银江水电站导流明渠截流戗堤龙口段的施工与过程控制

黄 俊， 马中将， 高二强
（中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司，贵州 贵阳 550081）

摘 要：银江水电站导流明渠采用右岸进占、单戗立堵的截流方式进行截流，其戗堤轴线长约 113.5 m，戗堤底部高程为 970.00 m，戗堤顶部高程为 987.00 m，戗堤最大高度为 17 m。在导流明渠截流过程中由左岸 5 个泄洪孔进行分流，其中坝前拦沙坎高程为 982.00 m。根据拦沙坎堰前的水位实测资料：当上游来水量小于 1 000 m^3/s 时，上游拦沙坎堰前的水位高程均低于高程 982.00 m。经水力学计算得知：当上游来水量为 1 000 m^3/s、戗堤龙口宽度为 35 m 时，戗堤龙口上下游水位的落差约为 2.13 m，戗堤龙口的平均流速约为 5.50 m/s。随着戗堤龙口的不断缩窄，其龙口上下游的水位落差、水流流速及戗堤龙口的进占难度相应逐渐增大。根据导流明渠截流施工具有的特点，通过对截流方案、截流材料备料、截流过程控制以及截流后的后续工作进行分析总结，旨在为同类型水电工程的截流施工提供有益的参考与借鉴。

关键词：银江水电站；截流戗堤；龙口；施工过程控制
中图分类号：TV7；TV51；TV52 **文献标志码**： B **文章编号**：1001-2184(2025)01-0066-04
DOI：10.20196/j.cnki.scslfd.20250116

Construction and Process Control of the Cofferdam Closure Crest at the Diversion Open Channel of Yinjiang Hydropower Project

HUANG Jun, MA Zhongjiang, GAO Erqiang
(PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang Guizhou 550081)

Abstract: The diversion open channel closure of Yinjiang Hydropower Project was carried out by the right-bank advancing single-cofferdam vertical closure method. The axis length of the cofferdam is approximately 113.5 m, the elevation of the bottom opening of the cofferdam is 970.0 m, the elevation of the top of the cofferdam is 987.0 m, and the maximum height of the cofferdam is 17 m. During the diversion open channel closure process, the flow was diverted through 5 flood discharge holes on the left bank, and the elevation of the sand retaining weir in front of the dam is 982.0 m. According to the measured water level data in front of the sand retaining weir, when the upstream inflow is less than 1000 m^3/s, the water level elevation in front of the upstream sand retaining weir is lower than EL. 982.00 m. Through hydraulic calculations, when the upstream inflow is 1000 m^3/s and the width of the cofferdam closure crest is 35 m, the water level difference between the upstream and downstream of the cofferdam closure crest is approximately 2.13 m, and the average flow velocity at the cofferdam closure crest is approximately 5.50 m/s. As the cofferdam closure crest continuously narrows, the water level difference between the upstream and downstream, the flow velocity, and the difficulty of advancing the cofferdam closure crest will gradually increase accordingly. Based on the above construction characteristics of the diversion open channel closure, through the analysis and summary of the closure plan, the preparation of closure materials, the process control during the closure, and the follow-up work after the closure, it provides useful references and examples for the closure construction of similar hydropower project projects.

Key words: Yinjiang Hydropower Project; Cofferdam closure crest; Closure crest; Construction process control

1 概 述

银江水电站坝址位于四川省攀枝花市主城区的金沙江中游河段，上距攀枝花水文站 10.0 km，下距雅砻江河口 3.6 km；其上游衔接金沙水电站，两梯级相距约 21.39 km。银江水电站枢纽主要由挡水、泄洪、生态泄水、电站厂房等水工建筑物组成。其中右岸布置有导流明渠、纵向围堰坝

收稿日期：2024-12-05

段、2 孔泄洪闸门;左岸主河床布置有河床式电站厂房及 5 孔泄洪闸门,电站总装机容量为 390 MW(6×65 MW),其转轮直径达 7.95 m,为世界第一。银江水电站采用分期导流方式进行施工,其中三期导流是在导流明渠内设置截流戗堤截断水流、利用已施工完成的厂房坝段及河床溢流坝段(6～9 号坝段)过流。三期导流截流戗堤独立布置于三期上游围堰上游侧,距三期上游围堰轴线约 130 m。导流明渠截流具有分流条件受限、龙口落差大、流速高、明渠底板光滑、截流水深大及截流窗口时间短等突出特点,导致其截流难度大;同时,因上游来水流量变化较大,截流完成后需要迅速加高截流戗堤至高程 990.00 m 以保证戗堤的安全稳定。因此,导流明渠截流顺利完成即成为三期基坑施工的关键。鉴于导流明渠截流戗堤施工的特殊性,笔者对截流戗堤施工进行了深入分析和思考。

2　截流戗堤的结构与龙口段水力参数

2.1　导流明渠截流戗堤的结构

截流戗堤的轴线长 113.5 m,戗堤顶部的宽度为 25 m,上游边坡坡比为 1∶1.3,下游边坡坡比为 1∶1.5,戗堤进占端头的边坡坡比为 1∶1,其中戗堤的最大高度约为 17 m[1]。流戗堤典型断面见图 1。导流明渠截流的龙口段戗堤在截流过程中具有堰前与堰后水位落差较大、水流流速大、施工强度高等施工特点。截流进占施工从 2024 年 10 月底正式开始,戗堤由右岸向左岸进占,11 月 18 日 9:00 戗堤进口剩余约 23.3 m,剩余高流速区域采用合金网兜、四面体、块石串、钢筋石笼等特殊材料坐底(单个最大重量约 23 t)形成挡水结构,高强度抛投进行截流,累计填入截流材料近 30 000 m³,11 月 18 日 19:08 顺利完成导流明渠截流。

2.2　截流戗堤龙口段的水力参数

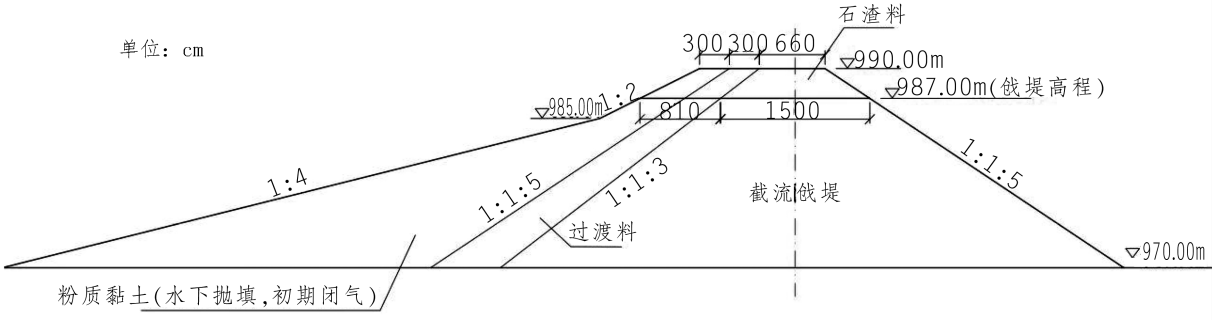

图 1　三期上游围堰截流戗堤典型断面图

(1)计算参数:笔者根据截流施工的强度和施工难度,并考虑到上游电站在截流期间短时段内对下泄流量的调控能力,对于龙口(40～53 m)区间按照 $Q=1\ 932\ m^3/s$ 进行水力计算,龙口 0～40 m 区间按照 $Q=1\ 000\ m^3/s$ 进行水力计算。

(2)抛投料的稳定计算。考虑到影响龙口抛石料稳定的因素较多,笔者在初算时采用伊兹巴什公式进行计算:

$$v=K\sqrt{2g\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}d} \tag{1}$$

式中:v 为流速;K 为稳定系数(取 0.70);γ_s 为块石容重(取 2.4);γ 为水容重(取 1.00);d 为抛投体的粒径,折算成圆球体的直径,m。

(3)水力参数的计算成果。截流戗堤进占水力学计算模型见图 2。导流明渠截流水力参数成果见表 1。

由表 1 可知:龙口 40～53 m 按照 1 932 m^3/s 流量进占时,其最大流速达到 6.20 m/s,抛投粒径不小于 1.73 m 的块石及辅助特殊材料;龙口 0～40 m 按照 1 000 m^3/s 流量进占时,其最大流速达到 5.79 m/s,抛投粒径不小于 1.46 m 的块石及辅助特殊材料。

3　导流明渠截流戗堤的施工

截流戗堤施工分为施工准备、戗堤预进占、戗堤龙口段进占、戗堤加高培厚 4 个施工阶段[2]。

3.1　施工准备阶段的施工

(1)至截流戗堤的进场道路主要考虑的是截流材料高强度运输的通行要求、最大坡度、回转半径等。其中进场道路填筑的宽度必须按照同时满足3车道大型车辆运输顺利通行的条件,即路面

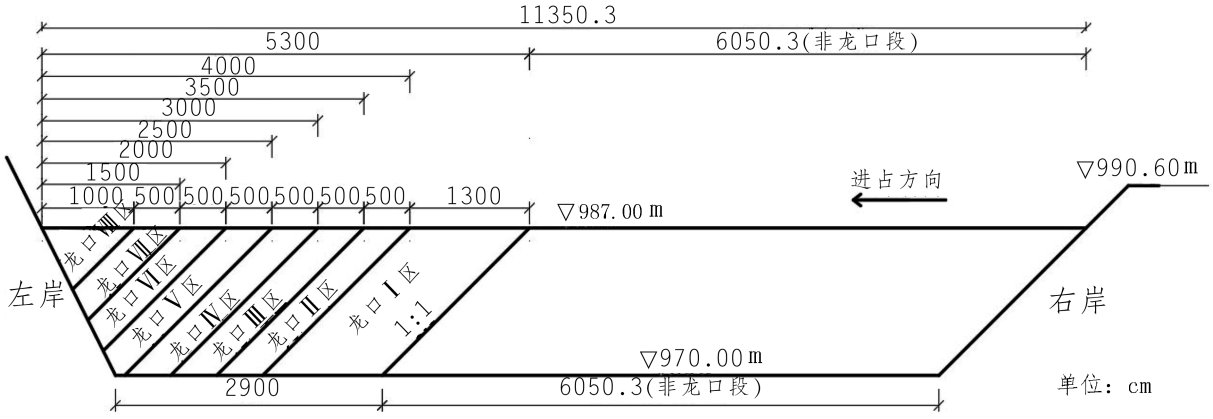

图 2　截流戗堤进占水力学计算模型示意图

表 1　导流明渠截流水力参数成果表

流量 /($m^3 \cdot s^{-1}$)	龙口顶宽 /m	龙口底宽 /m	龙口底高程 /m	龙口水深 /m	上游水位高程 /m	龙口平均流速 /($m \cdot s^{-1}$)	龙口落差 /m	抛投粒径 /m	龙口流量 /($m^3 \cdot s^{-1}$)	备注
1 932	53	29	970.00	13.03	983.03	6.03	2.57	1.64	972.55	在非控流阶段择时进占
	50	26	970.00	13.06	983.06	6.07	2.60	1.66	916.49	
	45	21	970.00	13.12	983.12	6.14	2.66	1.69	822.58	
	40	16	970.00	13.18	983.18	6.20	2.72	1.73	728.15	
1 000	35	11	970.00	12.60	982.60	5.50	2.13	1.36	615.76	控流阶段连续进占截流
	30	6	970.00	12.82	982.82	5.61	2.22	1.41	523.75	
	25	1	970.00	13.35	983.35	5.69	2.29	1.46	430.72	
	20	0	972.67	13.87	983.87	5.79	2.37	1.50	337.18	
	15	0	976.00	14.80	984.80	4.57	2.48	0.94	171.21	
	10	0	979.33	15.33	985.33	3.73	2.56	0.63	62.13	
	5	0	982.67	15.58	985.58	2.64	2.59	0.31	10.98	
	0	/	/	15.63	985.63	0.00	0.00	/	0.00	

填筑宽度按不小于 12 m 控制，并选择适当位置增设会车道；进场道路的最大纵坡按不大于 8% 控制；其最小回转半径不应小于 30 m。

(2)截流备料按截流戗堤的断面尺寸进行计算，其中戗堤预进占的抛投料主要采用石渣料和石渣混合料。戗堤预进占备料时计入 20% 的抛投料流失量；龙口段的抛投料主要采用块石串、大石(粒径＞0.8 m)、钢筋石笼(2.0 m×1.0 m×1.0 m)、合金网兜(5.0 m×5.0 m，孔径 33 cm)、混凝土四面体(边长为 3.0 m 或 4.0 m)。以上龙口段特殊材料抛投料的备料总量按龙口段戗堤断面尺寸的 40%计算，中石与石渣料和石渣混合料的备料总量按 60%计算。

(3)经核算，戗堤龙口段的形体总体积约为 1.2 万 m^3(龙口按长 40 m、堤顶宽 20 m 计)，则其特殊材料抛投料的备料总量约为 5 000 m^3，其中备料以边长 3.0 m 的混凝土四面体为主，备料总量约为 2 500 m^3；块石串、大石、钢筋石笼、合金网兜合计备料 2 500 m^3；中石、石渣料和石渣混合料合计备料总量约为 7 000 m^3。

(4)截流材料备料配备了 Φ28 钢丝绳及与其配套的卡扣连接件，用于龙口高流速区大块径抛投料的串接，以防止大块径抛投料流失。

(5)戗堤龙口段机械设备，配置大型推土机 1 台、大型装载机 2 台、大型反铲 1 台，振动碾 1 台。

3.2　戗堤预进占施工

戗堤预进占主要采用石渣料和石渣混合料抛填，其中堤头与堰体急流处根据现场实际情况采用大块石、块石串、钢筋石笼、合金网兜等抛投料进行保护[3]。在戗堤进占过程中，不得将抛投料直接倒入急流中，应采用推土机将抛投料推至堤头水中，并注意防止堤头坍塌。

3.3　戗堤龙口段的进占施工

(1)戗顶的高程(987.00 m)及宽度：结合现场的实际情况按 3 台载重汽车同时投料、两台推土机与一台反铲同时作业确定合理的截流戗堤控

制段的顶宽(20 m)和高程,其中龙口进占处的高程按距水面 1.0～1.5 m 控制为宜。

(2)龙口段的抛投方式按上、中、下(水流向)三个区段进行抛投,其中上游区宜采用边长为 3 m 的混凝土四面体串抛投进占为主;必要时采用边长为 4 m 的混凝土四面体抛填,采用块石料填充;当抛填物出露水面后则采用钢筋石笼、块石料、混合料填至龙口高程;中间区紧跟上游区平推进占,主要采用钢筋石笼串、六面体串、块石串、块石料、混合料填至龙口高程;下游区主要采用块石料、石渣混合料紧跟上游区、中间区平推进占,并采用合金网兜或块石串护脚[4]。

(3)在龙口上游段混凝土四面体抛投作业过程中,首先应采用边长为 3 m 的混凝土四面体串(3 个混凝土四面体采用 Φ28 钢丝绳及与之配套的卡扣件连接成串),用于边长为 3 m 的混凝土四面体串之间的串连钢丝绳长度可按 15 m 左右进行控制,采用推土机将其逐个推入急流中。当第 1 个混凝土四面体串连的钢丝绳受力后,再推入第 2 个串连的混凝土四面体,则第 2 个混凝土四面体即做为第 1 个混凝土四面体的锚固端,以此类推,使混凝土四面体串坐底并形成戗堤支撑结构[5]。

(4)当边长为 3 m 的混凝土四面体串难以形成戗堤支撑结构时,采用边长为 4 m 的混凝土四面体经钢丝绳(Φ28)锚拉后推入龙口急流处,用于锚拉钢丝绳的长度应按龙口的实际水深进行控制。

3.4　戗堤的加高培厚施工

(1)龙口段一旦合龙成功,立即进行戗堤的加高培厚施工,以防止戗堤堰前水位上升造成溃堰。

(2)戗堤的加高培厚首先采用中石、石渣料和石渣混合料将戗堤加高至戗堤的设计高程,然后再从戗堤堰体上游侧的迎水面采用过渡料或石渣料进行抛填加厚,其主要作用为充填大块径抛投料的空隙。

(3)当截流戗堤的渗流水量明显减小且渗水变清后,采用粉质黏土料进行抛填闭气、直至将截流戗堤的渗流水量控制在允许范围内,截流戗堤闭气完成后,按戗堤的设计断面进行削坡或补填修整。

4　经验与教训

鉴于银江水电站导流明渠的截流水位落差大,截流难度大,在前期截流戗堤预进占过程中存在指挥不畅、特殊材料抛投方式不合适而导致其流失大、截流戗堤裹头及堤角保护不到位等问题,经参建各方不断总结和分析,最终统一了思路,明确了指挥体系,采取有效措施做好了备料、特殊材料进占及裹头和堤角的保护,确保了截流成功。所取得的经验为:

(1)设立有效的统一指挥体系是保证截流各项措施有效落地的前提。鉴于该导流明渠截流戗堤龙口段的施工难度大,龙口合龙段的施工如何有序推进、在发现进占问题后如何进行修正需要统一的指挥体系有效运行,方可为截流各项措施的有效落地创造条件。

(2)确保特殊材料能够"站住"是保证龙口能否合龙成功的关键。随着龙口的不断束窄,龙口部位的水流流速不断增加,因此,如何保证龙口部位的特殊材料能够沉入龙口底部并不被水流冲走,银江水电站采用 3 m 及 4 m 边长的四面体通过 Φ28 钢丝绳及与之配套的卡扣件连接成串,钢丝绳的长度约为 15 m,采用挖掘机将大型四面体逐个缓慢推入龙口的方式确保了四面体不被冲走,进而实现了龙口逐步合龙。

(3)做好裹头保护及堤角护脚能够保证截流戗堤进占过程中的稳定。由于银江水电站上游金沙江中游河段水电站均已投产发电,银江水电站的来流量主要受其上游电站的发电控制。为了确保截流戗堤龙口段的有序推进,银江水电站截流戗堤的龙口段分三次完成,根据上游水电站的来流量选择流量小的时段进行龙口预进占,每次预进占完成后采用四面体、钢筋石笼、合金网兜及块石串对龙口段进行裹头和堤角保护以确保截流戗堤龙口段的稳定。

5　结　语

根据已有工程经验,在戗堤龙口段进占过程中因截流备料不充分直接造成截流失败的情况时有发生,同时亦存在另一种倾向:过度备料,特别是特殊材料的备料总量远大于龙口段进占的实际需求量而造成较大的经济损失。因此,截流是否成功的关键环节是截流的备料及抛投方式。通过

(下转第 74 页)

双液浆，最后灌注水泥浆。注浆初期，由于裂隙入浆量较大，首先应打开水泥浆泵机，采用水泥浆封堵岩体中的部分裂隙，当进浆量和注浆压力达到一定效果时再打开水玻璃泵机进行水泥-水玻璃混合液的灌注；最后，关闭水玻璃泵机，仅进行水泥浆单液灌注。注浆工序可分孔序、排序进行，其中孔序分为两序孔，先施工一序孔，再施工二序孔；对于注浆孔的排序亦分为两排序，即先施工一序排，再施工二序排[5]。分序注浆采取两孔并联的方式以保证灌浆质量，减少串孔渗漏，使先注孔扩散充分，后注孔起到填充密实的作用以增强注浆的整体效果。

(7)注浆结束。根据《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》DL/T 5148－2021 的要求：当灌浆段在最大设计压力下其注入率降低至不大于 1.0 L/min 后持压 5 min。注浆采取注浆终压和持压时间双控措施，注浆终压以 2.0 MPa 为准，持压 5 min 后停止注浆。

3.4　灌浆工程记录

灌浆工程记录采用 HR－I 灌浆自动记录仪现场记录，必须确保数据真实、准确、及时、齐全，对记录资料应及时整理后编制成所需要的图表和其他成果资料并符合归档要求。

3.5　排水孔施工

排水孔的施工滞后灌浆施工一个开挖循坏，待喷射混凝土及灌浆强度满足设计要求后进行钻孔。钻孔同样采用 YT－28 手风钻进行，孔深 4.5 m，间排距为 3 m×3 m，以起到泄压作用。工程后期可根据水压及设计要求对排水孔进行封堵或引排处理。

4　结　语

引水隧洞灌浆堵水技术是隧洞工程建设中的一项重要技术，其效果取决于灌浆材料的性质、灌浆工艺和方法、围岩特性等多个因素。在实际工程中，必须根据隧洞的具体条件和要求综合考虑，选择合适的灌浆材料和工艺并加强质量检测和控制以确保隧洞灌浆堵水的效果。绰斯甲水电站引水隧洞 2 号施工支洞控制段主洞下游双液注浆堵水技术在提高隧洞工程围岩稳定性和防渗性能方面表现出良好的效果：经检查，围岩钻孔取芯中的裂隙被水泥浆填充饱满，同时，检查孔的突涌水量亦小于 0.2 L/m·min，所取得的经验可为类似引水隧洞工程施工时参考。

参考文献：

[1]　田志斌. 深埋长隧洞突发涌水时分流多级排水系统设计研究[J]. 水利建设与管理，2019，39(10)：16-20.
[2]　张奇智. 输水隧洞Ⅳ级围岩涌水段注浆堵水治理方案研究[J]. 水利科学与寒区工程，2021，38(1)：147-149.
[3]　冀国栋. 高压富水硬岩地层双护盾 TBM 前置式超前注浆堵水技术研究[J]. 施工技术，2024，53(1)：87-92.
[4]　符文健. 岩溶发育地区隧道马丽散注浆加固堵水效果研究[J]. 湖南交通科技，2023，49(3)：149-154.
[5]　袁进科. 深圳益田浅埋暗挖地铁隧道富水砂层注浆堵水技术[J]. 施工技术，2019，48(1)：66-69.

作者简介：

唐洪应(1982-)，男，湖北恩施人，分局总经理，副高级工程师，一级建造师，学士，从事水利水电工程建设施工技术与管理工作；

吴　桃(1988-)，男，四川成都人，项目总工程师，工程师，学士，从事水利水电工程施工技术与管理工作；

李　明(1975-)，男，四川自贡人，项目经理，副高级工程师，从事水利水电工程施工技术与管理工作；

张雨珂(1994-)，男，河南驻马店人，助理工程师，学士，从事水利水电工程施工技术与管理工作.

(编辑：李燕辉)

(上接第 69 页)

合理备料、做好龙口段特殊材料的抛投，减少特殊材料的流失量，能够在降低备料成本的同时确保截流成功。

参考文献：

[1]　水电工程施工导流设计规范：NB/T 35041-2014[S].
[2]　水电水利工程截流施工技术规范：DL/T 5741-2016[S].
[3]　于涛，李高正. 观音岩水电站导流明渠截流施工技术总结[J]. 中国水能及电气化，2013，9(3)：6-8.
[4]　孙来成. 混凝土导流明渠截流关键技术研究[J]. 水利水电技术，2015，46(6)：115-119.
[5]　郭冬生. 三峡导流明渠截流施工技术[J]. 人民长江，2003，34(9)：17-19.

作者简介：

黄　俊(1981-)，男，湖北武汉人，副高级工程师，硕士，从事水电工程建设施工技术与监理工作；

马中将(1989-)，男，四川资阳人，工程师，从事水电工程监理工作；

高二强(1997-)，男，云南曲靖人，助理工程师，从事水电工程监理工作.

(编辑：李燕辉)