

立井施工技术发展综述

肖 瑞 玲

(安标国家矿用产品安全标志中心,北京 100013)

摘 要:回顾了我国立井井筒小设备施工,煤炭部、冶金部、一机部三部立井施工机械化配套科研攻关,立井短段掘砌混合作业施工配套设备研发,千米深井凿井技术开发研究等4个凿井技术发展阶段。全面介绍了立井施工机械化及其配套施工设备,概述了提升系统、稳车悬吊、打眼爆破、装岩设备和砌壁模板发展情况。指出目前我国立井施工工艺已全面推行一掘一砌正规循环的短段掘砌混合作业施工方法,平均成井速度可达80 m/月以上。最后提出了竖井掘进机技术及装备研究,大直径深立井井筒凿井设备研制,千米深井掘、砌、安施工关键技术及装备等研究方向,同时对今后深井凿井技术发展趋势进行了展望。

关键词:立井凿井技术; 施工设备; 竖井掘进机; 立井井筒

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2015)08-0013-05

Review on development of mine shaft construction technology

Xiao Ruiling

(China Mining Products Safety Approval and Certification Center, Beijing 100013, China)

Abstract: The paper reviewed four shaft sinking technology development stages including the mine shaft construction with the small equipment and a research and development program on the mechanized matching of the mine shaft construction equipment, research and development on mechanical matching technology conducted by the Ministry of Coal Industry, Ministry of Metallurgical Industry and First Ministry of Machinery Industry, the research and development on the construction matching equipment of the mine shaft short section lining combined operation, the research and development on the sinking technology of the 1 000 m mine deep shaft. The paper fully introduced the mechanization and matching construction equipment of the mine shaft construction and stated the hoisting system, winch suspension, bore-hole drilling and blasting, rock loading equipment and mine shaft lining formwork conditions. At present, a short section excavation and lining combined operation construction method with an excavation and lining normal circulation was fully conducted. The average mine shaft completed speed was over 80 m per month. A technology and equipment research and development of mine shaft excavator, a research and development on the shaft sinking equipment of the large diameter mine deep shaft, the key technology and equipment of the excavation, lining and installation operation for the 1 000 m deep mine shaft and the research orientation were provided. Meanwhile, a prospect was conducted on the development tendency of shaft sinking technology for future deep mine shaft.

Key words: mine shaft sinking technology; construction equipment; mine shaft excavator; shaft

0 引 言

立(竖)井是矿山开采的一种主要开拓方式,近年来在新建矿井约占开工矿井总数的45%。随着新区建设和矿山开采向深部发展,立井开拓方式的比例还会增大。立井井筒工程施工技术复杂,作业

场所狭窄,工作环境恶劣,而且经常会受到地质情况变化,如井下涌水、煤层瓦斯突出、地热等自然条件的影响,威胁安全施工。因而,其工程量虽仅占全矿井井巷工程量的6%左右,但其建设工期通常占全矿井建设总工期的40%以上。1974年开始的煤炭部、冶金部、一机部三部立井施工机械化配套科研攻

收稿日期: 2015-04-27; 责任编辑: 赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2015.08.003

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAB33B04); 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA06A402-04)

作者简介: 肖瑞玲(1962—),女,北京人,高级工程师。E-mail: 2670795878@qq.com

引用格式: 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.

关 经过 12 年 取得了近百项科研成果。1983 年又开始短段掘砌混合作业的立井施工机械化配套综合试验 进一步充实和提高了凿井机械化水平 改进了工艺 使我国凿井技术又上了一个台阶。1992 年短段掘砌混合作业法被列入煤炭工业 100 项新技术推广项目之中 在全国基建单位逐步推广使用^[1]。煤炭工业部“九五”期间煤炭工业 100 项新技术重点推广项目中 纳入了改进的配套施工设备。“十一五”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”对 4.2 m 段高掘砌正规循环作业及其配套施工设备工业性试验进行研究^[2] 包括全液压凿岩钻架技术、液压迈步式模板技术、1 m³ 液压抓岩机技术、5 m 深孔控制爆破技术等关键技术 全面推行一掘一砌正规循环的短段掘砌混合作业施工方法。采用 4~5 m 深孔钻爆 0.6~1.0 m³ 大抓斗抓岩机 4~5 m³ 吊桶出岩; 4.2 m 整体移动金属模板 月平均成井速度达 80 m 以上。随着现代化矿山生产技术的进步 安全高效矿井的建设 必须进行凿井技术研究和开发 以便加快立(竖)井井筒工程的建设速度。

1 凿井技术发展过程

1.1 1949—1973 年立井井筒施工技术初步发展

1949—1973 年 我国立井井筒施工采用人工手持式气动凿岩机、0.11 m³ 的小抓斗、容积 1.0~1.5 m³ 吊桶、提升机滚筒直径小于 2.5 m、木制井架和轻型金属井架、悬吊能力 16 t 以下的凿井绞车、扬程 250 m 吊泵等小型设备 工效低、速度慢。我国最早采用的施工方式是单行作业 随着新建矿井井型的加大和井筒的加深 开始采用掘砌平行作业 如 1953 年 阜新平安主井采用此工艺 取得了月成井 80.56 m 的成绩。1958 年 徐州权台主井采用掘砌单行作业 取得了月成井 160.92 m 的成绩。同年 鹤壁梁峪副井施工时 还曾采用过掘、砌、安一次成井 达到月成井 91.43 m 的成绩。1966 年 4 月 水城老鹰山副井 采用掘砌平行作业、柔性掩护筒 取得了月成井 105.4 m 的成绩。1970 年 1—9 月 沈阳红阳二号主井采用掘砌平行作业 连续 3 个月达到月成井 100 m 以上。20 世纪 70 年代以后 有些立井采用了锚喷作永久支护。1973 年 7 月 湖南涟邵桥头河二号主井采用短段掘喷混合作业 创月成井 174.82 m 的新纪录。

1.2 1974—1982 年立井机械化配套科攻关

1974 年经煤炭部、冶金部、一机部三部立井施工机械化配套科研攻关 一方面进行凿井设备的更新换代 填补空白; 另一方面改进工艺 使机械化与工艺配套 并考虑了有关的辅助作业系统。煤炭工业系统先后在 30 多个立井组织凿井机械化配套设备施工试点 有 20 多次月进度突破了 100 m 改变了立井掘进的技术面貌 加快了施工进度 据 1982 年上半年调查 用机械化配套设备施工的 11 个井筒 比非配套设备施工的 13 个井筒的平均月进度加快了 43.4%。煤炭部、冶金部、一机部组织有关科研、设计、高校、施工企业、机械制造厂等 140 多个单位 历时 12 年 耗资近 4 000 万元 取得了近百项科研成果 为我国凿井技术的现代化奠定了初步基础。

1.3 1983—1990 年立井短段掘砌混合作业施工设备

“六五”期间完成了国家科技攻关项目“立井短段掘砌混合作业法及其配套施工设备的研究”^[3]。该项目通过合理选择掘砌段高、深孔爆破工艺参数及选择凿井井架、提升、凿岩、抓岩、砌壁等工艺设备的配套设计 于 1988 年在河南平顶山矿务局六矿进风井成功地验证了一掘一砌的短段掘砌混合作业法是立井施工作业方式的优选方案。煤炭科学研究总院北京建井研究所与平顶山建井三处合作在进风立井进行“立井深孔爆破、短段掘砌混合作业法及其机械化施工综合配套设备”的研究和试验获得成功 历时 91 天 成井 121.1 m 后在全国推广应用。“七五”期间 完成了设备井内吊挂技术的研究。该项目的研究成功 使井下送风管、进排水管、通信、照明、放炮电缆等吊挂于井壁 不仅减轻了井架负荷 大量减少地面稳车及钢丝绳数量 而且为凿井掘进、支护、运输等主要工序提供了可高效作业的空间。

1.4 1991—2005 年立井机械化施工配套设备

1992 年短段掘砌混合作业法在全国基建单位逐步推广使用^[4]。煤炭工业部“九五”期间将经过改进的配套施工设备纳入 中煤建设集团工程有限公司和煤炭科学研究总院北京建井研究所共同完成了立井井筒快速施工技术的完善和推广应用。以立井井筒机械化快速施工综合配套为技术核心 系统优化了以大提升机、大模板、大抓岩机、大吊桶及伞钻深孔光面爆破为核心的立井施工技术 总结出了《立井冻结表土机械化快速施工工法》《立井机械化快速施工工法》。煤炭科学研究总院北京建井研究

所相继研制了DTQ型系列通用抓斗、YJM型系列多用模板、HZ-6C型中心回转抓岩机、QH型混凝土分料器、ZNQ型气动高频振捣器、LBM型模板固定式凿岩钻架^[5]、BQ型气动潜水泵、QF型除水分风器以及即将研究成功的多功能遥控抓岩机和井下对中找正仪共10种新设备,为形成我国立井凿井短段掘砌混合作业法的机械化配套设备奠定了可靠的物质基础。

1.5 2006—2015年千米深井凿井技术^[3]

进入21世纪需要利用既有技术装备施工掘进直径9.0~15.0 m,掘进深度800~1 200 m的立井井筒时,施工速度骤降,施工工期陡增,使得超大直径深立井的施工技术经济指标过高,针对上述系列难题,开展了“十一五”国家科技支撑计划课题“千米级深井基岩快速掘砌关键技术及装备研究”,中煤能源集团重大计划立项“超大直径深立井建井关键技术与成套装备”等项目研究。以掘进直径9.0~15.0 m,掘进深度800~1 200 m,整体掘进速度100 m/月的立井井筒施工技术与装备为目标,以深立井地压、冻结壁计算理论为基础,以井筒安全与效益协调理论为指导,以大型施工装备研发为重点,以关键施工技术创新为保障,以适合超大直径深立井井筒施工的装备、技术与组织管理集成体系的创立为核心,采用理论分析、数值模拟、模型试验、现场实测、工程实践等多种方法和手段进行综合研究。

随着井筒直径和深度的增大,井筒施工设备的布置范围增大,凿井井架悬吊的施工荷载也在增大,我国已有的5个系列6个型号的凿井井架已不能满足深大立井施工的需要,深大立井井筒施工所需的大型凿井井架必须具有合理的结构尺寸和更大的承载能力。深立井施工凿井吊盘采用井壁吊挂技术,其吊盘的井壁安全吊挂和迈步移动升降是实现井筒施工工艺的前提,研制开发全液压控制的迈步吊盘设备^[6]并实现工程应用,可使深立井施工技术得以提升和发展。

研制了一套新型提升系统,主要包括:新型的6、7、8 m³座钩式吊桶,G13~25 t密封旋转钩头装置,新型JKZ-5×3.1、2JKZ-5×2.65超深立井凿井提升机、φ3.5/4.0 m提升天轮,液压履带式装岩、清底机。为提高抓岩清底和抓岩效率,确定抓斗斗容为0.25 m³,实际清底抓岩能力为20 m³/h。

2 立井施工工艺和设备现状

2.1 立井施工工艺

目前,国内以3.0~3.5 m段高为主掘砌正规循环作业。4~5 m段高掘砌正规循环作业及其配套施工设备,采用取消临时支护的短段掘砌及与之相配套的伞形钻架、大型抓岩机、整体移动金属模板等成套工艺及技术参数,提高立井掘进效率,加快我国立井凿井速度。全面推行一掘一砌正规循环的短段掘砌混合作业施工方法。用4~5 m深孔钻爆法快速掘进;用0.6~1.0 m³大抓斗抓岩机,配4~5 m³吊桶高效出岩;用3.6~4.2 m整体移动金属模板,并辅以井内其他大型设备进行快速施工。在涌水量小于10 m³/h条件下,使平均成井速度达80 m/月以上。

2.2 井筒地层综合治水

综合治理井下涌水,在不稳定的含水层采用冻结凿井法,在煤矿建设实践中显示了明显的优势,又可用于基岩含水层立井施工。基岩含水层可采用地面预注浆、工作面预注浆和壁后注浆技术^[7]。近年研发的综合注浆法、注浆专用钻机、注浆泵、群孔钻进技术^[8]、少孔高压注浆以及工作面快速预注浆技术,都取得了突出效果。

2.3 施工组织管理

为了促进机械化配套,发挥机械化优势,许多施工单位改进了施工管理,取得了较好效果。施工组织管理的核心是坚持正规循环作业,因此,制定和实施循环作业时,要考虑机械配备、人力因素、地质条件、安全、质量、用正规循环作业保进度、保质量、保安全。在劳动组织上,地面三班作业,井下4班作业,组织专业打眼、排矸、砌壁专业组,执行工种岗位责任制;在机械使用维护上将主要凿井设备,如伞钻、抓岩机、吊泵等实行包机制和定期检修制;工程质量全面质量管理制,安全生产落实到班组;劳动报酬的合理化等,都是行之有效的制度,也都发挥了重要作用。

2.4 提升系统^[9]

2套提升系统,一主一辅,保证有足够的矸石提升能力,满足快速施工要求。目前有JK2.5/20、JKZ2.8/15.5、2JKZ3.0/15.5、2JKZ3.2/13.32、新型JKZ-5×3.1和2JKZ-5×2.65超深立井凿井提升机等6种凿井提升机可选用,当吊桶为2 m³、井筒深度400~600 m时,单钩可选用JK-2.5/20、2JK-3/

20型提升机;双钩可选2JK-2.5/20、2JK-3/20型提升机;当吊桶为 3 m^3 、井筒深度600~800 m时,单钩可选JKZ-2.8/15.5、2JK-3.5/20、2JK-3.5/15.5型提升机;双钩可选2JK-3/20、2JK-3/15.5、2JKZ-3/15.5型提升机;当吊桶为 4 m^3 、井筒深度800~1 000 m时,JK型新系列提升机已不能适应,只能选用JKZ型矿井凿井提升机,单钩可选JKZ-2.8/15.5型提升机,双钩可选2JKZ-3/15.5、2JKZ-3.6/13.4型提升机。与提升系统配套的还有新IV型和V型凿井井架,可满足伞架进出、上下井、座钩翻矸装置和矸石仓漏斗布置要求。此外还有7、9、11 t钩头, G13、15、18、21、25 t新型提升钩头装置和2、3、4、5、6、7、8 m^3 座钩式吊桶可选用。

2.5 稳车悬吊

凿井绞车用于悬吊吊盘、吊泵、安全梯及管路缆线等凿井设备和拉紧稳绳。凿井绞车分为单卷筒和双卷筒2种,前者用于单绳悬吊,后者用于双绳起吊。现有5、10、16、25、40 t等规格的单双筒和缠绕、摩擦2种结构的系列稳车。采用双绳悬吊的设备也可用2台单卷筒凿井绞车来悬吊。凿井绞车有55型和JZ型2种,后者又有改进型JZ2型和摩擦传动型JZM型等系列。凿井绞车所允许的钢丝绳最大静张力为392 kN,卷筒的容绳量为400~1 000 m。凿井绞车的能力是根据允许的钢丝绳最大静张力来标定的,因此在选凿井绞车时,除了考虑设备的悬吊方式外,应使悬吊的终端荷载与钢丝绳自重之和不超过凿井绞车的最大静张力值,选用绞车的容绳量应大于悬吊深度^[10]。

2.6 打眼爆破

1975—1976年我国研制出第1台FJD6型伞形钻架,并在陶二矿主井进行工业性试验,而后又研制并鉴定了FJD9、FJD6.7、FJD6A、FJD9A,初步形成了我国伞形钻架的系列产品。20世纪70年代后期又从日本引进一批4、6臂伞钻,80年代日本、西德在中国承包工程中又带来2台钻架。SJDY4-8新型液压凿岩伞钻,采用电动-液压驱动形式和导轨式液压凿岩机,提高了凿岩效率,使凿孔深度增为5 m。

2.7 装岩设备

0.4、0.6 m^3 的大型抓岩机虽有4种结构、7种规格的产品,但是为提高抓岩效率和改善井下工人劳动条件,研制了立井凿井液压中心回转式抓岩机,将抓斗容积增加为 1 m^3 ,抓岩能力增加为 $60\text{ m}^3/\text{h}$,机组动力由气压驱动改为液压驱动形式。大型 1

m^3 立井凿井液压中心回转式抓岩机经过地面和井下施工试验证明,实际抓岩生产能力可达 $80\text{ m}^3/\text{h}$ 以上。

2.8 砌壁模板^[11]

MJY系列多用金属模板,模板在圆周上只设1个伸缩搭接缝,靠1组伸缩液压缸将整个模板主体直径变小或变大,从而实现脱模、立模。而且还可根据施工要求,组成直径4.5~12.5 m,高度2.5~6.0 m,刃脚高0.2~0.3 m等50多种不同规格的模板,一模三用^[12]。2.4、3.0、3.6、4.0 m^3 底卸吊桶下料,井下混凝土分料器、振捣器等配套,更利于提高砌壁质量和效率。

“十一五”国家科技支撑计划项目将原来气动抓岩、气动打眼、稳车悬吊模板的方式改为液压抓岩机快速抓岩、液压伞钻快速打眼、模板迈步自行悬吊的新工艺。上述设备及相关工序共用1套液压动力系统,取消了原压缩空气动力系统,简化了井筒施工设备布置,省去了稳车等设备。另外,使用新型设备能有效降低施工噪声和粉尘,从根本上改善了井下工人的施工环境,有效降低了能耗和施工成本。本课题还攻克了全液压凿岩钻架技术、液压迈步式模板技术、 1 m^3 液压抓岩机技术、5 m深孔控制爆破技术等关键技术。

3 立井凿井施工技术发展趋势

目前井深超过700 m的井筒已占1/2以上,其中有近20个千米深井井筒,利用短段掘砌混合作业法为基础的深井机械化凿井,已成为深井凿井施工发展的基本趋势^[13]。

3.1 竖井掘进机技术及装备研究^[14]

竖井掘进机破岩钻井是凿井技术的发展方向。采用全断面或部分断面掘进机,利用导孔出渣的下排渣和利用液力出渣的上排渣,可以大幅减少井下作业人员,加快凿井速度,缩短工期,降低成本。一次成井的工艺和技术有2类,一类是利用反井钻机钻进导井作为溜矸孔,机械化快速刷大井筒,并进行相应支护。另一类是直接机械化破岩掘进,排除岩石,并进行支护。立井掘进机系统可以实现掘进破岩、排矸、安装井壁同时作业,互不干扰,因此机械化凿井的比例会有较大增长。

3.2 大直径深立井井筒(10~12 m)凿井设备研制

研究满足1 500~2 000 m深井的大型凿井提升机,提升力达到410 kN。大直径双联液压凿岩钻

架,用于井筒工作面的电液挖掘机;开发了挖掘机与双中心回转抓岩机“三机”配合装岩清底技术;在全行业,首次实现了装岩、清底工艺的完全机械化;作业人员减少50%以上,效率提高30%以上。以上工作完成后就可以开始钻孔工作。钻孔工作结束后,断开两钻架之间的连接,顺序吊离井下。完成上述研究可实现掘砌循环作业,形成一套新的大直径深立井井筒掘砌混合作业法及配套装备,填补我国在大直径深立井井筒施工中大型设备的空白,提高我国大型矿井建设速度和技术水平。

3.3 千米深井掘、砌、安施工关键技术及装备

目前国内千米深井悬吊大、提升能力小、气动凿岩机等设备耗能大等,使现有施工技术遇到瓶颈。以千米深井为研究对象,开展掘、砌、安施工关键技术及装备的研究,构建适合千米深井掘、砌、安一次成井施工工艺,管路井壁吊挂及新型模板技术,研制5 m大型提升机及配套挖掘清底机等设备是未来深井施工技术研究的重点^[15]。

3.4 低能耗深井凿井新装备

“三液联动”新工艺特点如下^[16-17]:在吊盘安装一液压泵站,液压伞钻、液压中心回转式抓岩机通过液压泵站提供动力驱动^[18],液压伞钻打眼,液压中心回转式抓岩机出矸^[17],液压迈步式吊盘由泵站提供动力,推动迈步油缸使迈步环和悬吊环交替运动,起到吊盘的目的,靠井壁支撑悬挂、自行调平找正和液压迈步移动。液压泵站的安装,减少了压风机房、压风管路、模板稳车的安设,满足千米深立井快速施工减少设备布置的要求^[18]。

4 结 语

总结了自1949年至今,我国井筒施工技术经历的4个发展阶段,全面介绍了立井施工机械化及其配套施工设备,目前,我国立井施工实现了机械化、大型化,从提升系统、稳车悬吊、打眼爆破、装岩设备和砌壁模板方面实现综合配套,伞钻、抓岩机、模板实现一套液压系统综合控制。同时提出研制竖井掘进机技术与装备,以及不同类型竖井掘进机械破岩钻井技术是凿井技术发展方向。

参考文献:

- [1] 龙志阳,陆伦.立井井筒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 con-

struction technique of vertical shaft[J]. Coal Science and Technology, 1999, 27(3): 35-38.

- [2] 龙志阳,桂良玉.千米深井凿井技术研究[J].建井技术,2011,32(1/2):15-20.
Long Zhiyang, Gui Liangyu. Research on mine shaft sinking technology for 1000m depth mine shaft[J]. Mine Construction Technology, 2011, 32(1/2): 15-20.
- [3] 龙志阳.立井短段掘砌混合作业法及其配套施工设备[J].建井技术,1998(3):1-6.
Long Zhiyang. Short sectional excavation and lining combined operation and related construction equipment for mine shaft sinking[J]. Mine Construction Technology, 1998(3): 1-6.
- [4] 龙志阳.立井混合作业法的发展及应用[C]//立井井筒施工技术.北京:煤炭工业出版社,1999:18-23.
- [5] 李俊良,龙志阳,杨春满,等.模板固定式凿岩钻架[J].煤炭科学技术,1997,25(8):9-11.
Li Junliang, Long Zhiyang, Yang Chunman, et al. Form plate fixed type sinking rock drill jumbo[J]. Coal Science and Technology, 1997, 25(8): 9-11.
- [6] 刘杰,王志强,邱天德,等.液压整体迈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 study on hydraulic completed walking type mine shaft sinking stage[J]. Mine Construction Technology, 2013, 34(3): 27-30.
- [7] 肖瑞玲.潜孔钻机在工作面预注浆工程中的应用[C].北京:煤炭工业出版社,1999:307-311.
- [8] 刘敏,肖瑞玲.定向钻进技术在注浆工程中的应用[C].徐州:中国矿业大学出版社,2005:375-380.
- [9] 龙志阳.中国煤矿井巷施工技术现状[J].中国煤炭,2001(1):13-17.
Long Zhiyang. Technical status-quo of shaft-sinking and drifting in China's coal mines[J]. China Coal, 2001(1): 13-17.
- [10] 龙志阳.立井凿井设备发展现状与展望[C].徐州:中国矿业大学出版社,2004:48-53.
- [11] 龙志阳.立井筑壁模板现状与发展[J].建井技术,1999(3):1-5.
Long Zhiyang. Status and development of platform for mine shaft lining[J]. Mine Construction Technology, 1999(3): 1-5.
- [12] 龙志阳,李俊良,胡敬东,等.立井MJY型系列多用金属模板[J].煤炭科学技术,1995,23(6):19-22.
Long Zhiyang, Li Junliang, Hu Jingdong, et al. MJY Series multi-purpose metal mould for shaft construction[J]. Coal Science and Technology, 1995, 23(6): 19-22.
- [13] 龙志阳.千米深井凿井技术现状及发展新动向[C].徐州:中国矿业大学出版社,2009:30-41.
- [14] 刘志强.快速建井技术装备现状及发展方向[J].建井技术,2014,35(S1):1-6.
Liu Zhiqiang. Present status and the development orientation of rapid mine construction technology and equipment[J]. Mine Construction Technology, 2014, 35(S1): 1-6.

- 究[J].岩石力学与工程学报,2010,27(2):143-148.
- Gou Panfeng, Wei Sijiang, Zhangsheng. Simulation of the stability of the roadway by different levels of stress [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 27(2): 143-148.
- [2] 王红胜, 李树刚, 张新志, 等. 沿空巷道基本顶断裂结构影响窄煤柱稳定性分析[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(2): 19-22.
- Wang Hongsheng, Li Shugang, Zhang Xinzhong, et al. The analysis of the stability of the coal pillar influenced the narrow coal pillar along the basic roof of the empty tunnel [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(2): 19-22.
- [3] 孙玉福. 水平应力对巷道围岩稳定性的影响[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 891-896.
- Sun Yufu. Influence of Horizontal stress on stability of surrounding rock of roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 891-896.
- [4] Fang Shulin, Zhang Jian. In-situ measure to internal stress of shotcrete layer in soft-rock roadway [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 321-328.
- [5] Kang Hongpu. Support technologies for deep and complex roadways in underground coal mines: a review [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 261-277.
- [6] 岳拥军, 王丽. 大埋深高应力条件下煤层巷道注浆加固技术[J]. 煤炭技术, 2010, 29(9): 131-132.
- Yue Yongjun, Wang Li. Grouting reinforcement technology of coal seam under high stress condition [J]. Coal Technology, 2010, 29(9): 131-132.
- [7] Zheng Jiangtao, Ju Yang, Zhao Xi. Influence of pore structures on the mechanical behavior of low-permeability sandstones: numerical reconstruction and analysis [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 329-337.
- [8] 臧龙, 谢文兵, 荆升国, 等. 孤岛煤柱下破碎软岩巷道支护技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(3): 8-11, 16.
- Zang Long, Xie Wenbing, Jing Shengguo, et al. Research on supporting technology of broken soft rock roadway under isolated island coal pillar [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(3): 8-11, 16.
- [9] 孙晓明, 郭志彪, 蔡峰. 深部泵房硐室群破坏原因及控制对策研究[J]. 煤炭工程, 2009(5): 28-30.
- Sun Xiaoming, Guo Zhibiao, Cai Feng. Damage Reasons and Control Countermeasures of deep pump houses [J]. Coal Engineering, 2009(5): 28-30.
- [10] 林惠立, 石永奎. 深部构造复杂区大断面硐室群围岩稳定性模拟分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1619-1623.
- Lin Huili, Shi Yongkui. Simulation on stability of surrounding rock of large section chambers in deep structural complex areas [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1619-1623.
- [11] 孙闯, 张向东, 张建俊. 深部断层破碎带竖井围岩与支护系统稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 587-594.
- Sun Chuang, Zhang Xiangdong, Zhang Jianjun. Stability analysis of vertical shaft surrounding rock and supporting system in deep fault fracture [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 587-594.
- [12] 冯志强, 康红普, 杨景贺. 裂隙岩体注浆技术探讨[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(4): 63-66.
- Feng Zhiqiang, Kang Hongpu, Yang Jinghe. Discussion on grouting technology for crack rock mass [J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(4): 63-66.
- [13] 陆士良, 汤雷, 杨新安. 锚杆锚固力与锚固技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998: 102.
- [14] 王悦汉, 陆士良. 壁后充填对提高巷道支护阻力的研究[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(4): 1-3.
- Wang Yuehan, Lu Shiliang. Research on the Effect of Roadway Backfilling on the Raise of Support Resistance [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1997, 26(4): 1-3.
- [15] 宗义江, 韩立军, 郝建明. 极破碎软岩巷道失稳机理与动态迭加耦合支护技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 355-362.
- Zong Yijiang, Han Lijun, Gao Jianming. Instability mechanisms and dynamic superposition coupling support in extremely fractured and soft rock roadway [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(3): 355-362.

(上接17页)

- [15] 赵明祥, 龙志阳, 杨永军. 千米立井井筒与井塔平行施工技术[J]. 建井技术, 2014, 35(1): 22-27.
- Zhao Mingxiang, Long Zhiyang, Yang Yongjun. Parallel construction technology of mine shaft sinking and mine shaft head frame in 1000m depth mine shaft [J]. Mine Construction Technology, 2014, 35(1): 22-27.
- [16] 龙志阳. 低能耗深井凿井新装备[C]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010: 290-296.
- [17] 王雨寒, 龙志阳. 千米深井“三液联动”掘砌新装备的研制[J]. 建井技术, 2011, 32(1/2): 29-31.
- Wang Yuhuan, Long Zhiyang. Research and development on new equipment of “three hydraulic linking” heading and lining in 1000m depth mine shaft [J]. Mine Construction Technology, 2011, 32(1/2): 29-31.
- [18] 吴远迪, 龙志阳, 周志鸿, 等. 液压抓岩机回转运动机液耦合仿真分析[J]. 工程机械, 2011, 42(1): 35-38.
- Wu Yuandi, Long Zhiyang, Zhou Zhihong, et al. Simulation analysis to hydro-mechanical coupling of rotation movement of a grab loader [J]. Construction Machinery and Equipment, 2011, 42(1): 35-38.
- [19] 吴远迪, 龙志阳, 周志鸿. 抓岩机吊臂动力学分析[J]. 工程机械, 2010, 41(7): 19-22.
- Wu Yuandi, Long Zhiyang, Zhou Zhihong. Dynamic analysis for hanging boom of a grab loader [J]. Construction Machinery and Equipment, 2010, 41(7): 19-22.
- [20] 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(1): 26-28.
- Wang Pengyue, Zhang Xiaomei, Long Zhiyang, et al. Study on rapid excavation and lining construction technique for base rock section in 1000m depth mine shaft [J]. Mine Construction Technology, 2011, 32(1): 26-28.