

我国煤矿综采装备技术的主要进展和发展趋势

任怀伟

(天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013)

摘 要 综采装备是实现煤炭高效、安全开采的基础保障。通过国家重大项目的实施, 国产综采装备取得了多项重大成果, 由原来的大型装备完全依赖进口到实现整机国产化, 国产采煤机、液压支架、刮板输送机、胶带输送机以及电液控制系统在产品性能、质量等方面基本满足了煤炭行业高速发展的装备需求。然而在核心技术方面, 系统可靠性、驱动技术和智能化仍是国产装备的短板, 急需进一步攻关。当前, 大功率、小体积、高性能、易控制、智能化已成为国际煤机装备的发展趋势, 也是国产装备发展的方向和目标。今后 5~10a, 突破和掌握核心技术、提升关键零部件性能、自主生产成套高端煤机装备是最为重要的奋斗目标。

关键词 综采装备; 系统可靠性; 驱动技术; 智能化

中图分类号 TD823.97 **文献标识码** A **文章编号** 1006-6225 (2014) 06-0011-06

Major Process and Development Tendency of Full-mechanized Mining Equipments in China

REN Huai-wei

(Coal Mining & Designing Department, Tiandi Science & Technology CO., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: Full-mechanized mining equipments is basic condition of realizing high-efficiency and safe mining of coal. Domestic full-mechanized mining equipments have obtained multiple important fruits by enforcing major projects of state level. Whole machine localization has been realized from former entirely import of large scale equipments. Products performance and quality of domestic coal cutter, powered support, scrape and belt conveyor can basically meet the requirement of high-speed development of coal industry. But for core technology, system reliability, driving technology and intelligence is still short slab of domestic equipments which need further breakthrough. At present, large power, small volume, high performance, easy control and intelligence have become development tendency of international coal equipments and is domestic equipments' development tendency and goals. In future 5~10a, breakthrough and mastering of core technology, key components performance improvement and independent production of whole set of high-level coal equipment are the most important goals.

Keywords: full-mechanized mining equipment; system reliability; driving technology; intelligence

在国家高科技发展计划(863计划)、智能制造装备发展专项等国家项目的大力支持下, 经过不断地摸索、引进消化和创新, 2009年以来国产煤机装备取得了多项重大成果, 由原来的大型装备完全依赖进口到整机国产化, 实现了质的飞跃。这些成果包括国家“十一五”科技支撑计划“年产600万吨综采成套技术与装备”、“年产千万吨级矿井大采高综采成套装备及关键技术”、“特厚煤层大采高综放开采成套技术与装备”, 中央国有资本重大技术创新项目“7m超大采高综采成套技术与装备研发”以及国家智能制造专项“煤炭综采成套装备智能系统”等。这些成果在开采工艺、材料、装备能力、控制系统等方面取得了全面进步, 使我国煤炭

工业向高效、安全、集约化方向前进了一大步。

但与此同时, 仍然不能回避国产装备在材料、加工工艺、关键控制元部件、整机可靠性和寿命、动力系统等几方面与国外先进水平存在的差距。核心技术掌握不够, 原始创新少, 产品仍然是大而全, 没有做到细而精, 产品附加值不高, 市场竞争力不强。在即将展开的“十三五”科技攻关中, 在研发新的大型综采装备的同时, 突破关键核心技术、提高关键零部件性能将是煤机行业最为重要的任务。

1 综采装备技术现状和研究进展

1.1 电牵引采煤机

收稿日期 2014-07-14

DOI 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2014.06.003

基金项目 国家高技术研究发展计划(863计划): 两柱式放顶煤液压支架研制(2012AA06A407); 山东省自主创新专项: 煤矿综采智能化成套装备关键技术及产业化(2013CXB40203)

作者简介 任怀伟(1980-), 男, 河北廊坊人, 副研究员, 从事液压支架计算机辅助设计、结构分析及优化等方面的研究。

引用格式 任怀伟. 我国煤矿综采装备技术的主要进展和发展趋势[J]. 煤矿开采, 2014, 19(6): 11-16.

采煤机是综采工作面的核心装备,是集机械、电气和液压为一体的大型复杂系统^[1]。在采煤过程中连续、长时间运行,工作环境恶劣,对其可靠性、稳定性、抗冲击震动、寿命等要求都非常苛刻。

我国从上世纪 80 年代后期开始研究交流电牵引采煤机,90 年代初期研制成功样机。随后 10a 的攻关研究主要集中在交流电牵引采煤机的系列设计、控制系统及控制功能的开发上。国内产品功率小、采高低、可靠性差,整体水平与国外产品相比差距明显。2005 年,煤炭科学研究总院、天地科技股份有限公司和神华集团共同提出了“年产 600 万吨综采成套装备研制”项目,研制出了当时国内最为先进的 MG750/1815 - GWD 型大功率电牵引采煤机^[2](图 1)。装机功率 1815kW,最大生产能力 3000t/h;研制了适应重载冲击、高效动力传输的高强度摆动式传动系统;创新采用 147mm 节距、承载力达 1000kN 的高强度“齿-销”传动系统,大大提高了采煤机的使用寿命;采用多 DSP 控制器分布式采煤机电控系统和先导芯线载波通讯技术,大大提高了采煤机的可控性^[3]。



图 1 MG750/1815 - GWD 型采煤机

该机在神华集团金峰分公司昌汉沟煤矿创造出月产 1.0805Mt,最高日产 46200t,连续 3 个月平均月产达到 962300t 的国产综采机组全国最高记录。

2010 年,在“十一五”科技支撑计划“年产千万吨级矿井大采高综采成套装备及关键技术”项目的支持下,太原矿山机器集团有限公司研制了 MG1000/2500 - WD 电牵引采煤机(图 2),最大采高达到 6.3m,牵引速度达到 25m/min,牵引力 1165kN,生产能力达到 3500t/h。此外,鸡西煤矿机械有限公司研制成功了 MG800/2040 - WD 型电牵引采煤机;西安煤矿机械厂研制成功了 MG900/2210 - WD 型交流电牵引采煤机。这些新研制开发的大采高综采装备在技术参数上已经接近和达到了国外先进水平。在摇臂自动调高、运行状态监测和自诊断、牵引部截割部大功率传动、重载齿轮传动件制造工艺等方面取得一定突破。但限于目前制

造水平和国内高强度优质材料供应等基础条件,与 Eickhoff 和 JOY 等国外公司先进产品相比在截割能力、零件耐磨性、系统可靠性和控制功能上仍有较大差距。鸡西煤机在被 JOY 收购后,引进了壳体、齿轮加工技术和电控箱等,关键部件的可靠性和寿命增加 2~4 倍,可见我国在工艺和材料性能方面的差距。



图 2 MG1000/2500 - WD 电牵引采煤机

目前,JOY 的 7LS 系列和 Eickhoff 的 SL 系列占据着采煤机高端市场,最大装机功率近 3000kW,最大牵引速度达到 30m/min 以上,最大开采高度达到 7m,设备生产能力达到了 5000t/h 以上。

1.2 强力液压支架

我国从上世纪 80 年代初开始研究引进液压支架,随后发展出了两柱掩护式、四柱放顶煤支架等各种架型。2000 年以前,大型高效矿井所使用的高端液压支架几乎全部依赖进口^[4]。国内只能生产以 16Mn, Q235 为材料的低工作阻力液压支架,设计手段、焊接工艺落后。为实现液压支架国产化,在国家科技项目的支持下进行了大力攻关,先后突破了设计技术、材料、电液控制和关键元部件先进制造工艺等关键技术,产品完全替代进口。近年来研制的主要高端液压支架架型包括:

(1) 年产千万吨大采高液压支架 通过“十五”时期的攻关,工作阻力 10000kN 左右的支架普遍采用了 Q460 和 Q550 的高强板。“十一五”期间,在国家科技支撑计划“年产千万吨级矿井大采高综采成套装备及关键技术”项目中,提出了液压支架可靠性设计理念 and 三维动态仿真设计手段;首次开发了整体顶梁二级护帮、微隙准刚性四连杆稳定机构、随动调架防倒装置;开发支架结构用 800MPa 高强度焊接结构钢及焊接工艺,不完全消除应力时效处理工艺;开发等强度设计的 $\phi 360 \sim 400$ mm 大缸径双伸缩立柱;开发研制了新型复合结构带楔型档圈的复合密封圈与聚氨酯复合密封圈,实现了支架设计手段、材料、焊接工艺^[5]的全面提升,性能指标达到了国外同类产品的先进水平

平。设备在山西西山晋兴能源斜沟煤矿 18105 孤岛工作面经受住了极强烈的压力显现, 达到了年产千万吨的生产能力^[4]。

(2) 大采高综放液压支架 普通综放液压支架采高一般都小于 3.5m, 按照 1: 3 的采放比, 只能对高度小于 14m 的煤层一次采全厚。然而, 神东、黄陵、大同等地普遍存在厚度 20m 以上的煤层, 大采高综放开采是唯一途径。为此, 将目前综放工作面割煤高度由 3.5m 加大到 5m, 在符合安全规程的前提下实现 20m 厚煤层工作面采放均衡生产。工作面采高增加, 可为工作面配备大功率后部输送机提供空间, 有利于工作面快速放煤。另外, 也使工作面通风断面加大, 减少瓦斯对工作面生产的影响。因此, 可以进一步提高工作面单产和资源采出率, 减少工作面的安全隐患。

对应研制的 ZF15000/28/52 (图 3) 型四柱大采高放顶煤液压支架工作阻力 15000kN, 采用铰接前梁和高可靠性伸缩梁加二级护帮的结构防止工作面片帮和冒顶。采用了新型双四连杆中通式大空间放顶煤支架稳定机构和扰动式高效放煤机构, 整体材料以 Q690 为主, 并研制了 $\phi 360\text{mm}$ 恒阻抗冲击立柱^[5]。该设备在大同煤矿集团塔山煤矿 8105 工作面进行了工业试验, 工作面设备平均开机率 92.1%, 采出率达到 88.9%, 平均月产超过 0.9Mt, 年产量 10.85Mt。



图 3 ZF15000/28/52 四柱大采高放顶煤工作面液压支架

(3) 7m 超大采高液压支架 普通大采高综采最大采高为 6.3m, 对于神东等地区煤层厚度在 7m 左右且冒放性不好的煤层无法适用, 为解决这类煤层的高效开采问题, 提出了“7m 超大采高综采成套技术与装备”的重大技术攻关课题, 将工作面采高由 6m 提升至 7m。采高增加后会带来一系列难题: 围岩活动加剧, 矿压显现增强, 加剧了对液压支架的冲击; 可引起严重的前端冒落和煤壁片帮; 工作面与巷道形成 2~3m 高度差, 常规逐渐过渡的配套方式造成工作面两端部过渡段顶部三角煤损失和支架偏载加剧, 给安全生产带来诸多问题。因此, 需在开采技术、配套方式、材料升级、制造工艺等方面进行一系列的变革。

项目研制的 ZY18800/32.5/7.2 型超大采高液压支架采用整体顶梁带内伸缩式伸缩梁和三级协助护帮装置、 $\phi 500\text{mm}$ 缸径立柱; 采用 Q890 高强度钢板, 工作阻力达到 18800kN, 支架寿命达到 60000 次工作循环以上^[6], 如图 4 所示。



图 4 ZY18800/32.5/7.2 型超大采高综采液压支架

7m 超大采高综采的提出和实现是开采技术的重大进步, 成果为大型煤炭基地建设、提高资源采出具有重要支撑作用。对发展高端煤机装备并形成战略新兴产业具有重大的推动作用, 为我国从跟踪国外综采装备与技术向引领国际煤机装备发展的转变做出重要贡献。

7m 超大采高成套综采设备于 2011 年 8 月 5 日在红柳林 25202 综采工作面安装, 2011 年 10 月至 12 月在井下进行了 3 个月的工业性试验: 工业性试验期间最高日产 43522t, 平均日产 37470t, 平均月产 1.10Mt, 达到工作面年产 12Mt 生产能力。2012 年 3 月 27 日在神华三道沟煤矿下井, 正常生产工作面日产达 33000t, 月产达到 1Mt。

1.3 刮板输送机

我国于上世纪 70 年代末开始研发、制造输送机, 成功地研制出多系列适应我国国情的综采和综放工作面输送设备。近年来, 国内外输送机都在向大运量、长运距、大功率、高强度、长寿命与高可靠性方向发展^[7]。在国家项目的支持下, 已经成功研制 1200mm 槽宽、装机功率 $3 \times 855\text{kW}$ 刮板机和 1300mm 槽宽、装机功率 525kW 转载机等成套设备; 为神木红柳林矿研制了 SGZ 1400/ (3 × 1500) 刮板输送机, 槽宽 1400mm, 装机功率 $3 \times 1500\text{kW}$; SZZ 1600/700 刮板转载机, 运输能力 5000t/h; PLM 6000 轮式破碎, 破碎能力 6000t/h。

目前, 工作面输送设备产品涵盖工作面刮板输送机、转载机、破碎机等 7 类, 其中, 刮板输送机槽宽 630~1400mm、输送量 450~4500t/h、装机功率 90~ $3 \times 1500\text{kW}$; 转载机槽宽 630~1600mm、输送量 500~5000t/h、装机功率 90~700kW; 破碎机破碎能力 500~6000t/h、装机功率 90~700kW。

提高耐磨材料强度、焊接工艺、设备可靠性和动力系统性能是刮板输送机研制的重点和难点, 也

是当前国内产品和国外先进产品的主要差距所在。国产输送机设备虽然在整体参数上已经接近或达到了国外先进水平,但高端产品的关键材料、零部件和动力系统依然依靠进口。江苏天明机械集团利用进口瑞典 HARDOX 耐磨板、德国 BOEHLER 焊材、BREUER 大功率高压变频电机等研制的高端产品占领神东市场就是一个很好的例子。

为掌握核心技术,近年来国内企业在新材料开发、热处理工艺、圆环链加工、在线监测、软启动、自动控制等方面进行了不断的探索,取得了一定的成绩:张家口煤机与中国矿业大学合作初步研制了国产的阀控液力耦合器^[8],并通过收购前英国 PARSONS 链条公司的主要制链设备和技术,使国产圆环链加工质量和技术得到大幅提升。

总体而言,国产输送机在设备能力、可靠性、材料、工艺等方面仍缺乏核心技术,VOITH, BREUER, HARDOX 等仍占据着各自领域的高端市场,整机与 CATERPILLAR, JOY 相比,可靠性存在差距。

1.4 带式输送机

带式输送机是大型井工煤矿主要的运输装备。随着高产高效矿井的不断发展,“一井一面”年产数千万吨的集约化生产模式不断涌现,对带式的运输能力、可靠性、寿命等提出了越来越高的要求。

目前,国内可伸缩带式输送机的带速可达 4m/s,单机驱动功率达到 1500kW,输送量 5000t/h。研制的 DSJ140/300/3×500+3×500 煤矿井下工作面巷道可伸缩带式输送机,运距 6000m; DTL160/310/4×1850 主斜井胶带机,运距 1790m,倾角 16°,单机功率 1850kW。在整机参数上国内与国外先进水平相差不大,但在驱动系统方面还有较大差距,且监控设备功能少、可靠性较差,托辊寿命短,速度低,旋转阻力大;输送带强度和接头强度低^[9]。

长距离大运量带式输送机由于功率大、距离长且多机驱动,必须采用软起动方式来降低输送机启动张力;特别是多电机驱动时,为减少对电网的冲击,应分时慢速起动;还要控制输送机加速度,解决承载带与驱动带的带速同步问题及输送带浪涌现象,减少对零部件的冲击。由于制造误差及电机特性误差,各驱动点的功率会出现不平衡,可能导致某个电机功率过大引起烧电机事故。因此,各电机之间的功率平衡应加以控制,并提高平衡精度。国内已大量应用调速型液力耦合器来实现输送机的软起动与功率平衡,解决了长距离带式输送机的启动

与功率平衡及同步性问题,但其调节精度及可靠性与国外相比还有一定差距。为提高托辊的生产质量,国内引进了日本最先进的 JRC 全自动托辊生产线,大幅提升了托辊的同轴度、密封性能;有效降低了摩擦系数和运行阻力,提高了使用寿命。

今后,国产带式输送机仍需在整机动态分析监测、软启动、高效储带与张紧、胶带动态控制等核心技术方面进一步攻关,满足煤炭高效生产需求。

1.5 电液控制及工作面自动化系统

我国液压支架电液控制系统研究起步较晚,2008 年以前主要以国外产品为主,包括德国 DBT 公司的 PM4 或 PMC 系统,美国 JOY 的 RS20S 系统,德国 Macro 的 PM32 系统,EEP 的 PEA-matic 系统, TIFENBACH 的 ESG 系统等。2008 年,天玛电液引进消化国外技术,成功研发自主知识产权的“SAC 型液压支架电液控制系统”。该系统采用先进的嵌入式控制技术,使用国际标准的 CAN 总线建立通信系统,采用人机界面分离、驱动电路合一的独特结构,具有抗干扰能力强、性能可靠、使用方便等特点^[10]。该系统填补了国内空白,打破了国外厂商的垄断。随后,郑煤机、四川神坤、平阳广日等均开始研发制造国产电液控制系统并逐渐推广应用。

在工作面自动化方面,2011 年天地科技承担了国家发改委、财政部和工信部组织实施的智能装备制造发展专项——煤炭综采成套装备智能系统。经过 2 年多的攻关,首次建立了以成套装备总控制网络为核心、单机装备为执行机构的综采工作面生产自动化系统;采用自顶向下设计方式,突破传统多单机控制系统集成的控制方式,将现有单机控制网络升级为“系统-设备”两级控制体系,实现层级控制。发明了 500 升电液换向阀组、激光测距仪等多种感知、控制和执行部件,整套系统生产自动化率达到 90%,工作面生产能力达到 12Mt/a。成果在陕煤集团神木红柳林煤矿示范应用,井下正式投入运行 6 个月,产量达到 7.9217Mt。

本项目的成功将我国电液控制及工作面自动化系统的能力和水平又提升到了一个新的水平,大幅缩小了我国煤机装备在自动控制方面与发达国家的差距,有力地推动了煤炭工业的两化融合和现代化矿井建设。

2 综采装备需要突破的关键技术与发展方向

我国综采装备与美国、德国等先进国家的产品相比在材料、工艺、控制、可靠性等方面存在较大

差距。为尽快提升国产装备的水平、提高产品竞争力,即将开展的“十三五”科技攻关中,在研发新型煤机装备的同时,必须下大力气突破关键核心技术、提高关键零部件性能。当前,大功率、小体积、高性能、易控制、智能化已成为国际煤机装备的发展趋势,这也是我国综采装备研究和发展的方向。

2.1 更高的生产能力、更大的功率,体积、重量保持稳定或下降

我国煤炭开发重心向西部转移,厚煤层开采逐渐成为常态。需要研发适合高效集约化生产的大功率、高强度装备,包括 8m 厚煤层综采成套装备、年产 15Mt 特厚煤层综放开采成套装备等。同时,为合理开发资源,薄煤层、大倾角等复杂难采煤层也要应采尽采,对应研发年产 1.5~2.0Mt 薄煤层自动化综采成套技术装备、年产 1.0Mt 以上短壁综采成套技术装备等。

高强度开采对设备的能力、可靠性、耐磨性提出了更高的要求,液压支架寿命 80000 次循环,采煤机截割牵引速度达到 18m/min、大修周期 10Mt 以上,刮板输送机过煤量 15Mt 以上。生产能力提高的同时,设备体积、重量的增加却给生产、运输带来了困难;而薄煤层等复杂难采煤层,作业空间狭小,提升装备生产能力与体积、重量增加的矛盾更加突出。因此,在提升设备能力的同时必须解决设备的可靠性、尺寸、重量等问题。从产品结构入手,突破 8m 超大采高液压支架稳定性控制及可靠性保障技术、大直径滚筒采煤机、有效过煤空间与矮机身协调设计技术、超大伸缩比液压支架等技术和装备;攻克刮板输送机高耐磨中部槽用钢、液压支架用高强度低温焊接结构钢、摇臂新型壳体等新材料,并采用机器人焊接工艺、CAM 加工技术、表面热处理工艺等先进技术制造关键元部件,大幅提高可靠性。

2.2 驱动系统要求更高的性能和效率,易于自动控制

驱动及控制技术是目前国产大型煤机装备最为缺乏的核心技术,刮板输送机上采用的软启动装置几乎全部依靠进口,例如德国福伊特公司的液力耦合器基本垄断了国内市场。因此,研发国产高性能、高效率的装备驱动系统是掌握核心竞争力、打破国外高端煤机装备垄断的关键。

就目前软启动的技术发展趋势而言,虽然液力耦合器、CST 等以机械方式实现软启动的设备可靠性高,但一般体积较大、传动效率较低,且转速、

扭矩等调节控制复杂,因而以变频技术为代表的新型软启动装置以其启动性能好、易于控制、传动效率高的特点逐渐成为驱动系统的发展方向。目前,国内防爆高压变频器和变频电机的研制刚刚开始,应用很少。国外无论是在变频器机芯电路拓扑结构方面,还是在控制策略、变频算法上都比国内先进,而且运行可靠性高。

在驱动电机的技术发展方面,目前应用的大功率三相异步电机仍然存在体积大、与减速器和软启动装置连接导致功率损失等问题。永磁电机是目前效率最高的电机之一,具有体积小、质量轻等一系列优点。永磁电机国内产品绝大多数是轴向电机,而盘型电机相对轴向电机具有更小的体积、更小的质量,更高效、高能量密度的优点。因此,将二者结合的防爆型永磁盘型电机更容易实现发挥出低速大转矩的特点,更容易开发出直驱电机,应用在煤矿的胶带机、刮板机等设备上,省去减速器和耦合器后效率进一步提高,更加节能,是未来电机驱动技术的发展方向。

实现装备驱动系统高性能、高效率、易于自动控制,需突破以下几个关键技术:防爆变频器适应高压要求的多电平电路结构、高启动转矩及高精度控制(DTC,变频器直接转矩控制)、变频器有效散热方式及防爆壳体研制;大功率盘型永磁电机输出特性控制、高精度加工及驱动控制器研制。

2.3 高度智能化、强适应性,能够远程控制

未来煤机装备除安全高效和高可靠性外,高度自动化、适应性强、能远程控制是重要趋势。国内部分矿井已实现了综合自动化,并在智能控制、无人开采等方面进行有益的尝试,取得了部分成果,但是还处于初级阶段。

煤机装备智能化可分为单机系统的智能化和生产系统的智能化。单机系统智能化主要解决设备对外界环境的自主响应和适应性问题,例如采煤机煤岩识别及自动截割、液压支架工况自动耦合等。生产系统智能化主要解决设备间的自动协调和配合问题,例如工作面记忆截割、液压支架跟机自动化推移、基于智能、视频与神经网络的工作面巷道集中控制和地面远程监控等。

我国煤层地质条件复杂,难采煤层高效开采更加依赖装备的信息化和智能化,新的控制模式、技术和装备开发应用是未来一段时间内煤机装备重要的攻关方向。需重点突破工作面无人化综采设备与煤岩耦合作用及自适应控制、采煤机煤岩性状在线识别和安全预警、液压支架自适应耦合控制及群组

支护系统自组织协同控制、井下全天候自动巡检机器人等关键技术和装备,以云计算、物联网、智能控制为核心,打造基础信息数字化、生产过程虚拟化、管理控制一体化、决策处理集成化的数字化矿井平台,实现矿井数据的深度融合与智能决策,最终达到矿井无人化安全生产。

3 结束语

通过国家一系列大型项目的支持,国产采煤机、液压支架、刮板输送机、胶带输送机以及电液控制系统在产品性能、质量等方面基本满足了煤炭行业高速发展的装备需求,为大型现代化矿井建设提供了有力的装备保证。然而,就产品核心技术和原始创新而言,国内企业仍处于落后局面,系统可靠性、驱动技术和智能化是目前最为重要和最急需突破的三项关键技术难题。

当前,煤机市场已经由单纯的“单机制造”转向“成套装备”的竞争。在突破单机设备关键技术的基础上,提高产品彼此之间的配套能力,是体现企业技术优势、提升竞争力的关键。我国能够提供成套大型煤机装备的企业很少,综合技术实力与国外大型煤机企业相比差距还很大。今后 5~10a,掌握核心技术、关键零部件不再受制于人、

实现煤机装备的完全国产化,打造中国自己的高端煤机制造企业是最为重要的奋斗目标。

参考文献

- [1] 葛红兵. 大功率采煤机的应用及技术发展展望 [J]. 煤矿开采, 2010, 15 (1): 4-7.
- [2] 高志明, 张伟. MG750/1815-GWD 系列大功率厚煤层采煤机 [J]. 煤矿开采, 2008, 13 (6): 58-60.
- [3] 王国法. 煤矿高效开采工作面成套装备技术的创新和发展 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38 (1): 63-68.
- [4] 王国法. 大采高技术与大采高液压支架的开发研究 [J]. 煤矿开采, 2009, 14 (1): 1-4.
- [5] 苏林军. 放顶煤液压支架的创新与发展 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39 (4): 84-88.
- [6] 程 骏, 张严敬, 荣和芳. 7m 大采高综采液压支架设计及配套 [J]. 煤矿开采, 2013, 18 (1): 25-27.
- [7] 姜翎燕. 工作面刮板输送机技术现状与发展趋势 [J]. 煤炭科学技术, 2007, 35 (8): 25-27.
- [8] 张德生. 大功率阀控液力偶合器设计理论及关键技术研究 [J]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
- [9] 蒋卫良. 高可靠性带式输送、提升及控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.
- [10] 宁 宇. 液压支架电液控制系统设计研究 [J]. 煤炭学报, 2009, 34 (1): 1-5.
- [11] 曹 拓, 孙 强. 液压支架支柱、千斤顶防腐技术的研究 [J]. 山东煤炭科技, 2009 (10). [责任编辑: 邹正立]

(上接 59 页)

(3) 从理论模型计算、塑性破坏区数值模拟和煤柱的应力数值分析三个方面探讨了沿空掘巷小煤柱宽度,同时结合现场具体的生产地质情况,综合考虑各方面影响因素,最终确定小煤柱的合理宽度为 10m。

(4) 根据成庄矿具体的地质条件及小煤柱沿空掘巷的特点,提出了 4220 副巷围岩控制的对策。同时通过对动压影响下沿空巷道的数值模拟分析,制定了高预应力高强度锚杆索组合支护系统,并确定了相应支护参数。井下试验结果表明巷道服务期间围岩变形控制效果显著,为矿井后续沿空掘巷的使用提供技术依据。

参考文献

- [1] 张 炜, 张东升, 陈建本, 等. 孤岛工作面窄煤柱沿空掘巷围岩变形控制 [J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43 (1): 36-42.
- [2] 李 磊, 柏建彪, 王襄禹, 等. 综放沿空掘巷合理位置及控制技术 [J]. 煤炭学报, 2012, 37 (9): 1564-1569.
- [3] 王德超, 李术才, 王 琦, 等. 深部厚煤层综放沿空掘巷煤

柱合理宽度试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (3): 539-548.

- [4] 华心祝, 刘 淑, 刘增辉, 等. 孤岛工作面沿空掘巷矿压特征研究及工程应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30 (8): 1646-1652.
- [5] 侯朝炯, 李学华. 综放沿空掘巷围岩大、小结构的稳定性原理 [J]. 煤炭学报, 2001, 26 (1): 1-7.
- [6] 刘增辉, 高 谦, 华心祝, 等. 沿空掘巷围岩控制的时效特征 [J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26 (4): 465-469.
- [7] 刘金海, 姜福兴, 王乃国, 等. 深井特厚煤层综放工作面区段煤柱合理宽度研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26 (4): 465-469.
- [8] 郑西贵, 姚志刚, 张 农, 等. 掘采全过程沿空掘巷小煤柱应力分布研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29 (4): 459-465.
- [9] 何富连, 陈建余, 邹喜正, 等. 综放沿空巷道围岩卸压控制研究 [J]. 煤炭学报, 2000, 25 (6): 589-592.
- [10] 康红普, 牛多龙, 张 镇, 等. 深部沿空留巷围岩变形特征与支护技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (10): 1977-1987.
- [11] 柏建彪. 沿空掘巷围岩控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006.
- [12] 陆士良. 锚杆锚固力与锚固技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998.

[责任编辑: 林 健]