



# 左江山秀船闸扩能工程高边坡开挖施工技术

魏 磊<sup>1</sup>, 宋根才<sup>2</sup>

(1. 广西北港规划设计院有限公司, 广西 南宁 530201;  
2. 广西珠委南宁勘测设计院有限公司, 广西 南宁 530008)

**摘要:** 以广西左江山秀船闸扩能工程为例, 研究引航道高边坡施工开挖与支护施工技术。结合施工现场实际与引航道高边坡的特征, 制定了高边坡施工的开挖和支护方法, 以确保工程的安全性和可行性。研究结果表明, 在左江山秀船闸扩能工程中采用该方法进行施工, 两岸边坡的稳定性问题得到解决, 确保了施工的安全进行, 同时保障了既有航道的正常通航。

**关键词:** 船闸扩能工程; 高边坡开挖; 控制爆破; 液压破碎; 高边坡支护

中图分类号: U641.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0220-06

## Construction technology for high slope excavation of Shanxi shiplock capacity expansion project in Zuojiang

WEI Xiao<sup>1</sup>, SONG Gencai<sup>2</sup>

(1. Guangxi Beigang Planning and Design Institute Co., Ltd., Nanning 530201, China;  
2. GuangxiZhuwei Nanning Design and Survey Institute, Nanning 530008, China)

**Abstract:** Taking Shanxi shiplock expansion project in Zuojiang, Guangxi as an example, this paper studies the construction technology of excavation and support of high slope of the approach channel. Combined with the actual construction site and the characteristics of the high slope of the approach channel, the excavation and support methods of the high slope construction are formulated to ensure the safety and feasibility of the project. The research results show that the stability of both sides of the slope can be solved by using this method in the capacity expansion project of Shanxi shiplock in Zuojiang, which ensures the safety of construction and the normal navigation of the existing channel.

**Keywords:** shiplock capacity expansion project; high slope excavation; controlled blasting; hydraulic breaking; high slope support

## 1 工程概况

近年来, 水路运输量日益增加, 现有船闸的容量已无法满足需求。为解决枢纽船闸通过能力有限的难题, 一系列既有船闸扩能工程开始兴建。为满足左江货运量增长需求及山秀枢纽上下游Ⅲ级航道通航规模要求, 实施左江山秀船闸扩能工程<sup>[1]</sup>, 采用根本性措施解决山秀梯级河流上的航运过坝问题, 以满足当前左江的水运发展需求。

山秀二线新建船闸位于一线船闸左岸, 两船闸中心线间距约 60 m, 船闸中心线交角为 8°, 主要建设通航建筑物, 由上/下引航道、上/下闸首和闸室组成。船闸主体段布置在拦河坝轴线以下, 船闸主体与拦河坝之间布置 88 m 长的通航连接段。船闸主体段长 309 m, 由上闸首、闸室和下闸首组成, 其中上闸首长 38 m、闸室长 230 m、下闸首长 41 m。二线船闸级别为Ⅱ级, 建设规模为

收稿日期: 2023-09-24

作者简介: 魏磊 (1981—), 女, 高级工程师, 从事水运工程规划与设计。

1 000 吨级船闸(兼顾 2 000 吨级), 船闸主尺度为  $190\text{ m} \times 23\text{ m} \times 5.5\text{ m}$ (有效长度×宽度×门槛水深), 设计水平年单向通过能力 1 470 万 t。山秀船闸枢纽实景模型(BIM+GIS)鸟瞰图见图 1。

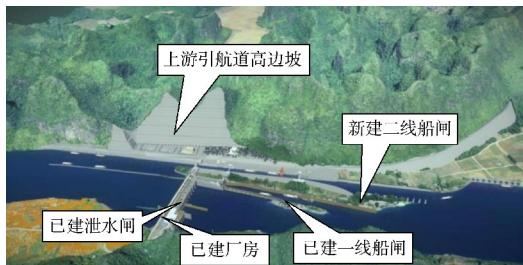


图 1 山秀船闸枢纽实景模型(BIM+GIS)鸟瞰图

根据设计方案, 工程建设拟对左岸山体进行削坡开挖以满足船闸平面布置需要, 由此形成超高人工边坡, 且裂隙、岩溶较发育, 对坡下船闸及通航船只造成较大威胁, 需对左岸边坡进行稳定性分析并采取相应支护措施。上游引航道开挖及高边坡防护工程量大, 是项目施工的关键节点。本工程高边坡施工特点为岩石爆破开挖受开挖坡面、层理面、裂隙面的影响, 坡面可能发生局部结构岩体坍塌和滑坡、人员高空坠落<sup>[2]</sup>。同时, 一、二线船闸轴线距离较近, 施工期需确保枢纽的正常安全运行, 对边坡开挖和防护的要求很高。枢纽坝轴线上游为高大陡石山体, 开挖工程量巨大, 开挖边坡高度约 200 m, 边坡地层类型主要为中风化灰岩夹白云质灰岩, 主要开挖坡比 1:0.4, 高边坡稳定和安全问题突出。

## 2 工程地质

### 2.1 地形地貌

二线船闸位于左江下游, 距广西扶绥县 14 km, 地形为岩溶、峰山地貌, 山顶高程 290~330 m。河谷两岸阶地高程范围在 87~110 m, 其两岸阶地呈现不对称发育, 自上游向下游前进至电站大坝位置时, 右岸的阶地相对较为宽广, 而左岸则呈现陡峭的岩壁特征; 电站大坝往下游转为左岸阶地开阔平缓, 右岸陡峭, 进站公路隧道穿山而过。

河床基本为基岩及电站修建时填土, 冲积砂、砾石、和卵石相对较少。河段较顺直, 枯水期时水面宽 130~150 m, 河床高程为 60~77 m, 河槽宽 160~200 m, 河谷宽(包括两侧阶地)400~450 m。河谷表现为 U 形发育, 其中河床尚未暴露在水面之上, 仅可观察到一级阶地的存在。

场地覆盖层厚 5~15 m, 以旱地为主, 种植农作物, 下伏基岩溶槽、溶沟等, 岩溶较发育, 尤以临近山峰、山麓区域为甚, 坡脚以外则以隐伏形的岩溶形态为主, 岩石坡面则稀疏生长灌木, 地表未发现大型漏斗、落水洞发育。

### 2.2 地质构造

高边坡地质及边坡支护如图 2 所示, 左岸边坡地层为单斜构造, 岩层产状稳定, 岩层产状东南  $15^\circ \sim 20^\circ$  高边坡范围共发现大小断层 13 条。断层走向多为东北  $40^\circ \sim 70^\circ$ , 少数为近东西向; 断层倾角为  $65^\circ \sim 90^\circ$ , 均为陡倾断层。方解石脉宽 66~420 cm, 沿断裂形成高 30~50 m 断层崖, 地表线性特征明显; 其余断层规模小, 破碎带宽 4~160 cm, 为方解石充填, 沿断裂隙多有溶蚀现象。左岸边坡裂隙较发育。根据地表裂隙统计(不包括层面裂隙), 按裂隙走向归纳, 以 2 组裂隙发育为主, 以西北  $275^\circ \sim 290^\circ$  和东北  $40^\circ \sim 62^\circ$  发育为主。裂隙倾角  $60^\circ \sim 90^\circ$ 。裂隙平直, 呈闭合状或方解石充填, 延伸较长, 属于剪切裂隙, 裂隙间距一般大于 1.0 m, 局部裂隙密集带发育间距为 0.3~1.0 m, 部分裂隙溶蚀成宽 5~30 cm 的溶沟、溶槽, 个别溶槽宽达到 100 cm, 为碎石、泥质充填。

层面裂隙与岩层的产状一致, 是构造运动中层面产生挤压错动而成, 裂隙面光滑, 裂隙在水的入渗溶蚀作用下扩张, 常伴有泥质填充物, 裂隙倾角  $6^\circ \sim 8^\circ$ , 裂面较光滑。山坡陡崖上岩体层面裂隙较发育, 但根据船闸钻孔岩芯裂隙统计, 溶蚀夹泥或锈染的层面裂隙只是偶有发育, 说明层面裂隙主要发育于地表浅部。岩体物理力学参数见表 1。

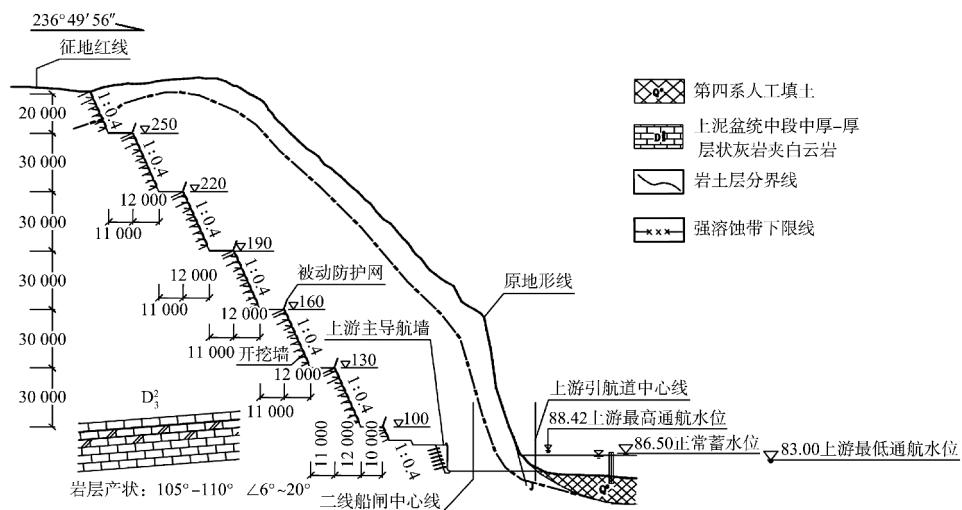


图 2 高边坡地质及边坡支护 (高程: m; 尺寸: mm)

表 1 岩体物理力学参数

岩层名称及编号	风化程度	天然密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	饱和抗压强度 标准值 $f_{ik}/MPa$	泊松比 $\mu$	变形模量/ GPa	弹性模量/ GPa	
灰岩夹 白质灰岩④	中风化	2.73	60.0	0.25	10.0	15.0	
	裂隙发育带	2.50	-	0.30	4.0	6.0	
方解石	中风化	2.73	27.0	0.28	8.0	12.0	
岩层名称及编号	抗剪断摩擦系数 $f'$		抗剪断黏聚力 $c'/MPa$		抗剪摩擦系数 $f$		承载力特征值/MPa
	混凝土-岩石	岩石-岩石	混凝土-岩石	岩石-岩石	混凝土-岩石	岩石-岩石	
灰岩夹 白质灰岩④	1.00	1.10	0.65	1.20	1.50	0.70	3.0
	0.80	0.50	0.50	0.70	0.50	0.55	1.8
方解石	0.90	0.70	0.50	0.80	0.70	0.60	1.5

### 3 高边坡开挖施工技术

现状山体在自然条件下尚处稳定状态，山体开挖时或开挖后，若不及时进行分级分段支护或者治理措施不当，有发生崩滑地质灾害的可能。高边坡支护紧跟开挖进度进行，坚持开挖一级防护一级。在边坡施工过程中，需采取自上而下的逐层有序施工方法，以确保双侧边坡的牢固稳定。同时，应确保处理弃土和渣滓不会导致附加的边坡变形或破坏，并应在干燥季节进行施工。特别是对于易风化、易崩解和膨胀性岩体，必须在开挖后立即进行支护工作，并采取相应的防水

和排水措施。施工过程中，应考虑适度的坡度，以促进排水，同时应避免在边坡稳定范围内形成积水。

### 3.1 总体开挖方案

项目边坡高度高、坡度陡,边坡局部稳定性计算采用传统边坡稳定性分析方法和数值模拟分析2种方法。传统上采用理正岩土计算7.0版本进行计算;数值模拟法采用三维离散元软件3DEC7.0版本进行计算。边坡局部稳定性计算结果见表2。

表2 边坡局部稳定性计算结果

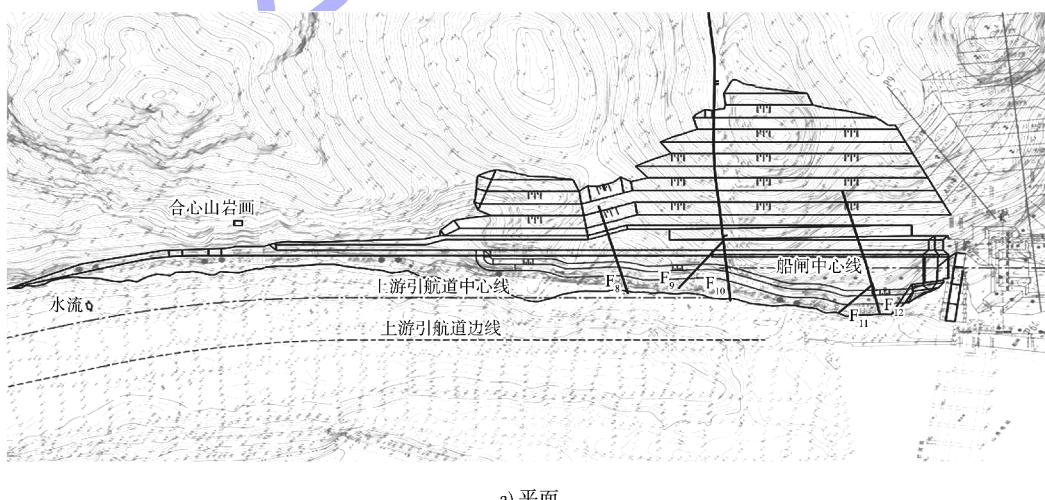
计算方法	计算剖面	安全系数计算值		安全系数规范值		是否满足规范要求
		正常运行工况	非正常运行工况	正常运行工况	非正常运行工况	
传统	$F_8$ 和 $F_9$ 断层	1.913	1.821	1.25	1.10	满足
	$F_9$ 和 $F_{10}$ 断层	1.595	1.576	1.25	1.10	满足
	$F_{11}$ 和 $F_{12}$ 断层	1.568	1.551	1.25	1.10	满足
数值模拟	$F_8$ 和 $F_9$ 断层	1.84	1.76	1.25	1.10	满足
	$F_9$ 和 $F_{10}$ 断层	1.59	1.54	1.25	1.10	满足
	$F_{11}$ 和 $F_{12}$ 断层	1.56	1.49	1.25	1.10	满足

根据计算结果,边坡稳定性满足相应规范允值。因此,边坡左岸山体开挖总体顺序自上而下分层分块进行,为阻止上部山体爆破岩石向下滚落,拟对每层(高30 m)开挖面均采用“留靴法”分块爆破开挖。左岸山体边坡开挖总体顺序为自上而下分层梯段爆破,台阶高度30 m。每层开挖均采用纵向拉槽、横向分块,永久边坡采用预裂或光面爆破。为阻止爆破岩石沿山坡滚落,在山体边沿处预留岩墙。同时按照质量和安全控制要求,对每一层开挖分为3个爆区依次组织实施。首先进行主爆区(I区)开挖,再进行控爆区(II区)开挖,最后为预留岩墙(III区)开挖。采用预留岩墙法对左岸山体爆破开挖可以降低滚石对左岸大坝设施造成的影响,每层分区分块开挖及先后次序的安排可以有效降低爆破振动对保

留岩体危害影响。

为避免爆破对现有枢纽建筑物及一线通航产生影响,在距现有建筑物边线大于200 m范围内的石方开挖,采用普通钻爆;在距现有建筑物边线大于50 m、小于200 m范围内的石方开挖,采用控制爆破;在距离现有建筑物边线小于50 m范围内的石方开挖,采用液压破碎。左岸接头坝拆除采用静态爆破。

在分层开挖过程中,应依次进行支护措施,确保上一层的稳固支护能为下一层的安全开挖提供有力保障,有利于开挖工作的顺畅进行。开挖工艺采用控制爆破与液压破碎形式相结合,上游引航道开挖方案见图3,开挖方式分区见图4。该方案已应用于广西左江山秀船闸扩能工程的高边坡开挖中,经现场验证,方案合理、科学。



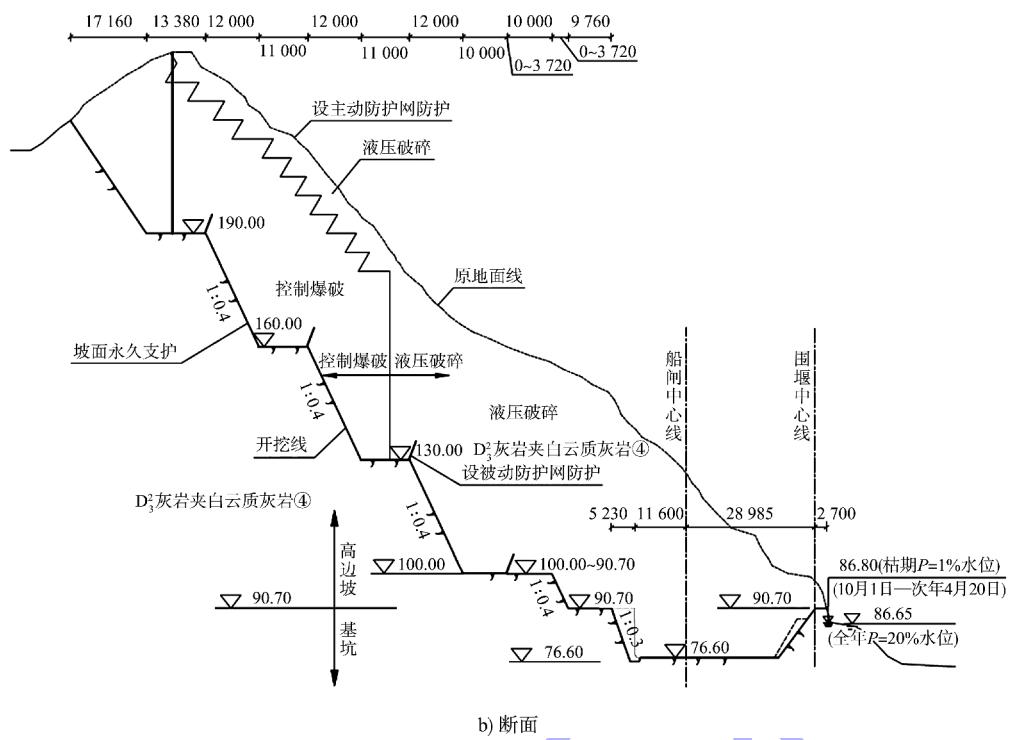


图 3 上游引航道开挖方案 (高程: m; 尺寸: mm)

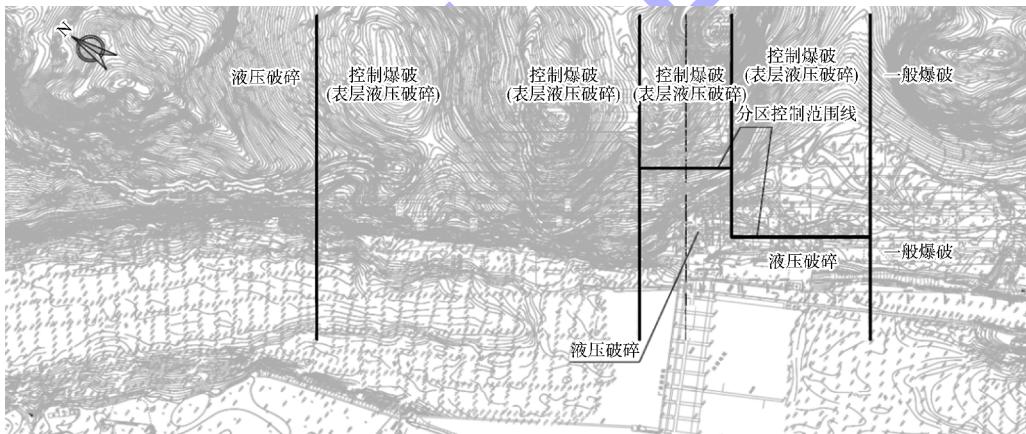


图 4 上游引航道和船闸主体段开挖方式分区

### 3.2 开挖施工工艺

#### 3.2.1 爆破开挖

鉴于该工程的现场实际情况以及其他较为相似的工程现场施工经验<sup>[3-7]</sup>，在石方的开挖工程中，以台阶控制爆破法为主要施工手段。

高边坡爆破方法的选择直接影响实际的爆破效果。在复杂环境下，有多种高边坡爆破方法可供选择，需要根据具体的爆破场地情况和方案设计做出选择。爆破方法应根据实际条件和要求进行权衡<sup>[8-9]</sup>。不论采用何种爆破方法，都必须确保

爆破过程的可控性和安全性，避免由不当爆破引发严重后果，使工程发生重大损失。为达到信息化施工、动态设计的目的，在施工期间可结合爆破监测数据调整和优化爆破参数。

#### 3.2.2 液压破碎施工

岩石抗压强度高、抗拉强度低，利用此特性，采用高压油作为动力源，由泵站输送的超高压力油经过增压器的机械增压，推动分裂器内的液压缸产生强大的推进力，从而使分裂机推动液压顶并向外伸出，直至使岩石发生膨胀破裂。对于不

适用炸药爆破的项目,则采用效率更高的液压静态破碎,其为机械化作业,受天气影响小,不会因高温天气或下雨影响作业时间,人工劳动强度较低。

### 3.2.3 预留岩墙施工

左岸山体边坡开挖总体顺序为自上而下分层分块进行,首先在预定边坡外侧形成一个切割堑沟(I部分),随后对剩余部分(II部分)进行精确爆破,即预留岩墙爆破。采用这一方法是为了能够在对路基上部山体进行爆破施工时,有效避免出现岩石向下滚落。

1) 爆破I部分岩体时,采用等边三角形的孔道布置方式,使炸药均匀作用于岩石,从而实现理想的爆破效果。在布置孔道的过程中,最先起爆的炮孔的钻孔方向应垂直于河流的流向,从高桩号向低桩号方向开挖,以控制爆堆前移方向,改善破碎效果,降低爆破震动。2) 爆破II部分岩体时,按最终边坡分层分台阶进行爆破开挖,采用微差控制爆破形式以控制爆破抛石方向,每层岩体主要采用主/被动网防护+定向爆破方式。为了避免出现边坡超挖和欠挖,对边坡采用预裂爆破技术。3) III部分岩体预留厚度5 m,采用液压破碎,以防止岩块抛掷或沿山坡滚落。

所有区域清渣完毕后及时进行最终边坡的支护施工,完成后即可进行下一层预留岩墙施工循环。预留岩墙爆破开挖工艺中的爆体I为提前开槽,范围满足施工作业面及机械设备、车辆通行要求,其他属于爆体II。预留岩墙爆破开挖总体顺序见图5,预留岩墙爆破开挖最终效果见图6。

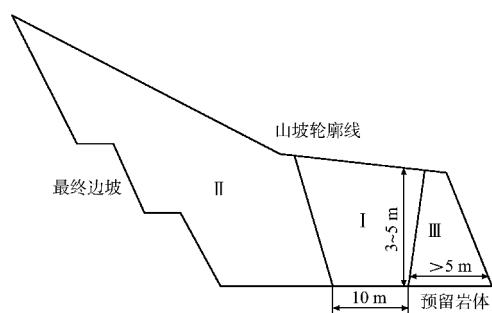


图5 预留岩墙爆破开挖总体顺序

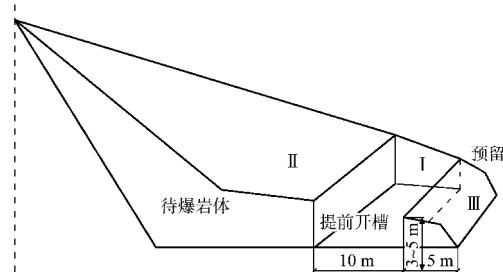


图6 预留岩墙爆破开挖最终效果

### 3.3 边坡永临支护方案

为防止落石滚入一线船闸上游引航道,影响过往船舶通航安全,临时开挖边坡在施工期需设主动及被动柔性防护网。开挖前在天然边坡坡面设置主动防护网;在开挖平台设置被动防护网作为永临防护,施工过程中被动防护网有破损应及时修复。

在边坡高程130、160、190、220、250 m各设置宽11 m防滚石的开挖卸荷平台。在高程100 m处分别设置宽7、10 m的上游施工主干道兼永久道路,在90.70 m高程分别设置宽5.00、9.76、10.00 m的上游引航道道路及回车平台。采用水泥砂浆抹面+植生槽种植乔木+排水沟+坡面排水管进行支护,开挖的最上2~3级坡面采用锚杆(索)+挂网喷混凝土+坡面排水管的支护方案,每级开挖平台两侧、坡面过度段及低坡开挖段采取锚杆(索)+挂网喷混凝土综合治理方案<sup>[10]</sup>。

## 4 结论

1) 在左江山秀船闸扩能工程中,对左岸高边坡进行开挖的施工过程中,提出针对性的边坡开挖与支护方案,使工程项目顺利推进,提高工程效率。根据现场地质情况与计算结果,左岸山体边坡开挖总体顺序为自上而下分层分块进行。

2) 左岸高边坡山体主要采用液压破碎结合控制爆破法施工,支护措施紧跟开挖进度。

3) 为避免影响过往船舶,施工过程中,采取锚杆(索)+挂网喷混凝土综合治理方案。