

反井钻机施工技术在洞库小断面通风竖井中的应用

李春来*, 彭振华

(中海油石化工程有限公司, 山东 济南 250101)

摘 要: 竖井施工常采用下导上扩式反井钻井工艺, 某洞库工程中小断面通风竖井开挖, 工期任务重、作业空间狭小、施工难度较大。采用传统的反导井法需要爆破扩挖至设计直径, 施工进度缓慢、经济性差, 而且施工安全也得不到保证。介绍了AT3000型反井钻机一次扩孔成型通风竖井的施工方法, 该方法具有对围岩扰动破坏小、安全性高、开挖效率高等优点, 施工效果较好, 可在类似地下洞库工程通风竖井施工中推广应用。

关键词: 洞库工程; 小断面通风竖井; 反井钻机; 一次扩孔成型

中图分类号: P634 **文献标识码:** B **文章编号:** 1004-5716(2025)03-0001-04

石油资源储备是保障国家社会经济安全稳定的有效手段, 近年来国际局势紧张, 海湾战争、俄乌战争均与油气储备资源有关, 我国早已成为油气进口大国, 随着我国经济社会的发展, 我国油气需求量日益攀升, 急需建立和完善战略石油储备。地下水封石油洞库相较于地上储罐具有安全性、经济性和环保性等突出优势, 是目前世界上公认最佳的战略石油储备形式。地下水封石油洞库工程中除了储油主洞室外, 进出油操作竖井和通风竖井的施工也是关键环节, 竖井施工具有较大的危险性, 开挖及支护难度较大。

深大竖井施工方法一般有逆向开挖法、正向全断面法、正向分部法、正向导井超前后部扩挖法。根据地下洞库工程建设的需求和施工条件的限制, 通常会采用先导井打通后扩挖法(反井法)进行施工。王台铺煤矿1[#]辅助回风立井^[1]、翠云山特长隧道通风竖井^[2]、毕力赫矿通风行人井^[3]及五老山隧道通风竖井^[4]等工程实践证明, 与吊罐、爬罐相比, 反井钻机施工的优点尤为突出, 其中王台铺煤矿回风立井深165m, 成功实现直径5.3m一次性全断面扩孔。随着我国反井钻机技术及装备的发展, 反井钻井直径方面, 从最初的1.0~1.2m, 发展到坚硬岩石条件下钻井直径3.4~4m, 以及煤矿较软地层中一次扩孔钻进5.3~6m^[5]。利用反井钻机一次扩挖成型施工竖井具有机械化程度高、开挖效率高、人力劳动强度比较低和开挖成型质量好等优点, 同时围岩受扰动小能够避免因爆破振动导致的渗水量超标进而

破坏洞库水封条件, 最重要的是无需施工人员进入井身作业, 人员作业安全得到保障, 避免了施工人员受落石、淋水、有害气体的伤害。

1 工程概况

某洞库工程在施工巷道0+866桩号左侧扩挖的通风竖井洞室内设置临时通风竖井以改善主洞室施工通风条件, 该通风竖井断面为圆形, 直径为3m, 竖井口高程约61m, 竖井底高程-18m, 竖井深度为79m。通风竖井表层覆残坡积粘性土及碎石土, 向下依次为强风化二长花岗岩、中风化二长花岗岩、微风化二长花岗岩。岩性描述如下:

①残坡积黏性土、碎石土及强风化二长花岗岩。围岩稳定性极差;

②-1中风化二长花岗岩。裂隙发育, 岩体破碎, 强度中等, 围岩稳定性差;

②-2微风化二长花岗岩。岩体较破碎, 裂隙较发育, 局部受P2破碎带影响, 岩体破碎, 围岩稳定性差;

②-3微风化二长花岗岩。裂隙稍发育, 岩体较完整, 围岩稳定性好。竖井工程地质及围岩级别划分如图1所示。

通风竖井由竖井口施工便道、地面道路作为施工道路进行施工设备、材料运输, 石渣从施工巷道、临时渣场道路作为施工通道进行石渣运输至渣场。通风竖井为明井露天施工, 周边无影响施工的地下管线及构筑物。

* 收稿日期: 2023-06-13 修回日期: 2023-06-13

第一作者简介: 李春来(1999-), 男(汉族), 河北衡水人, 助理工程师, 现从事地下洞库施工管理工作。

竖井	里程	岩性描述	岩层名称	围岩级别
	SJ0+079	①	残坡积黏性土、碎石土及强风化二长花岗岩	V
	SJ0+064	②-1	中风化二长花岗岩	IV
	SJ0+053	②-2	微风化二长花岗岩	III
	SJ0+031	②-3	微风化二长花岗岩	II
	SJ0+000			

图1 通风竖井工程地质及围岩级别划分示意图

在通风竖井开挖前,下方储油主洞室一层开挖进度已完成70%,即将开挖第二层,作业面增多后,满足施工人员正常呼吸及冲淡、排出地下有害气体等的最大通风量会出现缺口,故该通风竖井的施工工期较为紧迫。

该通风竖井右侧紧邻高速公路,最小直线距离为30m左右,考虑到采用常规的反井钻机先导井后爆破扩挖法施工可能会有爆破飞石影响高速公路交通,爆破振动会对附近运营洞库产生影响,同时施工过程中的水土保持等环保要求较高。项目部依据工程地质条件(微风化二长花岗岩,岩体单轴抗压强度90~110MPa)、施工工期要求及对竖井施工安全性、经济性要求进行比选,选择了具有施工进度快、安全性好、环保无污染和施工方便等一系列优点的反井钻机一次反拉成型的施工方法。

2 反井钻机选型及施工流程

2.1 反井钻机技术参数

根据工程概况进行施工工况的验算,最终选择了由湖南有色重金属机器有限责任公司研发的AT3000型天井钻机,该钻机具有良好的经济效益及效能且广泛地应用于煤矿、金属矿山、水利水电工程等领域。AT系列天井钻机均采用全液驱动,具有推进力大、抗冲击性好,工作平稳性好、成孔效果好、偏斜率小、孔壁光滑结构紧凑和移动安装简单方便等优点。其主要技术参数如表1所示。

对钻机的主要技术参数进行验算:

(1)扩孔拉力验算。扩孔拉力即为钻机的提升力,主要与动力头自重、扩孔钻头及钻杆自重和破岩压力等参数有关,钻机在本工程中的拉力为:

$$Q=G_1+G_2+G_3+P$$
 (1)

式中:Q——扩孔拉力,kN;动力头及主液压缸质量约

表1 AT3000反井钻机主要技术参数

钻机型号/基本参数	AT3000
导孔直径(mm)	270
扩孔直径(m)	3.0
钻孔深度(m)	200
额定扭矩(kN·m)	60
最大扭矩(kN·m)	120
最大推力(kN)	1500
扩孔最大拉力(kN)	2500
主机重量(t)	11.5
钻杆直径×有效长度(mm)	∅254×1000
电机功率(kW)	168.5
适应岩性	岩石单向抗压强度≤160MPa

为4500kg,自重 $G_1=44.1\text{kN}$;∅3.0m扩孔钻头质量约为10000kg,扩孔钻头自重 $G_2=98\text{kN}$;钻杆单位长度质量约为274kg,79m的钻杆累计重力 $G_3=212.1\text{kN}$;∅3.0m扩孔钻头布置16把滚刀,施工中破碎抗压强度小于120MPa的岩石,每把滚刀上的钻压不小于60kN,破岩所需的钻压 $P=960\text{kN}$ 。

经计算可得扩孔拉力为1314.2kN。

(2)扩孔扭矩验算。扭矩的大小与钻头直径、岩石性质、钻压、刀齿破岩阻力等有关,根据经验公式计算扭矩^[6]:

$$M=0.5ff_iPDh^{0.5}$$
 (2)

式中:M——扩孔扭矩,kN·m;

f ——静摩擦系数,取0.65;

f_i ——动摩擦系数,取0.06;

P ——破岩所需的钻压,960kN;

D ——扩孔钻头直径,为3.0m;

h ——破岩刀齿压入深度,取2mm。

经计算可得扩孔扭矩为79.42kN·m。

以上技术参数符合反井钻机工作时的提升力不超过钻机设计最大提升力的60%,扭矩不超过设计最大扭矩的70%的要求。

2.2 反井钻机施工流程

反井钻机钻进工艺如图2所示,钻机安装在井口上部的混凝土作业平台基础上,通过液压驱动导孔钻头,由上向下钻进小直径导孔。接长钻杆进行深度钻进,直到和下部通风竖井洞室贯通,拆下导孔钻头,替换上扩孔钻头,由下向上进行反向提拉扩孔。导孔钻头上的牙轮或扩孔钻头上的滚刀在钻压的作用下对岩石冲击、挤压和剪切,使岩石破碎,导孔钻进时破碎的岩屑被正循环的水泥浆排出孔外^[6]。扩孔时的石渣直接落

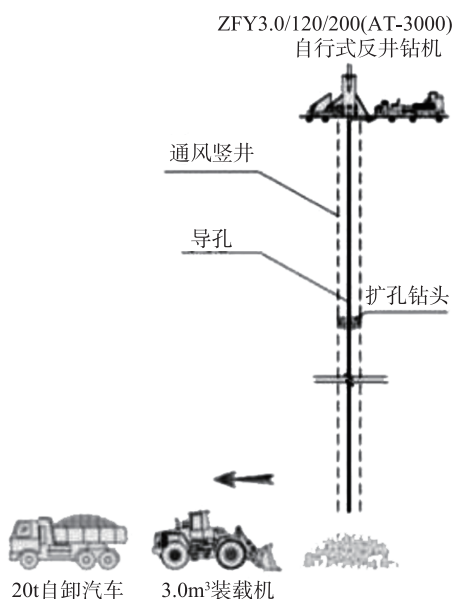


图2 反井钻机施工工艺

到下部通风竖井洞室中,由装卸机械装入自卸汽车,运输至堆渣场。

3 竖井施工方法

通风竖井施工顺序为:井口明挖支护、截排水沟施工、电缆孔施工、井口段预注浆加固、井口钻机基础施工、反井钻导孔钻设、反井钻扩孔。

3.1 井口段预注浆

在通风竖井井口明挖、支护完成后,为防止竖井井身不良地质段出现片帮掉块或涌水现象,需对竖井地表区域进行预注浆加固施工,预注浆范围超出竖井设计线2m。预注浆孔采用100B潜孔钻造孔,钻孔开孔直径为 $\varnothing 110\text{mm}$,孔深68m,注浆孔间排距为1m,共67个孔。钻孔完成后进行钻孔冲洗,要求孔内残留岩芯和沉淀物的厚度不超过20cm。注浆作业前对其中一个代表孔进行电视成像测试,勘探实际地质情况是否与设计图纸上的参数有较大出入。

安装好注浆管及止浆塞后,进行压水试验以检验注浆管路的密封性。注浆顺序为由外环到内环,单孔连续灌注。注浆采用逐级加压,每级加压幅度0.1MPa,注浆最终压力为3MPa。采用孔口循环孔内纯压式注浆方法。注浆开灌水灰比为1:1,按照水灰比1:1~0.8:1(纯水泥浆)变浆液浓度。单孔注浆压力达到设计终压且注入率小于 $0.05\text{L}/(\text{min}\cdot\text{m})$,继续稳压注浆30min以上,或单孔注浆量与设计注浆量基本相同,可结束本孔注浆。所有注浆孔完成后进行人工封孔,干缩水泥砂浆抹平、压实。

3.2 井口钻机基础施工

反井钻钻机基础尺寸 $7\text{m}\times 5\text{m}$ (长 $\times$ 宽),以钻孔中心为中心,开挖至基岩面,对前期地表预注浆后的基槽进行清理后,进行浇筑C30混凝土,浇筑厚度不应低于设计厚度,浇筑混凝土表面应预埋工字钢梁作为钻机轨道,然后继续浇筑至设计标高。为保证下一步钻机安装定位准确、运行平稳,混凝土浇筑过程中要保证钻机螺栓预留孔的准确性,混凝土浇筑完成后进行压光收面,上表面水平高差不大于 $\pm 0.75\text{cm}$ 。

3.3 反井钻导孔钻设

井口反井钻机基础浇筑完,抗压强度达到75%后可进行钻机的定位安装及调试,进行反井钻机导孔施工。先导孔轴线是导井的轴线,反井法施工导孔的造孔精度是决定一次性扩孔成型能否成功的关键所在,在钻进过程中需要严格控制钻设垂直度质量,用钻杆扶正器进行辅助调直。钻进参数根据现场实际情况进行调整,对于表层土及中风化岩层采用低钻压,对于微风化的稳定岩层宜采用高钻压并提高钻进速度,保证钻进速度平稳,切忌忽快忽慢。

3.4 反井钻机扩孔施工

导孔与下方通风洞室拱顶钻通后,修平顶拱扩孔钻进范围,使之与先导孔轴线垂直。用卸扣器拆下先导孔钻头和异型钻杆接上 $\varnothing 3000\text{mm}$ 扩孔钻头。然后进行扩孔反拉,从下至上一次扩孔成形,扩孔过程中滚刀切割破碎的石渣由于自重下落到井底通风洞室内,由装载机和自卸汽车通过施工巷道出渣运至堆渣场。扩孔钻头开始接触岩面时,用最低转速旋转上提,直至扩孔钻头全部与岩体均匀接触后方可正常钻进,防止钻头滚刀受到过大的冲击力而破坏。扩孔过程中与导孔钻进一样,应根据围岩强度调整钻压、钻速,在微风化稳定岩体地段可适当增加钻压,反之可以降低钻压^[7]。当钻头即将提升至地表即扩孔钻头与混凝土基础距离为2.5m时,应降低钻进速度,缓慢反拉,直到钻头完全露出地面为止。扩孔钻进结束后,拆去钻杆,采用钢丝绳将 $\varnothing 3000\text{mm}$ 钻头固定在主机轨道上,反井钻机吊离后再将钻头从井中吊离。

4 应用效果

反井钻机一次性全断面扩孔技术首次应用于石油洞库工程通风竖井施工,取得显著成效,具体效果如下:

(1)施工效率高。反井钻机施工一次性扩孔速度快,连续机械化的施工大大缩短了竖井开挖工期,通风

竖井的提前贯通满足了下方主洞室施工过程中的需风量要求,相较于传统的二次爆破扩挖施工方法提高工效3~5倍。该通风竖井采用三班倒24h不间断作业施工,施工工期为17d。

(2)施工安全可靠。钻爆法施工风险性较大,而使用反井钻机工艺施工安全系数较高,作业人员不需要深入竖井作业,避免受飞石落石、淋水、有害气体和噪声的伤害。

(3)工艺流程简单,降低人力物力的消耗。反井钻机施工过程机械化程度高,工人操作较为轻松方便,较钻爆法施工工序少,同时大大节省了爆破炸药、支护及注浆堵水材料,施工成本降低20%左右。每个班组配备1名技术管理人员和3名现场作业人员即可进行开挖作业,较使用钻爆法施工,节省了人力和机械的投入。

(4)工程质量好。扩孔后实际偏斜率为0.15%,反井钻机采用滚刀机械破岩,避免了爆破作业,对围岩扰动小、破坏作用小,井壁平整度高,未出现片帮及大量渗水情况,有利于支护作业(围岩稳定段不需要支护)和后期维护。

5 结语

本文以国内某洞库工程小断面通风竖井施工为例,就反井钻机反井法一次扩挖成型在通风竖井施工

中的应用进行了介绍。该通风竖井掘进过程成功采用了反井钻机施工,取得了较好效果,为类似洞库工程围岩稳定性好的小断面通风竖井及进出油操作竖井的设计与施工提供借鉴,反井钻机一次扩挖成型在国内洞库通风竖井施工中首次应用,具有推广价值,对加快我国地下石油储备洞库建设具有重要意义。

参考文献:

- [1] 汪船.煤矿大直径风井反井钻井法施工技术[J].煤炭工程,2010(10):25-27.
- [2] 崔柔柔.翠云山特长隧道通风竖井设计与施工方案[J].北方交通,2023(2):87-91.
- [3] 孙杰.反井钻机在通风行人井掘进中的应用[J].黄金,2021,42(12):42-45.
- [4] 丁国斌.五老山长大隧道通风竖井施工技术研究[J].工程建设与设计,2022(6):158-161.
- [5] 刘志强,宋朝阳,程守业,洪文浩,荆国业,李新华,王来所,赵钧羨.我国反井钻机钻井技术与装备发展历程及现状[J].煤炭科学技术,2021,49(1):32-65.
- [6] 王强.ZFY 3.5/400电控型反井钻机的设计研究[J].煤矿机械,2011,32(2):10-12.
- [7] 温军锁,徐辉.反井钻机在鸡笼山矿业公司盲混合井施工中的应用[J].黄金,2015,36(4):50-53.
- [8] 王养文.反井钻机施工技术在集义隧道小断面超深竖井施工中的应用[J].工程技术研究,2020,5(20):27-28.

(上接第144页)

5mm,高2.5m,埋深0.5m,固定在C30混凝土结构基础内,规格为:截面为0.5m×0.5m的矩形,埋深0.5m,基础基坑采用人工开挖;管脚处呈“十”字状焊接两块铁板,铁板尺寸20cm×5cm,厚度5mm;警示牌铁板板面尺寸1.5m×1.0m,厚度5mm,板面焊接于竖向圆管之间。牌正面标明“工程名称、开工时间、竣工时间、建设单位、设计单位、施工单位、监理单位”等内容。

6 结论

矿山采坑3、采坑4、采场和2处废石堆自然复绿,自然复绿面积83923m²;采坑1、采坑2和采坑5进行治理,治理面积517895m²。通过治理工程消除地质灾害隐患,可修复采矿活动对地貌景观的破坏,使矿山环境

与周边环境相协调,恢复当地自然环境,确保村民居住安全。

参考文献:

- [1] 杜敏,王凤娇,张越,等.邯郸市某废弃露天矿山生态修复探讨[J].资源信息与工程,2023,38(1):65-68.
- [2] 多晓松,邓朝文,胡冲.在承德露天矿山地质环境修复治理勘查设计中的思考[J].西部探矿工程,2021,33(4):41-43,46.
- [3] 陈安国,张举钢,周吉光,等.河北省矿山地质环境问题及其治理的对策[J].石家庄经济学院学报,2009,32(6):47-50.
- [4] 王让,尚佳楠,崔朋涛,等.西和县兴隆山采石场矿山地质环境现状及生态修复研究[J].中国锰业,2022,40(4):73-77.
- [5] 王让,崔朋涛,尚佳楠.滦平县宝财铁矿地质环境评估及恢复治理研究[J].能源与环保,2022,44(2):35-40,46.