

引用格式:陈建明.反井钻机在某铜矿大型风井井筒掘进施工中应用[J].有色设备,2025,39(3):106-110.

CHEN Jianming. Application of raise borer for ventilation shaft construction in copper mine[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(3): 106-110.

反井钻机在某铜矿大型风井井筒掘进施工中应用

陈建明

(紫金矿业集团股份有限公司,福建龙岩364200)

[摘要] 刚果(金)某世界级铜矿按井下采矿通风设计,需建设6条直径6 m、深度200~400 m的大型通风竖井。传统大直径井筒掘进施工普遍采用正掘爆破施工法,存在安全隐患多、施工效率低、工程造价高及施工周期长等问题。为此,本文在系统调研国内外矿山通风竖井井筒施工技术的基础上,借鉴国外采用大型反井钻机施工井筒的成功案例,并结合该铜矿现场地质条件,制定了以围桶式桩基为基础、采用大型反井钻机进行反掘施工竖井井筒的工程方案。通过现场工程实践,达到了预定工程目标,取得了良好的实践效果。该施工方案实现了安全风险控制、工程造价降低、施工周期缩短及工程质量提升的综合目标,具有良好的经济效益。研究成果可为国内类似矿山的风井井筒施工方法提供一定的参考和借鉴。

[关键词] 反井钻机;通风竖井;扩孔;铜矿;掘进

[中图分类号] TD262

[文献标志码] A

[文章编号] 1003-8884(2025)03-0106-05

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.03.012

0 引言

自20世纪90年代起,反井钻机技术在国外矿山工程领域得到了广泛应用与推广,基本取代了传统的正面掘进施工法。随着技术的不断进步,国外制造厂家开发的反井钻机在钻孔深度、扩孔直径和掘进效率等方面,性能技术指标已有很大的提升,不仅最大成孔直径可达8 m,且其钻孔深度已超过1 500 m。

在我国,反井钻机在国内主要应用于煤矿、水电和铁路领域的竖井、斜井、通风井以及排水井等工程领域,其掘进尺寸普遍在直径3 m以下。在矿山工程领域,虽存在小型通风竖井井筒利用反井钻机掘进的个别案例,但直径超过3 m的井筒仍普遍采用正向爆破掘进法施工。然而,随着矿山浅层优质矿产资源的日益枯竭,矿山开采深度和难度不断增加,采矿向深部发展是一种必然的趋势,对通风系统的要求也越来越高,进而促使配套的风井井筒尺寸也不断加大、加深。在此背景下,传统的正向掘进施工法因其安全系数低、施工效率不高等问题,已逐渐无法适应采矿向深部发展的要求。

以刚果(金)某世界级铜矿为例,该施工方案创造性地利用桩基相嵌形成桶状围桩基础,为反井钻机施工提供坚固基础,且桶状围桩基础在反掘完成后作为井筒颈口段,这不仅提高了反井钻机作业的稳定性和安全性,还大幅缩短了井筒支护工期。本文主要介绍了反井钻机的工作原理,以及通风竖井井筒施工的主要工序,并与正向掘进施工方法进行了比较,为国内矿山企业提供一定的参考和借鉴。

1 项目概况

刚果(金)某世界级铜矿为沉积型地下矿床,根据通风系统设计要求,需要在矿体南北翼分别建设3条净直径为6 m的进/出风井。结合现场地质状况和施工条件,制订了利用大型反井钻机掘进直径6 m、深200~400 m竖井的施工方案,该方案完成了6条深度不同的通风竖井井筒(表1)的建设,实现了大孔径、大深度反掘施工的应用。

2 反井钻机工作原理和设备选型

反井钻机工作原理为通过电机驱动液压马达,

[收稿日期] 2025-01-09

[第一作者] 陈建明(1980—),男,福建上杭人,机械工程师,主要从事矿山建设管理工作。

表 1 通风竖井技术参数

Table 1 Technical parameters of ventilation shafts

风井位置编号	最大风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	井筒深度/m	井筒净直径/m	井筒施工工期/月	岩土性质
NE VS-02	22	318	$\phi 6.0$	8	
NE VS-03	22	400	$\phi 6.0$	9	
SE VS-01	22	342	$\phi 6.0$	8	砂砾岩、角砾
SE VS-02	22	260	$\phi 6.0$	7	岩、粉砂岩等
KSM VS-01	22	200	$\phi 6.0$	7	
KSM VS-02	22	230	$\phi 6.0$	7	

利用液压动力将扭矩传递给可连续加长的钻杆及其安装在头部的钻头刀盘,驱动其旋转。同时,主机油缸产生的轴向力,通过钻头滚刀在钻压作用下滚动并产生冲击载荷,使滚刀齿对岩石产生冲击、挤压和剪切作用,以达到破碎岩石的目的。导向孔钻通下方巷道后,更换大直径反刷刀盘进行反向扩帮,岩屑靠自重落到下方巷道后定期清理。最后,通过喷浆对成井进行必要的支护。反井不仅适用于竖直井筒的施工,亦可用于斜井掘进。该技术具有钻进速度快、施工效率高优势,能够适应不同岩层地质条件

的施工需求。

为应对地下工程中复杂的地质条件,在施工前必须综合考虑岩体层状和地质构造。根据不同的地质条件确定反井钻机型号,选用匹配的破岩钻头和扩孔刀具,同时选取合理的钻进参数,进而制订详细的施工方案。通过调研多家国内外反井钻机的性能参数及其实际工程应用案例(表 2),并综合考虑现场地质条件、施工工期、同行业工程业绩及工程造价等多方面因素,最终采用南非 Master Drilling 公司的 RD7-1000 型反井钻机,其详细技术参数如表 3 所示。

表 2 国内外主要厂家反井钻机参数

Table 2 Specification of raise borer in main manufacturers

生产厂家	规格型号	装机容量/ kW	最大扭矩/ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	扩孔最大 拉力/kN	钻井直径/ m	最大钻井 深度/m	钻进偏斜 率/%	矿山应用实例
瑞典 Epiroc 公司	Robbins 92R	500	700	8 923	3.1 ~ 6.0	1 100	<0.5	芬兰 Kemi 矿山
德国 Wirth 公司	HG300-SP	550	710	8 200	3.0 ~ 6.0	990	<0.6	南非吕斯滕堡铂矿
南非 Master Drilling 公司	RD7-1000	760	1 240	10 450	3.1 ~ 7.1	1 200	<0.6	南非 Lonmin 铂矿
常州立鼎煤机公司	AT3500	168.5	150	3 000	2.5 ~ 3.5	400	<1	山西阳泉立鼎公司
煤炭科学研究总院	BMC500	128.5	102	3 000	2.0 ~ 3.5	500	<1	河南平煤四矿

表 3 RD7-1000 反井钻机工况参数表

Table 3 Specification of RD7-1000 raise borer

项目	规格	项目	规格
制造商	南非 Master Drilling	规格型号	RD7-1000
适用岩石性质	砂砾岩、角砾岩、粉砂岩等	适合岩石硬度(f)	1 ~ 20
岩石密度	2.65 ~ 2.9 t/m^3	液压马达电机功率	2 × 280 kW
液压马达最大扭矩	1 240 $\text{kN}\cdot\text{m}$	主机油缸最大推力	10 450 kN
先导孔转速	最高 40 r/min	扩孔转速	最高 7 r/min
钻杆规格	$\phi 375 \text{ mm} \times 3 000 \text{ mm}$	先导孔直径	$\phi 475 \text{ mm}$
稳定杆规格	$\phi 475 \text{ mm} \times 3 000 \text{ mm}$	扩孔直径	3 100 ~ 7 100 mm

3 反井钻机通风竖井施工工序

反井施工包含基础施工、导孔钻进、反刷扩帮和支护等主要工序,其施工工序流程如图1所示。

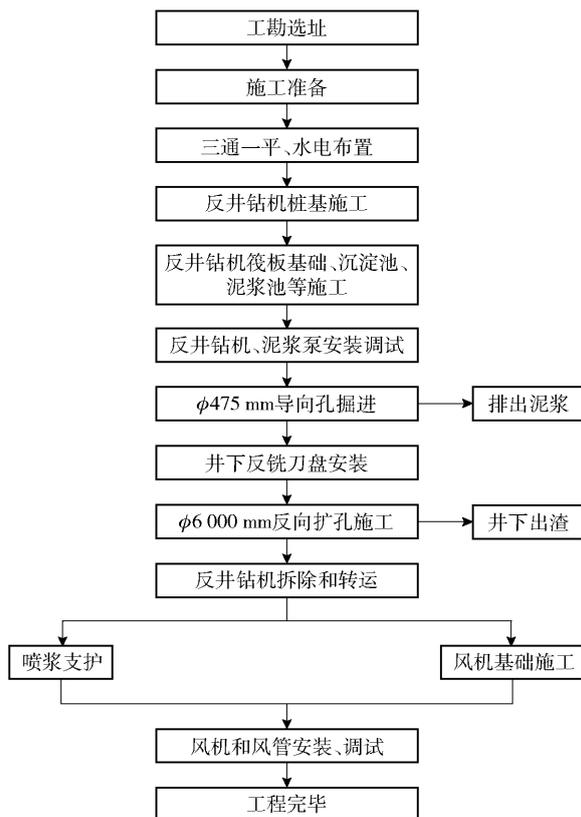


图1 反井钻机施工工序

Fig. 1 Construction process of the raise borer

3.1 反井钻机基础施工

在初步选定风井位置后,应对选址位置进行地质工勘,以了解该处的地质构造和水文地质情况,并综合考虑岩石裂隙、发育程度和RQD值等岩石力学特性,为风井的设计、施工提供相关依据。

对于大直径大深度井筒反掘施工来说,基础不稳容易导致钻偏或钻机塌陷,引起重大施工事故。采用机械旋挖成孔灌注桩及混凝土筏板作为承载基础,灌注桩环绕井筒直径一圈布置,桩基深度达到地下基岩层,且端桩全截面进入持力层。桩基由17根33 m主承重桩、17根33 m的辅助桩交叉组成。先用旋挖钻机开挖辅助桩,使用C15素混凝土灌注,然后在2根辅助桩之间旋挖主承重桩,使用C30钢筋混凝土灌注,钢筋混凝土纵向主筋采用φ20螺纹钢。主承重桩施工需切割辅助桩边缘,使承重桩与

辅助桩相互镶嵌,从而形成坚固的筒状基础。在反井钻机承重钢梁头尾两端位置施工4根加强桩,在风井中心位置施工1根导孔定位桩。反井钻机基础示意图如图2所示。

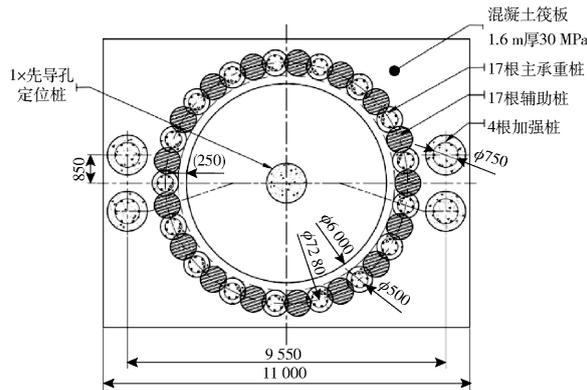


图2 反井钻机基础示意

Fig. 2 Schematic diagram of the raise borer foundation

全部桩基施工完成后,在其顶部施工厚1.6 m的C30钢筋混凝土筏板基础,主筋采用φ20螺纹钢加固。最后在筏板基础上安装钻机底座钢梁以及喷浆机器人导轨。

3.2 钻机配套设施布置

钻机基础施工完成后,开始安装地表辅助配套设施,主要包括液电控系统、钻杆夹取系统、辅助系统、排浆系统等部分。钻杆堆放位置应靠近机械手,地面铺设钢轨,方便钻机机械手夹取和放置。同时,沉淀池应设置多级过滤池,实现清水的循环利用,泥浆定期清理。

3.3 反井钻机的安装和调试

反井钻机主体安装必须保证达到一定的垂直度要求,采用线垂测量法,偏差在0.2‰之内,以确保保证钻进作业垂直进行。钻机刀具旋转系统和推进系统均采用液压驱动,可以根据岩石性质差异,合理调整转速和扭矩,以提高钻进效率,减少刀具的磨损和导向孔的偏斜。钻机操作台装有钻进记录仪、各种检测仪和报警装置等,可利用精密的电液伺服阀控制推力和拉力,确保导向精确。液压系统安装完成后,需进行空载试车,确保各液压系统正常工作,无泄漏。

3.4 导向孔施工

导向孔的施工质量是保证成孔质量的关键。采用三牙轮钻头进行导向孔施工。三牙轮钻头可在一定程度上保证钻孔过程中导孔不缩径,使稳定杆能

通过,并保证钻孔的钻凿精度。钻杆头部第 1/3/5 根需使用稳定杆,保证在导向钻进及后续反向扩孔过程中钻杆不发生偏移。

导向钻头上安装有冷却水孔,在钻进过程中不断把清水泵入钻头,确保钻头不会发生过热。钻进时应密切关注钻进的倾斜率,使用电子多点测斜仪,若发现钻进偏斜率大于 0.8%,应及时采取纠偏措施。

导向孔钻进过程中,应能根据不同的岩层调节相应的钻压和转速,在导向孔即将钻透下部巷道时,应逐渐降低钻压,并通知巷道内设置警戒,不允许有人员或机械设备通过,以防发生事故。导向孔钻透后,不能立即停止钻机,应待到钻机转动平稳、扭矩变化不大、钻具上下自如时才能停钻、提钻。

3.5 安装扩孔刀盘和反刷扩帮

与传统的正向掘进施工不同,反掘施工的前提条件是井下巷道必须提前掘进至风井底部位置,为安装扩孔刀盘创造条件。反刷扩帮作业时,为了使大直径刀盘平稳扩孔,在开始阶段参数应设定为小扭矩、小钻压钻进参数,待刀盘完全入孔后再开始正常的钻进。被破碎的岩屑靠自重落到下方巷道内,必须及时将岩渣清除运走,下孔口不能堵塞,且下口处 5 m 范围内不得有任何人员进入,防止落石砸伤。

在完成井筒反刷后,应对井筒内壁进行检查。若发现有地下水涌出,应进行封堵处理。若封堵效果不佳,则需进行疏水处理,在风井周边施工数口疏水孔,把地下水排出地表,再进行封堵作业。

3.6 井筒支护施工

井筒反掘扩帮完成后,安装喷浆机器人。机器人中间安装有照明灯和摄像头,可把井筒内部实际情况实时反馈至中控室屏幕。机器人中间安装可 360° 旋转的喷浆管,与地表混凝土泵车相连,使用 C25 纤维增强混凝土对井筒顶部领口段、底部下口处各 30 m 段喷浆 50 mm 厚度支护,养护 28 d。

4 风井井筒反掘施工法与普通正向施工法的对比分析

通风竖井是实现井下采矿作业具有良好通风条件、确保井下作业安全的关键设施。保证风井井筒施工安全,尽快形成井下通风条件,对保证井下生产安全、实现矿山安全稳产高产具有重要意义。通风竖井井筒反掘施工法与正向掘进施工法对相比,具

有以下特点。

1) 反掘施工需提前具备井下进入条件。由于反掘施工法需在采掘巷道内安装反铣刀盘,故采掘巷道需提前掘进至井筒底部位置,并具备通风、排水和运输反铣刀盘的条件。正向掘进法可以与采掘巷道掘进同步施工,巷道掘进和井筒施工相互影响较小。

2) 反掘施工安全系数高。正向掘进存在较大的安全隐患,危险因素较多。施工人员在深达几百米内的井内受限空间内,进行打眼、装药和临时支护等作业,炮烟中毒、高处坠落、冒顶片帮、物体打击、机械伤害、触电等安全隐患较多。由于破碎后的废石需要提升至井外,容易发生高空落石。另外由于井内通风不畅,爆破产生的毒烟易发生窒息或中毒事故;爆破后风井周边岩体易松动,容易出现冒顶和塌方事故。而反掘施工由于采用反井钻机机械化施工,作业人员无需进入工作面,工作环境和安全状况较好,避免了施工人员受落石、淋水、有害气体伤害等,大幅提高了施工安全性。

3) 反掘施工作业效率高、工期短。正向掘进作业受制于设备和空间的因素,一般 1 天仅能实施 1 次爆破,1 次爆破只能成井 1.5 m,而且还需撬顶,成井后还要刷帮,施工进度十分缓慢。以正掘直径 6 m、深度 300 m 井筒为例,至少需要 12 个月的工期。而反井钻机施工为机械化连续作业,掘进速度快,导向孔施工每天可钻进 20 ~ 30 m,反掘施工每天可完成 12 ~ 15 m。同样以施工直径 6 m、深度 300 m 井筒为例,仅需要 7 个月的工期。

4) 反掘施工工程质量好。正向掘进施工由于采用爆破作业,井筒内壁凹凸不平,给后续支护带来困难,同时也影响通风效果,增加风机电耗。而反掘作业采用滚刀机械破岩,对围岩破坏小,施工质量较高,成井井壁较光滑平整,风阻系数小,可以降低风机功率,节约用电。经测算,以同样井筒直径 6 m,风速 14 m/s 的通风竖井为例,利用反掘施工的风井风机电机功率比正掘施工的风井电机功率低 2% ~ 3%。

5) 反掘施工劳动效率高。正向掘进施工需要配置较强的施工力量,包括打孔、爆破等专业性较强的作业人员,且工人劳动强度高,一般施工 1 条风井需配置 25 ~ 30 人。而反掘施工采用机械化作业,操作简单,工人劳动强度低,一般 1 条风井仅需配置 5 ~ 8 人即可,劳动效率较高。

6) 反掘施工工程造价低。正向爆破掘进专业

性强,作业工序较复杂,施工人数较多,整体工期较长,因此整体工作造价较高。而反掘施工依靠机械化连续作业,施工人数少,工期短。根据该铜矿工程招投标结果,反掘施工工程造价为正向爆破掘进施工法的50%左右。

5 结语

反井钻机不仅可以实施大型通风竖井井筒的施工,也可以应用于矿石溜井和提升井等地下工程。利用反井钻机反掘施工可使井筒内壁一次性施工成形,与正掘施工爆破掘进相比,具有施工效率高、工期短、工程质量好等特点,同时由于采用机械化连续作业,安全系数高,劳动强度低,工程造价也较低。

随着国内矿山开采条件好的矿产资源日益减少,开采品位更低和埋藏更深的资源将是矿企今后不得不面临的问题。同时国家对矿山安全生产的日益重视,安全法规日趋严格,对矿山的安全生产提出了更高的要求。可以预见将来矿企对大直径、大深度竖井和溜井等地下工程施工的需要将越来越多,鉴于反掘施工相比正掘施工具有明显的优势,因此推广使用反井钻机施工大型通风竖井井筒等地下工

程具有重要的意义。

[参考文献]

- [1] 宋绍飞,陈涛,张吉祥,等.反井钻穿越施工中的导向孔精确控制技术分析[J].工程技术研究,2023,8(21):41-43.
- [2] 周建中.谈 ZHY1.20 型反井钻机在新强煤矿二水平延深施工中的应用[J].黑龙江科学,2014,5(1):213.
- [3] 刘福生,王红霞,方俊.反井钻机施工斜井、竖井技术介绍[J].水电站设计,2010,26(2):88-90,94.
- [4] 杨伟山.水利水电工程引水系统竖井(斜井)开挖方法研究[J].沿海企业与科技,2007(9):144-146.
- [5] 吴理云.南非竖井快速掘进历次世界纪录的分析和评价[J].东北工学院学报,1963(5):13-22,111.
- [6] 杨启鑫.反井钻机导井法竖井施工工艺技术优势及应用方向[J].科技创新与应用,2018(15):98-99.
- [7] 王辉.反井钻机在溢流竖井施工中的应用[J].水利规划与设计,2017(6):104-105,122.
- [8] 李恩涛.反井钻机在竖井施工中的应用[J].现代矿业,2013,29(6):148-150.
- [9] 袁金,张雷.浅谈反井钻机在竖井开挖中的应用[J].科技创业月刊,2013,26(12):235-236.
- [10] 于景波.不良地质条件下反井钻机在竖井开挖中的应用[J].河南水利与南水北调,2015(16):32-34.

Application of raise borer for ventilation shaft construction in copper mine

CHEN Jianming

(Zijin Mining Co., Ltd, Longyan 364200, China)

Abstract: A world-class copper mine in Democratic Republic of the Congo requires the construction of six large ventilation shafts, each with a diameter of 6 m and depths ranging from 200 to 400 m, to meet the ventilation demands of underground mining operations. Traditional shaft excavation methods for large-diameter shafts commonly employ the conventional sinking technique, which presents significant safety risks, low construction efficiency, high engineering costs, and prolonged construction periods. To address these issues, this study systematically investigates shaft construction technologies for mine ventilation both domestically and internationally, drawing upon successful international cases utilizing large-diameter raise borers. Base on the specific rock conditions of the mine, an engineering solution was developed to conduct a barrel-type pile foundation and employing a large raise borer for reverse excavation of the shafts. Field implementation demonstrated that the proposed approach successfully achieved the intended engineering objectives, yielding favorable practical outcomes. This raise boring technique effectively mitigated safety risks, saved capital cost, shortened construction duration, and improved project quality, demonstrating significant economic benefits. The research findings provide valuable technical references and practical insights for similar shaft projects in domestic mining operations.

Keywords: raise borer; ventilation shaft; reaming; copper mine; excavation

