

厄瓜多尔 CCS 水电站超深竖井反井钻机法施工关键问题研究

杨继华 魏 斌 齐三红 郭卫新

(地质工程院)

[摘要] 厄瓜多尔 CCS 水电站为引水式电站,布置有 2 条深达 537.9m 的超深竖井,其规模在世界水电工程领域位居前列,中国电建集团公司施工。经过方案比选,选择了新型 RHINO 1088DC 反井钻机进行竖井施工。反井钻机法施工分为正钻导孔、反扩导井及人工扩挖 3 个阶段。针对正钻导孔时的埋钻问题、导孔偏斜问题,反扩导井时的塌井及刀具损坏问题,人工扩挖过程中塌方、涌水及堵井问题,在分析了其成因的基础上提出了相应的预防及处理措施,取得了良好的施工效果。CCS 水电站超深引水竖井反井钻机的成功施工对国内水利水电工程深竖井施工水平的提高具有重要的借鉴意义,相关研究内容可为类似工程的竖井施工提供参考。

[关键词] CCS 水电站 超深竖井 反井钻机 关键问题 处理措施

1 引言

在水电站工程中由于引水、通风、排烟等需要往往布置地下竖井,竖井因特殊的结构导致其在施工开挖中所遇到的问题及所采用的技术不同于一般的隧洞^[1-3]。

目前国内、外水电站竖井开挖主要有 2 种方法,即自上向下单向作业法和反井钻机与人工开挖相结合方法,自上向下开挖法^[4]是从井口开始全断面开挖,对井壁进行初期支护,施工中的人员、设备、材料和出渣采用吊篮运输,这种方法国内、外使用较多,技术成熟、施工安全,但对于超过 200 m 以上的深竖井则人工劳动强度大、效率较低、施工速度慢且造价较高;当竖井下平段提前贯通时,可以采用反井钻机^[10]施工,其先自上向下钻一直径 20~30 cm 的导孔,再自下向上沿导孔反扩一直径 1.50~3.00 m 的导井,然后再采用人工的方法自上向下全断面扩挖,岩渣沿导井溜至洞底。此种方法大幅度提高了施工工效,改进了作业环境,其综合工程经济效益非常明显,在水电工程竖井施工中有广泛的应用前景。

反井钻机施工中,存在以下的风险和问题:当岩石较差时,塌孔现象比较普遍,存在卡钻、埋钻的风险,导孔偏斜难以控制;导孔施工无法取得原状岩芯,如何确定根据钻进参数和岩渣确定围岩类别是一个急需解决的问题;在反扩导井不良地质段施工

过程中,极易导致塌井,处理起来十分困难,如何避免塌井等是反井钻机施工成败的关键问题。

针对此问题,众多学者开展了相关问题的研究,汪文远等^[11]研究了 BMC300 型反井钻机在溪洛渡工程通风竖井 300MPa 超硬玄武岩中的施工技术;孙建荣^[12]对反井钻机先导孔钻进常见的事故进行了原因分析,并提出处理措施;李晓峰^[13]通过反井钻机在广梧高速公路石牙山隧道竖井工程中的应用,总结出来反井钻机导井的施工方法;桂良玉^[14]通过反井钻机在马来西亚冰若水电站引水系统中的两条竖井中的应用,总结出了在裂隙岩层中的施工技术。

以上的研究主要集中在 100~300 m 级竖井,而对 500 m 以上超深竖井的反井钻机施工实践及研究较少,500 m 级超深竖井地质条件复杂,施工时间长,施工风险大,对于其反井钻机施工尚处于探索之中。本文以厄瓜多尔 Coca-Codo Sinclair 水电站(简称 CCS 水电站)500 m 级超深引水竖井为工程背景,针对其竖井工程地质条件及工程特点,分析在施工过程中关键问题并提出相应的预防措施和对策,相关方法可为类似工程的 500 m 级竖井施工提供参考。

2 工程背景

2.1 工程概况

CCS 水电站工程^[15]位于厄瓜多尔 Napo 省和

作者简介:杨继华(1980),男,河南省濮川人,高级工程师,博士,从事隧洞与地下工程的勘察与研究工作。

Sucumbios 省境内的 COCA 河下游,为引水式电站,总装机容量 1500 MW, CCS 水电站全部工程由中国电建集团公司负责施工。

CCS 水电站 2 条引水发电洞均由上平洞、竖井、下平洞组成,如图 1 所示。

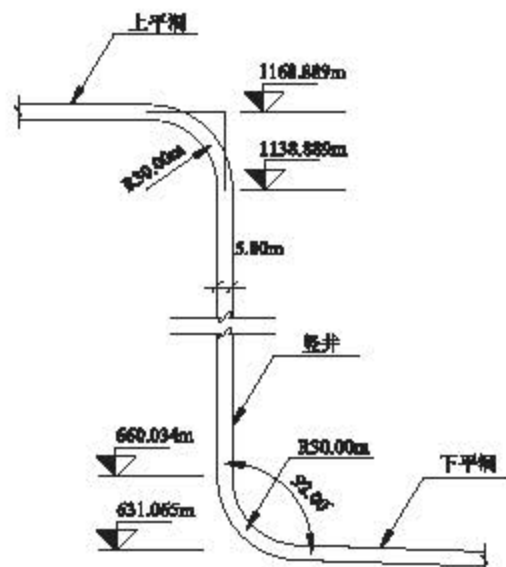


图1 CCS水电站引水发电洞布置示意图

2 条竖井(1#和 2#)的上口高程、下口高程及深度均相同,分别为 1168.9 m、631.0 m 及 537.9 m,其规模为世界水电站工程所罕见。竖井断面为圆形,设计开挖洞径 7.1 m,衬砌后洞径 5.8 m,引水发电洞特别是 2 条引水竖井是 CCS 水电站能否如期发电的控制性工程之一。

2.2 工程地质条件

竖井区 1128 m 高程以上主要岩性为白垩系下统 Hollin 地层(Kh)灰色、灰白色页岩、砂岩,呈互层状分布,以下为侏罗系-白垩系 Misahualli 地层(J-Km)青灰色、紫红色及浅红色火山凝灰岩,火山角砾岩及流纹岩等,岩体结构以整体块状、块状、次块状为主。

竖井区属于 Sinclair 构造带,构造相对简单,地表调查没有发现规模较大的断层,但 Hollin 地层(Kh)及 Misahualli 地层(J-Km)局部发育有多条小规模断层(f26-1、f46、f47、f48 及 f358),断层及破碎带宽度多小于 1 m。

根据前期勘察资料对竖井区发育的节理裂隙进行统计,Hollin 地层主要发育有 2 组节理:① $60^{\circ} \sim 70^{\circ} \angle 68^{\circ} \sim 88^{\circ}$,整体平直粗糙,一般闭合无充填,局部充填岩屑,延伸长度小于 10 m,平均 0.5 ~ 1 条/m;② $240^{\circ} \sim 250^{\circ} \angle 70^{\circ} \sim 80^{\circ}$,一般闭合无充填,

局部充填岩屑,延伸长度小于 10 m,平均 0.5 ~ 1 条/m。Misahualli 地层主要发育 3 组裂隙:① $140^{\circ} \sim 170^{\circ} \angle 70^{\circ} \sim 85^{\circ}$,整体平直粗糙,充填 1 ~ 2 mm 钙膜或闭合无充填,延伸较长,局部大于 10 m,平均 0.5 ~ 1 条/m;② $230^{\circ} \sim 260^{\circ} \angle 70^{\circ} \sim 80^{\circ}$,整体平直粗糙,充填方解石脉或者泥质条带,宽度 2 ~ 3 mm,局部 1 cm 左右,少数高岭土化,延伸长度 5 ~ 10 m,约 1 条/m;③ $40^{\circ} \sim 50^{\circ} \angle 5^{\circ} \sim 15^{\circ}$,该组结构面局部发育较集中,数量较少,延伸较长,充填 2 ~ 3 mm 岩屑或无充填,平直粗糙,约 1 条/m。另外局部发育有少量随机节理。

竖井所穿越的 Hollin 地层含水层和隔水层呈互层状,下部 Misahualli 地层微透水,无统一的地下水排泄基准面,区内附近不存在稳定地下水位,局部存在脉状、带状地下水。区内最大主应力方向为 NW 向,量值约 9.5 MPa。

依照 RMR 分类结果,竖井段 II 类围岩长度为 443 m,占全竖井段的 82%;III 类围岩长度为 61 m,占全竖井段的 11%;V 类围岩长度为 40 m,占全竖井段的 7%。

2.3 竖井开挖方法

引水竖井在施工之前,对自上而下的人工开挖法及反井钻机法进行了方案比选。发现当采用自上而下的人工开时,由于地层中地下水丰富、破碎带会出现大量涌水,竖井被淹没的风险极大,这对竖井向上排水是一个难以解决的困难,当竖井开挖较深时,吊篮出渣缓慢,施工时间长,而反井钻机施工时不存在向上排水的问题,在人工开挖时,也不存在向上出渣的问题。且在引水竖井施工前上平洞及下平洞已开挖至竖井位置,具备了反井钻机施工条件。基于此,决定采用反井钻机施工。

反井钻机法的竖井施工共分为 3 步,即:正钻导孔、反扩导井及人工扩挖一次成形。由于竖井深度达到了 530 余米,地质条件复杂,面临的问题多,施工风险大,这就要求反井钻机具备优良的性能以应对钻进过程中的复杂地质条件,经过众多设备比选,最终采用的设备为 RHINO 1088DC 新型反井钻机。

RHINO 1088DC 新型由芬兰 SANDVIK 公司研制,主要用于矿山和水利水电工程竖井和斜井施工。反井钻机由主机、电气液压控制柜、电机、液压系统、钻具(钻杆、钻头)等组成,如图 2 所示。

其性能如下:钻机主机重 16500 kg,正钻导孔时最大推力 400 kN、最大扭矩 100 kNm,反扩导井时最大拉力 4000 kN、最大扭矩 737 kNm,具备在破碎围

岩条件的脱困能力,最大转速 60 rpm,液压油缸最大行程 1.97 m,单根钻杆长度 1.524 m、重 430 kg、直径 25.3 cm,钻杆的安装和拆卸均由机械手自动进行,回转部分由两台变频电机(VFD)驱动,可实现无级变速,驱动总功率 260 kW,同反井钻机配备了智能孔内电视系统、高精度钻孔测斜仪等辅助设备。

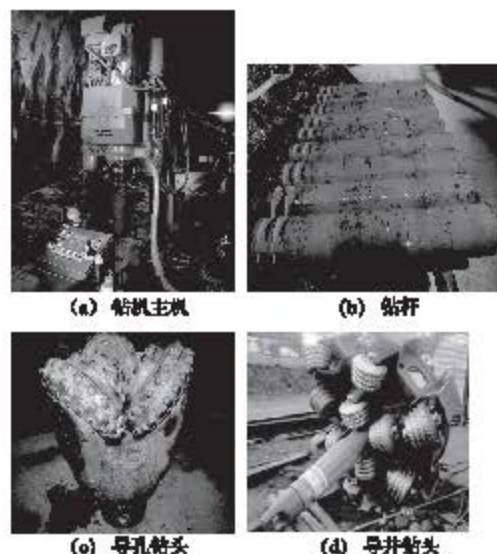


图2 RHINO 1088DC 新型反井钻机

3 正钻导孔

3.1 钻进方法

导孔直径 279 mm,由高程 1168.889 m 向下钻进,如图 3 所示,钻进过程中由电气液压控制柜控制钻进参数(推力、扭矩、钻速及供水量等),机械臂自动加装钻杆,单根钻杆长度 1.524 m,一个循环即为一根钻杆的长度,清水跟进,钻进无法取原状岩芯,岩渣由孔口返水带出。

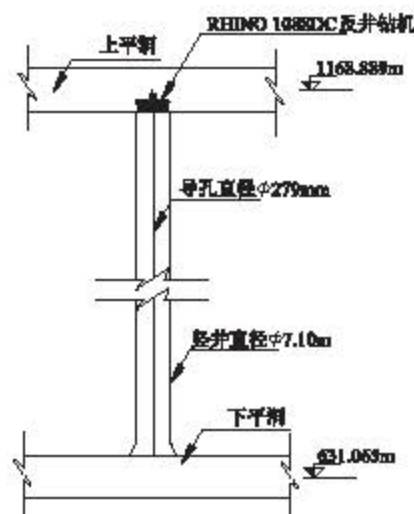


图3 正钻导孔示意图

3.2 导孔钻进中的地质问题

前期勘察资料显示,竖井区 Hollin 地层(Kh)及 Misahualli 地层(J-Km)发育有多条小规模断层($\epsilon 26-1$ 、 $f46$ 、 $f47$ 、 $f48$ 及 $f358$),局部井段存在节理密集带,围岩变化大,接触带密集。同时,由于区内降雨量极为丰富,据相关资料显示,平均年降雨量在 6000 mm 左右,地下水活动性强。以上特殊的地质条件都给钻进施工带来了不可预测的风险。而且随之孔深的不断加深,一旦遇到不良地质条件,工程处治也非常困难。常见的异常情况主要有塌孔、埋钻、返水返渣困难等。

在 2 号竖井的 1133.8 ~ 1121.3 m、1112.3 ~ 1109.3 m、1076.3 ~ 976.3 m、955.3 ~ 925.5 m、913.3 ~ 864.3 m、826.3 ~ 775.3 m 及 695.3 ~ 675.3 m 等高程段出现不同程度的漏水、不返水、返渣量过多、返渣夹泥、返渣颗粒不均及钻进时钻机振动较大等现象,经分析认为此段岩体受断层及节理密集带影响,岩体破碎,局部夹泥,岩体总体质量较差,存在局部塌孔现象,为避免埋钻不良后果的产生,通过调整钻进参数(降低推力、降低钻速、延长冲渣时间、增大扭矩)并对破碎岩体进行固结灌浆处理。需要注意的是,在进行灌浆时,需把钻杆全部提出,在钻杆提出前,应对孔底进行清渣处理,此时停止钻进、保持钻具不动,同时加大水压清孔,直到孔口返水中不带岩渣为止,由于在破碎岩体钻进时不可避免地产生塌孔,因此清孔作业有时可持续数小时。钻杆完全提出后,采用钻孔电视对孔内岩石条件进一步确认。

3.3 钻进参数问题

合理的机器参数不仅能保证平稳进行,还对避免埋钻事故、延长钻头使用寿命、提高钻进速度具有重要的作用。CCS 水电站引水竖井的反井钻机导孔施工过程中,采用表 1 的参数。此参数为控制性参数,在实施过程中,根据岩性变化和扭矩变化情况,不断调整钻进参数,以取得最佳推力和钻进速度。

表1 正钻导孔控制参数

	扭矩 /kN·m	推力 /kN	转速 (r/min)	钻进速度/ (m/min)
开孔	<10	60~90	5~8	<200
完整岩体	<10	<260	17~19	<80
破碎岩体	<10	60~90	15~17	<100

3.4 围岩初步分类问题

工程岩体分类是确定支护型式、支护强度及采取工程措施的基础资料,因此在正钻导孔的过程中对竖井围岩进行初步分类可以为反扩导井的钻机参

数选择和采取工程措施提供参考。

由于导孔钻进时无法采取原状岩芯,因此在CCS水电站引水竖井反井钻正钻导孔的施工过程中,通过与临近地质钻孔对比分析,总结出来基于钻进参数、岩渣、返水情况及钻孔电视的围岩分类方法。

钻进过程中,正常情况下钻进力为200~250 kN,扭矩3~5 kNm,钻机无振动,每一回次(即单根钻杆长度1.524 m)所需要时间为120~140 min,返水量与泵送水量基本相同,返渣颗粒均匀,此时可初定为Ⅱ类围岩。

如钻进力降低到150~200 kN,钻机轻微振动,每一回所需要时间为100~120 min,返水量与泵送水量相比略有减少,返渣颗粒不均且每一回次比正常情况下返渣量有所增加,则可能遇到节理裂隙密集带或断层影响带,此时可初定为Ⅲ类围岩。

如钻进力降低到100~150 kN,钻机振动剧烈,每一回所需要时间为100 min以下,返水量与泵送水量相比减少较多或不返水,返渣颗粒不均局部夹泥且每一回次比正常情况下返渣量增加较多,停钻时加水清渣时间在2 h以上,则可能遇到断层破碎带,此时可初定为Ⅳ类围岩。

对于初定的Ⅱ类围岩,可不作处理,继续钻进即可。对于Ⅲ类围岩可视情况进行灌浆,Ⅳ类围岩必须进行固结灌浆处理。

3.5 导孔偏斜问题

反井钻机正钻导孔时采用的是三牙轮镶齿钻头,钻头在切削岩石的时候受到侧向力的作用,当侧向力在钻头中心的合力不为零时,就会使钻头偏离孔中心线,产生导孔偏斜,如果导孔偏斜 1.0° ,则在530余米的孔底处的水平偏移量近10 m。这将会对下平洞的处理带来很大的困难,并且在竖井过水运行期间会产生难以预见的水力学问题,因此控制导孔的偏斜十分重要。

在CCS水电站引水竖井的反井钻机正钻导孔的施工过程中,主要采取了以下措施来控制导孔偏斜:

(1)钻机基础采用钢筋混凝土浇筑,保证在钻机施工过程中基础不移位、不变形;精确校准开孔角度。

(2)采用高精度测斜仪配合全站仪全程检测孔内偏差情况。

(3)开孔时,采用低推力、低钻速钻进,正常钻时,合理地控制钻进参数,避免大推力钻进。

(4)在破碎围岩导孔容易偏斜孔段安装6~7根长度约10 m的稳定杆,稳定杆直径与导孔直径相同,在孔壁的约束作用下,可在最大程度上控制钻孔偏差。

采用以上措施后,两条竖井的偏差均在 0.2° 以内,满足了精度要求。

4 反扩导井

4.1 扩井方法

导井直径2.10 m,反井钻机加装钻杆至下平洞安装扩井钻头(如图2(d)),由631.065 m高程向上扩井,每上拉一个回次(即单根钻杆长度1.524 m),卸掉一根钻杆。岩渣沿已扩挖成形的导井溜至下平洞,如图4所示。

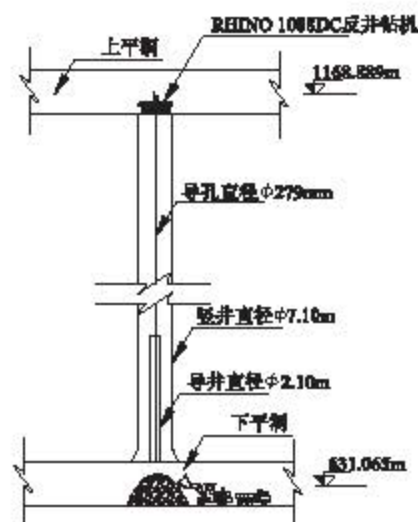


图4 反扩导井示意图

4.2 塌方和刀具磨损问题

在反扩导井的过程中,最有可能遇到的问题是导井洞壁围岩及掌子面岩体塌方,严重时会导致卡钻或埋钻以致全井报废的后果,风险极大。由于在反扩导井时无法对围岩固结灌浆,因此正钻导孔时对较差岩体(初定的Ⅲ类、Ⅳ类围岩)进固结灌浆显的尤其重要。根据正钻导孔时的地质资料,在岩体较差井段,采用调整反井钻机参数,如降低拉力、降低转速的办法以减小对围岩的扰动。经过正钻导孔时的灌浆处理并采用合适的钻机参数,可避免洞壁围岩及掌子面岩体塌方的发生。

导井施工时的钻头共配备了12把滚刀,在破碎围岩洞段,由于掌子面不平,会导致少量滚刀受力甚至单把滚刀受力的情况,此时如果拉力过大,极易引起滚刀损坏,滚刀损坏后换刀极为困难。因此在导

井的施工过程中,操作人员应根据地质资料及时调整参数,保证机器的平稳钻进,避免损坏滚刀。

4.3 对初步的围岩分类进行修正

在正钻孔阶段基于反井钻机参数和岩渣对竖井围岩进行了初步分类,但由于获取的定性、定量指标有限,分类可能存在一定的误差。在反扩导井阶段可根据岩渣的岩性、强度、地下水条件及反井钻机参数(拉力、扭矩等)对初步围岩分类进行修正。修正后的围岩分类可以人工扩挖时爆破设计、超前支护设计等提供参考。

4.4 反扩导井时的参数问题

反扩导井时,尽量使钻机平稳运行,避免拉力施工加过猛,以免对围岩造成大的扰动或损坏刀具。反扩导井时的参数按表 2 控制。由于钻杆较重,当在 500 m 深处钻井时,钻头与钻头的重量超过 150 t,因此表 2 中拉力为扣除钻杆、钻头的重量后作用在掌子面的拉力。

表 2 反扩导井控制参数

	扭矩 /kN·m	拉力 /kN	转速 (r/min)	钻进速度/ (m/min)
开孔	≤50	1200~1700	2~3	<200
完整岩体	≤100	<2000	8~10	<100
破碎岩体	≤80	<1000	2~4	<60

5 人工扩挖

5.1 开挖方法

竖井设计开挖直径 7.10 m, 直径 2.10 m 的导井位于竖井设计位置的中心, 此时在导井正上方布置龙门式吊车和吊篮。人工开挖一次成形采用自上向下的单向作业法, 由人工手持风钻钻孔装药爆破从井口(1168.899 m 高程)开始全断面开挖, 对井壁进行初期支护。开挖产生的岩渣沿导井溜至下平洞, 由装载机 and 自卸卡车出渣至洞外, 施工中采用吊篮运输人员和设备, 如图 5 所示。

待竖井整个开挖支护完成后再自下而上分段浇筑二次衬砌。

5.2 人工扩挖过程中的围岩分类

由于人工扩挖是全断面开挖, 井壁开挖至设计建基面, 此时井壁和掌子面的各种地质现象(岩性、构造、地下水等)都依次揭露出来, 此时可采用 RMR 围岩分类法按照岩石单轴抗压强度、RQD、节理面间距、节理面性状、地下水条件、节理面产状与洞轴线的关系对围岩进行分类, 分类结果可直接用于系统支护和局部加强支护设计。

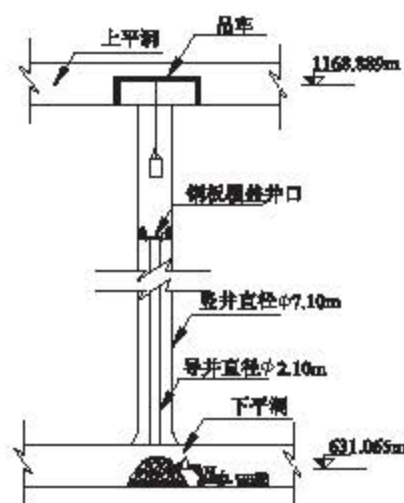


图 5 人工扩挖示意图

5.3 人工扩挖问题及对策

(1) 塌方

在人工扩挖过程中, 竖井围岩受局断层破碎带、节理密集带和地下水的影响, 可能会导致竖井围岩塌方。对于此类问题, 向掌子面下方周边围岩钻设超前锚杆, 形成对掌子面外围的支护, 并对下方围岩进行灌浆固结, 形成在锚固圈保护下的开挖作业, 对于在断层破碎带, 可在施工前采用超前小导管注浆进行预支护。

(2) 涌水

引水竖井段发育有多条断层及节理密集带, 富含地下水, 在人工扩挖的过程中, 揭穿含水层时, 会产生涌水, 涌水沿导井进入下平段, 由于下平段为下坡, 自身无排水能力, 完全依靠水泵排水, 排水距离长、成本高。另外涌水还会软化岩石, 降低井壁围岩的稳定性。针对涌水问题, 在施工过程中采用了“排堵结合, 以堵为主”的处理原则, 即对于涌水后 3~5 d 内水量明显减少且流量小于 10 m³/h 的出水点, 可暂时不做处理, 待二次衬砌的时候统一封堵, 对于流量稳定、水量较大的出水点, 在开挖过程中采用化学灌浆封堵地下水通道进行止水。

(3) 堵井

在人工扩挖施工中, 用于溜渣的导井极易被岩渣堵塞, 导致不能溜渣, 处理起来较为危险和困难。在国内、外的竖井施工中, 堵井现象较为常见, 如果措施不当, 处理起来十分麻烦, 严重时还会显著增加施工成本、延误工期。CCS 水电站引水竖井的人工扩挖过程中的堵井按位置可分为上部堵井、中部堵井和下部堵井 3 种。

上部堵井: 主要是因为爆破参数设计不合理或

没有按爆破设计执行,产生了大量的大块石造成堵井。对于此种堵井采用合理的布置炮孔密度和装药量并采用分段延期爆破技术以避免产生超径块石和岩渣集中堵井。发生堵井后,采用人工系安全带至堵井位置,清理掉部分松渣,找出堵井大块石并钻孔安装少量炸药爆破疏通。

中部堵井:一般是由于某段围岩稳定性较差,受上部爆破和岩渣冲击井壁形成的塌方而引起的。发生堵井后,首先要确定堵井段长度,在保证人身安全前提下可人工爆破向下疏通或人工装渣由吊篮向上出渣进行处理。如不能保证人身安全,可采用反井钻机钻堵塞体后装药爆破疏通。

下部堵井:一般是由于下部下平洞的集渣空间过小,清渣不及时,岩渣过多积压挤压压实造成。对于此种堵井,应增大集渣空间并及时清渣。一旦发生堵井,待底部出渣露出导井后,用长杆举炸药包固定在堵塞部位起爆疏通,但此种处理方法对人身安全威胁很大,必须采取严格的安全措施。

6 结语

厄瓜多尔 CCS 水电站引水竖井深达 530 余米,由中国电建集团公司采用新型 RHINO 1088DC 反井钻机施工,这是中国水电工程建设中的一个重要尝试。其中 1#竖井从导孔钻进到扩孔完成,仅用时 76 d,其中导孔钻进 53 d,扩孔 23 d,扩孔速度平均 23 m/d,最高时达到 53 m/d,成孔质量较好,偏差可控,2 号竖井由于岩石破碎段长,导孔施工过程中进行了多次灌浆,导孔钻进和扩孔共历时 120 d。反井钻机在 CCS 引水竖井取得了成功,这对国内水利水电工程深竖井施工水平的提高具有重要的借鉴意义。

CCS 水电站引水竖井反井钻机 3 个阶段的施工中,存在的主要问题有:正钻导孔时的埋钻问题、导孔偏斜问题,反扩导井时的塌井及刀具损坏问题,人工扩挖过程中塌方、涌水及堵井问题。根据施工实践,得出如下结论:

(1)正钻导孔阶段遇到的问题主要是塌孔、埋钻和导孔偏斜,此时应调整钻进参数、控制返水避免塌孔和埋钻;根据钻进参数、岩渣及返水情况等对竖井围岩进行初步分类,对于初定的 II 类围岩可不作处理,对于 III、IV 类围岩必须进行固结灌浆,这样可有效避免在反扩导井过程中井壁和掌子面围岩塌方;对于导孔偏斜,可采用加强钻机基础、精确校准开孔角度、监测孔斜变化、控制钻进参数、安装稳定

杆的方式控制。

(2)反扩导井阶段遇到的问题主要是塌井和刀具损坏,如遇到稳定性较差破碎岩体,应采用合适的钻机参数,如降低拉力、降低转速、增加扭矩的办法以减小对围岩的扰动,从而减小塌方的可能性,并避免损坏滚刀。

(3)人工扩挖阶段遇到的问题主要是围岩塌方、涌水及堵井,对于塌方段可采用超前支护的办法进行处理;对于涌水的处理应遵循“排堵结合,以堵为主”的原则,对于堵井应分析其原因并采取预防措施以避免堵井的发生,一旦发生堵井,应分析堵井位置及特征采取不同的处理措施。

参考文献

- [1] 康云彪. 锦屏二级水电站竖井开挖技术研究[J]. 水利水电施工, 2007, (2): 19-21.
- [2] 侯顺利, 杨纯景. 糯扎渡水电站 4 号导流洞进水塔竖井开挖支护[J]. 人民长江, 2008, 39(9): 9-10.
- [3] 李红. 溪洛渡水电站泄洪洞补气竖井开挖施工[J]. 人民长江, 2010, 41(5): 7-9.
- [4] 刘大贵, 谢新志, 周松. 构皮滩水电站通风竖井开挖支护技术综述[J]. 贵州水力发电, 2006, 20(3): 27-29.
- [5] 段汝健, 张德高. 周宁水电站高压引水竖井施工技术[J]. 水力发电, 2006, 32(12): 70-72.
- [6] 阮周宁. 水电站高竖井开挖施工技术[J]. 吉林水利, 2007, (12): 55-56.
- [7] 刘富强, 龙鑫. 竖井开挖中堵井预防和处理技术[J]. 中国水运, 2010, 10(8): 169-170.
- [8] 范林文, 唐世明, 陈敬瑞. 不良地质条件下的竖井开挖方案[J]. 四川水力发电, 2010, 29(4): 28-31.
- [9] 周荣. 大坪里隧道竖井施工过程数值模拟与研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [10] 周君波. 反扩导井及机械清渣在竖井扩挖中的应用[J]. 中国水运, 2010, 10(3): 84-86.
- [11] 汪文远, 高峰. BMC300 反井钻机在溪洛渡工程中的应用[J]. 人民长江, 2010, (6): 61-63.
- [12] 孙建荣. 反井钻机先导孔钻进常见事故原因分析及处理措施[J]. 煤炭工程, 2014, 46(8): 45-47.
- [13] 李晓峰. 反井钻机在竖井工程施工中的应用[J]. 公路交通技术, 2009, (4): 125-128.
- [14] 桂良玉. 反井钻机在沐若水电站施工中的应用[J]. 建井技术, 2014, 35(4): 52-55.
- [15] Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd. The Basic Design Report of Coca-Codo Sinclair Hydroelectric Project [R]. Zhengzhou, 2011.