

矿山反井钻进技术与装备的发展现状及展望

刘志强

(煤炭科学研究总院 建井研究分院,北京 100013)

摘要:论述了矿山反向凿井施工技术发展历程,汇总了目前反井钻机在地下工程建设领域的应用情况,对比了反井钻机钻井工艺和其他钻进工艺区别。反井钻井由主机、钻具和辅助系统构成,基于反井钻机工艺特点,将反井钻井方法分类为上扩法和下扩法,相应地研发了上扩式和下扩式 2 类反井钻机。在此基础上,提出了将反井钻机从井筒应用,拓展到大型非爆破节能开挖、地下工程破坏修复、地下工程服役期改造及安全救援等不同领域。

关键词:钻井法凿井;反井钻机;地下工程开挖;地下结构修复;应急救援

中图分类号:TD41 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2017)08-0066-08

Development status and prospect of mine raise boring technology and equipment

Liu Zhiqiang

(Mine Construction Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract:The paper stated the technical development course of the mine raise boring construction method, summarized the application conditions of the present raise boring machine to the underground engineering construction area and had a comparison on the differences between the raise boring shaft drilling technique and the other drilling technique. The paper pointed out that the raise boring structure could be divided to a main machine, drilling tools and auxiliary system. According to the technical features of the raise boring machine, the raise boring method could be divided to an upward reaming method and downward reaming method and thus the raise boring machine could be divided to an upward reaming type and a downward reaming type. On the circumstances, the certain application ideas of the raise boring machine were provided from the application to the mine shaft, extended to large non blasting energy saving excavation, underground engineering failure repair, reconstruction of the underground engineering in a service period, safety rescue and other area.

Key words:mine shaft sinking with raise boring method; raise boring machine; excavation of underground engineering; underground structure repair; emergency rescue

0 引 言

21 世纪作为“地下空间”的世纪^[1],地下工程的安全、高效建设成为关注的重点,地下工程的施工多是移植改进的矿山技术方法。人类开发矿物资源从露天开采到井工开采,20 世纪逐渐形成了成熟的矿井建设技术工艺。井工开采需要在岩体内开凿一系列的不同形状、尺寸的空间,用于开采过程中矿石、

物料、人员运输以及通风、排水等地下空间统称为井巷工程,完成这些工程施工过程为矿井建设。矿井建设首先要开凿进入矿体的通道,这些通道可以是竖井、斜井或平洞,开始于矿井地面工业广场,从上向下或从外向里逐步掘进形成进入矿体通道,当掘进延深到设计开采水平或矿体附近后,需要施工相关的井底车场和通向采区的巷道工程,并为矿物开采施工相应准备巷道,同时由于矿体可能是分层结

收稿日期:2017-02-11;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2017.08.012

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA06A403)

作者简介:刘志强(1962—),男,河北徐水人,研究员,现任煤炭科学研究总院建井研究分院副院长,北京中煤矿山工程有限公司副总经理、总工程师,中国煤炭科工集团首席科学家。E-mail:liuzhiqiang@vip.sohu.com

引用格式:刘志强.矿山反井钻进技术与装备的发展现状及展望[J].煤炭科学技术,2017,45(8):66-73.

Liu Zhiqiang.Development status and prospect of mine raise boring technology and equipment[J].Coal Science and Technology,2017,45(8):66-73.

构或分布结构,还需要建设井下连接不同水平的没有地面出口的暗立井或暗斜井,还要建设一些储存矿石的矿仓、溜矿用溜井等。按照井巷工程的空间分布形态,可以分为垂直巷道、水平巷道、倾斜巷道,其中垂直巷道包括立井、暗立井,水平巷道包括车场、运输、通风巷道、石门等;倾斜巷道包括斜井、上山、下山、溜矿(煤)眼、开切眼等。矿山建设逐渐形成了以钻眼爆破为核心的井巷掘进工艺,对于进入矿体的竖井、斜井采用由上向下的施工方法。井下的暗井和矿仓等工程,一般采用由下向上的施工方法,称为反向凿井法(反井法),虽然,其他井巷施工是矿山艰苦、危险的工序,但是,反井施工条件更加恶劣,人员在更危险的反井工作面,伤亡事故经常发生,不完全统计,以往人工爆破作业,每个深度不超过40 m的煤矿反井,就会发生1次人员伤亡事故。

经历漫长艰苦的发展,反向凿井方法演变从人工进入工作面进行钻爆施工,到反井钻机机械破岩,逐渐向机械化、自动化和智能化方向发展。反井工程施工经历了从直接反井到反井钻机的不同发展阶段,直接反井法,利用人工从下部巷道,不借助任何辅助手段,手持或气腿式风动凿岩机直接向上钻炮眼、装药、放炮,然后排出部分岩渣后,操作人员继续蹬渣作业,进行下一个循环的钻眼、爆破工作,由于岩渣自由堆积角的存在,施工高度受到限制,一般很难超过10 m;为了解决施工高度的限制和反井过程排出的岩渣管理问题,发展形成了木垛法,即普通反井法;为了解决人员输送问题,设计不同人员输送装置,如提升机提升吊罐和带轨道的自升式爬罐,形成了吊罐反井法和爬罐反井法。这些施工方法的共同缺点是都需要人工进入工作面来完成钻眼、装药、放炮、危石处理和临时支护作业,工作环境非常差,受有害气体、落石、塌方、淋水的危害,安全无法保证,伤亡事故经常发生,施工速度和工效都很低,特别是在煤矿,由于有害气体在工作面的积聚,对人身安全构成的威胁更大。因此,在借鉴钻井法凿井、全断面隧道掘进机凿井和掘进巷道基础上,逐渐演变发展出机械破岩的反井钻机反井法,采用钻机设备完成反井施工全过程,操作工人不需要进入工作面作业,也就避免了伤亡事故发生,从根本上解决了反井施工的安全隐患问题,同时也减轻了工人的劳动强度,提高了工作效率^[2]。

近年来随着反井钻井技术和装备的发展,破岩滚刀的材料性能提高,反井钻机能够适合从软到坚

硬的所有岩石,在岩石抗压强度达到300 MPa的岩石中达到较好的钻进效果,同时钻井直径达到5 m,钻井深度达到600 m,从煤矿、金属矿山、非金属矿等,到水电、抽水蓄能电站、公路铁路隧道通风井工程^[3],应用范围逐渐增加,并且改变了一些地下工程施工的传统思维,反井钻井技术促进了地下工程施工变革。

1 反井钻井技术及装备

1.1 反井钻井工艺

反井钻机钻进和普通钻孔方式不同,其钻井工艺包括导孔钻进和扩孔钻进^[4]。首先,在反井上口,施工钻机基础、循环池、循环沟槽等,完成供电、供水(风),形成运输通道,将反井钻机运输到位,在现场组装钻机和安装到基础上,调整钻机方位,采用地脚螺栓将钻机和基础固定,安装循环泵和管路,接通电源和水源,将钻杆、稳定钻杆和导孔钻头连接在钻机上,由上向下钻进导孔,钻进过程中逐渐加长钻杆,直到钻头和下水平巷道贯通,拆掉导孔钻头,连接上扩孔钻头,由下向上扩孔,直到和上水平贯通,扩孔过程逐渐拆除钻杆,导孔钻头破碎的岩渣,靠循环泵压入洗井液体循环排除,扩孔钻头破碎的岩渣靠自重落到下水平,由装岩设备装入运输车辆,运离反井下口,扩孔完成拆除反井钻机和辅助设备,提出扩孔钻头,反井钻进工作结束。

相对于普通钻进,反井钻机的钻进和出渣相互干扰少。反井钻机安装在反井的上口位置,拆导孔钻头、联结扩孔钻头、扩孔出渣、钻头维修、冷却水的排出在下口位置,钻进操作和出渣在2个水平,互不干扰;钻进效率高,由下向上扩孔,破碎岩渣靠自重直接落到下水平,岩渣只穿过扩孔钻头体向下掉落,下部钻孔内没有钻具,不影响排渣,钻进效率高;钻井直径大,原则上,只要钻机能力和钻杆承载力足够大,一次扩孔直径最大达到7 m,具有工作人员工作环境好、安全、劳动强度较低的特点。

1.2 反井钻井系统构成

反井钻机为地下工程施工服务,要满足地下工程特定的工作条件。反井钻机是完成反井施工核心装备,还要其他辅助设备系统配合,才能构成反井钻井系统^[4],反井钻进系统的构成及功能见表1。反井钻机主机部分包括主机、液压控制、泵站、油箱和电控系统等。操作台是控制和操纵钻机工作的中心,它主要由各种控制和操纵的阀及仪表组成,通过

管路、线缆控制钻机的工作,监控钻机的工作状态。钻具部分包括导孔钻头、扩孔钻头、普通钻杆、开孔钻杆、稳定钻杆、接头钻杆、破岩滚刀等。反井钻机辅助系统由冷却、出渣、循环、测量、供水、供电等构成。反井钻机提供钻具旋转和推进,旋转系统是由泵站产生高压油驱动液压马达转动,通过减速箱减速使主轴产生转矩,再由连接在主轴上的各级钻杆

向钻头传递。同时,泵站产生的高压油驱动推进油缸,带动动力头沿钻架的轨道做往复运动,通过钻杆的传递,使钻头产生对岩石的压力,配合转动,在机械力作用下,使滚刀对岩石产生冲击、挤压、剪切,破碎岩石。反井钻机技术参数及配套辅助设备要满足钻进工艺要求,才能达到较好的钻孔精度和较高的钻进效率^[2]。

表1 反井钻井系统构成及功能

Table 1 Composition and function of raise boring system

主要系统	系统名称	功能用途	主要结构形式
主机系统	反井钻机钻架、旋转及辅助操作系统	提供破碎岩石所需要的推力、拉力、转矩 承受钻进反拉力和反转矩 将反作用力传递到钻机基础 实现钻具拆卸和连接	推进部分:油缸推进、链条推进、齿条推进 导向:框架导向、圆柱结构导向、矩形结构导向 旋转驱动部分:液压马达驱动(高速马达行星减速、低速马达普通减速)、变频电动机驱动、直流电动机、交流电动机驱动等
	动力(驱动)系统	高压油或可控制电力提供钻机推进、旋转、辅助功能的动力	高压油:电动机、柴油机驱动液压泵 电力:变频器、直流交流控制器
	控制系统	控制调节动力分配,实现钻机功能参数和辅助作业	液压阀件控制、开关控制、计算机辅助控制
	开孔钻杆	导孔开孔钻进,保证开孔精度	圆钢加工整体结构,外圆经过磨加工
钻具系统	普通钻杆	传递破岩所需推、拉力、扭转力矩等	圆钢加工整体棒状结构
	异型接头	连接非标准丝扣钻具	圆钢加工整体结构
	导孔钻头	导孔钻进破碎岩石	三牙轮钻头、金刚石钻头、潜孔锤等
	扩孔钻头	扩孔钻进破碎岩石	球形、锥形、平面结构;整体结构式、组装结构
	破岩滚刀	扩孔钻头直接破岩	盘形滚刀、镶齿滚刀(锥形齿、球形齿、复合型齿)
稳定钻杆	维持钻具旋转平稳	螺旋形、直条形、扩孔器等	
辅助系统	循环系统	导孔钻进排渣、冷却钻具、维持孔帮稳定	离心泵、潜水泵、泥浆泵、高压气体、泥浆配置、检测系统
	冷却系统	冷却系统发热液压油或电器元件、冷却扩孔钻头及滚刀、减少破岩粉尘	风扇、外循环冷却水、内循环冷却液、循环冷却泵、钻杆内供水、环形空间供水、扩孔钻头喷嘴喷雾
	排渣系统	扩孔钻进期间排出落到下水平巷道的岩渣	耙斗装岩、装载机、侧装机、刮板输送机装入带式输送机、矿车、汽车等运出
	钻孔质量测量	导孔钻进过程中对钻孔、偏斜、孔内情况进行检测、纠偏	测斜仪、井下螺杆动力钻具、信号传输、井下电视、旋转定向钻具系统
	供水	导孔钻进地层漏失消耗、冷却损耗、配置泥浆等	水管、水泵等
	供电	电力驱动设备动力来源	控制开关等

1.3 反井钻机分类

反井钻机型号很多,很难以一种标准进行准确分类,可以按照推进、旋转方式和主机结构进行划分。根据推进方式分为:液压油缸推进、齿轮齿条推进、链条推进,现代反井钻机多采用液压油缸推进;根据旋转驱动系统划分为:液压马达驱动、直流电动机驱动、变频电动机驱动;根据

反井钻机主机承受反转矩的结构划分为框架、圆柱等支撑结构;根据扩孔钻头装配的破岩滚刀类型,可分为盘形、镶齿滚刀扩孔钻头,从反井钻井应用条件分为适合煤矿等要求防爆条件的防爆型反井钻机,及其他地下工程应用的非防爆型反井钻机;用于不同岩石条件钻进的硬岩反井钻机和软岩反井钻机等。但这些划分都不能完全代

表反井钻机特点,为此,依照反井钻机相关的反井钻井工艺方式对其进行划分。

按照反井钻机扩孔钻进方向分类,可以分为2种:①上扩法,相应的反井钻机为上扩式反井钻机,它是把钻机安装在反井的上部,先由上向下钻导孔与下部水平相通,再自下向上扩孔钻成所需的孔径;或反井钻机安装在反井下部巷道,由下向上直接钻导孔或分先导后扩,导孔和扩孔钻进方向都是向上。

②下扩法,下扩式反井钻机,是把钻机安装在反井下部巷道,先由下向上钻进导孔与上部水平相通,在上部拆掉导孔钻头,之后由上向下分级扩孔钻进。再有一些反井钻机既可以上扩也可以下扩,也称为多功能反井钻机。上扩法采用的较多,下扩法应用较少。下导上扩式反井钻机也称为常规反井钻机,钻机型号多,应用广泛,国内常用的反井钻机钻井深度和钻井直径对比如图1所示。

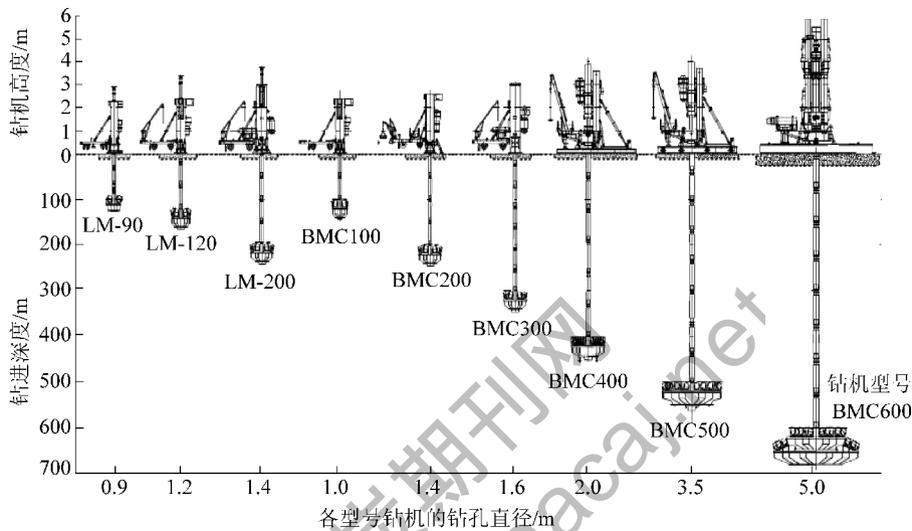


图1 反井钻机钻孔深度和钻孔直径

Fig. 1 Depth and diameter of raise boring

2 反井钻井技术发展与应用

2.1 反井钻井技术发展

反井钻机及反井钻井施工技术发展在我国主要经历了以下3个阶段^[5]。

1) 地下矿山小型反井钻机设备阶段。1980—1989年反井钻机采用整体框架式主机结构、液压马达驱动、液压油缸推进,将石油API标准钻铤经改进作为反井钻机钻杆,以软岩地层钻进为主,钻孔深度小于100m,钻孔直径1.0~1.5m,主要用于井下煤仓、溜煤眼、暗井等小直径导井。代表性工程有:利用LM-120型反井钻机在原开滦矿务局赵各庄矿,钻进煤仓、暗井等反井工程,钻孔直径1.2m,最大深度84m;原鹤岗矿务局南山矿等,为改变开采巷道布置,以溜煤眼联络开采和运输系统,达到减少巷道开拓目的,钻进大量直径1.2m溜煤眼。

2) 反井钻井工艺发展成熟阶段。1990—2005年反井钻机的技术参数包括转矩、推力、拉力增加,破岩滚刀适用范围增大,从软岩到中硬岩石,反井钻

机导孔钻进、偏斜控制、地层处理等工艺成熟,反井钻机应用范围扩大。代表性工程有:1990年采用LM-200型反井钻机在山东省新泰市汶南煤矿,在地面钻成直径1.4m、深度316m的新立井溜矸孔(导井)工程;1992年在国家重点工程北京十三陵抽水蓄能电站,首次在水电系统采用了反井钻机技术,快速、安全完成深度160m、直径1.4m的出线竖井导井工程,此后,又创新地采用反井钻机完成倾角50°,长度203m的压力管道,为水电压力管道建设开创了新工艺方法。反井钻机成为导井施工的重要装备,先后在泰山、宜兴、琅琊山、蒲石河、张河湾、西龙池、丰宁等多个抽水蓄能电站竖井斜井压力管道施工中成功应用^[6-7],又在大朝山、龙滩、小湾、达拉河、芹山、马鹿塘、引子渡、三峡、溪洛渡、向家坝、白鹤滩、乌东德等几十座国内大型电站建设发挥巨大作用^[8-9],2004年反井钻机在马来西亚巴贡电站完成8条竖井后,先后在马来西亚沐偌电站、哈萨克斯坦玛依拉电站、巴基斯坦尼鲁姆·杰卢姆电站、赞比亚卡里巴电站北岸扩机项目、老挝南立电站、厄瓜多

尔 TP 电站、厄瓜多尔保特索普拉多拉水电站、津巴布韦卡里巴电站南岸扩机项目等建成大量竖井及斜井。

3)大型反井钻机和大直径反井钻井工艺完善阶段。2006年后新型锯齿形钻杆丝扣联结、多油缸推进、多马达驱动形成大直径反井钻机,钻井深度达到600 m,钻孔直径5 m,深井、斜井反井钻井工艺以及硬岩滚刀得到发展,反井钻机适用范围得到拓展。代表性工程有:河南平煤集团四矿瓦斯抽放井,钻孔直径0.75 m,深度562 m^[10];山西晋煤集团赵庄煤矿瓦斯管道井,钻井直径2.5 m,深度431 m;山西晋煤集团王台铺煤矿风井,直径5.0 m,深度168 m。2009年在亚洲最长的陕西终南山公路隧道,钻成2条通风竖井导井,钻井深度分别为393和170 m^[11],此后在湖南邵怀高速公路雪峰山隧道、福建漳永高速官田隧道等建成多条竖井,甘肃敦格铁路当金山隧道通风竖井钻井直径3 m,钻井深度430 m;2003年首次将反井钻机技术应用于云南会泽铅锌矿,在金属矿山钻成深度300 m的延深井筒,此后,在河北黑龙山铁矿、迁安红石崖铁矿、首钢杏山铁矿、山西峨口铁矿等,在坚硬岩石中钻成多条竖井斜井;2015

年承担了在贵州开阳磷矿,在非煤矿山正在施工直径5.0 m井下竖井,这也是大型反井钻机第一次在井下施工。2014年BMC600大型反井钻机应用于白鹤滩电站,在坚硬的玄武岩中一次钻成直径3.5 m,深度100 m左右的通风井等工程,这是水电系统首次钻成大直径孔;反井钻机还在地下核原料开采、地下储气、储油硐室建设以及军事等工程建设发挥作用。

2.2 反井钻井技术应用

反井钻井技术从矿山工程开始,逐渐发展应用到不同的地下工程建设领域,在反井钻机发展的初级阶段,主要用作施工井筒的溜渣井(导井),钻孔直径小于2.0 m,一般井筒还需要采用爆破方法,由上向下进行扩挖(刷大),扩挖过程还需要人员下井操作,或采用竖井掘进机钻进扩大成井^[12],反井钻机和反井钻井工艺发展后,能够一次钻成直径3~5 m的井筒,破岩施工期间不需要人员下井作业,但支护作业还需要人员下井,从上向下进行支护,安全条件大幅改善。在岩石地层中建设竖井,多数工程具有下部隧道,可以采用反井钻机导井法或反井钻机一次成井方法。反井工程基本条件见表2。

表2 反井工程基本条件
Table 2 Raise boring engineering basic conditions

领域	工程	长度/m	倾角/(°)	断面形状	断面尺寸/m	施工方法	导井直径/m
矿山工程	矿仓	30~60	60~90	圆形	φ3~10	导井法	1.4~5.0
	暗井	60~200	90	圆形	φ5~6	一次钻成	1.0~2.0
	延深井筒	100~200	90	圆形	φ5~8	导井法	1.0~2.0
	新建井筒	100~800	90	圆形	φ5~10	导井法	1.0~2.0
	溜眼	20~60	60~90	圆形	φ1~2	一次钻成	1.0~2.0
	管道井	100~1 000	60~90	圆形	φ1~2	一次钻成	1.0~2.0
	下料井	100~500	60~90	圆形	φ0.5~1.0	一次钻成	0.5~1.0
	电缆井	100~500	60~90	圆形	φ0.3~1.5	一次钻成	0.3~1.5
	取水孔	100~500	90	圆形	φ0.3~0.5	一次钻成	0.3~0.5
	抢险钻孔	100~500	60~90	圆形	φ0.2~1.0	一次钻成	0.2~1.0
水电站、抽水蓄能电站	通风井	50~200	60~90	圆形	φ3~8	导井法	1.0~2.0
	压力管道	50~600	45~90	圆形	φ3~10	导井法	1.0~2.0
	调压井	50~200	90	圆形-矩形	φ3~20或10×10	导井法	1.0~2.0
	电梯井	50~200	90	圆形	φ5~8	导井法	1.0~2.0
	船闸竖井	50~100	90	矩形	10×20	导井法	1.0~2.0
交通(公路、铁路)	隧道通风井	100~800	60~90	圆形	φ5~10	导井法	1.0~2.0
地下储油、气罐	输送井	50~120	90	圆形	φ0.5~1.2	全断面	0.5~1.2
其他工程	通道井	50~1 000	90	圆形	φ3.5~10	导井法	1.0~2.0

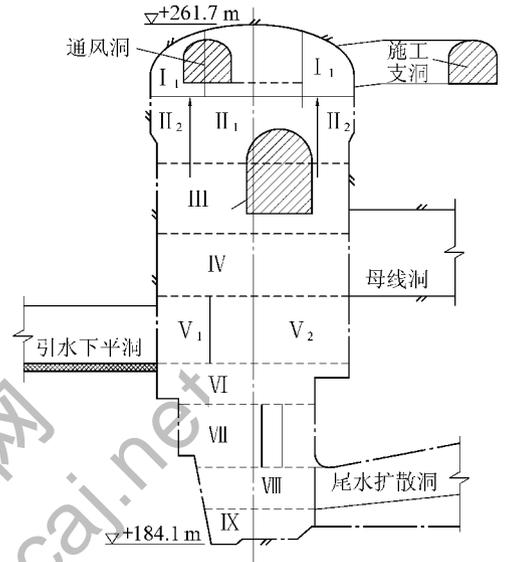
3 反井钻井在地下工程施工变革中的作用

反井钻机采用机械破岩方式,与爆破法相比对围岩和周围已建成工程结构扰动小,效率高。随着技术、工艺、装备和材料发展,反井钻井法所需的施工人员相对钻爆法大幅减少,在施工成本方面,逐渐接近或低于普通爆破法的水平,在成井速度、质量方面综合优势更加明显。反井钻机技术从矿山建设工程开始,并渗透到地下工程各个领域,目前,还是以井筒工程为主,在一些管道井、下料孔、安全通道等工程中有所应用,但是还没有全面发挥出反井钻井法的优势,因此,建议在以下3方面实现工艺技术变革,促进地下工程施工技术的发展。

3.1 大尺度地下空间开挖

大型水力发电站、抽水蓄能电站地下发电厂房和变电系统,以及地下储气、储油罐体、潜艇库、人护设施等,都需要建设大型地下洞室或洞室群,这些洞室体积巨大,开挖工序复杂,如广西龙滩水电站地下厂房长398.9 m,宽30.7 m,高77.3 m,石方开挖量63.6万 m^3 ;主变室长408.8 m,宽19.8 m,高34.05 m,石方开挖量18.2万 m^3 ;尾水调压井(含井间连接洞)长345.32 m,宽25.15 m,高81.21 m,石方开挖量50.3万 m^3 。有包括引水洞、尾水洞、通风洞、排风竖井、排水洞、施工支洞等9条连接洞。我国在大型洞室施工方面总结出许多经验,如分层、分区开挖,深孔控制爆破,预留岩锚梁等,如图2所示,由上到下,先顶拱边墙后顶拱,再利用施工或交通隧道逐渐向下开挖支护,直到洞室底部,这种工艺已成熟应用在多项工程中。随着机械化破岩技术发展,可以探讨采用反井钻机开挖导井(图3),并结合新的岩石切割设备研制,以非爆破的方式将岩石从岩体上切割下来,逐渐形成洞室结构。机械切割的另一大优点是对围岩扰动小,有利用发挥岩体的自撑能力,减少支护材料消耗,保持洞室的长期稳定。具体施工方法是采用先开挖上下施工支洞、拱顶的中导洞以及地下空间下部中导洞,在上部沿厂房轴线以一定间隔,采用反井钻机钻出直径3 m左右的一系列导井,然后,以导井为中心,由上向下钻垂直孔,通过以下3种方式进行洞室的扩大开挖,第1种,钻孔装药,逐渐分层爆破,利用反井钻孔作为自由面,实现深孔控制光面爆破;第2种,在钻孔内安设胀裂器具,通过液压方式加载以较低的能耗将岩石劈裂破碎下来;第3种,在竖向钻孔安设二氧化碳制裂器

材,以液体二氧化碳体积快速膨胀的方式,将岩石破碎下来。还可以研究岩石切割设备,以反井钻孔为自由面,分块把岩石切割下来,还将废弃岩石变为很好的建筑材料。这些方法可以减少爆破有害气体排放对环境污染和对围岩岩体的破坏,实现大型地下空间开挖的创新变革。



I₁、II₁、II₂、III、IV、V₁、V₂、VI、VII、VIII、IX为由上向下的开挖顺序

图2 大型地下洞室传统开挖方法

Fig. 2 Traditional excavation method of large underground chamber

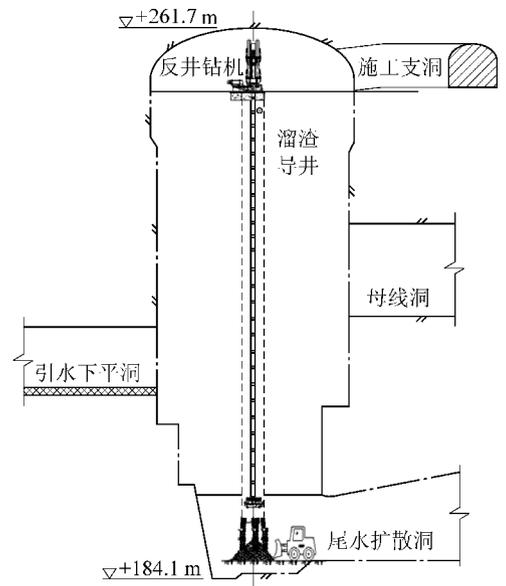


图3 大型洞室反井钻机辅助开挖方法

Fig. 3 Auxiliary excavation method of raise boring in large underground chamber

3.2 破坏工程修复

一些在服务年限内的地下工程,可能因为多种

原因发生局部或大面积、大规模破坏,破坏的原因可能是设计和施工先天不足,也可能由于地质因素,如地震、构造变化等,或由于矿物和地下水的开采引起地层移动,造成地下工程支护结构破坏、围岩的坍塌等后天因素。服务期内破坏的工程受到周围工程结构、生产系统限制,维修起来存在安全问题,失去运输和安装一些必要的维修装备条件,为了减少对生产的影响,必须快速高效完成维修,因此,需要研究采用特殊的维修施工方法。如矿山常用的溜井,深度60~300 m,在溜井上口或中间位置进行放矿,矿石自由下落,产生巨大冲击能量,造成溜井井壁结构和井帮岩石破坏,由于溜井内一般充填有不同高度的矿石,所以溜井的破坏情况很难准确掌握,发现问题时溜井已经发生大面积破坏,破坏的空间形状没有规律,如图4所示,井帮岩石是否以稳定难以判断。采用传统的从上向下的维修方式,存在用时长、不安全,溜井上口已没有足够空间安设维修辅助设备等问题。由此提出反井钻机为核心的维修方法,实现破坏维修工程的变革,创新的形成溜井维修的工艺。新的溜井修复工艺,主要工序包括溜井井筒破坏探测,探测溜井空间内坍塌后的结构形状,确定溜井范围、体积等参数;安装反井钻机,下放钻杆,对钻杆进行保护;下部填砂,上部塌方段充填低标号混凝土;混凝土达到一定强度后,联接扩孔钻头,一次扩孔到溜井所需直径3~8 m;再由上向下进行必要的井壁支护,砌筑耐磨高强混凝土,恢复溜井设施重新投入使用,安全高效地完成溜井修复。

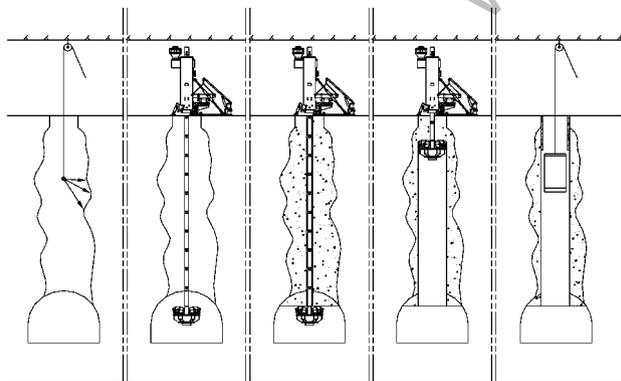
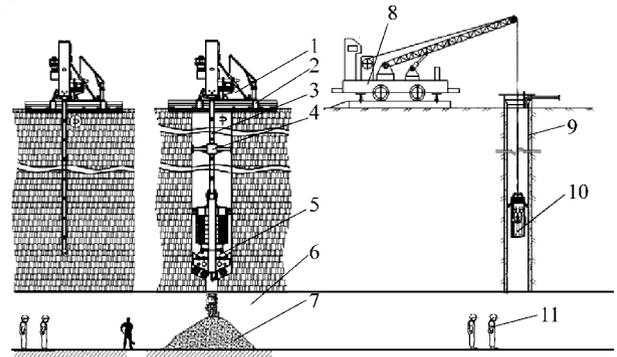


图4 反井钻井法治理破坏后井筒示意
Fig. 4 Raise boring control broken shaft

3.3 在服役地下改造和安全救援

一些地下工程在运行期间,由于条件变化需要

进行改造、扩容,增加一些设施和功能,这些工程在原设计上没有预留接口和空间,在岩石或工程结构的混凝土内进行改造施工,如采用爆破法破岩,爆破的冲击、震动,对原有结构和围岩造成破坏,一些工程断面较小还无法应用爆破法,因此,需要可控的机械破岩方法,包括水平反井钻井技术^[13],可以在地下工程直接钻进任何角度、直径、深度的联络通道,相对于爆破法,大幅减少对原有结构和围岩的破坏。如为原有地下工程结构空间增加通风井,建设逃逸通道,进行地下工程抢险救护等,在智利铁矿救援中,就设计采用反井正钻方法(图5),快速建设了抢险逃逸井。其施工工序包括测量定位确定抢险孔的钻进位置,然后施工钻机基础安装反井钻机,从上向下钻进直径311 mm的导孔,然后更换正钻用的钻头,由上向下正钻形成逃逸通道井,逃逸通道井形成后,利用提升绞车下放子弹型救生舱,逐次将被困人员救出。这种救援方式的优势是导孔钻成后,可利用导孔下放食物、水、通信器材、药品等,当然这种方法存在劣势,就是在正钻期间破碎一定量的岩石,下部要有足够的空间容纳,被困人员还要进行岩渣处理作业。反井钻机提供的工艺方法,在地下工程改扩建以及安全救护方面实现了变革。



(a) 定向导孔钻进 (b) 反井正钻扩大 (c) 被困人员救援

1—反井钻机;2—钻杆输送装置;3—钻杆;4—稳定器;
5—反井正钻钻头;6—被困空间;7—钻进成型岩渣;
8—救援提升绞车;9—救援井;10—救援舱;11—等待救援人员

图5 反井钻井法救援被困人员示意

Fig. 5 Rescue trapped people by raise boring machine

4 结 语

少人化或无人化机械破岩钻凿井筒是井筒施工技术发展方向^[14],从井下反井施工发展起来的机械破岩反井钻井技术,以反井钻机装备为基础,特别是在BMC600(ZFY5.0/600)大型反井钻机成功应用

的技术上^[15],以反井钻井工艺为支撑,通过3个阶段发展、实践和创新,成为地下矿山建设和改扩建重要技术,解决了矿山反井施工的安全、效率和质量问题,从钻进小直径孔用作大断面扩挖溜渣、泄水和通风的导井,到一次钻成较大的直径井筒,成为一种新的井筒施工工艺,使具有下部巷道的一大类井筒工程可以采用非爆破的方式形成井筒,这种方式在矿山工程推广应用的同时,逐渐在水利发电、抽水蓄能电站、公路、铁路长大隧道通风井及其他地下工程建设中得到认可和推广。反井钻机在地下工程建设中的优势逐渐得到认可,但是反井钻机还有很多相对于传统方法的优点,或者是传统方法无法做到的优势,还需研究和进行挖掘创造,形成创新的技术,以实现地下工程建设、地下工程运营、安全抢险救援、事故处理以及特殊条件下灾害治理等方面变革,促进地下工程施工进步。

参考文献 (References):

- [1] 钱七虎,陈志龙.二十一世纪地下空间开发利用展望[J].工程兵工程学院学报,1997,12(3):1-8.
Qian Qihu, Chen Zhilong. The prospect of development and utilization of underground space in 21th century [J]. Journal of Nanjing Engineering Institute, 1997, 12(3): 1-8.
- [2] 刘志强.快速建井技术装备现状及发展方向[J].建井技术,2014(S1):4-11.
Liu Zhiqiang. Present status and the development orientation of rapid mine construction technology and equipment [J]. Mine Construction Technology, 2014(S1): 4-11.
- [3] 刘志强.水电工程应用反井钻井技术的新进展[J].水力发电,2004,30(11):23-24.
Liu Zhiqiang. New development of the application of raise-boring technique to hydroelectric project [J]. Water Power, 2004, 30(11): 23-24.
- [4] Liu Zhiqiang, Meng Yiping. Key technologies of drilling process with raise boring method [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015(4): 385-394.
- [5] 刘志强,洪伯潜.改革开放30年煤矿井筒建设技术及装备发展[J].建井技术,2011,32(1/2):4-7.
Liu Zhiqiang, Hong Boqian. Technology and equipment development of mine shaft construction during 30 years of reform and opening in China [J]. Mine Construction Technology, 2011, 32(1/2): 4-7.
- [6] Liu Zhiqiang, Meng Yiping, Ji Hongguang, et al. Application and

development of raise boring machine in pumped storage power plant [C]//New Development in Rock Mechanics & Engineering. Shenyang: The Proceeding of the 4nd International Conference, 2012.

- [7] 刘志强,郑德湘.反井钻机技术在抽水蓄能电站建设中的应用和发展矿山建设工程技术新进展[M].合肥:合肥工业大学出版社,2009:233-241.
- [8] 刘志强,甘文鸿.反井钻机技术与地下工程开发[J].地下空间,1999,19(5):425-428.
Liu Zhiqiang, Gan Wenhong. Raise boring technology and underground engineering development [J]. Underground Space, 1999, 19(5): 425-428.
- [9] 张永成,敬守廷,刘志强,等.我国煤矿钻井法凿井技术的发展和展望[C]//矿井建设现代技术理论与实践.北京:煤炭工业出版社,2005.
- [10] 刘志强,荆国业,王桦.大直径瓦斯抽排井钻进技术分析[J].建井技术,2015,36(1):1-7.
Liu Zhiqiang, Jin Guoye, Wang Hua. Analysis on drilling technology of large diameter gas drainage well [J]. Mine Construction Technology, 2015, 36(1): 1-7.
- [11] 刘志强,吴玉华.钻井法凿井“一钻成井”工艺[J].建井技术,2011,32(1/2):8-10.
Liu Zhiqiang, Wu Yuhua. "One pass drilling completed mine shaft" technology with mine full shaft drilling method [J]. Mine Construction Technology, 2011, 32(1/2): 8-10.
- [12] 刘志强.矿山竖井掘进机凿井工艺及技术参数[J].煤炭科学技术,2014,42(12):79-83.
Liu Zhiqiang. Mine shaft sinking technique and technical parameters of mine shaft excavator [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(12): 79-83.
- [13] 刘志强.ZFY3.5/400电控制反井钻机技术及应用[J].河南理工大学学报,2011,30(S1):280-283.
Liu Zhiqiang. Technology of ZFY3.5/400 electronic-control raise boring machine and its application [J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2011, 30(S1): 280-283.
- [14] 刘志强.机械井筒钻进技术发展及展望[J].煤炭学报,2013,38(7):1116-1122.
Liu Zhiqiang. Development and prospect of mechanical shaft boring technology [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(7): 1116-1122.
- [15] 刘志强,徐广龙.ZFY5.0/600型大直径反井钻机研究[J].煤炭科学技术,2011,39(5):87-90.
Liu Zhiqiang, Xu Guanglong. Research on ZFY5.0/600 mode large diameter raise boring machine [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(5): 87-90.