

# 水电站导流洞爆破开挖及支护技术应用

王小军

(中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要** 本文以刚果(金)Nzilo1水电站导流洞工程为背景,系统阐述了复杂地质与空间条件下导流洞爆破开挖及支护的关键技术应用。工程导流洞全长593.28 m,穿越Ⅲ、Ⅳ类围岩,平面设两处大角度转弯,施工环境受限。本文从开挖方法、爆破参数设计、循环作业流程及超前地质预报等方面详细介绍了“新奥法”指导下的短进尺、弱爆破、强支护技术体系,并针对不同围岩类别,提出分别采用系统锚杆、挂网喷混凝土、钢拱架及超前小导管等组合支护措施,以期有效保障洞室稳定与施工安全提供参考。

**关键词** 导流洞;爆破开挖;支护技术;新奥法

中图分类号:TV7

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.016

## 0 引言

导流洞作为水利水电工程施工期的关键临时建筑物,其开挖与支护质量直接关系到主体工程的工期、安全与投资控制。在复杂地质条件、大断面、多转弯的导流洞施工中,如何实现高效、安全、精准的爆破开挖,并同步实施有效的支护,是工程面临的核心技术难题<sup>[1]</sup>。尤其在海外项目中,还需兼顾当地资源条件、设备配置及规范标准。本文依托刚果(金)Nzilo1水电站导流洞工程实践,结合现场施工组织与技术参数,系统总结爆破开挖与支护技术的应用要点,旨在为同类工程提供可借鉴的技术路径。

## 1 工程概况

刚果(金)Nzilo1水电站装机容量200 MW,总库容4.84亿m<sup>3</sup>,属二等大(二)型工程。本标段主要承担导流洞工程的施工任务,包括进出口明挖支护、洞身开挖支护、混凝土衬砌及灌浆等内容。导流洞洞身段全长593.28 m,设计断面为7 m(宽)×8 m(高)的城门洞型。洞线在平面上设置2个转弯,转弯半径均为70 m,转弯角度分别为130.45°和120°,空间线形复杂。洞身进口底板高程为1 068.00 m,出口为1 064.00 m,纵坡坡比为6.74%。进出口各设10 m长明渠,进口布置10 m长闸门井,出口设10 m长明洞用于后期交通转换。地质勘察表明,洞身段以Ⅲ类围岩为主,进出口约55 m范围为稳定性较差的Ⅳ类围岩,局部存在断层破碎带,施工安全风险较高。

## 2 工程施工重点

本工程导流洞施工重点集中于三方面。其一,洞身593.28 m范围内穿越Ⅲ类与Ⅳ类围岩交界带,其中

进口段约30 m、出口段约25 m为Ⅳ类围岩,岩体破碎、节理发育,自稳时间短;其余段落为Ⅲ类围岩,完整性相对较好。两类围岩物理力学性质差异明显,开挖过程中易在交界处产生应力集中或局部失稳,要求开挖进尺、爆破药量及支护时机必须随围岩变化动态调整。其二,洞线平面布置含两个大角度转弯,转弯角度分别为130.45°和120°,转弯半径均为70 m。弯道段掌子面非正交,导致测量放样需频繁转换坐标系,钻孔方向控制难度加大;同时通风软管在弯道处易弯折,风阻增大,排烟效率下降,掌子面空气质量保障面临挑战。其三,导流洞进出口均紧邻卢阿拉巴河岸,进口设10 m闸门井,出口接10 m明洞,洞口边坡高陡,且处于Ⅳ类围岩中,岩体易受雨水冲刷或河水渗透软化。施工初期必须完成边坡清危、锁口梁浇筑及超前支护,方可进洞作业,洞口段前10 m循环进尺严格控制在1.5 m以内,并采用钢拱架全环封闭支护,防止边坡失稳或洞口坍塌<sup>[2]</sup>。

## 3 水电站导流洞爆破开挖及支护技术应用分析

### 3.1 水电站导流洞爆破开挖技术应用

导流洞爆破开挖需兼顾施工效率与围岩稳定性,核心围绕开挖方法优化、爆破参数精准设计、标准化作业流程执行及特殊洞段专项处理展开。

#### 3.1.1 开挖方法与施工组织

导流洞开挖严格遵循“新奥法”原则,采取“短进尺、弱爆破、少扰动、强支护、勤观测”的施工方针。施工采用进出口双向掘进,共设两个工作面。洞身开挖分上下两层进行:上层开挖高度7 m,下层高度2.3~3.6 m。上层开挖推进100 m后,启动下层开挖,以减少对围

岩的二次扰动。针对不同围岩类别,采用差异化开挖策略。Ⅲ类围岩完整性较好,上层采用全断面开挖;下层采用“中部拉槽超前、两侧扩挖跟进”法,拉槽超前距离不超过 20 m,两侧扩挖交错进行,间距小于 20 m。Ⅳ类围岩段则严格控制循环进尺在 1.5~2.0 m,开挖后暂不出渣,优先进行安全处理与初期支护。

### 3.1.2 爆破参数设计与优化

导流洞爆破设计以光面爆破为核心,上层开挖采用 YT28 手风钻造孔,钻孔直径为 42 mm。掏槽孔深度为 4.2 m,孔距控制在 0.1~0.15 m;主爆孔深度为 4.0 m,孔距为 0.8~1.0 m;周边光爆孔深度同为 4.0 m,孔距根据围岩完整性调整为 0.4~0.7 m。装药结构方面,掏槽孔与主爆孔采用  $\phi 32$  mm 乳化炸药,实行连续耦合装药;周边光爆孔则采用  $\phi 25$  mm 乳化炸药,按间隔不耦合方式装药,不耦合系数为 1.6,药卷绑扎于竹片上,并以导爆索全程串接,确保传爆可靠<sup>[3]</sup>。

起爆网络采用非电毫秒微差起爆系统,起爆顺序为掏槽孔先行起爆,随后主爆孔分排延时起爆,最后周边光爆孔同步起爆,形成良好的临空面与轮廓控制。在Ⅲ类围岩中,单循环进尺控制在 3.0~3.5 m;在稳定性较差的Ⅳ类围岩段,循环进尺减小至 1.5~2.0 m,并相应降低单孔装药量。施工初期在代表性洞段开展爆破试验,通过对比不同孔距、装药密度及起爆时序下的开挖轮廓、超挖量及岩面平整度,确定初始参数组合。此后,每循环爆破后由技术人员记录爆破效果,包括岩渣块度、轮廓线偏差及是否存在欠挖或局部剥落,据此对下一循环的装药量、孔距或堵塞长度进行微调,使炸药单耗稳定控制在约 1.11 kg/m<sup>3</sup> 的合理区间内。

### 3.1.3 开挖循环作业流程

导流洞开挖严格执行标准化循环作业流程,具体工序依次为:测量放样→钻孔→装药→联网起爆→通风排烟→安全检查→危石处理→出渣→临时支护→掌子面清理→风水电管线延伸。每道工序衔接紧密,确保施工连续高效。

测量放样采用全站仪进行,每循环开挖前,技术人员放出隧洞中心线、顶拱线、底板高程、两侧腰线及设计轮廓线,并在掌子面上精确标定各炮孔孔位,孔位偏差控制在  $\pm 1$  cm 以内。钻孔作业由经验丰富的钻工分区定岗实施, YT28 手风钻造孔,周边光爆孔严格做到“准、直、平、齐”,孔底高程保持同一设计平面上。装药由持证炮工操作,掏槽孔与主爆孔采用  $\phi 32$  mm 岩石铵梯炸药连续装药,周边光爆孔则将  $\phi 25$  mm 乳化炸药药卷按设计间距绑扎于竹片上,采用

导爆索串接,确保装药位置与线装药密度符合爆破设计要求<sup>[4]</sup>。

装药完成后,按非电毫秒微差起爆网络联网,撤离人员并设置警戒,于安全位置起爆。爆破结束后,立即启动 500 m<sup>3</sup>/min 轴流式通风机向掌子面送风,排烟时间不少于 30 分钟,待洞内空气质量满足安全标准后,由专职安全员与爆破工进入掌子面进行安全检查,重点排查盲炮、松动危石及围岩异常。确认安全后,采用液压反铲或装载机装渣,自卸汽车运输至指定渣场,出渣前对渣堆进行洒水降尘。出渣完毕后,及时施作喷混凝土、挂网或安装钢拱架临时支护,随后人工配合机械清理掌子面及周边杂物,并同步延伸风水电管线至下一循环作业面,为后续钻孔作业创造条件。

### 3.1.4 特殊洞段处理措施

针对导流洞进出口洞口段及Ⅳ类围岩段,施工采取强化技术措施。洞口开挖前,先完成洞脸边坡的清危、挂网喷混凝土及系统锚杆支护,并浇筑钢筋混凝土锁口梁,严格执行“先锁口、再进洞”的施工程序。洞口段前 10 m 范围内,循环进尺控制在 1.5 m 以内,开挖后暂不出渣,立即进行危石清理与初喷封闭,随后安装 I18 工字钢拱架并完成挂网喷混凝土全环支护,支护作业紧随开挖面推进,滞后距离不超过 1 个循环进尺<sup>[5]</sup>。

对于洞身穿越的断层破碎带、软弱夹层等不良地质段,采用导洞超前探测方式,导洞位于主洞拱部,超前主开挖面 12~15 m,通过导洞揭露围岩结构、节理发育及地下水情况。根据探测结果,在主洞开挖前实施超前支护:优先采用  $\phi 42$  mm 热轧无缝钢管小导管,外插角 10°~20°,环向间距 200~400 mm;局部成孔困难段改用自进式中空注浆锚杆,杆体兼作钻杆与锚杆。小导管或锚杆安装后,分两次注入水泥浆及超细水泥~水玻璃双液浆,注浆结束 4~8 h 后方可进行主洞开挖。爆破作业时,单响药量较常规段减少 30%~40%,周边孔采用  $\phi 25$  mm 药卷间隔装药,主爆孔采用松动爆破参数,孔距缩小至 0.6~0.8 m,排距调整为 0.7~0.9 m,起爆网络采用非电毫秒微差延时,确保爆破振动控制在安全阈值内。

## 3.2 水电站导流洞爆破支护技术应用

支护技术是保障导流洞施工安全与结构稳定的关键,需依据围岩分级构建适配的支护体系。通过锚杆、喷混凝土、钢拱架及超前支护的协同应用,及时约束围岩变形,同时依托全过程施工监测动态调整支护参数,确保支护效果与工程安全。

### 3.2.1 支护体系总体设计

支护体系根据围岩类别分级设置。Ⅲ类围岩以系

统锚杆+挂网喷混凝土为主；IV类围岩及洞口段采用“超前支护+钢拱架+系统锚杆+挂网喷混凝土”的联合支护模式。所有支护均在开挖后及时施作，确保围岩变形在可控范围内。此外，III类围岩系统锚杆选用 $\Phi 22$  mm HRB400 螺纹钢，长度2.5 m，间排距 $1.2 \times 1.2$  m，呈梅花形布设；喷混凝土采用C25 配比，厚度10 cm，内铺 $\Phi 6.5 @ 200 \times 200$  mm 钢筋网。IV类围岩系统锚杆长度增至3.0 m，间排距加密为 $1.0 \times 1.0$  m；钢拱架采用I18 工字钢，每榀间距0.8 m，纵向以 $\Phi 22$  mm 钢筋连接，环向间距1.0 m；喷混凝土厚度15 cm，钢筋网规格为 $\Phi 6.5 @ 150 \times 150$  mm。洞口段在IV类围岩支护基础上，增设锁脚锚杆，采用 $\Phi 25$  mm 螺纹钢，长度4.0 m，每榀拱架设4根。

### 3.2.2 锚杆与喷混凝土施工

锚杆采用“先注浆后插杆”工艺为主。钻孔使用D7 液压钻机或YT28 手风钻，孔径大于锚杆直径15 mm 以上。注浆采用YSB~2B 型砂浆泵，水泥砂浆强度等级不低于20 MPa。锚杆材质为HRB400 螺纹钢，孔位偏差 $\leq 100$  mm，孔轴方向垂直于开挖面或按设计要求调整。喷混凝土采用湿喷法施工，混凝土由拌和站集中拌制，运输车运至洞内。喷层厚度5~10 cm，配合比经试验确定，掺加速凝剂以满足初凝 $< 5$  min、终凝 $< 10$  min 的要求。钢筋网在加工厂预制，现场人工安装，喷射时自下而上分段分区进行，确保钢拱架与围岩间空腔被混凝土完全填充。

### 3.2.3 钢拱架与超前支护

IV类围岩段采用I18 工字钢拱架进行初期支护，拱架沿洞轴线间距设置为0.5~1.0 m。所有拱架在加工厂按设计尺寸分节预制，每节端部焊接连接钢板并编号，运至现场后通过高强螺栓拼接，并对连接缝进行满焊加固。安装时，拱架底部必须置于开挖后未扰动的坚硬岩面上，局部凹陷处采用C25 混凝土找平，并在拱脚下方设置 $200 \times 200 \times 10$  mm 钢板支垫，防止应力集中导致下沉。拱架两侧与系统锚杆焊接固定，锚杆端头弯折后与拱架腹板贴焊，确保整体受力。纵向采用 $\Phi 22$  mm HRB400 钢筋作为连接筋，环向间距1.0 m，与拱架翼缘满焊。拱架安装完成后，立即挂设 $\Phi 6.5 @ 150 \times 150$  mm 钢筋网，并采用湿喷机分层喷射C25 混凝土，喷层厚度不小于25 cm，确保拱架完全包裹，形成封闭的柔性承载结构。

超前支护采用 $\Phi 42$  mm 热轧无缝钢管制作的小导管，单根长度3~5 m，沿开挖轮廓线外插角 $10^\circ \sim 20^\circ$  钻孔顶入，环向间距200~400 mm。小导管前端加工成锥形，管壁梅花形布设 $\Phi 6$  mm 注浆孔，间距

15 cm。注浆分两次进行：第一次注入水灰比1:1 的纯水泥浆，注浆压力0.5~1.0 MPa；第二次注入超细水泥与水玻璃双液浆（体积比1:1），水玻璃模数2.4~3.0，浓度30~35 Be'。注浆结束后静置4~8 h，待浆液初凝后方可进行开挖作业，并在掌子面前方保留1.5~2.0 m 未开挖岩体作为止浆墙。

### 3.2.4 施工监测与动态调整

施工全过程实施围岩变形监测。每循环开挖支护完成后24 小时内，在拱顶及两侧边墙布设收敛测点，采用全站仪或收敛计监测拱顶沉降与水平收敛变形。测点埋设牢固，编号清晰，初始读数在支护完成后2 小时内完成。IV类围岩段及断层破碎带加密布点，纵向间距5 m，观测频率为每日1 次；III类围岩段纵向间距10 m，观测频率为每2 日1 次。所有监测数据由专人记录并录入电子台账，每日进行趋势分析。当单日收敛速率超过2 mm/d 或累计变形量超过设计预警值（拱顶沉降30 mm、净空收敛40 mm）时，立即暂停掌子面开挖，组织技术、安全、测量人员现场会商，采取增设临时横撑、补打锚杆、加厚喷层或调整钢拱架间距等加强措施。同时，每月对监测仪器进行1 次校准，确保数据精度；监测台账同步上传至项目管理平台，实现建设、监理、施工三方实时共享，确保整体工程的稳定。

## 4 结束语

刚果（金）Nzilo1 水电站导流洞工程通过科学的爆破开挖设计与分级支护技术，成功克服了复杂线形、多变围岩及海外施工等多重挑战。实践表明，“新奥法”指导下的短进尺弱爆破、光面爆破控制、钢拱架联合支护及动态监测体系，是保障导流洞安全高效施工的有效技术路径。该工程经验对类似海外水电项目具有良好的参考价值。

## 参考文献：

- [1] 李荣军. 引汉济渭三河口水利枢纽导流洞工程开挖技术研究[J]. 科技创新与应用, 2017(27):46-47.
- [2] 陈忠伟. 导流洞开挖支护施工技术[J]. 建筑技术开发, 2022,49(22):39-41.
- [3] 郭信义. 浅孔微差爆破技术在后孟水库导流洞开挖中的应用[J]. 水利科技, 2021(01):60-62,75.
- [4] 蒋森林, 江钧雄, 杜宇杰. 特大导流洞群中隔墙塌方处理及安全爆破开挖关键技术[J]. 四川水利, 2023,44(02):56-60.
- [5] 阮国府. 巴勒水电站导流洞围堰爆破拆除施工技术[J]. 四川水利, 2024,45(06):60-64.