过搜集马达全站仪测量的棱镜数据和倾斜仪的读数,准确地计算出 TBM 方位、倾斜和滚动值,并以图片和数据的形式提供给 TBM 主司机。

**d. 马达棱镜。**为了防止由于两个目标棱镜之间

相互干扰而产生测量错误,本系统采用的是两个马达棱镜,在系统的控制下它能交替地打开和覆盖,这样能确保无论什么时候只能单独测量一个棱镜,从而避免了由于二者相互干扰产生的测量错误。

**e. 数据传输电缆。**包括各仪器与系统计算机的连接线和信号传输线。

#### 4.3 演算工坊导向原理

为了获得 TBM 的位置和方向信息,至少需要确定 TBM 的两个点,并且还要测量出这两个点的三维坐标。这两个点是由安装在 TBM 前部的两个马达棱镜确定的,暂命名为 P1 和 P2 棱镜。而这两个棱镜相对于 TBM 机器轴线的相对位置固定不变,在 TBM 安装时确定。演算工坊导向原理见图 3。

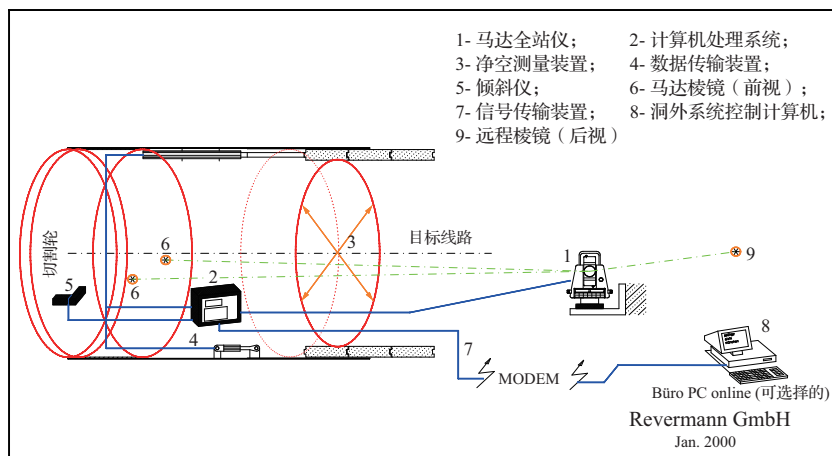


图3 演算工坊导向原理示意图

导向系统利用一个马达全站仪自动测量 P1 和 P2 棱镜。全站仪在开始测量这两个棱镜之前首先被定向(也就是测量作业时所说的后视),然后按顺序测量 P1 和 P2 棱镜坐标和高程,最后,系统计算机将测量数据连同倾斜仪采集的数据经过程序处理,直接把 TBM 机体姿态以图文的形式显示在计算机屏幕上。随着在掘进过程中 TBM 不断向前移动,TBM 机体的位置一直在发生变化,通过在不同时段测量出两个棱镜的三维坐标就很容易推算出 TBM 的实际掘进轴线。所以,TBM 实际轴线相对于设计轴线的竖向和水平偏差就很容易地计算出来并提供给 TBM 主司机。如果超出规定偏差,系统将自动计算并提供一个最优的投影路

径指导 TBM 回到设计中线位置,同时它还能提供必要的路径参数(如最小的转弯半径及有关轨迹的几何元素),方便主司机操作。

#### 4.4 搬站及测量

因马达全站仪固定在边墙上,随着 TBM 的不断向前推进,马达全站仪的前视距离不断增加,所测数据误差也相应增加,为了减少误差让演算工坊能相对稳定准确地反映 TBM 掘进姿态,每向前掘进一定距离(约 80m),就将马达全站仪向前传递以减小前视距离。搬站流程及注意事项如下:

**a. 搬站前**先记录下各测量数值,如刀盘偏差、坡度、滚动等。



b. 安装支架,用以安置马达全站仪,可利用喷浆机平台来安装。安装时保持支架的水平 and 稳固。

c. 测量新支架的施工坐标和标高。测量时必须以地面控制点为基准坐标进行测量和计算。

d. 在系统计算机中输入新的马达全站仪坐标和后视棱镜坐标,运行演算工坊软件,记录各测量数据,如果与之前数据相差值超标,应重新计算或测量相关数据。

#### 4.5 人工导向

人工导向是演算工坊导向系统的重要辅助措施,二者之间的导向原理基本一致,它是由测量人员通过用常规手段测量 P1、P2 棱镜来确定 TBM 的位置,以此来指导 TBM 主司机进行偏差调整。

a. 打开演算工坊系统程序的主页面,把系统由原自动测量模式改为手动测量模式。

b. 测量人员依照系统提示逐步进行测量,并将测量数据准确输入。

c. 测量完成后系统显示屏将显示 TBM 位置状态,主司机进行方向调整。

注意事项如下:

a. 人工导向的测量时机应该安排在循环掘进完之后、换步之前进行。

b. 导向时,TBM 必须停稳,处于绝对静止状态后方可进行测量;测量速度不仅要快,还必须准确。

c. 测量频率视岩石软硬情况而定,围岩较硬,调向效果明显,可选择 2 个循环导向一次;软弱围岩,调向相对困难,则必须 1 个循环导向一次。

### 5 TBM 掘进

TBM 掘进时根据地质预报及现场对围岩的观察,确定掘进模式和掘进参数调整范围,适时调整掘进推力、撑靴压力、刀盘转速和循环进尺,在尽量保护设备和安全的前提下实现快速掘进。在掘进过程中,根据隧洞测量导向系统显示的掘进偏差适当地进行方向调整。TBM 施工集开挖、支护于一体,两者可平行作业。其掘进流程见图 4。

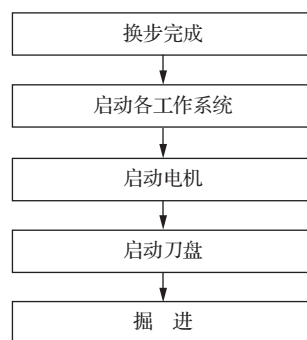


图 4 TBM 掘进流程

#### 5.1 换步、主机姿态调整

当主推进油缸达到最大掘进行程时,TBM 需要停机换步。此时刀盘停止转动,放下后支撑和刀盘底护盾支撑,将撑靴慢慢收回并前移一个行程,撑靴前移到位后再次撑紧岩壁并收回后支撑和底护盾支撑,最后通过操作后配套伸缩油缸牵引后配套走行一个循环。TBM 换步操作流程见图 5。

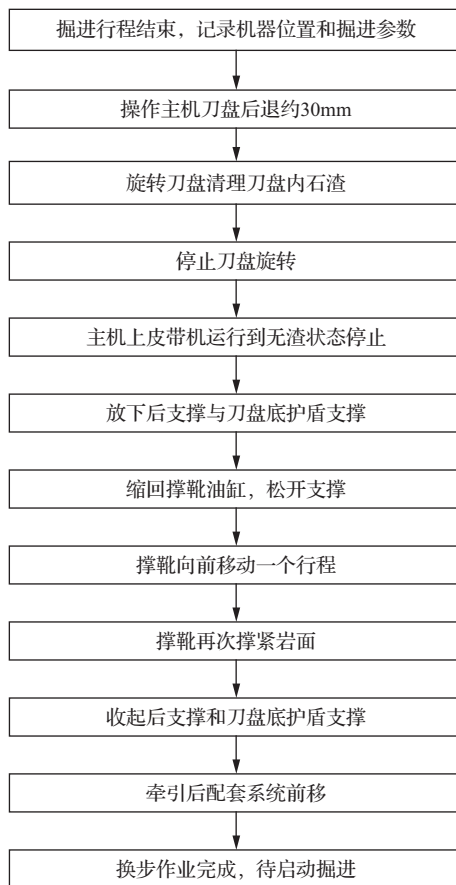


图 5 TBM 换步操作流程

在TBM掘进的同时,进行初期支护和相关配套作业。当刀盘向前掘进1.8m时,完成一个循环的掘进。TBM掘进与换步步骤如下:①撑紧撑靴,收起后支撑,见图6;②刀盘旋转,开始掘进推进,见图7;③掘进行程完成后,进行换步,放下后支撑,见图8;④收回水平撑靴,前移撑靴,再撑紧水平撑靴,进行下一掘进循环,见图9。

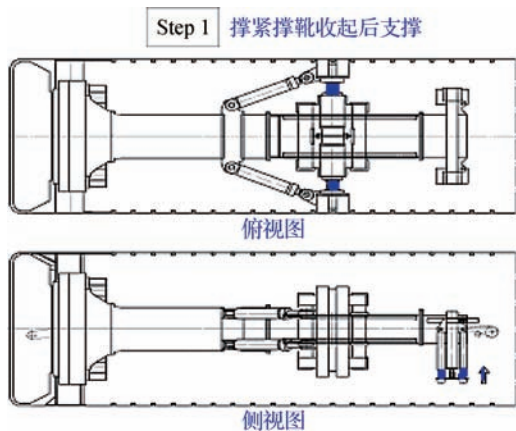


图6 TBM 掘进准备

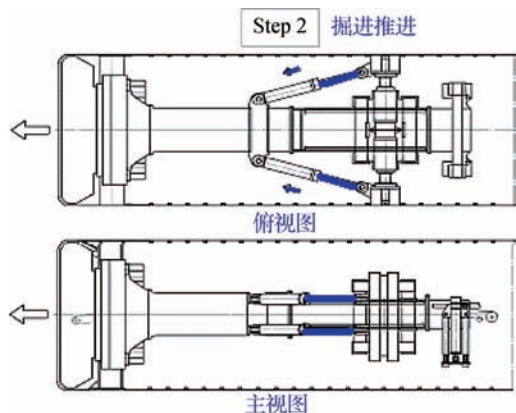


图7 TBM 掘进

TBM在进行换步作业时,根据测量导向系统电脑屏幕显示的主机位置数据进行TBM姿态调整,完成对主机掘进方向和主机滚动值的调整,使TBM以合理的姿态工作。

## 5.2 TBM掘进姿态控制与调整

由于地层软硬不均以及操作等因素的影响,TBM推进不可能完全按照设计的隧洞轴线前进,而是会产生一定的偏差。TBM施工中必须采取有效技术措施

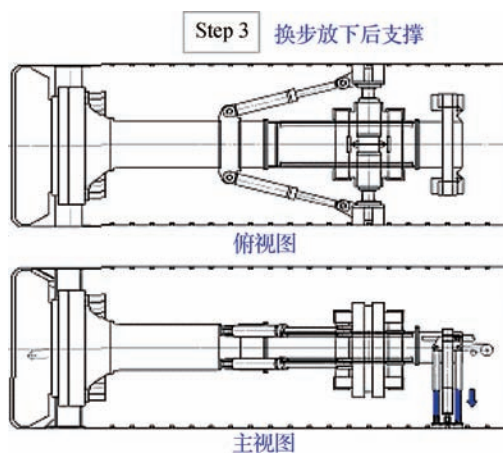


图8 TBM 换步准备

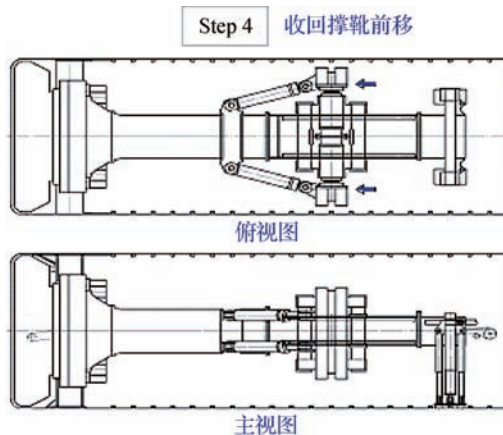


图9 TBM 换步

控制掘进方向,使掘进偏差处于质量标准允许的范围(隧洞设计轴线水平方向 $\pm 100\text{mm}$ 、竖直方向 $\pm 60\text{mm}$ )之内。

水平单撑靴掘进机方向控制工作原理为:根据测量导向系统显示的掘进机位置及方位,随时调整掘进机掘进方向,单撑靴敞开式掘进机的掘进方向在掘进过程中可随时调整,掘进机以刀盘护盾为支点,通过调整主梁的左右上下位置来完成。如需要向左方掘进时,左侧支撑油缸伸出,右侧支撑油缸收回,主梁向右移动,改变掘进方向。如需要上下调整时,可以调整倾斜油缸控制主梁的上下。因此隧洞的方向在掘进过程中随时可以调整,隧洞中心是一条连续的曲线,保证掘进方向可控。其方向控制原理见图10。

## 5.3 TBM姿态监测

TBM姿态监测是控制TBM掘进方向的唯一有效



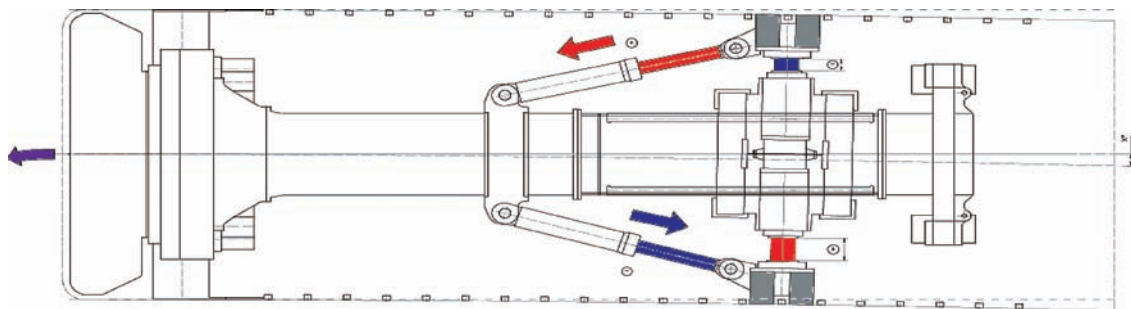


图 10 掘进方向控制原理示意图

方法和手段。岭南 TBM 姿态监测系统拟配备一套演算工坊自动导向系统。该系统配置了导向、自动定位、掘进计算程序软件和显示器等,能够全天候地动态显示 TBM 当前位置与隧洞设计轴线的偏差以及预测在当前状态下一定距离的偏差趋势。

#### 5.4 TBM 姿态方向的控制与调整

a. 在掘进过程中主要进行 TBM 的中线控制,当完成一个掘进循环后,在掘进过程中,对主机的倾斜和滚动值进行调整控制,纠正偏差。

b. 为确保边刀不受损伤,每次调向的幅度不应太大,在更换完边刀的第一个掘进循环中不宜进行调向作业。

c. 当 TBM 出现下俯时,通过调整上下油缸,增大主机的坡度,反之,则减小主机坡度。

d. 水平方向纠偏主要是通过调节水平支撑的油缸伸缩量进行调整。

e. 方向控制及纠偏注意事项。根据掌子面地质情况应及时调整掘进参数,防止 TBM 突然“低头”,方向纠偏时应缓慢进行,如修正过急,会对设备产生不利影响,TBM 始发、贯通时方向控制极其重要,应按照始发、贯通掘进的有关技术要求,做好测量定位工作。

## 6 结 语

针对引汉济渭秦岭大埋深隧洞 TBM 施工段存在的高地应力、强耐磨性硬岩、常态化岩爆、长距离等复杂地质环境,通过查阅相关资料、组织调研国内外目前 TBM 掘进的施工案例、专家咨询研判和结合现场施工现状,对岭南 TBM 设备掘进模式选择及操作控制、超

前地质预报、导向测量、姿态控制与调整等一系列掘进施工技术进行研究和不断地改进优化,提高了 TBM 设备在该类洞段施工的工效、适应能力和刀盘的贯入度,并在现场进行实际应用论证。有效地规避了岭南 TBM 在复杂地质环境下掘进过程中出现长时间的停机现象,对加快现场施工进度、缩短工期、减小工程成本都具有很大的意义,同时可为类似工程隧洞 TBM 掘进施工起到一定的借鉴作用。◆

#### 参考文献

- [1] 张军伟,梅志荣,高菊茹,等. 大伙房输水工程特长隧洞 TBM 选型及施工关键技术研究[J]. 现代隧道技术,2010,47(5):1-10.
- [2] 陈琼,陈恩瑜. 高地应力条件下隧道 TBM 施工岩爆分析[J]. 人民长江,2016,47(7):64-67.
- [3] 刘国庆. 木寨岭隧道软岩大变形段支护措施研究[J]. 现代隧道技术,2011,48(4):135-141.
- [4] 赵志强. 秦岭引水隧洞 TBM 施工段岩爆预防与治理[J]. 西部探矿工程,2016,28(10):170-172.
- [5] 吴数伟,张建海,张学品,等. 锦屏电站左岸导流洞局部围岩失稳有限元分析[J]. 四川水力发电,2005,47(6):124-127.
- [6] 刘国柏. TBM 穿越河谷施工技术研究[J]. 水利建设与管理,2016,36(10):16-18.
- [7] 王新,晏安平,王博. 超长隧洞 TBM 施工降温降湿技术研究[J]. 水利建设与管理,2020,40(11):68-73.
- [8] 郭放. TBM 扩大洞室及交叉段围岩稳定数值分析[J]. 水利建设与管理,2018,38(6):46-51.
- [9] 李静. 大伙房水库输水工程 TBM 洞内拆卸方案设计[J]. 水利建设与管理[J],2015,35(9):24-27.
- [10] 王明友,潘长城,金峰. 双护盾 TBM 自密实回填快速支护施工技术及应用[J]. 水利建设与管理,2020,40(6):30-33.



# 黄金峡水利枢纽泵站厂房温控措施研究

董航凯<sup>1</sup> 晏安平<sup>1</sup> 唐寅<sup>2</sup>

(1. 陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710024;  
2. 中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310004)

**【摘要】** 在泵站厂房坝段大体积混凝土施工和运行期间,温控措施是防止裂缝产生的有效手段。本文以黄金峡水利枢纽泵站厂房坝段为例,基于 ANSYS 有限元软件模拟泵站厂房坝段施工过程。考虑施工进度以及热力学参数,针对无温控、仅保温以及保温+通水冷却三种措施开展温度场与应力场模拟研究。结果表明:仅保温措施对大坝表面及流道附近混凝土的抗裂能力提升幅度高;保温+通水冷却措施可有效缓解由温差产生的应力问题,且满足大体积混凝土容许应力要求。此研究成果对类似工程的温控设计具有参考意义。

**【关键词】** 大体积混凝土;黄金峡水利枢纽;泵站厂房;温控;有限元模拟

中图分类号: TV544+.91

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)10-008-08

## Study on the temperature control measure of pumping station house of Huangjinxia Water Conservancy Project

DONG Hangkai<sup>1</sup>, YAN Anping<sup>1</sup>, TANG Yin<sup>2</sup>

(1. Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Xi'an 710024, China;  
2. Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou 310004, China)

**Abstract:** During the construction and operation process with mass concrete in the dam section of the pumping station house, temperature control measure is an effective way to prevent cracks. Taking the dam section of the pumping station house of Huangjinxia Water Conservancy Project as an example, this paper simulates the construction process of the dam section of the pumping station house based on ANSYS finite element software. Considering the real construction progress and thermodynamic parameters, the simulation study of temperature field and stress field is carried out for three temperature control measures, namely, no temperature control, thermal insulation only and thermal insulation plus water cooling. The results show that the thermal insulation measure can greatly improve the crack resistance of concrete near the dam surface and flow channel. Thermal insulation plus water cooling measure can effectively alleviate the stress caused by temperature difference and meet the allowable stress requirements of mass concrete. The research results have referential significance for the temperature control design of similar projects.

**Keywords:** mass concrete; Huangjinxia Water Conservancy Project; pumping station house; temperature control; finite element simulation



黄金峡水利枢纽是陕西省引汉济渭工程主水源地<sup>[1]</sup>。黄金峡水利枢纽泵站厂房坝段大体积混凝土受内外温差、温度最大降幅等多种因素影响,极易产生应力集中,导致裂缝发生<sup>[2-3]</sup>。因此,需针对泵站厂房坝段大体积混凝土温度应力及其控制标准开展深入研究<sup>[4]</sup>,分析不同温控措施下,大体积混凝土在施工期和运行期的温度应力分布规律<sup>[5]</sup>。在大体积混凝土领域,低热混凝土<sup>[6]</sup>、热带地区混凝土<sup>[7]</sup>、碾压混凝土<sup>[8]</sup>等相关研究表明温控措施是重要的防裂手段<sup>[9]</sup>;冷却水管和表面保温是目前泵站厂房坝段大体积混凝土温控防裂最主要的技术方案<sup>[10-11]</sup>。本文基于 ANSYS 有限元软件建模<sup>[12-13]</sup>,结合大体积混凝土温度应力计算原理<sup>[14]</sup>,在黄金峡水利枢纽泵站厂房坝段针对无温控、仅保温以及保温+通水冷却三种措施开展仿真计算分析<sup>[15]</sup>,给出泵站厂房坝段大体积混凝土温度场和应力场变化规律<sup>[16]</sup>,分析混凝土抗裂能力变化,为实际工程提供参考<sup>[17]</sup>。

## 1 大体积混凝土温度场计算原理

### 1.1 温度场及应力场基本原理

温度场分析的基本方程为

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (1)$$

式中: $a$ 为混凝土的导温系数, $\text{m}^2/\text{h}$ ;  $T$ 为表温度,表示温度场中某坐标处的温度,是关于时间 $\tau$ 以及空间变数 $(x, y, z)$ 的函数; $\tau$ 为时间, $\text{h}$ ;  $\theta$ 为水泥硬化过程中产生的混凝土的绝热温升, $^{\circ}\text{C}$ 。

在计算复杂应力状态下的整体应变增量时,考虑四种不同的应变增量综合作用影响,见式(2)。在考虑应力随时间变化关系时,将时间划分成等间隔时段,假设在每一时段应力随时间线性变化,以此减少计算量,见图1。

由于应力是以时间为自变量的增函数,在时段 $\Delta\tau_n$ 内,总应变增量为各类应变增量之和,可通过下式计算:

$$\Delta\varepsilon_n = \Delta\varepsilon_n^e + \Delta\varepsilon_n^c + \Delta\varepsilon_n^T + \Delta\varepsilon_n^0 \quad (2)$$

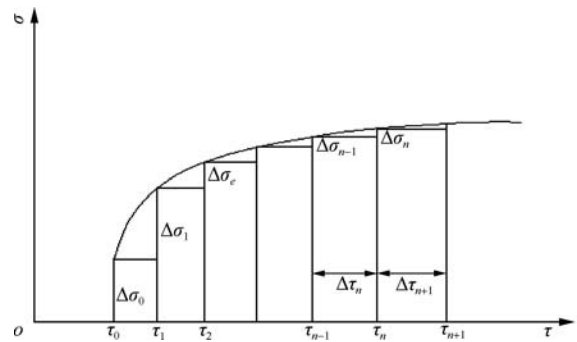


图1 应力随时间增量图

式中: $\Delta\varepsilon_n$ 为总应变的增量列阵; $\Delta\varepsilon_n^e$ 为弹性应变的增量列阵; $\Delta\varepsilon_n^c$ 为徐变应变的增量列阵; $\Delta\varepsilon_n^0$ 为自生体积应变的增量列阵; $\Delta\varepsilon_n^T$ 为温度应变的增量列阵。

### 1.2 水管冷却的等效算法温度场基本理论

冷却水管实际上可以看成热汇,当平均考虑全长为 $L$ 的水管管段的冷却效果时,混凝土平均温度的计算公式如下:

$$\Phi(\tau) = \frac{T_m - T_w}{T_0 - T_w} \quad (3)$$

式中: $T_0$ 为冷却开始时混凝土初始温度; $T_w$ 为水管进口处的水温; $T_m$ 为沿水管全长 $L$ 的管段混凝土平均温度; $\Phi(\tau)$ 为系数,其取值与混凝土冷却时间以及冷却水管参数有关。

由式(3)得到

$$T_m = T_w + \Phi(\tau)(T_0 - T_w) \quad (4)$$

式(3)和式(4)中的 $\Phi(\tau)$ 可由下式计算:

$$\Phi(\tau) = e^{-P\tau} \quad (5)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} P &= k_1 \left( \frac{\alpha}{D^2} \right)^s \\ k_1 &= 2.08 - 1.174\zeta + 0.256\zeta^2 \\ S &= 0.971 + 0.148\zeta - 0.044\zeta^2 \\ \zeta &= \frac{\lambda L}{c_w \rho_w q_w} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $a$ 为混凝土导温系数; $\lambda$ 为混凝土导热系数; $D$ 为等效圆柱体外半径; $c_w$ 为冷却水的比热; $\rho_w$ 为冷却水的密度; $q_w$ 为冷却水的流量。



## 2 工程概况及模拟方案

### 2.1 工程概况

黄金峡水利枢纽为混凝土重力坝,河床式泵站,泵站厂房坝段采用大体积混凝土浇筑,高程 413.5m 以下结构采用 C<sub>28</sub>25F<sub>150</sub>W<sub>8</sub>(三)一期混凝土;高程 413.5m 以上采用 C<sub>28</sub>30F<sub>150</sub>W<sub>8</sub>(二)一期混凝土。电站、泵站坝段位于左岸,左侧接左岸非溢流坝段,右侧连接厂坝导墙,由 1 个安装场段和 3 个机组段组成。

选取黄金峡 5 号和 6 号泵站厂房坝段建模,见图 2。模型单元总数 232243 个,节点总数 151410 个。模型计算采用残留比法,温度边界为地基表面,底部及侧面为绝热边界,从浇筑日期向前推算 30 年开始地基温度场计算,获取浇筑日地基温度。

### 2.2 模拟方案

5 号和 6 号泵站厂房坝段尺寸下部小,上部大(厚 3m)。黄金峡泵站电站进度计划见表 1。机组施工进度见图 3。按照施工进度,在黄金峡水利枢纽泵站厂房坝段针对无温控、保温以及保温+通水冷却三种措施开展仿真计算,分析坝体温度和应力变化规律。

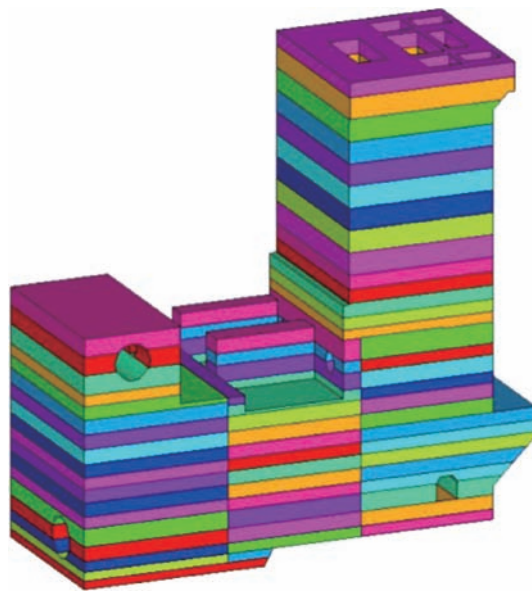


图 2 整体计算模型

保温材料参数按下式计算:

$$\beta = 21.06 + 17.58v_a^{0.910} \quad (7)$$

式中: $v_a$ 为风速,m/s,根据经验取年均风速 1.2m/s。

根据文献[5],基础约束区混凝土内埋设的冷却水管的间距一般为 1.5m(水平)×1.5m(浇筑层厚),基础强约束区水平间距加密至 1.0m,对于 2.0m 以上层厚增加一层水平间距 1.5m 的冷却水管。

表 1 黄金峡泵站电站进度计划

作 业 名 称	预定工期/d	工程量	最早开始/ (年-月-日)	最晚开始/ (年-月-日)	最早完成/ (年-月-日)	最晚完成/ (年-月-日)
HJX.1 泵站 5~6 号机组	397		2020-12-20	2020-12-24	2022-01-20	2022-05-31
具备桥机轨道梁安装条件	0	1 项			2021-12-07	2022-05-31
Ⅲ 高程 442.0m~屋顶	14	1 项	2021-12-07	2022-05-16	2021-12-21	2022-05-31
Ⅲ 高程 424.97~442.0m	28	300m <sup>3</sup>	2021-11-09	2022-04-18	2021-12-07	2022-05-16
Ⅲ 高程 417.8~424.97m	30	2270m <sup>3</sup>	2021-10-10	2022-03-19	2021-11-09	2022-04-18
检修闸门安装及二期混凝土	31	1	2021-12-20	2022-01-28	2022-01-20	2022-03-01
Ⅲ 高程 404.5m 以下	39	5460m <sup>3</sup>	2020-12-20	2020-12-24	2021-01-28	2021-02-01
5~6 号机扬水总管安装	48	1	2021-08-23	2021-08-27	2021-10-10	2021-10-14
I、Ⅱ 高程 408.0m 以下	70	9000m <sup>3</sup>	2020-12-20	2020-12-24	2021-02-28	2021-03-04
Ⅲ 高程 404.5~417.8m	78	6600m <sup>3</sup>	2021-05-31	2021-06-04	2021-08-17	2021-08-21
I 高程 429.0~455.0m	136	9430m <sup>3</sup>	2021-08-06	2021-09-14	2021-12-20	2022-01-28
I、Ⅱ 高程 408.0~429.0m	159	18700m <sup>3</sup>	2021-02-28	2021-04-08	2021-08-06	2021-09-14



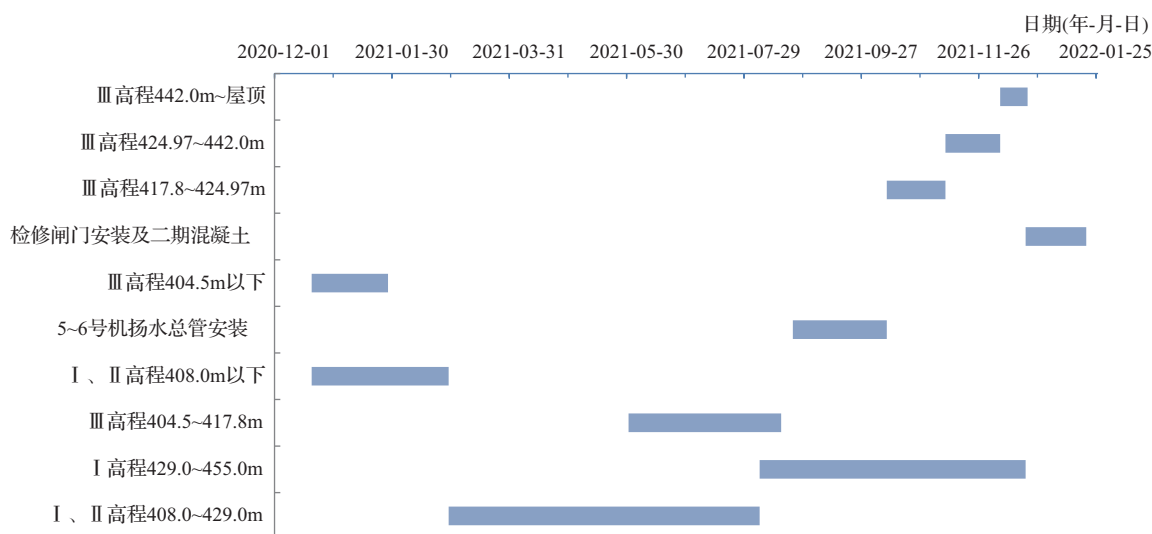


图3 5号和6号泵站机组施工进度

### 3 温度场和应力场分析

#### 3.1 温度场分析

##### 3.1.1 无措施下泵站厂房坝段仿真分析

图4为泵站厂房坝段混凝土浇筑完毕10天(729d)时的坝体温度分布图。坝体浇筑完成日期为2021年12月30日,处于低温季节,坝体混凝土表面温度为 $5.2^{\circ}\text{C}$ 左右。厂房坝段基础强约束区的混凝土温度为 $15.7\sim 16.4^{\circ}\text{C}$ ;厂房坝段基础弱约束区的混凝土

温度为 $12.4\sim 18.5^{\circ}\text{C}$ ;厂房坝段脱离约束区的下游侧混凝土温度为 $21.4\sim 33.7^{\circ}\text{C}$ 。厂房坝段混凝土的温度整体高于下游侧泵站总出水管附近混凝土的温度。原因是前者于高温季节浇筑,而后者混凝土浇筑时间是10—11月,且出水管道加大了混凝土的散热面。脱离约束区的上游侧混凝土温度为 $8.5\sim 13.3^{\circ}\text{C}$ ,温度较上游侧更低,原因是上游侧闸门井和流道增加了混凝土的散热能力。

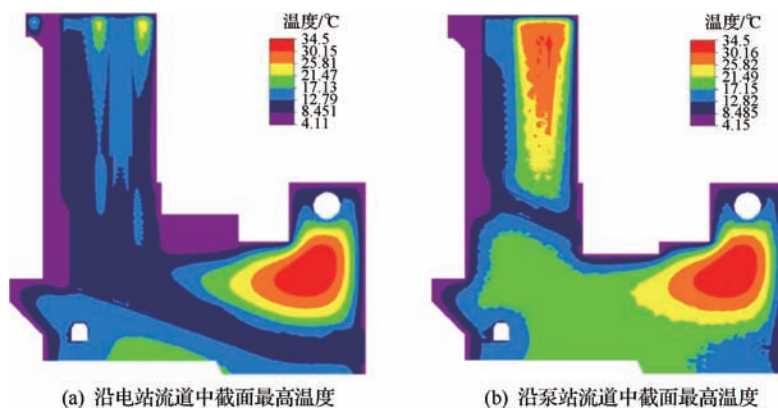


图4 泵站厂房坝段混凝土浇筑完毕10天(729d)时的坝体温度分布

泵站厂房坝段内部最高温度分布见图5。坝体内部峰值温度能够达到 $43.1^{\circ}\text{C}$ 左右,大部分区域混凝土最高温度为 $18.2\sim 30.0^{\circ}\text{C}$ ,且主要分布在2020年6—8月浇筑的下游侧高程 $408\sim 416\text{m}$ 的坝体混凝土处。厂房坝段大体积混凝土散热能力较差是产生温度分布的

主要原因。其他混凝土最高温度较高区域有:坝体上游侧高程 $396\sim 399\text{m}$ 的廊道下游侧(基础弱约束区上游侧)混凝土,最高温度达到 $38.7^{\circ}\text{C}$ ;坝体上游侧高程 $421\sim 436\text{m}$ (脱离基础约束区上游侧)混凝土,最高温度达到 $37.1\sim 41.1^{\circ}\text{C}$ 。

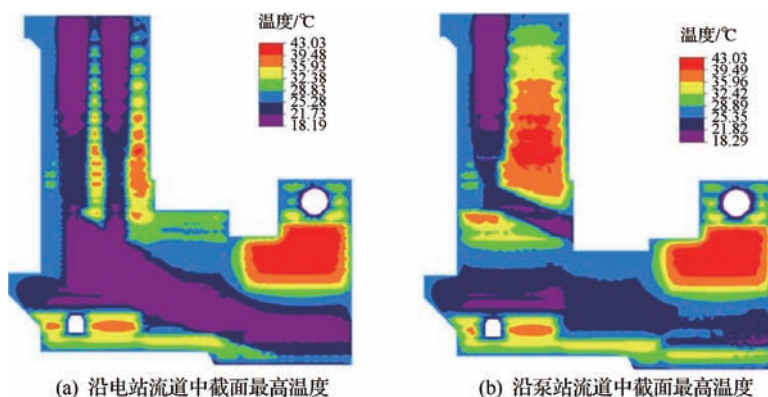


图5 泵站厂房坝段内部最高温度分布

### 3.1.2 保温和保温 + 通水冷却措施下泵站厂房坝段仿真分析

泵站厂房坝段混凝土在不同温控措施下内部最高温度分布见图6和图7。仅采取保温措施后,混凝土最高温度与无措施工况相比,增加了 $2.8^{\circ}\text{C}$ 左右;下游侧

大体积混凝土表面最高温度,较无措施工况增加了 $2.2^{\circ}\text{C}$ 。采取保温 + 通水冷却措施后,混凝土的最高温度较仅采取保温措施工况减少了 $4.6^{\circ}\text{C}$ ;下游侧大体积混凝土表面最高温度,较仅采取保温措施工况减少了 $0.4 \sim 2.2^{\circ}\text{C}$ 。

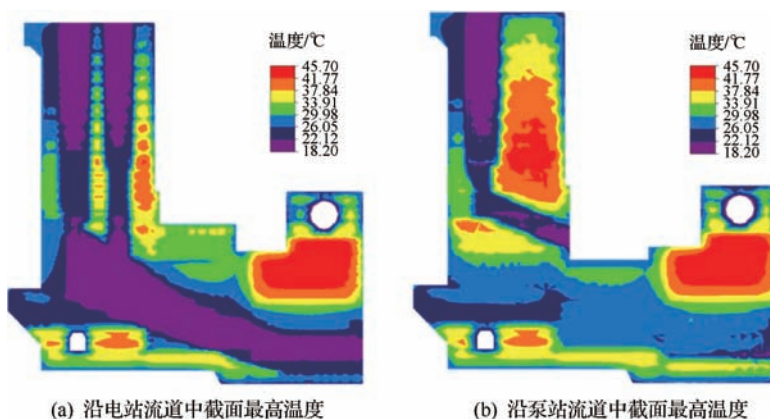


图6 保温措施下坝体混凝土内部最高温度分布

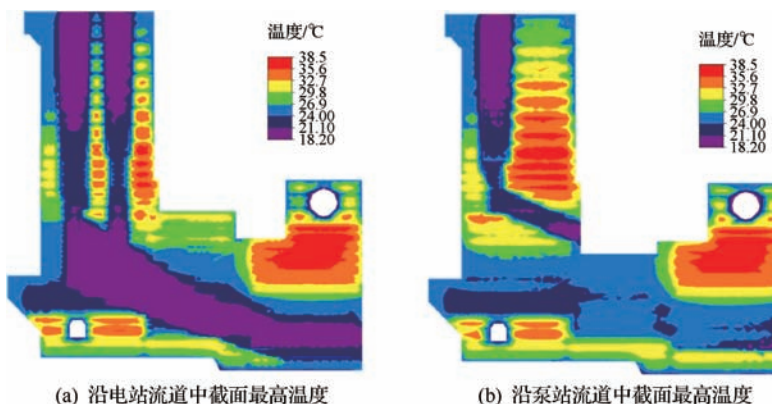


图7 保温 + 通水冷却措施下坝体混凝土内部最高温度分布

可以看出,保温措施能够有效减小泵站厂房大体积混凝土内温度分布不均的情况,降低外界温度变化



的影响,同时保温+通水冷却措施能够在此基础上有效地减小混凝土表面最高温度,进一步削减温度峰值,改善大体积混凝土温度分布不均现象。

### 3.2 应力场分析

在基础强约束区选取 T2、T4 为内部特征点。在基础弱约束区选取 T6、T8 为特征点。在脱离基础约束区内部选取 T12、T14 为特征点。考虑无温控、仅保温和保温+通水冷却的温控措施工况对泵站厂房坝段混凝土的影响,分析混凝土从开始浇筑到浇筑 3 年时段内的应力历程变化规律。

针对基础强约束区,特征点顺流向应力历程对比见图 8。与无措施工况相比,在仅保温工况下,内部特征点 T2 和 T4 处最大顺流向应力减小 0.1MPa,后期顺流向应力减小 0.3MPa;在保温+通水冷却工况下,内部混凝土特征点 T2 和 T4,最大顺流向应力减小 1.0MPa,后期顺流向应力减小 0.7MPa。基础强约束区特征点横流向应力历程对比见图 9,内部混凝土特征点 T2 和 T4 处最大横流向应力减小 0.1~0.2MPa。在保温+通水冷却工况下,相对仅保温工况,内部混凝土特征点 T2 和 T4,最大横流向应力减小 0.9MPa。

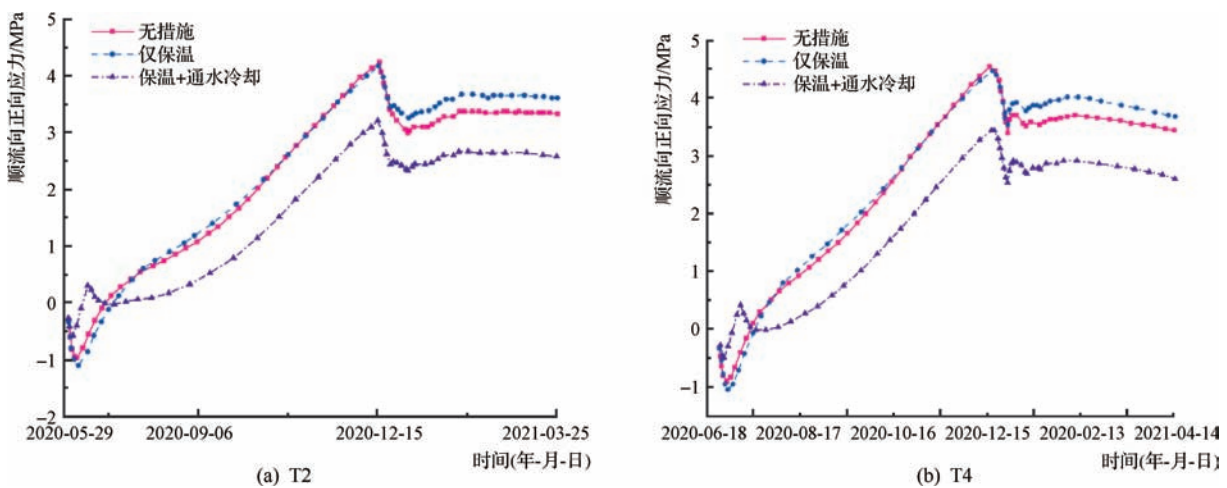


图 8 不同温控措施下厂房坝段基础强约束区特征点顺流向应力历程对比

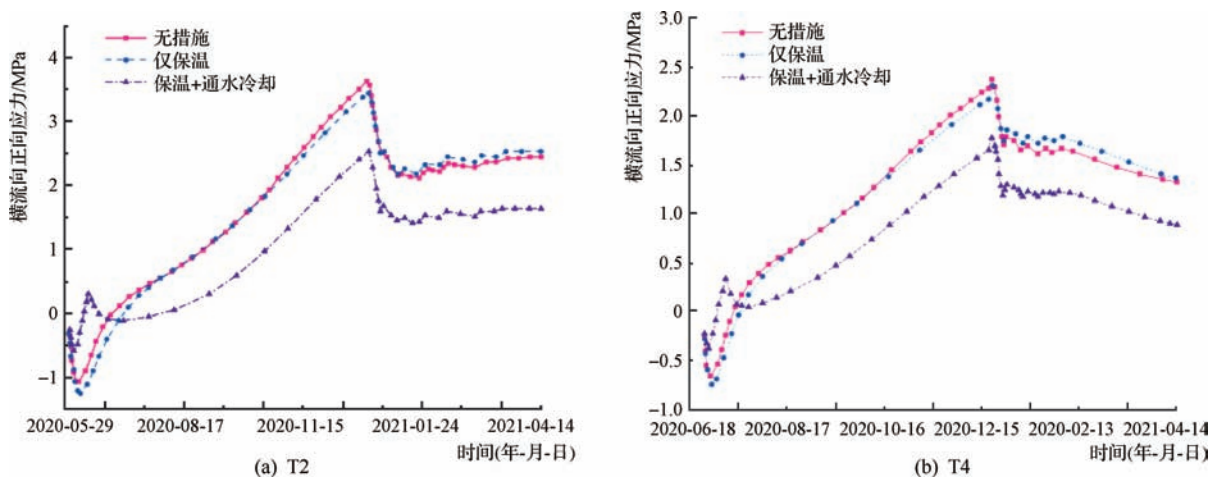


图 9 不同温控措施下厂房坝段基础强约束区特征点横流向应力历程对比

针对基础弱约束区,特征点顺流向应力历程对比见图 10。相对无措施工况,在仅保温工况下,内部混凝土特征点 T6 最大顺流向应力减小 0.1MPa;T8 最大

顺流向应力减小 0.3MPa。在保温和通水冷却工况下,相对仅保温工况,内部混凝土特征点 T6 最大顺流向应力增加 0.1MPa;T8 最大顺流向应力减小 0.4MPa。基



基础约束区特征点横流向应力历程对比见图 11,在仅保温工况下,相对无措施工况,内部混凝土特征点 T6 最大横流向应力几乎无变化;电站流道附近 T8 最大横流向应力减小 0.3~0.6MPa。在保温和通水冷却工况

下,相对仅保温工况,内部混凝土特征点 T6 最大横流向应力下降 0.2MPa;电站流道附近 T8 最大横流向应力减小 0.5~0.6MPa。

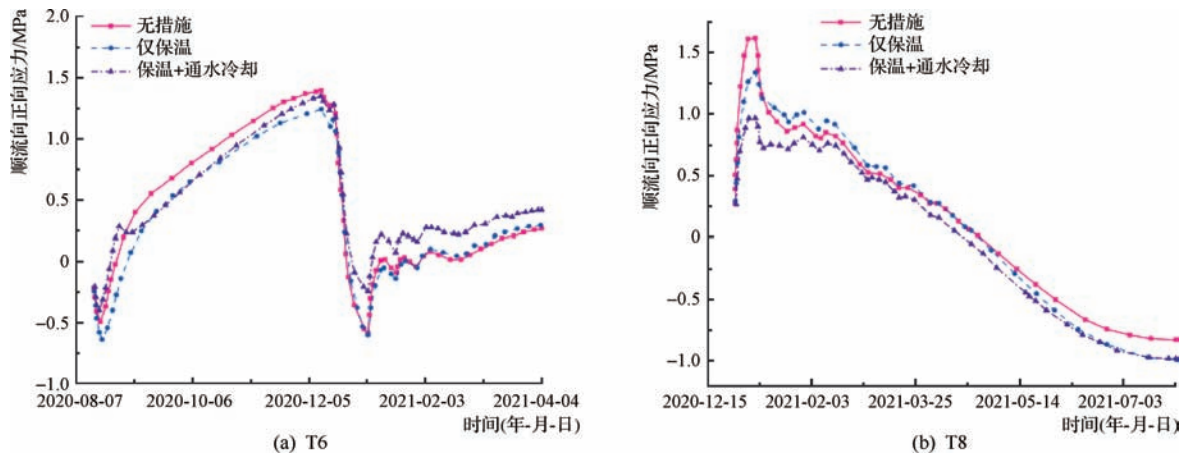


图 10 不同温控措施下厂房坝段基础约束区特征点顺流向应力历程对比

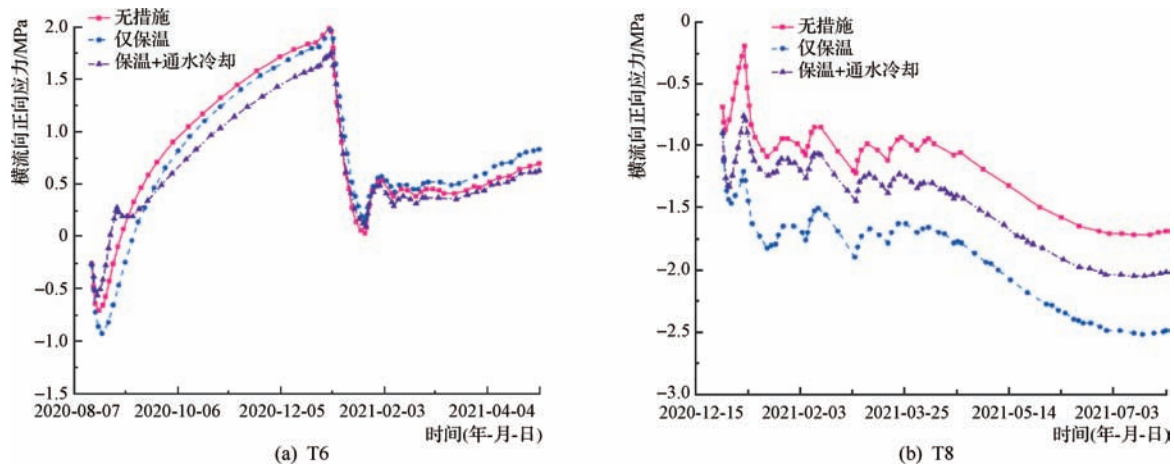


图 11 不同温控措施下厂房坝段基础约束区特征点横流向应力历程对比

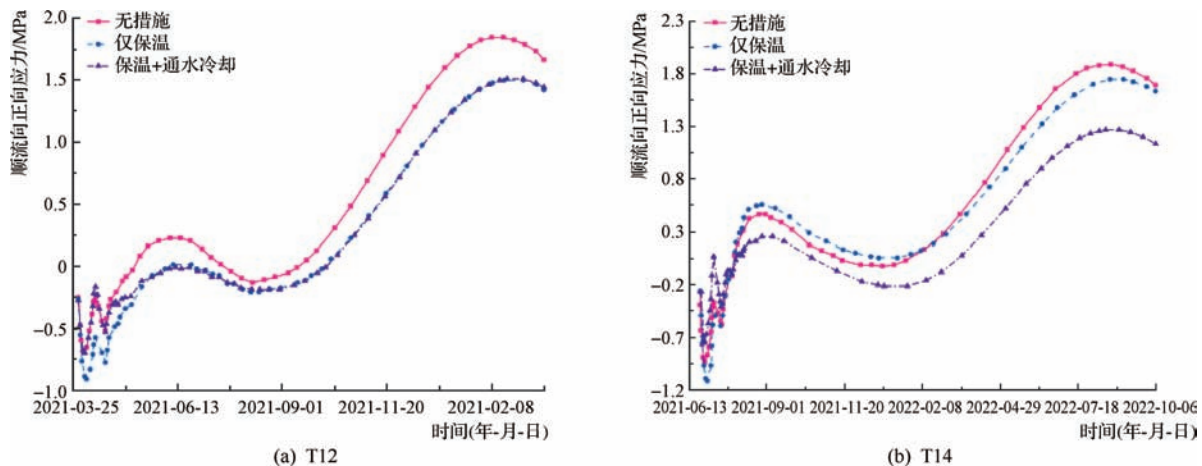


图 12 不同温控措施下厂房坝段脱离基础约束区特征点顺流向应力历程对比



针对脱离基础约束区,特征点顺流向应力历程对比见图 12。仅保温工况下,相对无措施工况,内部混凝土特征点 T12 顺流向应力减小 0.1~0.5 MPa。在保温和通水冷却工况下,相对仅保温工况,内部混凝土特征点 T12,顺流向应力前期压应力减小 0.4 MPa,后期几乎无变化;特征点 T14 前期压应力减小 0.5 MPa,后期拉应力下降 0.4 MPa。脱离基础约束区特征点横流向

应力历程对比见图 13,在仅保温工况下,相对无措施工况,内部混凝土特征点 T12 横流向应力减小 0.3~0.5 MPa;表面特征点 T14,横流向应力后期增加 0.1 MPa。在保温和通水冷却工况下,相对仅保温工况,内部混凝土特征点 T12,横流向应力前期的压应力减小 0.4 MPa,后期应力下降 0.1 MPa;T14 前期压应力减小 0.4 MPa,后期拉应力下降 0.5 MPa。

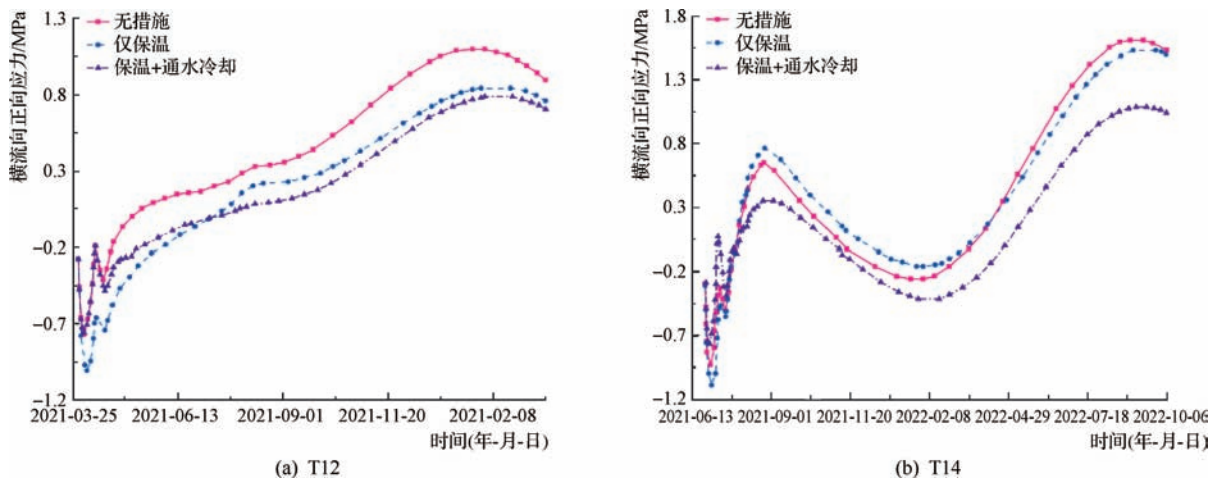


图 13 不同温控措施下厂房坝段脱离基础约束区特征点横流向应力历程对比

## 4 结 论

a. 对于厂房坝段大体积混凝土,温控措施能够有效减小大体积混凝土温升峰值。保温措施对表面及流道附近混凝土的抗裂能力提升幅度高于对内部混凝土抗裂能力的提升幅度。

b. 外界约束对于温度应力同样具有影响,对于泵站厂房坝段强约束区、弱约束区与脱离约束区分别采取不同温控措施,有助于温控防裂措施精准有效。

c. 保温 + 通水冷却的温控方法与单独保温的温控方法相比,能够显著缓解因温差产生的应力问题,有助于减轻泵站厂房大体积混凝土开裂现象,使泵站厂房坝段更具有安全性、适用性、耐久性。◆

### 参考文献

- [1] 张忠东,宋晓峰,肖瑜,等. 引汉济渭(一期)调水工程关键技术研究[J]. 中国水利,2015(14):63-66.
- [2] 任喜平,李元来,刘炜山. 大坝浇筑过程中温差裂缝形成研究及防控[J]. 水利建设与管理,2020,40(11):78-82.

- [3] 丁宝瑛,王国秉,黄淑萍,等. 国内混凝土坝裂缝成因综述与防止措施[J]. 水利水电技术,1994,25(4):12-18.
- [4] 张越. 水利工程大体积混凝土温控防裂措施探究[J]. 水利规划与设计,2015(4):60-62,110.
- [5] 姚国虎. 构皮滩水电站拱坝混凝土温度应力分析及控制措施[J]. 水利技术监督,2013,21(5):64-67.
- [6] 牛运华,潘洪月,习兰云,等. 乌东德大坝低热水泥混凝土温控防裂效果研究[J]. 水电能源科学,2020,38(5):98-100.
- [7] 王飞,王晓峰. 基于温控仿真的热带地区常态混凝土重力坝施工期温控防裂研究[J]. 水电能源科学,2020,38(1):83-85.
- [8] 李守义,张金凯,张晓飞,等. 碾压混凝土坝温度应力仿真计算研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [9] 孟维欢. 浅析大体积混凝土裂缝防治措施[J]. 水利建设与管理,2011,31(4):24-25.
- [10] 朱伯芳. 论混凝土坝的水管冷却[J]. 水利学报,2010,5(41):505-513.
- [11] 许继刚,王振红,汪娟,等. 大坝混凝土通水冷却方式和表面保温力度研究[J]. 人民黄河,2020,42(10):134-141.

(下转第 47 页)



# 监控量测技术在秦岭长隧洞中的应用技术研究

齐国庆<sup>1</sup> 王亮<sup>1</sup> 田睿<sup>2</sup>

(1. 陕西引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710010;  
2. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710048)

**【摘要】** 为保障施工安全,进一步探索监控量测技术在长距离、大埋深复杂地质环境下隧洞施工中的应用,文章以秦岭输水隧洞施工过程中的监控量测项目选择、量测标准、数据分析及信息反馈为研究对象,分析了秦岭输水隧洞施工监控量测技术的应用过程,提出了异常现象的处理措施,为长距离、大埋深隧洞的监控量测技术应用和优化提供了参考经验。

**【关键词】** 监控量测技术;数据分析;处理措施;应用过程

中图分类号: TV513

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)10-016-05

## Research on application technology of monitoring and measuring technology in Qinling long tunnel

QI Guoqing<sup>1</sup>, WANG Liang<sup>1</sup>, TIAN Rui<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Xi'an 710010, China;  
2. Shaanxi Province Institute of Water Resource and Electric Power Investigation and Design, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The monitoring and measuring item selection, measuring standards, data analysis and information feedback adopted during Qinling tunnel construction are adopted as the research objects in the paper in order to ensure the construction safety, further explore application of the monitoring and measuring technology in tunnel construction under long distance and large buried depth complicated geological environment. The application process of monitoring and measuring technology during construction of Qinling tunnel are analyzed. The measures to deal with abnormal phenomena are put forward, thereby providing reference experience for the application and optimization of monitoring and measuring technology of long distance and large buried depth tunnels.

**Keywords:** monitoring and measuring technology; data analysis; treatment measures; application process

随着现代施工技术不断发展,我国大型跨流域长距离引调水工程建设规模逐渐扩大,输水隧洞作为输水工程的重要组成部分,也逐步向长距离大埋深的方

向发展,施工难度和施工安全风险也在不断增加,因此在工程施工过程中需要选择合理可靠且高效的监控量测技术方案,及时监控施工对地层的扰动程度,准确评

收稿日期: 2021-11-12

基金项目: 陕西省水利科技计划项目“复杂地质条件深埋长隧洞 TBM 掘进关键技术研究”(2017slkj-26)

作者简介: 齐国庆(1985—),男,硕士,主要从事水利水电工程建设管理工作。



价隧洞围岩稳定性,根据监控量测技术取得的信息对施工进行有效指导和控制,采取针对性支护方案,以确保隧洞施工安全<sup>[1]</sup>。本文在已有隧洞工程施工控制量测经验的基础上,结合引汉济渭秦岭输水隧洞工程复杂地质环境下的施工实际情况,对长距离、大埋深隧洞施工监控量测技术进行了比较全面的探索和应用,有效保障了现场施工安全和施工进度控制<sup>[2-3]</sup>。

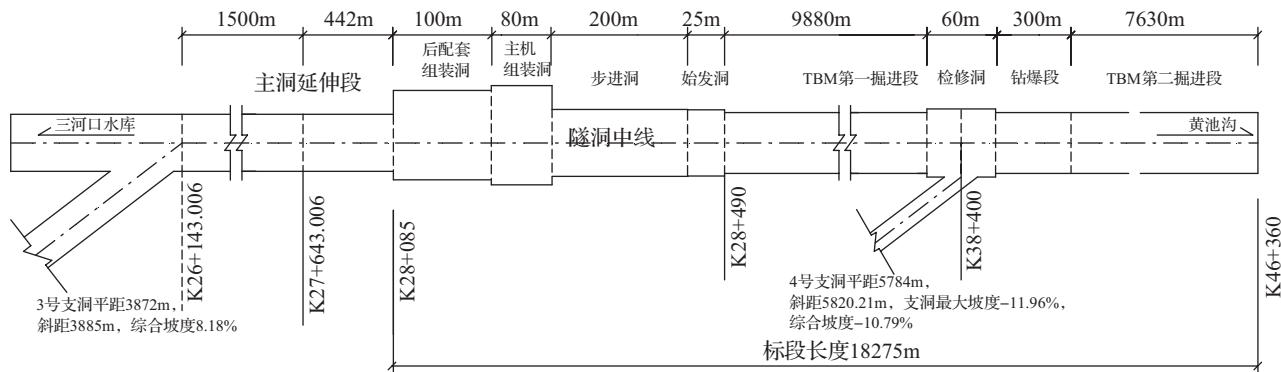


图1 工程平面布置

## 2 监控量测

### 2.1 量测项目的选择

按照规范要求及一般隧洞施工经验,将监控量测项目根据隧洞级别分为必须实施量测项目和可选择实施量测项目。必须实施量测项目即日常监控量测项目,对围岩和支护收敛变形,以及隧洞拱顶下沉和净空变化等影响施工安全和工程质量的项目进行监控量测<sup>[5-7]</sup>;可选择实施量测项目,一般为根据设计要求或施工过程中的需要进行量测的项目,如对洞底隆起和纵向位移等的监测量测<sup>[8]</sup>。秦岭输水隧洞以拱顶下沉和净空变化为主要监控量测内容,结合施工实际情况适时增加选测项目。

### 2.2 量测断面及测点布置

Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类围岩监控量测断面分别以 30 ~ 50m、10 ~ 30m、5 ~ 10m 间距进行布置<sup>[9-10]</sup>,但针对地质条件复杂、易发生断层塌方的洞段,应根据勘察设计情况及施工揭露情况加密监测断面<sup>[11-12]</sup>。

一般在同一断面布置不少于 3 个测点,其中断面轴线附近应布置至少 1 个测点,由于秦岭输水隧洞跨度较大,在断面轴线附近增设到 2 个测点。一般情况

## 1 工程概况

秦岭输水隧洞 TBM 施工段位于秦岭主脊段,长约 35km。岭南标段全长约 18km,最大埋深 2012m<sup>[4]</sup>,施工机械采用美国罗宾斯制造的 TBM 设备,TBM 掘进段隧洞综合坡度 1/2500,具体段落划分见图 1。

下的仰拱沉降测点和净空变化测点布置见图 2。

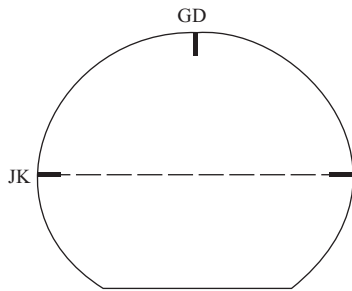


图2 测点布置

### 2.3 监控量测频率的确定

一般隧洞施工的监控量测频率综合考虑测量断面与开挖面距离(见表 1)和测量断面测点的位移速度(见表 2)来确定,通常取其中较高的数值作为量测频率。

表1 按测量断面与开挖面距离确定的监控量测频率

测量断面与开挖面距离/m	监控量测频率
(0 ~ 1) B	2 次/d
(1 ~ 2) B	1 次/d
(2 ~ 5) B	1 次/(2 ~ 3) d
> 5B	1 次/7d

注 B 为隧洞开挖宽度。



表2 按测点位移速度确定的监控量测频率

测点位移速度/(mm/d)	监控量测频率
$\geq 5$	2次/d
1~5	1次/d
0.5~1	1次/(2~3)d
0.2~0.5	1次/3d
$< 0.2$	1次/7d

秦岭输水隧洞在采用TBM法施工时,除考虑常规因素外,还需要考虑TBM设备的条件限制,如TBM设备的护盾长6m,则在此设备掘进期间护盾6m范围内无法安装监控量测设备。因此在TBM施工过程中,必须依据TBM的设备参数、隧洞掘进(开挖)速度来确定必测项目的监控量测点和监控量测频率。而可选择的量测项目其监控量测频率是在施工过程中根据施工揭露地质条件、隧洞设计安全监测要求,以及主要量测项目的量测结果确定的。

#### 2.4 监控量测控制基准

在确定了监控量测点位和频率后,根据设计勘察结果以及已有工程实例提出隧洞初期支护相对位移控制基准以及位移管理等级。秦岭输水隧洞初期支护极限相对位移、初期支护极限相对位移控制基准、位移管理等级见表3~表5。

表3 隧洞初期支护极限相对位移

围岩级别	隧洞埋深/m		
	$h \leq 50$	$50 < h \leq 300$	$300 \leq h$
拱脚水平相对净空变化/%			
II		0.01~0.03	0.01~0.08
III	0.03~0.10	0.08~0.40	0.30~0.60
IV	0.10~0.30	0.20~0.80	0.70~1.20
V	0.20~0.50	0.40~2.00	1.80~3.00
拱顶相对下沉/%			
II		0.03~0.06	0.05~0.12
III	0.03~0.06	0.04~0.15	0.12~0.30
IV	0.06~0.10	0.08~0.40	0.30~0.80
V	0.08~0.16	0.14~1.10	0.80~1.40

表4 极限相对位移控制基准

类别	距掌子面1B	距掌子面2B	远离掌子面
允许值	$65\% U_0$	$90\% U_0$	$100\% U_0$

注  $U_0$ 为位移控制基准值。

表5 位移管理等级

管理等级	距开挖面1B	距开挖面2B	施工状态
III	$U < U_{1B}/3$	$U < U_{2B}/3$	正常施工
II	$U_{1B}/3 \leq U \leq 2U_{1B}/3$	$U_{2B}/3 \leq U \leq 2U_{2B}/3$	优化施工方法或支护参数,加强监控量测,必要时采取针对性措施
I	$U > 2U_{1B}/3$	$U > 2U_{2B}/3$	停工疏散施工人员,采取针对性措施

注  $U$ 为实测位移值。

#### 2.5 监控量测结束标准

隧洞施工监控量测结束标准一般根据位移速度判别,通常当位移速度小于0.2mm/d时,隧洞围岩已基本达到稳定,施工监控量测可在持续到基本稳定后14d内结束。在施工过程中,当发现位移速度大于5mm/d或位移累计达到100mm时,说明围岩正在进行剧烈应力反应,必须立即疏散施工人员,及时分析原因,同时采取针对性措施的加强支护系统。

秦岭输水隧洞施工在通过断层破碎带地段时,由于围岩长时间不稳定,增加了测点,延长了监控量测时间,并针对该段围岩采取了增设排水孔和加强支护措施,通过长期围岩稳定实时监控,切实保障了施工安全。

#### 2.6 监测数据的上传

秦岭输水隧洞监控量测数据采用信息化施工管理平台自动上传<sup>[13-14]</sup>,同时将监控量测的数据、方案、设计文件等上传至安全监测模块。根据勘察设计要求及实际监控量测数据,在平台进行预警预报。根据秦岭输水隧洞施工实际情况,监控量测预警等级见表6。

表6 监控量测预警等级

安全等级		正常	二级(预警)	一级(预警)
围岩变形量/mm	III	$< 19$	$\geq 19, < 27$	$\geq 27$
	IV	$< 45$	$\geq 45, < 64$	$\geq 64$
	V	$< 116$	$\geq 116, < 165$	$\geq 165$

### 3 监控量测数据分析及信息反馈

#### 3.1 监控量测数据分析处理

监控量测数据应及时进行整理,并由专人负责数

据的校核、分析工作,同时绘制位移-时间曲线(见图3)。在一个测点取得达到一定数量要求的数据后,由计算机生成散点图,根据散点图数据分布来选取回归函数进行计算分析,测算该测点可能出现的最大位移值或应力值,以此判断隧洞工程结构的稳定性。常用的回归函数如下:

对数函数:

$$U = A \lg(1 + t) + B \quad (1)$$

$$U = A \ln\left(\frac{B + T}{B + t_0}\right) \quad (2)$$

指数函数:

$$U = Ae - B/t \quad (3)$$

$$U = A(e - Bt - e - Bt_0) \quad (4)$$

双曲函数:

$$U = \frac{t}{A + Bt} \quad (5)$$

$$U = A \left[ \left( \frac{1}{1 + Bt_0} \right)^2 - \left( \frac{1}{1 + BT} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中: $U$ 为变形值(或应力值); $A$ 、 $B$ 为回归系数; $t$ 、 $t_0$ 为测点的观测时间, $d$ ;  $T$ 为量测时距开挖时的时间, $d$ 。

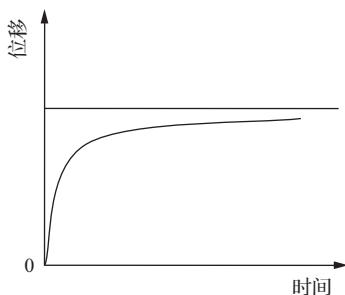


图3 位移-时间曲线

秦岭输水隧洞在监控量测过程中,为加快数据分析和信息反馈,由信息化施工管理平台进行数据管理、自动分析。

### 3.2 信息反馈及对策

秦岭输水隧洞在信息化施工管理平台的基础上,建立了信息反馈机制,通过信息化施工管理平台向参建各方及时反馈信息。监测数据通过平台进行统一管理,定时、定期发布监测结果。针对超过控制标准的异

常监控量测数据,由施工单位负责提出处理方案,通过信息化平台将相关信息同时报送监理及设计单位。监控量测报告定期由信息化平台生成后分别报送至施工、监理、设计和业主单位,由参建各方根据测点位移-时间曲线图,及时对工程现状和施工安全进行评价。监控量测与信息反馈程序见图4。

## 4 异常监控量测结果的处理

监控量测数据复核和分析无误后,确定监测结果异常的,须及时分析确定原因,并针对性采取措施。秦岭输水隧洞在施工过程中主要针对以下4种情况制定了相应的处理方案:

a. 监测结果异常由隧洞仰拱沉降引起,一般采取仰拱封闭措施,如仍然出现仰拱沉降现象,则采取锚杆加灌浆加固处理。

b. 监测结果异常由围岩压力引起,一般采取钢筋网片配合锚喷支护对围岩进行加固,补强初期支护,同时在下一循环施工时,对支护参数进行优化,必要时也可增加二次衬砌。

c. 初期支护或围岩监测信息明显异常,出现显著变形以及不稳定征兆时,应安排专职观察员定点全时段进行监控,同时疏散施工人员,采取应急措施或方案保证工程安全。

d. 在隧洞施工过程中,若发现揭露出的围岩地质条件差、初支系统出现较多裂缝、监控量测数值已超过监测标准上限值,应立即采取补强措施。通过计算分析,对施工方案和支护参数进行优化或改变,采取针对性措施。

## 5 结论

秦岭输水隧洞工程自开工以来未发生一起安全事故,施工过程中实施的监控量测技术和信息反馈机制有效保障了施工安全。本文通过监控量测技术在长距离、大埋深秦岭输水隧洞的复杂地质施工环境下的实际应用,以监控量测项目选择、量测标准、数据分析及信息反馈为研究对象,分析了引汉济渭秦岭输水隧洞施工的监控量测技术的应用过程,提出了异常现



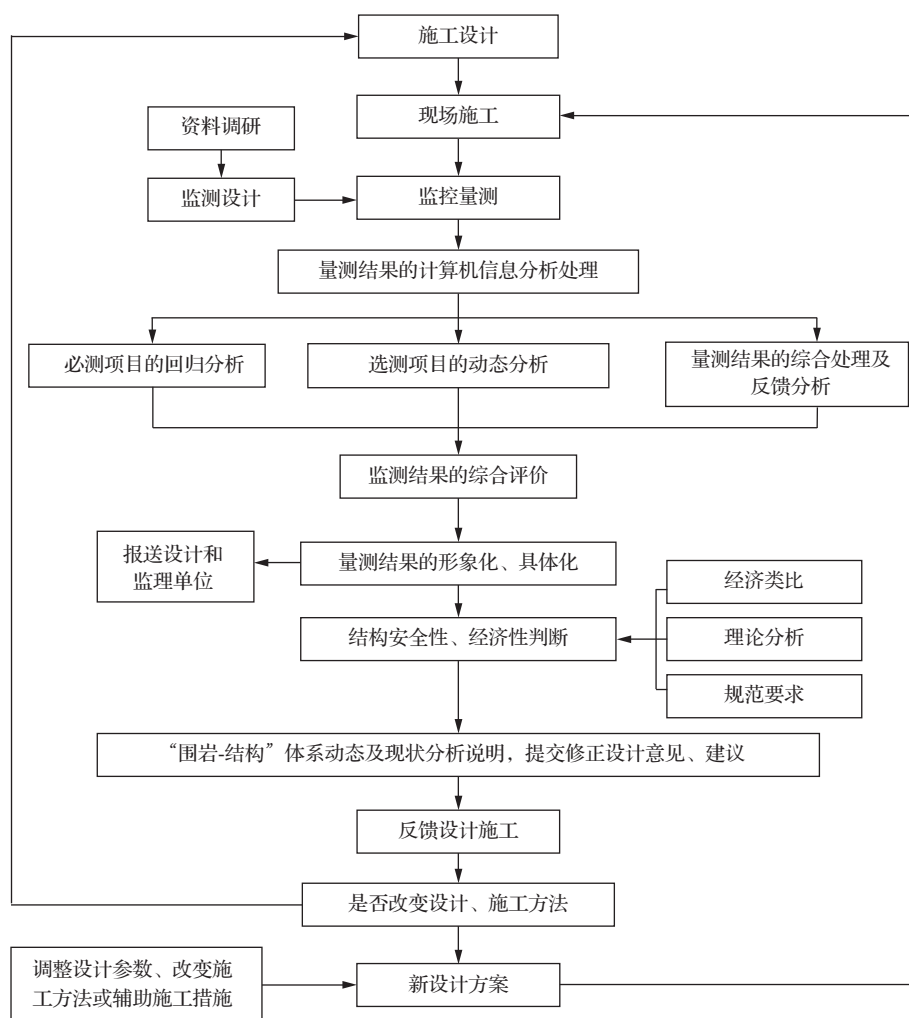


图4 监控量测与信息反馈程序

象的处理措施,对长距离、大埋深复杂地质环境下的隧洞施工监控量测进行了有效探索,为类似工程监控量测技术应用提供了经验借鉴。◆

## 参考文献

- [1] 菊爽飞. 隧洞工程施工监控量测管理体系研究[J]. 广西水利水电, 2020(6): 72-74, 82.
- [2] 徐燕, 唐卓怡, 汪春桃, 等. 隧道施工自动化监测技术应用研究[J]. 公路, 2016, 61(11): 277-282.
- [3] 孔祥政. 长大水工隧洞永久监控量测施工方法[J]. 水利建设与管理, 2016, 36(7): 15-18, 23.
- [4] 杨春宝, 胡国志, 李凌志, 等. 深埋输水隧洞硬岩岩爆防控技术研究[J]. 水利规划与设计, 2021(4): 52-56.
- [5] 谭啸. 水工引水隧洞监控量测方法综述[J]. 黑龙江水利科技, 2014, 42(11): 173-175.
- [6] 边振荣. 引洮二期工程七干渠隧洞开挖支护及围岩监控量测技术[J]. 水利规划与设计, 2021(4): 83-87.

- [7] 甘淇匀,周建.国内外隧道监控量测技术发展现状综述[J].地下空间与工程学报,2019,15(S1):400-415.
- [8] 班树春,王丹,高荃.新奥法施工隧道施工阶段监控量测的实施[J].水利建设与管理,2009,29(10):44-47.
- [9] 赵福成.大伙房水库输水工程 D/B1 施工段 F<sub>3</sub> 断层技术总结[J].水利建设与管理,2015,35(12):4-7.
- [10] 赵翔元.引汉济渭输水隧洞安全监测系统技术分析与研究[J].水利建设与管理,2019,39(12):17-20,16.
- [11] 黄锋,王星星,魏源泉,等.基于监控量测的隧道围岩分级方法及其应用研究[J].铁道建筑,2015(6):50-53.
- [12] 刘占魁,刘宝许.隧道工程监控技术与位移反分析测点优化布置[J].包头钢铁学院学报,2002(1):1-4.
- [13] 杜小洲.需求牵引 应用至上 全面打造智慧引汉济渭工程[J].水利建设与管理,2021,41(8):11-21.
- [14] 王竞敏,王沛芝,罗畅,等.基于引汉济渭工程探讨数字水利的应用[J].水利规划与设计,2021(10):16-19.

## 编者按

2019年9月18日,习近平总书记在郑州主持召开黄河流域生态保护和高质量发展座谈会并发表重要讲话,黄河流域生态保护和高质量发展上升为国家战略。2021年10月,《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》印发。2021年10月22日,习近平总书记在济南主持召开深入推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会,发出了为黄河永远造福中华民族而不懈奋斗的号召。2022年2月,中共水利部党组发表《为黄河永远造福中华民族而不懈奋斗》文章,表示坚定不移深入推动黄河流域生态保护和高质量发展。本刊对相关报道、文章和信息进行了转载。

各地相关部门和水利工作者积极贯彻落实讲话和文件精神,切实结合本地实际,深入思考探索具体实施路径。本期选择刊发白银市水务局王小娥等撰写的《黄河上游干旱区祖厉河流域生态发展模式研究》一文,为黄河上游干旱区落实生态环境保护要求,制定本地高质量发展规划提供参考。

## 黄河上游干旱区祖厉河流域生态发展模式研究

王小娥<sup>1</sup> 魏 智<sup>2</sup> 吴锦奎<sup>3</sup>

- (1. 白银市水土保持总站,甘肃 白银 730900;
2. 白银市河道管理站,甘肃 白银 730900;
3. 中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000)

**【摘 要】** 祖厉河流域位于黄河上游干旱半干旱区,是黄河上游的重要支流,其发展模式对黄河上游干旱区高质量发展有着重要示范意义。本文通过调查交流和总结已有研究成果,提出流域契合生态型发展模式。结果表明:河流特殊的地理环境造成流域资源性与水质性缺少并存的本底条件,流域内采砂、河道治理和土地利用等人类活动对生态造成较大扰动。流域发展应分区域分重点精准施策,川区重在实施灌区现代化改造,节约集约利用域外调水资源,山塬区推广旱作生态农业。通过小流域综合治理和适当人工植绿,引导流域生态向更健康的方向演替。

**【关键词】** 黄河上游;干旱区;祖厉河流域;生态治理模式

中图分类号: TV212.4

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)10-021-04

收稿日期: 2022-04-20

作者简介: 王小娥(1973—),女,水土保持监理工程师,主要从事水土保持监督工作。



## Study on ecological development model of Zuli River Basin of arid area in the upper reaches of the Yellow River

WANG Xiao'e<sup>1</sup>, WEI Zhi<sup>2</sup>, WU Jinkui<sup>3</sup>

(1. Baiyin General Station of Soil and Water Conservation, Baiyin 730900, China;

2. Baiyin River Management Station, Baiyin 730900 China;

3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Zuli River basin is located in the arid and semi-arid region in the upper reaches of the Yellow River, which is an important tributary of the upper reaches of the Yellow River. Its development model has important demonstration significance for high-quality development of the arid area in the upper reaches of the Yellow River. The river basin matched ecological development model is proposed through investigation, communication and summary of existing research results. The results show that the special geographical environment of the river leads to background conditions of coexisting insufficient resources and water quality in the river basin, and human activities such as sand mining, river management and land use in the river basin have caused great disturbance to the ecology. River basin development should be carried out according to the region and the focus accurately. Modernization of irrigated areas and conservation and intensive use of water resources outside the region should be implemented mainly in Sichuan. Dry ecological agriculture should be popularized in the mountain tableland. The ecology in the river basin can be developed to a healthier direction through the comprehensive management of small watershed and appropriate artificial green planting.

**Keywords:** upper reaches of Yellow River; arid area; Zuli River basin; ecological governance model

祖厉河位于黄河上游干旱半干旱区,横跨甘肃、宁夏两省(自治区),是黄河上游重要的一级支流。主要流域面积位于甘肃省中部干旱区的白银、定西市,是黄河上游生态脆弱区治理的典型区域之一。目前,国内关于祖厉河的研究一直集中于年水资源量变化、水质和水沙关系方面<sup>[1-5]</sup>,而对黄河上游这一干旱半干旱区典型流域现状、存在问题及以后发展方式的研究较少。所以,在黄河流域生态保护和高质量发展以及乡村振兴国家战略机遇期,准确认识祖厉河流域现状问题,分析提出发展对策,对加强河道空间管控,实现黄河上游典型流域生态保护和修复的示范辐射效应,进而带动流域内乡村振兴有着重要意义。

### 1 流域概况

祖厉河流域位于东经 104°12′~105°33′,北纬 35°18′~36°34′之间,属黄河的一级支流,发源于会宁县南部的华家岭北麓(海拔 2457.9m),流经甘肃省通渭、陇西、会宁、安定、榆中、靖远 6 县(区)及宁夏的一部分,于靖远县红咀子处(海拔 1394.5m)汇入黄河。

干流全长 223km,流域面积 1.06 万 km<sup>2</sup>,多年平均流量 3.56m<sup>3</sup>/s,年径流量 1.14 亿 m<sup>3</sup>,年径流深 10.6mm,径流系数 0.028。年均气温 3.6~8.7℃,最冷月平均气温 -8.1~7.7℃,极端最低气温 -27.2~-22.8℃。多年平均(1956—2016 年)输沙量 0.5 亿 t,平均侵蚀模数 4700t/(km<sup>2</sup>·a),平均含沙量 436kg/m<sup>3</sup>,最大含沙量 1120kg/m<sup>3</sup>。

祖厉河流域水系发达,支流众多,主要支流有中川河、祖河、大豹子沟、西巩驿河、土木岷河、关川河等。河源至会宁县城以南为上游,土质层较薄,局部基岩出露,地势逐渐降至海拔 1723m,两岸群山起伏,植被覆盖较好,是祖厉河基流主要产水区;会宁县城至郭城驿站为中游,属黄土梁峁沟壑地形,植被差,河流泥沙含量增多,矿化度增高,地势逐渐降低至海拔 1925m;郭城驿站至河口为下游,地势低平,河床宽浅,泥沙含量大,河水矿化度增至 10g/L。由南向北,多年平均降水量由 400mm 减少至 250mm,水面蒸发量由 900mm 渐增至 1100mm,降水和蒸发呈明显地带性。降水集中在 6—9 月,年径流主要以暴雨洪水形式出现。



## 2 流域现状存在的主要问题

### 2.1 水资源短缺问题突出

祖厉河流域水资源总量 0.76 亿  $\text{m}^3$ , 其中自产地表水资源量 0.61 亿  $\text{m}^3$ , 不重复地下水资源量 0.14 亿  $\text{m}^3$ , 人均水资源量 137  $\text{m}^3$ , 是干旱缺水的甘肃省平均水平的 1/8。流域内工农业生产及居民生活用水主要来源于甘肃省引洮供水工程(二期)五、六、八干渠和靖会高扬程提灌工程, 域内大部分人口及产业集聚于川区。祖厉河除河源植被较好、矿化度小于 3g/L 外, 会宁县城以下植被变差, 河流切割黄土层下的  $\text{K}_3$  红砂岩层, 沿途纳入西巩河、甘沟河、土木岷河及关川河等支流, 矿化度增高至大于 3g/L。郭城驿站以北的下游河床宽浅, 年降水量 300mm 以下, 无较大支流汇入稀释, 沿途溶解大量镁、钠、钙, 矿化度逐渐增大至 10g/L, 不能饮用和灌溉, 资源性和水质性缺水并存。

### 2.2 水土流失现象严重

祖厉河流域位于甘肃中部干旱区, 平均降水量 380mm, 北部甚至在 250mm 以下。流域中心区域包括以干旱闻名的安定、会宁两县(区)的全部和定西市安定区。流域内现有耕地 491.8 万亩, 占整个流域面积的 30.8%, 耕地中坡耕地占 95% 以上。土壤垦殖指数在中部和南部高达 40% ~ 50%, 局部超 60%<sup>[6]</sup>。流域内土质疏松, 植被覆盖度低, 坡耕地大面积存在, 导致以水力侵蚀和重力侵蚀为主的水土流失严重, 水力侵蚀以面蚀、沟蚀为主, 主要分布在梁峁、梁坡、沟坡。重力侵蚀以滑坡、崩塌、泻溜等为主, 主要分布在沟道、陡坡、悬崖立壁及沟头。河道无序采砂造成河势紊乱, 加剧了水土流失, 采砂规划对砂石资源量缺少科学分析, 盲目确定采砂量。在河道“清四乱”行动中, 祖厉河靖远段河道干流关停 23 处采砂点, 但砂石料堆积于岸边和河道内, 采砂遗留的砂坑没有进行回填整理。流域水土流失面积占流域总面积的 99.96%, 多年平均输沙量达到 0.41 万 t, 水土流失模数高达 4700  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ <sup>[2]</sup>。以临近下游 2km 的安宁渡水文站计, 祖厉河年平均入黄河水量占 1.6%, 但年平均输入黄河的泥沙量却占 39.6%, 成为黄河上游的多沙河流, 强烈的土壤侵蚀使流域生态脆弱、水土流失严重。

### 2.3 点、面源污染风险较高

流域内农业种植面积大, 川台地(Ⅱ级阶地)利用率高, 近年来地膜覆盖栽培技术以增温保墒、抑制杂草生长、促进作物早熟和增产而在全流域广泛推广, 化肥、农药及地膜使用量较大。以玉米为例亩均可增产 200 ~ 300kg, 旱作农业区更为显著, 取得了较好的经济效益。农膜成为继种子、化肥之后的第三大农业生产必需品。但随着时间的推移, 地膜污染也逐步显露出来。由于残留地膜回收率低, 土壤中残膜量逐步增加。祖厉河流域主要农业面源污染物为  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  (高锰酸钾指数)、 $\text{BOD}_5$  (五日生化需氧量)、 $\text{NO}_2\text{-N}$  (亚硝酸盐氮)、 $\text{NH}_3\text{-N}$  (氨氮)、TP (全磷)、 $\text{F}^-$  (氟化物)、TN (全氮), 大部分来源于农地和林地, 与河流水体主要污染物基本一致。来源于坡面的污染物高锰酸盐指数、溶解氧、氨氮、亚硝酸盐氮、砷、总磷的负荷分别占沟道同类污染物负荷的 77%、95%、62%、80%、87%、50%<sup>[7]</sup>, 说明沟道污染物主要来自流域内面源污染。

干流流经的县城、乡镇污水收集管网未完全覆盖或无市政配套管网, 仍然存在直排现象。流域内较大的甘沟、郭城 2 处大(Ⅱ)型水厂、6 处乡镇污水处理站未完全实现污泥的资源化利用和安全处置, 流域加工企业主要进行塑料薄膜回收加工、淀粉加工等, 相当数量的工业企业不能做到废水稳定达标排放。2020 年干流河道两岸内有规模化养殖场 10 家, 规模以下养殖场 40 家, 建成废旧农膜回收网点 19 个, 存在点源污染风险。受面源和点源污染的双重影响, 祖厉河水质全河段恶化为劣 V 类, 污染物数量多具有增大趋势<sup>[8]</sup>。

## 3 流域可持续发展的主要对策

### 3.1 坚持科学的流域发展定位

根据黄河流域生态保护和高质量发展战略对上、中、下游的总体定位, 位于黄河上游的祖厉河流域应突出黄土高原水土流失治理重点任务, 根据气候、土壤、光热资源条件, 上游降水量大、植被覆盖度高, 是祖厉河水源涵养和生态屏障区; 中游是全流域主要产沙区, 水土流失约占全流域的 50%; 下游多为Ⅲ、Ⅳ级阶地塬区, 地势相对平坦。将全流域划分为“水源涵养保护区、水土流失重点治理区、水土流失防治区、河道综合治理区”四大功能片区, 按照“先支流后干流, 先上游



后下游”的综合治理格局,着力把祖厉河流域建设成为黄河上游水土流失重点治理示范区、河流廊道生态修复与重建示范区、流域红色文化传承引领区,实现环境变化条件下祖厉河流域的综合治理。

### 3.2 改良粗放的产业发展模式

按照现阶段农业生产方式转变和农业现代化的内在要求,认识新的发展模式和生态规律,利用先进的农业技术,实现农业经济效益、社会效益和生态效益的统一协调发展。政策层面应全面实行坡耕地退耕还林还草,减少对自然生态的扰动和破坏,促进生态环境的恢复和保护;流域内宜分区域错位发展,川台区可重点种植粮经作物,实施大中型灌区(靖会灌区、南川灌区)的现代化改造,节约集约利用水资源。根据相关研究,到2030年,当灌溉水有效利用系数从0.55增加至0.6以上时,农业可节水0.5亿 $m^3$ ;山塬区主要以发展旱作生态农业为主,种植小杂粮、观赏植物(花卉、油菜花)和绿色无公害蔬菜,发展高原特色休闲农业、农村旅游,不仅可以减少面源污染,减少水土流失,还可提高农村撂荒抛荒的宝贵土地资源利用效率。

祖厉河流域人口密度较大且多集中于川台区(I级阶地),地形破碎,沟壑密度大,适宜通过小流域综合治理方式,坚持“宜林则林,宜草则草,乔、灌、草结合,乡土树种为主”的治理理念,推广当地成功的“山顶戴帽子、山腰系带子、山脚穿鞋子”治理模式,采用“隔坡环山水平带子田”和“漏斗式鱼鳞坑”工程做法。在首先保护原始生态基础上,适当进行人工植绿改造,促使生态逐步自然修复,引导生态向更合理的方向演替,实现人、地、水三者和谐。

### 3.3 实施严格的河道管控利用

河流水域岸线作为沿河国民经济设施建设的重要载体,是社会发展可利用的重要资源,应和土地资源一样加以合理保护、有效利用。祖厉河白银段(含关川河)河道岸线利用建筑物主要包括水库、防护堤、交通桥及沿河企业建筑物。祖厉河岸线保护与利用规划已划定的保护区和保留区占比在80%以上,体现了“保护优先,合理利用”的原则。此外,随着全球气候变化和水保措施的增加,流域洪水量级和频率存在持续减小的趋势,基于河道砂石资源没有得到有效补充和更新的实际,科学利用流域内砂石资源,合理划定砂石资

源可采区与可采期,保护好有限的历史沉积砂石资源。

## 4 结论

a. 祖厉河流域水资源形态主要是季节性洪流,人均水资源量 $137m^3$ ,1980年以来降水量、年径流量一直处于偏少期,流域大部分人口及几乎全部产业集聚于川区,依赖流域外调水来解决工农业生产及居民生活用水问题。流域特殊的 $Q_4$ 黄土地层和荒漠植被,导致水土流失模数高达 $4700t/(km^2 \cdot a)$ ,河流沿途溶解大量镁、钠、钙和点面污染物,矿化度高,不能饮用和灌溉,资源性与水质性缺少并存。

b. 黄河上游祖厉河流域总体发展目标,应定位于黄土高原生态文明建设,突出黄土高原水土流失治理重点任务,可将流域划分为“水源涵养保护区、水土流失重点治理区、水土流失防治区、河道综合治理区”四大功能片区。川区重在实施大中型灌区的现代化改造,节约集约利用水资源;山塬区要以发展旱作生态农业为主,通过坡耕地退耕还林还草和小流域综合治理,减少面源污染,减少水土流失。

c. 河道岸线利用要体现“保护优先,合理利用”的原则。科学认识随着全球气候变化和水土保持治理面积的增加,流域洪水量级和频率存在持续减小的趋势,基于河道砂石资源补充和更新困难的事实,科学保护利用流域内砂石资源。◆

### 参考文献

- [1] 赵秀兰,周蕊,张富,等. 1957—2016年祖厉河上游降水与水沙变化趋势[J]. 水土保持研究,2020,27(3):84-90.
- [2] 肖志宏. 甘肃省祖厉河水文特性及变化趋势分析[J]. 地下水,2020,42(5):242-244.
- [3] 张富,赵传燕,邓居礼,等. 祖厉河流域降雨径流泥沙变化特征研究[J]. 干旱区地理,2018,41(1):75-82.
- [4] 吕明侠,王一博,吴川东,等. 祖厉河河源区径流、泥沙对气候的响应研究[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(2):87-94.
- [5] 周蕊,张富,李晓雅,等. 郭城驿流域水沙演变对降水和水保措施的响应[J]. 人民黄河,2021,43(5):116-120.
- [6] 韩通,陈少勇,乔立. 祖厉河流域近50年降水变化研究及典型人类活动事件的响应[C]//第26届中国气象学会年会气候变化分会场论文集. 杭州:2009.
- [7] 华荣祥. 祖厉河典型小流域的面源污染研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2012.
- [8] 康启燕. 祖厉河流域农业面源污染特征研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2016.

# 基于均衡法及数值模拟法的乔诺地下水库资源量论证计算

王友年

(新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司,新疆 乌鲁木齐 830000)

**【摘要】** 为论证计算克孜勒苏柯尔克孜自治州(以下简称克州)乔诺地下水库的地下水资源量,在综合分析库区实际及水文地质情况的基础上,运用均衡法及数值模拟法对目标库区地下水资源量进行分析计算。结果表明:研究区地下水资源量较小;目标库区的腾空与调蓄库容分别为 48.59 万  $\text{m}^3$  及 102.76 万  $\text{m}^3$ ;运用模型计算得出当地下水位埋深等于调蓄下限水位时,在无人工回补及有渗水管工程规模条件下,乔诺地下水库的最大可开采量为 906.39 万  $\text{m}^3/\text{a}$ 。该结论对于论证乔诺地下水库工程的可行性及缓解区域水资源短缺等具有十分重要的现实意义。

**【关键词】** 均衡法;GMS 软件;地下水资源量;成库论证;乔诺地下水库

中图分类号: TV62+3+P641.6

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)10-025-07

## Demonstration calculation of resources in Qiaonuo Groundwater Reservoir based on equilibrium method and numerical simulation method

WANG Younian

(Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi 830000, China)

**Abstract:** In order to prove and calculate the groundwater resources of Qiaonuo Groundwater Reservoir in Kizilsu Kirghiz Autonomous Prefecture, the equilibrium method and numerical simulation method are applied to analyze and calculate the groundwater resources of the target reservoir based on the comprehensive analysis of its actual and hydrogeological conditions. The results show that the groundwater resources in the target area are comparatively small. The vacated and regulated storage capacity of the target area are 485900  $\text{m}^3$  and 1027600  $\text{m}^3$  respectively. According to the model calculation, when the buried depth of the groundwater level is equal to the lower limit water level of regulation and storage, the maximum exploitation volume of Qiaonuo Groundwater Reservoir is 9063900  $\text{m}^3/\text{a}$  under the condition of no artificial backfilling and the scale of the seepage pipe project. The conclusion is of great practical significance for demonstrating the feasibility of Qiaonuo Groundwater Reservoir Project as well as alleviating the shortage of regional water resources.

**Keywords:** equilibrium method; GMS; groundwater resources; demonstration of reservoir formation; Qiaonuo Groundwater Reservoir

地下水库在水资源的开发、利用与保护等方面发挥着重要作用,不仅可以解决区域水资源分配不均、水

资源短缺等问题,还可以有效防止如地面沉降等环境地质问题的发生<sup>[1-2]</sup>。乔诺水库工程位于新疆克州乌

收稿日期: 2022-01-21

作者简介: 王友年(1993—),男,硕士,主要从事水资源规划方面工作。





恰县境内,是克州水资源综合规划确定的调水水源调节水库工程。利用地下水库进行区域水资源调控是地下水开发利用的主要手段之一。因此,开展乔诺地下水库资源量论证计算,进行地下水人工调蓄,对于缓解区域水资源短缺、防止水土流失及改善下游生态环境具有十分重要的现实意义<sup>[3-4]</sup>。

在国内外众多区域供、需水矛盾愈演愈烈的情况下,水资源的合理开发及利用变得越来越重要<sup>[5-10]</sup>。部分学者认为开发利用地下水是解决区域水资源短缺的有效途径<sup>[5]</sup>,也有部分学者认为在加强水资源综合管理的前提下,促进地表水-地下水的联合利用也可有效缓解区域水资源短缺的问题<sup>[6]</sup>。近年来,随着理论认识的不断推进,利用地下水库调蓄逐渐成为解决水资源分配问题的有效方法<sup>[7-8]</sup>。而地下水库的调蓄库容计算则是建立地下水库的基本条件之一。因此,在进行地下水库建设前需要进行资源量计算,以论证地下水库修建的可行性。对于地下水库资源量计算常用的方法主要有均衡法及数值模拟法<sup>[2,9-13]</sup>。如杜新强等<sup>[10]</sup>通过特征水位计算得出库区特征库容。NI et al.<sup>[11]</sup>基于 Visual Modflow 软件对威海某河流地下水库库容进行计算后,得出该地下水库具有较大的开采潜力。张源等<sup>[2]</sup>通过大量的钻孔数据利用 GMS 软件开展了目标库区调蓄资源量的计算,得到了很好的应用。李凤丽等<sup>[12]</sup>结合库区水文地质条件,利用数值模拟的方法在计算出库区库容后,经模拟预报后确定了库区合理的开采方案。李安娜等<sup>[13]</sup>将均衡法与数值模拟法有机结合对目标库区地下水库调蓄库容进行了计算。以上研究均为本文确定乔诺地下水库资源量计算方法提供了思路。

综上所述,地下水库对于缓解区域水资源供需矛盾及水资源合理分配等具有明显优势,因此,需要进一步探索建立地下水库后能否在满足乌瑞克河流域各行业用水的前提下,向阿图什市工业园区供水,以支持工业园区的建设。本文运用 GMS 软件构建库区地下水流数值模型,并利用均衡法及数值模拟方法同时计算库区地下水资源量,以期论证乔诺地下水库的可行性及缓解区域水资源短缺等问题提供解决思路。

## 1 区域地质概况及研究方法

### 1.1 研究区概况

乔诺水库位于乌瑞克河出山口上游约 6km 处,行政区划属克州乌恰县。目标库区距阿图什市 18km、喀什市 20km、吐尔尕口岸 36km,南邻 314 国道。乌瑞克河是克孜河支流卡浪沟吕克河的支流之一,发源于天山南脉阿克巴什阿尤山南坡,地理位置介于东经  $74^{\circ}53'59'' \sim 75^{\circ}29'40''$ 、北纬  $39^{\circ}38'48'' \sim 40^{\circ}15'52''$  之间。自源头至出山口河流呈西北—向南偏东走向,出山口以下河流转向南汇入卡浪沟吕克河,河流全长 86km,流域面积  $995\text{km}^2$ 。

目标库区总地势北高南低,两岸山顶海拔 2400 ~ 2800m,相对高差 300 ~ 500m,属低中山区河谷侵蚀地貌,其河谷地貌见图 1。库区段河道总体近南北向,河

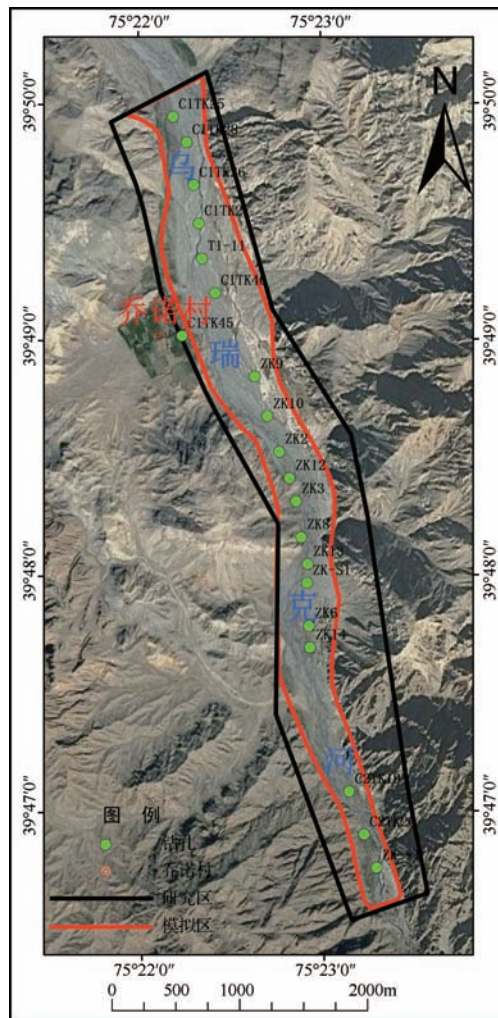


图 1 研究区位置

谷底宽 300 ~ 400m, 总体较顺直呈 U 形河谷, 河道自然坡降 18‰ ~ 22‰。库区两岸坡度较陡, 自然边坡 40° ~ 60°, 两岸地层岩性为中石炭统及中泥盆统结晶灰岩, 中硬岩—软岩类, 巨厚层状—厚层状构造, 岩层走向与岸坡大角度相交倾向上游, 岸坡整体稳定。乌瑞克河水量主要来自冰雪融水和暴雨及地下水补给, 汛期主要以冰雪融水补给为主, 冬季以地下水补给为主。由于河床由圆状和次棱角状的漂石、卵石、砾石、砂组成, 结构疏散, 透水性强, 河水和地下水转换较频繁。径流季节分布较为集中, 年际和年内变化较大。区内地下水总体由北向南径流。

## 1.2 计算方法

本次为论证计算乔诺地下水库资源量, 分别采取均衡法及数值模拟法验证计算目标库区地下水资源量。

### 1.2.1 均衡法

经实际调查发现库区补给项主要包括侧向流入  $S_1$ 、降雨  $S_2$  及河道入渗  $S_3$  等, 排泄项主要包括地下水侧向流出  $S_4$ 、渗水管开采  $S_5$  及蒸发排泄量  $S_6$  等。依据地下水均衡法<sup>[14]</sup>对库区地下水资源量进行计算。

$$\Delta S = \mu F \Delta H / \Delta t \quad (1)$$

$$\Delta S = S_1 + S_2 + S_3 - S_4 - S_5 - S_6$$

式中:  $\Delta S$  为均衡期地下水水体变化量,  $\text{m}^3/\text{a}$ ;  $\mu$  为含水层给水度;  $F$  为库区研究区面积,  $\text{m}^2$ ;  $\Delta H$  为均衡期水位差,  $\text{m}$ ;  $\Delta t$  为均衡期,  $\text{a}$ 。

### 1.2.2 数值模拟法

本次数值模拟法采用 GMS 地下水模型系统 (Groundwater Model System) 进行模拟计算。该软件因具有功能强大的图形界面及可根据库区水文地质条件进行地下水模型构建, 进行资源量的模拟计算, 在地下水资源量分析计算时被广泛应用<sup>[15]</sup>。

## 2 地下水库资源量论证

本次将根据野外实测及抽水试验等数据, 利用 GMS 软件构建库区地下水流数值模型, 并运用均衡法及数值模拟法分别计算得出目标库区的地下水资源量, 以期乔诺地下水库的成库论证提供参考依据。

## 2.1 水文地质概念模型

本次研究区南北长 6.5km, 东西宽 1.2km, 总面积约  $8\text{km}^2$ 。依据收集的资料、水文地质钻探及物探等工作成果确定库区模拟含水层厚度为 120m。上边界为潜水面, 为垂向水量交换边界; 下边界为隔水边界, 无水量交换。结合地下水埋深及地下水流场特征等, 确定研究区北部边界由于接受上游地下水侧向径流补给, 概化为补给边界; 南部边界概化为排泄边界; 结合地下水径流方向和初始流场将东、西部边界概化为零流量边界。水文地质概念模型见图 2。依据本次勘察及钻孔揭露情况, 研究区地层岩性主要为卵砾石及砂卵砾石, 且在河谷地带, 地下水埋深较浅, 含水层无明显且连续的弱透水层, 故本次依据含水层划分原则, 将研究区在垂向上概化为非均质各向异性潜水含水层。

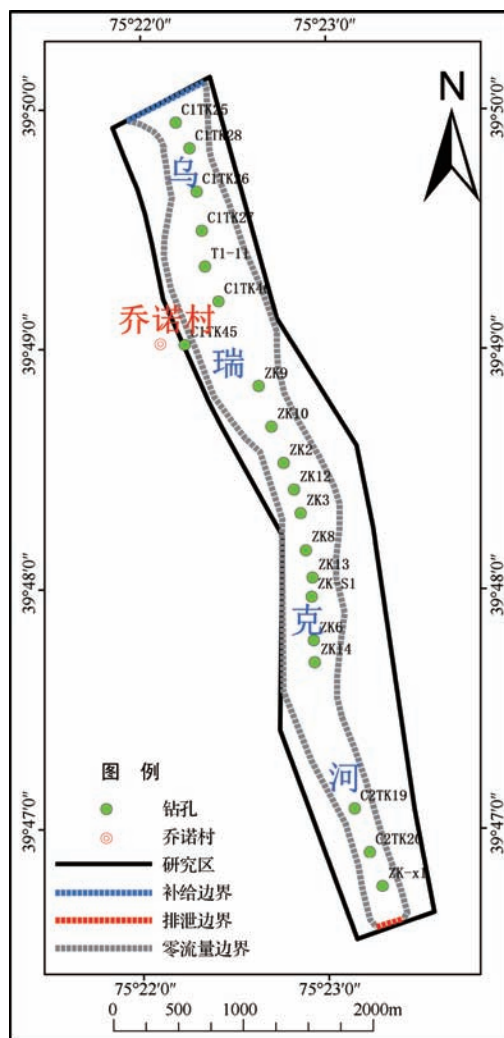


图 2 研究区水文地质概念模型





## 2.2 地下水流数学模型

研究区内地下水含水空间为卵砾石及砂卵砾石,有明显的水力联系,故概化区内地下水流动状态为层流,符合达西定律。通过实际调查发现,虽然研究区内有人工开采,但开采未使用抽水模式,没有影响地下水径流条件,另研究区范围较小,地下水埋深及上下游水位变化不大,河道内地下水与河床具有统一浸润曲线,故可视为三维稳定流。而论证地下水库调蓄时,增加的开采量及调蓄工程将会导致研究区内地下水位发生变化,为三维非稳定流。

综上所述,结合研究区水文地质概念模型,前期模型识别为稳定流,预报计算时为非稳定流,则对应的数学模型选用非均质各向异性三维非稳定流数值模型,模型识别时储存量变化量为零,所建立的数学模型<sup>[16]</sup>可表示为

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + W = \mu \frac{\partial H}{\partial t}, \\ & (x, y, z) \in F, t > 0 \\ & H(x, y, z, t) |_{t=0} = H_0(x, y, z), \quad (x, y, z) \in D \\ & -K_{xx} \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{(x, y, z, t) \in \Gamma} = q(x, y, z, t), \quad t > 0 \\ & -K_{yy} \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{(x, y, z, t) \in \Gamma} = q(x, y, z, t), \quad t > 0 \\ & -K_{zz} \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{(x, y, z, t) \in B} = 0, \quad t > 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $K_{xx}$ 、 $K_{yy}$ 和 $K_{zz}$ 分别为 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 方向的渗透系数, $m/d$ , $K_{xx} = K_{yy}$ ;  $H$ 为水头值, $m$ ;  $q$ 为单宽流量, $m^3/(d \cdot m)$ ;  $W$ 为源汇项, $m/d$ ;  $\mu$ 为给水度; $n$ 为边界面的外法线方向; $\Gamma$ 为侧边界; $B$ 为底边界。

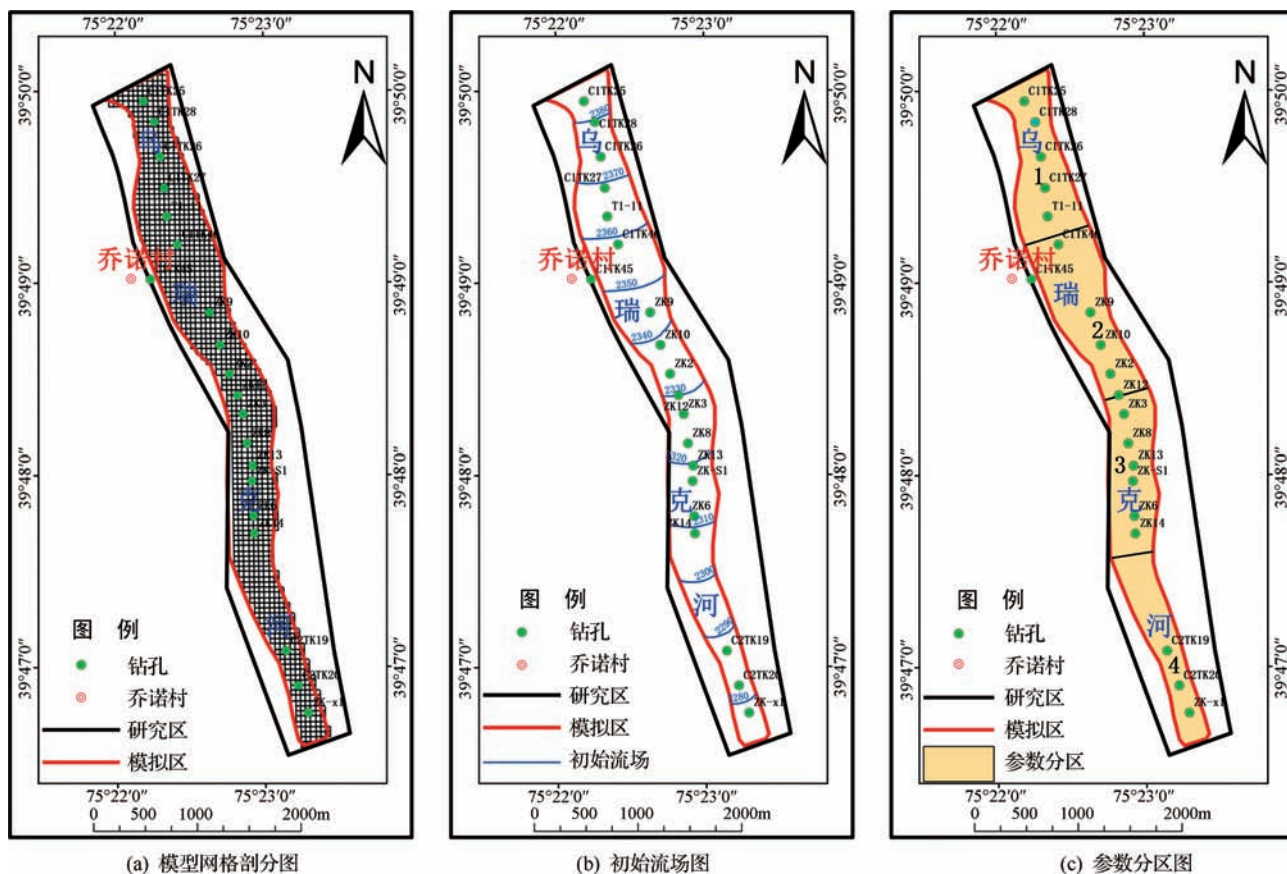


图3 研究区时空离散及初始流场与边界条件处理示意图

## 2.3 时空离散及初始流场

对研究区在空间上的离散包括平面上的网格剖分

及垂向上的分层。平面上采用等间距( $50m \times 50m$ )有限差分的离散方法,共剖分为20736个网格,网格剖分



见图 3(a),有效模拟面积为  $3\text{km}^2$ 。垂向上依照库区水文地质条件共分为 3 层。本次模拟以 2020 年 5 月流场作为初始流场及初始时刻,根据地下水位的观测时间,时间步长以 30 天为单位,进行模拟及识别。

根据研究区实测地下水位,给出的研究区初始流场见图 3(b)。根据上述边界条件概化结果在 GMS 软件中将上边界作为开放边界,底边界处理为隔水边界。由于研究区位于上游河段,其补给项主要包括侧向流入、降雨及河道入渗等,排泄项主要包括地下水侧向流出、渗水管开采及蒸发排泄等。在模型处理时将垂向降雨入渗及人工开采用 Recharge 模块进行处理,蒸发排泄用 ET 模块进行处理,河道入渗量、侧向补给及排泄用 Specific Flow 模块处理。根据库区含水层特征、岩性的空间分布规律及抽水试验获取的水文地质参数确定研究区参数分区,见图 3(c)。

## 2.4 模型识别及验证

结合库区已有水文地质钻孔及抽水试验资料,确定各层水文地质参数,见表 1。本次在进行拟合时为消除时间影响,首先进行稳定流初始流场的拟合,并通过不断调整参数对相应参数进行识别。其实测及模拟流场拟合见图 4。结果表明本次构建的库区地下水流数值模拟较为可靠,可用于地下水资源量分析与计算。

表 1 研究区识别前、后水文地质参数

地层 分层	含水层 分区	$K_{xx}, K_{yy}/(\text{m/d})$		$K_{zz}/(\text{m/d})$		$\mu$	
		识别前	识别后	识别前	识别后	识别前	识别后
第一层	1	45	48	4.5	4.8	0.20	0.20
	2	35	35	3.5	3.5	0.20	0.18
	3	30	33	3.0	3.3	0.15	0.15
	4	28	29	2.8	2.9	0.20	0.15
第二层	1	4.8	4.5	0.48	0.45	0.15	0.15
	2	2.2	3.2	0.22	0.32	0.11	0.11
	3	1.9	1.6	0.19	0.16	0.12	0.13
	4	0.9	0.8	0.09	0.08	0.13	0.13
第三层	1	0.26	0.23	0.023	0.023	0.08	0.08
	2	0.21	0.20	0.021	0.020	0.10	0.10
	3	0.15	0.15	0.015	0.015	0.08	0.08
	4	0.14	0.11	0.014	0.011	0.09	0.08

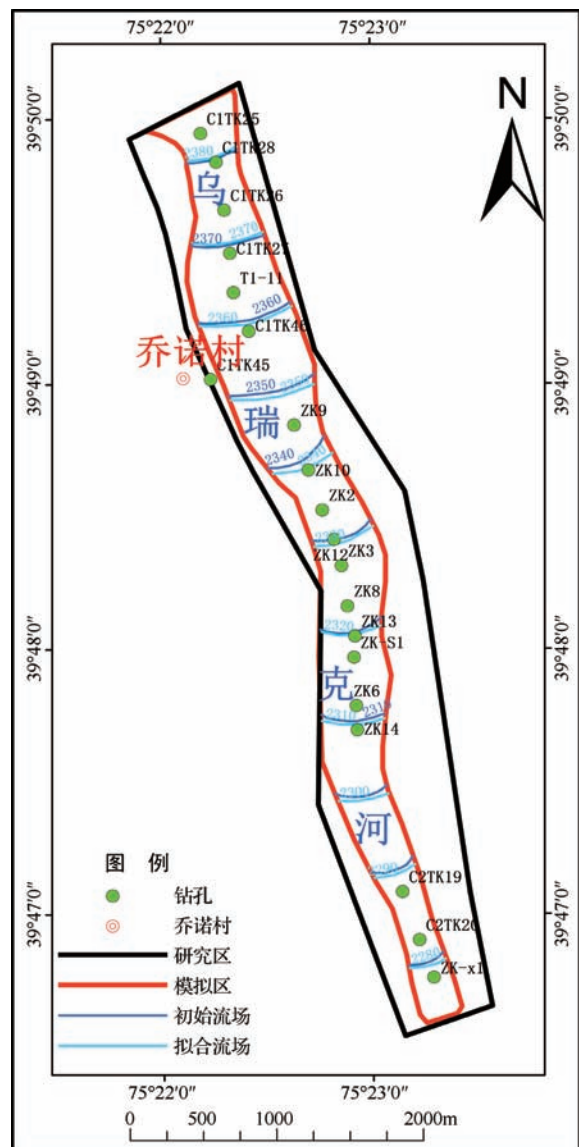


图 4 稳定流初始流场拟合图

## 2.5 库区地下水资源量分析

需要指出的是,由于受现有的工程及实际情况的影响,在建立地下水库后仍将使用已经建成运行的渠首渗管,渗管首部最小自流供水水位为 2321m。因此,当水位低于 2321m 时,地下水将无法自然流入渗管内。故在进行资源量论证时,地下水位保证在 2321m 之上是重要指标。故本次在进行库区地下水资源量分析时还将计算地下水位 2321m 以北的区域内的地下水资源量。现运用均衡法及数值模拟法分别计算得出整个研究区及研究区地下水位 2321m 以北区域的地下水资源量,结果见表 2。



表2 库区地下水资源量计算结果 单位:万 m<sup>3</sup>/年

均衡项	现状研究区地下水资源量 计算结果		地下水位 2321m 以北研究 区地下水资源量计算结果	
	均衡计算 结果	模拟计算 结果	均衡计算 结果	模拟计算 结果
总补给量	1354.29	1280.30	937.52	1034.66
河道入渗	988.95	892.49	753.45	816.66
侧向流入	363.53	386.00	183.29	217.22
降水入渗	1.81	1.81	0.78	0.78
总排泄量	1294.89	1277.58	929.35	1034.65
渗水管开采	804.68	804.68	804.68	804.68
侧向排泄	482.30	464.99	119.48	224.78
蒸发	7.91	7.91	5.19	5.19

结果表明,研究区内地下水资源量中河道入渗为主要补给项,渗水管开采为主要排泄项。经均衡法计算得出研究区及地下水位 2321m 以北区域的地下水资源量中总补给量分别为 1354.29 万 m<sup>3</sup>/年及 937.52 万 m<sup>3</sup>/年,总排泄量分别为 1294.89 万 m<sup>3</sup>/年及 929.35 万 m<sup>3</sup>/年。经模拟法计算得出研究区及地下水位 2321m 以北区域的地下水资源量中总补给量分别为 1280.30 万 m<sup>3</sup>/年及 1034.66 万 m<sup>3</sup>/年,总排泄量分别为 1277.58 万 m<sup>3</sup>/年及 1034.65 万 m<sup>3</sup>/年。库区地下水资源量整体较小,且两种方法计算结果相差较小,也从侧面表明了模型的可靠性。

## 2.6 目标库区调蓄库容计算

为进一步论证乔诺地下水库的可行性,对目标库区的调蓄库容进行分析计算。地下水库的调蓄能力取决于供水目标、调蓄方案、蓄水能力等。供水目标指地下水库供水需求,对调蓄方案论证起到限制作用,若达不到调蓄目标则不适合修建地下水库。调蓄方案决定了地下水库的蓄水和储水能力,蓄水能力则主要通过地下水库的库容来体现<sup>[17]</sup>。本次库区调蓄仅就天然条件调蓄进行设计分析。其蓄水能力论证通过调蓄水位、正常水位、死水位对应的地下水库容、可开采资源量及调蓄水量评价结果来分析,目标库区地下水位及库容指标见图 5。

对于库区调蓄库容,可根据含水层结构、地下水库

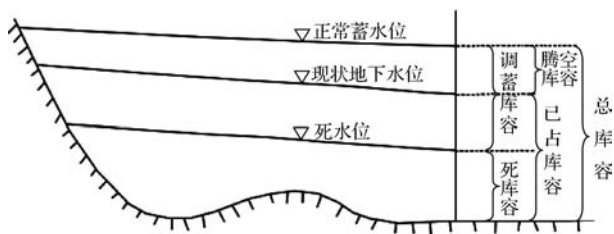


图5 目标库区地下水位及库容指标示意图

体积及给水度确定<sup>[13]</sup>。其计算公式如下:

$$V_{\text{库}} = \mu FM \quad (3)$$

式中:  $V_{\text{库}}$  为库容指标, m<sup>3</sup>;  $\mu$  为含水层给水度;  $F$  为库区研究区面积, m<sup>2</sup>;  $M$  为含水层厚度, m。

结合前文提到的目标库区后期仍将使用已经建成运行的渠首渗管,因此将死水位定为 2321m;资料显示,在现状条件下,库区平均地下水埋深为 3m;且由于库容较小,在进行论证的过程中,考虑极端条件下若想增大调蓄水量,增加腾空库容,需要将调蓄地下水埋深设计为零,即正常蓄水位为地表高程。则根据式(3)计算得出目标库区的腾空库容与调蓄库容分别为 48.59 万 m<sup>3</sup> 及 102.76 万 m<sup>3</sup>。

进一步考虑库区外界条件约束,在无人工回补条件下的地下水库开采区为北侧边界至最南侧渗水管处,即研究区 2321m 水位以北区域。当地下水埋深值等于渗水管埋深时为调蓄下限水位,此时渗水管的出水量为地下水库的最大调蓄能力。结合库区平均地下水埋深为 3m,渗水管埋深为 4.5m,故本次设计地下水埋深降至 4.5m 时为调蓄的下限水位。运用模型进行计算,当地下水埋深等于调蓄下限水位时,在无人工回补及有渗水管工程规模条件下,乔诺地下水库的最大开采量为 906.39 万 m<sup>3</sup>/年,地下水资源量较小,成库条件并不理想。

## 3 讨论

本次计算结果可用于论证乔诺地下水库工程的可行性,但通过计算表明目标库区由于受死水位限制其可开采水量较小,该结论可为后续修建地下水库提供参考依据。为分析目标库区地下水资源量较少的原因,本次对比新疆典型地下水库台兰河地下水库。对

比发现,乔诺地下水库库区位于上游出山口,储水空间为狭长的河道,储水深度最大为 120m 左右,储水能力差、库容储量小。刘慧<sup>[18]</sup>指出台兰河地下水库在洪积扇前缘与细土平原交界带沉积颗粒变细,透水性减弱,地下水流速减慢,可视作天然暗坝。同时存在着天然的阻水构造古木别孜背斜及天然储水空间塔克拉克向斜洼地和巨大的山前冲洪积扇,储水条件较好。上述成库条件是台兰河地下水库和乔诺地下水库库容差异的关键性因素。

同时,本次仅针对天然条件下目标库区的地下水资源量进行分析,但在修建地下水库时还可能会相应地采取一定的工程措施<sup>[19-20]</sup>。因此,在论证地下水库可行性时还可针对在工程规模条件下地下水库的最大开采量进行预报。同时,也可论证地表水-地下水联合调蓄<sup>[21]</sup>,具体为优先考虑使用地表水(扣除生态基流),若地表水满足供水需求则无须继续论证计算。而当地地表水无法满足供水需求的情况下,则可进一步论证天然条件下使用地表水和地下水联合调蓄。即当地地表水量扣除生态基流不满足供水需求时,还可论证计算在多年平均及不同来水频率下地下水按月是否能够提供地表水不足的部分,而这也可作为后续研究重点。

#### 4 结 论

本文以均衡法与数值模拟法相结合对乔诺地下水库资源量进行论证计算,其结论如下:

a. 结合研究区实际情况及水文地质条件,通过均衡法与数值模拟法分别计算出目标库区地下水资源量,结果表明库区地下水资源量较小。

b. 经计算得出目标库区的腾空库容与调蓄库容分别为 48.59 万  $\text{m}^3$  及 102.76 万  $\text{m}^3$ 。

c. 目标库区由于受天然条件及死水位限制可开采水量较小,成库条件较差,但今后在考虑地下水库修建时还可进一步开展工程规模及地表-地下水联合调蓄情况下的成库论证。◆

#### 参考文献

[1] 谢轶,周丹卉,张峥,等.基于 GMS 和 ArcGIS 的地下水库库容计算:以大庆西部地下水库为例[J].环境保护科学,2009,35(2):98-100.

[2] 张源,方樟. GMS 地质结构建模在地下水库调蓄资源量计算中的应用:以潮白河水库为例[J]. 中国水运(下半月),2015,15(1):313-315.

[3] 赵天石. 地下水库:辽宁省 21 世纪可持续发展战略的重要选择[J]. 中国地质,2000(2):26-28.

[4] 郑勇,钟爱民. 新疆克州水资源开发利用现状、问题及对策研究[J]. 水资源开发与管理,2017(11):17-21,16.

[5] CAO J, KITANIDIS P K. Adaptive finite element simulation of Stokes flow in porous media[J]. Advances in water resources, 1998,22(1):17-31.

[6] 李波. 新形势下新疆水资源开发利用应对策略研究[J]. 水利规划与设计,2015(9):35-39.

[7] 姚旭初,柴福鑫,袁鸿鹄,等. 地下水库库容和调蓄能力计算方法研究[J]. 水利水电技术,2019,50(S1):112-116.

[8] 汤洪洁. 地下水库发展的探究[J]. 水利规划与设计,2014(6):4-6,10.

[9] 李江,刘江,谢蕾. 新疆南疆水资源高效利用与重大水利工程布局[J]. 水利规划与设计,2020(6):1-7,85.

[10] 杜新强,秦延军,齐素文,等. 地下水库特征水位与特征库容的划分及确定研究[J]. 水文地质工程地质,2008(4):22-26.

[11] NI L D, WANG W P, ZHAO W D, etc. Numerical simulation and regulation analysis of subsurface flow for an underground reservoir in Weihai[J]. IOP Conference series: earth and environmental science, 2021, 621(1).

[12] 李凤丽,徐嘉璐,张游,等. 母猪河地下水库数值模拟和调蓄分析[J]. 中国农村水利水电,2020(11):204-209.

[13] 李安娜,许广明,赵伟玲. 淳沱河冲洪积扇地下水库调蓄库容研究[J]. 安徽农业科学,2012,40(20):10698-10700.

[14] 王建军,李爱萍. 水源地地下水资源量计算及应用[J]. 内蒙古水利,2020(2):50-52.

[15] 祝晓彬. 地下水模拟系统(GMS)软件[J]. 水文地质工程地质,2003(5):53-55.

[16] 骆祖江,张弘,李会中,等. 乌东德水电站坝址区地下水渗流三维非稳定流数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(2):341-347.

[17] 肖霄. 吉林省洮儿河扇形地地下水库人工调蓄理论与技术[D]. 长春:吉林大学,2017.

[18] 刘慧. 台兰河地下水库结构及调蓄能力研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2012.

[19] 杨秀华,刘勇. 竹林脚水库工程成库条件分析[J]. 水利规划与设计,2018(7):177-180.

[20] 卢双宝,徐宝同,刘立华. 南宫地下水库设计分析[J]. 水利规划与设计,2014(12):55-56,63.

[21] 崔素芳. 变化环境下大沽河流域地表水-地下水联合模拟与预测[D]. 济南:山东师范大学,2015.





# 西河泵站工程出水流道优化设计

付爱华<sup>1,2</sup>

(1. 南昌大学, 江西 南昌 330031;  
(2. 中山市堤围管理中心, 广东 中山 528400)

**【摘要】** 进、出水流道是低扬程泵装置的重要组成部分,流道的水力性能对泵站的影响举足轻重,扬程越低,影响越大。本文介绍了西河泵站双向竖井贯流泵装置出水流道 CFD 水力优化计算过程;并根据水力优化计算结果,结合泵型、泵站运行年利用小时数、泵房布置等因素,经技术经济比较后确定了西河泵站出水流道设计方案。同时,对今后大中型泵站的出水流道设计提出了建议,以期为大中型泵站科研、设计等人员提供参考。

**【关键词】** 泵站;双向竖井贯流泵装置;出水流道;优化设计

中图分类号: TV222.2

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)10-032-06

## Optimal design of outlet flow channel of Xihe Pumping Station Project

FU Aihua<sup>1,2</sup>

(1. Nanchang University, Nanchang 330031, China;  
2. Zhongshan Levee Management Center, Zhongshan 528400, China)

**Abstract:** Inlet and outlet flow channel are important parts of the low-head pump device. The hydraulic performance of the flow channel has decisive influence on the pumping station. The lower the head, the greater the influence. This paper introduces the CFD hydraulic optimal calculation process of outlet flow channel of two-way shaft tubular pump unit in Xihe Pumping Station. According to the results of hydraulic optimal calculation, and combining the pump type, annual utilization hours of pumping station and the layout of pumping house, the design scheme of the outlet flow channel of Xihe Pumping Station is determined after technical and economic comparison. Meanwhile, this paper puts forward some suggestions for the design of the outlet flow channel of medium and large pumping stations in the future, in order to provide reference for the scientific research and design personnel of medium and large pumping stations.

**Keywords:** pumping station; two-way shaft tubular pump unit; outlet flow channel; optimal design

进、出水流道是低扬程泵装置的重要组成部分<sup>[1]</sup>。重要的大型泵站宜对泵装置进行三维流动数值计算分析,并应进行装置模型试验验证<sup>[2]</sup>。流道的水力性能对泵站的影响举足轻重,其水力设计质量的好坏不仅影响泵装置效率,而且影响泵站的安全稳定运行<sup>[3]</sup>。

陆林广、汤方平等专家学者在泵装置 CFD 水力优化设计方面进行了系统的研究并取得了丰硕的成果,为我国泵装置水力性能的提高和泵站技术的进步做出了巨大的贡献<sup>[4-9]</sup>。

为保证西河泵站工程泵装置稳定、可靠和高效运

收稿日期: 2022-03-15

作者简介: 付爱华(1975—),男,正高级工程师,主要从事水利水电工程设计、建设与运行管理方面的研究。

行,在泵站进、出水渠道设计时,先根据所选泵型、工程经验初拟进、出水渠道型式和尺寸,然后采用三维流动数值计算软件对泵站进、出水渠道尺寸进行优化计算。在该工程的初步设计阶段,建设单位、设计单位和扬州大学进行了进、出水渠道和泵装置 CFD 优化设计计算研究工作,取得了较好的效果。本文介绍西河泵站工程双向竖井贯流泵装置出水渠道(排涝时为出水渠道,引水时为进水流道,下同)优化设计。

## 1 工程概况

西河泵站工程位于广东省中山市中顺大围西干堤岐江河西出口的西河水闸西侧,外临西江磨刀门水道。工程的主要任务是排涝、防洪(潮),兼顾反向应急补水。泵站排涝设计流量  $400\text{m}^3/\text{s}$ 、引水设计流量  $145\text{m}^3/\text{s}$ 、泵站总装机容量  $18400\text{kW}$ ,工程等别为 I 等,工程规模为大(1)型,属特大流量特低扬程泵站。泵站采用 8 台前置竖井贯流泵装置(其中 4 台为单向泵、4 台为双向泵),单泵设计排涝流量为  $50.00\text{m}^3/\text{s}$ 、单泵设计引水流量为  $36.25\text{m}^3/\text{s}$ ,水泵叶轮直径为  $3.90\text{m}$ ,进、出水渠道均采用直管式渠道<sup>[10]</sup>。泵站特征水位和净扬程见表 1。西河泵站属于特低扬程泵站,为实现泵装置的高效运行,必须对渠道进行必要的优化设计。

表 1 西河泵站特征水位和净扬程 单位:m

工况	排 涝			引 水		
	内水位	外水位	净扬程	内水位	外水位	净扬程
设计	0.25	2.24	1.99	0.85	-0.35	1.20
平均	0.25	1.05	0.80	0.40	-0.57	0.97
最低	-0.75	-0.45	0.30	-0.45	-0.75	0.30
最高		2.99	2.74	1.15		1.90

注 排涝工况最高扬程时对应的内水位取设计内水位。

## 2 可研初拟的出水渠道型式及其尺寸

设计单位在可研阶段根据工程的特征参数以及已建类似泵站的经验,经工程类比和初步分析,初拟泵站的出水渠道采用直管式渠道,渠道出口断面至水泵叶轮中心的长度为  $26.50\text{m}$ ,其中渠道总长(导叶体出口

到渠道出口,含闸门段,下同)为  $23.873\text{m}$ ,渠道出口断面的宽度和高度分别为  $10.00\text{m}$  和  $5.50\text{m}$ ,渠道内不设分隔墩,渠道平面扩散角  $16.94^\circ$ 、当量扩散角  $11.77^\circ$ ,设计排涝流量  $50.00\text{m}^3/\text{s}$  时渠道出口断面平均流速  $0.909\text{m/s}$ 、设计引水流量  $36.25\text{m}^3/\text{s}$  时渠道进口断面平均流速  $0.659\text{m/s}$ 。可研初拟的泵站出水渠道单线图见图 1。

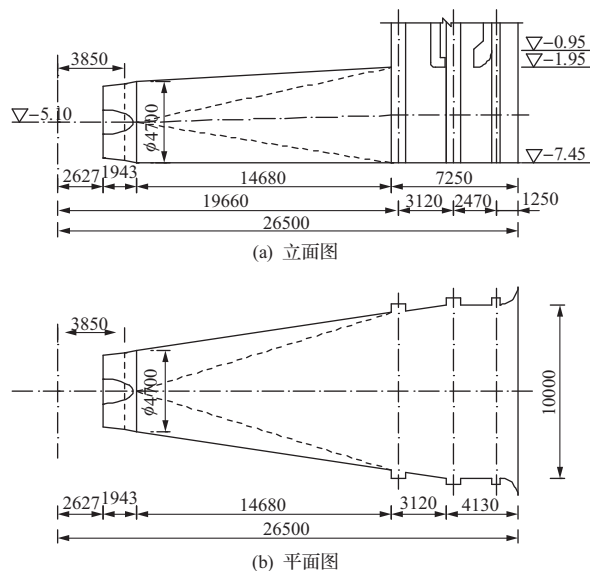


图 1 可研初拟的出水渠道单线图

(尺寸单位:mm,高程单位:m)

## 3 出水渠道优化设计

### 3.1 水力优化设计目标

对西河泵站出水渠道进行水力优化设计,以水头损失为检验指标,要求达到以下目标:①渠道型线变化尽可能均匀,渠道内的水流转向有序、扩散平缓,以尽可能避免渠道内产生涡流及其他不良流态;②尽可能多地回收水流的动能,最大限度地减少渠道水头损失;③渠道控制尺寸取值合理,满足水力设计允许的工程控制参数要求。同时,由于排涝工况的出水渠道亦为引水工况的进水流道,此时,还要求达到以下目标:④渠道内水流收缩均匀,无涡流及其他不良流态;⑤渠道出口断面的流速分布尽可能均匀、水流方向尽可能垂直于出口断面<sup>[11]</sup>。



### 3.2 水力优化设计控制方程与计算软件

出水水道内的三维湍流流动的数值计算用连续方程和 Navier-Stokes 方程进行描述;考虑到湍流流动的脉动特性,采用时均法把湍流运动看作是时间平均流动和瞬时脉动流动的叠加;为了使方程组封闭,采用标准  $k-\varepsilon$  模型,引入反映湍动能的  $k$  方程和反映湍动能耗散率的  $\varepsilon$  方程。

随着近年来计算流体动力学方法 (CFD) 的迅速发展和应用,许多用于求解三维雷诺平均 N-S 方程和多种湍流模型方程组的专用软件应运而生。本次对西河泵站工程出水水道三维湍流流动的数值计算采用的是目前国际上应用广泛的 Fluent 软件,此软件已被大量地用于模拟泵装置进、出水水道和水泵内部的流动,进行泵装置的性能预测和优化设计。

### 3.3 水力优化设计方案及计算成果

水道优化设计先按可研阶段初拟的水道型线 (编号为 SC1) 进行 CFD 数值计算,然后在该方案的基础上对出水水道进行型线优化,提出优化方案 SC2 ~ SC4,具体如下:

**a. SC2 方案。**在 SC1 方案的基础上进行以下调整:①对导叶体出口与混凝土水道之间的连接段进行调整;②将出水水道断面圆变方段的长度由 14.68m 减短为 8.80m,以增大水道断面面积,同时便于施工。

**b. SC3 方案。**在 SC2 方案的基础上进行以下调整:①将出水水道顶板的仰角由  $3.12^\circ$  调整为  $5.19^\circ$ ;②对出水水道型线进行相应调整。

**c. SC4 方案。**在 SC3 方案的基础上进行以下调整:①出水水道出口断面至水泵叶轮中心的长度由 26.50m 减短为 25.50m;②在出水水道出口闸门段增设长度为 9.55m、厚度为 1.20m 的中隔墩;③出水水道出口断面宽度由 10.00m 增加至 10.70m。

SC2 ~ SC4 方案的水道单线图见图 2 ~ 图 4。

根据以上方案,采用 Fluent 软件进行数值计算,各方案计算结果汇总见表 2,SC3、SC4 方案流场见图 5 ~ 图 8。

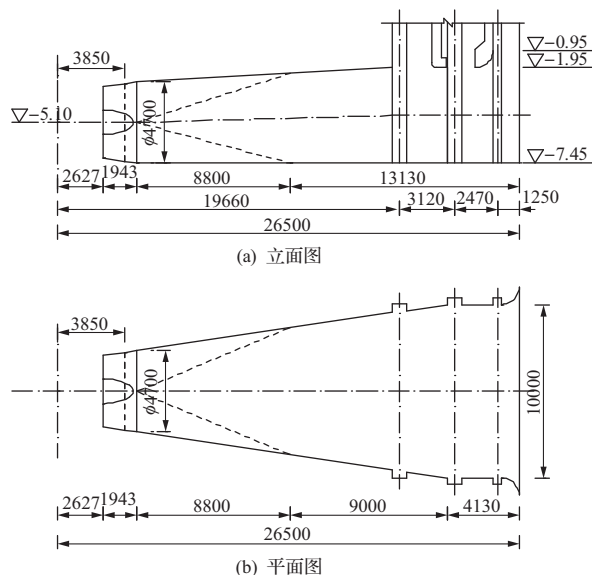


图 2 SC2 方案出水水道单线图

(尺寸单位:mm,高程单位:m)

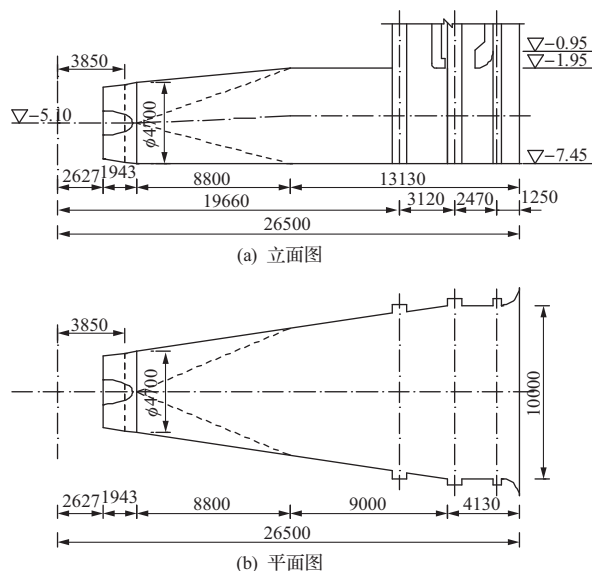


图 3 SC3 方案出水水道单线图

(尺寸单位:mm,高程单位:m)

表 2 出水水道水力优化计算结果汇总

工况	排涝(Z)	引水(F)		
		水头损失/ m	流速分布 均匀度/%	水流入泵 平均角/(°)
方案号				
SC1	0.1023	0.0563	95.24	86.47
SC2	0.1006	0.0552	95.13	86.20
SC3	0.1003	0.0551	95.64	86.31
SC4	0.1150	0.0625	95.56	86.24

注 SC1Z 代表双向泵排涝工况出水水道;SC1F 代表引水工况进水水道。



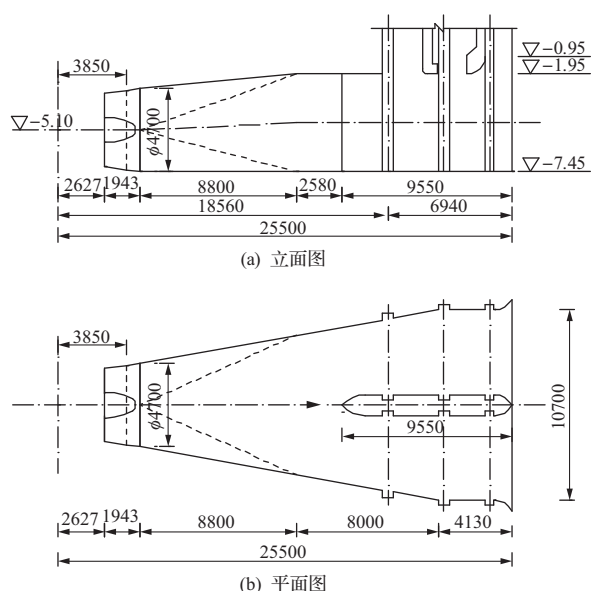


图4 SC4方案出水渠道单线图

(尺寸单位:mm,高程单位:m)

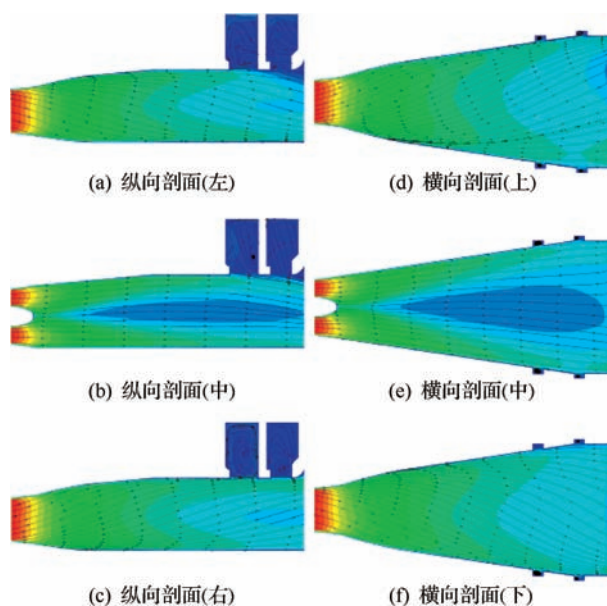


图5 SC3Z方案出水渠道流场图

### 3.4 水力优化设计结果分析

由表2可以看出:可研阶段初拟的出水渠道(SC1方案)正、反向的水头损失较小;反向运行时渠道内流速分布较均匀、水流方向基本垂直渠道出口断面。出水渠道优化后,SC3方案较SC1方案和SC2方案水力条件总体有所改善,但效果不太明显;在正向运行工况时,水头损失减小0.002m,减小率为1.96%;在反向运行工况时,水头损失减小0.0012m,减小率为1.95%。

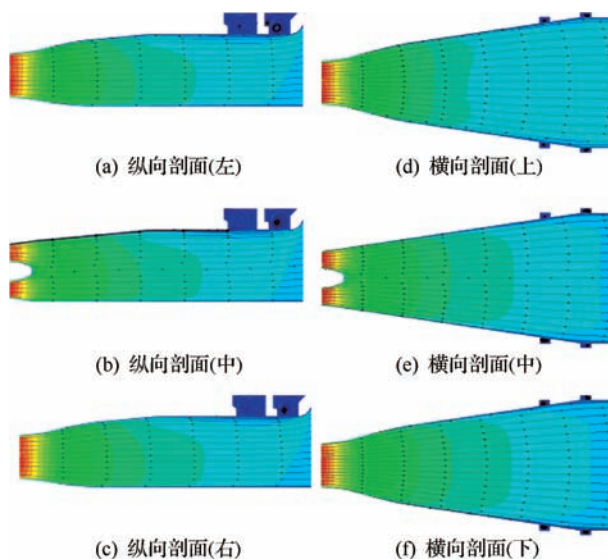


图6 SC3F方案进水渠道流场图

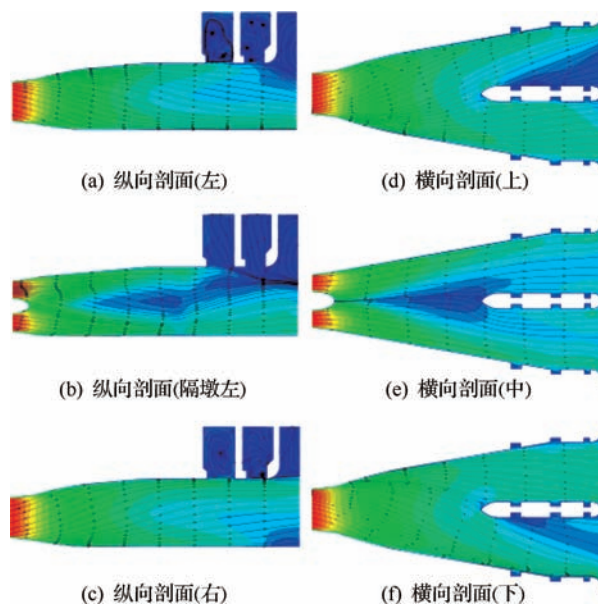


图7 SC4Z方案出水渠道流场图

由图5和图6可以看出:SC3方案正向排涝工况受渠道进口环量的影响,水流呈螺旋状进入出水渠道;出水渠道内水流的旋转运动从渠道进口一直持续到渠道出口,在旋转状态下流畅地完成扩散过程;水流在整个渠道内的扩散均匀平缓,在旋转水流所具有的离心力作用下,渠道断面四周的流速大于中心的流速,渠道内未出现明显的水流脱壁或旋涡等不良流态;SC3方案反向引水工况渠道内的流速由进口至出口逐渐增大,整个进水渠道内的水流收缩平缓、流速分布均匀、流线层

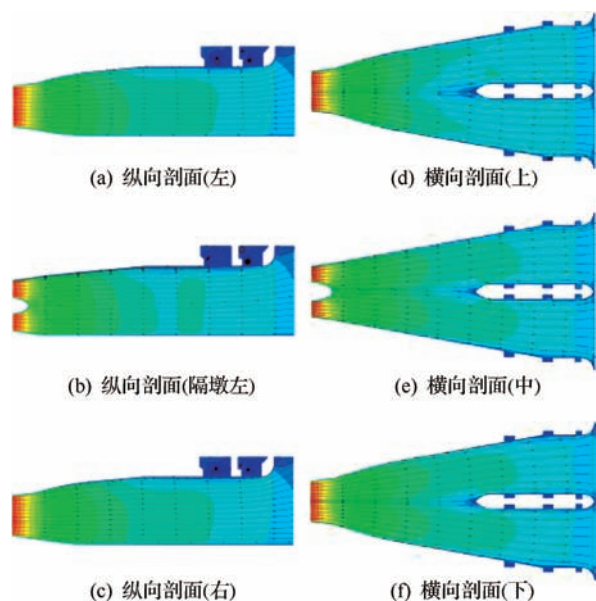


图8 SC4F方案进水流道流场图

次分明,无任何不良流态。说明可研阶段拟定的出水流道方案基本合理。

由表2还可以看出:SC4方案较SC3方案和SC1方案水力条件稍差,但差距不大;在正向运行工况时,水头损失增加分别为0.0127m和0.0147m;在反向运行工况时,水头损失增加分别为0.0062m和0.0074m。由图7和图8可以看出:SC4方案正向排涝工况流道内增设中隔墩后,在中隔墩附近虽存在小范围低速区,但水流总体扩散平缓,流道内无不良旋涡;SC4方案反向引水工况进水流道的水流收缩均匀,流道出口流速分布均匀,水流方向基本垂直于流道出口断面。说明SC4方案从水力条件上讲不如SC3方案和SC1方案,但其水头损失和水力性能相差不大,流道水力性能仍属优异。

### 3.5 出水流道最终设计方案选择

众所周知,泵站进、出水流道设计不但要考虑流道的水力性能,还要结合泵型、泵站运行年利用小时数、泵房布置等因素经技术经济比较后确定。

西河泵站是排涝泵站,兼顾反向应急补水功能,与供水泵站和调水泵站相比,其年利用小时数很低。根据中山市类似泵站的运行情况预测,其单泵年排涝开机在200h左右,双向泵单泵年反向引水开机预计在

400h以内。以SC3方案为基准,SC4方案因水力性能差距在项目全生命周期(50年)的增量电费估算结果见表3。

表3 SC4方案增量电费估算结果

项 目	排 涝	引 水	合 计
增量水头损失/m	0.0147	0.0074	
设计净扬程/m	1.99	1.20	
增量水头损失/设计净扬程/%	0.74	0.62	
设计工况轴功率/kW	800	715	
年运行台时	1600	1600	
运行年数	50	50	
用电单价/[元/(kW·h)]	0.383	0.383	
增量电费/万元	18.14	13.58	31.72

注 年运行台时数排涝工况按8台泵各200h计,引水工况按4台泵各400h计;用电单价按中山市2021年稻田排灌用电电价计算。

由表3可见:若采用SC4方案的出水流道,比采用SC3方案预计在泵站全生命周期增加运行电费仅为31.72万元。

由图3和图4可知:若采用SC4方案,泵房顺水流方向长度将比SC3方案减短1.00m,有利于节省泵房钢筋混凝土工程量。出水流道内增设中隔墩后,为保持流道的净宽,流道边墙会随之减薄;与此同时,因出水流道底、顶板垂直水流方向跨度减小,也可适当减薄出水流道底、顶板厚度,这都将减小泵房钢筋混凝土工程量。另外,出水流道内增设中隔墩,不但可减小泵站出水流道闸门跨度和工程量,而且还因出水流道的闸门变窄可采用单吊点启闭机启闭,也将有利于节约工程投资,还可提高闸门运行的安全可靠。

出水流道若采用SC4方案,与SC3方案相比,其工程造价降低额估算见表4。

表4 SC4方案降低工程造价估算

项 目	钢筋混凝土	闸门及埋件	合 计
减少工程量	5953m <sup>3</sup>	16.86t	
单 价	1750元/m <sup>3</sup>	16000元/t	
降低造价/万元	1041.77	26.98	1068.75

注 钢筋混凝土含钢量按80kg/m<sup>3</sup>估算;启闭机投资基本持平,不参与对比。

由表4可见:若采用SC4方案的出水流道,比采用

SC3 方案预计可降低工程造价 1068.75 万元,从项目全生命周期的总投资来看,若采用 SC4 方案可节约成本 1037 万元。

因此,综合考虑流道水力性能、泵型、泵站运行年利用小时数、泵房布置等因素,经技术经济比较后,西河泵站工程双向竖井贯流泵装置出水流动道最终推荐采用 SC4 方案,即:采用直管式出水流动道,流动道出口断面至水泵叶轮中心的长度为 25.50m(其中出水流动道总长为 22.873m),流动道出口断面的宽度和高度分别为 10.70m 和 5.50m,流动道设 1.20m 厚的中隔墩,流动道平面扩散角  $19.65^\circ$ 、当量扩散角  $11.75^\circ$ ,设计排涝流量  $50.00\text{m}^3/\text{s}$  时出口断面平均流速  $0.957\text{m}/\text{s}$ 、设计引水流量  $36.25\text{m}^3/\text{s}$  时进口断面平均流速  $0.694\text{m}/\text{s}$ 。

## 4 结 语

a. 在对西河泵站双向竖井贯流泵装置出水流动道水力优化分析计算的基础上,综合考虑流道水力性能、泵型、泵站运行年利用小时数、泵房布置等因素,经技术经济比较后,推荐采用的西河泵站工程出水流动道 SC4 方案水力性能优异、项目全生命周期投资最省。

b. 由于现行《泵站设计规范》规定出水流动道当量扩散角宜取  $8^\circ \sim 12^\circ$ ,而推荐的西河泵站出水流动道方案当量扩散角为  $11.75^\circ$ ,已接近规范推荐值的上限,虽经 CFD 计算后所推荐的出水流动道水头损失仍较小,但因规范所限,未采用进一步缩短出水流动道的方案。建议以全生命周期的投资最省的原则,得出可能的更经济方案,为今后类似泵站的流道设计提供参考。

c. 出水流动道扩散角对流道出水流态和水力性能的影响很大,是大型低扬程泵站出水流动道三维型体水力设计的关键参数之一。现行《泵站设计规范》以当量扩散角作为出水流动道主要水力控制指标,当量扩散角法实际上是将出水流动道三维问题简化为二维问题来计算,完全不能反映流道中隔墩的影响,在很大程度上

也不能反映流道内水流的实际情况,更不能满足现代大型低扬程泵站建设的高标准、高要求。随着 CFD 理论和技术水平的不断进步,现已完全具备了采用三维计算方法对流道进行水力优化设计的条件。建议在现行《泵站设计规范》修编时,对大中型泵站应要求进行流道 CFD 水力计算,以水头损失作为流道水力性能主要考核指标;对供水、调水泵站以当量扩散角和平面扩散角作为流道水力设计参考指标,对排涝泵站可不考核流道扩散角。◆

## 参考文献

- [1] 王刚. 泵站进、出水流动道优化水力设计方法研究[D]. 扬州:扬州大学,2012.
- [2] 泵站设计规范:GB 50265—2010[S]. 北京:中国计划出版社,2011.
- [3] 洪飞. 大型低扬程泵站出水流动道扩散角的分析与应用[D]. 扬州:扬州大学,2017.
- [4] 陆林广,刘军,梁金栋,等. 大型泵站出水流动道三维流动及水力损失数值计算[J]. 排灌机械,2008(3):51-54.
- [5] 陆林广. 高性能大型低扬程泵装置优化水力设计[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.
- [6] 刘军,施伟,徐磊,等. 大型低扬程泵装置水力设计关键技术的创新与发展[J]. 江苏水利,2021(12):1-14.
- [7] 成立,薛坚,刘超,等. CFD 技术在泵装置水力优化设计中的应用[J]. 南水北调与水利科技,2007(3):33-37.
- [8] 谢荣盛,汤方平,邵勇. CFD 在新沟河双向竖井贯流泵站中的应用[J]. 中国农村水利水电,2014(12):109-112.
- [9] 夏烨,汤方平,石丽建,等. 双向竖井贯流泵装置数值模拟及试验分析[J]. 中国农村水利水电,2017(7):149-153.
- [10] 陈坚,王星梅,林农,等. 西河泵站工程可行性研究报告(报批稿)[R]. 中山:淮安市水利勘测设计研究院有限公司,2021.
- [11] 陆林广,林农,徐磊,等. 西河泵站工程大型竖井贯流泵装置进、出水流动道 CFD 优化水力设计计算研究报告[R]. 扬州:扬州大学,淮安市水利勘测设计研究院有限公司,2021.





# 感潮河段适应水位变化自升降拦污设施应用研究

孙超君 张宜亮 张 辉

(江苏省秦淮河水利工程管理处,江苏 南京 210022)

**【摘 要】** 江苏省秦淮新河泵站处于秦淮新河入江口处,水位最大变幅达8m,传统形式的拦污设施无法满足泵站的安全运行要求。结合现场实际情况,研发了由滑动槽、端部水力自升降装置、拦污排等构成的感潮河段适应水位变化自升降拦污设施。运行效果表明,该设施大大降低了设备运行成本,为维护河湖良好生态环境、充分发挥水利综合效益、全力保护秦淮河流域水生态环境提供了有力保障,可为其他工程提供借鉴和参考。

**【关键词】** 感潮河段;拦污设施;滑动槽;水力自升降装置;拦污排;水流力

中图分类号: TV671

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)10-038-05

## Study on the application of self-lift trash interception facility adapting to water level changes in tidal reach

SUN Chaojun, ZHANG Yiliang, ZHANG Hui

(Management Division of Qinhuaihe River Hydraulic Engineering of Jiangsu Province, Nanjing 210022, China)

**Abstract:** The Qinhuai New River Pumping Station in Jiangsu Province is located at the entrance area of Qinhuai New River with the maximum variation of water level being 8m. The traditional trash interception facilities cannot meet the safe operation requirements of the pumping station. Combined with the actual situation of the site, the self-lift sewage interception facility adapting to water level changes in tidal reach which is composed of sliding groove, hydraulic self-lift device at the end and trash barrier is developed. The operation result shows that the facility greatly reduces the operation cost of equipment, provides a strong guarantee for maintaining the good ecological environment of rivers and lakes, gives full play to the comprehensive benefits of water conservancy, protects the water ecological environment of Qinhuai New River Basin and provides reference for other projects.

**Keywords:** tidal reach; trash interception facility; sliding groove; hydraulic self-lift device; trash barrier; current force

河道水面上的漂浮物顺流而下,易聚集在河道凹岸、拦河坝、泵站前,不仅对沿江水质、水面景观、供水、航运等产生不利影响,还会降低泵站运行效益,对枢纽工程运行安全构成威胁<sup>[1]</sup>。拦污设施是在水电站、泵

站、水库中布置的专门用于拦截污浮物以保证工程运行安全的设施。常规情况下,水位变幅较小时,拦污设施一般采用两端牵引式结构,在拦污范围的两端各设置固定锚固结构,由拦污排体自动调节适应水位的小

收稿日期: 2021-12-15

作者简介: 孙超君(1988—),女,高级工程师,主要从事水利运行与管理工作。

幅变化。随着我国水利工程的建设发展,拦污设施在传统两端固定牵引式结构的基础上做了一定的改进,瀑布沟水电站通过人工调整不同高程的岸边挂桩位置来适应水位变化,但人工改变挂桩位置运行安全风险高,且操作时受水位气象条件影响较大<sup>[2-6]</sup>;小湾水电站采用人工操作卷扬机调节以适应水位变化,但需要人员不间断地现场值守,长期使用不方便<sup>[7]</sup>。

随着水利工程的不断建设和发展,拦污设施还需要具有适应水位变化、经济适用、操作方便等特点。感潮河段引水工程的特点是水位变幅大,而水草等漂浮物重量轻、面积大、数量多,受水位的影响大,水位高时,水草可从上方进入工程管理区;水位低时,水草可以从下方进入工程管理区,起不到拦污效果。因此,在感潮河段不适合采用传统的两岸固定牵引式拦污装置,需专门研究适应水位变化自升降的拦污设施才能保证拦污效果。

## 1 工程概况

秦淮新河水利枢纽工程位于南京市雨花台区秦淮新河入江口处,由一座大型节制闸和一座大型泵站组成,采用闸、站结合的布置形式,是秦淮河流域主要控制工程之一,具有防洪、排涝、抗旱、改善城市水环境、

保障生态水位、航运等多种功能<sup>[8]</sup>。

秦淮新河泵站建成于1982年,为双向灌排两用泵站,灌排设计流量均为 $50\text{m}^3/\text{s}$ ,灌溉设计扬程 $2.5\text{m}$ ,排涝设计扬程 $2.0\text{m}$ ,2级水工建筑物,采用平面S形流道、快速闸门断流。泵站正常蓄水期设计水位 $3.65\text{m}$ ,防洪期设计水位 $11.47\text{m}$ ,变幅达 $7.82\text{m}$ 。

近年来,由于水体富营养化等原因,在河道出现成片生长的水生植物凤眼莲(又名水葫芦),其茎叶悬垂于水上,藁枝匍匐于水面,繁殖迅速,人工清理工作强度大、难度高。为保证秦淮河水环境,维持秦淮河流域生态水位,秦淮新河泵站全年常态化运行,2020年全年开机运行232天,抽引江水 $5.3\text{亿}\text{m}^3$ 。因水葫芦等污浮物积聚在泵站进水口拦污栅处(见图1),拦污栅前堆积的污物不能及时清理,增加了拦污栅前后的水位差,使得拦污栅易发生阻塞,水流通过拦污栅产生水力损失,增加了泵站运行能量消耗,引起水泵汽蚀、机组振动等危害,对泵站的安全运行造成隐患。目前采用的解决方案是频繁地开停机,人工打捞水草等漂浮物,这种方法不仅费时费力费工费钱,而且影响机组运行,效果甚微。因此,为有效拦阻水草,在泵站进水口拦污栅前增设拦污设施是必要的。



(a) 泵站进水口漂浮物



(b) 拦污栅前打捞出的垃圾

图1 未安装拦污设施时泵站进水口照片

## 2 设计需求分析

秦淮新河泵站建设年代久远,没有配套相应的拦污设施且无法改造,结合秦淮新河泵站水位变幅情况(约 $8\text{m}$ ),考虑不破坏现有建筑物结构,结合工程运行需求,研究采用“固定滑动槽+拦污设施端部连接装置”的方案。其中,两岸拦污设施连接装置随水位升降

控制技术方案有人工操作、自动化控制和水力自升降控制3种。

**a. 人工操作。**人工操作卷扬机,使拦污设施升降,但水位日间变化幅度大,安排人工值班增加人力消耗成本,费力费工费钱,如操作不准确易破坏拦污设施。因此,人工操作不满足工程运行要求。



b. 自动化控制。加装自动化测控系统,根据自动测量的水位情况自动控制固定连接装置升降。该方法建设投入资金较大,且水位自动测量设备易损坏,还需专人进行日常维护,运行成本高。

c. 水力自升降控制,利用水的浮托力带动固定连接装置升降。该方法不需要专人维护,建设投入资金少,日常维护工作量小,维修保养费用较低,性价比高,维护方便<sup>[9]</sup>。

秦淮新河泵站需全年常态化运行,经比选,拦污设施选用水力自升降控制技术方案,在泵站两侧安装滑动槽,一侧安装在泵站翼墙,另一侧安装在泵站导流墩上,利用水的浮托力带动拦污设施升降。

### 3 拦污设施结构布置

水力自升降控制拦污设施由左右岸滑动槽、端部水力自升降装置、钢丝绳、拦污排组成(见图2);拦污排由浮筒、尼龙绳网和铅坠组成,浮筒下挂尼龙绳网,下挂铅坠。在端部水力自升降装置浮力的带动下,水力自升降装置随水位变化在左右岸固定滑动槽内自由上下移动,带动拦污排上下移动,自动调整悬链线矢高以适应不同的水位高度。

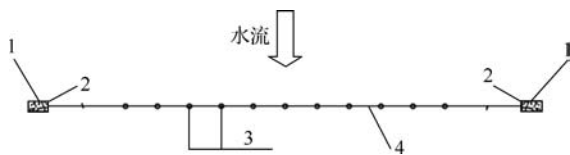


图2 拦污设施组成结构

1-左右岸滑动槽;2-端部水力自升降装置;3-拦污排;4-钢丝绳

#### 3.1 滑动槽设计

目前常用的拦污设施滑动槽与墙面固定的方式是螺纹固定,而该装置常年与水面接触,螺纹连接处易产生锈蚀现象,导致滑动槽更换拆除时可能会因锈蚀变得困难费力,加大工作时间。为解决这个问题,安装滑动槽时设置缓冲装置(见图3),装置包括套杆、转杆、转轴、第一伸缩杆、第二伸缩杆、弹簧、第一把手、固定块、插杆、限位块和插槽,需要将固定板拆卸时,可以先拉动第一把手,从而带动第二伸缩杆在第一伸缩杆内向右移动,使插接在插槽内的插杆脱离插槽,此时因为

固定板前端设置有套杆、转杆和转轴,且转轴焊接有第一伸缩杆的缘故,可以将第一伸缩杆转动至左侧,从而使限位块与第一伸缩杆形成的限位结构解除,此时固定板与辅助块解除固定关系,从而使装置能够成功拆卸。通过此装置有效避免了螺钉螺母固定可能产生锈蚀导致难以拆卸的问题,安装、拆卸快捷便利,极大节省了操作人员的时间,省时省力,而且延长了设施的使用寿命。

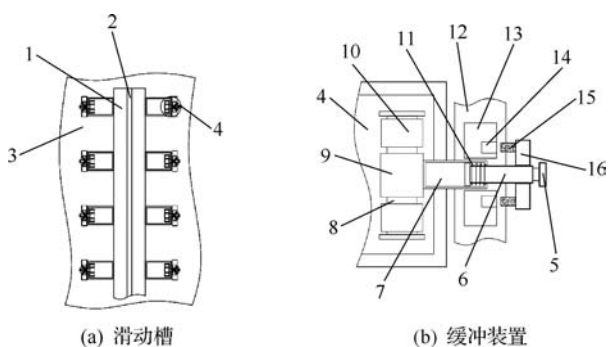


图3 滑动槽装置结构示意图

1-滑动槽;2-滑动槽口;3-翼墙墙面;4-固定板;5-第一把手;6-第二伸缩杆;7-第一伸缩杆;8-转杆;9-转轴;10-套杆;11-弹簧;12-辅助块;13-限位块;14-插槽;15-插杆;16-固定块

#### 3.2 端部水力自升降装置设计

端部水力自升降装置连接拦污排和翼墙(导流墩)固定滑动槽,并提供拦污排端部装置随水位自由升降的牵引力,由构架、滑轮、吊耳等组成(见图4)。滑轮共设置有6组,且每组滑轮设置有3个,便于升降装置在滑动槽内部滑动,在浮力的带动下,升降装置随水位变化在滑动槽内自由沿垂直方向移动,带动拦污排沿垂直方向移动,自动调整钢丝绳矢高以适应不同的水位高度,使用性能佳。其受力包括装置产生的浮力、装置重力、浮筒牵引荷载产生的摩擦力等,水力自升降的原理如下:

a. 水位上升时,浮力 > 重力 + 摩擦力,装置随水位自动上升。

b. 水位下降时,重力 > 摩擦力 + 浮力,装置随水位自动下降。

c. 自身浮力维持其连接轴高程与拦污设施浮筒连接轴高程保持一致。



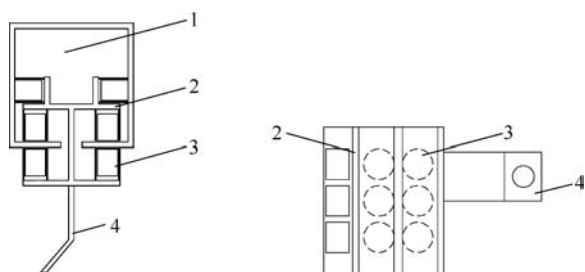


图4 端部水力自升降装置结构示意图

1-滑动槽;2-构架;3-滑轮;4-吊耳

端部连接装置牵引钢丝绳,钢丝绳两端用锚头锚

固,钢丝绳可随水位高低变化在滑动槽内上下滑动;滑动产生的恒定拉力使拦污设施钢丝绳保持设计张力,处于张紧状态。

### 3.3 拦污排设计

拦污排主要由浮筒组成,采用线性低密度聚乙烯浮筒,一次成型无焊接缝,内部填充聚氨酯泡沫,具有不吸水不易变形、耐冲击碰撞、抗腐蚀氧化等优点,除遇强自然力及人为的不当使用,不需要保养、维修等费用,性价比高,维护方便,具体参数见表1。

表1 浮筒性能参数

型号	材质	直径	长度	浮力	孔径	均厚	使用寿命
FT200 × 1000	LLDPE	200mm	1000mm	28kgf	40mm	4mm	15年以上

浮桶静止在水中时,水平方向主要受到水流力和钢丝绳的牵引力,浮筒受到的水流量按下式估算<sup>[4]</sup>:

$$F_m = C_m \frac{\rho}{2} v^2 A \quad (1)$$

式中: $F_m$  为浮筒受到的水流量,kN; $C_m$  为浮筒水流阻力系数; $\rho$  为水密度, $\text{t/m}^3$ ; $v$  为水流速度, $\text{m/s}$ ; $A$  为浮筒水下部分垂直于水流方向的投影面积, $\text{m}^2$ 。

单只浮桶受到的上下游水流量分别按下式估算:

$$F_{xsc} = C_{xsc} \frac{\rho}{2} v^2 B \quad (2)$$

$$F_{xmc} = C_{xmc} \frac{\rho}{2} v^2 B \quad (3)$$

水草等漂浮物浮力小、体积大、数量多,易从浮筒下部进入工程区域,因此,为拦截水中漂浮物并实现高效拦污,在拦污浮筒上挂50cm深、网孔5cm的规格的尼龙绳网,确保阻拦水草效果,有效提升拦污排的拦污能力,从而提升装置的整体实用性;在浮筒下侧安装配重块,配重块选用300g的铅坠,且水边处浮筒下安装配重块4块,中间每只浮筒下装配2块(见图5),通过设置配重块保障浮筒运行工况下整体平衡以及尼龙绳网的垂直度,通过配重力矩、浮筒浮力矩与水流力矩来实现受力平衡,防止拦污排翻转。

## 4 应用情况

根据现场地形条件,设计高水位时泵站进水口水面宽度约30m,历史最大流量为 $70.9 \text{ m}^3/\text{s}$ ,对应断面面

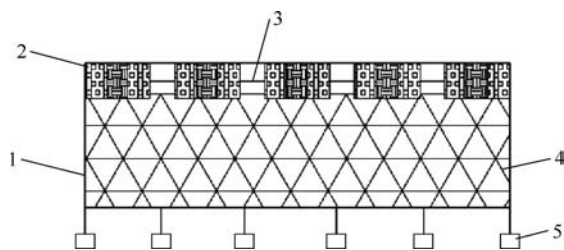


图5 拦污排结构示意图

1-拦污排;2-浮筒;3-钢丝绳;4-尼龙绳网;5-配重块

积约 $210 \text{ m}^2$ ,对应流速为 $0.34 \text{ m/s}$ 。该设施的主要功能是阻拦水草进入工程区域,无须高强拦截能力,而流速较小,故选用 $\phi 8$  钢丝绳,设1道。拦污设施滑动槽左右岸对称布置,滑动槽布置高程为 $3.0 \sim 12.0 \text{ m}$ ,滑动槽长9m,拦污排由30只浮筒通过钢丝绳连接而成,在浮筒上挂50cm深、网孔5cm的尼龙绳网;放置300g的铅坠加大配重。左右岸水边处浮筒下安装配重块4块,其他每只浮筒下装配2块。在设计低水位泵站停机时安装拦污设施,尽可能减少对引江调水工程的影响,选配适当体积和浮力的浮筒,调整钢丝绳至完全阻挡进水口以适合拦阻水草。

2019年10月30日,秦淮新河泵闸拦污设施安装完成并投入运行。截至2021年11月,拦污工程已运行2个主汛期,系统运行性能稳定,在水位发生变化时,端部水力自升降装置利用水的浮托力带动固定连接装置升降,维持钢丝绳始终处于张紧状态,时刻呈良好状态,阻拦水草成效明显(见图6);创新性提出的在拦污浮筒上



挂长度适中的尼龙绳网以及在浮筒下侧安装配重块的改造,不仅通过配重力矩、浮筒浮力力矩与水流力矩来

实现拦污排受力平衡,防止拦污排翻转,而且能有效拦截水面以下的杂物,为工程安全运行提供保障。



(a) 安装拦污设施前



(b) 安装拦污设施后

图6 安装拦污设施前后秦淮新河泵站前池对比

## 5 结 语

a. 因水葫芦等污浮物积聚在泵站进水口拦污栅处,使得拦污栅发生阻塞,增加了拦污栅前后的水位差,增大水流对拦污栅的冲击力,导致水泵效率降低,增加了泵站运行能量消耗,引起水泵汽蚀、机组振动等问题,影响水流流态,对泵站安全运行造成隐患。泵站被迫多次停机人工打捞水草等漂浮物,这种方法不仅费时费力费工费钱,而且效果甚微。安装拦污设施后,不仅能有效改善泵站进水口水流条件,明显提高工程运行效率,而且降低了人工打捞水草难度,不需要机组停机操作,大大降低了设备运行成本,为工程安全运行提供保障。

b. 秦淮新河泵站全年常态化运行抽引江水,运行期平均补水流量不少于  $30\text{m}^3/\text{s}$ 。往年每周停机 8h 人工打捞水草,对保证流域生态水位有一定影响。安装该拦污设施后,大大减少了每年泵站机组因打捞水草增加的停机时间,有效保证了秦淮河生态水位和生态基流,国考、省考断面水质持续优于考核标准。为维护河湖良好生态环境、充分发挥水利综合效益、全力保护流域水生态环境提供了有力保障。

c. 秦淮新河泵站建设年代久远,没有配套相应的拦污设施且无法改造,传统拦污设施需改造基础,造价较高,且后期运行费用较高。改造后的拦污设施不仅初期建设投资少,施工难度相对较小,结构安装简单,造价低廉,拦截水草效果明显,见效快;而且该设施投

入运行后不需要人工操作,运行成本低,日常维护工作量小,维修保养费用低、性价比高,维护方便<sup>[10]</sup>。适应水位变化自升降拦污设施为解决感潮河段水工建筑物拦污问题提供了可靠、高效的新方案,可在不适合建设传统拦污设施的工程中应用,具有一定的推广价值。◆

## 参考文献

- [1] 蔡莹,唐祥甫,蒋文秀.河道漂浮物对工程影响及研究现状[J].长江科学院院报,2013(8):84-89.
- [2] 郑江,刘勇,倪迎峰.超大水位变幅水力自升降拦漂设施研究与应用[J].人民长江,2017(2):71-73.
- [3] 肖源鸿,刘然,卢小伶.于桥水库放水洞烂污栅重建介绍[J].水利建设与管理,2009,29(7):76-78.
- [4] 周江.大型水电站水库大体量漂浮物打捞方法探究[J].云南水力发电,2020(3):111-113.
- [5] 郝镇.小湾水电站进水口拦污漂制作及安装工艺研究[J].施工技术,2015(6):605-607.
- [6] 邓育林.漫湾水电厂拦污栅前后水位差过大处理措施[J].水电站机电技术,2008(1):53-55.
- [7] 蔡莹,李章浩,李利,等.河道型水库漂浮物综合治理措施探究[J].长江科学院院报,2010(12):31-35.
- [8] 孙超君,董舒,陈书宁.水下抛石处理技术在秦淮新河闸加固工程中的应用[J].水利建设与管理,2019,39(5):47-50.
- [9] 钱福军,周和平,夏卫中.长江感潮段闸站工程摩阻型拦栅设施应用[J].排灌机械工程学,2016(4):313-320.
- [10] 黄会宝,文豪,陈红.高坝大库型水电站拦污排的应用研究[J].水电与新能源,2012(6):37-39.

# 高原地区大坝基础振冲碎石桩施工研究

赵如阳 贾洪波

(中国安能集团第三工程局有限公司, 四川 成都 611130)

**【摘要】** 为解决高原地区复杂地质条件下大坝基础加固难题,巴塘水电站大坝基础采用振冲碎石桩施工,通过引孔及下设护筒工序衔接的成功运用,对原地基土进行置换,与原地基土共同构成复合地基,靠桩体比周围土的刚度大,使地基应力向碎石桩集中,达到降低在桩周土上的附加应力的效果,有效提高了整个复合地基的承载力。

**【关键词】** 大坝基础处理;振冲碎石桩;高原地区

中图分类号: TV52

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)10-043-05

## Study on vibroflotation gravel pile construction of dam foundation in plateau area

ZHAO Ruyang, JIA Hongbo

(The Third Engineering Bureau Co., Ltd. of China An' neng Construction Group, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** The vibroflotation gravel pile construction is adopted in Batang Hydropower Station dam foundation in order to solve the problem of dam foundation reinforcement under complex geological conditions in the plateau area. The original foundation soil is replaced to form the composite foundation jointly with the original foundation soil through successfully applying drilling hole and lower pile casing procedure cohesion. The pile has higher stiffness than the surrounding soil, the foundation stress is concentrated to the gravel pile, thereby lowering the additional stress on the soil around the pile, and efficiently improving the bearing capacity of the whole composite foundation.

**Keywords:** dam foundation treatment; vibroflotation gravel pile

### 1 工程概况

巴塘水电站位于金沙江上游河段四川省和西藏自治区的界河上,右岸为西藏昌都市芒康县,左岸为四川甘孜藏族自治州,施工区域平均海拔 2500m。

河床坝基心墙下存在范围较小的砂层透镜体,其范围在坝上下游方向延伸约 120m,坝轴线方向约 180m,最大埋深距地面约 20m。经分析虽然该透镜体

不存在液化问题,但其力学指标低于相邻砂卵砾石层,且心墙正好坐落在该透镜体上,为避免不均匀沉降造成心墙局部破坏,同时提高心墙部位地基承载力,采用碎石振冲桩进行处理。大坝基础振冲碎石桩施工范围为坝上 0+012~坝下 0+013,坝右 0+089.12~坝右 0+273.12,2480~2466m 高程采用振冲碎石桩对基础进行加固处理。

碎石桩桩径 1.0m,等边三角形布置,桩间距

收稿日期: 2021-11-24

作者简介: 赵如阳(1992—),男,学士,从事水利水电工程施工技术管理工作。





3.0m;振冲碎石桩法处理后复合地基承载力特征值要满足设计要求;砂砾石基础复合地基承载力特征值550kPa;砂层透镜体基础复合地基承载力特征值400kPa。

## 2 工程地质条件

坝址区段河谷相对较窄,现代主河床位于右侧,坝前左侧为宽缓一级阶地,平面形态呈凸向岸外“月牙”形,地面高程2491~2495m,内侧坡脚地形低洼。坝址区水流平缓,枯水期水位2486m(2006年11月),河床地面高程2483m。

据目前勘探资料,河床覆盖层厚17.70~58.80m,河心纵向覆盖层厚35.35~55.55m,下游侧相对较厚。覆盖层总体上呈江心一带堆积层较厚,向两侧逐渐变薄。覆盖层以砂卵砾石层为主,局部夹有含砾中粗砂、含泥砾粉细砂透镜体,分布厚度变化较大,一般埋深大

于20m。河床覆盖层按其颗粒组成、分布层次等,自下而上大致可分为4大岩组。

I岩组( $Q^{\text{al}}-I$ )——含泥砾中细砂层:该岩组分布于河床中心部位、覆盖层底部,厚度7.40~9.95m,向上下游侧呈透镜状渐变尖灭。

II岩组( $Q^{\text{al}}-II$ )——砂卵砾石层:分布于河床覆盖层中下部,揭露层厚4.7~25m,埋深18~33m,其中河床部位埋深较大,分布规律为两侧薄河心厚。

III岩组( $Q^{\text{al}}-III$ )——含泥砾中粗砂层:分布于河床覆盖层中上部,揭露该岩组埋深12~26m,横向分布连续,左厚右薄,推测纵向延伸长度大于300m,向上下游侧呈透镜状渐变尖灭。

IV岩组( $Q^{\text{al}}-IV$ )——砂卵砾石层:分布于河床覆盖层上部,层厚12~27m,分布规律为两侧相对较薄河心厚,局部夹有含砾中粗砂层透镜体。

河床覆盖层物理力学参数建议值见表1。

表1 河床覆盖层物理力学参数建议值

岩组	干密度/(g/cm <sup>3</sup> )	比重	孔隙比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	内摩擦系数 $f$	$E_0$ /MPa	承载力 $f_k$ /kPa
I岩组	1.83	2.80	0.530	0	31.3	0.61	10~20	200~250
II岩组	2.10	2.83	0.341	0	33~35	0.65~0.70	20~25	350~400
III岩组	1.85	2.79	0.508	0	29.5~31	0.565~0.61	10~15	200~250
IV岩组	2.08	2.85	0.370	0	32.2~35	0.63~0.70	15~20	350~400

## 3 试验桩施工

### 3.1 试验桩布置

试验区分为B、C两个试验区,B区位于坝右0+180.12处的平行于坝体的直线上,范围为坝上0+012.00~坝下0+013.00之间;C区位于坝右0+091.72处的平行于坝体的直线上,范围为坝上0+012.00~坝下0+013.00之间,设计桩径为1.0m。

由于河床水位保持于2484m左右,为保障施工平台干地作业,施工平台设置于2485m高程,部分施工区域为河床原始地层,其余部分为回填施工。

### 3.2 振冲碎石桩生产性工艺探索

试验B区及C区揭露地质情况基本与设计地质层面吻合,振冲碎石桩施工区2485m高程以下0~5m左

右层面孤石含量较大。

试验B区=2485m高程以下5~13m为砂卵砾石层,其粒径相对较大,卵砾石含量较大,猜测与截流抛填及白格堰塞湖冲刷有一定关系,该地层胶结性较差。中部13~18m为含砾中粗砂层,该层上层部位有部分粉细砂夹杂砾石,下部砾石占比较多。约18m以下为砂卵砾石层,其地层坚硬。

试验C区=2485m高程以下5~13m为砂卵砾石层,越靠近左岸侧含泥量较大,且含泥深度越大,该部位为岸坡部位,其下部孤石量较大,且块径较大。13~16m为含泥砾中粗砂层,由于该部位处于透镜体消融部位,其层厚区别较大。

分别在试验B区(地层中上部孤、漂石未经挖除)和试验区B内(地层上部2.0m深度范围内孤、漂石已

基本挖除)进行试验,均下设约 6.0m 护筒。

振冲碎石桩实际施工期间对振冲器造孔进行了一系列的改进与调试,在最初摸索阶段旋挖钻机引孔 8m 左右时,使用 ZCQ180 型振冲器常规加水造孔,其电流值达约 350A,多次超过荷载跳闸,均不能有效进行造孔施工,极易发生埋设振冲器事故,同时对振冲器本身的损害较大。后续施工中又对 ZCQ180 型振冲器加装供风系统进行造孔施工,其功效较只加水方式有一定的优势,但是在造孔施工中电流依旧超过负荷,也不能达到设计深度。且由于供风扰动,孔段均出现不同程度塌孔现象<sup>[1]</sup>。

在探索造孔过程中,使用大功率 ZCQ260 型振冲器进行了相关试验,在更换了大功率振冲器后,其优势较 ZCQ180 型振冲器无明显变化,在该地层下大功率振冲器设备使用更加危险。

至此从护筒下设着手改进工艺,将护筒下设增加至约 13m,上部试验旋挖钻机造孔后,再试验旋挖钻机螺旋钻头扰动切割下部,再使用振冲器进行造孔作业,经过现场试验,该施工工艺能够在该地层特性下顺利成桩<sup>[2]</sup>。

同时在试验 C 区采取同样工艺进行施工,其功效从两天成桩 1 根提升为一天成桩 3 根,很大程度上提升了施工功效。

### 3.3 振冲碎石桩试验桩施工

#### 3.3.1 造孔清孔

针对地基处理振冲碎石桩的实际情况,考虑缩短工期、节约成本、降低造价等因素,采用“上部回填部分及 IV 岩组( $Q^{\text{al}}$ -IV)——砂卵砾石层旋挖钻机造孔+下部振冲器造孔制桩”的施工工艺<sup>[3]</sup>。

对于  $Q^{\text{al}}$ -IV 部位,由于胶结性差及地下水饱和度

较高且水压较大,造孔难度较大,针对该地层的特殊性,对上部孤石及块石进行换填,使用旋挖钻机引孔穿透该层并在该地层全段下设护筒,保障该地层成孔率。护筒按照 6~8m 一节进行下设,护筒连接采用焊接,制桩后进行护筒起拔拆除。钢护筒(壁厚 20mm、直径 1m)顶端高出地面 0.30m,护筒埋设偏差不超过 30mm。钢护筒下设采用旋挖钻机钻设直径为 1.0m 的导孔,75t 履带吊配合 ZD120A 型振动锤下设护筒。

造孔过程中,振冲器应下沉、上提反复 2~3 遍扩孔,确保填料顺畅,保证桩径满足设计要求。

在达到设计孔深及设计处理边界条件后,返出泥浆过稠或存在桩孔缩颈现象时宜进行清孔,一般清孔 2~3 遍,直至孔口返出泥浆变稀,振冲器电流基本为其空载电流值<sup>[4]</sup>。

#### 3.3.2 填料制桩

采用含泥量小于 5% 的碎石等硬质材料,不使用已风化及易腐蚀、软化的石料。填料粒径宜为 20~80mm。最大粒径不大于 100mm。填料应采用连续级配的碎石料,小、中碎石比为 1:1,在现场指定位置进行拌和,经过拌和后进行振冲填料。

桩体加密从桩底标高开始,加密段长度不得超过 0.50m,逐段向上进行,中间不得漏振。依靠振冲器的水平振动力将填入孔中的石料不断挤向侧壁土层中同时使填料挤密,直到满足设计要求。

通过安装在不同设备上的传感器,实现对振冲施工过程中的深度、电流、电压、填料量进行实时监控,并生成统计报表,对整个施工过程进行动态跟踪,科学记录制桩过程数据,对制桩过程进行监督,有效控制施工质量<sup>[5]</sup>。具体施工技术参数见表 2。

表 2 技 术 参 数

类 别	造孔水量/ $\text{m}^3$	造孔电流/A	加密水量/ $\text{m}^3$	加密电流/A	留振时间/s
控制标准	0.3~0.8	160~300	0.1~0.5	210~240	10~12

#### 3.3.3 质量检测

施工质量检测时先进行重型动力触探试验检测桩体密实度,采用标准贯入试验检测桩间土处理效果。

检测应在成桩 1 天后进行。对每个试验区选取 3 根振冲碎石桩作为试验桩,对其进行重型动力触探试验检测,在三根试验桩中部位置进行标准贯入试验,触探击



数应达到设计要求<sup>[6]</sup>。

由于标准贯入试验不适用于砂卵石层地基检测,因此对桩间土处理效果采用重型动力触探试验进行相关检测<sup>[7]</sup>。

## 4 检测结果

### 4.1 桩间土处理效果

B区桩间土处理效果分析如下:

制桩前:制桩前桩间土采用重型动力触探(砂卵石层不适宜采用标准贯入试验方法)对桩间土进行检验,BJ-1试验孔试验平均 $N_{63.5}$ 击数为大于16.2,修正后平均 $N_{63.5}$ 击数为大于11.5,参照《南京地区建筑地基基础设计规范》(DGJ 32/J 12—2005)承载力特征值 $f_k = 500\text{kPa}$ 。

制桩后:制桩后桩间土采用超重型动力触探(砂卵石层不适宜采用标准贯入试验方法)对桩间土进行检验,BJ-2试验孔试验平均 $N_{120}$ 击数为大于14.4,修正后平均 $N_{120}$ 击数为大于9.8,参照《成都地区建筑地基基础设计规范》(DB 51/T 5026—2001)承载力特征值 $f_k > 700\text{kPa}$ 。<sup>[8]</sup>

C区桩间土处理效果分析如下:

制桩前:制桩前桩间土采用重型动力触探(砂卵石层不适宜采用标准贯入试验方法)对桩间土进行检验,CJ-1试验孔试验平均 $N_{63.5}$ 击数为大于20.0,修正后平均 $N_{63.5}$ 击数为大于12.2,参照《南京地区建筑地基基础设计规范》(DGJ 32/J 12—2005)承载力特征值 $f_k = 410\text{kPa}$ 。

制桩后:制桩后桩间土采用重型动力触探(砂卵石层不适宜采用标准贯入试验方法)对桩间土进行检验,CJ-2试验孔试验平均 $N_{63.5}$ 击数为大于20.3,修正后平均 $N_{63.5}$ 击数为大于12.9,参照《南京地区建筑地基基础设计规范》(DGJ 32/J 12—2005)承载力特征值 $f_k > 470\text{kPa}$ 。<sup>[9]</sup>

### 4.2 桩体施工成果

B试验区共选取3根试验桩,分别为B1、B2、B3,C试验区共选取3根试验桩,分别为C1、C2、C3,桩体资

料、施工情况统计见表3、表4。

表3 B试验区试验桩统计

序号	桩号	施工深度/ m	设计孔深/ m	有效桩深/ m	填料量/ m <sup>3</sup>	平均桩径/ m
1	B1	19.31	18.94	14.31	16.60	1.14
2	B2	19.11	19.05	14.11	18.35	1.13
3	B3	19.57	19.05	14.57	15.88	1.11

表4 C试验区试验桩统计

序号	桩号	施工深度/ m	设计孔深/ m	有效桩深/ m	填料量/ m <sup>3</sup>	平均桩径/ m
1	C1	17.31	17.11	12.31	15.25	1.18
2	C2	17.15	17.11	12.15	13.07	1.09
3	C3	17.66	16.91	12.66	14.94	1.08

### 4.3 桩体检测成果

#### 4.3.1 B试验区桩体检测

B试验区B1桩体采用重型动力触探进行检验,全孔试验平均 $N_{63.5}$ 击数为大于27.4,修正后平均 $N_{63.5}$ 击数为大于16.9,参照《水电水利工程振冲法地基处理技术规范》(DL/T 5214—2016)密实程度为很密实。

B试验区B2桩体采用超重型动力触探进行检验,全孔试验平均 $N_{120}$ 击数为大于23.4,修正后平均 $N_{120}$ 击数为大于16.7,参照《建筑地基检测技术规范》(JGJ 340—2015)密实程度为很密实。

B试验区B3桩体采用超重型动力触探进行检验,全孔试验平均 $N_{63.5}$ 击数为大于24.8,修正后平均 $N_{63.5}$ 击数为大于17.5,参照《水电水利工程振冲法地基处理技术规范》(DL/T 5214—2016)密实程度为很密实。

#### 4.3.2 C试验区桩体检测

C试验区C1桩体采用重型动力触探进行检验,全孔试验平均 $N_{63.5}$ 击数为大于28.7,修正后平均 $N_{63.5}$ 击数为大于19.1,参照《水电水利工程振冲法地基处理技术规范》(DL/T 5214—2016)密实程度为很密实。

C试验区C2桩体采用重型动力触探进行检验,全孔试验平均 $N_{63.5}$ 击数为大于27,修正后平均 $N_{63.5}$ 击数为大于18.9,参照《水电水利工程振冲法地基处理技术规范》(DL/T 5214—2016)密实程度为很密实。



C 试验区 C3 桩体采用超重型动力触探进行检验,全孔试验平均  $N_{63.5}$  击数为大于 26.6,修正后平均  $N_{63.5}$  击数为大于 16.9,参照《水电水利工程振冲法地基处理技术规范》(DL/T 5214—2016)密实程度为很密实。

## 5 试验结果分析与结论

根据试验成果桩间土承载力在振冲桩施工前后有明显的提高。

a. B 试验区承载力特征值从原始 500kPa 提升至大于 700kPa,较原始地基提升约 40.00%。

b. C 试验区承载力特征值从原始 410kPa 提升至大于 470kPa,较原始地基提升约 14.63%。经分析,其改善效果与 B 试验区区别较大的主要原因是 C 区部位地层中含泥,而 B 试验区则不含泥。

制桩加密后的桩间土承载力能够满足设计要求。处理后砂砾石基础复合地基承载力特征值大于 550kPa;砂层透镜体基础复合地基承载力特征值大于 400kPa。

根据桩体相关检测数据,桩体密实程度均为很密实,能够满足桩体施工要求。

B、C 试验区内试验桩施工桩径均大于设计桩径 1.0m,并且孔深均与设计深度基本吻合,因此对上部砂卵砾石层下设护筒及该层全段引孔的施工工艺在该地层情况下是适宜的,同时在试验施工工艺及参数下能够满足桩体施工相关要求<sup>[10]</sup>。

## 6 结 语

根据施工过程资料及检测结果分析,振冲碎石桩

制桩相关控制参数在本试验区地质条件下是适宜的;对上部砂卵砾石层全段下设护筒及在该层全段引孔的施工工艺在该地层情况下是合理的;终孔参照结束标准能够满足设计相关要求,该结束标准是适用的;对于上部块石及孤石进行换填施工是合适的;对于振冲施工过程中特殊情况采取的处理措施是适宜的。◆

## 参考文献

- [1] 王本炜,赵亮.浅谈振冲碎石桩地基加固中的管理与应用[J].中小企业管理与科技(上旬刊),2010(1):128.
- [2] 贺光耀.振冲碎石桩施工中常遇到的问题及其处理方法[J].勘察科学技术,1994(6):40-42,39.
- [3] 蒋祖浩.振冲碎石桩处理深厚层软土地基[J].地下空间与工程学报,2002,22(3):233-234.
- [4] 张九义,南亚林.振冲碎石桩复合地基应用实例[J].西部探矿工程,2006,18(B06):24-25.
- [5] 李军民.振冲碎石桩在水利工程中的有效应用分析[J].中华民居(旬刊),2012(3):565-566.
- [6] 王春元.振冲碎石桩在曼飞龙水库除险加固工程中的应用[J].水利建设与管理,2009,29(9):69-71.
- [7] 任维信.振冲碎石桩在潇河综合治理工程橡胶坝及泵房项目中的应用[J].水利建设与管理,2014,34(6):4-5.
- [8] 李进元.振冲碎石桩法地基处理在阴坪水电站中的应用[J].岩石力学与工程学报,2015,32(S1):2968-2976.
- [9] 田宇.振冲碎石桩处理在水利大坝地基施工中的应用[J].科技创新与应用,2018(5):153-154.
- [10] 李连喜,杨军,张增涛.振冲碎石桩在某工程中的应用[J].水利建设与管理,2008,28(8):21,20.
- [11] 王家辉,王文武,宋立元.基于水管冷却技术的重力坝施工温控方案仿真优化[J].水利规划与设计,2019(6):106-111.
- [12] 马洪山,徐志林,艾存峰.基于 SolidWorks 和 ANSYS Workbench 的平面钢闸门三维有限元分析[J].水利建设与管理,2017,37(7):18-22.
- [13] 杨微,刘彬.基于 ANSYS workbench 的哈达山溢流坝弧形闸门受力分析[J].水利建设与管理,2020,40(10):21-27.
- [14] 汪洋.锦凌水库坝体混凝土温度控制计算分析[J].水利规划与设计,2017(4):105-107,120.
- [15] 全宗国,陈健玲,彭鑫.船闸底板大体积混凝土温度场仿真分析[J].水利建设与管理,2018,38(4):39-43.
- [16] 樊启祥,郑斌,许传稳.水工衬砌混凝土施工期温度裂缝综合控制技术[J].水利建设与管理,2019,39(6):32-36,41.

(上接第 15 页)



# 地下水封洞库灌浆止水施工技术及应用

吴波 王凯 郭创

(中国水利水电第十四工程局有限公司, 云南 昆明 650051)

**【摘要】** 本文利用超前预报,根据洞室开挖揭露的地质条件,合理确定施工预注浆孔和后注浆参数,采用“先预埋管、再覆盖封闭岩面,先灌外圈、后灌内圈,先灌无渗水孔、再灌小渗水孔、终灌大渗水孔”的灌浆施工程序,使洞室渗水量符合设计指标的要求。施工期间库区地下水位总体稳定,围岩变形量较小,洞室稳定安全,取得了良好工程效果。

**【关键词】** 水封洞室;预注浆;后注浆;灌浆止水

中图分类号: TV523

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)10-048-04

## Construction technology and application of grouting and water stop for underground water-sealed cave depot

WU Bo, WANG Kai, GUO Zhao

(China Water Resources and Hydropower 14th Engineering Bureau Co., Ltd., Kunming 650051, China)

**Abstract:** The advanced prediction is utilized and the construction grouting hole and post-grouting parameters are rationally determined according to the geological conditions of cavern excavation exposure. The grouting construction procedure of “pipeline pre-casting followed by covering sealed rockface, outer ring grouting followed by inner ring, no-water seepage hole grouting followed by small seepage hole and large seepage hole” is adopted. The amount of cavern seepage is conformed to the designed indicator requirements. The reservoir underground water level is stable generally during construction. The surrounding rock deformation is less. The cavern is stable and safe with excellent project effect.

**Keywords:** water-sealed cavern; pre-grouting; post-grouting; grouting water stop

### 1 引言

地下水封洞库是指在稳定的地下水位以下一定深度岩体中开挖出来的利用水封原理储存原油的地下空间系统,水封主要是利用稳定的地下水位(或补给地下水,使地下水位稳定)对开挖出的洞室四周裂隙进行封闭,减小洞室内原油介质的外泄。在洞室周围地下水

的密封下,原油介质能很好地储存(原油介质密度比水密度轻)。为满足地下洞室原油储存设计数量,减少后期运营成本,对地下洞室内的渗水量有严格要求。地下洞室在开挖后洞内渗水部位的止水施工质量,成为地下水封洞库施工期及运营期的关键因素之一。

在实际工程应用中,地下水治理主要采用引、排、堵相结合的方法,地下水封洞库不允许以引、排的方式

收稿日期: 2021-12-15

作者简介: 吴波(1976—),男,高级工程师,主要从事水利水电工程施工及管理工作。

治理地下水,要求以洞室内堵的方式治理地下水。固结灌浆、帷幕灌浆施工技术在水利水电工程建设中已经日趋成熟,灌浆材料主要以普通硅酸盐水泥为主。在水利水电工程建设中,固结灌浆主要为混凝土衬砌后有盖重灌浆,或为有压浆板无盖重灌浆,灌浆的目的主要是围岩加固,提高围岩整体性和抗变形能力,不以止水为目的;水利水电工程建设中帷幕灌浆主要是将浆液灌入岩体裂隙、孔隙形成连续的阻水幕,以减小渗流量和降低渗透压力,灌浆段一般至隔水层,灌浆压力随灌浆深度逐渐加大,灌浆孔排距较密。

地下水封洞库的储油方式,自20世纪50年代在瑞典出现以来,因具有安全、对地面环境影响小、占耕地少、节省大量钢材、油品质量不受损害、油品损耗小等优点,在北欧、韩国、日本等国家和地区已建设若干座类似油库,储存原油及其产品。我国在20世纪70年代建成该种油库储存原油、柴油,在20世纪90年代又建成储存LPG水封洞库,在设计、建设及生产中积累了一定的经验。

## 2 工程概况

惠州地下水封洞库项目地下工程,库址区地层为晚侏罗世( $J_3p$ 、 $J_3s$ 、 $J_3g$ )的黑云母二长花岗岩,以中—细粒结构为主,见有岩脉出露。岩脉多受断裂构造和节理密集带控制,以石英脉最为发育;其次有花岗斑岩脉、闪长玢岩脉、辉绿辉长岩脉、煌斑岩脉等。洞罐分为10个洞室,单个洞室容积约为50万 $m^3$ ,洞室断面形状为直墙圆拱形,洞室跨度为20m,高度为30m,长930m,洞库上方距洞顶25m处设水平水幕系统,洞室在施工前,水幕系统正常运行,洞室施工不允许以引排的方式治理地下水,不能因洞室施工造成地下水位下降,要求以洞室内堵的方式治理地下水。

## 3 技术原理

地下洞室I层开挖掌子面先采用TSP法超前地质预报,判断前方地质围岩结构和水文条件,在不良地质段增加超前探孔预报,对超标渗水探孔围岩段进行水

平预注浆施工,爆破开挖后围岩面渗水采用后注浆施工。后注浆孔根据围岩级别确定孔间排距,灌浆范围扩大到渗水区6~9m,灌浆区孔向一致,造孔方向与围岩节理裂隙成大角度相交,破碎带围岩段安装钢筋网,对渗水孔预埋2根 $\phi 20$ 钢管引流,用无机堵漏材料封堵引流管与灌浆孔之间的缝隙、回浆管与灌浆孔之间的缝隙以及围岩面细微渗水裂隙,封堵完成后喷射混凝土,在混凝土强度达到70%后,对灌浆引流管进行灌浆,灌浆封堵顺序为“先外圈灌浆孔、后内圈灌浆孔,先无渗水孔、再小渗水孔、后大渗水孔”。

## 4 工艺流程和操作要点

### 4.1 施工工艺流程

为保证地下水封洞库原油储存设计数量,减少后期运营成本,应对地下洞室内的渗水量严格控制。地下洞室在开挖后洞内渗水部位的止水施工质量,成为地下水封洞库施工期及运营期的关键因素之一。提高地下洞室灌浆止水效果,达到设计渗水标准是关键。

洞室施工流程:超前地质预报→预注浆→后注浆。

注浆施工流程:布孔→灌浆或注浆孔放样控制→钻孔控制→钻孔冲洗和裂隙冲洗→灌前压水试验→灌浆施工。

### 4.2 方法措施

#### 4.2.1 超前地质预报

超前地质预报采用TSP超前地质预报和探孔预报相结合的方法,先采用TSP法超前地质预报,根据物探成果,在断层破碎带及IV、V级围岩处进行超前探孔预报。

#### 4.2.2 预注浆

在开挖支护施工中,对地质预报为围岩岩体破碎、节理裂隙发育、围岩稳定性差、易掉块围岩段,在开挖前对围岩钻探孔确认,探孔内渗水流量 $Q < 0.1L/(\min \cdot m)$ 时,对掌子面进行开挖;开挖后渗水 $0.5L/(\min \cdot m) < Q < 1L/(\min \cdot m)$ 时,对探孔注浆,注浆按照超前预注浆要求进行; $Q > 1L/(\min \cdot m)$ 时,掌子面需要超前预注浆,超前预注浆段长度应根据工程





地质条件、水文地质条件、钻孔设备及工期等条件确定。

#### 4.2.3 后注浆

对主洞室断层破碎带、裂隙密集带、围岩与岩脉接触带及渗水量较大部位进行后注浆灌浆止水施工,注浆位置主要是集中渗水大于  $2\text{L}/\text{min}$ 、面域渗水大于  $4\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  的部位。Ⅰ、Ⅱ级围岩段渗水多为单点状。对滴状渗水,渗水量大于  $0.2\text{L}/\text{h}$  的灌浆施工,在渗水来源处布置灌浆孔,灌浆孔深  $6\text{m}$ ,并沿渗水来源周围布置2排系统灌浆孔,系统灌浆孔间排距  $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ ,孔向与节理裂隙倾向大角度相交。洞室Ⅲ级围岩段、破碎带渗水多为分散面域状,布置灌浆孔间排距  $60\text{cm} \times 60\text{cm}$ ,灌浆孔深  $6\text{m}$ ,孔向倾斜岩面,与破碎带倾向大角度相交,在渗水区安装  $\phi 8$  钢筋网,钢筋网间排距  $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ ,钢筋网与岩面预留  $2 \sim 3\text{cm}$  保护层,覆盖范围超出渗水区  $6.0\text{m}$ ,超出渗水区周围  $9.0\text{m}$  范围布置系统灌浆孔(见图1),系统灌浆孔间排距  $1.5\text{m} \times$

$1.5\text{m}$ ,超出渗水区域  $3\text{m}$  范围布置两排深  $12\text{m}$  灌浆孔(见图2)。所有灌浆孔均预埋2根  $\phi 20$  钢管引流,1根  $\phi 20$  引流钢管深入孔内  $30\text{cm}$ ,1根  $\phi 20$  钢管深入孔内距离孔底  $30\text{cm}$ ,孔口采用无机防水堵漏材料封堵。

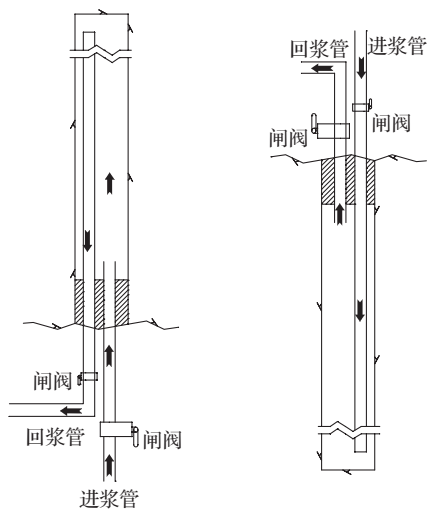


图1 预埋灌浆管方式

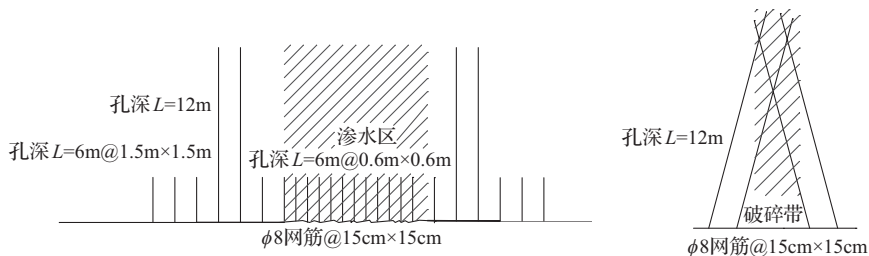


图2 Ⅲ级围岩段(破碎带)渗水灌浆孔的布置调整

按设计要求在围岩面喷射混凝土,混凝土强度达到  $70\%$  后进行引流管灌浆,先深孔灌浆,深孔先灌外侧排无效孔,从低向高,再灌有效孔,后灌内侧排深孔;在深孔灌浆完成后,从灌浆范围最外圈(最外排)孔开始,最外圈(最外排)孔从最低处的灌浆孔开始,最外圈(最外排)无渗水先灌浆,最外圈(最外排)孔有渗水后灌浆,最外圈孔灌浆完成后,依次向内圈(渗水区)灌注,在渗水区先灌无效孔,后灌有效孔,在灌有效孔时,先灌渗水小的孔,最后灌渗水大的孔。

#### 4.2.4 施工过程控制

$6.0\text{m}$  灌浆孔主要采用 YT28 手风钻造孔,孔径  $42\text{mm}$ , $12.0\text{m}$  灌浆孔主要采用 Rocket Boomer 353E 凿岩三臂台车造探孔,孔径  $56\text{mm}$ ,造孔前观察围岩面裂

隙倾向、夹角,造孔方向与围岩节理裂隙倾向成大角度相交,孔向与洞轴线夹角不小于  $45^\circ$ ,孔向尽量一致。造孔过程中,时刻观察孔内排出的岩粉和回水情况。

封堵孔口及缝隙期间,要确保引流管闸阀和回浆管闸阀呈打开状态。

灌浆采用 P. O42.5R 水泥和 MFC-GM6000A 超细水泥,浆液开始制备至用完的时间应小于  $4\text{h}$ ,浆液温度保持在  $5 \sim 40^\circ\text{C}$ ,由于洞室湿度大、通风条件不良,现场备用水泥存放一般不超过  $12\text{h}$ 。后注浆压力按照  $1.5\text{MPa}$  控制,单孔灌浆前进行裂隙冲洗,冲洗压力为  $1.0\text{MPa}$ ,冲洗至回水澄清后  $10\text{min}$  为止。灌浆区灌浆选用  $2:1$ 、 $1:1$ 、 $0.5:1$  三个比级水灰比,开灌水灰比选用  $2:1$ ,灌浆压力应尽快达到设计压力,在  $1.5\text{MPa}$  灌

浆压力下,注入率不大于 1L/min 时,延续灌注 30min 以上即可结束灌浆。在破碎带、渗水量大的灌浆区,当开灌比浆液注入量已达到 300L 以上,或灌注时间已达 30min,而灌浆压力和注入率均无改变或改变不显著时,应改用浓一级的水灰比灌注。在 1.5MPa 灌浆压力下,注入率不大于 1L/min 时,延续灌注 30min 以上即可结束灌浆。达到灌浆结束标准后,先关闭灌浆孔口的闸阀,后停灌浆泵,灌浆孔内闭浆。灌浆中很少出现串孔、串浆,仅有少部分孔在灌浆中,其周边渗水孔存在渗水量加大现象和渗水变浑浊现象。对渗水量加大和渗水变浑浊灌浆孔,按照灌浆次序要求重新确定灌浆孔次序;在出现串孔后,灌浆孔按照浆液变换要求变浆,串孔排出浆液比级达到 2:1 后,串孔与灌浆孔并灌,按照灌浆技术要求灌浆结束。灌浆结束后,先关闭孔口回浆管闸阀,再关闭孔口进浆管闸阀,最后停止灌浆泵。灌浆严格按照“灌浆孔从低向高,从灌浆范围最外圈向内圈,先灌浆无渗水孔,后灌浆有小渗水孔,最后灌浆有大渗水孔”的顺序施工。

## 5 材料与设备

灌浆用水、水泥、外加剂、掺和剂需要满足规程规范要求,主要施工设备配置见表 1。

表 1 主要施工设备配置

序号	设备名称	型号及规格	单位	数量
1	空气压缩机	DSR-180A (24m <sup>3</sup> /min)	台	4
2	凿岩台车	Rocket Boomer 353E	台	1
3	台车架	自制	台	4
4	制浆机	ZJ-400D	台	2
5	搅拌机	HJB-200	台	16
6	搅拌桶	YJ-200A	台	16
7	灌浆泵	3SNS-A	台	16
8	灌浆自动记录仪	GJY-VII	台	16

## 6 质量控制

造孔孔向与围岩节理裂隙成大角度相交,严格要求在射混凝土强度达到 70% 以上再进行引流管灌浆,

控制水泥浆液自制备至用完的时间不超过 2h,严格控制水泥浆液温度不超 40℃。现场储存不超过 1 天的水泥用量,水泥进入输浆管前应过 1mm<sup>2</sup> 的细筛,灌浆施工中使用的灌浆自动记录仪每月必须进行校验。灌浆结束后,同时关闭进浆管、回浆管上闸阀,孔内闭浆不少于 72h。

## 7 结 果

采用本施工技术,减少了超前探孔施工、减少了喷射混凝土回弹量、节约了反复灌浆工期。洞库建设完成后,渗水量满足要求,减小了运营期污水处理工作量;施工期间洞室围岩变形量小,洞室安全稳定,库区地下水位总体稳定,满足设计要求。

## 8 结 论

地下水封洞库施工采用仪器超前地质预报和探孔预报相结合的方法,节约了超前探孔施工工程量,加快了施工进度;洞室 I 层以下各层超前预注浆孔倾斜向下,提前预注浆施工,施工干扰小;后注浆采用“预埋引流管”喷射完混凝土后灌浆的施工工序,减少喷射混凝土层脱落;采用“先外圈灌浆孔、后内圈灌浆孔,先无渗水孔、再小渗水孔、后大渗水孔”灌浆顺序,减小了岩面漏浆及渗水面外延。本施工技术适用于水利水电工程或市政、铁(公)路隧洞施工灌浆止水处理项目,经济效益显著,具有推广应用价值。◆

### 参考文献

- [1] 宋琨,晏鄂川,陈刚. 地下水封洞库岩体渗透系数估算研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014(3):575-580.
- [2] 杨峰. 惠州地下水封储油洞库群围岩稳定性分析与评价[D]. 北京:中国地质大学(北京),2011.
- [3] 刘贯群,韩曼,宋涛,等. 地下水封石油洞库渗流场的数值分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2007(5):819-824.
- [4] 李阳. 浅谈 HSC 超细水泥在隧洞止水注浆中的应用[J]. 水利建设与管理,2014(11):10-13.
- [5] 陈祥. 黄岛地下水封石油洞库岩体质量评价及围岩稳定性分析[D]. 北京:中国地质大学(北京),2007.

(下转第 65 页)



# 膏浆灌浆技术在矿山酸水库大坝 防渗工程中的应用

王绍平<sup>1</sup> 黄磊<sup>2</sup> 刘兵<sup>1</sup>

(1. 马钢(集团)控股有限公司南山矿业公司,安徽 马鞍山 243000;

2. 湖南宏禹工程集团有限公司,湖南 长沙 410007)

**【摘要】** 酸水库坝是矿山酸性废水集中储存的重要建筑物,受水头压力与酸水侵蚀的长期作用,坝体坝基易出现不同程度渗漏问题并引起水库周边环境恶化。为解决酸水库坝注浆防渗治理中常规水泥浆凝结时间长、渗透通道粗、耗浆量高、效果不佳的难题,本文以南山矿酸水库注浆防渗工程为依托,通过膏浆(黏土水泥膏状注浆材料)灌浆方法,对经长期酸水渗透侵蚀的土层和强风化岩体裂隙及长期渗透掏刷的非密实可溶物裂隙进行充填封堵,治理效果较好,该技术是一种对矿山酸水库坝体防渗经济适用、效果可靠的方法,可供类似工程参考。

**【关键词】** 灌浆;膏浆;防渗;坝体;矿山酸水

中图分类号: TV523

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)10-052-05

## Application of paste grouting technology in anti-seepage project of mine acid reservoir dam

WANG Shaoping<sup>1</sup>, HUANG Lei<sup>2</sup>, LIU Bing<sup>1</sup>

(1. Masteel (Group) Holding Co., Ltd., Nanshan Mining Company, Ma'an 243000, China;

2. Hunan Hongyu Engineering Group Co., Ltd., Changsha 410007, China)

**Abstract:** Acid reservoir dam is an important building for the centralized storage of acid mine waste water. The dam body and foundation are prone to different degrees of leakage due to the long-term effect of water head pressure and acid water erosion, thereby causing environmental pollution around the reservoir. Acid reservoir grouting anti-seepage project of Nanshan Mine is adopted as the basis in the paper in order to solve the problems of long setting time, large penetration channel, high slurry consumption and poor effect of conventional cement slurry in acid reservoir dam anti-seepage treatment. The fissures of soil layer and strong weathering rock mass eroded by long-term acid water penetration and non-dense soluble material fissures due to long-term permeable brushing are filled and sealed through the paste grouting method (clay cement paste grouting material). The treatment effect is excellent. The technology is an economical, effective and reliable method for preventing seepage of mine acid reservoir dam, which can be used as a reference for similar projects.

**Keywords:** grouting; paste; seepage control; dam; mine acid water

收稿日期: 2021-11-25

作者简介: 王绍平(1967—),男,高级工程师,主要从事坝体防渗工作。



## 1 引言

由于矿石和围岩中含有硫化矿物,在矿山开采过程中经氧化、分解并与水结合形成大量酸性矿山废水<sup>[1-3]</sup>,为了防止污染,避免酸水影响周边居民的生存环境,许多矿山对污水进行了建坝集中处理<sup>[4-5]</sup>。但随着矿山的开采,许多开采时间已久且在长期水头作用下的酸水库坝出现了不同程度的渗漏问题,为避免污水向外渗漏对周围环境造成污染,亟须对渗漏通道进行充填封堵<sup>[6-7]</sup>。注浆是一种经济、高效的防渗治理方法,但由于酸水库长期渗透水恶化了坝基水文和地质条件,水流沿坝体内透水通道渗透,长期掏刷侵蚀土层和裂隙间可溶物,扩大了渗透通道,采用常规水泥浆注浆存在浆液沿大渗透通道随水冲走、浆材浪费、注浆量大的问题,此外,酸性条件下会延长水泥的凝结时间,更不利于注浆封堵。黏土水泥浆液表现出较好的抗酸稳定性,且在强透水地层的防渗中具有较好的应用效果<sup>[8-9]</sup>,本文以安徽马钢南山矿酸水库防渗灌浆施工为依据,介绍黏土水泥膏浆在大渗透通道中的堵水应用。

## 2 工程概况

马钢南山矿酸水库位于安徽省马鞍山市雨山区向山镇徐山村境内,为蓄存铁矿酸性处理水于20世纪70年代人工筑坝形成,水库汇水面积约0.1km<sup>2</sup>,大坝坝体长400m,坝顶宽40m,坝高40m,坝顶高程67~68m,水库稳定水位60m<sup>[10]</sup>。因历时较长,在水头作用下,库水穿过坝体薄弱部位从下游坡脚呈散状渗出。勘察表明,大坝渗漏主要集中于坝体填土颗粒较粗部位及坝基强风化岩层。坝体填土渗透系数多在10<sup>-3</sup>~10<sup>-4</sup>cm/s,最大达3.5×10<sup>-2</sup>cm/s,属于中等透水,局部强透水;坝基存在8~18m厚的强风化层,钻探取芯查明,岩体破碎,节理裂隙发育,压水试验透水率 $q=1\sim 10\text{Lu}$ ,局部大于10Lu,属于弱—中等透水带。水库用于选矿中所产生的酸性水储存,pH值为3.6~3.7,水流沿坝体内透水性较强的土层和坝基强风化岩体裂隙渗透,长期掏刷侵蚀土层及裂隙间可溶物,使渗漏通道持续不断扩大,且酸性渗透水对基础及土壤有明显的腐蚀作用。在长期渗透水流的影响下,恶化了坝基水文、工

程地质条件。为解决酸水对下游农田和周边环境的污染问题,保证环境安全,依据补充勘探资料,需对酸水渗漏进行防渗灌浆处理。对于渗流的防渗注浆存在以下难题:

a. 在酸性条件下,纯水泥浆存在凝结时间较长甚至难以达到初凝的问题,常规注浆材料难以起到注浆效果。

b. 该酸水库年限较久,酸水腐蚀严重,透水部位土层松散、岩体破碎,渗透通道粗、渗流量大,常规浆液容易在较大水流下被水冲刷,导致无效灌浆。

## 3 堵水设计思路

黏土水泥复合膏浆灌浆技术是采用具有流动可灌性与高塑性变形强度的特殊膏状注浆材料,利用其可控凝结、低流动性及触变性的特点,达到有效控制浆液扩散范围,保证浆体在钻孔周围较均匀扩散充填透水孔隙,从而在松散强透水地层或松散软弱地层内快速形成防渗效果较好的连续帷幕体的技术。该技术适用于松散软弱地基防渗灌浆处理;特别适用于全(强)风化岩体、松散土层、砂层等强透水地层的防渗处理。基于此,对于本工程中经水流冲刷的松散土层与节理裂隙密集发育岩体采用复合膏浆灌浆技术进行渗漏通道的充填封堵。

## 4 复合膏浆灌浆技术

### 4.1 灌浆工艺

灌浆帷幕幕顶高程至水库稳定水位(高程60m处),帷幕幕底应进入基岩以下2m。采用“孔内浆体自凝封闭、自下而上分段纯压式可控灌浆法”。

灌浆深度范围:灌浆顶部在高程60m处,底部深入基岩2m,平均深度28.77m。灌浆时先将注浆管下入孔底,然后按每2.0m一个灌浆段,每灌段按0.3~0.5m逐步上提灌浆管,自下而上灌浆至灌浆顶部。

### 4.2 工艺流程

施工总程序:施工准备→钻孔放样→膏浆钻孔先导孔施工(可作为I序孔)→I、II、III序孔施工→质量检查→资料整理。

灌浆单孔施工程序:施工准备→钻孔定位→固定机具→坝体非灌段跟管钻进→非灌浆段孔口管镶筑→坝体灌浆段跟管钻进→接触段灌浆→起拔套管→待凝→注浆管安装及封闭→安装拔管机及注浆管路→启动注浆泵注浆→提升、拆卸注浆管→自下而上重复注浆与提升→注浆至设计段顶→压力封孔。

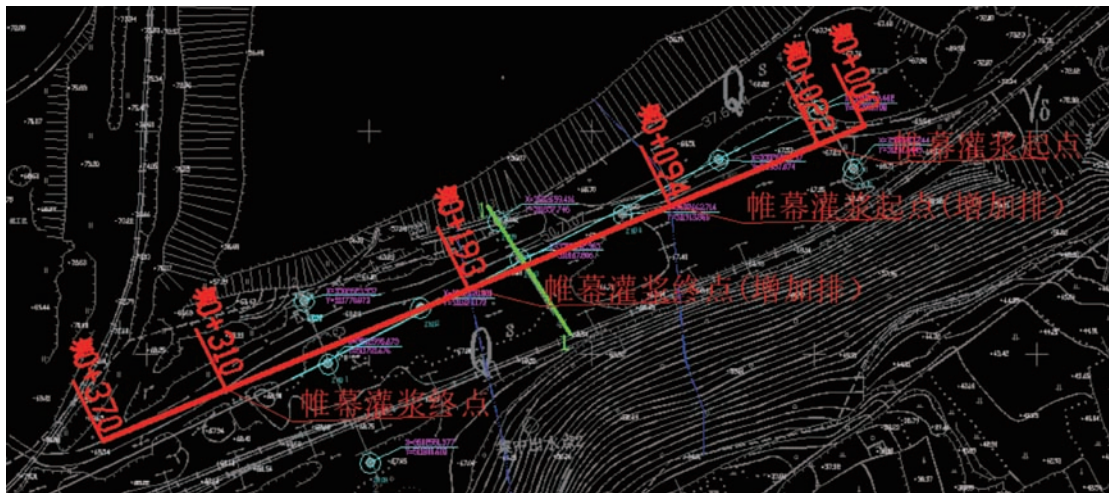


图1 施工孔位布置

#### 4.4 孔口管安装和注浆管安装

##### 4.4.1 孔口管安装

孔口管采用  $\phi 127$  钢管,埋设后待凝 8h 以上,经检查合格后进行下一工序施工。孔口管埋设后应及时查看孔口管接头是否有脱节,并用水平尺校铅直度、卷尺测量控制嵌入深度、注水检查管外侧是否漏水。

##### 4.4.2 注浆管安装

钻孔达到要求深度后,下入灌浆管至孔底,然后用黏土或细砂回填灌浆管与钻孔之间的环隙至钻孔顶部。开灌前,将孔口封闭的回浆管开关打开,然后开泵压入封孔浆体填满灌浆管与孔口管壁之余留空隙,待回浆口排出较浓的浆液时关闭回浆管口开关,开始试压浆灌注。如果在灌浆时或上提灌浆管后,出现从孔口管和覆盖层间隙处冒浆现象,可再次待凝 10min 左右,进行有效止浆。

#### 4.5 灌浆材料

酸水库坝体重点透水部位土层松散、岩体破碎、裂隙发育,对于裂隙连通性极好的透水部位堵水注浆材料十分关键,浆液的凝结时间、抗冲蚀性、流动性等特

#### 4.3 孔位布置

孔位布置图见图1。钻孔按设计图纸轴线(0+022-0+310)指定桩号,采用全站仪配合钢卷尺进行钻孔放样,钻孔开孔直径为 127mm,终孔孔径不小于 75mm,钻孔采用 XY-200 型地质钻机配金刚石钻头跟管回转钻进。

点尤为重要。

针对这类地层选择水泥、黏土作为主要原材料,并添加可提高浆材早期强度、抗水流冲刷能力与抗酸稳定性的外加剂,将各种材料以适宜的比例拌和,制备具有扩散范围可控的触变型黏土水泥膏状浆液。

##### 4.5.1 灌浆原材料

a. 水泥:采用耐酸抗侵蚀的特种水泥;在施工过程中对水泥的强度、细度、凝结时间进行抽样检查。

b. 黏土:要求塑性指数大于 14,黏粒(粒径小于 0.005mm)含量不小于 20%,粉粒(粒径 0.005 ~ 0.05mm)含量一般不多于 60% ~ 70%,含砂量(0.05 ~ 0.25mm)不大于 8%,有机物含量不大于 2%。黏土配置浆液前,应进行粉碎、除砂、细分后再入池后碱化,进行浸泡溶胀待用。

c. 水:水质符合灌浆用水要求。

d. 外加剂:HY-1 外加剂,使黏土水泥浆材的性能符合浆体可控的要求,实现浆材基本不发生析水、浆材的凝固时间可控的目的。

##### 4.5.2 浆材配比

本项目采用的黏土水泥膏浆及稳定浆液配合比见

表 1。

表 1 膏浆浆材配合比

配合比	水泥/kg	黏土/kg	水/kg	HY-1 外加剂/kg	流动度/mm	结石体 28d 强度/MPa	结石体抗渗系数/(cm/s)
1 号	100	100	140 ~ 160	10	90 ~ 120	1.5 ~ 3.0	$(3 \sim 8) \times 10^{-7}$
2 号	100	100	140 ~ 160	15	65 ~ 90	1.6 ~ 3.2	$(1 \sim 3) \times 10^{-7}$

#### 4.5.3 浆材作用机理

以黏土为主的膏状浆液,浆液流动度控制在 80 ~ 130mm 之间,通过添加外加剂,使水泥中铝酸四钙、硫铝酸钙等成分水化、胶凝作用迅速产生早期强度;通过铝酸钠、硫酸铝钾或硫酸铝与硅酸盐或其他化合物生成钙矾石,吸收浆液一定的自由水;通过黏土粒子的崩解结构和水溶性膨胀高分子化合物,包裹浆体中大量的自由水,三者协同作用使浆液的初凝时间控制在几十分钟到几小时,使浆液在灌注过程中,达到有效控制

浆液扩散半径的目的。同时浆液中黏土粒子包裹的自由水,可在搅拌剪切力下得到重新释放,使浆液产生流动性,见图 2(a);在没有搅拌剪切力作用下,浆液静止并固化,见图 2(b),表现出良好的触变性能。利用浆液自身较大的内摩擦阻力、被灌介质的黏阻力实现灌浆压力平衡,可避免浆液在地层中无限制性地往最薄弱地层扩散,有效地避免了黏土水泥膏浆在浅层或局部弱面产生重复劈裂,减少了无效灌注与材料浪费。



(a) 黏土水泥膏浆搅拌后(流动度60mm)



(b) 黏土水泥膏浆静置(流动度60mm)

图 2 黏土水泥复合膏浆

#### 4.6 注浆结束控制

“复合膏浆灌浆技术”是一种连续间隔提升灌注工艺,注浆结束主要由间隔提升段分段控制。注浆间隔提升段结束控制标准如下:

a. 该注浆间隔提升段达到设计单位注入量,且注浆压力大于该注浆段最小设计压力时,可结束该间隔提升段注浆。

b. 该注浆间隔提升段达到最大设计注浆压力,且注入量大于该注浆段最小设计单位注入量时,可结束该间隔提升段注浆。

#### 4.7 特殊情况处理

a. 钻孔串浆、地表冒浆、注浆中断的处理措施为:

①立即停注,待凝 20 ~ 30min 后再注;②立即在串浆的钻孔安装注浆装置,同时注浆;③注浆中断时,如果中断时间短,可以再注;如果中断时间较长,则应扫孔后再注。

b. 注浆过程中若长时间达不到该注浆段位设计最小注浆压力,且注入量达到设计最大单位注入浆量时,可采用间歇灌注或掺加外加剂方法处理,如还达不到结束标准,按溶洞注浆方法处理。





c. 注浆过程中若长时间达不到该注浆间隔段设计最小注入量,且注浆压力到达设计最大注浆压力时,延续灌注 10min 或注浆压力连续 3 次超过设计压力 20% 时可结束注浆。

## 5 注浆效果

南山矿酸水库渗漏处理工程从 2020 年 10 月 1 日开始施工,至 2020 年 11 月 29 日完工,历时 60 天完成钻孔施工工程量 7516.5m,膏浆灌浆工程量 5873.7m,非灌浆段封孔工程量 1642.8m,孔口管镶筑 582m,主要工程量见表 2。

施工前后透水对比见图 3。施工完成后坝后未见明显渗漏水,堵水效果良好,达到业主的堵水要求,灌

表 2 工程量完成情况

序号	项目编号	项目名称	单位	完成工程量
1	—	南山矿酸水库渗漏处理工程		
2	1	灌浆工程		
3	1.1	钻孔	m	7516.5
4	1.2	膏浆灌浆	m	5873.7
5	1.3	非灌浆段封孔	m	1642.8
6	1.4	孔口管镶筑	m	582

浆质量合格。采用黏土水泥膏浆作为注浆材料,与常规水泥浆比,减少了无效灌浆量,节省了大量注浆材料,大幅降低了施工成本,且经工程检验,复合黏土膏浆灌浆技术对于酸水侵蚀地层具有较好的防渗施工效果。



(a) 施工前



(b) 施工后

图 3 施工前后透水对比

## 6 结论

受长期酸性水流侵蚀影响,酸水库渗漏具有渗透通道粗、渗流量大的特点,因此其防渗注浆材料需满足一定的抗水流冲刷能力和化学稳定性。工程实践表明,采用黏土水泥膏浆注浆能对酸水侵蚀后的土壤、破碎岩层裂隙进行足量充填,满足南山酸水库的防渗要求,是一种堵水效果好、经济适用的酸水库防渗工艺。◆

### 参考文献

[1] 王柱强,胡巍. 矿山酸水成因分析及治理技术评价[J]. 中国矿业,2010,19(5):37-40.  
[2] 张猛,赵林. 煤矿酸性水产生机理及预测防治研究[J]. 煤矿环境保护,2000(3):25-28.  
[3] 陈弹霓,倪鹏. 硫铁矿酸性废水产生及治理浅析[J]. 广东化工,2019,46(7):183-184.

[4] 胡长春,宋威,雷宇. 利用人工水坝治理受煤矿废水污染河流:以都匀市杨柳街河为例[J]. 环保科技,2021,27(4):44-46,58.  
[5] 牛政,贺铝,肖伟,等. 酸性矿山废水处理组合工艺的研究进展[J]. 中国资源综合利用,2021,39(9):188-190,200.  
[6] 郭其青. 祝家酸水库防渗处理工程研究与实践[J]. 金属矿山,1999(10):17-19,38.  
[7] 鞠海燕,黎剑华,袁源平. 矿山酸性污水土石坝渗漏探测及诱因分析[J]. 中国钨业,2007(3):42-45.  
[8] 宾斌,孟旗帜,孙朝,等. 黏土水泥膏浆在强岩溶地区帷幕注浆中的施工应用技术[J]. 中国建筑防水,2016(22):28-32.  
[9] 陈永贵,邹银生,张可能. 铜矿山尾矿坝帷幕防渗技术研究[J]. 地质与勘探,2007(3):108-111.  
[10] 李雷. 治理酸性废水 改良生态环境[C]//中国金属学会. 第二届全国冶金节水、污水处理技术研讨会论文集. 长沙:中国金属学会,2005:102-103.

# 不良地质段地下厂房岩锚梁开挖技术探究

王淑莹

(中国水利水电第六工程局有限公司, 辽宁 沈阳 110179)

**【摘要】** 乌东德水电站右岸地下厂房存在小夹角岩层、缓倾角节理、B类角砾岩、层面附碳质薄膜区等不良地质现象,严重影响高边墙的稳定和岩锚梁的成型质量。在施工过程中采用精细化分层分区、超前预固结灌浆、超前预锚固锚杆、岩台竖向孔护壁、岩锚梁岩台下拐点预加固等一系列的关键技术措施,降低了安全风险和施工干扰,保证了不良地质段岩锚梁的开挖质量达到预期效果,创立了工程品牌,可为日后类似工程提供借鉴与参考。

**【关键词】** 地下厂房;岩锚梁;开挖技术;乌东德水电站

中图分类号: TV554+.1

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)10-057-05

## Study on excavation technology of rock anchor beam of underground powerhouse in undesirable geological section

WANG Shuying

(China Water Resources and Hydropower Sixth Engineering Bureau Co., Ltd., Shenyang 110179, China)

**Abstract:** The underground power plant on the right bank of Wudongde Hydropower Station has some adverse geological phenomena, such as small angle rock strata, slow dip joints, class B breccia and carbonaceous film area, etc., thereby seriously affecting the stability of high side wall and the formation quality of rock anchor beam. Fine hierarchical partitioning, advanced consolidation grouting, prestressing anchor bolt and rock vertical hole wall, rock anchor underplatform turning point pre-reinforcement and a series of other key technology measures are adopted during construction. The safety risk and construction interference are lowered, thereby ensuring that the excavation quality of the bad geological section anchor beam can reach the desired effect. The project brand is created, thereby providing reference for similar projects in the future.

**Keywords:** underground workshop; rock anchor beam; excavation technology; Wudongde Hydropower Station

## 1 引言

岩壁吊车梁简称岩锚梁,它借助长锚杆或预应力锚索将钢筋混凝土梁体固定在岩台上,通过混凝土、锚

杆和岩石的接触面将梁体承受的全部荷载传递到围岩上<sup>[1]</sup>。岩壁吊车梁是综合利用钢筋混凝土技术、锚固技术、光面(预裂)爆破技术的产物,是水电站地下厂房系统中一种特殊的结构型式<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2021-12-07

作者简介: 王淑莹(1989—),女,硕士,主要从事水利水电工程施工及质量管理工作。



20世纪60—70年代,北欧国家最早将岩锚梁技术应用在水电站地下厂房中。1986年,我国将岩锚梁技术率先应用在鲁布革水电站建设中,开挖质量达到预期效果<sup>[3]</sup>。与其他结构梁相比,采用岩锚梁技术有利于围岩稳定,缩小主厂房跨度,加快厂房下部开挖进度,大大缩短施工期限,降低工程造价<sup>[4]</sup>。由于岩锚梁具有安全性好、经济效益高、承载能力强等特点,该技术逐渐被广泛应用,并取得了较好的应用效果。

## 2 工程概况

乌东德水电站位于四川省会东县和云南省禄劝县

交界,为目前中国第四、世界第七大水电站,是金沙江下游4个梯级电站中的第一梯级电站<sup>[5]</sup>。

右岸地下厂房布置在河床侧山体岸坡内,洞室埋深210~390m,外侧端墙距岸边约120m。右岸地下厂房岩体以已灰色中厚—厚层白云岩及灰岩为主。主厂房安装6台单机容量为850MW的水轮发电机组。主厂房的开挖尺寸为333.00m×30.50m(32.50m)×89.80m。岩锚梁通长布置在主厂房第Ⅲ层,岩锚梁桥机轨顶高程为839.70m。岩锚梁岩台设计高度为4.1m,顶部设计宽度为1.0m。

乌东德水电站右岸地下厂房三维布置图见图1。

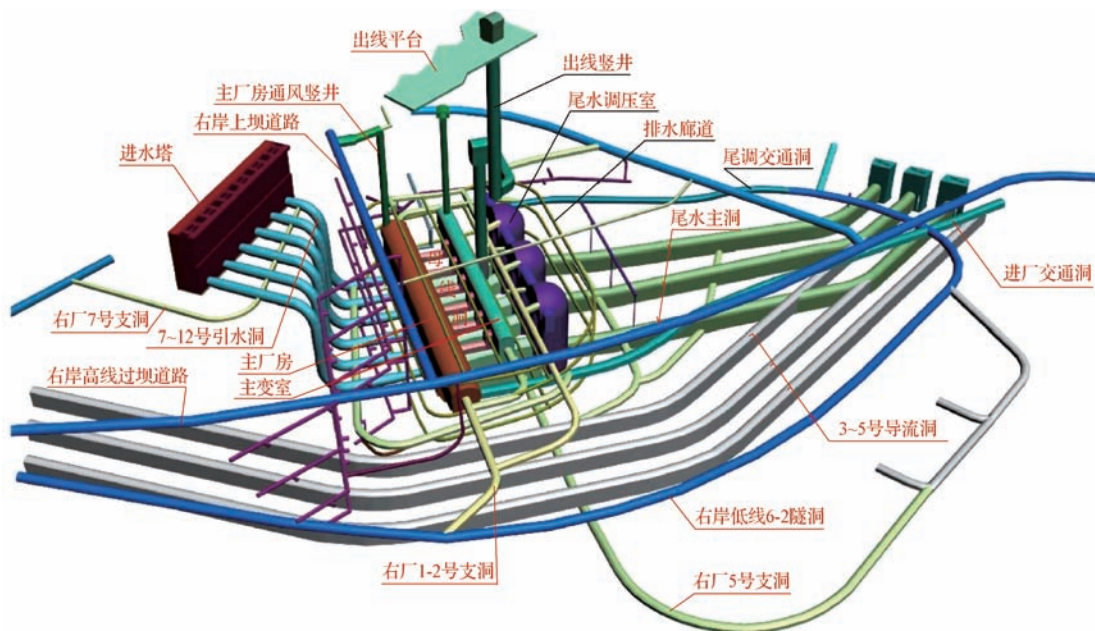


图1 乌东德水电站右岸地下厂房三维示意图

## 3 工程地质条件

乌东德水电站右岸地下厂房存在层间附碳质薄膜和小夹角岩层等不良地质段,地质条件差。其中,层间附碳质薄膜区岩面光滑,层间结合松弛,抗剪强度低,容易发生滑动、变形、离层脱离等现象,严重影响高边墙的稳定和岩锚梁的成型<sup>[6]</sup>。主厂房岩层走向与洞室轴线相交角度为 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ,夹角较小,岩层较薄,施工中容易发生变形破坏,如片帮、顺层剥落、塌落等。开挖后高边墙因卸荷松弛影响,导致围岩稳定问题极为突出。主厂房缓倾角节理、顺断层、B类角砾岩等相对

发育,岩锚梁成型较为困难。

## 4 岩锚梁开挖施工技术

### 4.1 开挖分层分区分块

根据工程地质条件、施工通道、施工机械设备的性能等因素进行主厂房的分层分区分块开挖。主厂房第Ⅰ层为顶拱层,高程为855.0~845.0m,分层高度为10.0m;第Ⅱ层高程为845.0~841.5m,分层高度为3.5m;岩锚梁开挖层位于第Ⅲ层,高程为841.5~831.9m,分层高度为9.6m。为了保证岩锚梁的开挖质量,将主厂房第Ⅲ层进一步细化、调整分层分区。



岩锚梁开挖分层分区见图2。

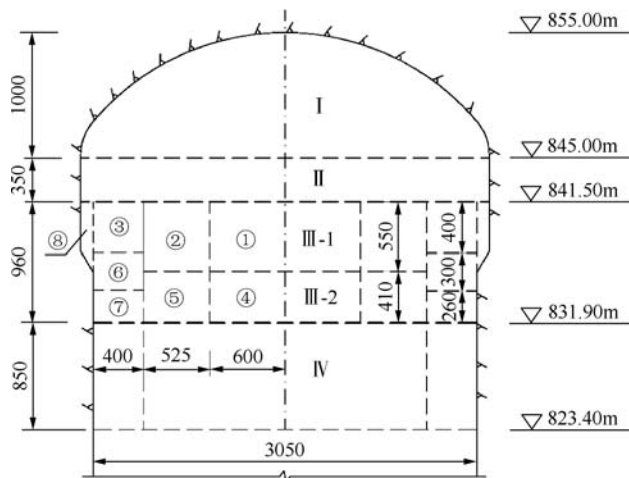


图2 岩锚梁开挖分层分区示意图(尺寸单位:cm)

#### 4.2 岩锚梁开挖施工程序

结合图1所示,岩锚梁开挖施工程序为:①区中槽预裂施工→①区中间拉槽开挖→②区、③区保护层梯段开挖→④区中间拉槽开挖→⑤区、⑥区、⑦区保护层依次开挖→⑧区岩锚梁岩台开挖及支护施工→第IV层预裂施工。

#### 4.3 岩台仿真爆破试验

仿真爆破试验是为了获取爆破最大单响药量,优化调整爆破参数,减少爆破对岩壁梁保留岩体的扰动;根据爆破试验效果分析研究爆破振动衰减传爆规律,控制开挖质点振动速度,使岩锚梁爆破开挖质量达到最佳效果<sup>[7]</sup>。爆破试验流程为:选择爆破试验位置→布设爆破试验测点→采集爆破试验数据→整理分析爆破试验数据→优化调整爆破参数→下一循环。

为了获取岩锚梁岩台爆破参数,按照模拟比例1:1进行爆破试验,每次爆破试验段长约10m,每段进行两次爆破试验,并根据工程地质条件的不同和每段爆破后的效果及时优化调整爆破参数。为了进一步研究爆破后影响的松弛深度,布置两组声波孔在模拟岩台部位和模拟直立边墙部位,以3孔为1组,布孔深度为3m,布孔间距为1.5m,在岩台面垂直布置,直立边墙部位下倾10°布置。穿过模拟试验区声波孔均可进入待开挖岩体内。通过分析模拟试验监测点爆破飞石

的最大距离、围岩表面的爆破裂隙、围岩变形、残孔痕迹等,及时优化调整爆破参数,最终达到理想爆破效果、获得爆破的最优参数<sup>[8]</sup>。

声波孔布置见图3。

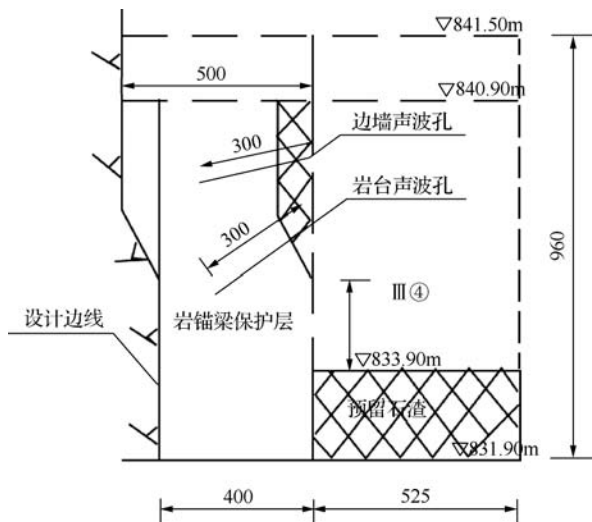


图3 声波孔布置示意图(尺寸单位:cm)

#### 4.4 岩锚梁开挖施工方法

##### 4.4.1 岩锚梁①区施工

岩锚梁①区采用中间拉槽施工,先进行①区两侧预裂爆破施工,然后进行梯段爆破施工。采用D7液压钻机钻孔,梯段爆破开挖高度为5.5m,梯段爆破开挖宽度为12.0m。

##### 4.4.2 岩锚梁②区施工

岩锚梁②区施工为第一次保护层开挖,采用梯段爆破开挖方式,开挖采用D7液压钻机钻孔,梯段爆破开挖高度为5.5m,单侧梯段爆破开挖宽度为5.25m。②区梯段爆破施工前先进行②区和③区之间的预裂爆破施工。②区梯段爆破施工滞后①区拉槽开挖约30m。

##### 4.4.3 岩锚梁③区施工

岩锚梁③区为岩锚梁外侧保护层第一层,③区与岩台分界处采用光面爆破。光面爆破炮孔和垂直孔采用YT-28手风钻钻设,开挖高度为4.0m,单侧开挖宽度为4.0m,③区岩锚梁外侧保护层第一层施工滞后②区保护层30m。

##### 4.4.4 岩锚梁④区施工

岩锚梁④区采用中间拉槽施工,先进行④区两侧

预裂爆破施工,然后进行梯段爆破施工。采用D7 液压钻机钻孔,梯段爆破开挖高度为4.1m,梯段爆破开挖宽度为12.0m。待①区中间拉槽结束后方可进行④区中间拉槽施工,④区施工滞后③区30m。

#### 4.4.5 岩锚梁⑤区施工

岩锚梁⑤区施工为第二次保护层开挖,采用梯段爆破开挖方式,开挖采用D7 液压钻机钻孔,梯段爆破开挖高度为4.1m,单侧梯段爆破开挖宽度为5.25m。⑤区梯段爆破施工前先进行⑤区和⑥区之间的预裂爆破施工。⑤区梯段爆破施工滞后④区拉槽开挖约30m。

#### 4.4.6 岩锚梁⑥区施工

岩锚梁⑥区为岩锚梁外侧保护层第二层,⑥区与岩台分界处采用光面爆破。光面爆破炮孔和垂直孔采用YT-28 手风钻钻设,开挖高度为3.0m,单侧开挖宽度为4.0m。⑥区岩锚梁外侧保护层第二层施工滞后⑤区保护层30m。

#### 4.4.7 岩锚梁⑦区施工

岩锚梁⑦区为岩锚梁外侧保护层第三层,⑦区与设计边线处采用光面爆破。光面爆破炮孔和垂直孔采用YT-28 手风钻钻设,开挖高度为2.6m,单侧开挖宽度为4.0m。⑦区岩锚梁外侧保护层第二层施工滞后⑥区保护层30m。

#### 4.4.8 岩锚梁⑧区施工

岩锚梁⑧区施工为岩锚梁岩台开挖区,采用竖直孔和斜孔相结合方式开挖,采用YT-28 手风钻钻设竖直孔和斜孔。竖直孔钻孔孔距30cm、孔深300cm、单孔装药量约450g,斜孔钻孔孔距30cm、孔深180cm、单孔装药量约250g。

### 4.5 开挖成型关键技术措施

#### 4.5.1 超前预固结灌浆技术

根据岩锚梁岩性特征和不良地质段的情况,在岩台外侧4m厚的保护层开挖前进行超前预固结灌浆。采用高压水冲洗保护层岩面后,喷射厚度15cm的C25混凝土将岩面封闭<sup>[9]</sup>。预固结灌浆孔垂直于保护层岩面钻设布置,灌浆孔布置间距为2m、排距为2m、孔径

为76mm、孔深为10m。灌浆材料为高抗硫酸盐水泥,分两序两段进行预固结灌浆。灌浆段长度分别为3m、7m,灌浆压力分别控制在0.3~0.5MPa、0.8~1.2MPa。预固结灌浆见图4。

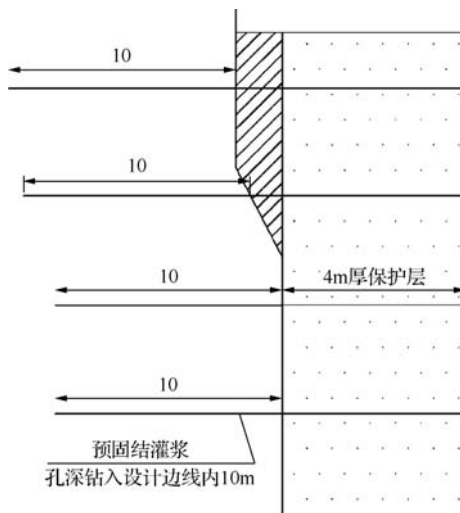


图4 预固结灌浆示意图(尺寸单位:m)

#### 4.5.2 超前预锚固锚杆技术

在岩台外侧4m厚的保护层岩面上钻设倾斜向和垂直向锚杆孔,并安设超前预锚固锚杆。在岩锚梁岩台的每个横断面上分别布置一根上仰25°的锚杆、一根上仰15°的锚杆、一根垂直于保护层岩面的锚杆<sup>[10]</sup>。锚杆直径为25mm,钻孔深度为7.0~8.5m,入岩深度3.0m,轴向间距1.5m。预锚固锚杆布置见图5。

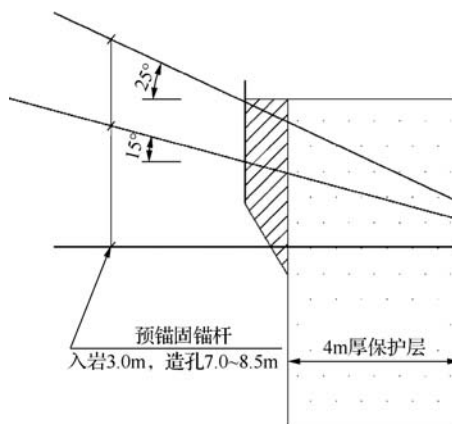


图5 预锚固锚杆布置示意图

#### 4.5.3 小夹角层面控制技术

为保证小夹角层面高边墙的稳定,按照“薄层开挖,随层支护”的原则进行开挖支护。围岩支护张拉锚

杆按  $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$  进行布置,选用长度  $L=9.0\text{m}$ 、直径为  $32\text{mm}$  的锚杆。开挖控制层高在  $4.0\text{m}$  以内,紧跟掌子面进行随机支护,系统支护与掌子面间距不得大于  $15\text{m}$ ,锚索支护需在一个月以内完成。不良地质部位进行专门的爆破设计,优化爆破参数。小夹角层面部位最大单响药量控制在  $20\text{kg}$  以内。

#### 4.5.4 B类角砾岩支护控制技术

为了有效抑制 B 类角砾岩引起的松弛卸荷及表面开裂浅层围岩变形现象,及时进行系统支护(系统锚杆长  $9\text{m}$ )和喷射混凝土等施工。根据地质条件、块体埋深及方量等调整增加锚杆,必要时为了抑制深层围岩变形可布置预应力锚索予以加固。

#### 4.5.5 岩台竖向孔护壁技术

结合图 1 所示,爆破挖除岩锚梁  $4\text{m}$  保护层后岩锚梁岩台宽度不利于岩台竖向孔钻孔施工。因此,岩台竖向孔的钻孔施工应在  $4\text{m}$  保护层爆破前完成。为了防止  $4\text{m}$  保护层爆破碎石堵塞岩台竖向孔,或因爆破扰动后引起岩台竖向孔塌孔,在岩台竖向孔钻孔结束后及时安装直径  $40\text{mm}$  的 PVC 管进行护壁<sup>[11]</sup>。在岩锚梁岩台爆破时,PVC 管起到缓冲作用,有效阻止瞬间巨大的爆破冲击力释放到厂房边墙上,确保岩锚梁施工安全。

#### 4.5.6 岩锚梁岩台下拐点预支护技术

岩锚梁部位地质条件较差,容易发生滑动、变形、岩壁松弛现象,为提高围岩的稳定性和岩锚梁成型质量,应对岩锚梁岩台下拐点部位岩体进行预支护处理。为了锁定加固岩锚梁岩台下拐点部位岩体,具备施工条件后提前施工岩锚梁下拐点以下系统锚杆,并同步将  $\angle 63 \times 63 \times 5$  的护角角钢安装在距岩锚梁最近的一排锚杆上。角钢的一面满焊在系统锚杆上,角钢的另一面紧贴在岩壁上,并将岩壁与角钢之间的缝隙用 M10 水泥砂浆填满<sup>[12]</sup>。

### 5 岩锚梁开挖效果

乌东德水电站右岸地下厂房不良地质段岩锚梁开挖界面平整度为  $9.2\text{cm}$ ,开挖半孔保存率达  $85\%$  以

上,平均超挖为  $9.8\text{cm}$ ,无欠挖,工程质量优良。经质点爆破振动监测,爆破区域最大质点振动均小于  $3\text{cm/s}$ ,属于合理爆破施工。

岩锚梁开挖效果图见图 6。



图 6 岩锚梁开挖效果图

### 6 结 语

岩锚梁开挖是水电站地下厂房开挖过程中非常重要的施工内容,也是最为关键且难度最大的环节。乌东德水电站右岸地下厂房存在层间附碳质薄膜、小夹角岩层、缓倾角节理、顺断层、B 类角砾岩、块体等地质问题,加大了开挖施工难度。为了减小爆破振动,开挖过程中合理精细化分层分区块,在岩台仿真爆破试验的基础上,不断调整优化爆破参数,并通过采取一系列的开挖成型关键技术措施,保证了不良地质段岩锚梁成型质量,值得在类似工程中推广应用。◆

#### 参考文献

- [1] 蒙世仟,杨世港.百色水利枢纽地下主厂房岩锚梁设计[J].水利建设与管理,2007,27(2):21-23.
- [2] 张菲菲,陈兵.乐昌峡水利枢纽地下厂房岩锚梁岩台开挖施工方法研究[J].广东水利水电,2012(1):95-98.
- [3] 刘明锋.地下厂房岩锚梁岩台开挖精细化爆破施工[J].煤矿爆破,2018(3):35-38.
- [4] 字政明,潘登喜,吴强,等.薄层板岩条件下岩锚梁开挖技术研究及实践[J].低碳世界,2019,9(7):85-86.
- [5] 齐界夷,贺明武,唐昭醒,等.乌东德水电站左岸地下厂房快速安全开挖支护施工技术[J].施工技术,2018,47(7):132-135.

(下转第 69 页)





# 对进一步完善代建制管理的政策建议

王诗祥 余智豪

(淮河水利委员会治淮工程建设管理局,安徽 蚌埠 233001)

**【摘要】** 我国推行代建制20年来取得了较好的成效。为探索解决代建制推行过程中遇到的问题,通过回顾代建制政策出台背景、推行与实施情况,系统总结代建制政策要点,分析实践中存在的发展障碍,从完善法律法规、强化合同管理与市场准入、处理好与全过程咨询与监理制关系、优化代建费用管理与风险控制、协同推进项目管理承包与工程总承包等方面提出完善相关配套制度设计建议,以实现规范化、专业化、市场化发展目标。

**【关键词】** 代建制;管理;政策;分析;建议

中图分类号: C931.2

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)10-062-04

## Policy recommendations for further improving the agent construction management

WANG Shixiang, YU Zhinang

(Huaihe River Project Construction Management Bureau of Huaihe River Commission, MWR, Bengbu 233001, China)

**Abstract:** The implementation of agent construction system in China has achieved good results for 20 years. In order to explore and solve the problems encountered during the implementation of agent construction system, this paper reviews the background, promotion and implementation of agent construction system policy, systematically summarizes the key points of agent construction system policy, and analyzes the development obstacles in practice. It also proposes recommendations for improving the related system design and achieving the development goal of standardization, professionalization and market industrialization from aspects of perfecting laws and regulations, strengthening contract management and market access, handling the relationship between the whole process of consultation and supervision system, optimizing the construction cost management and risk control and promoting project management contracting and project general contracting.

**Keywords:** agent construction system; management; policy; analysis; recommendations

在计划经济体制条件下,我国政府投资建设项目基本都是采用指挥部式的组织模式,参建各方主体责任不明确,经常出现“投资无底洞,工期马拉松,质量无保障”的现象。改革开放后社会主义市场经济体制逐步形成,政府投资建设项目的建设管理体制也发生深

刻变化,逐步建立了工程建设监理制、招标投标制、项目法人制、合同管理制度。随着改革开放的深入,开始推行代建制、工程总承包(EPC)、项目管理承包(PMC)和全过程咨询等制度改革。代建制在我国探索推行以来取得了一定的成效,但在法制、体制、机制和

收稿日期: 2022-06-27

作者简介: 王诗祥(1964—),男,正高级工程师,主要从事水利工程建设管理工作。

专业化、规范化、市场化环境等方面也存在一些发展障碍,需要进一步完善相关配套制度设计。

## 1 我国代建制政策背景

代建制是相对于自建制而言的。2002 年建设部“政府投资工程管理方式改革”课题首次提出以“代建制”改革现有政府投资工程管理模式。2003 年建设部出台《关于培育发展工程总承包和工程项目管理企业的指导意见》,于 2005 年、2006 年相继发布《建设工程总承包管理规范》《建设工程项目管理规范》。2004 年国务院出台《关于投资体制改革的决定》(以下简称《决定》),明确提出对非经营性政府投资项目加快推行“代建制”。

2004 年财政部出台《关于切实加强政府投资项目代建制财政财务管理有关问题的指导意见》,就代建项目的投资计划、资金拨付、竣工财务决算与资产交付、代建管理费标准等进行明确。

2016 年《中共中央 国务院关于深化投融资体制改革的意见》提出要“进一步完善政府投资项目代理建设制度”。2017 年《国务院办公厅关于促进建筑业持续健康发展的意见》提出要完善工程建设组织模式,加快推行工程总承包,要培育全过程工程咨询。

2019 年国家发展改革委和住房城乡建设部出台《关于推进全过程工程咨询服务发展的指导意见》。

## 2 全国各地推行代建制模式情况

### 2.1 政府组建专业机构管理模式

安徽、珠海等地推行政府主导,组建具有专业化管理能力的常设管理机构,按事业单位管理,对所属行业政府投资项目进行建设管理。

### 2.2 项目管理公司竞争模式

重庆、浙江等地推行由政府设置准入条件,培育具有较强经济和技术实力,有良好建设管理业绩的项目管理公司,市场化运作,通过公开招标择优选择。

### 2.3 政府选定入围公司模式

上海、武汉等地推行由政府筛选入围若干家具备

较强实力的项目管理公司,对特定建设项目进行代建管理。

## 3 水利工程项目代建制实施情况

水利部高度重视水利行业代建制推广工作。2006 年 12 月,水利部出台的《水利工程项目验收管理规定》中明确了项目法人,包括实行代建制项目中,经项目法人委托的项目代建机构。2009 年水利部出台《关于进一步加强水利工程建设管理的指导意见》,提出积极推进项目代建制和委托制,鼓励发展专业化的项目建设管理机构,对工程建设进行全过程或若干阶段的专业化管理。全国相关省份陆续开展了水利工程代建制推广工作。2002 年浙江开始在水利工程项目中推广代建制,由项目法人通过招标选择项目建设管理单位,受委托按合同对乐清白石水库、苍南桥墩水库等除险加固工程的实施阶段进行现场管理,主要是质量、安全、投资、进度等目标管理,取得了良好的效果。

南水北调项目涉及单元工程众多,在工程建设中主要采取的建设管理模式为直管、委托和代建制三种。2004 年国务院南水北调办出台《南水北调工程代建项目管理办法(试行)》,并在 3 个标段推行代建制,项目法人通过招投标方式选择 3 家项目建设管理单位并签订代建合同,每家项目建设管理单位管理 1 个工程标段,该标段的监理、设计合同与项目法人签订,其余合同与项目建设管理单位签订。

部分省份专门制定了水利工程项目代建制管理办法:2010 年湖北省出台《水利工程项目实施代建制暂行办法》;2013 年江苏省出台《水利工程项目代建制试行办法》;2014 年山东省出台《公益性水利工程代建制试行办法》等。

2015 年水利部办公厅出台《关于水利工程项目代建制管理的指导意见》(以下简称《意见》),至此,水利工程项目代建管理制度初步建立。

## 4 代建制的政策要点

### 4.1 完善政府投资体制,规范政府投资行为

《决定》提出加快推行代建制,目的是要加强政府



投资建设项目管理,重要举措是改进项目建设实施方式。

#### 4.2 严格招标投标制,预防腐败

《决定》和《意见》提出通过招标等方式,选择专业化的项目建设管理单位。目的是规范项目建设管理单位的选择程序,项目建设管理单位根据委托合同进行招标,选定勘察设计、施工总承包、建设监理及主要设备、材料供应商等,预防自建制监管一体化的弊端,设置“隔离墙”以期有效预防腐败。

#### 4.3 培育项目建设管理专业化队伍

推行代建制的前提是选择专业化的项目建设管理单位。项目建设管理单位必须具备与工程建设规模相适应的管理能力、经验和资源,以及相应的管理技术和水平,以科学合理控制项目的投资、质量、安全和工期。

#### 4.4 代建制为建设实施代建

《决定》和《意见》明确指出:代建制为建设实施代建,对建设项目自施工准备至竣工验收过程进行管理,不包括项目立项阶段的前期工作,不是全过程代建。

### 5 对完善代建制管理的政策建议

#### 5.1 明确项目建设管理单位的法律地位,规范代建合同示范文本

现阶段项目建设管理单位在国家基本建设程序中的法律地位、法律责任未明确。委托方通过委托代建合同可以转移民事责任,但行政责任和刑事责任则无法通过合同转移。建议尽快修订《中华人民共和国建筑法》《建设工程质量管理条例》《建设工程安全生产管理条例》等法律法规,明确项目建设管理单位的法律地位和法律责任。

政府投资项目都涉及公共安全和公众利益,项目建设管理责任重大,为避免出现项目建设管理单位承担义务多、责任大而管理权限小的弱势局面,建议有关部门尽快出台委托代建合同示范文本,规范双方的权利和义务。

#### 5.2 处理好代建制与全过程咨询的关系

目前的代建制仅限于建设实施代建。项目建设管

理单位不参与建设项目的决策阶段事务,对项目的管理目标具有一定的局限性。建议鼓励有条件的建设项目积极推行决策阶段、实施阶段和运行阶段全过程咨询,真正实现科学决策、科学管理。

#### 5.3 处理好代建制与监理制的关系

建设监理制是国家强制推行的一项管理制度,初衷是弥补建设单位管理能力不足问题。在代建制模式下,委托了专业化的项目建设管理公司,是否还需要委托监理,如何协调和平衡二者的关系与责任?建议修订有关法律法规,明确代建制模式下可不再委托建设监理,以减少管理职责交叉,提高建设管理效率,节约资源和费用。

#### 5.4 把好项目管理单位的市场准入关

现阶段的项目建设管理单位的所有制性质、专业侧重、规模大小、信用等级良莠不一,为确保项目建设管理质量和效益,建议加强对项目建设管理单位及专业人员的资质、职业资格管理和信用评价,把好市场准入关。

#### 5.5 科学设置代建费的合理预期

按照财政部的相关规定和各地代建制实际情况分析,现阶段代建费标准一般都是参照建设管理费标准通过市场竞争取费,实际的代建费与管理责任和投入不匹配,这不利于提高项目建设管理单位参与代建制实施的积极性和主动性,不利于提升项目建设管理单位专业化规范化水平,不利于代建制的健康发展。建议实施代建制的项目在取消施工监理的同时,参考建设管理费加部分建设监理费的标准通过市场竞争取费。代建制的标的是管理服务,应以综合服务能力和水平参与市场竞争,在提高投资效益的同时提高管理效率,实现代建费的合理预期。

#### 5.6 有效防控代建制的风险

代建制的风险主要包括项目建设管理单位管理不善导致的项目建设投资、质量、进度、安全等预期目标损失的风险,以及项目建设管理单位自身承担损失风险的能力。为有效预防代建制风险,必须明确其法律责任,建议参照有关监理责任模式,规定项目建设管理



单位对工程建设项目中的目标损失承担连带责任,同时,国家层面大力推行工程保险制度,有效降低建设市场责任主体风险度。

### 5.7 积极探索代建制、项目管理承包(PMC)与工程总承包(EPC)协调发展

项目管理承包(PMC)指项目管理承包商接受委托对工程项目进行全过程项目管理,包括项目策划、项目立项、选择 EPC 承包商等,并对设计、采购、施工、试运行进行过程管理。我国目前还没有出台项目管理承包(PMC)相关规范。

工程总承包(EPC)是指依据合同约定对建设项目的的设计、采购、施工和试运行实行全过程或若干阶段的承包。

代建制侧重于实施阶段项目管理,项目管理承包(PMC)侧重于全过程项目管理,也可以分阶段管理,与全过程咨询类似,工程总承包(EPC)侧重于全过程承包,也可以分阶段承包,三者各有侧重。应结合建设项目特点与各地各行业实际,全面推行代建制、全过程项目管理和工程总承包,让项目建设管理相关制度建设在法制化、专业化和规范化的统领下协调发展。

## 6 结 语

代建制作为建设投资管理体制领域正在实施的一项重大改革,必须通过不断探索,深入研究,勇于实践和科学决策,实现我国建设项目管理持续高质量发展。◆

### 参考文献

- [1] 关于投资体制改革的决定[EB/OL]. (2005-08-12) [2022-01-20]. [http://www.gov.cn/zwgk/2005-08/12/content\\_21939.htm](http://www.gov.cn/zwgk/2005-08/12/content_21939.htm).
- [2] 关于深化投融资体制改革的意见.[EB/OL]. (2016-07-18) [2020-01-20]. [http://www.gov.cn/zhengce/2016-07/18/content\\_5092501.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2016-07/18/content_5092501.htm).
- [3] 关于促进建筑业持续健康发展的意见.[EB/OL]. (2017-02-24) [2020-01-20]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-02/24/content\\_5170625.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-02/24/content_5170625.htm).
- [4] 关于推进全过程工程咨询服务发展的指导意见.[EB/OL]. (2019-03-15) [2020-01-20]. <https://zfxxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=16122>.
- [5] 水利工程建设项目的验收管理规定.[EB/OL]. 国务院公报. 2007-32. [2022-01-1-20]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2007/content\\_797367.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2007/content_797367.htm).
- [6] 水利部印发水利工程项目代建制管理指导意见[J]. 山西水利,2015(2):5.
- [7] 韦志立,丰景春,黄华爱.建立和完善水利工程项目代建制[J].中国水利,2006(10):36-37.
- [8] 崔延鹏.关于代建制相关问题的探讨[C]//中国土木工程学会.七省市第八届建筑市场与招标投标优秀论文集.济南:天津科技翻译出版公司,2007.
- [9] 梁昌新.关于政府投资项目代建制的几点思考[J].宏观经济管理,2007(9):3.
- [10] 谭导.关于项目代建管理问题分析[J/OL].城市建设理论研究(电子版),2013(13). [2022-03-02]. <https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/cjsjlyj2013131247>.

(上接第 51 页)

- [6] 巫润建,李国敏,董艳辉,等.锦州某地下水封洞库工程渗流场数值分析[J].长江科学院院报,2009(10):87-91.
- [7] 陈俊儒.基于流固耦合的海底隧道注浆圈合理参数研究[D].长沙:中南大学,2009.
- [8] 张龙云,张强勇,李术才,等.基于流固耦合的围岩后注浆对大型水封石油洞库水封性影响分析[J].岩土力学,2014,35(S2):474-480.
- [9] 赵英.浅析帷幕灌浆施工方法及效果[J].水利建设与管

理,2016(6):14-17.

- [10] 孙海江.黄岛国储地下水封油库工程爆破控制技术的应用[D].济南:山东大学,2014.
- [11] 周黎明,邱东明,等.TSP隧道超前地质预报技术及其3D成果研究与应用[J].长江科学院院报,2016(10):72-78.
- [12] 马坤,倪志刚,徐利.帷幕灌浆施工技术在库大坝基础防渗加固处理中的应用[J].水利建设与管理,2017(2):22-25.



# 长距离输水管道水压试验方法及验收标准探析

马志华

(河南省水利第一工程局集团有限公司,河南 郑州 450000)

**【摘要】** 目前我国尚没有适合长距离输水管道水压试验的标准,水压试验方法及验收标准没有统一。本文结合南水北调登封供水工程水压试验实例,对水压试验的分段方法、压力表的安装位置及土方回填工序等试验方法进行了探讨并提出了建议,根据渗水量和压降值的力学关系,分析了管道环境温度和管道内存空气对试验压力值的影响,提出了验收标准判定依据,对长距离输水管道工程水压试验的实施及标准化,具有一定的参考价值。

**【关键词】** 长距离;输水管道;水压试验;探析

中图分类号: TV32+2

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)10-066-04

## Analysis of hydraulic pressure test method and acceptance standard for long-distance water conveyance pipeline

MA Zhihua

(Henan Water Engineering First Group Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** At present, there is no suitable standard for hydraulic pressure test of long-distance water conveyance pipeline, and there is no unity in hydraulic pressure test method and acceptance standard. Taking the hydraulic pressure test of Dengfeng Water Supply Project of South-to-North Water Diversion Project as an example, this paper discusses such test methods as the segmentation method of hydraulic pressure test, the installation position of the pressure gauge and the earthwork backfilling process and puts forward some suggestions. According to the mechanical relationship between infiltration water volume and pressure drop value, the influence of ambient temperature of pipeline and air in pipeline on test pressure value is analyzed and the basis for determining acceptance standard is put forward. It has certain reference value for the implementation and standardization of hydraulic pressure test of long-distance water conveyance pipeline projects.

**Keywords:** long-distance; water conveyance pipeline; hydraulic pressure test; analysis

目前,我国长距离输水管道工程水压试验方法和验收标准参照的规范是《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)<sup>[1]</sup>。但其中个别条款不适

合长距离输水管道工程水压试验,例如 9.1.1 条第 1 项规定:“压力管道应按本规范第 9.2 节的规定进行压力管道水压试验,试验分为预试验和主试验阶段;试验

收稿日期: 2021-08-25

作者简介: 马志华(1966—),男,高级工程师,主要从事水利工程施工技术研发工作。

合格的判定依据分为允许压力降值和允许渗水量值,按设计要求确定;设计无要求时,应根据工程实际情况,选用其中一项值或同时采用两项值作为试验合格的最终判定依据”;9.1.9条规定:“管道的试验长度除本规范规定和设计另有要求外,压力管道水压试验的管段长度不宜大于1.0km”;9.2.5条第2项规定:“水泵、压力计应安装在试验段的两端部与管道轴线相垂直的支管上”;9.2.7条规定管道安装检查合格后即可进行回填土施工,管道顶部回填土留出接口位置;9.2.8条第2项规定:“试验管段不得用闸阀做堵板,不得含有消火栓、水锤消除器、安全阀等附件”。

针对长距离输水管道工程战线长、口径大、工况复杂的特点,笔者结合南水北调登封供水工程水压试验实例,通过对水压试验方法和验收标准进行探讨和分析,试图提出修改现行规范相关条款的一些建议。

## 1 工程概况

南水北调登封市供水配套一期工程位于河南省境内,南水北调中线16号口门位于河南省禹州市火龙镇任坡村。从南水北调中线总干渠16号口门引水至河南省登封市告成镇白沙饮水一级泵站前池,管线全长33.5km,管线最大高差137m。

泵站至3+000、河道穿越、道路穿越及联通阀管段为双排涂塑复合钢管,管道材质为Q345C,管径1000mm,管壁厚14mm;其余均为双排球墨铸铁管,1000mm,检修阀选用PN25双向密封蝶阀。全线管道设计工作压力为1.5MPa,试验压力为2.0MPa。

## 2 水压试验总体方案

### 2.1 准备工作

根据阀井设计位置和现场交通实际情况,管线共划分六个试验段,试验段长度平均5km;选用两个相同型号的压力计,分别安装在试验段两端附近的排气阀下方的定制短管上;管道安装后及时按照设计进行土方回填至原始地面,检查管道附件及管道附属设施,最后进行整体水压试验。

在试验段一端的检修空气阀井内,将空气阀卸掉,

临时替换上定制的试压盲板,经过球阀后用压力软管引到井外,与加压泵连接。

### 2.2 充水及排水

为能够重复利用充水试压段内的试压用水,按管线地势,从高到低依次充水试压,每段试压完成后,开启两端检修阀,让水自流到下一个试验段,直至试压结束;试压结束(或中间维修)需要全部排空管内存水时,从试验段放空阀排出。

### 2.3 试压

为减小检修阀的单向受力,将试验段及其上下游相邻试验段充满水并加压至1MPa(试验压力的50%),测算管腔内存空气量并采取排气措施;然后将试验段两端的检修阀关闭,并作为试验段的两端靠背继续升压工作。

当压力升至1.5MPa(工作压力)时,开始分级升压;压力升至2.0MPa(试验压力),必要时进行压力值修正;稳压15min后,当压力降值小于0.03MPa(GB 50268—2008规定的球墨铸铁管压力降允许值)时,即判定试压合格。

## 3 水压试验方法探讨

### 3.1 水压试验段长度划分

长距离输水管道工程一般是指管线长度超过10km的供水、引水工程。GB 50268—2008规定,为便于试验操作,压力管道水压试验的试验段长度不宜大于1.0km。

但是,长距离输水管道的工程特点是口径大,沿途地形复杂,试压段长度过短,不仅所需封堵费用高,而且管道合拢接头多,施工安装难度大;反之,如果水压试验的管段过长,则管道试验压力受管腔内存气量的影响较大,并且不便于操作,而且一旦出现异常情况,应急处理成本反而增大<sup>[2]</sup>。

根据检修阀的设计参数,符合条件的检修阀可做试压堵板<sup>[3]</sup>,试压段的最小长度应根据检修阀井之间的距离确定。检修阀井布置考虑了输水系统的排水功能、管道分段检修及排水时间等因素,宜每3~10km设置为一个试压段<sup>[4]</sup>。





### 3.2 压力表安装位置对试验压力的影响

长距离输水管道水压试验一般利用检修阀门作为靠背,试验段的两端是双向密封蝶阀。如果在阀门附近的主管道上开孔安装水泵或压力计,势必影响管道系统的强度和耐久性。所以,应采用定制的连接件,将压力表安装在容易拆卸的阀件上。

由于水具有很小的压缩性,即可认为管腔内液体是一种毫无空隙的连续体,在管道内没有空气的情况下,管路系统的压力波传递速度略小于声速<sup>[5]</sup>。假设试验段的长度为10km,从管道一端加压,在有少量空气的情况下,压力波传递到另一端所需的时间不足60s。所以,当试压段长度小于10km时,由于压力传递时差造成的压降(GB 50268—2008 规定稳压测定时间15min)偏差可以忽略。

但是,管腔内不可避免地存有少量空气,使流体的体积弹性模量降低,从而降低压力波传递速度;长距离输水管道本身是弹性体,管道升压时,管壁会发生膨胀,压力波传递速度降低。所以,当管道试压段过长时,在同一时刻,安装在不同位置的压力表读数存在一定的误差。

### 3.3 管道顶部土方回填对管道的影响

随着球墨铸铁管、预应力钢筒混凝土管等承插口类型的管道接口质量不断提高,单口打压<sup>[6]</sup>合格率接近100%,管线漏水大多是由于管道安装后土方回填机械扰动破坏造成的,包括挖掘机械对管身的碰撞破口或碾压机械过重造成的管口椭圆渗漏;对于长距离钢质管道来说,大量的管道接口外露,水温随着外部环境温度的变化而变化。

管道土方回填前进行水压试验,不但水温变化会影响试验结果,而且试验结果不能代表管道工作状态下(回填土达到设计覆土深度)系统的质量情况。所以试压试验宜在土方回填完成后进行整体试验。

## 4 水压试验验收标准分析

### 4.1 渗水量与降压的关系

进行管道水压试验时,管腔内充满水以后,仍要继续

续向管腔内注水,才能在管腔内产生水压直至达到试验压力,所以需要向管道内增补水量;反之,试验段泄压时,就需要排出或渗漏出这些水量。以登封供水工程为例,管材为K12球墨铸铁管,管道内径1m,公称壁厚0.018m,试验段长度为10km,由于压降所泄出的水量按式(1)<sup>[7]</sup>计算:

$$\Delta V = V \Delta P (1/E_w + D_i/e_n E_p) \quad (1)$$

式中: $\Delta V$ 为升压所增加的水量,L; $V$ 为试压管段总容积,L; $\Delta P$ 为升压量,MPa; $E_w$ 为水的体积模量,MPa; $D_i$ 为管材内径,m; $e_n$ 为管材公称壁厚,m; $E_p$ 为管材弹性模量,MPa。

由计算得出:在管道试压时就可以推算出15min时降压值为0.03MPa,渗水量为1.3L/(min·km),GB 50268—2008 表9.2.11 允许渗水量为3.0L/(min·km)。经过对比可以看出,在不考虑内存空气和水温变化的影响时,管道水压试验的允许压力降标准值相对允许渗水量值标准严格;管道水压试验的压力降和渗漏量成线性关系,试压分段长度对管道水压试验验收标准没有影响。

### 4.2 管道内存空气对压力降的影响

长距离输水管道试压段长度宜划分为1~10km,中间设计排气阀。但在设计管线坡度比较平缓的管道工程中,由于施工误差极容易形成反坡,导致充水时管顶最高点存气且不能有效排除,压力试验时需要对压力降数值进行修正。见式(2):

$$\Delta W = Q [1/(P_1 + 1) - 1/(P_2 + 1)] \quad (2)$$

式中: $\Delta W$ 为由于管道内残余空气,需要向管道内多增补的水量,L; $Q$ 为管道内残余空气体积,L; $P_1$ 为测量初始压力,kgf/cm<sup>2</sup>; $P_2$ 为测量结束压力,kgf/cm<sup>2</sup>。

根据式(1)可以画出P-V理论曲线<sup>[8]</sup>,根据现场实际渗漏测量值画出实际P-V曲线,经过P-V理论曲线和P-V实际曲线对比,可以及时发现管道是否有泄漏或管道中是否存有大量的空气;根据式(2),按照向管腔内注入水量的多少可以计算管腔内存有多少空气。

以5km长DN1000球墨铸铁管为例,在管腔内没

有空气的情况下,稳压 15min 后,压降  $0.3 \text{ kgf/cm}^2$ ,根据式(1)计算可知渗水量为  $1.3 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{km})$ ,泄漏总量为 97.5L;在管腔内存有 1% 空气的情况下,压降  $0.3 \text{ kgf/cm}^2$ ,根据式(2)可以计算出因内存空气增加的渗水量为 102L,泄漏总量为  $97.5 + 102 = 199.5 \text{ L}$ 。

根据以上计算结果可以看出,当管道内存有大量空气时,由于空气容易被压缩,致使升压时需要另外注入大量的水,造成升压过程比较缓慢,稳压时达到相同的压降值所需要的时间相对延长<sup>[9]</sup>。

### 4.3 温度对水压试验的影响

试验段管道容积的变化受压力和温度影响,特别是钢制管道管腔内存有大量空气时,管道外部环境温度发生变化对管道的容积变化影响较大<sup>[10]</sup>。

对于球墨铸铁、PCCP 等材质承插口工艺输水管道,如果大量管身外漏,在炎热的夏季或寒冷的冬季,管道内水温 and 气体温度变化较大,必将影响水压试验结果。所以,待管道顶部回填土全部完成后进行整体水压试验,可以减少温度变化对压力值的影响。

## 5 结 语

根据长距离输水管道口径大、线路环境复杂的特点,GB 50268—2008 中有关水压试验的部分条款不适用长距离输水管道水压试验的实施及验收,建议及时制定试验规程或对 GB 50268—2008 进行修订:

a. 建议将管道水压试验段长度修改为不宜大于 10km。

b. 试压阶段管道内任意一点压力的变化将迅速等值传递到另外任意点,压力表的安装位置对试验压力值没有任何影响。为避免压力计损坏不被发现或试

验段中间阀门忘记开启,应采用两个压力计并分别安装在试验段两端附近。

c. 静水压试验需在管道顶部回填土全部完成后,整体进行水压试验。但缺点是升压时一旦漏水,不易查找漏点,所以长距离输水管道应在开工前制定管道测漏技术措施。

d. 建议将水压试验合格判定的依据改为允许压力降值。

e. 内存气体不能有效排出时,应测定存气量对压力的影响,修正压力表读数或稳压时间。◆

### 参考文献

- [1] 给水排水管道工程施工及验收规范:GB 50268—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [2] 许志刚,杜培文,张力友,等.长距离大口径输水管道水压试验方式研究[J].人民黄河,2017,39(4):91-93,98.
- [3] 张志伟.大口径球墨铸铁管道水压试验技术研究[J].北京水务,2021(1):58-61.
- [4] 王国君.PCCP 管道水压试验技术研究[J].山西水利科技,2020(4):31-34.
- [5] 陆安均,杨林,杜晓琳.输水管道中压力波波速的研究[J].科技信息,2010(32):31-32.
- [6] 赵嘉伟.输水工程中口径管道单口水压试验的改良优化[J].水利建设与管理,2021,41(6):34-37.
- [7] 刘乃力.给水管道水压试验中存气量对试验的影响分析[J].山西建筑,2011,37(5):117-118.
- [8] 输送石油天然气及高挥发性液体钢质管道压力试验:GB 16805—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [9] 安金龙.长输管道水压试验的排空问题[J].化工建设工程,2003(4):21-22.
- [10] 潘永东,张洪元.温度变化对钢质管道水压试验的影响[J].石油工程建设,2006(5):10-13,81-82.
- [9] 蒋厚良,张环,谢灿.预留岩坎水下爆破技术在低涵进口施工中的应用[J].水利建设与管理,2021,41(8):64-66,72.
- [10] 马琪琪.荒沟抽水蓄能电站超深斜井开挖施工技术[J].水利建设与管理,2021,41(1):42-46.
- [11] 焦忠帅.长甸水电站全排孔水下岩塞爆破施工技术浅析[J].水利建设与管理,2020,40(12):53-59.
- [12] 梁剑,阙晓琼.小断面高竖井开挖施工方法[J].水利建设与管理,2020,40(11):26-32,16.

(上接第 61 页)

- [6] 高飞.乌东德水电站左岸地下厂房围岩稳定性分析[D].武汉:长江科学院,2020.
- [7] 曾辉.岩滩水电站扩建工程地下厂房岩锚梁开挖技术[J].企业科技与发展,2014(1):38-40.
- [8] 焦忠帅.水下岩塞爆破及其在水利工程中的应用[J].水利建设与管理,2020,40(7):45-50,63.



# 白蚁监测诱杀 IPM 技术在鲁班水库中的应用研究

赵川 肖翔 罗思敏

(四川省水利科学研究院, 四川 成都 610072)

**【摘要】** 我国水库数量众多,坝体等水工结构经常遭受白蚁危害的不利影响。白蚁生物危害直接影响水库工程的安全及寿命,严重降低了水库的使用效能。为了解决传统大坝白蚁整治方式的不足,提出采用基于有害生物综合治理(IPM, Integrated Pest Management)的白蚁监测诱杀一体化技术,涵盖监测、识别、预警、治理、评估等环节。鲁班水库采用白蚁监测诱杀一体化 IPM 技术后,坝体预警信息量整体呈现下降趋势,说明白蚁防治效果显著。白蚁监测诱杀 IPM 技术高效、绿色、环保,可在今后的水库大坝白蚁治理工程中加以推广应用。

**【关键词】** 白蚁危害;有害生物综合治理技术;预警;鲁班水库

中图分类号: TV698.2 + TU746

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)10-070-05

## Application of IPM technology for termite monitoring and trapping in Luban Reservoir

ZHAO Chuan, XIAO Xiang, LUO Simin

(Sichuan Academy of Water Conservancy, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** There are a large number of reservoirs in China with hydraulic structures such as dam bodies often being adversely affected by termites. Termite biohazard directly affects the safety and life of reservoir projects and seriously reduces the service efficiency of reservoirs. In order to solve the shortcomings of traditional termite treatment methods in dams, an integrated termite monitoring and trapping technology based on Integrated Pest Management (IPM) is proposed, which covers monitoring, identification, early warning, treatment and evaluation. After the integrated termite monitoring and trapping IPM technology was adopted in Luban Reservoir, the amount of early warning information of the dam body shows a decreasing trend, indicating that the effect of termite treatment is significant. The IPM technology for termite monitoring and trapping is efficient, green and environmental protection, which can be popularized and applied in termite treatment projects of reservoir dams in the future.

**Keywords:** termite hazard; IPM technology; early-warning; Luban Reservoir

白蚁危害是影响水库工程效益正常发挥的重要因素之一,对水库土坝的安全运行构成严重的威胁<sup>[1-3]</sup>。

收稿日期: 2021-11-23

基金项目: 四川省科技厅科技计划项目“水库大坝白蚁监测诱杀一体化技术转化项目”(项目编号:2020JDZH0002)

作者简介: 赵川(1989—),男,硕士,主要从事水利工程结构安全诊断工作。



白蚁在坝身筑巢或到坝体区域活动时,形成蚁道和空腔。当水位上升没过蚁道进口时,水流会进入蚁道和巢腔中,造成流土和管涌等险情,甚至发生溃坝,直接影响下游安全。根据四川省水库土坝白蚁普查结果分析,20 世纪 50—70 年代建成的土坝,白蚁危害率高达 90%。据调查,四川省水库土坝白蚁的危害非常严重,几乎每座水库都有白蚁。

传统的白蚁防治技术是利用土壤药物以及地基药物进行预防,即在建筑物地基挖好之后,将药物喷洒到地基低端和周围。当建筑物填土之后、铺水泥之前,将药物喷洒在土壤的表面,进而实现建筑物白蚁防治的效果<sup>[4-8]</sup>。然而,传统的水库土坝白蚁专项整治方式,防治效果并不理想。原因主要是:①缺乏土坝白蚁防治专业人员,工程缺乏有效的常态监测管护,常以坝体出险作为受到白蚁危害的证据,致使土坝长期带病运行,增加了工程失事的风险和整治的难度;②采用传统的“挖巢法”进行整治,大挖大填费时费工,对坝体破坏大,白蚁防治效果与整治人员的专业水平有很大关系,也有一定的运气成分;③未针对土坝主要危害蚁种进行防治,参照其他行业的防治方式,往往药不对症,且药物容易对地下水造成污染;④整治方案不系统,与水库大坝工程特点不相适应。

鉴于此,本文针对水库大坝白蚁防治过程中的难题,结合水库大坝的工程特点,提出白蚁监测诱杀一体化的 IPM 技术,并将其应用于鲁班水库白蚁整治工程中,以推进水利行业白蚁防治技术的发展,从而保障水库等重点水利工程充分发挥效益。

## 1 白蚁监测诱杀 IPM 技术

人类探索有害生物防治过程,经历了多个阶段,1967 年提出了“有害生物综合防治”(Integrated Pest Management, IPM)的概念<sup>[9,10]</sup>。白蚁监测诱杀 IPM 技术是根据白蚁的生物学、生态学和行为学特性设计开发的一种白蚁防治技术和程序,其通过专用的设备和程序,实施白蚁防治活动。白蚁监测诱杀技术由白蚁监测技术和白蚁诱杀技术组成,做到有蚁即灭,无蚁

监测<sup>[11-15]</sup>。

白蚁的诱杀分为两个步骤:引诱和处理。白蚁引诱是指采用某些对白蚁有强烈引诱力的物质或材料,促使白蚁个体向人为确定区(点)大量集聚。白蚁诱杀技术有毒饵诱杀和粉剂诱杀两大类。所谓毒饵诱杀是把灭白蚁活性物质加入饵料中做成毒饵,白蚁取食后在群体中传播,最终造成群体的死亡。粉剂灭杀是用引诱物质把白蚁诱集于引诱坑(或容器)中,再喷施慢性灭白蚁粉剂,让授粉白蚁在群体中传播药剂,或将白蚁带回室内分离,喷施慢性灭白蚁粉剂,再释放受粉白蚁于引诱坑(或容器)中,最终导致整个群体死亡。

目前国外多采用“监测—诱杀”,或者称为“诱集—释放—杀灭”法开展白蚁诱杀活动。采用此方法时,先在土壤中建立若干观测站,可以在 100m<sup>2</sup> 的范围内设置 3~10 个观测站。随后定期普查,发现有观测站被白蚁袭击时,用盛有毒饵(通常是慢性毒剂)的容器替代之。为了加速药剂的传播,施药者通常将观测站中原有的白蚁收集起来,放入占据其位置的盛药装置中。如果该盛药装置在下一轮的普查中仍有白蚁活动,则需继续施药;如果盛药装置中未见白蚁,则可将其取出,将观测站重新植入。观测站可长期植入土中,受到攻击后及时施药,确保特定区域内长年无白蚁危害。

白蚁防治“监测—诱杀”系统由饵料、饵剂和饵站三个部分组成:①饵料:投放在饵站中,用于诱集或监测白蚁,其不含防治白蚁有效成分;②饵剂:投放在饵站中,是含防治白蚁有效成分的供白蚁取食的物质。饵剂是监测诱杀系统中重要的组成部分之一,是监测诱杀系统能否有效地防治白蚁的关键;③饵站:聚集白蚁,盛放饵料和饵剂的装置。白蚁能进出饵站,并将其作为一个活动和采食点,采食饵料或饵剂。

## 2 应用案例

### 2.1 水库工程概况

鲁班水库是四川省第三大水库,位于绵阳市三台县鲁班镇,是都江堰灌溉系统人民渠七期末端的一座



图1 鲁班水库大坝现场

大(2)型围蓄水库,水库总库容 2.78 亿  $\text{m}^3$ 。水库枢纽主要建筑物包括:主坝一座(钢筋混凝土斜墙干砌条石

坝)和副坝六座(其中:浆砌条石重力坝两座、黏土斜墙石渣坝四座),见图1。该水库于1980年底完成枢纽工程建设任务,1981年开始蓄水运行。水库运行40年来,为灌区的农业生产发挥了重要作用。

## 2.2 白蚁分布及危害分析

鲁班湖风景区是四川省政府命名的省级风景名胜,层林叠翠,风景秀丽,气候宜人,属亚热带湿润季风气候,适宜白蚁生活。在鲁班水库的选址地周围,山坡中的溪水和植物为白蚁提供了充足水源和丰富的食物,滋生多种白蚁。经水库现场实地踏查,鲁班水库主副坝及周边林地均发现众多白蚁活动迹象,见图2。



图2 鲁班水库白蚁危害现场调查

经调查分析,白蚁危害主要分布在鲁班水库主坝和倒湾垭副坝以及油房垭副坝三座坝体的下游坝坡及附近范围。

## 2.3 白蚁危害治理方法

在鲁班水库主副坝部分设施开展了以下白蚁防治工作:

a. 在堤坝上多点埋设白蚁信息素诱杀包,进行白蚁全效灭杀。第一次在堤坝上按 1 包/ $\text{m}^2$ 进行埋设,诱使白蚁的工蚁大量出巢迅速取食,以后根据白蚁危害降低情况,按上次埋设包数的 10% 进行递减。

b. 利用白蚁趋避特性,在堤坝、左右坝肩及其周边灌注和滞留喷洒白蚁生物趋避剂(环保无毒),设置白蚁趋避带,进行全效趋避。

在水库堤坝上安装 4 套白蚁监测装置,实现管理

员在室内 24 小时实时监测。通过安装的监测系统能全面观测、评估白蚁种类、危害情况、危害范围,同时根据蚁情进行具体分析,并在第一时间制定白蚁防治方案,将白蚁灭杀在发生危害之前,确保水库堤坝安全。白蚁实时视频监控影像见图3。

鲁班水库白蚁危害治理实施现场见图4,白蚁信息素诱杀包和白蚁趋避带及其他相关设施均布置在坝体下游坝坡。

## 2.4 白蚁危害治理效果分析

根据在鲁班水库堤坝上安装的 4 套白蚁监测装置,获取了 3 座坝体白蚁危害的实时监测数据,并根据结果绘制了 3 座坝体 2020 年 1—12 月的预警频率曲线图,见图5。





图3 鲁班水库白蚁实时监测视频影像



图4 鲁班水库白蚁危害治理实施现场

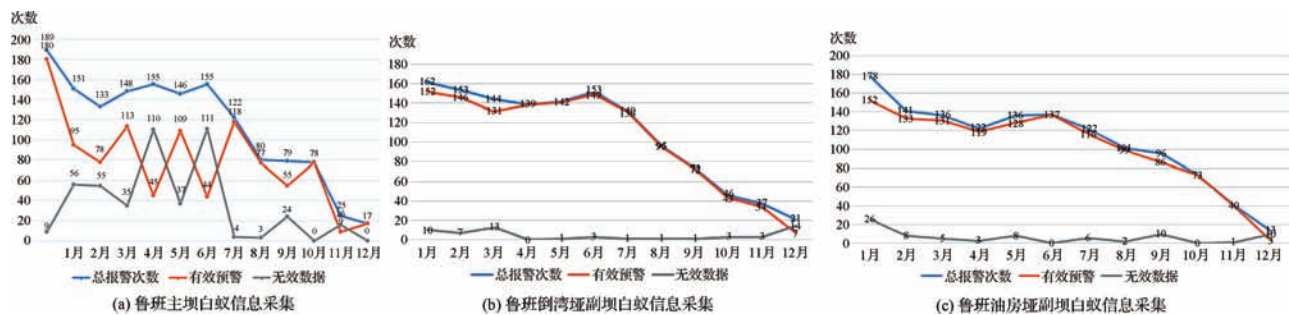


图5 2020年鲁班水库白蚁危害监测信息数据

根据2020年1—12月累计监测信息分析(在白蚁识别算法排出误差的基础上,进一步人工筛查解除预警的无效数据),鲁班水库主坝及周边由于丛林茂盛,

白蚁危害十分严重,叠加3—7月白蚁活动旺盛季节,在投放后的一段时间内,白蚁信息素诱杀包引诱周围白蚁取食,导致的预警阶段性反复。鲁班水库主坝在





投放白蚁信息素诱杀包和设置白蚁趋避带后,蚁害整体呈现下降趋势。副坝预警信息量持续回落,直至较低水平,说明鲁班水库大坝白蚁防治效果较为显著。

在鲁班水库白蚁防治期间,取出埋放的引诱装置和诱杀包进行观察,均发现有大量白蚁啃食痕迹,证明白蚁已经取食杀灭饵料。图6为后期现场查看的鲁班水库白蚁信息素诱杀包啃食情况。



图6 鲁班水库白蚁信息素诱杀包啃食情况

### 3 结 论

本文针对四川省水库大坝白蚁危害的成因、特点及现状,构建了一种白蚁生物危害综合防治体系,形成了一套白蚁监测诱杀一体化的IPM技术,将白蚁监测、识别、预警、治理、评估等环节有效整合集成,并应用于鲁班水库大坝白蚁治理中。鲁班水库大坝采用白蚁监测诱杀一体化IPM技术进行白蚁治理后,效果显著,提升了水库大坝安全监测水平,为水库大坝白蚁危害的综合治理提供了一种可复制的综合防治技术体系,建议在今后的水库大坝白蚁治理工程中加以推广应用。◆

### 参考文献

- [1] 倪锦龙. 白蚁防治技术研究进展[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(24): 162-163.
- [2] 文富勇. 基于云服务的大坝安全监测信息管理与分析研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(1): 251-255, 260.
- [3] 罗倩钰, 杨杰, 程琳, 等. 混凝土坝运行初期安全监控指标拟定方法研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(2): 32-36.
- [4] 区勤勇. 水库大坝白蚁病害分析及治理措施分析[J]. 内蒙古水利, 2019(11): 72-74.
- [5] 严少辉, 孙叙, 彭晓涛, 等. 我国古树名木白蚁防治技术研究进展[J]. 中华卫生杀虫药械, 2020, 26(1): 84-86.
- [6] 王谨. 厦门园博园白蚁调查及综合防治措施[J]. 福建农业科技, 2019(2): 41-46.
- [7] 李伟联. 在运行燃气PE管应对白蚁侵蚀的防治对策[J]. 煤气与热力, 2020, 40(10): 32-39, 46.
- [8] 常正方, 罗晶晶. 10% 氟虫胺对古树白蚁的防治效果初探[J]. 绿色科技, 2021, 23(11): 107-108.
- [9] 罗森午. 木结构古建筑白蚁防治的IPM策略应用[J]. 住宅与房地产, 2018(36): 229-230.
- [10] 刘晓, 辜巍, 景康, 等. 水利工程白蚁诱杀-监测一体化装置研发及应用[J]. 四川水利, 2020, 41(5): 122-125.
- [11] 刘源智, 江涌, 苏祥云, 等. 中国白蚁生物学及防治[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1998.
- [12] 杨忠生. 关于昆虫信息素的研究与应用[J]. 考试周刊, 2009(9): 223-224.
- [13] 王余霞, 李阳艳, 阮健伟. 白蚁防治IPM策略中监测-诱杀技术应用概述[J]. 绿色科技, 2011(5): 21-24.
- [14] 黄姗姗. 古建筑白蚁危害成因及远程实时监测技术的应用[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(13): 96-99.
- [15] 李晶舰, 林俊, 陈晓露, 等. 白蚁智能监测诱杀装置技术与应用研究[J]. 中华建设, 2018(10): 148-149.

# 浅析基于分布式光纤传感的 PCCP 监测技术应用

孙 钰 封 皓 沙 洲

(辽宁西北供水有限责任公司, 辽宁 沈阳 110003)

**【摘 要】** 为了实时监测预应力钢筒混凝土管(PCCP)管道预应力钢丝的状态,防止断裂的预应力钢丝给管道的运行埋下巨大的安全隐患,采用基于相位敏感光时域反射仪和马赫-曾德干涉仪的两种分布式光纤传感技术互补的模式,对 PCCP 的断丝事件实施了精准定位和声音还原,实现在役的 PCCP 管道预应力钢丝断裂事件的实时监测和定位,对于预防 PCCP 工程系统发生灾难性事故、避免造成重大经济损失和恶劣社会影响具有关键作用,对基于分布式光纤传感的 PCCP 断丝监测技术的进步和在长距离供水工程中的应用具有重要意义。

**【关键词】** 预应力钢筒混凝土管;马赫-曾德干涉仪;相位敏感光时域反射仪;分布式光纤传感;断丝监测

中图分类号: TV221.1 + TV674 文献标志码: B 文章编号: 2097-0528(2022)10-075-05

## Application of PCCP monitoring technology based on distributed optical fiber sensing

SUN Yu, FENG Hao, SHA Zhou

(Liaoning Northwest Water Supply Co., Ltd., Shenyang 110003, China)

**Abstract:** In order to monitor the state of prestressed steel wire in prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) pipeline in real time, and to prevent great hidden danger to the operation of pipeline caused by the broken prestressed steel wire, the complementary mode of two distributed optical fiber sensing technologies, namely, phase-sensitive optical time-domain reflectometer and Mach-Zehnder interferometer, is adopted to implement accurate positioning and sound reduction of PCCP broken wire event, and realize real-time monitoring and positioning of broken prestressed wire event of PCCP pipeline in service. It plays a key role in preventing catastrophic accidents in PCCP project system and avoiding significant economic losses and adverse social impacts, and is of great significance for the progress of PCCP broke wire monitoring technology based on distributed optical fiber sensing and its application in long-distance water supply projects.

**Keywords:** prestressed concrete cylinder pipe; Mach-Zehnder interferometer; phase-sensitive optical time-domain reflectometer; distributed optical fiber sensing; broken wire monitoring

PCCP(预应力钢筒混凝土管)的结构完整性对输水工程安全运行至关重要,一旦发生爆管,产生的环境影响、经济损失不可估量<sup>[1]</sup>。随着 PCCP 在国内大型输供水项目的应用和发展,项目的安全运行在地方经

收稿日期: 2021-08-27

作者简介: 孙钰(1976—),男,正高级工程师,主要从事 PCCP 制造、工程建设与管理、工程运行维护以及抢险维修等工作。



济社会发展中的作用越来越重要,PCCP 结构安全作为预防性保障的核心问题之一,逐渐受到项目管理者的重视。

常规的 PCCP 主体结构中预应力钢丝是提供环向抗内水压力性能的重要结构,预应力钢丝一旦断裂,将恶化管道的整体抗内压能力,增加爆管概率<sup>[2-3]</sup>。因此,对预应力钢丝进行实时监测,准确掌握断丝发生的时间、位置、数量、规模,对于预防爆管、保障管道安全运行至关重要<sup>[4]</sup>。

预应力钢丝断裂的瞬间会释放出高能声波,这种声波大多呈现快速衰减的脉冲特征,具有较宽的频谱成分<sup>[4]</sup>。监测并识别这种特殊声波可对断丝事件进行发现和定位。分布式光纤传感有效地突破了传统的点式传感器监测受大规模组网、供电、布线、电磁干扰以及高昂的维护监控成本等因素限制,将光缆作为传感器和信号传输通道,一根光缆实现管道全线的振动监测和信号传输<sup>[6-7]</sup>。此外,光缆具有无源、耐腐蚀、抗电磁干扰等优良特性,能够显著降低传感器的部署难度和施工成本<sup>[8-9]</sup>。

国际或是国内,通过光纤传感探测物理量大多采用光学干涉原理。本文通过深入研究 PCCP 结构特性,尝试采用不同的干涉仪实践验证,最终确定了效果较好的相位敏感的光时域反射和马赫-曾德干涉仪优势组合模型。相位敏感的光时域反射仪( $\phi$ -OTDR)可实现多点同步定位、分段独立响应,具有较高的定位精度和作用距离,但其频率响应受到传感距离制约,一般为 1~10kHz,对于高频分量丰富的信号其采样率稍显不足<sup>[10-11]</sup>。马赫-曾德干涉仪(MZI)不能对事件进行定位,但具有极高的频率响应<sup>[12-13]</sup>。这两种技术在分布式振动监测方面各有优劣,针对在 PCCP 断丝监测领域的需求,技术研发团队创新性地将这两种技术进行了融合,在实验室的理论模拟测试基础上,经过有针对性的现场实测,进一步验证了对 PCCP 断丝信号的监测、定位和识别的有效性,对促进基于分布式光纤传感的 PCCP 断丝监测技术的进步和推动该项技术在长距离供水工程中的应用具有重要意义。

## 1 $\phi$ -OTDR 系统与 MZI 监测系统的特点

两种系统的时域信号的产生原理不同。 $\phi$ -OTDR 系统的时域信号是有限瑞利散射脉冲叠加形成的合光场的光强随时间的变化;MZI 系统是连续光在整个光纤上的累积相位调制的结果。 $\phi$ -OTDR 系统的时域信号仅受局部振动的影响,而 MZI 时域信号是整条光纤上各个位置的振动累积影响的结果。 $\phi$ -OTDR 的特点是能够同时测量多点的振动信号,其时域图只选取了某一个特定位置的时域信号。MZI 由于采样率很高,可以达到 50kHz 以上,且频率响应也宽,因此适合声音还原。而单 MZI 不能定位(双 MZI 可以实现定位),因为它最后得到的就是一个最终的测量结果,这个最终的结果是所有位置的振动叠加影响出来的,没办法分开。 $\phi$ -OTDR 适合定位,MZI 适合声音还原。

## 2 模拟融合系统

将  $\phi$ -OTDR 和 MZI 两个系统进行融合,使用融合系统对 PCCP 断丝事件进行监测,同时实现了高精度定位和声音还原的需求。其系统光路见图 1。

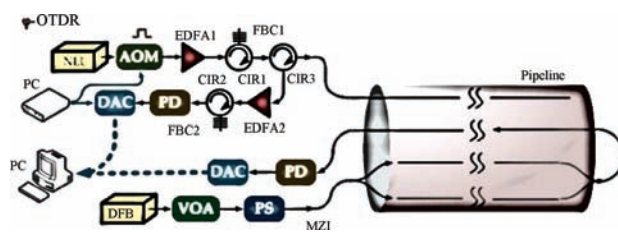


图1 融合系统光路图

NLL-窄线宽激光器;AOM-声光调制器;EDFA-掺铒光纤放大器;CIR-环形器;FBG-光纤布拉格光栅;PD-光电探测器;DAC-数据采集设备;PC-计算机;PG-脉冲产生模块;PS-光纤扰偏器;VOA-可调光纤衰减器;DFB-分布式反馈激光器

按图 1 所示,需要定制一根 4 芯光纤, $\phi$ -OTDR 系统使用传感光缆中的 1 根纤芯,MZI 系统使用传感光缆中的 3 根纤芯,两系统可以同时覆盖范围内的 PCCP 断丝事件进行监测。

## 3 试验与数据分析

### 3.1 试验描述

经过试验室测试以后,技术团队开展了单体管道



和管线系统性试验,本文仅对单体管道的试验进行阐述。

### 3.1.1 模拟融合监控系统

按照现场试验方案,分别在试验选取的单节、组队的 DN3200 PCCP 的内壁和外壁上采用黏结的方式固定光缆。试验选用的光缆型号为 GYTA53,本次试验只根据需要选取了光缆中的 4 根纤芯接入定制的融合系统,并将其中的 2 根纤芯在尾端熔接  $2 \times 1$  耦合器,汇入第 3 根纤芯,形成了 MZI 系统的闭合回路,完成传感光缆的布设。

### 3.1.2 清理拟断丝部位

随机在 PCCP 外部选取 3 处拟断丝部位,采用人工手持机械凿除的方式在相应的管外砂浆保护层部位

开槽,操作过程中控制力度不应钢丝造成外伤,慢慢剔除拟断丝点位钢丝的外表面砂浆,使选取点位的预应力钢丝裸露在外。

### 3.1.3 模拟断丝和外部破坏性入侵事件

准备工作就绪后,将融合监测设备开机上电,接入相应纤芯并调试妥当后,开启信号监测软件,进行数据的实时采集、分析、处理和存储。人工切割裸露在外的单根预应力钢丝,直到切断。钢丝断裂的瞬间在试验现场可以听到比较闷的“砰”的一声。

## 3.2 现场测试数据分析

### 3.2.1 断丝信号特征分析

根据现场模拟试验收集的数据,通过软件进行处理并形成  $\phi$ -OTDR 系统的时空图,见图 2。

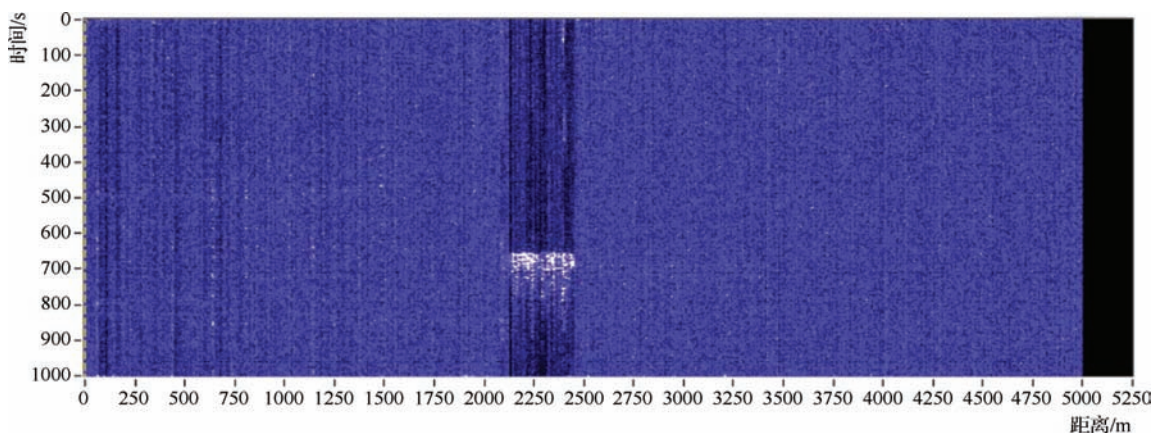


图2 断丝信号时空图

时空图显示的是 300Hz 的高通滤波结果。从图中可以看到,300Hz 高通滤波基本滤除了全部环境信号的干扰,图中 2250m 附近的白色横线是断丝在时空图

上留下的痕迹。断丝信号具有非常高的信噪比。

本次试验结果表明,采用  $\phi$ -OTDR 系统可以对 PCCP 断丝信号进行有效监测。

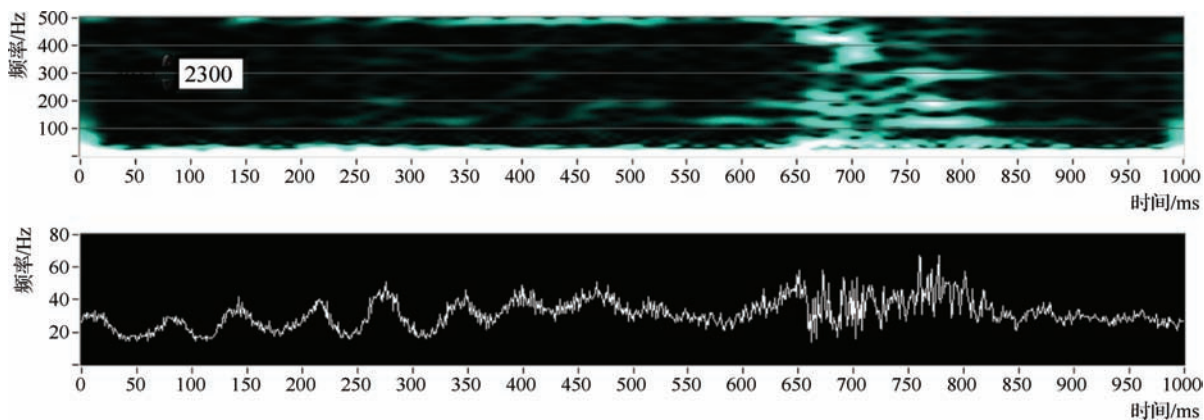


图3 断丝信号频谱



从图3中可以看到,在断丝发生的瞬间,波形会产生快速的、杂乱的变化。信号的高频分量在断丝瞬间突然增加,基本覆盖了0~500Hz整个带宽范围,与非

断丝时段的信号差异十分明显。信号的频率范围较广,在图中的480~500Hz段可见明显的能量分布。

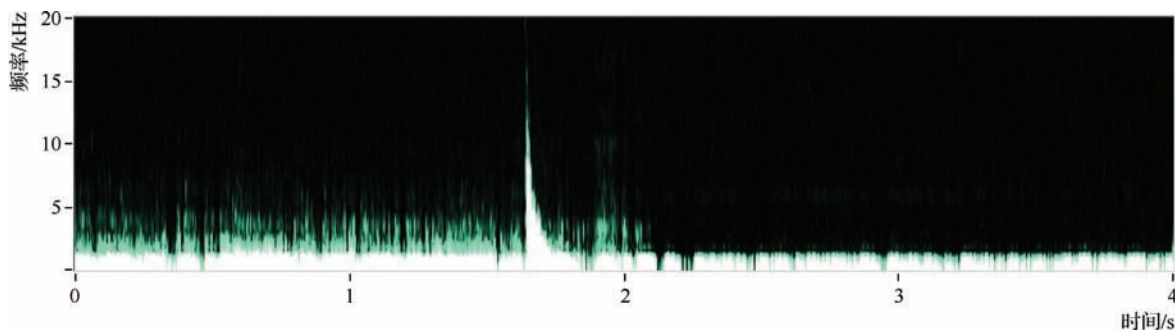


图4 MZI系统信号频谱图

图4显示了MZI系统响应信号的时域波形、局部放大波形及时频谱图。从图中可以看出,在断丝发生的瞬间信号中的高频分量有明显增加,最高频率分量超过15kHz。对信号进行带通滤波,并进行归一化后输入扬声器进行播放,可以清楚地听到角磨机砂轮切割预应力钢丝的声音以及预应力钢丝断裂瞬间产生的“砰”的一声。

### 3.2.2 定位

时空图横轴代表距离,纵轴代表时间,颜色代表能量,时空图反映了能量随时间和距离的分布。色块在y轴方向的尺寸反映了事件的持续时间,色块在x轴方向的尺寸反映了事件的波及范围。可以通过观察时空图上色块的位置、大小、形状、颜色,获知振动事件发生的位置、时间、持续时长、波及范围以及振动强弱等信息。因此,通过计算振动事件对应色块特征点的横坐标,可以获得振动事件的发生位置,从而完成事件的定位。

按照光纤布设时设定的标尺,通过对时空图(见图2)信息提取,能够得到白色横线(事件点)的左侧边沿实地位置,即可获得断丝点的定位结果。在试验用的50Msps采样率下,空间定位分辨率可以达到2~4m。

### 3.2.3 入侵监测拓展

管道工程普遍距离长、管线上部大多不是永久性占地,经常会发生未经审批私自在管道沿线挖掘取土、打桩、堆土筑路的事件,还可能有一些定向钻、顶管等施工,这些都有可能造成管道的灾难性结构损伤。这些工程活动在进行的过程中一般伴随有强烈的振动,

这些振动通过土壤的传导,可以被分布式光纤传感系统捕捉和辨识,会在时空图上暴露其踪迹,使系统能够对事件进行定位和辨识。不同类型的入侵事件,因振动信号的频率、波及范围、发生时间间隔等差异会表现为不同的振动特性,在时空图上均表现为一定的形态学特征。系统的分析算法通过对这些特征进行分析,实现事件类型的推测,在上述的入侵事件刚刚开始尚未触及管道之前,系统就可以感知到振动的存在,并对其进行辨识和定位,将事件类型和发生位置提供给运管单位,运管单位根据系统的定位结果,及时赶赴施工现场进行协调和维护。

## 4 结论

通过在PCCP上开展的断丝监测试验,验证了基于相位敏感光时域反射仪和马赫-曾德干涉仪的两种技术融合形成的新型分布式光纤振动/声传感系统的理论模型是有效的,可以对PCCP断丝事件进行精确定位,定位精度在2m以内。在模拟系统中,水的振动、周边车辆通行以及人员说话等低频杂音基本可以被系统过滤,能够清晰还原出断丝时刻的声音,试验系统通过人工复听判断,进一步增加了识别的准确率。

该项技术实现了PCCP断丝事件的在线监测和定位需求,能够对作用在试验管道上的外部侵入事件进行有效的监测反馈,对促进基于分布式光纤传感的PCCP断丝监测技术的进步和推动该项技术在长距离供水工程中的应用具有重要意义。◆

## 参考文献

- [1] 陈博智. 运行与环境荷载作用下 PCCP 的结构安全评价研究[D]. 大连:大连理工大学,2018.
- [2] 马平. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)的破坏模式及原因分析[J]. 智能城市,2020,6(23):137-138.
- [3] GE SH Q, SINHA S K. Evaluation of condition of prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) using numerical simulation [J]. Proceedings of the water environment federation, 2011 (12):3952-3970.
- [4] 熊欢. 南水北调超大口径 PCCP 预应力分析模型与试验研究[D]. 北京:清华大学,2010.
- [5] 骆建军,姚宣德,张东生,等. 大口径 PCCP 管道断丝频谱响应现场试验研究( I ) [J]. 土木工程学报,2016,49(9):110-116.
- [6] 王五平,Jack Elliott,宋人心,等. PCCP 爆管预警的光纤声监测系统[J]. 水利水电技术,2009,40(3):68-70,77.
- [7] 曾绍洪. 内压作用下 PCCP 变形光纤监测技术研究[D]. 南京:南京大学,2017.
- [8] LEE B. Review of the present status of optical fiber sensors [J]. Optical fiber technology. 2003,9(2):57-79.
- [9] BARRIAS A, CASAS J R, VILLALBA S. A Review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications [J]. Sensors, 2016.
- [10] HUI X N, ZHENG SH L, ZHOU J H, et al. Hilbert-huang transform time-frequency Analysis in  $\phi$ -OTDR distributed sensor [J]. IEEE photonics technology letters, 2014, 26(23):2403-2406.
- [11] 刘建霞.  $\phi$ -OTDR 分布式光纤传感监测技术的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8):199-204.
- [12] 覃欣,朱宁西,刘刚,等. 马赫-曾德干涉检测地下电缆周界振动的分析与实验[J]. 电力工程技术,2019,38(2):105-110.
- [13] 谭靖,陈伟民,吴俊,等. 基于萨格奈克/双马赫-曾德干涉原理的长途管道破坏预警技术研究[J]. 光子学报,2008(1):67-72.

## 大藤峡水利枢纽工程通过二期蓄水(61 米高程)阶段验收

2022 年 9 月 28 日,大藤峡水利枢纽工程通过由水利部主持的二期蓄水(61 米高程)阶段验收。水利部副部长、阶段验收委员会主任委员刘伟平指出,本次验收是工程建设具有里程碑意义的一个重要节点,标志着珠江流域控制性工程——大藤峡水利枢纽即将全面发挥综合效益。

9 月 27—28 日,水利部组成阶段验收委员会,各位委员实地察看工程现场,观看工程建设声像资料,听取工程建设管理工作报告、安全鉴定报告、阶段验收技术检查意见,讨论并形成了《大藤峡水利枢纽工程二期蓄水(61 米高程)阶段验收鉴定书》。

刘伟平指出,在各方共同努力下,工程建设战胜特大洪水、世界最高人字闸门制安调试、国内最大轴流转桨式水轮发电机组制造安装等诸多难关,先后顺利实现大江截流、一期下闸蓄水、船闸试通航、首台机组发电、建筑物全线挡水等重大节点目标。工程一期蓄水后,大藤峡工程作为流域控制性工程的作用已经显现,初步发挥了防洪、水资源配置、航运、发电等效益,特别是在应对 2021 年珠江流域严重旱情和防御 2022 年西江多次编号洪水过程中发挥了重要作用。工程二期蓄水后进入正常蓄水位运用,将全面发挥经济效益、社会效益、生态效益等综合效益,进一步提升珠江流域防洪保安能力、珠江流域水资源优化配置和供水保障能力、西江干流航运能力、区域能源安全保障能力、珠江流域生态安全保障能力。

刘伟平强调,大藤峡工程建设,为扩大有效投资、稳住经济大盘做出了贡献,推动了机电、装备、材料等多个相关行业、领域的技术进步,培养了一大批工程建设、运行的优秀技术人才和管理人才。下一步,大藤峡工程参建各方要坚决贯彻党中央“疫情要防住、经济要稳住、发展要安全”重大决策部署,认真落实李国英部长“七个两手抓”的工作要求,统筹发展和安全,牢牢守住安全底线;加强建设管理,如期全面完成建设任务;强化运行管理,确保全面发挥工程综合效益;推动高质量发展,打造一流水利工程。

大藤峡水利枢纽工程是国务院确定的 172 项节水供水重大水利工程的标志性工程,已于 2020 年 9 月一期下闸蓄水至 52 米高程,二期蓄水将根据水库来水情况,在统筹航运、发电、生态等需水要求下,分两阶段逐步抬高蓄水位至 61 米高程。

(来源:水利部网站,网址:[http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202209/t20220928\\_1599074.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202209/t20220928_1599074.html),日期:2022 年 9 月 28 日)





# 水下测量系统在预制构件安装定位中的研发与应用

徐立军

(辽宁省水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110006)

**【摘要】** 在深水区域进行大型预制构件安装时,往往面临深水、水下能见度低、安装精度难控制等难题。为此,文章结合南京某深水航道整治工程案例,研发并应用了一套水下测量定位系统,主要包括基于倾斜仪与GPS的测量系统和基于水下图像的测量系统。通过设计专用测量架,应用测量系统对构件的定位数据以及构件接缝宽等进行测量分析,据此进行高效的粗调和精调。实践表明,利用该水下测量定位系统测得的构件高程和平面误差满足相应的限值要求,有效保证了大型预制构件的水下安装精度。

**【关键词】** 测量系统;预制构件安装;GPS;倾斜仪;水下图像

中图分类号: TU753.8

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)10-080-05

## Development and application of underwater measurement system in prefabricated component installation and positing

XU Lijun

(Liaoning Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

**Abstract:** When installing large prefabricated components in deep water area, it is often faced with difficulties such as deep water, low visibility and uncontrollable installation precision. Therefore, combined with the case of a deep water channel regulation project in Nanjing, this paper develops and applies a set of underwater measurement and positioning system, mainly including the measurement system based on clinometer and GPS as well as the measurement system based on underwater image. Through the design of a special measurement frame and the application of the measurement system in measuring and analyzing the positioning data of the components and the width of the cracks between components, the rough and fine adjustment can be carried out efficiently. The practice shows that the height and plane errors of the components measured by the underwater measurement and positioning system meet the corresponding limit requirements which effectively ensures the underwater installation precision of large prefabricated components.

**Keywords:** measurement system; prefabricated component installation; GPS; clinometer; underwater image

在工程测量领域,水下测量为一重要分支,其主要用于江河湖海等水域环境条件下的地形地貌测量,包

括测定平面位置与高程等,并最终获得水下地形图、等深线图,用于水下工程建设或相关活动的开展<sup>[14]</sup>。

收稿日期: 2021-09-14

作者简介: 徐立军(1983—),男,高级工程师,主要从事水利工程测量工作。

在水下测量的技术手段方面,相关学者已有较多的研究成果,例如:杨少愚等<sup>[5]</sup>、宁新龙<sup>[6]</sup>关注无人船在水下测量中的工艺原理、技术特点以及流程优化等方面;陈齐<sup>[7]</sup>则在通过无人机航测获得密集点云数据的基础上,提出了高精度 DEM 的构建方法;陈远明等<sup>[8]</sup>开发了一套水下摄影测量系统,并将其应用于拖曳试验,验证了其可靠的测量精度。本文在前人研究的基础上,以某深水航道整治工程为依托,通过研发一种专用测量架,并在其上设置基于 GPS 和倾斜仪的测量系统以及基于水下图像的测量系统,通过两种测量系统的先后应用,依次进行粗调整和精调整,从而有效地实现了深水区域的大型预制梯形空心构件的高精度安装。

## 1 工程概况

南京某深水航道整治工程需要在近 13m 水深位处安装大型预制构件,但施工中面临着一系列的安装难题,比如水下能见度低、安装精度要求高、安装区域水深等,亟须采取针对性的水下定位技术保证预制构件安装的精度和效率。工程主要包括头部潜堤、右缘丁坝、南北侧丁坝、左汊护底带以及护岸等,其中头部潜堤与部分丁坝的结构型式设计为混合堤,即由预制梯形构件与抛石基床共同组成。梯形构件为空心形式,单件质量为 180t,具体尺寸为:顶、底宽度分别为 2.0m、6.0m,高 6m,壁厚 60cm,长度为 4.94m。其在整平基床之后进行安装,构件间安装间隙为 60cm。本工程共需要安装梯形构件 369 个,安装断面见图 1。

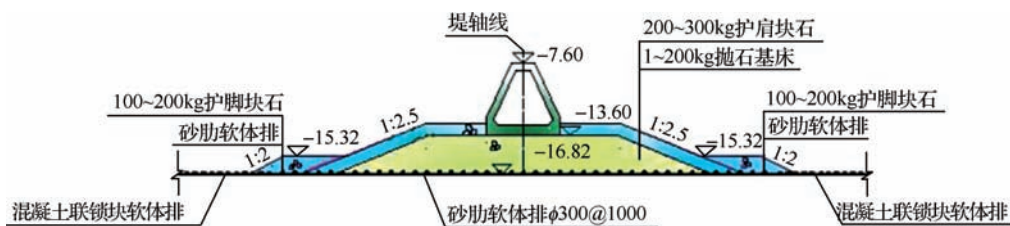


图1 航道中预制构件安装断面

本工程中的预制构件安装须考虑基床纵向 0.9% 的坡降,安装时水流速度 2m/s 以上,采用传统起重船吊装时,安装位置最大深度近 17m,精度控制难度非常大。因此,传统的测量定位方法无法满足要求,需要新的水下测量装置,以保证构件安装满足  $\pm 3\text{cm}$  的允许偏差。

## 2 新型测量架的设计

考虑本工程的实际安装难度,专门设计了用于安装定位仪器的测量架。该测量架主要包括两边的测量杆以及基础底座,其布置在吊架的 2 组吊钩之间并通过 4 条铁链相连,从而使预制构件与测量架之间的相对位置不受外界因素影响,测量架构造见图 2。

梯形构件顶部预留有直径 2cm 的孔洞,用于通过 2 根直径 18cm 的钢插销,以与测量架基础底座连接固定。测量架底座上布置一台水下双轴倾斜仪。伸出水

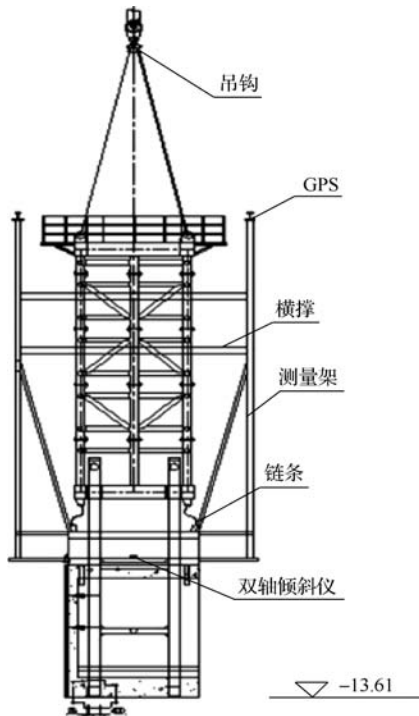


图2 专用测量架构造



面的2根测量杆顶部各布置一台GPS天线。测量杆直径20cm,采用镀锌钢管制作而成,避免水流冲撞引起晃动。测量杆之间连接有2道横撑,使之形成整体。同时,在水深处测量时,测量杆设置为2节,而在水浅处测量时,则可单独使用1节。测量杆节间使用法兰连接固定。位于下游侧的测量架设置有两台水下摄像机(带有清水箱)。方位数据采集系统包括GPS定位系统和倾斜仪,与浮吊上的主控电脑相连,可实时显示待安装构件的实际位置偏差情况,并对水下摄像机获取的图像进行计算分析,获得相关数据,如待安装构件与前面已安装完构件之间的错牙、缝宽等,并校核定位测量系统。

### 3 基于倾斜仪与GPS的测量系统

#### 3.1 技术原理

基于倾斜仪与GPS的测量系统通过专用软件收集倾斜仪与GPS的数据,并将构件的平面位置、高程及其与相邻构件间的缝宽、错牙、轴线偏差等实时显示于控制界面上,指导操作人员正确调整构件姿态,保证水下安装的误差不超过允许值。通过直观把握待安装构件的水下状态,从而实现水流快、深水、能见度低等不利工况下的高精度安装。

#### 3.2 系统组成

数据通信设备、软件以及数据采集设备构成了该系统。其中,数据通信设备主要包括串口服务器及两台无线AP,用于接收数据并传输给电脑,可将数据在多个设备间传递。系统软件包括显示模块、项目管理模块以及通信模块,可对构件位置、倾角以及方位角等参数进行监控。显示模块的功能主要为构件测量数据的显示、存储与处理;项目管理模块的功能是管理项目的各种参数等;串口通信模块承担数据通信功能。数据采集设备包括两台RTK GPS以及一台倾斜仪,分别用于构件位置定位以及倾斜姿态测量。

#### 3.3 运行配置

##### 3.3.1 模块配置

将各设备按要求连接起来组建硬件系统,见图3。

由串口服务器对设备采集的数据进行接收,再通过无线AP发送。利用一根网线将无线AP与主控电脑连接,以接收数据。主控电脑在接收相关数据的同时,也应激活电脑端口,使服务器的4个接口映射至电脑。GPS的坐标原点与高程面分别为预制构件的中心与构件上表面,在软件中输入计算好的坐标,从而测量出预制构件与GPS安装位置的相对关系。同时,输入对应的转换系数,将WGS84坐标系下的GPS接收数据转换到目前工程的坐标系中,以保证数据统一。

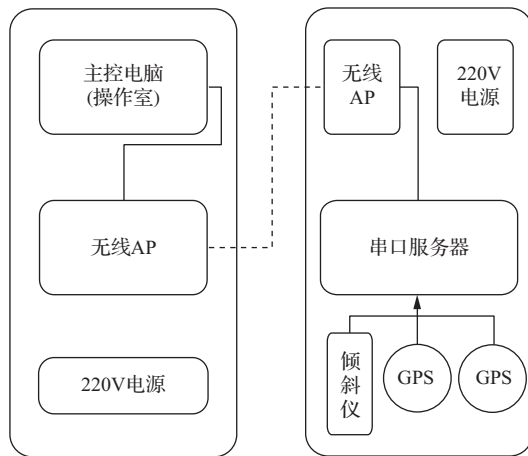


图3 测控设备的模块配置

##### 3.3.2 施工图导入

在CAD软件中画出预制构件的安装位置图、构件外框图以及地理背景图等,再将各图纸加载到控制软件中。

##### 3.3.3 构件尺寸与施工区域设置

在导入施工图之后,同时输入该区域的里程起点与位置、轴线端点高程及坐标等参数。其中,里程起点与位置分别为构件安装区域的起算点里程及坐标,轴线端点为同一坡度的堤轴线两端。

此外,为正确定位构件位置,还需要输入构件的上下表面尺寸,以获得四角的特征点坐标值、夹具在构件上的位置以及构件安装方向等。考虑实际中的制作误差或放置误差,应具体测量出夹具到构件边缘的实际边距,以保证符合实际情况。

## 4 基于水下图像的测量系统

为对预制构件的安装情况进行更精确的调整,将



两套水下摄像装置安装在吊具钩腿上,采集水下安装处的相关图像,再经电脑端进行图像分析,确定构件位置信息。水下摄像机设计有清水装置,以避免深水处混浊水体的影响。

4.1 构件安装调整流程

基于水下图像测量系统的预制构件安装调整流程见图4。

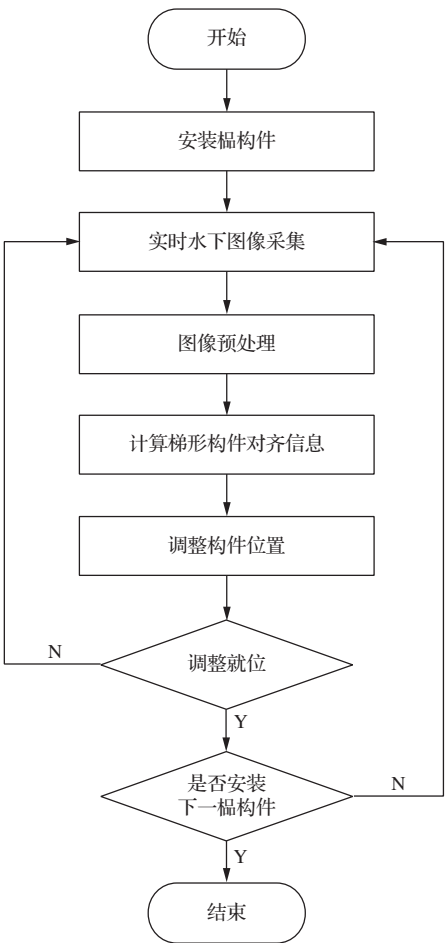


图4 构件安装调整流程

4.2 水下图像测量的关键技术

4.2.1 采集图像

为获得高质量的水下安装图像,采用分辨率为720×576的摄像机,可每次在视频中自动获得一帧图像用于分析处理。在整体构件安装方案中,水下图像获取是关键的一环,需在施工现场复杂的深水环境中保证所采集图像的清晰度。在实际操作中,为避免水下泥沙、弱光照环境的不利影响,在摄像机前额外配备了清水箱。

了清水箱。

4.2.2 图像预处理

图像预处理的基本流程见图5。

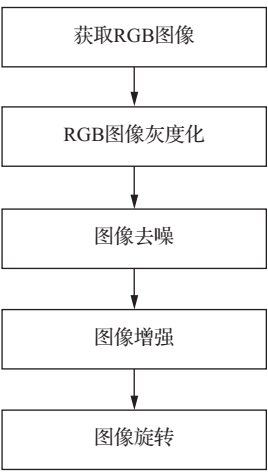


图5 图像预处理的基本流程

a. 图像去噪。中值滤波是一种信号处理技术,主要针对的是非线性平滑滤波,其能有效控制噪声,通过用邻域各点的像素中值取代某特定点的像素值,使孤立的噪声点得到消除。构件安装时处于深水环境,图像采集后往往具有模糊的边缘,相关的噪点比较多,影响分析精度。因此,本工程拟将基于排序统计理论的中值滤波法用于图像处理,使图像的边缘平滑。

b. 图像增强。深水环境不仅增多了图像中的噪点,且会使图像的对比度降低,影响图像中特征点的有效提取,使测量精度变低。因此,需对去噪之后的图像进行进一步的增强处理,以改进图片质量。本次采用直方图变换的形式,达到较好地区分背景与测量目标的目的。将图像的概率密度函数应用于变换函数,使期望形式的直方图得以呈现,然后再变换图像,从而使某图像或图像值区间的反差变大。综上所述,为使图像特征更为突出,便于提取,可通过直方图变换的方法,放大或缩小水下图像的某一灰度范围。

c. 图像二值化。对于某图像,设其像素仅有黑白两色,且没有中间灰度,即只有最大或最小灰度值(在某特定精度下),则此类特殊的灰度图像即为二值图像。图像二值化是指将原本的灰度图像通过处理,转



变为二值图像的过程,即对灰度图像(28个亮度等级)进行阈值的合适选取,以获得二值化图像,且能将整体或局部的特征进行反映。

## 5 测量精度分析

两台天宝 GPS 与一台水下双轴倾斜仪构成了本次设计应用的预制构件水下测量装置。GPS 高程误差限值为  $\pm 30\text{mm}$ ,平面误差限值为  $\pm 20\text{mm}$ 。倾斜仪的

误差限值为  $\pm 0.01^\circ$ 。考虑预制构件与测量架的相对位置关系,结合上述误差限值,经计算,本次测量系统的高程与平面误差均不超过  $\pm 30\text{mm}$  的限值。

为评定测量系统的精度,另通过传统的全站仪对构件安装定位进行测量,获得测量数据,并将两者的测量精度进行对比,见表1。由表1可以看出,该水下测量系统的高程与平面位置等数据相较于全站仪数据,其误差均不超过  $30\text{mm}$  的限值。

表1 预制构件水下测量系统与全站仪的数据对比

点 位	方 法	平面坐标/m		高程/mm	dx/mm	dy/mm	dz/mm
		x	y				
1	全站仪	3567739.240	432277.727	9.983	25	6	-3
	测量系统	3567739.265	432277.733	9.980			
2	全站仪	3567741.203	432277.840	9.941	18	11	24
	测量系统	3567741.221	432277.851	9.965			
3	全站仪	3567740.950	432282.757	9.929	3	-18	9
	测量系统	3567740.953	432282.739	9.938			
4	全站仪	3567738.580	432282.539	9.939	-11	-20	-12
	测量系统	3567738.569	432282.519	9.951			

本工程先通过倾斜仪与 GPS 对预制构件的安装定位情况进行粗调整,此后再采用计算机水下图像测量的方式获得待安装构件与前面已安装构件之间的缝宽,并据此数据对待安装构件进行进一步的精调,从而提高了构件在水下测量定位的精度。

## 6 结 语

a. 水下测量技术在本工程近  $13\text{m}$  水深区域的梯形预制构件安装中得到了成功应用,有效保证了构件安装精度,使航道整治工程面临的水下光线弱、深水、水流急、精度要求高等难题迎刃而解。

b. 在 GPS 和倾斜仪粗定位的基础上,水下图像测量技术的可视化应用实现了构件的精调整,施工中可对构件位置进行软件界面的实时显示,据此调整方位参数指导船舶科学移位,保证构件的高精度安装。

c. 在水下图像可视化技术方面,未来在类似工程工况下,可进一步优化检测技术,如在测量系统中增加声呐定位技术等。通过多种工艺手段的有机联合,可有效应对深水区域构件的安装难题,并促进类似深水

航道整治工程施工技术进步。◆

## 参考文献

- [1] 孙进,汪和平,丁煜.水下三维测量与模型构建系统的设计[J].徐州工程学院学报(自然科学版),2020,35(2):67-71.
- [2] 叶昆平.水下地形测量精度评定的方法研究[J].地理空间信息,2020,18(8):73-75,93.
- [3] 袁建飞.多种智能测量设备在水库水下地形测量中的联合应用[J].测绘与空间地理信息,2020,43(7):188-190,194.
- [4] 魏荣灏,陈佳兵,徐达.基于 PPK 无验潮的水下地形测量技术研究[J].海洋技术学报,2021,40(1):57-62.
- [5] 杨少愚,孙睿英,任思思.无人船在水下地形测量应用中的可靠性分析及工艺流程优化[J].测绘与空间地理信息,2021,44(S1):233-236.
- [6] 宁新龙.浅析无人测量船在水下地形测量中的应用前景[J].水利建设与管理,2021,41(3):47-50.
- [7] 陈齐.基于无人机航测及水下地形测量的水利工程高精度 DEM 构建研究[J].测绘与空间地理信息,2020,43(1):205-208.
- [8] 陈远明,叶家玮,吴家鸣.水下摄影测量系统的研发与试验验证[J].华南理工大学学报(自然科学版),2017,45(4):132-137.