

文章编号: 0253-9993(2013)07-1116-07

机械井筒钻进技术发展及展望

刘志强^{1,2}

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院 北京 100083; 2. 天地科技股份有限公司 建井研究院 北京 100013)

摘 要: 首先对国外机械钻进技术现状做了回顾; 其次, 对冲积层特殊钻井法凿井技术在国内产生、发展进行了回顾, 并将钻井技术发展划分为“技术基础准备阶段”、“钻井工艺现场实验应用阶段”、“技术装备发展成熟阶段”和“技术、装备突破阶段”等 4 个阶段, 提出钻井法凿井向西部弱胶结软岩煤矿井筒、矿山小直径垂直通道、市政工程以及非煤矿山工程发展方向和需要解决的技术问题; 再次, 对于反井钻机技术发展、钻凿煤矿井筒技术及难点等做了分析, 列举出反井钻井凿井需要解决的技术问题; 最后, 对竖井掘进机技术发展提出展望, 对竖井掘进机凿井破岩、排渣、支护和辅助系统作用进行了论述。通过分析得出: 根据不同地质条件、工程条件采用不同的机械化凿井方法, 才能达到减少井筒内施工人员, 提高安全和工作效率目的。

关键词: 钻井法凿井; 竖井钻机; 反井钻机; 竖井掘进机; 岩石破碎

中图分类号: TD265 **文献标志码:** A

Development and prospect of mechanical shaft boring technology

LIU Zhi-qiang^{1,2}

(1. Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Institute of Mine Construction, Tian-di Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: Firstly, the paper reviews the status quo of mechanical shaft boring technology overseas. Secondly, describes generation and development of shaft drilling technology used in domestic alluvium. Then drilling technology development is divided into four stages: Basic technical preparations; field application test of drilling process; mature technology and equipment stage and breakthrough stage. List the drilling method used in western soft rock, small diameter vertical channels in mines, municipal engineering and other mines, as well as technical problems need to be solved. Thirdly, the development of Raise Boring Machine and the difficult in drilling in coal mine was analyzed, and technical issues need to be addressed in the Raise Boring Machine construction is described. Fourthly, the development of full face shaft boring machine is prospected and performances of rock-cutter, slagging, supporting and auxiliary systems are discussed. Through analysis, conclusions are that using suitable mechanical drilling method to construct shaft under different geological and project conditions can reduce the workers in the underground construction, then complete the construction safety and efficiency.

Key words: mine shaft drilling; shaft boring machine; raise boring machine; full face shaft boring machine; rock crushing

井筒是矿井建设的“咽喉”工程, 工程量不大(占井巷工程总量的 5% ~ 7%), 但工期较长(占井巷施工总工期的 40% ~ 50%)^[1]。我国矿井井筒施工以

钻爆法普通凿井为主, 采用伞形钻架或手持风动凿岩机钻凿炮眼、装填炸药、安装雷管、连接起爆线、爆破、抓斗装岩机装岩、吊桶出矸、人工或挖装机清底、钢筋

收稿日期: 2013-01-04 责任编辑: 常琛

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(SS2012AA060611); “十一五”国家科技支撑资助项目(2008BAB33B03)

作者简介: 刘志强(1962—), 男, 河北徐水人, 研究员。Tel: 010-84263105, E-mail: liuzhiqiang@vip.sohu.com

绑扎、支模浇筑混凝土、以及管缆延伸、吊盘定位等^[2]。这些都需要人工在井下操作,工作人员在淋水、低温、潮湿的艰苦环境作业,受到各种机械高强度噪声、粉尘等职业伤害,井筒突水、煤层瓦斯突出、塌方、落物等安全事故也时有发生^[3-11],可以说建井工人从事的是煤矿最艰苦、危险的工作,目前相对于采煤等岗位建井期间的机械化水平最低。

钻井法凿井是一种全机械化综合凿井技术,采用专用钻机从地面直接钻凿出井孔后,再将地面预制好的井壁逐节漂浮下沉到已钻成的井孔内,最后进行壁后置换充填,形成煤矿井筒,整个凿井过程工作人员全部在地面工作,实现“打井不用下井挖”^[12],从根本上解决凿井安全和职业伤害问题,并且地面预制井壁质量好,在复杂的井筒环境长期稳定性好,井筒不存在水的渗、漏。虽然钻井法凿井技术是作为一种特殊凿井技术,主要应用于含水不稳定地层,但是随着工艺、技术、装备的发展,钻井法应用范围将不断扩大,是井筒建设技术的发展方向。其它井筒钻进技术包括反井钻机和井筒掘进机技术,也将丰富和发展钻井法机械凿井内涵,促进建井技术发展。

1 国外机械钻井技术现状

钻井法凿井最早出现在约1850年,德国工程师肯特(Kind)用改造的冲击式钻井方式,钻成一个直径4.25 m,深98 m的钻井井筒。1871年德国工程师霍尼格曼(Honigmann),采用多次扩孔工艺,完成直径7.65 m的井筒钻进,奠定现代钻井的工艺基础。到20世纪70年代,德国、前苏联、美国等研制出不同类型竖井钻机,应用于采矿工业和核试验井筒钻进。美国休斯公司1980年开始研制CSD-300型钻机,在澳大利亚西部的阿格纽镍矿岩层中,钻成一个直径4.267 m,钻深663 m的风井。随着近几年国外井筒建设的萎缩,国外井筒钻进量大大减少,在美国用于钻凿直径2~5 m的采矿、井工采油和一些市政工程井钻进工作^[13-14]。

20世纪50、60年代,美国和德国研制出有钻杆的反井钻机,反井钻井工艺利用了地下巷道所形成的生产系统,钻进过程破碎岩石的排除,从液体压气提升,变成到自重落于下部巷道,克服了钻井法排渣重复破碎、钻进效率低的缺点,大大提高了钻井速度,因此得到广泛的应用。美国、德国、芬兰、日本等先后研制出不同类型的反井钻机。目前,导孔偏斜控制技术,使反井钻井深度超过千米,钻孔精度能满足工程要求,钻机驱动、推进系统能力增大,使得反井钻机钻孔直径超过7 m。反井钻机主要适用岩石条件稳定

的地层,对于自支撑能力不足的地层,在扩孔期间可能发生坍塌,需要慎重应用,或需要进行地层改性处理^[15]。

20世纪60年代开始,美国、德国开始研究竖井掘进工艺,利用隧道掘进机技术,研制出不同类型竖井掘进机,包括利用导孔竖井溜渣、全断面局部淹水排渣、部分断面破岩、吸收式排渣等多种类型设备,主要用于市政和矿山井筒工程,其中大部分工程是采用有导孔方式,利用反井钻机钻成的导孔,作为排渣通道,提高排渣效率和设备可靠性。竖井掘进机的优点是可以钻进及支护平行作业,可以适应相对地质条件较差的地层,目前,最大钻井深度也超过千米^[16]。

2 钻井法凿井技术

2.1 国内钻井法凿井发展

钻井法凿井在国内应用已有40余年的历史,经历了从无到有、从小到大的过程。钻井直径由4.3 m到10.8 m,深度从90 m逐步到660 m,成井直径3.5 m到8.3 m,从钻凿井风井推广到钻凿主、副井井筒^[17]。从引进石油装备开始,到专用设备和专项技术的发展。到目前为止,完成钻井井筒85个,钻井总深度23 656.02 m,最大钻井深度656.2 m,通过冲积层最大厚度583.8 m,最大成井净直径8.3 m^[18],历年钻井深度变化如图1所示,成井偏斜率变化如图2所示。总体来说,我国钻井法凿井技术大致经历了以下4个阶段。

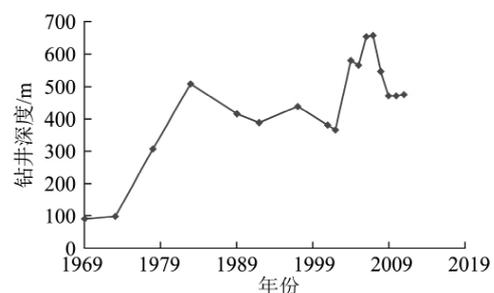


图1 钻井深度逐年变化情况

Fig. 1 Yearly variations of shaft boring depth

(1) 技术基础准备阶段(1958—1969年)。

技术基础准备包括工艺技术和装备研究,1958年煤炭科学研究总院建井研究所成立了钻井法技术研究组,开始收集国内外有关钻井法凿井、石油钻井的技术资料,进行分析、整理和研究,提出了钻井法凿井工艺路线,并进行了直径1 m、深10 m和28 m小型钻井试验^[19],1965年国家科学技术委员会批准立项进行钻井法凿井中间试验研究^[20]。竖井钻井装备研究是从石油钻机转盘、绞车、天车、游车、水龙头、大

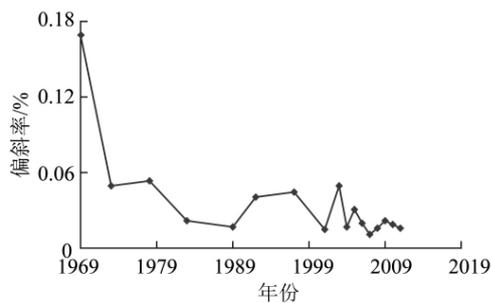


图 2 成井偏斜率逐年变化情况

Fig. 2 Yearly variations of the skewness in shaft excavation

钩等六大部件开始,根据钻井法凿井直径大等特点,进行相应改进和研究,并设计制造大直径钻头、钻台、井架等配套设备,1968 年底组装成 ZZS-1 型中间试验钻机。

(2) 钻井工艺现场实验应用阶段(1969—1979 年)。

1969-01-01—06-13,采用 ZZS-1 型实验钻机,在淮北朔里南风井完成了我国第 1 口钻井工程,钻井直径 4.5 m、净径 3.5 m、深度 90 m,取得成功,经过工艺改进和完善以及多种类型钻机研制和应用,钻井法逐渐成为可靠的特殊凿井工法。

(3) 技术装备发展成熟阶段(1979—2000 年)。

随着对钻井技术的认识,专用竖井钻机开始设计制造,先有 MZ-I 型、MZ-II 型和 YZ-1 型等钻机完成设计加工投入适用,随后又设计制造了 ND-1 型、SZ-9/700 型、BZ-1 型、红阳-I 型、红阳-II 型、QZ-3.5 型以及 AS-9/500 型等较大竖井钻机,以满足大直径、深井钻井的需求。从而逐步形成了主要是钻凿冲积层的钻井法凿井工艺系统:地面转盘驱动钻杆和钻头旋转、滚刀破岩;绞车、天车、游车、大钩实现钻具提升、下放;恒速或恒钻压自动或手动给进;一次钻超前孔,多次扩孔达到设计直径;泥浆护壁,压气反循环洗井排渣,化学添加剂处理泥浆,机械除渣;地面预制井壁,在泥浆中漂浮下沉预制井壁到设计深度,最后进行壁后充填固井成井。逐渐形成“一次超前、多级扩孔、减压钻进、泥浆护壁、压风反循环洗井、地面预制井壁、漂浮下沉、壁后充填固井”的钻井工艺,代表性的工程是深度 508 m 淮南潘三西风井钻凿成功。

(4) 技术、装备突破阶段(2001 至今)。

进入 21 世纪,通过“十五”科技攻关计划“600 m 深厚冲积层钻井法凿井技术研究”的实施,以龙固双主井井筒钻进成功为标志(深度 582.75 m,成井直径 5.7 m),从改进 L-40/800 型以及 AS-9/500 型竖井钻机,到 AD130/1000 型、AD120/900 型液压竖井钻

机研制成功,龙固深厚冲积层钻井工艺^[21]和“十一五”科技攻关计划“一扩成井”、“一钻成井”等快速钻井新工艺的成功应用^[22],标志着我国钻井法凿井技术日臻成熟,综合达到国际领先水平。

2.2 钻井法凿井技术应用前景

目前,钻井法主要是作为一项特殊凿井技术应用。随着技术、经济水平的提高,具有高风险的建井施工,必将逐渐向机械化方向发展,钻井法是可选择机械化施工工艺,通过技术、工艺和装备的研究,逐渐拓展其应用范围。

(1) 西部弱胶结软岩井筒钻进。

西部包括内蒙古、新疆、宁夏、陕西等部分煤矿,上覆岩层主要为侏罗系、白垩系地层,特别是白垩系地层,弱胶结、遇水、空气泥化、沙化严重,并且,这些地层含水丰富,普通凿井法难以通过,冻结凿井也出现许多问题,因此,可以考虑钻井法,针对西部地层、环境、气候等特点,通过研究提出工艺方法,解决部分井筒工程机械化施工问题。西部采用钻井法需要研究解决技术问题:井筒锁口流动风积沙治理、大直径软岩钻进破岩和排渣、低密度泥浆材料对易水化软岩护壁作用、低温条件装备运转和泥浆循环、废弃泥浆处理及综合应用、永久井壁和地层耦合关系、适合于西部地层的井壁结构设计理论、低密度泥浆内漂浮下沉井壁失稳控制及壁后充填技术等。

(2) 快速钻进矿山小直径垂直通道。

随着煤矿瓦斯抽放、充填开采、逃生避灾、电缆和管线通道建设,需要施工大量的直径 0.5~2.0 m 的垂直井孔,包括瓦斯抽放孔、充填下料孔、避灾硐室逃逸通道、避灾硐室生命维护通道、采区电缆井、下料管道井等。目前,这些工程一般采用地质或水文钻机施工,由于钻机、钻具结构、能力小(扭矩、提升力)、排渣循环方式等限制,钻进效率非常低,如果能够引进钻井法凿井技术工艺,可以大大提高钻进效率,促进类似工程快速建设,为矿井安全生产服务。钻井法施工小直径孔需要研制相应能力满足钻井工艺要求的钻机、研究钻机快速安装拆卸工艺、废弃泥浆随钻进处理、专用井孔支护结构、材料及安装技术及装备。

(3) 市政筒形工程钻进。

市政工程也存在大量的类似井筒工程,第 1 类为桩基工程,包括高层建筑物基础桩、大跨度桥梁大直径桩;第 2 类地下筒形结构,包括污水处理井、筒形地下停车场、圆形地下工程结构通道;第 3 类作为工程的辅助施工通道,如建设污水、电缆、管道、通讯等顶管工程的两端始发和接收井,地铁、公路跨江河和建筑物盾构隧道两端始发和接收井等。这些工程一般

深度较小(小于100 m),直径相对较大,有些工程超过20 m,目前一些工程由于施工技术及设备限制,如桩基工程采用小直径多桩代替大直径结构,会影响到结构承载能力。现有的桩基钻孔设备最大直径小于2.5 m,若引进钻井法凿井技术,一次成井直径会大大增加,为工程提供合理的结构形式。考虑市政工程特点,钻井法应用时需要解决好市政施工场地限制和设备大型化的矛盾、钻井产生废弃物外运和就近处理技术。

(4) 非煤矿山井筒工程。

非煤矿山井筒工程包括金属矿山、非金属矿山各类井筒,水力发电站、抽水蓄能电站通风、压力管道、电梯井等,山岭公路、铁路隧道通风竖井等,这些工程和煤矿井筒工程地层最大的区别是岩石坚硬,岩石从岩体上破碎下来形成井孔难度大,能量消耗多,因此,要研究合理破岩方式、滚刀结构、刀齿材料和刀具的耐磨性,以适应石英含量高的火成岩等磨蚀性强的岩石条件应用。

3 反井钻机钻井凿井技术

3.1 国内反井钻机钻井技术发展

反井是指在地下采矿作业中由下向上施工竖井或斜井的凿井方法。反井钻机钻井工艺如图3所示,包括导孔钻进和扩孔钻进。反井钻机驱动钻杆旋转,钻杆将能量传递给钻头,通过滚刀将岩石破碎下来,形成钻孔(导孔和扩孔)。导孔的作用是将钻具下放到下水平,以便联结扩孔钻头。导孔钻进关系到钻孔的质量,是反井施工的关键。导孔的垂直度决定了钻孔的偏斜率;导孔钻进过程也是对地层探测的过程,可以了解岩石性质、地质构造等,对扩孔钻头破岩刀具选择及工程支护方式选择都有参考价值;还可以通过导孔,对稳定性较差的地层进行预加固处理。扩孔过程是大量破碎岩石的过程,需要根据岩石条件选择破岩滚刀,布置扩孔钻头,制定相应的钻进参数,以达到钻进效率最高。我国从20世纪80年代开始研制反井钻机和反井钻井工艺,发展经历了以下3个阶段^[23]。

(1) 工艺装备模仿阶段(1980—1989年)。

为解决煤矿井下反井工程施工的安全问题,20世纪80年代,通过研究国外反井钻机结构原理和工艺,开始研制反井钻机,主要满足煤矿井下施工的特殊条件,具有防爆性能、体积小、质量小便于井下运输、安装使用,反井钻机主机采用框架式结构,液压油缸推进、液压马达驱动钻杆旋转,钻杆联结采用石油钻杆API标准丝扣,采用镶齿滚刀破岩,破碎煤系地

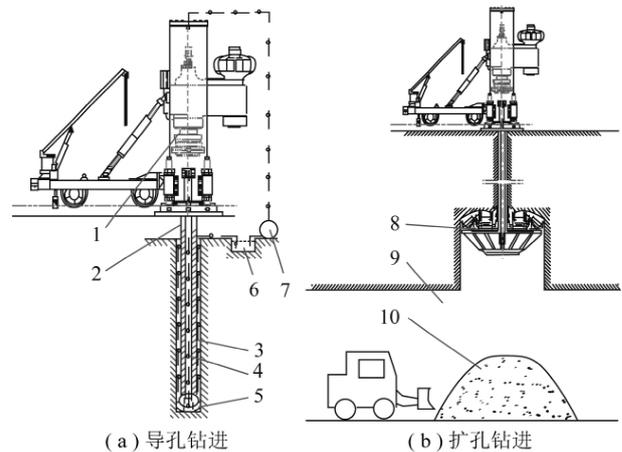


图3 反井钻机导孔工艺

Fig. 3 Technics picture of raise boring machine guide hole
1—动力水龙头;2—钻杆;3—导孔钻头;4—从泥浆泵压入的泥浆;
5—从环形空间返回的携带岩渣泥浆;6—泥浆循环池;
7—泥浆泵;8—扩孔钻头;9—下部巷道;10—扩孔岩渣

层软岩为主,钻孔深度一般小于100 m,钻孔直径1.0~1.5 m,反井钻机主要用于井下煤仓、溜煤眼、暗井、通风孔等工程。代表性工程有:原开滦矿务局赵各庄矿利用LM-120型反井钻机,钻进煤仓、暗井等反井工程,最大深度84 m;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,钻进大量直径1.2 m溜煤眼,达到减少巷道开拓目的。

(2) 工艺装备发展阶段(1990—2005年)。

随着反井钻机技术得到认识,钻井应用范围扩大,从煤炭井下工程,发展到水电、金属矿山等领域,钻孔深度、钻孔直径增大,反井钻井所需要破碎岩石抗压强度远远高于煤矿地层,从小于60~100 MPa到250~300 MPa(如泰山抽水蓄能电站花岗岩)通过研究相应的钻机技术参数和大型反井钻机结构;研究深井、斜井反井钻井工艺;研究坚硬岩石破碎理论和相适应的破岩滚刀,扩大了反井钻机应用范围。代表性工程有:山东省新泰市汶南煤矿在地面钻成直径1.4 m、深度316 m的新立井溜矸孔;十三陵抽水蓄能电站钻成直径1.4 m、倾角50°、斜长203 m的压力管道工程,反井钻机在煤矿和水电工程领域得到广泛应用,主要钻机类型为LM-200型反井钻机。

(3) 工艺装备成熟阶段(2006至今)。

小型反井钻机得到普及应用后,开始自主研究设计适合我国不同地质条件、工程条件的大型反井钻机,在装备上大推、拉力推进、大扭矩旋转的多油缸提升、多马达驱动形成大直径反井钻机;锯齿形螺纹联结,替代API标准,形成了大直径钻杆新型联结方式,提高钻杆抗拉、抗扭能力,满足通用性和可靠性;

组装式大直径扩孔钻头,满足井下运输和狭窄空间组装;大直径反井钻井工艺,随钻测量和纠偏控制技术,提高了偏斜控制精度。这些技术进步使反井钻机开始应用于煤矿井筒工程。代表性项目有:河南平煤集团四矿瓦斯抽放井,钻孔直径 0.75 m,深度 462 m;山西晋煤集团赵庄煤矿瓦斯管道井,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^[21]。主要钻机类型为 ZFY3.5/400^[23]和 ZFY5.0/600 型反井钻机。

3.2 反井钻机钻凿井筒工艺技术

近年来随着 ZYF3.5/400^[24]和 ZFY5.0/600 型^[25]等大型反井钻机的研制成功,反井钻机钻凿煤矿井筒成为可能,并进行相应工艺技术和工业性试验应用。反井钻机作为机械化施工井筒的一种新工艺,充分利用设备和自然力量,不存在重复破碎,相对普通凿井和钻井法凿井,具有安全性高,钻进过程人员不下井作业,设备少、占地少、工作人员少,钻进成井速度快,功效高,施工位置不存在废弃物排放等优点。但反井钻机只能作为综合机械化凿井的一种方式,不能够解决所有井筒钻凿问题,适用范围也受到工艺限制,只能用于具下部巷道已经形成生产系统的井筒,一般要求井筒所穿过的地层较为稳定,目前主要用于采区风井建设。反井钻井法还需要研究和解决很多技术、工艺问题。

(1) 偏斜控制问题。

反井钻机钻进小直径孔,一般是用作通风或是大直径工程的导井,是一种措施工程,导井的偏斜只要在永久断面内,就可以使用。反井钻机施工井筒,主井、副井作为提升井,偏斜要求严格,如果存在偏斜,为满足提升需要,只能加大井筒断面,风井虽然偏斜要求低,但也要满足施工或安设安全梯的需要,为此,提高反井钻机钻孔精度,是制约反井钻机钻凿井筒的重要因素。提高钻孔精度的途径有提高钻杆直径,增加刚度,采用 RVDS 旋转垂直钻进系统,这 2 种方式,都会大大增加反井钻井施工成本。另外就是在工艺上保证,如按理论计算布置钻具、提高开孔精度、合理控制钻井参数、实现随钻测斜等等,这要求操作人员具有良好的理论基础、实践经验和现场处理能力。

(2) 井帮稳定性问题。

反井钻进从导孔和下部巷道透孔,联结扩孔钻头开始扩孔后,所形成的井孔井帮,需要在整个扩孔过程、反井钻机拆除、安装支护设备以及从上向下支护期间,井帮必须具有自支撑能力,不能在此期间发生大规模破坏、坍塌事故。虽然反井钻机机械破岩,对围岩的扰动达到最小,但反井钻井所穿过的地层复

杂,钻进大直径孔更容易发生井帮不稳定事故,这样限制反井钻机施工大直径、深井的应用范围,为了维护岩层的稳定,反井钻井施工前,应根据所提供的地质条件进行井帮稳定的风险性评价,提出可行性分析报告。对于局部不稳定或是裂隙发育,可以进行地层改性处理,通过预加固达到稳定施工的目的,同时需要开展反井钻井随钻支护技术研究,反井钻井扩孔和支护交替作业,达到安全控制井帮稳定,以拓展反井钻井技术应用范围。

4 竖井掘进机凿井技术及展望

钻井法凿井机械化程度高,安全性高,存在的问题是成井效率较低,虽然已经实施了钻井直径 7 m 左右井筒的“一钻成井”和 9 m 左右的井筒“一扩成井”,但月成井速度仍达不到 40 m^[21],而且主要适用于冲积层,对坚硬基岩并不适用。反井钻井法凿井虽然速度快、功效高,但需要下部巷道配合,并且不能实现随钻进对井帮进行支护处理。因此,需要研究另一种机械化凿井方法——竖井掘进机。竖井掘进机是利用滚刀破岩替代钻眼爆破,实现在空间和时间上掘进和支护平行作业的综合机械化作业。将竖井机械化施工速度,达到和普通法相当月成井 100~200 m 的水平。竖井掘进机凿井工艺技术主要由以下部分构成,从井底开始:

(1) 破岩系统。

竖井掘进机破岩是靠滚刀将岩石从岩体上破碎下来,破岩一般采用单刃盘形滚刀和镶齿多刃盘形滚刀,滚刀按一定的规律布置在刀盘上,刀盘破岩所需旋转扭矩,由变频电机或液压马达经过齿轮减速,中心轴传递给刀盘。推进由液压油缸实现,掘进破岩过程产生的反扭矩、推、拉力,以及迈步过程,由掘进机液压油缸通过靴板支撑井帮产生。

(2) 排渣系统。

竖井掘进机分为上出渣和下出渣 2 种类型,下出渣型是利用反井钻机形成的导孔作为溜渣通道,掘进破碎的岩石靠自重溜到下水平巷道(图 4);上出渣是利用机械或循环液体将滚刀破碎的岩石碎屑向上输送,可以在掘进机上部工作平台分离,由吊桶等提升到地面,也可以利用泵、管路直接以流体方式输送到地面,进行分离外运。

(3) 支护系统。

竖井掘进机相对反井钻机钻凿井筒的优点,是能够实现掘进和支护同步,克服反井钻井整个井筒需要空帮,到整个井筒钻进完成,存在井帮失稳的坍塌风险。竖井掘进机后部可以安设多层辅助工作盘、台,

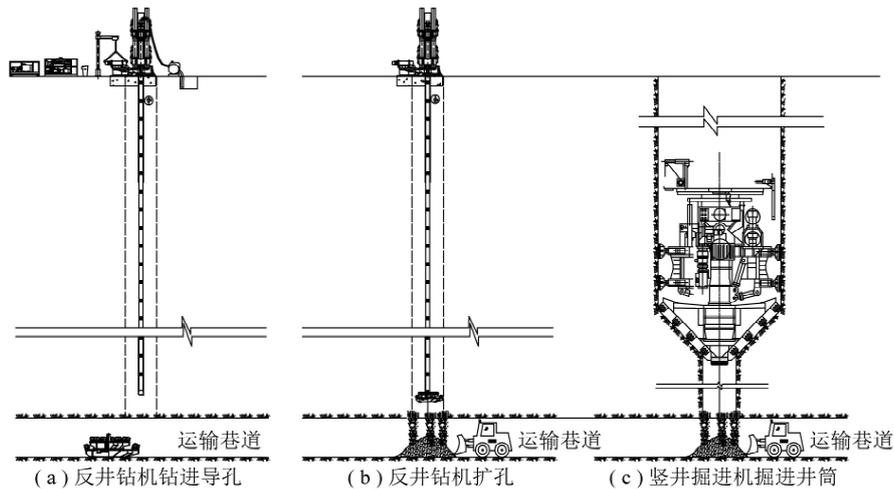


图4 有导孔竖井掘进机凿井示意

Fig.4 Schematic diagram of shaft sinking by full face shaft boring machine with guide hole

实现锚喷临时支护和浇筑永久井壁,并且,实现掘进、支护真正意义上的平行作业,提高综合成井速度。

(4) 辅助系统。

竖井掘进机掘进存在的问题,凿井辅助设备不能大量减少,只是相对功率容量和工作量减少。凿井井架悬吊风筒、电缆、压风、水、下料等管路,由凿井绞车悬吊,提升绞车用作提升物料、矸石、人员等。为了施工安全,还需要布设有害气体的安全监控,设有超前勘探装备,探测井筒掘进方向是否存在水和瓦斯突出风险等。

5 结 语

钻井法凿井是一种可靠的全机械化施工方法,反井钻井法提供另外一种高效施工方法,竖井掘进机是替代普通法凿井发展方向。相对于钻眼爆破的普通凿井工艺,机械化施工方法可以大大减少下井作业人员,钻井法凿井实现打井不下井,反井钻井法凿井只是在支护时,需要人员下井作业,竖井掘进机凿井,实现掘进和支护平行作业,操作人员减少到1~2人,并且可以实现地面遥控操作,井壁支护也可实现机械化,大大减少井下作业人员^[26]。但每一种凿井工艺方法都存在局限性,必须根据不同地质条件、工程条件采用不同的机械化凿井方法,才能达到减少井筒内施工人员,提高安全和工作效率目的。

参考文献:

- [1] 安国梁. 煤矿井巷施工技术的现状与展望[J]. 建井技术, 1994(6): 2-4.
An Guoliang. Current status and prospect of construction technology in coal mines[J]. Mine Construction Technology, 1994(6): 2-4.
- [2] 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.
- [3] 高良敏, 桂和荣, 胡友彪, 等. 新集五矿井筒突水水文地质条件分析[J]. 煤, 2001, 10(6): 7-8, 38.
Gao Liangmin, Gui Herong, Hu Youbiao, et al. Analysis of hydrogeology condition in shaft bursting water in Fifth Coal Mine of Xinji[J]. Coal, 2001, 10(6): 7-8, 38.
- [4] 周 辉, 翟德元, 王泳嘉. 薄隔水层井筒底板突水的突变模型[J]. 中国安全科学学报, 1999, 9(3): 44-48, 58.
Zhou Hui, Zhai Deyuan, Wang Yongjia. The sudden change model of water outburst at vertical shaft floor of thin water resisting layer[J]. China Safety Science Journal, 1999, 9(3): 44-48, 58.
- [5] 汪敏华, 丁同福. 朱集矿副井井筒含水层涌水特征及治理对策[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(11): 103-106.
Wang Minhua, Ding Tongfu. Water flow features of aquifer in mine auxiliary shaft of Zhuji Mine and control counter measures [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(11): 103-106.
- [6] 程建圣, 梁运培, 董钢锋. 立井井筒掘进工作面煤与瓦斯突出RFP模拟研究[J]. 煤矿安全, 2008, 39(3): 5-7.
Cheng Jiansheng, Liang Yunpei, Dong Gangfeng. Research on RFP simulation for coal and gas outburst in vertical shaft face [J]. Safety in Coal Mines, 2008, 39(3): 5-7.
- [7] 李亚军. 一起井筒瓦斯爆炸事故的分析[J]. 煤矿安全, 1997(9): 26-27.
Li Yajun. Analysis on a gas explosion accident in a mine shaft construction [J]. Safety in Coal Mines, 1997(9): 26-27.
- [8] 陈玉林. 主井井筒煤和瓦斯突出简况[J]. 煤矿安全, 1980(12): 20-22.
Chen Yulin. Brief introduction of coal-gas outburst in a main shaft [J]. Safety in Coal Mines, 1980(12): 20-22.
- [9] 于镇洪, 赵春来. 一次冻结井筒事故的分析[J]. 煤炭科学技术, 1979, 7(11): 3-4.
Yu Zhenhong, Zhao Chunlai. Analysis on a frozen shaft accident [J]. Coal Science and Technology, 1979, 7(11): 3-4.

- [10] 李红辉,王友成. 竖井井筒与井塔同时施工技术[J]. 中国矿山工程 2009, 38(5): 1-4 41.
Li Honghui, Wang Youcheng. Technique of shaft and derrick constructing at the same time [J]. China Mine Engineering, 2009, 38(5): 1-4 41.
- [11] 宋来武,郑克俭,周新贞. 城郊煤矿主井筒片帮突水分析[J]. 中州煤炭 2000(2): 24.
Song Laiwu, Zheng Kejian, Zhou Xinzen. Analysis of main shaft rib spalling and water inrush in Chengjiao Mine [J]. Zhongzhou Coal 2000(2): 24.
- [12] 洪伯潜. 煤矿井筒钻井法凿井技术综述[A]. 煤炭科学研究总院. 现代煤炭科学技术理论与实践[C]. 北京: 煤炭工业出版社 2007: 23-35.
Hong Boqian. Review of the shaft sinking technology in coal mines [A]. China Coal Research Institute. Modern coal science and technology theory and practice [C]. Beijing: China Coal Industry Publishing House 2007: 23-35.
- [13] 张永成,孙杰,王安山. 钻井技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社 2008.
Zhang Yongcheng, Sun Jie, Wang Anshan. Drilling Technologies [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House 2008.
- [14] 毛光宁,译. 美国钻井法凿井现状[J]. 建井技术 2004 25(4): 39-40.
Mao Guangning, Tran. Status quo of the shaft sinking technology by boring method in USA [J]. Mine Construction Technology 2004 25(4): 39-40.
- [15] Dennis G Martin, Roland Hunt, Alun Price Jones. New opportunities for mine planners-large diameter borehole hoisting systems [A]. 3rd International Conference on Shaft Design and Construction [C]. London: T & T the Official Publician of the British Tunnelling Society 2012: 75-78.
- [16] Werner Burger, Martin Rauer. Mechanised shaft sinking methods for hard and medium strength rock [A]. 3rd International Conference on Shaft Design and Construction [C]. London: T & T the Official Publician of the British Tunnelling Society 2012: 15-17.
- [17] 张永成,史基盛,王占军. 钻井施工手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社 2010.
Zhang Yongcheng, Shi Jisheng, Wang Zhanjun. Handbook of mine shaft drilling [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2010.
- [18] 洪伯潜. 我国煤矿凿井技术现状及展望[J]. 煤炭学报, 2008, 33(2): 121-125.
Hong Boqian. Discussion vertical structural stability of a drilled shaft in mud further [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(2): 121-125.
- [19] 张永成,刘志强. 钻井法凿井技术的发展和展望—小型凿井试验 40 周年纪念[J]. 建井技术 2003 24(2): 4-6.
Zhang Yongcheng, Liu Zhiqiang. Development and prospect for the shaft sinking technology—the 40 anniversary of small-scale drilling test [J]. Mine Construction Technology 2003 24(2): 4-6.
- [20] 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[A]. 煤炭科学研究总院北京建井研究所. 矿井建设现代技术理论与实践[C]. 北京: 煤炭工业出版社 2005: 9-15.
Zhang Yongcheng, Jing Shouting, Liu Zhiqiang et al. Current status and prospect of the shaft sinking technology by boring method in coal mines in China [A]. Beijing Research Institute of Mine Construction, China Coal Research Institute. Modern technology theory and practice on mine construction [C]. Beijing: China Coal Industry Publishing House 2005: 9-15.
- [21] 洪伯潜. 我国深井快速建井综合技术[J]. 煤炭科学技术, 2006 34(1): 8-11.
Hong Boqian. Comprehensive technology for deep mine rapid construction [J]. Coal Science and Technology 2006 34(1): 8-11.
- [22] 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.
- [23] Liu Zhiqiang. Drilling technology and development of LM series raise boring machine [A]. Proceeding of the 2nd ISRM International Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics [C]. London: CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group 2012: 671-676.
- [24] 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.
- [25] 刘志强. ZFY3.5/400 电控型反井钻机技术及应用[J]. 河南理工大学学报 2011 30(S2): 280-283.
Liu Zhiqiang. Technology of ZFY3.5/400 electronic-control raise boring machine and its application [J]. Journal of Heinan Polytechnic University 2011 30(S2): 280-283.
- [26] Zhang Yongcheng, Liu Zhiqiang, Duan Bangkui. Achievements of China's coal mine construction in recent years [A]. 3rd International Conference on Shaft Design and Construction [C]. London: T & T the Official Publician of the British Tunnelling Society 2012: 127-130.