

Research on Excavation and Support Technology of High Heel Stress Extra Large Underground Cavern Group at Baihetan Hydropower Station

Wanqi Jiang

powerchina Eco-Environment Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518100, China

Abstract

Baihetan Hydropower Station's left bank ground plant is a large-scale cross-section cavern. The scientific and reasonable excavation and support plan is the key factor to ensure the safety, progress and quality control of the cavern.

Keywords

high ground stress; extra large; underground caverns; excavation support

白鹤滩水电站高地应力特大型地下洞室群开挖与支护技术研究

姜万齐

中电建生态环境集团有限公司, 中国·广东 深圳 518100

摘要

中国白鹤滩水电站左岸地厂为特大型断面洞室, 其洞室集中了“跨度大、走向长、埋层深、地应力高”等特点。科学合理的开挖支护方案是保证洞室安全、进度和质量受控的关键因素。

关键词

高地应力; 特大型; 地下洞室群; 开挖支护

1 引言

中国西部开发战略的实施, 加快了水电项目的开发, 近 10 多年以内开工建设的大型水电站均主要分布于西部高山峡谷地区, 这些水电站大多选择为深埋式地下厂房构筑物, 如在建的白鹤滩水电站左岸地下厂房洞室水平埋深 800 ~ 1050m, 垂直埋深 260 ~ 330m。对白鹤滩水电站地下洞室开挖与支护方案的研究可为工程建成后的洞室围岩稳定提供依据, 也可为中国其他水电站建设项目提供技术参考。

2 概述

2.1 工程概况

本技术主要针对左岸厂房 EL562.90 ~ EL531.40 共计 31.5m 的开挖、支护施工进行研究。左岸地下厂房布置在拱

坝上游山体内部, 主要包括主副厂房、主变室及母线洞等洞室群。主副厂房按“一”字型布置, 从南到北依次布置副厂房(长 32.00m)、辅助安装场(长 22.50m)、机组段(长 304.00m, 机组间距 38.00m)和安装场(长 79.50m), 总长度为 438m, 最大高度 88.7m。

2.2 工程地质

围岩主要由 $P_2\beta_2^3$ 和 $P_2\beta_3^1$ 层新鲜的隐晶质玄武岩、斜斑玄武岩、杏仁状玄武岩、角砾熔岩等组成, 以 III₁ 类、II 类围岩为主。斜切边墙底部的 $P_2\beta_2^4$ 层凝灰岩及其中的层间错动带 C_2 岩性软弱, 易产生一定程度的塑性变形和剪切变形。 $P_2\beta_2^3$ 第二类柱状节理玄武岩分布在⑤~⑧机窝。层间错动段 C_2 及柱状节理裂隙等复杂地质条件, 与结构面切割后形成不稳定块体易发生塌方和掉块^[1]。

3 开挖技术方案的选定

3.1 开挖分层、分区

根据厂房的结构特点、通道条件、机械性能,并兼顾支护施工等,左岸厂房 EL562.90 ~ EL531.40 采用薄层开挖的方式进行施工。集水井分 3 大层(8 序)、1# 机窝分 3 大层(10 序)、2 ~ 8# 机窝分 3 大层(9 序)进行开挖支护施工。各层开挖工程总量为 12.60 万 m³。

3.2 施工工艺

左岸厂房 EL562.90 以下开挖施工工艺流程如下:

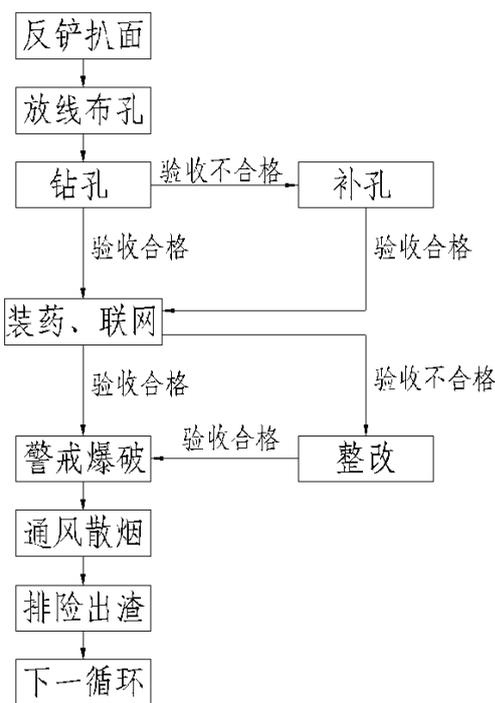


图 1 开挖施工工艺流程图

3.3 爆破试验

3.3.1 试验目的及部位

为确定适用于 EL562.90 ~ EL557.40 高程的开挖方法和爆破参数,以保证 EL562.90 ~ EL557.40 结构面成型质量。特选取 8# 机窝第 VIII -2 层作为试验区,进行竖向预裂、竖向光爆和水平光爆对比试验。

3.3.2 试验参数

试验区顺水流方向长 12m,分 3 个循环,每个循环长度 4m。

竖向预裂孔间距 50cm,孔深 400cm,分 3 组进行对比装药,每组 8 孔。竖向光爆孔间距 50cm,孔深 400cm,分 2 组

进行对比装药,每组 8 孔。

水平光爆孔间距 45cm;主爆孔间距 110cm,排距 110/120cm;缓冲孔距结构面 50/60cm,间距 80cm;底板孔间距 80cm。炮孔均人工采用 YT-28 手风钻造孔,并借助导向样架进行孔向控制,孔径 42mm,孔深 400cm。

竖向预裂孔分 3 组进行装药,线装药密度分别为 350g/m、375g/m、400g/m。竖向光爆孔分 2 组进行装药,线装药密度分别为 96g/m、121g/m。水平光爆孔线装药密度为 75g/m。主爆孔单孔装药量 2.4kg,缓冲孔、底板孔单孔装药量 1.9kg。炸药单耗 0.58 ~ 0.59kg/m³。

在实施过程中,试验部位可根据现场条件进行适当调整。

3.3.3 技术要求

根据《白鹤滩水电站左岸引水发电系统地下洞室群开挖支护施工技术要求(BHT/0416)》的相关规定,预裂及光面爆破的效果应达到以下要求:

(1) 残留炮孔痕迹应在开挖轮廓面上均匀分布,炮孔痕迹保存率:完整岩石在 80% 以上,较完整和完整性差的岩石不小于 60%,较破碎和破碎岩石不小于 20%。

(2) 相邻两孔间的岩面平整,孔壁不应有明显的爆震裂隙。

(3) 相邻两茬炮之间的台阶或预裂爆破孔的最大外斜值,不应大于 15cm。

(4) 预裂爆破后,必须形成贯穿连续性的裂缝。

3.3.4 爆破振动监测

爆破振动监测采用传感器和自记仪进行监测,在待测部位(岩体)进行爆破质点振动速度监测,然后通过专用分析软件对已采集的数据进行分析计算^[2]。

根据《关于明确左岸地下厂房下部开挖支护具体技术要求的设计通知》规定,爆心距 R=10m 时,实测质点振动速度不大于 7cm/s。

3.3.5 试验总结

试验结束后,分析、对比各组爆破试验效果,确定适用的爆破方式和爆破参数。

3.4 爆破设计

3.4.1 环向预裂爆破

厂房下部装渣导洞对应范围内下游第 VIII -5 区(2 ~ 8# 机窝)、第 VIII -6 区(1# 机窝)边墙结构面需进行环向预裂。

环向预裂孔分为两部分,一部分自上而下采用 QZJ100B 手风钻造孔,孔深 3m,孔径 42mm,孔间距 40cm。孔底采用 1 节 A32 药卷加强装药,正常装药段为 7 节 A25 药卷间隔 10cm 装药,孔口采用粘土堵塞,堵塞长度 63cm,线装药密度 300g/m。

另一部分自下而上采用多臂钻造孔,孔深 4.7 ~ 5.36m,孔径 64mm,孔间距 40cm。孔底采用 1 节 A32 药卷加强装药,正常装药段为 13 ~ 15 节 A25 药卷间隔 10cm 装药,孔口采用编织袋堵塞,堵塞长度 47 ~ 51cm,线装药密度 318g/m。

环向预裂孔采用竹片间隔装药、导爆索传爆。自上而下、自下而上两个起爆网络应采用导爆索连接,保证对应部位上、下预裂孔同时起爆。

3.4.2 光面爆破

除节环向预裂范围、左厂下 0+6.25 ~ 左厂下 0+11 (EL562.90 ~ EL557.40) 结构面进行竖向预裂或竖向光爆(根据爆破试验确定)外,其余结构面光面爆破。井挖段结构面为竖向光爆孔,其余部位结构面均为水平光爆孔。

(1) II、III 类围岩

II、III 类围岩情况下,循环进尺 4m。

水平光爆孔采用 YT-28 手风钻造孔,孔径 42mm,孔间距 45cm,孔深 400cm。边墙光爆孔线装药密度 75g/m,底板光爆孔线装药密度 117g/m。

竖向光爆孔采用 YT-28 手风钻造孔,孔径 42mm,孔间距 50cm,孔深 385cm。竖向光爆孔线装药密度 117g/m。

光爆孔采用竹片间隔装药、导爆索传爆;主爆孔和缓冲孔采用非电雷管引爆。

装药参数应根据现场实际揭露情况和爆破试验进行优化。

(2) 不良地质段

围岩为 IV 类、V 类、揭露 C₂ 层间错动带或发育第二类柱状节理玄武岩时,循环进尺 2.5m。

光爆孔采用 YT-28 手风钻造孔,孔径 42mm,孔间距 45cm,孔深 250cm。边墙光爆孔线装药密度 64g/m,底板光爆孔线装药密度 107g/m。

装药参数应根据现场实际揭露情况和爆破试验进行优化。

3.5 声波测试

爆破时,需进行声波测试,确定松动圈范围。声波测试在保护层开挖时进行,共测试 3 组。采用单孔测试,孔深为

15m,孔径 A76mm,下倾 10°,以保证测试时测试孔内能存水,使耦合效果良好。测试孔采用多臂钻造孔。在爆破开挖前先进行爆前测试,爆后形成轮廓面后,再进行测试,进行爆前爆后波速对比,以确定围岩松动圈范围。测试结束后,声波孔采用 M35 砂浆封堵。声波测试孔具体布置见图 2。

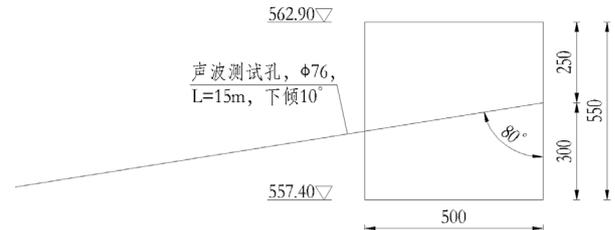


图 2 声波测试孔布置图

3.6 施工方法

3.6.1 机窝及集水井平推施工

手风钻平推分中槽开挖和两侧结构面保护层开挖,保护层滞后中槽开挖不超过 10m。

(1) 扒面

采用 1.6m³ 液反铲对准备钻孔的作业面进行清理,清除挂渣、松动石块等。

(2) 放线布孔

施工测量采用全站仪进行,测量由专业人员认真进行,测量仪器必须经过鉴定后方可使用,每个月进行一次测量检查,复测,确保测量控制工序质量。

(3) 钻孔

爆破孔采用 YT-28 手风钻钻孔,钻孔直径 42mm。钻孔孔位依据测量放线确定。每个钻手按“平、直、齐”的要求施钻,使用熟练的钻手负责光爆孔,严格按照爆破设计进行施钻。倾角采用坡度尺进行控制,严格按照设计孔深钻孔。

左厂下 0+6.25 ~ 左厂下 0+11 (EL562.90 ~ EL557.40) 结构面竖向预裂孔或竖向光爆孔孔底技术超挖 35cm,方便下一循环施钻。

(4) 装药、联线、起爆

炮孔经检查合格后,方可进行装药爆破;炮孔的装药、堵塞和引爆线路的联结,由经考核合格的炮工,严格按监理工程师批准的爆破设计进行施作。

装药严格遵守安全爆破操作规程。装药前,先用 PVC 管或其他工具检查炮孔有无堵孔的情况,以便及时进行洗孔。

然后由专业炮工根据爆破设计进行每孔孔内非电雷管分发。装药的炮工则根据爆破设计装药量进行装药,孔内延期雷管及时装入。装药完成后,采用粘土进行堵孔,堵塞长度按照爆破设计执行。同时,炮工根据爆破设计进行孔外网路连接^[3]。

最后由炮工和值班技术员复核检查,确认无误,撤离人员和设备并做好相邻工作面的警戒工作,炮工负责引爆。

(5) 通风、散烟

爆破后,启动厂房和尾水系统的系统通风机进行通风,自然通风为辅。

(6) 排险

爆破通风散烟结束后,由 1.6m³ 液压反铲清撬松动岩块及危石,以确保后续作业人员和设备的安全。在施工过程中,经常检查已开挖洞段的围岩稳定情况,清撬可能塌落的松动岩块。

(7) 出渣

开挖渣料采用 1.6m³ 液压反铲或 3.0m³ 侧卸式装载机配 25t 自卸汽车出渣。

3.7 不良地质洞段施工方法

(1) 根据爆破试验情况和实际揭露围岩情况优化爆破设计。

(2) 边墙揭露后及时跟进系统支护,按照设计图纸做好加强支护。

3.8 结构面成型控制方法

厂房 EL562.90 以下设计开挖结构体型复杂,成型困难。为保证成型质量,控制方法如下:

(1) 开挖前,按设计图纸要求做好锁口支护。

(2) 控制样架搭设精度,样架导向管角度应按技术措施进行控制。

(3) 设计开挖体型变化部位,做好周边孔造孔质量控制。选用技术过硬的钻工进行周边孔钻孔施工,做到孔间距相等、孔向互相平行、孔底处于同一铅直面上。不合格的炮孔在爆破前采用水泥砂浆封堵^[4]。

(4) 严格按照措施中爆破设计进行装药,爆破装药参数可根据爆破试验和现场实际情况进行调整。

(5) 每次爆破后,进行炮后分析、总结,为下一循环开挖爆破提供合理的爆破参数。

4 支护技术方案的选定

厂房 EL562.9 以下支护项目主要有:初喷 CF30 纳米钢纤维混凝土、初喷 C25 混凝土、挂钢筋网 A8@15cm×15cm、复喷 CF25 纳米混凝土、复喷 C25 混凝土、Φ32, L=6m 普通砂浆锚杆、Φ32, L=9m 普通砂浆锚杆, Φ32, L=6m, T=100KN 预应力锚杆、Φ32, L=9m, T=100KN 预应力锚杆等。

支护原则:初喷混凝土应紧跟掌子面,系统锚杆支护滞后 1~2 个循环(不大于 3 天),挂网复喷混凝土滞后掌子面不大于 30m(不大于 15 天),锚索张拉滞后掌子面不大于 60m。

4.1 喷混凝土施工

4.1.1 施工工艺

喷混凝土施工与开挖、锚杆施工跟进平行作业。施工工艺为:

(1) 施工准备

埋设好厚度控制标志,作业区有足够的通风照明,喷前检查所有机械设备和管线,确保施工正常。

(2) 拌和及运输

拌和配料严格按试验确定的配合比精确配制搅拌,搅拌时间足够,拌合料用混凝土搅拌机运输施工现场。

(3) 清洗岩面

撬挖后的岩面,先用高压风水分区进行冲洗。开喷以前对有微渗水岩面要进行风吹干燥。

(4) 分层喷射及复喷

喷射混凝土沿一定方向分区、分块、分薄层均匀施喷,避免回弹料覆盖未喷面。喷头距施喷面 0.6~1.0 米,喷射推进行有序,尽量减少回弹,刚喷射完的部分进行喷厚检查不满足厚度要求的,及时复喷处理。

(5) 养护、检测

喷射混凝土终凝 2 小时后,喷水养护,养护时间一般部位为 7 天,重要部位为 14 天。对喷层厚度及喷混凝土的强度检测,符合设计要求。

4.1.2 施工方法

喷混凝土施工前采用高压风水联合清洗岩面,12m³ 混凝土罐车从拌和站运料至工作面供料。1~8# 机窝井挖段(EL557.4~EL549.7)和检修排水廊道采用混凝土喷射机喷

混凝土；其余部位采用湿喷台车喷混凝土，分层喷至设计厚度。施工程序为：初喷混凝土→系统锚杆安装→钢筋网片、龙骨筋安装→复喷混凝土→预应力锚索施工^[5]。

4.2 锚杆施工

4.2.1 普通砂浆锚杆施工

1~8#机窝井挖段(EL557.4~EL549.7)边墙普通砂浆锚杆采用“先插杆、后注浆”工艺，人工安装普通砂浆锚杆工艺如图3。



图3 “先插杆、后注浆”施工工艺流程图

除上述所述范围采用“先插杆、后注浆”工艺外，其余普通砂浆锚杆采用“先注浆、后插杆”工艺，人工安装普通砂浆锚杆工艺如图4。



图4 “先注浆、后插杆”施工工艺流程图

(1) 测量放线、锚孔定位

基础验收合格后，按照设计要求或现场监理工程师指令放好锚杆孔位、角度，并用红油漆作好标记，钻孔时严格按设计角度开钻，严格控制钻孔质量。

(2) 钻孔、吹洗孔

锚杆孔主要采用多臂钻进行造孔，钻孔直径64mm；局部多臂钻不具备施工条件时，采用液压钻D7/JK590/CM351造孔，钻孔直径90mm。钻孔孔位偏差不大于150mm，孔深偏差不大于50mm。钻孔完成后用高压水枪或风枪将孔清洗干净，作好记录经验收合格再进行锚杆安装。

(3) 锚杆安插及注浆

①先插杆、后注浆

采用“先插杆、后注浆”工艺时，锚杆结构图如图5。人工或人工借助吊车平台进行锚杆安装。砂浆按试验室提供的配比拌制，施工时将注浆管插入距孔底50~100mm，排气管的里端应深入锚杆孔距孔底30~50mm，注浆时须待排气管出浆或不再排气时方可停止。

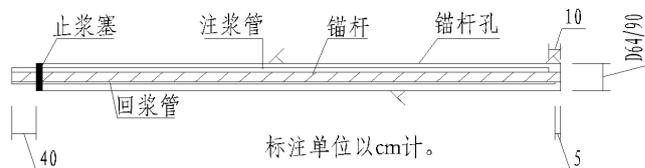


图5 “先插杆、后注浆”锚杆结构图

采用“先插杆、后注浆”工艺时，注浆管采用内径15mmPVC管，回浆管采用内径8mm硬质塑料管。

②先注浆、后插杆

人工或人工借助吊车平台进行锚杆安装。砂浆按试验室提供的配比拌制，注浆时将注浆管插至孔底，然后回抽5~10cm，在灌浆压力下慢慢将注浆管拔出，保证注浆饱满。

(4) 无损检测

锚杆安插完成，砂浆达到龄期后进行无损检测，抽检数量每作业区不小于10%，杆体孔内长度大于设计长度的95%为合格。

4.2.2 预应力锚杆施工

预应力锚杆施工工艺：锚固段采用药卷速凝锚固剂，采用锚固喷枪输送药卷，速凝锚固剂注装完毕后进行锚杆及附件安装，等强后采用20T扭力扳手进行锚杆张拉，超张拉持荷锁定。张拉完成后，进行自由段灌浆。

(1) 杆体制作

预应力锚杆杆体按设计要求在施工局综合加工厂加工，自卸汽车运至施工现场。锚杆体整根钢筋加工，不得采用焊接加长。杆体端部采用套丝机加工20cm长的丝口。加工好的杆体按规范要求检查验收，验收。锚垫板尺寸为200mm×200mm×8mm，在施工局综合加工厂进行加工，从专业厂家购买与锚杆杆体丝扣配套的M32螺母，并经验收合格后用于本工程。

锚杆增设止浆环，止浆环安装在距孔底端3m处，并在锚杆自由段安装进浆管和回浆管，进浆管采用内径15mmPVC管，回浆管采用内径8mm硬质塑料管，回浆管距止浆环15cm，进浆管深入孔内约30cm，进、回浆管通过在锚垫板上预留孔引出孔外。

(2) 造孔

采用全站仪进行精确放样，采用多臂钻进行造孔，造孔孔径为A64mm；或采用液压钻D7/JK590/CM351造孔，钻孔直径90mm。为控制孔向及倾角，开孔前用罗盘对凿岩机导轨的方向及倾角进行测量，合格后，用半功率开孔，开孔深度

达0.5米时,再次对孔向及倾角进行复核,确保无误后,采用全功率钻进,直至钻孔结束。对孔深的控制,一般在钻杆上作好标记,施钻结束后,采用风或水联合对钻孔进行清洗,然后检测孔深,合格后,进行孔口保护,移交下道工序。孔位偏差不大于15cm,孔斜误差不得大于孔深的5%,造孔深度达到设计要求,孔深误差不得大于5cm。

(3) 锚杆灌注张拉

①速凝锚固剂注浆

药卷锚固剂采用锚固剂喷枪进行注浆,安装锚固剂药卷前,安装人员先用杆体试探钻孔的深度,并做出标记。根据设计锚固段长度和钻孔孔径,用体积公式算出药卷用量。药卷入孔前应根据所选用的锚固剂出厂使用说明书用清水浸泡(40~70s),然后将锚固剂药卷装入专用的锚固喷枪,最后将喷枪送至孔内预定位置,扳动扳机,将锚固剂药卷均匀打入孔内,同时退出喷枪。

②锚杆安装

a 安装锚杆:锚杆安装前,先检查锚杆止浆环、进浆管、回浆管是否安装到位,加固是否满足要求,然后进行锚杆安装施工。锚杆安装利用吊车平台配合人工进行将杆体缓慢推至设计位置,然后采用木楔将孔口临时固定(木楔完全打入孔内)。杆体必须在速凝锚固剂初凝前安装到位,理论初凝时间为55min。

b 安装托板、垫圈(球形垫)和螺帽:速凝锚固剂初凝后,开始安装锚杆体托板、垫圈和螺帽,并调整托板位置使之与锚杆轴线垂直。若岩面采用球形垫也难以调平螺母与球形垫板平行,可采用适量速凝锚固剂药卷垫平。在进行锚垫板调平加固时,注意保护进、回浆管不被弯折和破坏。

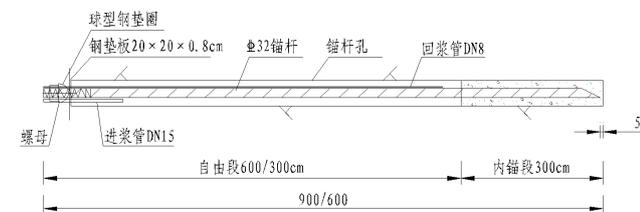


图6 预应力锚杆结构布置图

c 张拉:锚杆的张拉锁定应在速凝锚固剂强度(含垫板后找平水泥卷)达到20MPa后进行,预应力锚杆采用20t扭力扳手进行张拉。

张拉施工前,将张拉机具按设计要求进行率定。然后移

机就位进行张拉。预应力锚杆正式张拉前,先按照20%设计张拉荷载对锚杆进行预张拉1~2次,使其各部位接触紧密,然后分别以设计荷载的50%、75%、105%逐级张拉,每级持荷5分钟,测读相应的杆体伸长值,并做好记录。当加荷至1.05T(T=100kN)杆体伸长值无变化时,持荷锁定,然后卸荷,撤除机具。锚杆锁定后48h内,若发现预应力损失大于锚杆设计值的10%时,进行补偿张拉。张拉力的大小必须满足设计要求,张拉锚杆拧紧螺帽的扭矩不应小于100N.m。

d 自由段灌浆:自由段注浆通过进浆管按照普通砂浆锚杆注浆工艺进行注浆施工,砂浆配合比按照洞内普通砂浆锚杆执行。

4.3 钢筋网施工

厂房EL562.9以下系统挂网参数为A8mm@15cm×15cm。钢筋网按设计编制、接头采用点焊或绑扎,尽可能采用现场绑扎网筋,网筋与岩面大致密贴,利用插筋固定,人工借助吊车平台或施工排架安装。两片网间搭接不小于20cm。钢筋网与岩面距离不得大于30mm。

5 结语

目前,由中国电建集所属工程局施工的白鹤滩水电站左岸地下厂房开挖支护已全面结束,开工至今洞内未发生一起安全事故。除加强平时的安全监测和按设计要求施工以外,上述方案的实施取得了重大成功,为今后中国类似的地下洞室开挖项目积累了丰富的施工技术经验,具有一定的借鉴意义,但应注意以下几个问题:对于洞挖方案的选择,应根据围岩地质条件的变化作出合理的调整,不可盲目冒进施工,也不可按部就班固定施工,需从安全、经济、工期等方面综合考虑作出决定。每一洞段开挖完成后,围岩内部应力会发生变化,需及时进行系统支护,增强围岩稳定性。支护作业需考虑与开挖的相互影响,支护不能跟进掌子面太近,避免影响开挖,也不能滞后开挖太远,出现开挖等支护的现象,应综合考虑保证开挖与支护的连续作业。

参考文献

- [1] DL/T 5099-2011 水工建筑物地下工程开挖施工技术规范[S].
- [2] DL/T 5181-2015. 水电水利工程锚喷支护施工规范[S].
- [3] GB 5036. 特种作业人员安全技术考核管理规则[S].
- [4] JCJ 46-2012. 施工现场临时用电安全技术规范[S].