



冻结立井井筒机械化掘进现状及发展趋势

陈湘生 王恒 宋朝阳 陈汉青 陈曦 丁航 王磊

引用本文：

陈湘生, 王恒, 宋朝阳, 等. 冻结立井井筒机械化掘进现状及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 1–17.
CHEN Xiangsheng, WANG Heng, SONG Zhaoyang. Current situation and development trend of mechanized shaft driving in frozen shaft[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 1–17.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2024-0327>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

全断面竖井掘进机凿井围岩分类指标体系与评价方法

Classification grading evaluation index system and evaluation method of surrounding rock for full section shaft boring machine
煤炭科学技术. 2022, 50(1): 86–94 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a84b01ea-6054-4166-8d73-172ef3df68e0>

竖井巷道掘进超前地质探测研究进展与展望

Research progress and prospect of advanced geological exploration in shaft and roadway driving
煤炭科学技术. 2024, 52(S1): 145–152 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0615>

大倾角压力管道斜井机械破岩钻进技术与工艺探讨

Discussion on technology and process of mechanical rock breaking and drilling in inclined shaft of high inclined pressure pipeline
煤炭科学技术. 2021, 49(4): 58–66 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.04.007>

矿用硬岩巷道机械化掘进破岩形式研究现状及展望

Research status and prospect of rock breaking form in mechanized excavation of mining hard rock roadway
煤炭科学技术. 2024, 52(S1): 259–268 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0211>

煤矿全断面岩巷掘进机开发应用与发展

Development and application of full-section rock tunnelingboring machine in coal mine
煤炭科学技术. 2019(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d1b81fc6-89b5-42d2-bddf-16d709218a9a>

基于重力排渣的大直径井筒钻掘技术与工艺体系研究

Research on technology and equipment system of large diameter shaft drilling based on gravity slagging
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 272–282 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-1758>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

特约综述



陈湘生,王恒,宋朝阳,等.冻结立井井筒机械化掘进现状及发展趋势[J].煤炭科学技术,2024,52(9):1-17.
CHEN Xiangsheng, WANG Heng, SONG Zhaoyang, et al. Current situation and development trend of mechanized shaft driving in frozen shaft[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 1-17.

移动扫码阅读



陈湘生,男,湖南湘潭人,教授,博士生导师。享受国务院政府特殊津贴专家,中国工程院院士,深圳大学土木与交通工程学院院长,深圳大学未来地下城市研究院院长。研究方向:隧道及地下工程、韧性地下结构工程、人工冻土力学及应用、智能岩土工程、城市空间 HOD 协同规划研究等。长期从事隧道及地下工程理论与技术方面的科学的研究工作。承担了国家自然科学基金重大项目、中国工程院战略研究与咨询等科研项目 30 余项,获国家科技进步特等奖 1 项、二等奖 2 项,省部级科技进步特等奖 2 项、一等奖 7 项,詹天佑奖 4 项,发表论文 200 余篇,出版学术专著 15 部。

冻结立井井筒机械化掘进现状及发展趋势

陈湘生^{1,2,3},王恒^{1,4},宋朝阳²,陈汉青^{2,3},陈曦^{2,3},丁航^{1,4},王磊^{1,2}

(1. 煤炭科学研究总院,北京 100013; 2. 矿山深井建设技术国家工程研究中心,北京 100013;
3. 深圳大学 土木与交通工程学院,广东 深圳 518060; 4. 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室,北京 100013)

摘要:针对我国“富煤贫油少气”的能源赋存结构及煤炭未来一段时间将长期占据能源消耗主导地位的特点,回顾了我国煤炭井工开采领域冻结立井井筒机械化掘进发展历程。钻爆法凿井作为我国立井井筒施工的主要工法,炸药的应用大幅提高了冻结井筒的掘进效率,配套的伞钻打孔、抓岩机装岩、大型井架及设备提升、大模板砌壁等大型机械化设备的应用,大幅提高了井筒成井速度;竖井钻机、反井钻机及竖井掘进机作为特殊地层条件下立井井筒特殊凿井方式,也有各自应用范围。面对我国西部富水弱胶结地层特点及智慧矿山发展趋势,采用冻结+钻爆法施工难以满足千米级弱胶结岩层立井井筒智能化无人化的建设需求,而采用冻结+竖井掘进机钻井是未来超深立井井筒技术发展方向之一。结合国外冻结+竖井掘进机凿井工程案例,针对我国西部富水弱胶结岩层立井井筒建设,提出了冻结+竖井掘进机凿井在冻结壁厚度和强度设计理论、双层钢筋混凝土井壁永久支护、低温环境下竖井掘进机掘进破岩形式以及分级上排渣方式等冻-掘-支-运协同作业方面提出了合理化建议;明确了井壁结构与弱胶结围岩相互作用机理,优化双层井壁结构方法,构建竖井掘进机掘-支-运同步作业模式等,提升井筒建设综合效率,提高信息化水平,推动立井井筒向机械化、绿色化和智能化发展。

关键词:特殊凿井;机械破岩;冻结井壁;竖井掘进机

中图分类号:TD265; TD421 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2024)09-0001-17

Current situation and development trend of mechanized shaft driving in frozen shaft

CHEN Xiangsheng^{1,2,3}, WANG Heng^{1,4}, SONG Zhaoyang², CHEN Hanqing^{2,3},
CHEN Xi^{2,3}, DING Hang^{1,4}, WANG Lei^{1,2}

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. National Engineering Research Center of Deep Shaft Construction, Beijing 100013, China;

收稿日期:2024-03-11 责任编辑:朱恩光 DOI: 10.12438/cst.2024-0327

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52090084, 51938008, 52008197)

作者简介:陈湘生(1956—),男,湖南湘潭人,中国工程院院士,博士生导师,博士。E-mail: xschen@szu.edu.cn

通讯作者:王恒(1984—),男,河北保定人,副研究员,硕士。E-mail: wangheng8374@126.com

3. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

4. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China)

Abstract: In view of the energy occurrence structure of “rich coal, poor oil and little gas” in China, and the situation that coal will occupy the dominant position of energy consumption for a long time, the development history of frozen shaft mechanized drilling and blasting is reviewed in the field of coal mining in China. As the main construction method of shaft construction, the application of dynamite greatly improves the drilling efficiency of frozen shaft. The application of supporting large mechanized equipment such as umbrella drilling, rock grabbing machine loading, large derrick and equipment hoisting, and large formwork building, greatly improve the wellbore completion speed; Shaft drilling rig, reverse drilling rig and shaft boring machine as special shaft sinking methods under special formation conditions, also have their own application range. Aiming at the characteristics of water-rich weakly consolidated formation and the development trend of smart mine in western China, there are shortcomings in using freezing & borehole-blasting method and large drilling equipment to develop the shaft of weakly consolidated formation at kilometer level, while using freezing & shaft boring machine is one of the trends of ultra-deep shaft construction. Combining with the construction cases of freezing & shaft boring machine abroad, reasonable suggestions are put forward for shaft excavation of water-rich weak consolidated rock formation in western China. The freezing wall thickness and strength are calculated according to the current design theory, the permanent shaft support adopts double-layer reinforced concrete wall structure, the rock-breaking form of shaft boring machine under low temperature environment, and the method of hierarchical slag discharge to realize the parallel operation of digging - supporting - transporting. Finally, the next research focus of this construction method is put forward. The synergistic mechanism between shaft wall structure and weakly consolidated surrounding rock should be clarified to realize optimization of shaft wall structure, and the support - operation cooperation mode of shaft boring machine to improve shaft excavation and support efficiency and improve informatization level. Realize shaft driving towards mechanization and intelligence.

Key words: special sinking; mechanical rock breaking; freezing well walls; shaft boring machine

0 引言

能源是经济发展的重要驱动力,其中化石能源占据一次能源消费的绝对主导地位,石油、煤炭和天然气的占比分别为33.1%、28.9%和24%^[1]。根据国际能源署统计^[2],2022年全球煤炭消费量共计8 025 Mt,其中中国和印度占据了国际煤炭消费量前两名,煤炭消费量分别为4 250 Mt和1 103 Mt,且中国煤炭消费量超过了全球其他国家消费量总和。我国一次能源赋存具有“富煤、贫油、少气”的特点,决定了我国以煤为主的能源结构。长期以来我国煤炭的消费量占比超过60%,且此结构在未来较长一段时期内很难改变,煤炭在能源安全中将持续发挥着兜底保障作用。据国际能源署预测,2025年全球煤炭消费量将升至8 039 Mt,其中中国消费量达4 337 Mt,全球占比将从2022年的52.96%升高至53.95%^[2]。根据“十四五”能源规划,我国现代能源体系建设要坚持立足国内、完善产供储销体系、不断增强风险应对能力、加强煤炭安全托底保障,同时推动煤炭和新能源优化组合,促进新能源占比逐渐提高,加快实现能源绿色低碳转型。同时提出加快推进煤矿智能化建设、有序分类推荐煤矿关闭退出和加快先进技术装备推广应用三大举措,共同保障国内煤炭开发有序平稳推进^[3]。

目前,随着浅部固体矿产资源持续大规模、高强度开采使得浅部资源逐渐枯竭,未来15~30年资源

能源安全保障严重不足。根据已探明情况,我国主要固体资源能源近70%分布在2 000 m以深,目前煤炭开采已突破1 500 m以深,面向2 000 m深;金属矿山采深已经突破1 500 m,逼近2 000 m,面向深2 500 m。因此,2 000 m以深是未来发展趋势和必然选择,矿山深井建设技术已经是深地工程领域先进生产力的代表。因此深立井是开采深部资源的必经途径,而深立井的开拓一方面需要面临更复杂的地质条件,如复杂的地质结构、高地温、高地应力等,另一方面需要解决深井开拓的装备及相关技术问题,如深井掘进、排渣、支护、提吊及通风等问题。此外,以冻结、注浆、钻井为代表的矿山建设特殊凿井核心技术,也为国家市政、水利、交通、绿色能源、国防等领域的重点工程建设提供了重要的技术支撑。

人工智能是第四次工业革命和产业变革的核心驱动力,正将人类社会带入智能时代。矿山深井建设技术作为服务于人类生存发展所必需的战略性资源能源、深地空间利用与工程安全的重要科学技术之一,其安全、高效、绿色、智能化发展是必然趋势。目前,煤矿智能化建设方兴未艾,井筒作为煤炭开发的首要工程和关键工程,推动井筒建设向机械化、绿色化和智能化发展是必然的发展趋势。

1 冻结井筒钻爆法凿井技术

立井开拓是矿井建设的主要开拓方式之一,近年来,新建立井井筒占井工矿开拓量的45%^[4]。根据

国内煤矿和非煤矿山建设情况的不完全统计,我国在1970—2023年间建成及在建的千米级立井数量已超过150条,如深度1341.6 m的磁西煤矿副井、1505 m的思山岭铁矿主井、1527 m的新城金矿新主井、1551.8 m的纱岭金矿主井、1915 m的三山岛金矿在建副井,千米以内的立井井筒数量更是不胜枚举。根据发展需求和深井建设规划,国家“十四五”期间深井建设深度更是有望突破2000 m。受限于立井尺寸,井筒内部工程施工技术复杂、作业环境恶劣,尤其是穿越的地层充满不确定性,涌水涌沙、瓦斯及其他有害气体突出、地热地压、岩爆等均对立井井筒开拓产生巨大影响^[5]。因此,立井井筒的安全快速掘砌技术以及相配套设备的研发是至关重要的。

现代凿井工艺出现之前,国内外的井筒破岩、提升和支护等工序主要依靠人力进行,但已经具备现代凿井的雏形。在爆破法应用至井筒开挖后,破岩效率大幅提高,配套设备的提升、支护及相应的设备、工艺、技术均有了长足发展。

1974年原煤炭部、冶金部、一机部开始进行立井施工机械化配套科研攻关,取得了大量科研成果,1983年开始研究短段掘砌混合作业的立井机械化配套试验研究,进一步改进了施工工艺,且该技术在1992年正式被列入煤炭工业100项新技术进行大力推广^[6]。“十五”国家科技支撑计划重点课题“千米级深井基岩快速掘砌关键技术及装备研究”研制了4.2 m掘砌段高循环作业及其配套施工设备,并进行了工业性试验,取得了良好的效果,形成了液压凿岩钻机、液压抓岩机、液压迈步式模板及深孔爆破等关键技术。

目前,我国立井井筒凿井依然以钻爆法为主,特殊地层条件下以冻结法、注浆法等工艺技术提供凿井地质保障,已突破了深1500 m级立井快速掘砌的关键技术与工艺,解决了立井井筒软弱地层围岩失稳、坍塌和涌水的防治难题,保证了钻爆法凿井阶段井下“打干井”和循环掘砌作业,实现了立井建设技术工艺在时间、空间上的综合利用,满足了复杂地质条件下深井凿井需求,并且形成了冻-注-凿平行作

业凿井技术体系^[7-8]。

1.1 冻结壁与冻结井壁设计发展简述

19世纪初,西伯利亚地区开采金矿时利用季节性温度变化在冬季开挖、夏季停工的方式进行了含水松软地层段井筒开挖。1862年英国南威尔士矿山首次采用人工冻结的方法进行含水地层井筒开挖,至1883年人工地层冻结法施工专利获批后,正式宣告冻结法施工技术的诞生^[9]。1883—1914年期间,德国、法国、波兰等国共计施工超过270个立井冻结井筒,最大冻结深度为415 m;一战、二战期间西方新建矿井基本处于停滞状态,二战后欧美国家有超过750个立井井筒采取了人工地层冻结法施工,最大冻结深度达到960 m。国内外立井井筒冻结深度/冲积层厚度发展趋势,如图1所示。

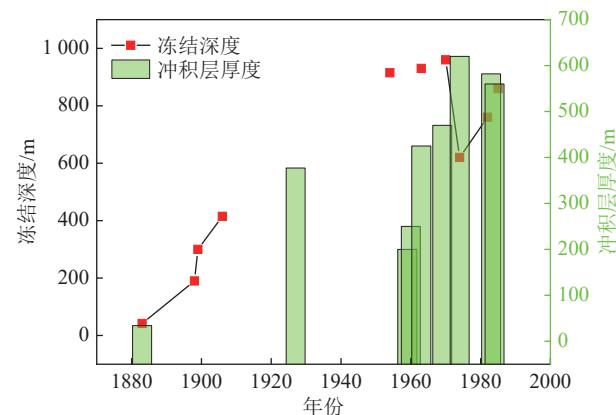


图1 国内外立井井筒冻结深度/冲积层厚度发展趋势

Fig.1 Domestic and overseas development trend of freezing depth of shaft/alluvial thickness

1955年我国施工了国内第一条立井井筒冻结—开滦林西风井,开创了我国冻结法应用先例,之后又成功在开滦唐家庄煤矿风井进行冻结设计及施工,自此开始了冻结法在国内的推广应用。1970年以前立井冻结深度主要在100 m左右,1970—2000年期间冻结深度主要在450 m以内,2000年以后冻结深度已经接近1000 m(高家堡西风井冻结深度990 m),冻结凿井深度已达到世界第一。1955—2023年我国冻结施工的部分立井井筒,见表1。

表1 1955—2019年我国冻结施工的部分立井井筒

Table 1 Incomplete statistics of frozen construction shaft in China between 1955 and 2019

井筒冻结深度/m	井筒数量/个						累计数量/个
	1955—1969年	1970—1979年	1980—1989年	1990—1999年	2000—2009年	2010—2023年	
<100	36	26	34	32	49	10	187
100~200	25	44	50	71	92	18	300
200~400	7	41	42	58	153	125	426
400~600	—	1	2	5	82	51	141
≥600	—	—	—	—	28	62	90

1.1.1 冻结壁设计理论的演变

冻结壁是非均质厚壁圆筒结构,为便于求解,通常将其视为均质厚壁圆筒进行计算,其影响因素包括计算深度(地压值)、计算层位的冻土物理力学参数以及掘进参数等。冻结壁厚度计算一般可按照强度条件和变形条件进行^[10]。

1)按强度条件计算冻结壁。在冲积层赋存条件下,当表土深度不超过150 m时,LAME^[11]将冻结壁视为弹性体,采用无限长厚壁圆筒设计公式进行冻结壁的计算;当冲积层深度超过200 m后,DOMKE^[12]将冻结壁视为弹塑性体,提出了无限长厚壁圆筒计算公式进行冻结壁计算。应用Lame公式和Domke公式来计算冻结壁厚度是早期冻结法应用时国内外普遍采用的公式,在冻结深度不超过400 m的冲积层地区,两个公式具有良好的普遍适用性,且两个公式中涉及的计算参数少,物理意义明确,公式应用简单。随着冲积层厚度增加,采用Lame公式和Domke公式设计的冻深超过400 m的井筒冻结壁,冻结施工中出现了大量冻结管断裂情况^[13-15]。另外,由于井筒开挖过程中仅会暴露有限长度的冻结壁(掘砌段高),因此将冻结壁视为有限长厚壁筒计算更接近实际情况,且Lame公式和Domke公式没有考虑时间和温度因素。目前冲积层地区仍主要采用强度条件计算砂性地层的冻结壁厚度,而利用变形条件校核黏土地层的冻结壁厚度/掘进段高。

2)按变形条件计算冻结壁。在考虑掘砌段高因素同时,将冻土的流变特性纳入计算因素,根据冻结壁塑性变形量及冻结管弯曲挠度限值来确定变形条件下的冻结壁,里别尔曼将冻结壁视为有限长厚壁圆筒,假设段高两端位移量为0,同时将温度和时间归入冻土强度进行考虑,得到了冻结壁厚度计算公式。维亚洛夫和扎列茨基将冻土假设为塑性体,提出了变形极限状态下的有限长塑性冻结壁厚度计算公式。两个公式均将掘进段高作为公式计算要素之一,考虑了时间因素在冻结壁计算中的重要作用。

此外,维亚洛夫和扎列茨基、库克谢涅夫、Вялов^[16]分别提出了安全掘进段高条件下的冻结壁厚度与段高关系计算公式;笔者^[17-18]将人工冻土试验获得的蠕变参数代入Вялов公式,得到以冻结壁变形极限为准则的深井冻结壁的动态计算公式;杨维好、杨志江将冻结壁视为弹性^[19]、弹塑性^[20]和塑性^[21]各向同性材料,对冻结壁和围岩相互作用下的冻结壁设计理论进行了探究,研究表明:考虑开挖卸荷条件下,采用弹性理论计算冻结壁厚度较Lame公

式值小,采用Mises强度条件冻结壁厚度计算值比Tresca强度条件更小;采用弹塑性理论计算冻结壁厚度时,冻土与未冻土弹性模量的比值低于10时“两壁”相互作用显著,计算冻结壁的厚度建议选用Coulomb-Mohr准则;采用塑性理论计算冻结壁厚度时,也建议选用Coulomb-Mohr准则,算得的厚度明显小于里别尔曼公式计算结果,且冻土的内摩擦角在计算时不应忽视。

1.1.2 冻结井壁结构设计

我国的冻结法发展较晚且早期立井井筒冻结深度浅,井壁采用单层井壁结构,其中开滦林西风井采用红砖砌体,少数井筒采用素混凝土结构,绝大部分井筒采用钢筋混凝土结构。混凝土井壁施工期间出现了大量的收缩缝、沉降缝及温度裂缝,导致单层井壁漏水严重,需要用注浆法补充加强井壁的封水效果。

20世纪60年代为解决单层井壁裂缝、渗漏水问题,在范庄煤矿主井单层井壁的内侧进行套壁施工取得了较好效果,从此我国冻结井筒的井壁结构开始采用双层钢筋混凝土井壁结构(邢台煤矿主、副井)^[22]。70年代后期,随着井筒冻结深度进一步增加,现浇混凝土的水化热等原因导致内层井壁出现大量的环向裂缝,因此借鉴了波兰经验在内、外层井壁之间敷设塑料板夹层,在1985年又增加了泡沫塑料板结构敷设于冻结壁和外层井壁之间来减缓冻结壁的冻结压力,同时其保温隔热性能也为外层井壁混凝土养护提供了有利条件,至此开启了我国冻结井筒双层钢筋混凝土复合井壁结构的时代^[23-24]。

由于我国现行的冻结壁、井壁计算体系和规范特点,深部井筒冻结井壁厚度过大,不但增加了井筒开挖量和混凝土浇筑量,同时也由于大体积混凝土的水化热增大了井壁的温度应力,导致出现大量环形裂缝进而影响内层井壁的防水效果^[25-26]。因此减薄深部井壁设计厚度、增加井壁强度、降低大体积混凝土的水化热是当前深部冻结井壁的主要研究方向^[27]。此外改变井壁结构形式也是研究方向之一^[28]。

1.2 冻结井筒爆破破岩掘进技术发展简述

钻爆法施工的主要工序包括工作面钻眼爆破工作、装岩与提升工作、井筒支护工作,以及通风、排水、测量等辅助工作。

1.2.1 冻结井筒爆破破岩掘进技术

冻结法凿井自1955年在开滦林西风井首次应用以来,至今已建成超过1200条立井冻结井筒,冻结井筒的开挖也已经相对成熟,其中炮掘+双层现浇

混凝土井壁支护结构是非常成熟的工法,井筒综合成井速度可以超过90m/月。

早期矿井开拓以人工开挖和火烧岩石方法进行破岩,辅以简单的钎锤工具进行破岩,耗时长、效率慢,月成井效率约3m;1680年左右火药首次用于矿山工程施工,经过50年的发展,火药在矿山开拓中得到了大力推广,破岩效率较火烧岩石法提高了3倍以上,但火药的爆炸性和炮烟的毒性造成了大量的矿工伤亡情况;1878年矿山行业针对坚硬岩石引入了“高爆炸药”代替简单的火药爆破,且导火索和雷管的出现使得爆破得到控制,凿井破岩发生了根本性变革^[29]。

井筒爆破需要根据立井穿越地层特性、工程地质与水文地质条件、地质构造及井筒基本参数,结合炸药种类、性能以及药卷直径等特性,合理确定钻孔布置方案及相关参数,包括钻眼形式(掏槽眼、周边眼和辅助眼)、钻孔参数(钻眼布置圈径、圈数及钻眼间距、深度、直径、数目)以及单位岩体炸药消耗量等爆破参数^[30]。在立井井筒掘进中,钻眼爆破工作是一项主要工序,占整个掘进循环时间的20%~30%。

井筒爆破孔的布置方式经历了台阶式到全断面式的发展过程,随着凿岩机功率增加和钻进深度加深,可以实现三角形、正方形、菱形以及直眼、斜眼等各种掏槽孔的钻眼形式;垂直钻孔精度提高后,多采用垂直孔全断面布置方式,井筒断面内实现一次性钻进、电雷管及延期雷管延时起爆,也可以一次完成整个井筒荒径内的爆破孔起爆,爆破深度从1.0m提高至5.0m^[8]。

分层爆破可以降低工作人员的劳动强度,当多台凿岩机同时作业时,能够同时钻凿多个爆破孔,钻孔直径增大,钻孔深度增加,不但可以钻凿大直径掏槽孔,还可以用于钻进地层的工作面注浆深孔。随着机械技术发展,凿岩钻架参照雨伞结构,形成了高效钻岩设备—“伞钻”,钻孔效率大幅提高^[29]。

为了加快掘进速度,在提高井下设备机械化程度的前提下,可加大钻眼深度并增加掘砌转换循环次数。井筒掘砌循环达到一定指标后,可以适当控制循环次数、逐步增加钻眼深度^[4,31]。且随着新型凿岩机和装运设备的改进,井筒掘进的炮眼深度有逐渐增大的趋势。

20世纪70年代,钻眼设备主要为手持式风动凿岩机,如YT-23型手持式凿岩机,受限于钻具设备性能,钻眼深度小、装药量少,炮眼深度一般小于3m,单个循环进尺1.5m左右;1974—1982年以三部立井会战形式确定了机械化施工基础,形成以伞式钻

机、大型抓岩机、大型稳绞车为主要内容的设备研发,之后立井短砌混合作业实现了3.5m一掘一砌正规循环^[32];20世纪80年代,研制并采用了伞式钻机代替手持式钻眼设备,主要包括FJD系列(FJD-4、FJD-6、FJD-9型等)、SJZ5.5~SJZ6.11系列、以及YSJZ系列等气动/液压伞钻类型,同时配备YGZ型气动凿岩机,炮眼深度达4.2m,同时单个循环进尺提高至3.14m,有向YGZ-90导轨式重型凿岩机和液压凿岩机发展的趋势;2010年以后采用手持凿岩机可钻凿直径45mm的炮眼、伞钻可钻凿直径55mm的炮眼,炮眼深度可达5.8m,循环进尺达到5.2m;目前立井掘进过程中多采用液压凿岩机、多臂液压伞形钻机、双联钻架并配以合理的炮眼布置方式进行钻眼爆破,可实现抗压强度值为200MPa坚硬岩石地层的有效爆破,同时,采用光面、光底、减震、弱冲爆破技术等爆破方式,减轻爆破振动对围岩的破坏,确保新岩面具有良好的稳定性,围岩自身能够形成稳定的承载结构^[7-8]。

20世纪70年代,国内新开拓的立井井筒平均深度已经超过440m,井筒最大净直径为8.0m,掘砌平均速度超过160m,如湖南桥头河二号立井创造了月成井174.82m的纪录;80年代后开拓的立井井筒平均深度为600m,井筒净直径为6~8m,最深达1072m,井筒掘砌速度超过40m,如阳泉供水工程进风立井创造了月成井177.02m的纪录、摩洛哥立井创造了最高月成井107.6m的效率;20世纪90年代后随着混合作业、深孔爆破等技术的发展,立井井筒掘砌速度进一步提高,如鸡西滴道矿东风井创造了月成井210m的纪录。1991—2005年立井机械化施工配套被列入煤炭工业部重点推广项目“100推”之中^[33]。进入21世纪后,立井井筒掘砌效率进一步提高,最高月成井速度达到了223.2m,月平均掘砌效率也从20世纪80年代的不足30m,成功突破70m大关。

以口孜东煤矿副井^[34]为例,井筒设计深度为1032m,井筒净直径为8.0m,最大掘进荒径13.25m,表土段最大掘进断面为137.82m²。表土段采用了冻结法施工,采用短段掘砌混合作业配合整体下行式金属活动模板砌壁、液压自动脱模;井下设备采用了SJZ-6.9型伞钻、YGZ-70型导轨式凿岩机钻眼和两台ZH-6型中心回转抓岩机,底卸式吊桶运送混凝土。该井筒月成井效率为158m,创造了同规格井筒中井筒掘砌效率全国纪录。

河南神火集团泉店煤矿中央风井井筒工程^[35],采用了冻结法施工,井筒开挖采用先进的施工工艺和机械化配套设备,冻结段外壁单月成井进尺达到

了223.2 m。

1.2.2 井底工作面装岩技术发展

早期的凿井提升系统相对简单,仅实现提升和排渣功能即可;现代的凿井提升系统没有根本性变革,基本沿袭了早期系统模式,可看作在该系统上进行了技术、装备的升级和改造。

在采用钻爆法施工的立井井筒中,井筒排渣主要依靠抓岩机、挖掘机和吊桶的相互配合,完成工作面浮矸的清理。排渣工序耗时长,根据井筒深度和直径差异,甚至可占到整个凿井作业循环时间的50%以上,因此抓岩机的效率可直接影响井筒的掘砌速度。20世纪70年代初采用NZQ2-0.11型抓岩机配合人工清底出渣,其容量小,斗容仅为0.11 m³,抓岩能力仅为8~12 m³/h,配合容积为1.0~1.5 m³的吊桶进行排渣。1974年研制出HH型、HZ型、HK型、HS型等4种应用场景不同的大型抓岩机,并逐步改进、沿用至今;80年代,研制出斗容为0.4 m³、0.6 m³的6瓣和8瓣抓岩机,包括HZ-4型和HZ-6型中心回转式、HK-4型和HK-6型靠壁式、HH-6型和2HH-6环形轨道式等多种结构和规格的抓岩机,并配以1.5~3.0 m³的单钩和双钩吊桶进行排渣,与气动抓岩机相比,液压抓岩机实现了能耗降低、效率提高的两大目标;90年代以后,以HZ-6B型、DTQ0.6B型和HZ-10型为代表的HZ系列中心回转抓岩机,斗容达到1.0 m³,机架回转角度大于360°,同时辅以小型挖掘机清底,实现排渣能力80 m³/h;研制出了6~8 m³大容量座钩式TZ系列吊桶和4 m³底卸式吊桶,同时吊桶材质由Q345B调整为Q460C,吊桶梁选用35号钢并加粗吊桶梁,新型材料的应用不仅提高了吊桶强度,同时减轻了自重^[31,32],进一步提升了排渣效率。

目前井筒装岩以中心回转式抓岩机应用最为普遍,它固定在吊盘的下层盘或稳绳盘上,抓斗利用变幅机构作径向运动,利用回转机构作圆周运动,利用提升机构通过悬吊钢丝绳使抓斗作上下运动来进行抓岩。

1.2.3 工作面岩渣提升技术

立井井筒施工时提升工作的主要任务是及时排除井筒工作面的矸石、下放器材、设备以及提放作业人员。提升系统一般由提升容器、钩头联结装置、提升钢丝绳、天轮、提升机以及提升所必需的导向稳绳和滑架组成。根据井筒断面的大小,可以设1~3套单钩提升或一套单钩一套双钩提升。

20世纪80年代以前,立井井筒的提升和悬吊结构先后采用了木制、混凝土和轻型金属井架等结构

形式,并在此基础上逐步研制出了I~IV型的标准凿井井架,配备直径小于2.5 m的提升机滚筒用于提升岩渣、物料和施工人员的升降,凿井稳车的提吊能力普遍在16 t以下,采用单行作业方式下立井井筒的凿井速度仅为20~30 m/月。20世纪80年代,在了I~IV型的标准凿井井架基础上提出了IV改型、V型的专用凿井井架,配备滚筒直径为4~5 m的凿井提升机,同时随着短段掘砌工艺逐渐成熟,正规循环率不断提高;然而随着井筒设计参数的提高,IV改型、V型井架仅适宜直径小于8 m、深度不超过800/1 000 m的立井建设工程。90年代后研制出了VI型、VII型、SA型、SM型凿井井架,以及相匹配的JKZ-4.0、JKZ-4.5型提升机和JZ-25/1800、JZ-40/1800型悬吊稳车等新型大型化凿井装备^[36-38],通过在井筒内布置多套提升设备,容绳量最高可达2 000 m,提升能力最高达50 t,角柱跨距和天轮平台尺寸满足了井口施工设备、材料运输及天轮布置要求,满足了大直径超深立井安全提升要求。

1.2.4 冻结井筒井壁施工技术

早期的井筒支护形式很简单,根据井筒断面形状不同,利用天然木材进行简单支护,圆木支护在相当长一段时间内用作井筒施工的安全保护措施,并逐渐形成了标准的木质梁、柱、板结构,提高了支护强度,增大了井筒安全性和使用寿命;随着圆形井筒断面形式出现,逐渐形成了井圈背板支护技术,但原材料仍是竹木为主,并逐渐采用钢制井圈代替圆木井圈,井筒安全性能进一步提升;砖石砌壁增大了井筒支护强度,且大幅降低了井筒内部支护难度,但是砌体井壁结构存在严重的漏水隐患,随着材料种类的多样化及相关性能的发展,砖石砌块井壁已经基本被混凝土材料代替^[29]。

从天然的火山灰等类似水泥材料用于浇筑地面建筑物开始,井筒支护也逐渐采用了整体浇筑模式,并随着水泥出现,整体现浇模式成为了井筒支护的主流形式。早期采用分块式木模板混凝土浇筑,浇筑段高不大于1.0 m,采用钢模板之后,浇筑段高仍旧小于2.0 m;直到井筒掘砌在配备伞形钻架、大斗容抓岩机和大容积提升吊桶后,研制并配备了大段高整体金属液压模板和底卸式吊桶运送混凝土,混凝土浇筑段高才大幅提升,达到4.8 m以上,且形成的机械化短段掘砌混合作业方式取代了单行、平行作业方式,其工序转换时间少、施工速度快、作业人员劳动强度低、综合机械化程度较高,显著提高了立井凿井速度和质量^[39,40]。

目前,立井井筒砌壁通常采用MJY型系列整体

移动式液压金属模板,段高2.5~5.0m,适用井径范围为4.5~8.5m,质量为6.03~24.70t,具有脱模力强、刚度大、变形小、立/拆模方便的特点。一掘一砌正规循环,井壁接茬少,井壁成形质量好,砌壁时间从初始阶段占循环时间的30%下降到15%~20%。迈步式整体模板和吊盘一体化装备,减少了井架、悬吊设施及悬吊的质量,并利用液压油缸和井壁梁窝实现了井筒内凿井装备的无绳悬吊、迈步自调平^[40],同时采用大吊桶和大提升机,实现了一次段高4.6m正规循环掘砌作业,满足了直径8~12m、深度1500m级深大立井建设需求^[41]。

1.3 冻结钻爆法凿井存在的问题及挑战

冻结法自1883年创立以来,从最初为了解决含水土体水害问题,已经发展成为广泛解决含水软弱岩/土层问题的主要技术手段之一,冻结法以其良好的适应性、可靠性、可控性及环保性能成为地下工程施工中重要的工法之一。人工地层冻结技术也已经从最初矿井开拓应用,逐步推广应用至水利、建筑、市政等诸多领域。但是随着冻结应用领域范围的不断扩大,诸多新问题也逐渐显现:

1)地层问题:我国蒙陕甘地区煤层埋藏深,主要赋存于800m以深的侏罗系延安组,而深厚的白垩系和侏罗系直罗组地层涌水量大,无法采用普通法掘砌方式通过含水地层,地层可注性差,冻结法成为井筒开拓必要的辅助手段^[42]。

2)钻孔工艺问题:立井井筒建井工期占据整个矿井建设工期的40%~60%,而冻结造孔占据立井建设工期的1/4左右,尤其是当钻深大于800m后,岩性互层、岩层倾向、硬度等均导致冻结钻孔效率减缓、偏斜控制难度增大。

3)掘进工艺问题:钻爆法掘进方式效率虽然不高,但井下人员多、机械化程度低,井筒施工风险性

大,但受限于设备、工艺等因素,机械化建井、智能化建井短时间内仍无法实现。

4)井筒支护结构问题:双层钢筋混凝土(复合)井壁结构主要集中于材料性能和配筋率的提高,而井壁受力机制尚未明确,因此在深立井冻结井壁设计时,井壁厚度大,增加了井筒开挖量和混凝土浇筑量。

随着我国人力资源结构调整及煤矿安全要求的进一步提升,煤矿井筒建设将逐步减少炮掘方式,进而增强井筒机械化、智能化施工,如国家矿山安全监察局陕西局关于推进重点工作通知明确:在采掘和支护工艺方面,2023年底淘汰炮采炮掘工艺,井下采掘作业取消使用火工品。因此竖井钻机、竖井掘进机及斜井TBM将作为本阶段主要的研究及爆破掘进替代方式。目前可可盖煤矿已经采用大直径竖井钻机及敞开式TBM分别进行500m级立井和白垩系洛河组岩层段斜井的井筒掘砌,月平均进尺分别达到50m(直径8.5m)和710m;顾桥、核桃峪等煤矿的井下巷道也引入了TBM施工并解决了一系列技术难题。目前陶忽图煤矿正在采用竖井钻机进行800m级立井井筒掘进施工,竖井掘进机在硬岩地层的施工也有了一些经验,但在富水弱胶结岩层中的深立井井筒掘进国内尚无先例。

2 机械破岩钻井法凿井发展及应用

20世纪60年代,国内外开始机械破岩凿井装备研究,大直径井筒机械破岩钻井装备主要有竖井钻机、竖井掘进机、反井钻机、斜井硬岩掘进机等类型^[29]。

立井井筒机械破岩钻井法凿井技术主要包括以下3类:采用竖井钻机钻进形成井筒的钻井法、采用反井钻机经过导孔和扩孔钻进形成井筒的反井法、利用竖井掘进机一次钻进形成井筒的掘进机钻井法^[43,44]。机械破岩钻井法凿井技术分类,如图2所示。

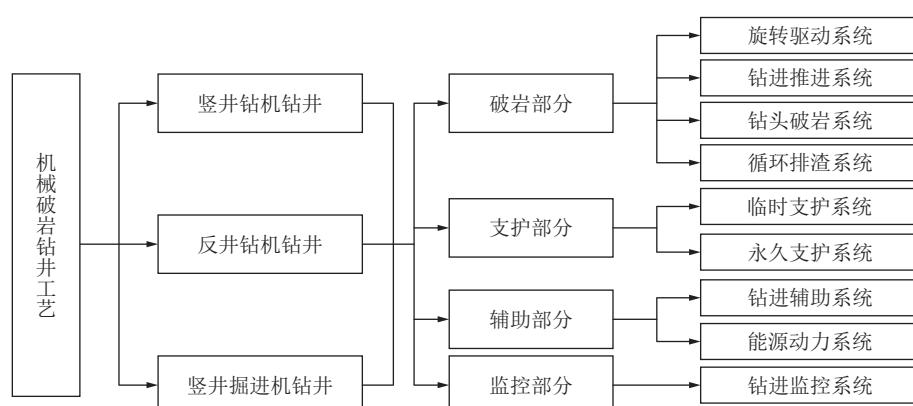


图2 机械破岩钻井法凿井技术分类

Fig.2 Technical classification of mechanical rock breaking drilling method

目前已完工的立井机械化掘进工程施工中,竖井钻机钻井最大深度达到660 m,井筒最大净径8.3 m;反井钻机钻井最大深度为562 m,最大钻井直径6 m;导井式下排渣竖井掘进机钻井最大深度为282.5 m,直径5.8 m;上排渣竖井掘进机最大深度为198 m,直径7.83 m。

2.1 竖井钻机钻井法凿井技术

钻井法凿井适用于含水冲积层/软岩井筒,具有机械化程度高、钻进自动控制、井下无人的优势,“打井不下井”的施工工艺确保了高安全性的优点^[46]。

20世纪中叶,以美国休斯公司的CSD300型和德国维尔特集团公司的L40型为代表的竖井钻机应用于凿井施工中,但受限于材料性能及装备加工水平等因素,机械破岩凿井效率较低,且技术的整体发展受到较大限制。直至20世纪末,多数国家竖井钻机的研发及相关材料、装备加工制作技术基本处于停滞状态,部分业务转移至隧道掘进机领域。

为解决我国两淮、徐沛矿区富水深厚冲积层井筒建设难题,以北京中煤为代表的企业、科研院所及高校在国家“七五”“十五”“十一五”项目资助下相继开展了钻井法凿井技术研究^[46]。首先在国外竖井钻机基础上,升级改造了L40/1000型钻机,后又研制了AS12/800型、AD130/1000型等具有自主知识产权的大型竖井钻机,并且形成了井筒直径小于7.7 m

“一钻成井”、井筒直径10.8 m的“一扩成井”快速钻井工艺,最大钻井深度为660 m,标志着我国竖井钻机钻井技术达到了新的高度,处于国际领先水平。其中平煤神马能源化工集团有限责任公司研制的ZDZD-100型全液压竖井钻机在陕西省可可盖煤矿全岩地层完成了直径8.5 m、深度538 m的“一钻成井”试验。目前,尽管竖井钻机钻井法采用“一钻成井”和“一扩成井”快速凿井工艺技术,虽然在一定程度上提高了钻井法的钻进速度,但相较钻爆法而言,钻井法的综合成井速度仍然较低,而且井筒施工深度有限,尤其是在硬岩地层的深立井井筒开拓中应用受限。

2.2 反井钻机钻井法凿井技术

反井法采用反向破岩方式,岩渣依靠自重下落,钻进速度快、成井效率高,但下排渣工艺要求下部已有成形巷道,以满足岩渣运排要求。根据煤矿、非煤矿山以及水电、交通隧道的井筒工程围岩特点,采用了大型反井钻机破岩、导孔钻进轨迹控制技术等,形成了适用于不同领域的反井钻井工艺与装备^[44-47]。

国外有多家公司进行反井钻机的技术和装备研

究,其中海瑞克研制的RBR900型反井钻机,设计钻井深度达2 000 m,扩孔刀盘的直径范围为1~8 m,是目前最大型的反井钻机装备。

国内从20世纪80年代开始,以北京中煤矿山工程有限公司为代表的科研单位陆续开发了适应国内地层情况的反井钻机技术及装备,包括LM系列、BMC100~BMC600系列反井钻机,最大钻井直径达到6 m,钻井最大深度为592 m。目前的BMC1000型反井钻机可实现钻井直径7 m、钻井深度1 000 m掘进需求。

但反井钻井法也存在一些尚需研究和解决的问题有,如偏斜控制、井帮稳定性以及底部成形巷道的客观条件限制等。

2.3 竖井掘进机钻井法凿井技术

竖井掘进机作为一种能够在空间和时间上实现井筒掘、支平行作业的装备,可以实现井筒掘砌速度达到100~200 m。竖井掘进机钻井系统能够实现掘进破岩、排渣、支护同时作业,互不干扰,并可以大幅减少井下作业人员,提升凿井效率、缩短工期、降低成本^[44, 48]。根据具体的凿井工艺与装备,竖井掘进机应用可分为两大类:①采用掘进机直接破岩钻进、排渣、支护,使用真空或液力排渣的上排渣式竖井掘进机;②采用反井钻进导井作为溜矸孔,掘进机扩钻成井并进行支护的下排渣式竖井掘进机。

20世纪60年代,美国和德国首先开始研制竖井掘进机:美国罗宾斯公司研制了241SB-184、20-24FT型等全断面竖井掘进机,采用刮板运输机刮渣的机械排渣方式;前苏联研制的CK-1Y型竖井掘进机在顿巴斯的加里宁矿完成了净直径7 m、深1 109.8 m的立井井筒掘砌施工,该机型采用了二次提升的混合排渣方式;海瑞克股份公司研制了悬臂截割破岩上排渣竖井掘进机,维尔特公司研制了部分断面竖井掘进机和SB-VI-580/750型上排渣竖井掘进机,基尼公司研制了球形钻头结构的VDS400/2430型竖井掘进机。2015年来,为满足立井井筒建设需要,以德国海瑞克公司为典型代表的装备制造企业提出了多种型号竖井掘进机设计方案,包括全断面竖井掘进机、截削式沉井掘进机、撑靴式竖井掘进机等类型。截至目前,国外采用竖井掘进机施工的井筒最大直径约为8 m、深度在700 m左右,井筒掘进速度低、相对成本高。

受益于国内装备制造业的快速发展、综合国力的提升和我国立井施工领域的机械化、自动化、智能化需求,国内竖井掘进机研发起步较晚但发展较快。

国内铁建重工、中铁装备、中交天和、北京中煤等企业均先后开展竖井掘进机自主研发。“十二五”时期，北京中煤矿山工程有限公司依托国家“863”计划项目的“矿山竖井掘进机研制”课题，研制出了国内首台(套)MSJ5.8/1000/1.6D型竖井掘进机，该机型采用了锥形全断面钻头破岩和导井式下排渣设计，并于2020年开展了云南省以礼河水电站钻井工业性试验，完成了钻深282.5m、导孔直径1.4m、掘进直径5.8m的出线立井工程。中铁装备于2013年收购了德国维尔特硬岩掘进机及竖井钻机核心技术，所研发的SBM/1000型全断面硬岩竖井掘进机采用全断面刀盘破岩和机械排渣方式，于2021年完成了浙江省宁海抽水蓄能电站立井工程工业性试验，钻深198m、钻井直径7.83m。中交天和研制的“首创号”超大直径硬岩竖井掘进机，采用了全断面刀盘破岩和半淹井流体排渣方式，2021年在新疆维吾尔自治区天山胜利隧道2号竖井始发，设计钻井直径为11.4m。中煤矿建集团正在进行“800m以深富水岩层竖井高效智能化钻井装备及关键技术研究”，研制了新型钻机将填补软岩井筒钻井法施工空白；铁建重工(长沙)依托其长期积累的隧道掘进机研发、应用技术，在国内最早开展全断面竖井掘进机研发，目前其研制的下沉式全断面竖井掘进机开挖直径5~23m，已有超过23台样机出厂并完成了大量立井工程建造，形成了成熟的技术体系。相关产品的研制和应用标志着我国基本掌握了竖井掘进机技术。与此同时，2021年科学技术部组织并立项了“千米竖井硬岩全断面掘进机关键技术与装备”重点专项。

总之，国内外部分工序的单机智能施工装备开始了初步探索和研发，但由于立井施工与地质和深度密切相关，国内尚无面向西部弱胶结岩层地区深埋、富水、软岩地质的煤矿立井研发先例，相关装备和施工技术空白。

2.4 冻-注-钻综合特殊凿井技术及应用

除冻结法、钻井法外，注浆法也是一种特殊凿井施工方法，防治地下工程水害、加固软弱地层的一种有效技术手段，其原理是利用泵压将具有充塞胶结性能的浆液注入含水层中，使得浆液能够以充填或渗透形式扩散至裂隙、溶洞、孔隙结构中，浆液凝固后会隔绝过水通路、封堵裂隙，从而起到封水作用^[49,50]。且注浆法可与另2种工法综合利用，成为快速凿井的必要手段之一。

1) 钻-注施工技术。山西赵庄煤矿采用了地面预注浆与反井钻机结合的施工模式。采用注浆技术

对地层进行改性，改善反井施工条件，降低反井施工风险。

2) 冻-钻施工技术。济宁三号井是我国首个也是唯一一个冻结+反井施工工程项目。为了加快副井建井速度、确保矿建工程整体移交，采用了冻结钻爆法施工第四系及风化带地层、反井法施工冻结基岩及基岩段地层的方案，即风化带以下97m冻结段基岩采用LM-200型反井钻机施工导孔溜研后再刷大成井的方式，实现平均钻进速度159m/月(冻结基岩段+普通基岩段)。

3) 冻-注-凿三同时技术。冻注凿三同时，就是将传统的冻结、注浆、凿井三种工法通过一定的技术手段，实现在同一立井、同一时间施工，达到缩短立井建设工期的新方法。即在立井上部第四系及风化带采用冻结法进行井筒掘砌的同时，下部基岩段采用地面预注浆法进行平行作业的综合凿井技术。1999年邢东矿副井首次采用了冻-注-凿三同时作业并取得了成功，相关研究成果获得煤炭工业协会特等奖；刘庄煤矿采用三同时作业方式实现了工期大幅提前，其相关研究成果获得安徽省科技进步一等奖；之后国内许多井筒均采用了三同时施工技术，如山西梵王寺煤矿、宁夏红二煤矿等井筒施工。

3 竖井掘进机钻井法凿井应用现状

3.1 国内竖井掘进机凿井工程案例

国内浅立井领域已研发多台截削式竖井掘进机并进行应用，主要在市政工程中采用；立井井筒领域已研发4台全断面竖井掘进机进行4个深立井井筒施工，其中包括：

1)浙江宁海抽水蓄能电站项目^[51]。浙江宁海抽水蓄能电站位于浙江省宁波市宁海县，装机容量为 140×10^4 kW，安装4台 35×10^4 kW可逆式水泵水轮发电机组，以500kV电压接入浙江电网。电站排风立井高度约198m，荒径7.8m，净直径7.5m，喷锚支护厚度为150mm。排风立井0~5m为强风化层，IV类围岩，稳定性差；井深5~25m为弱风化岩石，围岩为IV~III类；井深25m以下为微新岩石，III~II类围岩，岩体以完整性差~较完整为主，围岩强度90~120MPa。排风立井分2步施工：始发段10m立井为人工掘进，剩余188m采用掘进机施工。

SBM主机主要由刀盘、主驱动、稳定器、设备立柱、撑靴推进系统、出渣系统、砌壁支护系统、多层次吊盘构成(图3)，开挖、出渣、井壁衬砌同步设计，多层次平台主要用于放置电器、流体设备，同工作装置



图3 “中铁599号”竖井掘进机

Fig.3 “Zhongtie No.599” shaft boring machine

分离设计,解决凿井绞车、衬砌、掘进之间同步问题。开挖直径7.83 m,其中主机段长17 m、重达450 t,根据SBM施工经验和技术参数,其较为理想的施工速度为120~180 m/月,实际开挖过程中设备日有效进尺2 m、施工最快进尺达4.8 m/d。

2)天山胜利隧道3号竖井项目^[52]。2021年12月12日,由中交天和机械设备制造有限公司自主研发制造、用于天山胜利隧道2号立井工程施工的世界首创超大直径硬岩竖向掘进机“首创号”顺利始发,系首台高寒、高海拔、大深度、超大直径撑靴式硬岩竖井掘进机。作为天山胜利隧道的通风井,2号立井工程是其重要组成部分,也是目前世界上最深的高速公路竖井,井深800 m,是首个一次开挖成型的超大直径硬岩大深度竖井,岩石强度高达200 MPa以上。

“首创号”竖向掘进机主要由主机部分、吊盘部分、井上设备组成(图4),开挖直径11.4 m,主机长约24 m,质量约1100 t。截至目前该项目尚未结束。

3)四川沿江高速通风立井项目。该立井深度292.5 m,上部地层为碳质页岩,下部地层为花岗闪长岩,分体始发掘进,始发段采用泥水出渣模式。“蜀畅号”竖井掘进机(图5)设计开挖直径9.53 m,整机高约50 m,设备总质量约710 t,由刀盘、盾体、撑靴系统、主驱动、推进系统、锚杆钻机、模板系统、斗提机出渣系统、泥浆环流系统、后配套系统、电气系统、液压系统、井架、地面绞车系统以及泥水站分离系统等组成,集开挖、出渣、支护、导向于一体,可以实现超前钻探作业以及掘进、出渣、模板支护平行作业。同时,作为全国首创深竖井TBM施工设备,“蜀畅号”施工过程实现全自动化、全机械化,掘进过程无需人员下井即可完成,通过刀盘旋转配合推进系统完成立井开挖,设备井下噪音小于60 dB,岩层扰



图4 “首创号”竖井掘进机

Fig.4 “Shouchuang” shaft boring machine



图5 “蜀畅号”竖井掘进机

Fig.5 “Shuchang” shaft boring machine

动小、超欠挖少、成井完整,大幅提高各作业环节协同化、自动化、低碳化,实现大幅度减员增效目标。单日最高进尺达6 m。

4)云南以礼河水电站立井项目^[53]。以礼河四级水电站位于云南省会泽县西北,属于白鹤滩水电站复建的配套系统。出线立井井深282.5 m,井筒净直径10.3~12.0 m。井筒顶部为人工素填土,下部基岩为二叠系峨眉山组强风化玄武岩和二叠系栖霞—茅口组弱风化灰岩,25 m范围初支采用锚喷支护+钢筋混凝土,25 m以下初支采用锚喷支护。

项目采用了北京中煤矿山工程有限公司研制的“金沙江1号”(图6),该设备基于传统的立井施工技术,结合隧道盾构机、物料垂直提升技术等,实现了井内掘进的机械化、智能化、无人化。设备由开挖掘进系统、清渣与出渣系统、井壁支护系统、通风系统等组成,采用刀盘开挖,刮板输送机清渣,斗式提升机提渣,最终由吊桶装渣,提升机提升出井。该项目利用先导孔溜渣、扩孔掘进,目前已经完工,最快进尺达10.9 m/d。



图 6 “金沙江 1 号”竖井掘进机

Fig.6 “Jinshajiang No.1” shaft boring machine

3.2 国外冻结+竖井掘进机施工案例

1) 加拿大 Jansen 项目^[54]。加拿大萨斯喀彻温省的 Jansen 地区有着全球最大的碳酸钾矿, 本项目包括 2 条立井, 深度为 1 030 m, 采用冻结+竖井掘进机方式进行井筒掘砌, 即首先利用冻结法形成挡水帷幕, 然后采用竖井掘进机进行井筒掘进。

井筒周边为中硬岩(石灰岩和石英砂岩), 强度大约为 120 MPa。冻结段采用双层井壁结构: 初支上半段为锚网喷, 下半段采用混凝土滑模浇筑; 二衬采用纤维混凝土(滑模); 非冻结段采用 PET、土工格栅和固定螺栓施工初支。通过采用纤维加强混凝土, 省去了安装钢筋的步骤, 不需要额外人员在拥挤的立井井筒区域内工作, 纤维混凝土实景如图 7 所示。该项目于 2010 年开工, 设计掘进速度 3 m/d, 单个截割臂开挖土方能力为 40 m³/h。真空出渣系统可以将最大粒径 250 mm 的岩渣输送到 30 m 高度, 实际应用中保留一定余量, 控制岩渣粒径 <150 mm、输送高度 25 m 左右, 并能够实现干、湿岩渣输送。



图 7 纤维混凝土二衬结构

Fig.7 Fiber reinforced concrete of the inner shaft wall

2) 白俄罗斯 Nezhinsky 钾盐矿项目^[55]。该项目包括 2 条 750 m 深的立井井筒, 穿过地层主要为沉

积岩、砂、黏土、白垩纪泥岩和白云岩。由于在 150 m 的深度以上含水量丰富, 确定采用冻结法+竖井掘进机施工, 冻结深度 165 m(42 个冻结孔), 用 2 台 SBR(截削式竖井掘进机)分别施工, 井筒开挖直径最大为 12 m, SBR 竖井掘进机如图 8 所示。



图 8 Nezhinsky 钾盐矿 SBR 竖井掘进机

Fig.8 SBR shaft boring machine in the Nezhinsky potash mine

该项目的支护施工方案为: 井筒外壁为模板浇筑的厚 450 mm 混凝土层; 在施工到深度 320 m 后停止掘进, 在初期混凝土外壁上采用分块铸铁管拼装支护形成内衬和隔水层; 对于深 320 m 以下井筒采用混凝土浇筑衬砌。井筒支护结构示意, 如图 9 所示。

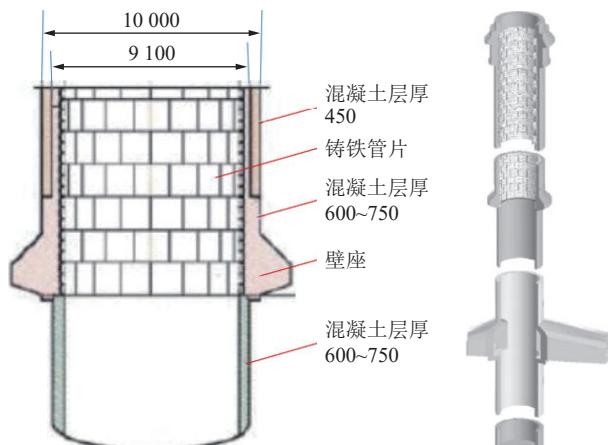


图 9 井筒支护结构示意

Fig.9 Shaft support structure diagram

现场准备工程于 2017 年 11 月开始, 包括冻结钻孔、施工工程、现场设置、安装绞车、永久性安全

帽和下沉所需的其他部件。首台 SBR 于 2018 年 6 月抵达现场,在地面上进行预组装,然后下放到 50 m 深的始发井,至 2019 年 2 月,井筒掘进深度为 150 m,综合成井速度为 3.6 m/d。且 2020 年 4 月创下了单月 144 m 的立井月进尺记录和一天掘进 7.4 m 的最高日掘进记录。

在施工 165 m 冻结段的外壁时,SBR 上模板浇筑系统距底部开挖面 12~15 m,浇筑模板高约 5 m,这一阶段模筑和开挖作业可以相互独立、互不影响。

在 165 m 以下非冻结段时,井壁稳定性开始变

差、片帮增多,在 2 号立井施工至 170 m 非冻结层时出现重大问题:在此深度,软黏土层自稳定性差导致井帮坍塌,井筒断面超挖严重,无法正常掘进(图 10),最后采用数百立方米的混凝土填满井底后再继续掘进,耽误了 4 周。为应对这种恶劣情况,该区段施工时开挖和浇筑混凝土作业交替进行,此阶段采用缩短模板并将其插入尽可能靠近开挖面的位置,此时尽管理论上可达到 7 m/d 进尺,但实际最大掘进速度为 3.95 m/d。在到达 320 m 深度后,停止掘进,从底部开始向上砌筑具有水密性能的铸铁管片;完成永久支护后再继续施工下部井筒。



图 10 非冻结段井帮坍塌情况
Fig.10 Well wall collapse in non-frozen section

3) 英国 Woodsmith 钾盐矿项目^[56]。该项目区域蕴藏世界上最大的杂卤石矿资源。该矿的两个井筒深度分别为 1 594 m 和 1 565 m,这将是目前使用 SBR 截削式竖井掘进机 SBR 开挖的最大深度,凿井主要涉及红色砂岩和泥岩。竖井掘进机为海瑞克第三代改进 SBR 技术。竖井掘进机如图 11 所示。冻结+竖井凿井施工技术在国际上现有案例较少,冻结+竖



图 11 Woodsmith 项目竖井掘进机

Fig.11 SBR shaft boring machine in Woodsmith potash mine

井凿井施工案例工程条件和技术参数对比,见表 2。

4 冻结+竖井掘进机凿井法设计思路

竖井掘进机施工要求井筒穿过的地层条件稳定、涌水量小。当工程、水文地质条件复杂时,凿井期间将产生大量涌水,影响掘进安全,因此只能对井筒地层进行改性后才能进行凿井施工。虽然冻结法及竖井掘进机成套设备均属于相对成熟的特殊凿井施工工法,但国内尚无冻结段采用竖井掘进机施工先例。因此在特殊地层条件下的立井井筒开拓,将 2 种工法结合可以充分发挥各工法的优势,实现安全、快速、高效机械化建井。

4.1 井筒冻结方案设计

4.1.1 冻结壁设计思路

对于富水冲积层和弱胶结地层,采用冻结法进行地层改性,利用冻结壁隔绝井筒内外水力联系,确保竖井掘进机安全掘进。采用竖井掘进机进行井筒开挖,造成的围岩震动较爆破法小,冻结壁强度可满足掘进机机体撑靴荷载要求(一般设计<2 MPa),而冻结壁平均温度一般为-8~-11 °C(孔隙水弱胶结岩

表2 冻结+竖井凿井施工案例部分技术对比
Table 2 Part technical comparison of the freezing & shaft sinking construction cases

案例项目	Jansen钾盐矿项目(加拿大)	Nezhinsky钾盐矿项目(白俄罗斯)	Woodsmith钾盐矿项目(英国)
地质状况	中硬岩(120 MPa)石灰岩和石英砂岩	泥岩和砂岩地层(钾盐矿)	红色砂岩和泥岩(钾盐矿, 杂卤石)
井筒深度/m	1 000	730	1 600
井筒直径/m	8 ~ 11	7.2 ~ 10.1	7.45 ~ 10.5
冻结深度/m	700	165	—
设备参数	2台SBR 截割臂功率: 600 kW 截割臂扭矩: 140 kN·m SBR质量: 380 t 最大切割直径: 12.3 m	2台SBR 截割臂功率: 600 kW 截割臂扭矩: 75 kN·m SBR质量: 400 t 最大切割直径: 12 m	2台SBR 截割头功率: 600 kW 截割头扭矩: 75/100 k N·m SBR质量: 350 t 最大切割直径: 10.5 m
排渣方式	气动渣土系统(PNM)	PNM	PNM
支护方式	初支: 锚网喷 二衬: 纤维混凝土(滑模)	初支: 混凝土+钢管片 二衬: 冷却砖+防爆混凝土	初支: 岩质锚杆、钢梁和木材 二衬: 交互套筒的下垂钢板、U型钢梁
掘进效率/(m·d ⁻¹)	3.0(设计)	3.95	—
不良地层	伏安岩层渗漏问题: 钾盐矿层注满混凝土和沙子	—	—
工程事故	10名工人压力测试时陷入钾盐矿山溶洞	—	—
完工时间	2018年8月井筒竣工	2020年7月井筒竣工	尚未完工

层)或-13~-18 °C(深厚冲积层),冻结壁强度一般≥8 MPa,因此仍旧按照目前冻结壁设计理念进行设计即可,即采用多姆克公式和拉麦公式进行冻结壁厚度计算、成冰公式进行冻结壁有效厚度校核以确定冻结壁强度,采用变形公式(如维亚洛夫-扎列茨基公式)确定冻结壁刚度。由于硬岩地层岩石强度高,围岩可以提供竖井掘进机机体掘进及扶正支撑荷载,冻结壁仅需起到地层封水作用即可;软岩地层部分岩层岩石强度低,除封水作用外,需要冻结壁具有适当强度来承载井筒深部水压力。

4.1.2 冻结井壁设计思路

采用竖井掘进机进行井筒开挖,不影响井筒采用双层支护结构,但掘进方式对内、外层井壁形式有影响。具体包括机体安装始发段、正常掘进段及套壁段,可供选择的支护方式包括临时支护结构、双层钢筋混凝土以及钢板+混凝土永久支护结构等。

1)临时支护结构。锚网喷在立井井筒建设中一般作为临时支护,结合光面爆破进行,且在爆破时应尽量减少炸药用量。在支护设计中,一般以锚为主进行设计,辅以喷射混凝土、钢筋网喷射混凝土,在井筒围岩变形稳定后再浇筑混凝土井壁。但在冻结井筒中一般不采用锚杆支护形式,以防打穿冻结管,造成盐水渗漏。可以采用钢井圈+木背板的支护方式进行临时支护。

井圈背板法通常用于普通法立井井筒掘进,适用于较稳定的土层,即在表土段采用人工或抓岩机(土硬时可放小炮)出土,下掘一小段后(空帮距根据

土层的稳定性来确定,一般不超过1.2 m),即用井圈、背板进行临时支护,掘进一段后(一般不超过30 m),再由下向上拆除井圈、背板,然后砌筑永久井壁,周而复始,直至基岩。

在弱胶结岩层正常进行井筒掘进时,尤其是通过破碎带时,临时支护可采用竖井掘进机的护盾进行,以确保刀盘与模板吊盘之间围岩的稳定性。但特殊情况下需要较长时间停止掘进又需要预留施工空间时(如设备维修或刀头更换),需要采用井圈+背板法进行掘进工作面段井帮的支护,钢制井圈的间距一般在2 m左右,最大不超过4 m,井圈与围岩之间密铺木背板,以确保临时支护段的稳定性。

2)双层钢筋混凝土结构。混凝土现浇结构一般用于冻结井筒的永久支护,也是目前冻结井壁采用的主要支护方式,双层钢筋混凝土(复合)井壁结构一般配筋率仅为0.55%~0.85%,远达不到地面建筑结构的配筋率,井壁结构强度的提高更多的是依靠增大混凝土强度,目前已有井筒采用C100级别的混凝土。

采用竖井掘进机进行井筒掘进,需要尽量减少井筒空帮时间,因此吊盘的模板浇筑平台宜设在最下层,与常规井筒外层井壁施工一致,采用模筑方式进行外层井壁的浇筑,内层井壁施工采用套壁方式,作为井筒运营期间主要的防水结构。

采用竖井掘进机尤其是全断面竖井掘进机进行井筒开挖时,井筒开挖会形成光滑断面,大幅降低了井帮围岩与外层井壁之间的摩擦力,这也是竖井掘

进机与钻爆法最大区别之一,因此需要增加附属结构(如锚杆、圈梁等)来满足井壁结构吊挂力计算,防止井壁施工及运营期间出现“脱裤子”现象。

3)钢板混凝土结构。钢板+混凝土井壁结构主要用于钻井法、沉井法施工时需要地面预制的井筒,在地压大的深井井筒中,常采用丘宾筒、组合钢板等支护结构,其优点主要是预制构件强度高、缺点是成本高,如德国的AV型井壁。

当井筒深度大、地下水承压高时,内层钢板设计厚度可达40 mm左右,而钢板过厚时井下焊接十分困难,且焊接时间长,当井筒开挖穿过煤层时,瓦斯赋存影响钢板结构的井下焊接。此外,在钻井井壁制作时,内层钢板应设置泄水孔,钻井法施工段井壁漏水量不应大于0.5 m³/h;而冻结井壁的现浇结构形式和混凝土浇筑、振捣效果决定了内层钢板作为井壁主要的防水结构,且400 m内井筒漏水量不大于0.5 m³/h,冻结深度超过400 m时,每百米增加漏水量不大于0.5 m³/h,因此在不预留泄水孔情况下,特殊富水地层可能会引起应力集中,造成钢板鼓包现象。

此外,竖井掘进机需要进行安装及调试工作,因此在井筒正式开挖前,需要进行50~70 m井筒掘进,具体开挖深度依照机体尺寸进行设计,安装调试一

般耗时40~50 d,因此不宜采用临时支护结构,该段支护结构宜采用钢筋混凝土结构按照外层井壁参数进行施工。

4.2 竖井掘进机装备设计方案

采用冻结法施工的立井井筒,从井筒开始掘砌到停止地层冻结,冻结壁的平均温度总体随着掘进深度增加而不断降低,甚至出现井筒冻实的情况,因此整个掘进机机体均处于负温环境中进行工作,因此机体整体工作性能(如低温岩石切削)需要考虑低温环境的影响,尤其注意液压系统和流体系统在低温环境下的启动、工作性能。

4.2.1 掘进系统设计思路

按照钻头结构形式划分,深井竖井掘进机目前主要有全断面竖井掘进机和截割式(部分断面)竖井掘进机;按照破岩刀具类型划分,可以分为滚刀破岩、刮刀破岩和截割破岩。其中全断面竖井掘进机主要针对少水稳定岩石地层,采用全断面滚刀破岩,更适合中硬岩以上地层开挖;截割式竖井掘进机采用截割滚筒破岩,主要针对少水软弱围岩,由于采用摆动油缸控制开挖直径,立井开挖直径变化无需对设备进行拆装就能快速适应不同的开挖直径。同形式竖井掘进机施工适应性特点,见表3。

表3 不同形式竖井掘进机施工适应性特点

Table 3 Construction adaptability characteristics of different types of shaft boring machines

掘进机类型	全断面竖井掘进机	截割式竖井掘进机
地质适应性	少水、稳定的岩石地层	少水、稳定软土或软岩地层
开挖方式	全断面滚刀破岩	截割滚筒开挖
出渣模式	泥浆、链斗+吊桶	真空、泥浆、链斗+吊桶
变径方式	需要拆装边块,变径复杂	无需拆装,控制摆动油缸行程实现变径,变径简单
缺点	设备质量大、造价高	破岩效率低、不适用硬岩
支护形式	井圈背板、护盾、双层钢筋混凝土、钢板+混凝土复合结构	

对于破岩效率而言,爆破法虽然高效、经济,但爆破引起的震动不可避免地会对周围岩体产生一定程度的破坏。相较而言,刮削、截割、挤压等机械破岩方式更有利于围岩的稳定。正常情况下,竖井掘进机破岩效率较高,不会影响井筒整体成井效率。竖井掘进机设备型式的选择需要综合考虑地质适应、安全、高效、经济、工艺等因素,满足工程具体施工功能要求,设备配置合理,充分发挥施工机械的综合效率。

4.2.2 排渣系统设计思路

按照破碎岩石的排除方式划分,竖井掘进机可

分为下排渣式和上排渣式。前者适合于具有下部巷道的情况,同时需要进行导井施工甚至导井+扩孔施工,以满足岩渣下排及运输的要求,因此对于新建井筒而言,下排渣式并不适用;上排渣式需要克服重力影响,常见的排渣方式包括半/全淹水泵吸反循环排渣、真空泵吸排渣、刮板链斗机械排渣、机械抓斗排渣以及机械转轮排渣等几种形式,不同形式具有不同的应用方式。

在冻结法施工的立井井筒中,冻结壁作为地层改性后增强围岩强度和刚度的止水帷幕,井筒通风和积水的侵蚀会降低冻结壁的可靠性,因此在竖井

掘进机的排渣设计时,应采用干式排渣形式,同时工作面切削产生的岩渣,需采用多级排渣形式提升至地面,如采用三级排渣方式:

1)一级出渣系统。一级出渣可采用垂直螺旋出渣方式,由螺旋输送机伸入下部刀盘土仓区域,通过螺旋轴将驱动刀盘切削下来的渣土输送 到中转储渣箱内,并通过二级出渣系统向上输送。

2)二级出渣系统。二级出渣采用垂直提渣机方式,由垂直螺旋机与垂直提渣机组合而成,垂直螺旋机将掌子面的渣土向上输送至主驱动区域,卸料后转至垂直提渣机进渣区域,由垂直提渣机接力完成至环形渣仓区域的倒运。

3)三级出渣系统。三级出渣采用吊桶出渣方式,将二级出渣系统输送至设备渣仓内的岩渣 利用吊桶提升到地面卸渣平台进行倾卸。千米级井筒出渣是建井期间耗时最长的工序,采用干式排渣方式时,需加强掘-支-运平行作业管理,提升井筒掘砌综合效率。

5 结语

回顾了我国立井凿井技术从爆破、排渣、提升、井壁浇筑设备及技术的发展历程,以及特殊凿井法在特殊地层条件下的应用,结合机械化、自动化、智能化建井趋势,列举了国内外特殊凿井法与井筒开挖的(结合)应用,给出了我国西部弱胶结岩层条件下采用冻结+竖井掘进机开拓方式时相关设计的建议。

1)西部弱胶结富水地层采用冻结法施工是当前立井井筒开拓主要的辅助工法,安全性高、成本可控,当前冻结井壁设计是基于东部冲积层立井井筒设计经验,深部井壁厚度往往超过 2 m,目前通常采用高性能高强度混凝土并提高配筋率来提高井壁强度实现井壁减薄,但忽视了井壁结构与围岩之间相互作用形式与荷载计算方式,没有从井壁结构受力机理上取得突破,应进一步研究壁间注浆对双层井壁受力结构的影响方式和影响程度,以大量的现场监测数据和模型试验数据作为依托,调整井壁结构计算参数取值,实现井壁材料和作用荷载双向调整,确定合理的井壁计算方法。

2)机械化、智能化凿井方式是矿山领域井筒开拓及巷道掘进的发展趋势,以白垩系、侏罗系为代表的西部弱胶结岩层岩石强度低,但不同岩性地层强度差异较大,且该地层易扰动弱化、暴露风化、水解泥化特性决定了采用竖井钻机、TBM、竖井掘进机进行破岩的难题之一在于解决“泥包钻”问题。同时

千米级立井井筒掘砌采用上排渣形式时,工作面至地面的多级排渣形式以及提升能力也是大型设备掘砌的难题。

3)截至 2023 年 6 月底,国家首批智能化示范煤矿有 50 座井筒煤矿通过专家验收,其中井工煤矿有 22 座达到 I 类中级智能化,26 座达到 II 类中级智能化,2 座达到 II 类初级智能化。当前的煤矿智能化建设总体程度不高,多集中于井下开采阶段;地面的智能化系统多侧重于监测监控、信息收集,而后台数据处理、信息反馈及系统自动调控程度不够高,这是制约智慧矿山建设的重要因素。在智能化矿山大背景下,需要多个行业共同协作,从数据库建设、信息收集及处理、系统自动调控、设备材料、方案设计等诸多方面进行匹配,共同推进矿山智能化建设。

参考文献(References):

- [1] 边文越,陈挺,陈晓怡,等.世界主要发达国家能源政策 研究与启示[J].中国科学院院刊,2019,34(4): 488–496.
BIAN Wenyue, CHEN Ting, CHEN Xiaoyi, et al. Study and enlightenment of energy policies of major developed countries[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 488–496.
- [2] International Energy Agency. Coal 2023 Analysis and forecast to 2026[OL]. (2023-12-01)[2024-06-18]. <https://www.iea.org/energy-system/fossil-fuels/coal>.
- [3] 国家能源局. 关于政协第十四届全国委员会第一次会议第 03720 号提案答复的复文摘要 [OL]. (2023-08-20)[2024-06-18]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2023-08/20/c_1310740153.htm.
- [4] 肖瑞玲. 立井施工技术发展综述[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(8): 13–17, 22.
XIAO Ruiling. Review on development of mine shaft construction technology[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43 (8) : 13–17, 22.
- [5] 刘志强,陈湘生,宋朝阳,等. 我国深部高温地层井巷建设发展路径与关键技术分析 [J]. 工程科学学报 , 2022, 44(10) : 1733–1745.
LIU Zhiqiang, CHEN Xiangsheng, SONG Zhaoyang, et al. Development path and key technology analysis of shaft and tunnel construction in deep stratum with high temperature[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(10): 1733–1745.
- [6] 龙志阳,陆伦. 立井快速施工技术的发展与应用[J]. 煤炭科学技术, 1999, 27(3): 35–38.
LONG Zhiyang, LU Lun. Development and application of rapid mine shaft construction technology[J]. Coal Science and Technology, 1999, 27(3): 35–38.
- [7] 刘志强. 矿井建设技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [8] 谭杰,刘志强,宋朝阳,等. 我国矿山竖井凿井技术现状与发展趋势 [J]. 金属矿山, 2021(5): 13–24.
TAN Jie, LIU Zhiqiang, SONG Zhaoyang, et al. Status and development trend of mine shaft sinking technique in China[J]. Metal Mine, 2021(5): 13–24.
- [9] 王建平,刘伟民,王恒. 我国人工地层冻结技术的现状与发展 [J]. 建井技术, 2019, 40(4): 1–4, 25.

- WANG Jianping, LIU Weimin, WANG Heng. Present state and development of China artificial ground freezing technology[J]. Mine Construction Technology, 2019, 40(4): 1–4, 25.
- [10] 余力, 马英明. 关于冻结壁的计算方法[J]. 建井技术, 1981(3): 37–41.
- YU Li, MA Yingming. The calculation method of freezing wall[J]. Mine Construction Technology, 1981(3): 37–41.
- [11] LAME, CLAPEYRON. Memoire sur l'équilibre intérieur des corps solides homogènes[J]. Mem divers savans, 1833, 4.
- [12] Domke. Über die beanspruchung der frostmauer beim schachtabteufen nach gefrierverfahren[J]. Gluchauf, 1915(47): 1129–1135.
- [13] 陈明华, 庞荣庆. 深冻结井筒施工中几种常见事故的分析[J]. 建井技术, 1981(4): 45–48.
- CHEN Minghua, PANG Rongqing. Analysis of several common accidents in deep freezing wellbore construction[J]. Mine Construction Technology, 1981(4): 45–48.
- [14] 赵志福, 李志清, 梁洪振. 元氏煤矿深井冻结施工新经验[J]. 建井技术, 2000, 21(4): 6–9.
- ZHAO Zhifu, LI Zhiqing, LIANG Hongzhen. New experiences of ground freezing construction in deep mine shaft sinking of Yuanshi Mine[J]. Mine Construction Technology, 2000, 21(4): 6–9.
- [15] 盛小飞, 吴佳坤. 霄云煤矿主井井筒冻结施工实践[J]. 建井技术, 2008, 29(2): 11–13.
- SHENG Xiaofei, WU Jiashen. Practices on freezing shaft sinking of mine main shaft in Xiaoyun mine[J]. Mine Construction Technology, 2008, 29(2): 11–13.
- [16] Вялов С С, Гмошинский В Г, Городецкий С Э. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты льдогрунтовых ограждений[M]. Изд-во АН СССР, 1962.
- [17] 陈湘生. 深冻结壁时空设计理论[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 13–16.
- CHEN Xiangsheng. Time space design theory for deep ice wall of short cylinder[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(5): 13–16.
- [18] 陈湘生. 对深冻结井几个关键问题的探讨[J]. 煤炭科学技术, 1999, 27(1): 36–38.
- CHEN Xiangsheng. Discussion on several key issue of deep freezing shaft[J]. Coal Science and Technology, 1999, 27(1): 36–38.
- [19] 杨维好, 杨志江, 韩涛, 等. 基于与围岩相互作用的冻结壁弹性设计理论[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3): 516–519.
- YANG Weihao, YANG Zhijiang, HAN Tao, et al. Elastic design theory of frozen soil wall based on interaction between frozen soil wall and surrounding rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(3): 516–519.
- [20] 杨维好, 杨志江, 柏东良. 基于与围岩相互作用的冻结壁弹塑性设计理论[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 175–180.
- YANG Weihao, YANG Zhijiang, BAI Dongliang. Elastic-plastic design theory of frozen soil wall based on interaction between frozen wall and surrounding rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 175–180.
- [21] 杨维好, 杜子博, 杨志江, 等. 基于与围岩相互作用的冻结壁塑性设计理论[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1857–1862.
- YANG Weihao, DU Zibo, YANG Zhijiang, et al. Plastic design theory of frozen soil wall based on interaction between frozen soil wall and surrounding rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1857–1862.
- [22] 庞荣庆. 有关冻结井壁的几个问题[J]. 煤炭科学技术, 1979, 7(4): 7, 18.
- PANG Rongqing. A few questions about freezing well walls[J]. Coal Science and Technology, 1979, 7(4): 7, 18.
- [23] 杨永敏, 刘庆云. 深井冻结井筒采用泡沫塑料夹层对冻结外力的影响[J]. 煤炭工程, 1985, 17(8): 4–6, 39.
- YANG Yongmin, LIU Qingyun. Effect of foam intercalation on external freezing force in deep frozen shaft[J]. Coal Engineering, 1985, 17(8): 4–6, 39.
- [24] 陈相孝, 楼根达, 王正廷. 建昌营煤矿冻结井壁施工与井壁防漏[J]. 建井技术, 1995, 16(5): 24–25.
- CHEN Xiangxiao, LOU Genda, WANG Zhengting. Construction and leakage prevention of frozen shaft wall in Jianchangying Coal Mine[J]. Mine Construction Technology, 1995(5): 24–25.
- [25] 王铁梦. 现浇双层混凝土井壁的温度应力与裂缝[J]. 建井技术, 1981(3): 33–37.
- WANG Tiemeng. Temperature stress and cracks in cast-in-place double-layer concrete wall[J]. Mine Construction Technology, 1981(3): 33–37.
- [26] 孔维浩, 杨龙, 姚直书, 等. 冻结井壁纤维混杂与微膨胀高性能混凝土配制与抗裂试验[J]. 煤矿安全, 2020, 51(3): 69–74.
- KONG Weihao, YANG Long, YAO Zhishu, et al. Preparation and crack resistance test of high performance concrete with fiber hybrid and micro expansion freezing shaft lining[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(3): 69–74.
- [27] 王恒, 郭君华. C100高性能混凝土在冻结井筒井壁中的应用[J]. 煤矿安全, 2021, 52(9): 122–128.
- WANG Heng, GUO Junhua. Application of C100 high performance concrete in freezing shaft wall[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(9): 122–128.
- [28] 朱艳州. 富水基岩中单层井壁的变形规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- ZHU Yanzhou. Study on deformation law of single-layer shaft lining in water-rich bedrock[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [29] 刘志强. 竖井掘进机[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2019.
- [30] 刘志强, 王博, 杜健民, 等. 新型单平台凿井井架在深大立井井筒施工中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(10): 24–29.
- LIU Zhiqiang, WANG Bo, DU Jianmin, et al. New mine shaft sinking headframe with single platform applied to construction of deep and large diameter mine shaft[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 24–29.
- [31] 韩宇, 付军, 商亚州. 焦家金矿新竖井快速施工[J]. 建井技术, 2018, 39(5): 13–15, 36.
- HAN Yu, FU Jun, SHANG Yazhou. Rapid construction of new vertical shaft in Jiaojia gold mine[J]. Mine Construction Technology, 2018, 39(5): 13–15, 36.
- [32] 龙志阳, 桂良玉. 千米深井凿井技术研究[J]. 建井技术, 2011, 32(S1): 15–20.
- LONG Zhiyang, GUI Liangyu. Research on sinking technology of kilometer deep well[J]. Mine Mine Construction Technology, 2011, 32(S1): 15–20.
- [33] 煤炭部100项重点推广项目简介(上)[J]. 江苏煤炭, 1994(2): 63.
- Introduction of 10 Key Promotion Projects by the Ministry of

- Coal 100 (Part 1) [J]. Jiangsu Coal, 1994(2): 63.
- [34] 卜现山. 口孜东矿主井冻结深度刷新亚洲之最 [J]. 煤炭工程, 2009, 41(4): 76.
- BU Xianshan. The deepest freezing depth in Asia: Kouzidong mine [J]. Coal Engineering, 2009, 41(4): 76.
- [35] 王建合, 王复飞, 刘化伟, 等. 泉店矿中央风井冻结段外壁掘砌快速施工技术 [J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(1): 49–50, 53.
- WANG Jianhe, WANG Fufei, LIU Huawei, et al. Rapid construction technology of outer wall excavation and lining at ground freezing section of central ventilation shaft in Quandian Mine [J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(1): 49–50, 53.
- [36] 王鹏越, 张小美, 龙志阳, 等. 千米深井基岩快速掘砌施工工艺研究 [J]. 建井技术, 2011, 32(S1): 26–28.
- WANG Pengyue, ZHANG Xiaomei, LONG Zhiyan, et al. Research on construction technology of rapid excavation of bedrock in kilometer deep well [J]. Mine Construction Technology, 2011, 32(S1): 26–28.
- [37] 徐辉东, 杨仁树, 刘林林, 等. 大直径超深立井凿井新型提绞装备研究及应用 [J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(7): 89–92, 140.
- XU Huidong, YANG Renshu, LIU Linlin, et al. Study and application of new hoisting equipment to large diameter ultra deep mine shaft sinking [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(7): 89–92, 140.
- [38] 边振辉. 大直径超深竖井成套施工技术 [J]. 建井技术, 2018, 39(5): 1–6.
- BIAN Zhenhui. Complete set of construction technology for large diameter and super depth vertical shaft [J]. Mine Construction Technology, 2018, 39(5): 1–6.
- [39] 龙志阳. 立井整体移动模板的研究 [J]. 煤炭科学技术, 1992, 20(5): 6–9, 5.
- LONG Zhiyang. Research into one-piece moving shuttering for vertical shaft sinking for vertical shaft sinking [J]. Coal Science and Technology, 1992, 20(5): 6–9, 5.
- [40] 刘杰, 王志强, 邱天德, 等. 液压整体步步式凿井吊盘设计研究 [J]. 建井技术, 2013, 34(3): 27–30.
- LIU Jie, WANG Zhiqiang, QIU Tiande, et al. Design and research of hydraulic integral walking sinking hanging plate [J]. Mine Construction Technology, 2013, 34(3): 27–30.
- [41] 王鹏越. 超大直径深立井施工技术发展及展望 [J]. 煤炭工程, 2018, 50(6): 47–50.
- WANG Pengyue. Development and prospect of construction technique for super-large diameter deep vertical shaft [J]. Coal Engineering, 2018, 50(6): 47–50.
- [42] 王建平, 刘伟民, 王恒. 核桃峪煤矿副立井冻结设计与施工 [J]. 建井技术, 2020, 41(5): 43–45.
- WANG Jianping, LIU Weimin, WANG Heng. Ground freezing design and construction of auxiliary mine shaft in hetaoyu mine [J]. Mine Construction Technology, 2020, 41(5): 43–45.
- [43] 荆国业, 韩博, 刘志强. 全断面竖井掘进机凿井技术 [J]. 煤炭工程, 2020, 52(10): 29–33.
- JING Guoye, HAN Bo, LIU Zhiqiang. Research on sinking technology of full-section shaft boring machine [J]. Coal Engineering, 2020, 52(10): 29–33.
- [44] 刘志强, 宋朝阳, 程守业, 等. 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.
- LIU Zhiqiang, SONG Zhaoyang, CHENG Shouye, et al. Development history and status quo of raise boring technologies and equipment in China [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 32–65.
- [45] 刘志强, 宋朝阳, 程守业, 等. 煤矿矿井建设技术与装备 70 余年创新发展及推广实践 [J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 65–83.
- LIU Zhiqiang, SONG Zhaoyang, CHENG Shouye, et al. Seventy years innovation development and popularization practice of coal mine construction technology and equipment in China [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 65–83.
- [46] 刘志强, 宋朝阳. 我国大直径井筒机械破岩钻井技术与装备新进展 [J]. 建井技术, 2022, 43(1): 1–9.
- LIU Zhiqiang, SONG Zhaoyang. The latest development of mechanical rock breaking drilling technology and equipment for large diameter shaft in China [J]. Mine Construction Technology, 2022, 43(1): 1–9.
- [47] 刘志强. 反井钻井工艺及其关键技术研究 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(5): 12–21.
- LIU Zhiqiang. Research on process and key technologies of raise boring [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5): 12–21.
- [48] 荆国业, 刘志强, 韩博. 竖井掘进机钻井工艺及装备研究 [J]. 中国煤炭, 2018, 44(5): 65–70.
- JING Guoye, LIU Zhiqiang, HAN Bo. Research on shaft sinking technology and equipment of mine shaft excavator [J]. China Coal, 2018, 44(5): 65–70.
- [49] 周兴旺. 注浆施工手册 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2014.
- [50] 高岗荣. 煤矿注浆技术综述 [J]. 建井技术, 2020, 41(5): 1–9, 23.
- GAO Gangrong. Review on grouting technology of coal mine [J]. Mine Construction Technology, 2020, 41(5): 1–9, 23.
- [51] 孟继慧, 夏万求, 彭泽豹, 等. SBM 施工风险分析及管控措施: 以宁海抽水蓄能电站竖井工程为例 [J]. 建井技术, 2021, 42(6): 1–6, 11.
- MENG Jihui, XIA Wanqiu, PENG Zebao, et al. Risk analysis and control measures of SBM construction-based on shaft engineering of Ninghai pumped-storage hydroplant as example [J]. Mine Construction Technology, 2021, 42(6): 1–6, 11.
- [52] 望远福, 洪亮. 天山胜利隧道 3 号竖井施工技术研究 [J]. 交通世界, 2023(13): 154–156.
- WANG Yuanfu, HONG Liang. Research on construction technology of No.3 shaft of Tianshan Shengli Tunnel [J]. Transpo World, 2023(13): 154–156.
- [53] 刘志强, 宋朝阳, 程守业, 等. 千米级竖井全断面科学钻进装备与关键技术分析 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(11): 3645–3656.
- LIU Zhiqiang, SONG Zhaoyang, CHENG Shouye, et al. Equipment and key technologies for full-section scientifically drilling of kilometer-level vertical shafts [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3645–3656.
- [54] 海瑞克. 行业先锋携手开拓地下空间-项目业绩 (加拿大 JANSEN 矿山) [OL]. (2013) [2024-06-18]. <https://www.herrenknecht.com/cn/referenzen/referenzendetail/jansen-mine>.
- [55] 海瑞克. 行业先锋携手开拓地下空间-项目业绩 (NEZHINSKY 矿山) [OL]. (2018) [2024-06-18]. <https://www.herrenknecht.com/cn/referenzen/referenzendetail/nezhinsky-mine>.
- [56] 海瑞克集团官方公众号. 英国伍德史密斯矿产项目——海瑞克提供全方位产品 [OL]. (2019-06-27) [2024-06-18]. <https://www.tunnelling.cn/PNews/NewsDetail.aspx?newsId=34118>, 2019.