



# 特定条件下水下快速封堵施工技术

简 震，于 庆

(中国水利水电第五工程局有限公司，四川 成都 610066)

**摘要：**针对发电厂房基坑被淹没的问题，进行了水下封堵研究。岷江犍为航电枢纽工程采用“水下作业+临时封堵体+背后支撑+平压装置”的封堵方案，克服了作业空间受限、工期短、难度大、安全隐患突出等众多问题，历时 9 d 成功封堵了交通廊道，确保工程进度和工程安全。该成果填补了该领域研究的空白、奠定了研究的基础，同时形成了发明专利一项。

**关键词：**交通廊道；水下快速封堵；封堵体；水下混凝土；犍为航电枢纽

中图分类号：U 641

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)12-0079-05

## Construction technology of underwater rapid blocking in specific conditions

JIAN Zhen, YU Qing

(Sinohydro Bureau 5 Co., Ltd., Chengdu 610066, China)

**Abstract:** Aiming at the submergence of the foundation pit of the power plant, the underwater blocking research is carried out. The Minjiang Qianwei navigation-power junction adopts the blocking scheme of “underwater operation + temporary blocking body + back support + flat pressure device”, which overcomes many problems such as limited working space, short construction period, high difficulty, and prominent safety hazards. It takes 9 days to successfully block the traffic corridor to ensure the progress and safety of the project. This result has filled the research gaps in this field, laid the foundation for research, and formed an invention patent at the same time.

**Keywords:** traffic corridor; underwater rapid blocking; blocking body; underwater concrete; Qianwei navigation-power junction

在大型水利水电工程中，常通过水下大型孔洞过流，完成任务后封堵孔洞，水下封堵施工难度较大。目前水下封堵施工存在以下几种问题：1) 水下情况复杂，水下封堵位置离外界较远时，封堵材料运输不方便；2) 封堵体结构复杂，施工难度大；3) 封堵材料造价昂贵，封堵施工代价大；4) 封堵受水压力影响，施工过快时很难保证封堵体的稳定性。这些问题造成了水下封堵施工难度大、工期长、耗费大量的人力和物力。

## 1 工程概述

岷江犍为航电枢纽工程位于四川省乐山市犍为县境内，是岷江乐山—宜宾段的第 3 个梯。枢

纽总库容为 2.27 亿 m<sup>3</sup>、总装机容量为 500 MW，为河床式水电站、闸坝式挡水建筑物。工程等级为二等，工程规模为大(2)型。枢纽工程主要建筑物采用一字形布置，厂房和船闸分岸布置。从左至右分别布置左岸接头重力坝段(含鱼道)、厂房坝段、右储门槽坝段、泄洪冲砂闸坝段、船闸段、右岸接头重力坝段，坝顶总长 1 094.55 m，坝顶高程 342.8 m，最大坝高 37.80 m。

封堵部位位于左岸厂房坝段 9# 机组右侧交通廊道，交通廊道与右岸灌浆廊道连通。2018 年 5 月 22 日工程遭遇超标洪水，右岸船闸基坑进水，洪水从右岸灌浆廊道经 9# 机组交通廊道倒灌入左岸厂房坝段，导致左岸发电厂房基坑被淹没。

灌浆廊道为城门洞形，洞身全长 385.4 m(灌浆廊道 342 m+交通廊道 43.4 m)，洞径为 2.5 m×3.5 m(宽×高)，洞底高程为 310.00 m，灌浆廊道出口为 1#电梯井，其高程为 319.50 m，水面高程 319.20 m，洞内最大水头  $H=9.2$  m，见图 1、2。



图 1 封堵部位剖面

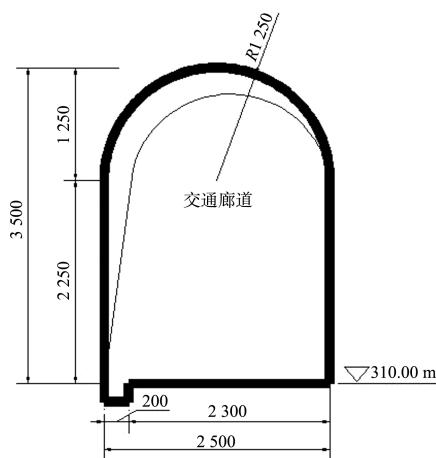


图 2 交通廊道剖面 (单位: mm)

## 2 交通廊道洞内水流问题

洪水进入右岸船闸基坑经右岸灌浆廊道再经 9#机组交通廊道倒灌入左岸厂房坝段，形成连通器效应。施工期内，右岸船闸基坑与左岸厂房坝段基坑水位差距较小，洞内流速缓慢，平均流速约为 2 m/s，但洞内流速会随着封堵面的逐渐减小而增大，封堵部位水深 9.2 m，出口处水位高程为 319.20 m，这些条件都导致交通廊道封堵施工难度增加，安全风险增大。

## 3 水下封堵方案

### 3.1 封堵体位置

涌水洞身全长 385.4 m，包括左岸厂房段交通廊道 43.4 m，封堵体的位置要考虑水下作业路径距离尽量小，同时兼顾后期灌浆廊道作业施工、不宜占用等因素，最终确定将封堵体布置在交通

廊道段距离 1#楼梯井 5 m 处，高程 310.00 m。

### 3.2 施工条件

左岸厂房基坑被淹没后，基坑内水位基本与右岸船闸基坑水位一致，考虑到左岸厂房工程安全及工期要求，为保证左岸厂房及时复工，最终确定了水下封堵方案<sup>[1]</sup>。

#### 3.2.1 施工布置

施工期最高水位 319.20 m，选定 9#机组 319.50 m 平台作为施工期的水上操作及封堵材料暂存区。

#### 3.2.2 施工通道

施工人员、设备、材料等由厂房尾水渠岸边乘船至 9#机组 319.50 m 平台，经 1#电梯井至交通廊道内，到达封堵部位。电梯井尺寸为 3.0 m×3.0 m，通道理论距离 14.5 m。见图 3。

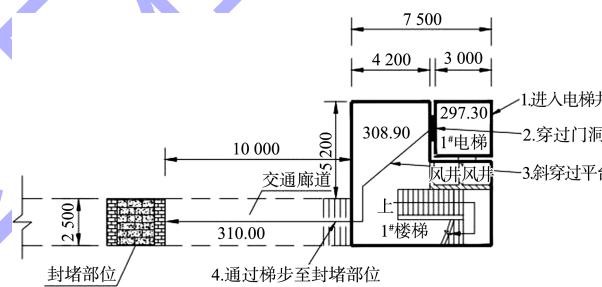


图 3 封堵部位通道俯视 (高程: m; 尺寸: mm)

#### 3.2.3 作业条件

水下封堵施工位于交通廊道内，洞内流速缓慢，平均流速约为 2 m/s，但随着封堵部位的施工，封堵面逐渐减小，洞内流速会随之增大。封堵部位施工期最大水深  $h$  为 9.2 m，最大水压强  $P$  为 90.16 kPa。

#### 3.2.4 封堵体长度设计

根据以往的工程经验，封堵体长度的计算方法，主要有以下几种：

1) 经验公式法。以封堵部位设计最大水头  $H$  与廊道洞径  $D$  为参数确定堵头的长度  $L$ 。本工程校核洪水 ( $P = 10\%$ , 10 a 一遇) 高程为 331.00 m，故封堵体设计水头为 21 m， $L = H \cdot D / 50 = 1.47$  m。该计算方法的缺陷是没有考虑抗剪断黏聚力、摩擦系数等因素。

2) 混凝土圆柱面的抗冲压剪切方法。堵头长度  $L$  为：

$$L \geq \frac{P}{[\tau]A} \quad (1)$$

式中:  $P$  为封堵体迎水面总水压值, 交通廊道封堵时段计划在 6 月份, 查阅了《犍为坝址逐月平均流量表》及《坝址水位流量关系曲线》, 本月平均流量为  $3\ 770\ m^3/s$ , 相对应的水位为  $321.50\ m$ , 采取底板处(高程  $310.00\ m$ )应力值作为特征值;  $[\tau]$  为容许剪应力, 取  $1.5\sim2.0\ MPa$ ;  $A$  为封堵体剪切面周长, 为  $10.9\ m$ 。

除廊道顶拱部位外, 一般认为底面有效接触系数  $\lambda=1$ , 侧面有效接触系数根据实际情况确定, 本次计算取侧面有效系数  $\lambda=1$ 。经过计算封堵体长度为  $5.17\ m$ 。

3) 根据《水利水电工程施工组织设计手册》<sup>[2]</sup>, 堵头形式及长度计算如下:

$$L = \frac{KP}{Arf + S\lambda C} \quad (2)$$

式中:  $L$  为堵头长度;  $P$  为设计水头的总推力, 以  $11.50\ m$  水头计算;  $K$  为安全系数, 取  $1.6$ ;  $A$  为断面面积, 为  $8.08\ m^2$ ;  $r$  为封堵洞宽, 为  $2.5\ m$ ;  $S$  为断面周长, 为  $10.93\ m$ ;  $f$  为混凝土与岩石(或混凝土)的摩擦系数, 取  $0.6$ ;  $\lambda$  为抗剪断面积有效系数, 取  $0.75$ ;  $C$  为混凝土与岩石(或混凝土)接触面的抗剪断黏聚力, 取  $1.3\ MPa$ 。

经计算  $L=0.809\ m$ ;  $10\ a$  一遇洪水时, 对应水头为  $21\ m$ , 经计算封堵长度  $L=1.51\ m$ 。

综合以上 3 种方法的计算结果, 按经验公式法及抗冲压剪切公式法计算的结果基本接近( $L=1.47\sim5.17\ m$ ), 由于本工程等级为Ⅱ等工程, 工程规模为大(2)型, 廊道水下封堵工程设计标准高, 一旦出现损毁, 二次进水将会严重影响基坑内人员、设备的安全, 对工程造成无法估量的损失, 同时考虑封堵施工过程中可能存在的水下施工视线受限效果不佳、混凝土接触面处理清洗效果不好及混凝土收缩影响等因素, 安全系数取  $1.2$ , 最终确定封堵体长度取  $6.2\ m$ 。

### 3.2.5 封堵体结构设计

1) 目前, 常见隧洞的封堵体结构主要有楔形结构以及圆柱形结构两种, 楔形结构封堵体受到上游水流的水平推力时能够将水平推力均匀地传

至交通廊道洞壁, 能充分利用廊道壁的承压作用, 缺点是封堵体实施前需要对原交通廊道洞壁混凝土进行破拆、钢筋切割、洞身扩挖, 施工难度极大、工期长。柱形结构封堵体受力条件不如楔形封堵体, 但可直接在隧洞内实施, 工序相对简单, 施工简单便捷, 施工工期短。由于本工程交通廊道断面大, 楔形体的施工难度高, 同时结合本工程工期节点要求, 本次廊道封堵体采取在原交通廊道混凝土壁面上直接凿毛、浇筑柱形堵头的施工方案<sup>[3]</sup>。

2) 根据上述计算方法, 选取封堵长度  $L=6.2\ m$ 。考虑水下封堵时的浮托力, 增加保险系数及提高防渗效果, 结合陕西省白水县林阜水库通水廊道封堵(水深  $21\ m$ , 洞径  $2.8\ m$ , 封堵厚度  $2\ m$ )的成功案例, 确定选取岷江流量  $3\ 000\ m^3/s$  以下的时段进行施工:

①首先在交通廊道的迎水面施工一堵厚  $0.56\ m$  的砖砌墙体, 可抵挡  $5\sim8\ m$  水头差, 以减小水流冲刷, 缩短施工时间。

②待墙体满足一定强度要求后, 墙体背后采用浆砌混凝土预制块(现有)填充  $5\ m$ , 浆砌混凝土预制块规格为  $50\ cm \times 25\ cm \times 10\ cm$ , 施工过程中设置平压连通管, 平衡两侧水压。

③待浆砌混凝土预制块施工完成后, 在其后施工一堵厚  $0.56\ m$  的砖砌墙体, 防止回水掏刷, 整体封堵长度为  $6.2\ m$ 。

④待封堵体全部完成施工过后, 在其背后(临发电厂房侧), 采用工字钢进行加固支撑, 工字钢通过锚筋与廊道壁连接。

## 4 水下封堵体施工

### 4.1 封堵体施工流程

施工准备(施工材料、施工人员)→施工现场平面布置→制作出口吊装工作平台→潜水员水下通道清理→施工材料吊运至水下施工部位→前端砖砌墙体施工→预埋平压连通管→浆砌混凝土预制块施工→后端砖砌墙体施工→封堵体背部支撑施工→平压连通管关闭→施工完成现场清理<sup>[4]</sup>。

### 4.2 场内交通设置

#### 4.2.1 临时码头设置

水下封堵施工所需材料主要为实心砖、混凝土

预制块、水下专用水泥等材料，所需设备主要为潜水设备、空压机、提升机(鸡公吊)等。在厂房下游尾水渠岸边处设置临时码头，作为运输船只的临时停靠点，水下封堵施工开始前将主要材料和设备全部运输至 319.50 m 作业平台存放，见图 4。

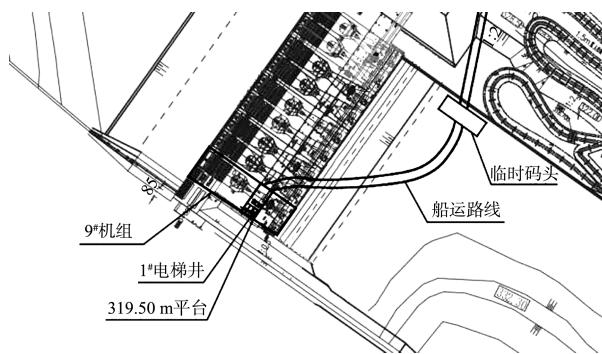


图 4 施工平面布置

#### 4.2.2 船运路线确定

运输船只行驶路线：临时码头→厂房尾水渠→厂房 9#机组段→9#机组 319.50 m 作业平台，利用 GPS 确定水下建筑物位置，在水面上设置航标确定安全行驶区域。

#### 4.3 水上施工平台设置

##### 4.3.1 场地确定

水下封堵部位为 9#机组交通廊道，入口为 9#机组副厂房段 319.50 m 平台 1#电梯井，选择 319.50 m 平台作为本工程水上施工平台，平台顺水流方向长 31 m，垂直水流方向长 22 m。

##### 4.3.2 吊装设备确定

水下作业人员及施工材料通过 1#电梯井口起吊设备运输至水下施工部位附近。井口处空间狭小，无法使用大型起吊设备，且水下封堵施工最大吊重不大于 200 kg，起吊距离 9.5 m，选择 1 t 提升机(鸡公吊)作为本次施工主要起吊设备，见图 5。



图 5 1 t 提升机

#### 4.4 水下作业视线保证

潜水员均配发专业潜水头灯；廊道内水流较缓，潜水员下水前 0.5 h 在水中加入适量明矾，净化水体、提升视线。

#### 4.5 封堵体施工

水下作业潜水员佩戴 KMB-18 轻潜头盔，利用空气压缩机供气设备下沉到施工部位，期间专业潜水信号员密切关注水下潜水员情况，通过潜水服自带对讲机随时联系潜水施工人员动向。

为保证封堵效果，将封堵处污泥清除干净，保证封堵体与廊道壁有良好的接触面。

##### 4.5.1 前端砖砌墙体施工

为了迅速抵挡水头差带来的水流扰动，减小水流冲刷、缩短施工时间，首先在封堵体的最前端迎水面施工一堵厚 0.56 m 的砖砌墙体。

水下墙体砌筑，由实心砖、水泥和快速凝固剂进行施工，其施工方法与平常砌墙方法相同，在墙体中部埋设平压连通管，平衡两侧水压，见图 6。

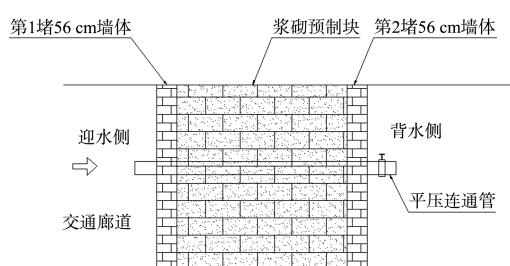


图 6 封堵体结构

##### 4.5.2 中部浆砌混凝土预制块施工

为快速完成封堵体施工，改变传统现浇混凝土的封堵工艺，采用相同强度混凝土预制块砌筑，采用水泥与快速凝固剂按比例拌制砂浆，降低水下施工难度，大大节约了工期，同时为后期封堵体的拆除提供了有利条件。

待前端砖砌墙体施工完成后，立刻进行中部浆砌混凝土预制块施工，此部分封堵长度为 5 m，为廊道封堵体的主体结构。

混凝土预制块规格为 50 cm×25 cm×10 cm，单块质量为 31 kg，水下受力情况为：

$$F = G - f_{\text{浮}} \quad (3)$$

式中:  $F$  为预制块水下受力;  $G$  为预制块重力;  $f_{\text{浮}}$  为预制块所受浮力。计算得浮力为 187.5 N, 潜水员可在水下轻松搬运混凝土预制块。

#### 4.5.3 后端砖砌墙体施工

待前中部浆砌混凝土预制块施工完成后, 立刻进行后端砖砌墙体施工, 此部分施工长度为 0.56 m, 该部位为防止回水掏刷, 整体封堵长度为 6.2 m。

该部分施工, 与前端砖砌墙体施工工艺一致, 施工时注意接出平压连通管。

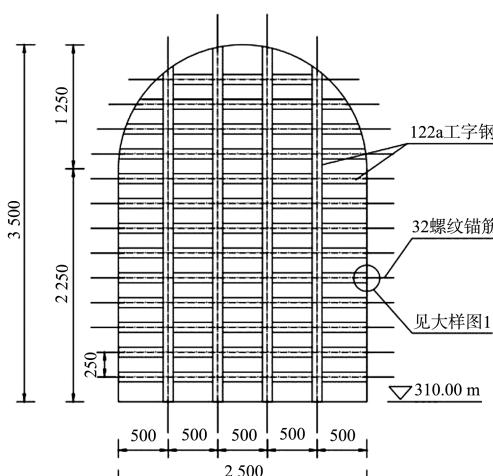
#### 4.5.4 平压连通管施工

在封堵墙体中部设置平压连通管, 出口处设置阀门, 保证两侧水压平衡, 平压管尺寸根据具体情况而定, 施工过程中连通封堵体两侧水流, 调节两侧水压差, 保证施工过程中封堵体的稳定<sup>[5]</sup>。

当封堵体全部施工完成后, 等待 7 d 强度后, 关闭平压连通管出口阀门, 截断交通廊道水流, 完成对交通廊道水流的封堵。

#### 4.5.5 封堵体背后加固

在封堵体完成施工后, 立即采用钢支撑进行后期封堵体加固<sup>[6]</sup>, 采用 I22 a 工字钢间距 25 cm 进行横向支撑并和 32 螺纹钢锚筋焊接连接, 竖向设置间距 50 cm I22 a 工字钢支撑并和 32 螺纹钢锚筋焊接连接, 另外设置斜撑加固支撑, 支撑方式见图 7。



a) 正视图

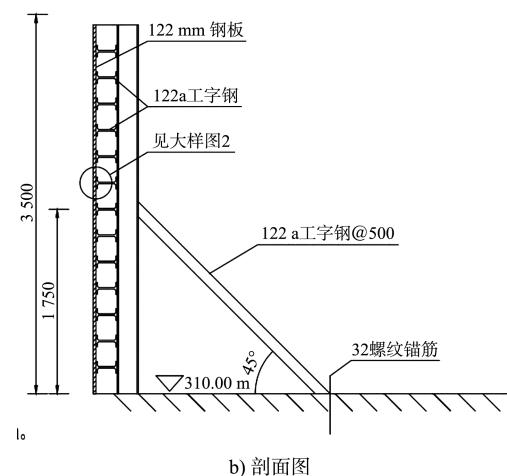


图 7 封堵体背部支撑 (单位: mm)

### 5 结语

- 1) 为实现对廊道的快速封堵及后期拆除, 采用“前端砌筑砖墙+中部浆砌混凝土预制块+后端砌筑砖墙”封堵结构, 结果表明该设计可以实现快速封堵同时为后期拆除提供了有利条件。
- 2) 为实现封堵施工过程中封堵体两侧水压平衡, 设置平压连通管, 结果表明该设置可以调节两侧水压差, 保证封堵体结构稳定。
- 3) 为保证封堵体施工完成后结构稳定, 采用钢支撑背架设计, 可有效保证封堵体结构稳定。

### 参考文献:

- [1] 李永山, 梁勇, 陈猛, 等. 一种大型孔洞水下快速封堵的方法 [P]. 中国, 201811048045.0[P]. 2018-09-10.
- [2] 水利电力部水利水电建设总局. 水利水电工程施工组织设计手册 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1987: 240.
- [3] 李帅, 刘智杰, 李颂章. 澄天河水库扩建工程导流洞封堵设计研究 [J]. 湖南水利水电, 2020(4): 46-48.
- [4] 刘晓岭. 东武仕水库泄洪洞水下封堵施工方案 [J]. 科技经济市场, 2014(5): 101-102.
- [5] 高宇, 卢山, 盘春军, 等. 万家寨水电站导流洞涌水封堵技术 [J]. 红水河, 2020, 39(1): 12-16.
- [6] 马炜, 李路强, 陈阳, 等. 调压井过水条件下的封堵施工 [J]. 云南水力发电, 2017, 33(S2): 70-72.