

抽水蓄能电站引水长斜井扩挖及支护施工技术

侯 炼

(中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 针对抽水蓄能电站引水隧洞斜井扩挖施工过程中所面临的程序复杂、施工难度大、安全风险高等问题, 以厦门某抽水蓄能电站为例, 探讨了引水长斜井扩挖的关键技术, 包括优化引水长斜井扩挖施工程序与方法, 合理布置扩挖施工平台与提升系统, 以及制定有效的扩挖堵井预防与处理措施。通过这些关键技术的综合运用, 该工程的扩挖最大月进尺达 96 m, 实现了引水长斜井扩挖施工的安全化与快速化。

关键词: 引水长斜井; 扩挖施工; 提升系统; 堵井预防; 抽水蓄能电站

中图分类号: TV554

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)S1-0159-05

Construction technology for expansion excavation and support of long inclined shaft for water diversion in pumped storage power station//HOU Lian(*Sinohydro Engineering Bureau 8 Co., Ltd., Changsha 410004, China*)

Abstract: In view of the problems such as complex procedures, high construction difficulties, and high safety risks during the expansion excavation process of inclined shafts in the water diversion tunnels of pumped storage power stations, taking a pumped storage power station in Xiamen City as an example, this paper discusses the key technologies for the expansion excavation of long inclined shafts, including optimizing the construction procedures and methods for the expansion excavation of long inclined shafts, reasonably arranging the construction platforms and lifting systems for the expansion excavation, and formulating effective preventive and treatment measures for shaft blockage during the expansion excavation. Through the comprehensive application of these key technologies, the maximum monthly progress of the expansion excavation in this project reached 96 m, achieving the safe and rapid construction of the expansion excavation of the long inclined shaft in the water diversion tunnel.

Key words: long inclined shaft for water diversion, expansion excavation construction, lifting system, prevention of shaft blockage; pumped storage power station

抽水蓄能电站因其自身功能及布置特点, 其引水系统常设有斜井段。斜井开挖在施工难度和安全风险方面均远高于平洞和竖井开挖。斜井长度较长, 对钻孔的精度要求高, 控制难度大。斜井扩挖支护的施工难度大, 安全风险高, 工作效率低下。此外, 扩挖控制测量的难度大, 对施工设备机具的性能要求更高。因此长斜井施工常常成为工程的重点和难点。斜井开挖施工常采用全断面开挖法和先开挖导井再扩挖成型法这两大类^[1-4]。本文以厦门某抽水蓄能电站为例, 分析了在复杂地质条件下导孔精准贯通、斜井扩挖爆破参数优化、扩挖支护提升系统安全高效施工、溜渣堵井的预防与处理等关键技术, 从而确保了抽水蓄能电站早日实现发电的既定目标。

1 厦门某抽水蓄能电站概况

1.1 工程概况

厦门某抽水蓄能电站主要由上水库、输水系统、

地下厂房系统、地面开关站以及下水库等建筑物组成。输水系统采用二洞四机的布置形式, 连接上、下库进/出水口的输水系统全长约为 2 764.2 m (沿 1 号机输水系统长度), 其中引水系统的长度约为 1 245.3 m。引水系统分为上、下两级的斜井布置, 共计 4 条。引水上平洞、中平洞、下平洞分别以 1 号、2 号、3 号施工支洞作为施工通道开展施工。上、下斜井的长度分别为 385 m 和 352 m, 斜井中轴线与水平线之间的夹角为 55°, 上、下斜井开挖断面呈现出 5 m×8.1 m (宽×高) 和 5 m×6.7 m (宽×高) 的马蹄形断面。厦门某抽水蓄能电站引水系统布置如图 1 所示。在前期施工中, 均运用定向钻机+反井钻机反拉的方式构建出直径为 2.5 m 的导井, 待导井成型后, 采用自上而下的方式进行全断面扩挖。上、下斜井的支护型式主要为锚喷支护; II 类围岩段采用随机支护, III、IV 类围岩段采用系统支护, 在 IV 类围岩

段增设钢筋拱肋以加强支护。锚杆的长度为 3.0~4.5 m,喷混凝土的厚度为 8~12 cm。

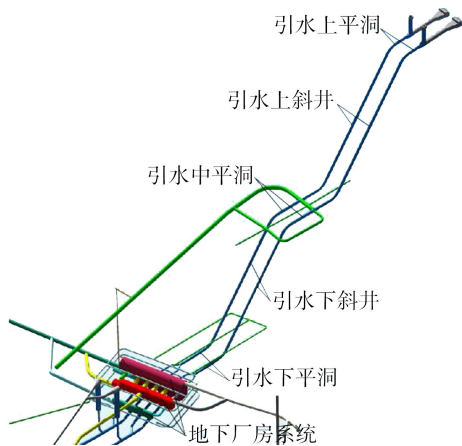


图 1 厦门某抽水蓄能电站引水系统布置

1.2 工程地质

引水上斜井的围岩主要为晶屑熔结凝灰岩,呈现微风化状态,具有块状结构,岩体完整性为完整~较完整。岩石的饱和抗压强度为 80~100 MPa。尽管局部区域岩体完整性较差或较为破碎,但断层等不利地质构造并不发育,仅有小断层 f19 穿过上斜井的中下部,该断层带内为碎裂岩,与上斜井的洞向呈大角度相交,对围岩的稳定性影响相对较小。围岩节理发育程度为轻度,节理与断层组合在洞顶可能导致小掉块,因此在开挖时应及时采取支护措施。围岩类别以 II、III 类为主,断层带附近则为 IV 类。围岩整体基本稳定,但断层及局部区域稳定性较差,需及时进行支护。上斜井位于地下水位以下,岩体透水性呈微~极微,局部存在导水节理,在开挖时局部区域可能会产生线状流水,因此需做好抽排水措施。

下斜井的围岩处于微风化~新鲜状态,呈现块状结构,岩体完整性以完整~较完整为主,岩石的饱和抗压强度为 80~100 MPa。尽管局部区域岩体完整性较差或较为破碎,但中倾角断层等不利地质构造未显著发育,不过可能存在 NWW 向或 NEE 向的陡倾角小断层,这些小断层与洞向呈大角度相交,对洞壁的稳定性影响较小。下斜井围岩的节理发育程度为轻度~中等,局部中倾角节理在洞顶可能导致小掉块,因此在开挖时应及时采取支护措施。围岩类别以 II、III 类为主,断层带附近则为 IV 类,围岩整体基本稳定,但局部不利组合节理的稳定性较差,需及时采取支护措施。下斜井位于地下水位以下,岩体的透水性呈微~极微,在钻孔深度约 291m 处(隧洞底板下方约 15 m)发现有承压水,长探洞显示个别 EW 向节理具有导水作用,在开挖时局部可能会产生线状流水,因此需做好抽排水措施。

2 长斜井导井开挖及扩挖分段施工程序

在完成各条斜井的导井开挖作业后,将依次进行斜井扩挖与支护施工。导井施工流程分为四个阶段:准备阶段、导孔钻进阶段、扩孔阶段以及收尾阶段,具体流程见图 2。

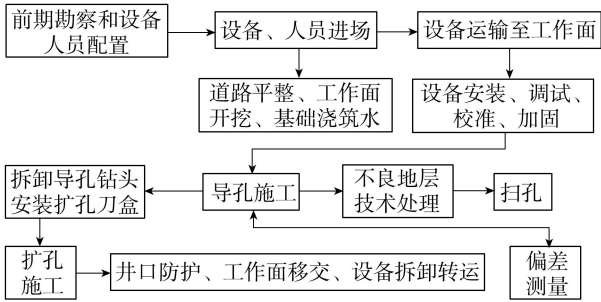


图 2 导井开挖流程

斜井扩挖作业分为上、下两段进行,首先进行斜井前段 60 m 区域的扩挖及支护施工,随后再对斜井自 60 m 处往后部分进行扩挖及支护施工。

在扩挖作业的初始阶段,施工重点在斜井上弯段的扩挖及支护上,完成后继续进行前 60 m 直线段的扩挖及支护施工。同时,在上平洞内进行扩挖台车的组装、临时轨道的铺设以及绞车的安装与调试工作,随后将扩挖台车放置在临时轨道上并加以固定。前段 60 m 区域的扩挖及支护施工完成后,对轨道进行延伸,将扩挖台车下放至井内,然后拆除临时轨道,进行钢平台及运输小车的安装,并且安装用于测量的激光导向仪,最后进行整个提升系统的安装和调试。待上述附属设施全部安装完成后,随即利用扩挖台车进行斜井自 60 m 处往后部分的扩挖及支护施工。

3 长斜井扩挖及支护施工方法

3.1 斜井前段 60 m 区域扩挖

在斜井前段 60 m 区域扩挖施工期间,上下交通采用临时爬梯。在每次施工循环中,除了扒渣时段外,导井口均利用井盖进行封闭。斜井采用全站仪等测量仪器直接进行测量导向,并对最终的掌子面进行测量复核,以确保无欠挖现象,同时标记出设计断面。

引水斜井前段 60 m 区域采用从上至下的全断面爆破开挖方式,使用 YT28 手风钻进行钻孔作业,周边采用光面爆破技术。其中,周边孔的孔距为 40~50 cm,采用不耦合间隔装药工艺;崩落孔的孔距为 80~110 cm,采用直径为 32 mm 药卷连续装药。II、III 类围岩的循环进尺为 2.7 m,IV 类围岩的循环进尺为 1.8 m。

在实施爆破作业前,应将距离掌子面 10 m 范围

内的轨道拆除,待爆破作业结束后,再通过爬梯以人工方式进行轨道的重新安装。爆破作业完成后,排烟主要依靠自然通风,同时利用原支洞已经布置的通风系统加强通风。

在最初两个开挖循环中,由于开挖面积较大,部分区域与导井的距离较远,因此需使用 1.0 m³ 的反铲在上方平洞开展装车作业,将渣料运送至骨料中转场外。而在后续的各个循环中,则采用人工扒渣的方式,使渣料经由导井下落至下方平洞,随后使用 3 m³ 装载机配合 20 t 自卸汽车将渣料运至下库骨料中转场。下部出渣作业必须待上部扒渣完成且井口封闭后才能进行。此外,平洞出渣作业必须及时执行,以防止堵井。

3.2 斜井自 60 m 处往后部分扩挖

3.2.1 作业平台及提升系统布置

在斜井前段 60 m 区域开挖作业完成后,随即进行作业平台及提升系统的安装。其涵盖的项目包括轨道安装、扩挖台车的就位、载人运料小车的配备、钢支架平台的搭建、双筒绞车牵引系统的构建、导井盖板的设置等。

首先在斜井的上弯段布置扩挖台车的临时轨道与卷扬机,利用卷扬机将扩挖台车下放至斜井直段轨道上并锁定。接着,在上弯段搭建钢平台,同时在上平洞处安装绞车。待绞车安装完成后,利用绞车把载人运料小车下放至斜井直段轨道上并锁定。随后,进行托辊及液压平衡油缸的安装,并对双筒绞车牵引系统进行调试。在提升系统通过验收后,便开始斜井自 60 m 处以后直线段的正常扩挖施工。

扩挖台车采用槽钢焊接制作而成,其整体结构由槽钢骨架、防护栏杆、人行步梯以及轨道轮组成,自重约为 5.12 t。考虑到施工、人员、设备、材料荷载以及安全系数等因素,采用 12 t 双筒绞车进行提升操作,并且在运行期间严禁载人以及超载行为。根据不同的功能需求,台车被划分为三个层级:顶层作为支护平台和防护平台,有效防止井壁掉块对下层施工人员造成伤害;中层为支护作业平台;底层为钻孔作业平台。台车底部设置有导井盖板,台车的上下层之间通过面层进入孔和台车内部设置的钢格栅踏步梯作为上下通道,进入孔处配备可翻转的盖板,以确保施工安全。

载人运料小车采用槽钢焊制而成,其整体结构由槽钢骨架、防护栏杆、人行步梯、混凝土料斗、钢筋料斗以及轨道轮组成,自重约为 2.25 t,采用 8 t 双筒绞车进行提升操作,运行时严禁超载。该运料小车具有多种功能,既可运送人员往返于上弯段至开挖支护工作面,又能在喷锚支护作业中运送喷锚料、锚

杆、钢筋网及钢筋拱肋等支护材料,还可在日常施工中运送其他小型施工用材以及机具等。

扩挖台车和运料小车的提升系统由钢支架、轨道、1 台 12 t 双筒绞车和 1 台 8 t 双筒绞车、导向轮、钢丝绳、托辊以及相应的运行开关控制系统构成。为了调整钢丝绳的绳高,防止钢丝绳在牵引过程中因与底板摩擦而出现破损现象,在平洞内根据需求设置托辊与压辊,确保钢丝绳保持平直状态,并在井内沿钢丝绳的方向下方设置托辊。绞车的提升力需要预留一定的富余度。随着斜井扩挖进尺的增加,钢丝绳自重占提升力的比例也随之提高。为了确保台车运行的安全性,必须对台车的载质量进行限制。台车及小车限重如表 1 所示。

表 1 台车及小车限重

部位	自重/t		钢丝绳质量/t	限重/t	
	小车	台车		小车	台车
0~100 m	2.25	5.12	0.65	3.64	3.76
100~200 m	2.25	5.12	1.30	3.04	3.16
200~300 m	2.25	5.12	1.95	2.44	2.56
300~385 m	2.25	5.12	2.50	1.93	2.05

钢平台采用工字钢焊制而成,其面层铺设 16 mm 厚的钢板,布置在斜井上弯段。该平台主要为绞车操作、作业人员上下小车、材料设备装卸提供场所。由于上弯段的曲率半径较小、坡度较大,不利于材料、设备及人员上下小车。此外,上弯段处的作业人员、杂物、碎石等易掉落至井内,因此,设置监测平台不仅能够提供便利的施工条件,而且可以防止物体掉落斜井内对人员造成伤害,同时还可作为观测平台使用。

斜井扩挖台车与运输小车共用同一轨道,其轨距为 2.5 m,轨道采用 P30 钢轨。引水斜井扩挖作业平台及提升系统纵剖面布置如图 3 所示。

3.2.2 扩挖施工

在进行钻孔作业前,应先利用运输小车将作业人员和设备运至作业面,随后将轨道延伸 2.5~3.0 m,确保运输小车能够行驶至开挖掌子面的上方。与此同时,要对导井口进行封盖处理。之后,作业人员便可站在扩挖台车上进行钻孔作业。

在扩挖施工过程中,采用 YT28 手风钻进行钻孔操作,周边实施光面爆破技术,周边孔的孔距为 40~50 cm,采用不耦合间隔装药。崩落孔的孔距为 80~110 cm,采用直径为 32 mm 药卷连续装药。Ⅱ、Ⅲ类围岩的循环进尺为 2.7 m,Ⅳ类围岩的循环进尺为 1.8 m。

在进行爆破作业前,应先拆除距离爆破点 10 m 范围内的轨道,防止因爆破对轨道造成损坏。爆破作业完成后,排烟主要依靠自然通风,同时利用原支

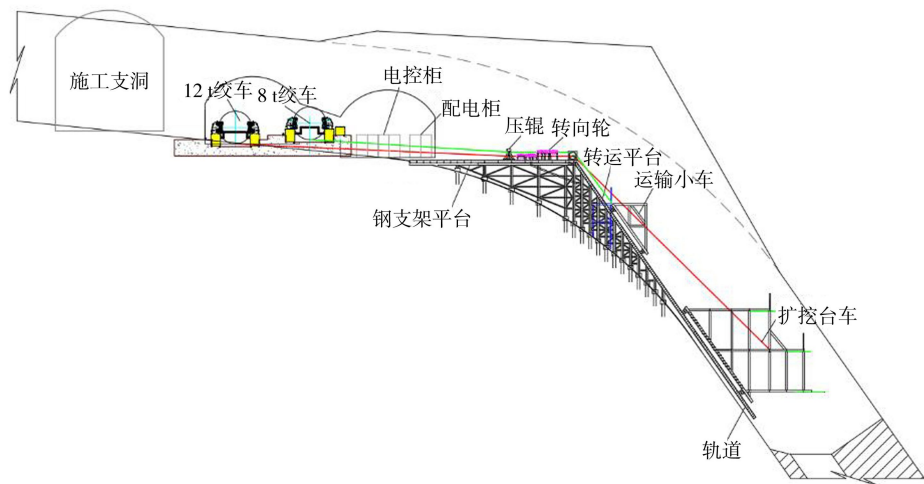


图3 引水斜井扩挖作业平台及提升系统纵剖面布置

洞内已经布置的通风系统加强通风。

根据斜井导井的设计布局,斜井扩挖爆破后,部分石渣可经过导井溜至下方平洞,其余石渣则需通过人工扒渣操作使其进入导井,进而溜至下方平洞。当石渣经过导井下落至下部平洞后,采用3 m³侧卸式装载机配合20 t自卸汽车运至指定弃渣场。下部出渣作业必须待上部扒渣作业完成并确保井口封闭后方可进行。下部平洞的出渣作业应及时实施,以防止堵井。

3.3 支护施工

为确保开挖爆破施工的安全,喷锚支护工作必须及时推进实施,严格遵循开挖一个循环支护一个循环的原则,确保开挖作业与支护作业同步有序开展。

锚杆施工采用“先注浆后插杆”的工艺方法,利用YT28手风钻进行造孔,造孔直径为42 mm。锚杆注浆作业在扩挖支护台车上进行,在前60 m的锚杆注浆施工时,将锚杆注浆机和砂浆搅拌机安置在井口,而当施工进展至60 m后,则将其放置在扩挖支护台车上,并且供料通过运料小车送至扩挖支护台车上。

喷射混凝土作业均采用湿喷法。在前60 m挂网喷混凝土施工期间,将混凝土湿喷机安置在井口处;当施工推进至60 m后,则将其放置在扩挖支护台车上。喷混料通过6~9 m³搅拌运输车运至平洞内,接着借助下料管溜至运输小车内,最后由运输小车运至扩挖台车上。

3.4 扩挖作业循环时间

引水上、下斜井采取全断面扩挖方式进行施工。Ⅱ、Ⅲ类围岩段的循环进尺为2.7 m,综合月进尺为

70 m;Ⅳ类围岩段的循环进尺为1.8 m,综合月进尺为50 m。Ⅱ、Ⅲ类围岩以及Ⅳ类围岩的单循环作业时间见表2。

4 斜井扩挖堵井预防处理措施

4.1 堵井原因分析

引水斜井的导井断面直径为2.5 m,然而在施工过程中仍有堵井现象出现。导致堵井的原因很多,主要可以归结为以下3种情况:一是在现场施工过程中未能严格按照爆破设计方案执行,致使爆破后产生超径石块,进而引发堵井;二是导井中间某段地质条件差,在爆破和溜渣过程中发生塌方,造成了堵井;三是下部平洞的扩挖集渣区空间太小或出渣作业不及时,使得堆渣积压过于密实,最终造成堵井。

4.2 堵井预防措施

根据斜井导井出现堵井的原因,可采取以下措施预防导井堵井:

a. 预防堵井的首要措施在于源头控制,减少单次排渣量。同时,必须严格按照设计的爆破参数开展作业,尤其是要精确控制爆破钻孔的间距和排距,合理规划炮孔的分布密度。在靠近导井边缘的区域,炮孔间距应适当缩小,并且合理装药,控制爆破产生的最大石渣块度不超过井径的1/3。

b. 当导井下口的堆渣距离井口小于2 m时,应立即进行出渣作业,以避免因堆渣过高而引发堵井现象。

c. 在井内进行扒渣作业时,需密切观察导井内风向和气流情况,防止堵井后继续下渣,从而导致导井全部堵死,造成难以处理的局面。

表2 引水斜井扩挖循环时间

单位:min

围岩类别	测量放线	超前支护	造孔	装药爆破	通风散烟	安全处理	扒渣	洞室支护	循环时间
Ⅱ、Ⅲ类	60	0	420	90	30	60	300	300	1 260
Ⅳ类	60	180	480	90	30	60	240	360	1 500

d. 应及时清理下部集渣区的堆积渣石,避免因堆渣过于密实而造成堵井问题。

4.3 堵井处理措施

为确保堵井处理能够既安全又迅速地得以完成,切实保障处理人员的安全,扩挖堵井时可采取以下处理措施:

a. 施工人员进入现场后,根据不同的堵井情况确定相应的处理方案。首先使用钢钎或炮杆对井口处石渣的封堵情况进行试探性检查。若溜渣井口只是轻微封堵且封堵渣料体积较小,将采用钢钎进行人工清撬。在清撬过程中,作业人员需注意相互间的协作与监控,并保持必要的安全距离。参与清撬的人员数量不宜过多,一般不得多于3人,且所有作业人员必须佩戴安全带,并将安全带系于井壁插筋上,以确保人员安全。

b. 当堵井点位于井口下5 m范围以内时,可使用手风钻进行钻孔震动以实现疏通。若仍无法疏通,则改用钻机进行钻孔爆破,以达到疏通目的。

c. 当堵井点处于井口下5 m以上且堵井长度较短时,可从井口由上往下放置炸药包至堵井处,利用爆破震动的方式进行疏通。

d. 当堵井长度较短且与斜井底部的距离也较短时,可利用特制气球(尼龙布材质)顶托炸药包至堵井处实施爆破疏通作业。

e. 当堵井发生在导井中部,并且采取其他常规措施无法实现疏通时,在堵井处的上部搭设钢平台,在距离井壁外50~100 cm左右的位置采用潜孔钻进行钻孔,利用细钢丝绳悬挂炸药下放至钻孔内(借助重锤引导下放),通过爆破作业完成疏通。

5 结 论

a. 对于长斜井的扩挖作业,采取分段开挖的施工策略,首先对井口段进行扩挖,以预留出足够的空间用于安装、试运行以及避炮,从而确保提升系统的安全运作。井口段的划分长度可根据现场的实际需求确定,但不应短于30 m。

b. 长斜井具有断面较小且斜率较大的特点,这使得钻孔方向不易控制,而钻孔精度是斜井扩挖成型的关键。在施工工程中,采用手风钻进行分层浅孔爆破开挖。除了加强测量控制外,建议由经验丰富的钻工执行“定人定位”的作业模式,即指定固定的钻孔作业人员在斜井的特定位置进行钻孔作业。

c. 在斜井扩挖过程中,针对周边孔孔距的设

置,对于Ⅱ、Ⅲ类围岩,建议将其控制在50 cm左右,而对于Ⅳ类围岩,则应将其控制在45 cm以内。

d. 鉴于长斜井扩挖过程中循环进尺短且循环次数多,作业人员需频繁上下移动,建议对施工平台(扩挖台车)以及载人运料提升装置进行独立设计与安装,以便增加人员上下井的灵活性,缩短循环作业的时间,从而加快整个扩挖施工的进度。另外,考虑到斜井断面相对较小,载人运料小车与扩挖台车可考虑共用同一轨道,以满足施工空间的需求。

e. 在进行长斜井开挖作业时,为了降低堵井发生的风险概率并防止由此导致的工期延误,导井开挖尺寸建议保持在2.5 m以上。

f. 鉴于当前导井具备较大尺寸的优势,在爆破作业后的通风主要依赖自然通风以排除烟雾,同时利用已经布置在原支洞的通风系统加强通风,即可满足施工过程中的通风需求。

参考文献:

[1] 王有庆. 斜井施工技术在水利水电工程中的应用[J]. 工程技术研究, 2020(19): 91-93. (WANG Youqing. Application of inclined shaft construction technology in water conservancy and hydropower projects [J]. Engineering Technology and Application, 2020(19): 91-93. (in Chinese))

[2] 齐界夷. 长龙山抽水蓄能电站超长斜井开挖施工技术[J]. 电力勘测设计, 2021(9): 1-7. (QI Jieyi. Construction technology for excavation of ultra-long inclined shaft in Changlongshan Pumped Storage Power Station [J]. Electric Power Survey and Design, 2021(9): 1-7. (in Chinese))

[3] 张坤. 浅埋大倾角不良地质长斜井开挖处理施工技术[J]. 水利科学与寒区工程, 2022, 5(3): 72-74. (ZHANG Kun. Construction technology for excavation and treatment of long inclined shafts with shallow burial, large inclination angles and unfavorable geological conditions [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2022, 5(3): 72-74. (in Chinese))

[4] 薛小伟, 高杰燧, 张任兵, 等. 缓倾角长斜井开挖支护施工关键技术[J]. 云南水力发电, 2023, 39(12): 128-135. (XUE Xiaowei, GAO Jiecong, ZHANG Renbing, et al. Key technologies for excavation and support construction of low-angle long inclined shafts [J]. Yunnan Water Power, 2023, 39(12): 128-135. (in Chinese))

(收稿日期:2024-09-10 编辑:雷燕)