

“露天煤矿绿色智能开采技术研究进展”专题

【编者按】露天开采具有资源回采率高、劳动效率高、机械化程度高、安全条件好、生产成本低等优点,美国、澳大利亚、俄罗斯等发达国家煤炭露天开采产量比例达 60% 以上,与我国同为发展中国家的印度煤炭露天开采的产量比例高达 90%。21 世纪以来,我国国民经济快速发展,能源需求持续增长,煤炭产量从 2000 年的 9.98 亿 t 增长到 2018 年的 36.8 亿 t,年均增长 7.5%。我国露天煤矿产量比例从 2000 年的 4% 增长至目前的 18%,已建成千万吨级大型露天煤矿 20 余座,有效地保障了国家能源安全与经济发展。

当今世界,新一轮科技革命蓄势待发,新一代信息技术、生物技术、新材料技术、新能源技术广泛渗透,几乎带动所有领域发生了以绿色、智能为特征的群体性技术革命,加速了传统行业变革的进程,德国提出了“工业 4.0”,美国提出了“智慧地球(Smart Planet)”,中国提出了“中国制造 2025”。智能制造、智能装备、智能生产已成为工业界发展的主流方向。2003 年以来,在确保煤矿安全高效开采和环境效应并重大背景下,露天煤矿的建设进入了快速发展期。露天煤矿开采顺应趋势,推动物联网、云计算、大数据、人工智能、自动控制、移动互联网、机器人化装备等与现代露天采矿技术深度融合,促进全面感知、实时互联、分析决策、自主学习、动态预测、协同控制的智能化矿山建设,进一步有效改善现场作业安全条件,实现无人则安、少人则安,促进露天煤矿增效、降费、减人、节能、减排,消除煤炭开采对环境产生的负效应,实现露天煤矿安全高效绿色开采。为了交流和展示近年来我国在露天开采理论、技术、工艺装备、绿色矿山建设等方面取得的新成果,探讨未来露天煤矿绿色智能化开采发展趋势。本刊组织策划了“露天煤矿绿色智能开采技术研究进展”专题,限于篇幅,刊登学术论文 11 篇,以期促进露天煤矿绿色智能矿山的建设与发展。衷心感谢各位专家学者为专题撰稿与审稿!



移动扫码阅读

李浩荡,余长超,周永利,等.我国露天煤矿开采技术综述及展望[J].煤炭科学技术,2019,47(10):24-35. doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.10.002

LI Haodang, SHE Changchao, ZHOU Yongli, et al. Summary and prospect of open-pit coal mining technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 24-35. doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.10.002

我国露天煤矿开采技术综述及展望

李浩荡¹, 余长超², 周永利³, 黄玉凯⁴

(1. 国家能源投资集团有限责任公司, 北京 100011; 2. 神华北电胜利能源有限公司, 内蒙古 锡林浩特 026000;

3. 神华准能集团有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010300; 4. 神华宝日希勒能源有限公司, 内蒙古 海拉尔 021025)

摘要:改革开放 40 年来,我国露天煤矿开采技术得到快速发展,基于露天煤矿开采技术最新资料和 2019 年国家能源局全国煤矿生产能力公告,从规模、数量、能力、分布以及开发主体等方面归纳了我国露天煤矿发展现状,具有数量少能力大、超大型为主、开发集中度高 3 个特点。从基础理论、开采工艺、装备水平、信息智能、安全生产、生态恢复等 6 个方面露天煤矿先进采矿技术,同时对剥采比、边坡失稳、绿色开采 3 个方面,阐述了现有开采工艺在转向协调开采、运输优化、高效爆破、陡帮端帮开采等方面应用现状,分析了采装、运输等装备研发应用及国产化、大型化技术情况,开发并应用了卡车智能调度、CI-IDS 生产管理、轮胎全寿命管理、疏干智能排水、智能爆破等 6 套信息智能系统,总结了边坡滑坡、运输事故、小煤窑采空区塌陷、水害等 4 大安全风险防控技术,从绿色开发、生态修复、综合整治、采复一体、地貌重建、干雾抑尘等 6 个方面综述了绿色矿山建设技术成果,并结合当前实际,提出我国政策与发展不同步、开采模式相对单一、开采技术发展不平衡、大型关键设备及零配件仍依赖进口、高效露天开采工艺应用较少、恢复生态原貌技术尚不成熟、重大灾害治理技术仍需突破的 7 个问题。最后,对我国露天煤矿高质量发展提出了 5 点新认识:探索露天煤矿一矿多坑、井露联合开发开采新模式,研发吊斗铲、无人卡车、大型破碎机等采剥运破高端智能装备为建设智慧矿山提供支撑,创

收稿日期:2019-06-16;责任编辑:曾康生

作者简介:李浩荡(1981—),男,河北柏乡人,教授级高级工程师。Tel:010-58133127, E-mail:10000338@chnenergy.com.cn

新保障人机安全的安全高效生产新技术,创建全程绿色开采、损伤鉴定、原貌恢复等绿色矿山成套技术体系,同时要建立专业化运营队伍及培养职业开采人员,加快实现我国煤炭产业高质量发展。

关键词:露天煤矿;开采装备;智能化技术;绿色矿山

中图分类号:TD824

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)10-00024-12

Summary and prospect of open-pit coal mining technology in China

LI Haodang¹, SHE Changchao², ZHOU Yongli³, HUANG Yukai⁴

(1. China Energy Investment Group Co., Ltd., Beijing 100011, China; 2. Shenhua Beidian - Shengli Energy Co., Ltd., Xilinhot 026000, China;

3. Shenhua Zhungeer Energy Co., Ltd., Ordos 010300, China; 4. Shenhua Baorixile Energy Co., Ltd., Hailar 021025, China)

Abstract: In the past 40 years of reform and opening up, China's open-pit coal mining technology has developed rapidly. Based on the latest information on China's open-pit coal mining technology and the National Coal Energy Production Capacity Announcement of the National Energy Administration in 2019, the development status of open-pit coal mines in China is summarized from the aspects of scale, quantity, capacity, distribution and development subjects. It is characterized by its small capacity, large size and high development concentration. This paper summarizes the advanced mining technology of open pit mines from six aspects: basic theory, mining technology, equipment level, information intelligence, safety production and ecological restoration. At the same time, the study results of stripping ratio, slope instability and green mining are also described. The current mining technology is applied to the status of new technologies in the areas of coordinated mining, transportation optimization, high-efficiency blasting, and steep-end mining. The development and application of equipment, transportation and other equipment, localization and large-scale technology are analyzed, and the application is developed and applied. A total of 6 sets of information intelligent systems, such as truck intelligent dispatch, CI-IDS Production Management, tire life management, dewatering intelligent drainage, intelligent blasting are developed and four major safety aspects of slope landslide, transportation accident, small coal mine gob collapse, water damage are summed up. From the aspects of green development, ecological restoration, comprehensive remediation, recovery and integration, landform reconstruction, dry fog and dust suppression, the paper summarizes the technical achievements of green mine construction, and combines the current reality to propose seven problems: the policy and development are not synchronized; the mining mode is relatively single; the mining technologies are unbalanced; large-scale key equipment and spare parts still rely on imports; high-efficiency open-pit mining technology is less applied; the technology to restore ecological originality is still immature and the major disaster management technologies still need to break through. Finally, five new understandings have been put forward on the development of high-quality and intelligence of open-pit coal mines in China: exploring multiple pits in open pit mines, developing new models for joint development of underground and open-pit mining, developing mining shovel, unmanned trucks, large crushers, and other high-end intelligent equipment to support the construction of smart mines, innovating to guarantee the safe and efficient production of human-machine safety, creating a complete set of green mining technology systems for green mining, damage identification and original restoration, as well as establishing a professional operation team and training professional mining personnel in order to accelerate the realization of the high-quality development of China's coal industry.

Key words: open pit mine; mining equipment; intelligent technology; green mine

0 引 言

煤炭露天开采是一种开采能力大、建设速度快、劳动效率高、生产成本低、劳动环境优、安全有保证、资源回收率高等为特点的开采方式^[1-2]。因其独特的优势,近百年来世界各国优先发展露天煤矿,致其在开采规模、方法、工艺、技术、装备等方面取得突飞猛进的发展,露天开采已成为美国、印度、印尼、澳大利亚、俄罗斯等世界主要采煤大国(中国除外)主要采煤方式,2018年各产煤国露天煤矿产量占比均超过50%,部分国家达到90%以上^[3-4]。位于美国怀俄明州的世界最大露天煤矿罗切斯特煤矿,采用吊斗铲和单斗-卡车间断工艺,实现单坑年产亿吨煤

炭^[5]。我国露天煤矿发展起步较晚,且适合露天开采的煤炭资源相对较少,据统计^[6]仅占我国煤炭资源总量的10%~15%,集中分布在新疆、内蒙古、山西等区域,整体上我国露天煤矿发展相对较慢。但是,改革开放40年来,我国经济得到快速发展,煤炭需求大幅增加,同时随着国家对煤炭资源勘探程度深入,发现了适合露天开采的整装煤田,以投资少、见效快为特点的露天煤矿快速崛起,开采技术加速发展。尤其是党的十八大以来,我国经济发展坚持以供给侧结构性改革为主线,大力实施落后产能退出政策,同时鼓励建设特大型露天煤矿^[7],不断释放先进产能,再一次推动我国露天煤开采技术进步。目前,露天开采初步形成了集理论—工艺—装

备—人才—管理等为一体的自有产权开发开采技术体系。十九大以来,我国特色社会主义进入了新时代,中央提出建设以高质量发展为特征的现代化经济体系,推动经济发展质量变革、效率变革、动力变革,提高全要素生产效率,这为露天煤矿发展提出了更高的要求,需要在安全、智能、绿色、高效等方面取得更大突破。为此,笔者系统的阐述了我国露天煤矿发展现状,总结归纳了先进技术成就,分析了存在的主要问题,并对我国露天煤矿未来开采技术进行了展望分析。

1 我国露天煤矿发展现状

我国露天煤矿起源于1914年辽宁抚顺古城子露天堙(史称中国第一个露天煤矿),至今已有百余年的历史。经过百余年的发展,我国露天煤矿经历了从无到有、从小到大,开采技术经历了从模仿到创新、从落后到先进,开采装备经历了从小到大、从单一到综合、从进口到国产等发展过程^[8]。

按照国家能源局2019年2号公告^[9]《关于全国煤矿生产能力情况》,笔者统计了证照齐全依法合规生产建设露天煤矿情况:截至2018年底,我国共有露天煤矿303处(不含井露联合开采煤矿),占全国煤矿数量6.9%,产能75 908万t/a,占总产能16.6%。其中:在生产露天煤矿249处,占全部生产煤矿7.4%,产能63 643万t/a,占全部生产煤矿产能18%,此外基建露天煤矿有54处,产能12 265万t/a。在生产露天煤矿中,产能400万t/a及以上大型露天煤矿35处,占比14.1%,产能41 700万t/a,占比65.5%;产能1 000万t/a及以上特大型露天煤矿16处,占比6.4%,产能31 100万t/a,占比48.9%,数量占全国所有千万吨及以上煤矿总数39%,产能占全国千万吨及以上煤矿总产能46.7%,煤矿数量产能关系如图1所示。另有产能2 000万t/a及以上露天煤矿8处,产能达20 600万t/a,产能3 000万t/a露天煤矿还有3处,最大的露天煤矿为国家能源投资集团所属的哈尔乌素和宝日希勒露天煤矿,产能均达3 500万t/a,是目前我国产能最大煤矿,也位于世界十大露天煤矿之列。此外,还有11处基建露天煤矿中,千万吨及以上6处,涉及产能7 340万t/a。

我国大型在生产露天煤矿主要分布在内蒙古、山西、新疆、云南、黑龙江和陕西等6大省区,其中内蒙古最多,数量167处,产能42 285万t/a,分别占比67.1%、66.4%,千万吨及以上煤矿10处、产能22 100万t/a,在千万吨及以上露天煤矿中分别占比62.5%、71.0%,可见内蒙古成为露天煤矿开采的主

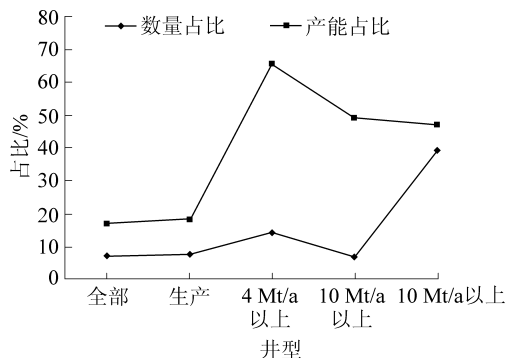


图1 我国露天煤矿数量与产能占比关系

Fig. 1 Number and capacity ratio of open-pit coal mines

要区域。我国大型露天煤矿开发主体集中在中央企业及国有地方企业,主要为国家能源投资集团、中煤能源集团、国家电力投资集团、华能集团、大唐集团、小龙潭矿务局、天池能源公司等企业。其中露天煤矿规模最大的国家能源投资集团拥有露天煤矿20处(不含井露联合)、产能23 050万t/a,占全国在生产露天煤矿产能的36.2%,产能3 000万t/a以上的露天煤矿有3处总产能超过亿吨。露天煤矿分布和开发主体占比情况如图2所示。

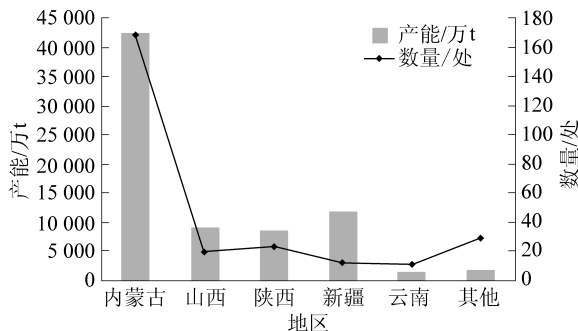


图2 露天煤矿区域分布

Fig. 2 Distribution of open-pit coal mines

根据以上分析,总结出我国露天煤矿开采现状3个特点:①数量少能力大,以占比7.4%的煤矿数量贡献出18%的煤炭产量,平均单矿产能是井工煤矿2倍多;②超大型占主流,露天煤矿数量不到全国煤矿数量7%,但千万吨及以上超大型煤矿数量占比39%、产能占比46.7%;③露天煤矿开发开采集中度高,66.4%的产量在内蒙古区域内,36.2%的产量由国家能源投资集团所属露天矿开采。

3 我国露天煤矿先进开采技术综述

3.1 基础理论研究成果

我国露天开采理论研究起源于建国初期前苏联,提出了剥采比优化、车流优化等理论^[10]。近几年来,专家学者总结归纳了基础理论新进展^[11],但从露天煤矿开采理论研究的所有文献分析,主要聚

焦在剥采比、边坡、绿色开采3个方面。

1) 剥采比理论。露天煤矿在设计和生产过程中常用的剥采比主要有均衡剥采比、生产剥采比、境界剥采比、经济剥采比,专家学者对各类剥采比从不同角度进行了研究和应用,得出了在不同条件下不同剥采比的重要程度。姬长生等^[12]分析了确定经济剥采比方法不完善之处,建议重新加以界定;于汝绶等^[13-14]提出了当量经济剥采比新概念,建议确定露天煤矿境界原则改为境界剥采比小于等于当量经济剥采比;之后研究剥离运输功均衡法,将剥采比和剥离运距结合起来,拓宽了均衡剥采路径。为增加露天煤矿的经济效益,宋子岭等^[15]运用现代控制理论,用最小的生产剥采比采出最多的有用矿物。还有一些学者为了确定最合理的露天开采境界,提出经济剥采比的动态使用性,如王满仓等^[16];研究了开采下部煤层经济剥采比的优化确定方法,如刘闯等^[17]。这些理论促进了我国露天煤矿设计规范、制度等修订,也在多个露天煤矿得到应用。

2) 边坡理论。边坡失稳是边坡灾害的主要危险源。由于各露天煤矿所处的区域不同,边坡所在的地质条件差别较大,发生边坡失稳滑坡的机理不同。综合分析文献^[18-20],露天煤矿边坡是露天采矿工程活动所形成的一种特殊结构物,影响露天煤矿边坡稳定性的因素繁多,这些因素可分为2类:①内因,如水文地质、岩石的矿物组成、岩体中的地质结构面和构造应力,它们是边坡岩体自身所固有的。②外因,如疏干排水情况、采矿工程活动、爆破震动、风化等,为岩体所处的环境条件。岩质边坡破坏模式包括:崩塌、倾倒破坏、平面滑动、楔体滑动、近似圆弧形滑动、岩层曲折破坏等类型,主要表现为顺倾滑动型破坏、反倾切断型破坏、局部台阶松动崩塌破坏、均质追踪节理滑动型破坏、楔体型破坏等5种类型。

3) 绿色开采理论。我国露天煤矿绿色开采理论研究起步较晚,2003年钱鸣高院士提出了绿色开采的概念。之后,露天煤矿研究人员秉承煤矿绿色开采理念,开展系列研究,初步形成从开拓、工艺、装备、复垦、评价等多项指标的绿色开采理论体系。才庆祥等^[21]提出露天煤矿采矿与生态重建一体化理论,指导了绿色开采理论发展;韩义朝等^[22]从合理的采矿工艺与设备选型、系统的开采程序与开拓运输系统、最大的资源回采与综合效益、科学的经营管理、绿色的防尘降噪诠释了露天煤矿绿色开采理论。缪海宾^[23]提出要实现绿色开采,将环境保护及恢复作为煤矿发展的内在因素,将循环经济发展与生态

环境的可持续发展作为绿色开采的目标,将煤矿开采过程的各环节和结果“绿色化”“生态化”作为主要内容和途径。此外,还有学者提出绿色度的概念,并对绿色开采评价体系进行大量研究。

3.2 开采工艺新进展

我国露天煤矿开采技术进展迅速,按照运输连续性将开采工艺分为间断、半连续、连续3类开采工艺,主要有单斗-卡车间断、单斗-卡车+半固定破碎站(或自移式破碎机)半连续、轮斗连续、吊斗铲倒堆、综合开采等工艺^[24-26],在伊敏、霍林河、元宝山、平朔、准格尔等露天煤矿均有应用。当前,我国大部分露天煤矿采用综合开采工艺技术,并在主要开采工艺,以及开拓、运输、爆破等生产环节不断创新:

1) 协调和转向开采技术。研究表明^[27-29],相邻多露天煤矿协调开采和大型单露天煤矿转向开采技术有力促进了露天煤矿安全高效开采。相邻露天煤矿统一规划设计,优化排土方案和运输系统,缩短运距,减小生产剥采比,提高资源回采率和经济效益。如黑岱沟与哈尔乌素露天煤矿实施协调开采技术,提出了相邻露天煤矿“Z”型追踪协调开采方法,构建了相邻端帮运输系统参数的动态优化模型,获得了最优压帮高度和最小追踪距离等关键技术参数,实现了相邻端帮压煤的完全回收,解决了回收压煤与安全高效运输相矛盾等技术难题。采区转向技术分为连续和间断两类,当前基本利用连续式,可利用原有采场空间进行新采区的开采建设,无需重新拉沟,其进一步划分为留沟缓帮连续式和扇形推进连续式2种。留沟缓帮连续式是将开采方向一次转向90°的方式如图3所示。黑岱沟、安太堡均实施了转向开采技术,保持了煤矿连续高产高效。

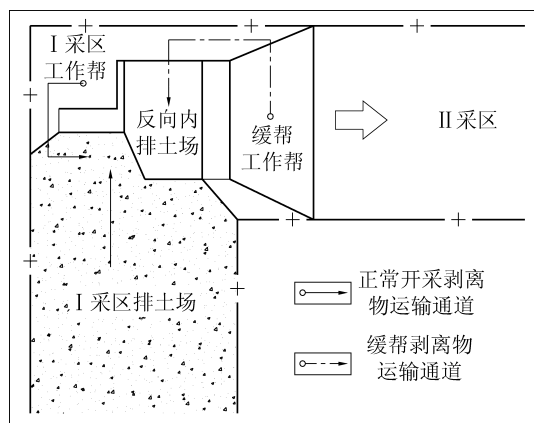


图3 转向反向内排运输示意

Fig.3 Turn and reverse transportation system of inner dump

2) 创新运输路线技术。缩短运距是露天煤矿降本增效的主要举措,因此创新了多种技术。①内

排土场搭桥技术,主要有中间搭建单桥、中间搭建双桥和混合式搭桥3种方式。宝日希勒露天煤矿^[30]搭桥时采用反向内排的技术进行搭桥(图4),用最短的时间完成中间桥的搭建,煤炭运距缩短1 500 m,降低成本、解决了端帮运输通道压煤难题,增加了经济效益,同时避免了与外委队伍小型运输车辆交叉作业,减少了安全隐患;②无煤区留岛搭桥内排技术^[31]。针对开采区域特殊构造无煤区,留设孤岛煤柱,实施岛后内排运输搭桥,降低剥离运输费用,增加经济效益。胜利一号露天煤矿有2块无煤区,通过留设无煤区“中心孤岛”和搭桥技术,减少无效剥离,增加经济效益近4 000万元。③采坑深部布设破碎站技术。宝日希勒露天煤矿为解决运距长、费用高、交通拥堵等问题,研究破碎站下坑可行性,采用胶带机垂直布置,沿分段的内排土场由北向南爬升,提升角度为10°,破碎站均布置于现有中间桥中部,原煤运输费用每年可节约13 500万元,节省卡车运输距离2.81 km。

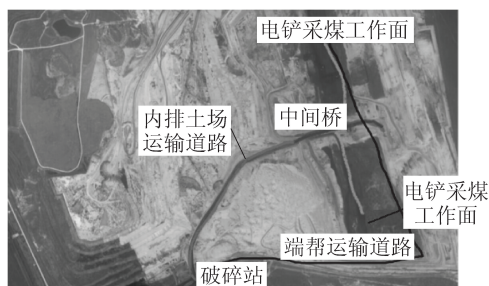


图4 内排土场搭设中间桥运输系统

Fig. 4 Intermediate bridge transportation system in inner dump

3) 高效爆破技术。目前露天煤矿主要采用深孔爆破、预裂光面爆破、抛掷爆破^[32]等技术。其中,抛掷爆破技术是采运排一体化开采技术,将岩石破碎并将部分岩石抛掷到采空区,剩余物料由吊斗铲倒堆完成剥离作业,黑岱沟露天煤矿采用吊斗铲抛掷爆破工艺,并研发集“爆破设计、穿孔引导、装药、起爆”四位一体的露天煤矿智能化爆破技术,大大提高了效率。冻土预深翻掩埋代替冻土爆破技术^[33]在蒙东极寒区域普遍应用,即在每年土方剥离竣工前利用液压铲将裸露的工作帮(将形成的冻土平盘)进行提前深翻掩埋,为第二年剥离做好准备,保证了安全高效生产。此外,还有锡箔纸防水袋爆破技术,解决了煤矿露天复采中高温区深孔爆破安全难题。神华新疆公司准东露天煤矿采用光面爆破与缓冲爆破结合技术解决减震问题,还创新了破碎锤配合硬挖的作业方式替代爆破预裂工艺,降低生产成本。

4) 陡帮端帮开采技术。多个露天煤矿研究应

用了陡帮和端帮开采技术提高了煤炭回采率,陡帮开采技术^[34]通过采用短工作线,快速推进、快速内排压帮的方式增大边坡角,提高矿产资源高效开发和节约利用水平。端帮采煤技术^[35]是在传统的露天开采技术和井工开采技术之外发展起来的一种先进、比较成熟的矿山开采方式,可进行露天煤矿坑端帮资源回采、等高线露头煤开采和沟槽开采等。目前,端帮开采有螺旋钻、采煤机、井露联合开采等采煤工艺。另外,胜利一号露天煤矿曾使用露天采煤机开采相对较薄煤层,成为薄煤层开采的一种方式。

3.3 开采装备应用及国产化技术

露天煤矿开采工艺不同使用的装备不同。露天煤矿设备主要包括采装、运输、穿孔、破碎、排土及辅助装备。20世纪露天煤矿大型设备主要依靠进口,近20年来我国加快各类设备国产化进程,目前除大型设备部分零部件进口外,许多设备已实现国产化,大大提高了产能水平^[36]。

1) 采装设备。以挖掘机为主,分为单斗式和多斗式。单斗挖掘机细分为电铲、液压铲、吊斗铲,多斗挖掘机分为轮斗式和链斗式。目前我国大型露天煤矿主要使用电铲,部分露天煤矿也使用液压铲、轮斗铲和吊斗铲。电铲是目前多数大型露天煤矿的主要采装设备,以国产WK系列斗容10~55 m³为主,目前最大斗容达75 m³。液压铲具有灵活机动、效率高、投资小、挖掘力大等特点,为露天煤矿不可或缺的辅助设备。轮斗是连续工艺的采装设备,受采场条件和技术影响,目前应用较少,扎哈淖尔露天煤矿使用一台塔克拉夫能力6 600 m³/h挖掘机,大连重工生产出国产全液压轮斗挖掘机,在白音华露天煤矿使用。吊斗铲是采运排一体化装备,运行成本低、生产能力大、效率高,目前国内仅有准能黑岱沟露天煤矿引进1台斗容90 m³的在用。此外,采掘设备还有前端式装载机、铲运机、露天采矿机、露天采煤机、地平王、端帮采煤机等辅助设备。

2) 其他设备。运输设备主要有自卸卡车和带式输送机。卡车是单斗-卡车间断开采工艺的主要运输设备,国内大型露天煤矿使用较多的为电动轮式刚性自卸卡车,主要型号有TR100、630E、830E、MT4400、MT5500等,载重100~300 t,目前国内哈尔乌素露天煤矿应用了载重达363 t卡车,世界最大载重已达450 t。带式输送机是半连续、连续运输的主要运输设备,目前国内设备较为成熟均能满足需求。

目前国内大型露天煤矿在用的钻孔直径400 mm以下牙轮钻机、潜孔钻机和回转钻机 etc 爆破穿

孔设备基本实现国产。破碎机是半连续工艺重要设备,能力最大可达12 000 t/h,自移式破碎机开始推广,目前在伊敏、平朔东露天、白音华二号等露天煤矿成功应用。

3.4 信息化智能化技术

信息化智能化是21世纪经济社会发展的必然趋势,并在露天煤矿得到飞速发展和应用,其中卡车智能调度系统、CI-IDS生产管理系统、轮胎全寿命管理系统、疏干智能排水系统、智能爆破系统等成熟

应用,提高了安全高效生产水平。

1) 煤炭生产执行系统(CMES)。基于Hadoop的大数据平台技术,对露天煤矿设备、环境、能耗等实时数据以及各板块生产业务数据进行采集、存储,通过对生产动态模型建设、多目标控制流程进行优化和能耗、设备异常及生命周期进程监控预警,实现了从设计、采矿、设备维修、煤炭洗选到装车外运的智能联动和多层级、多业务领域的一体化协同智能决策,大幅提高智能化程度,生产执行系统如图5所示。

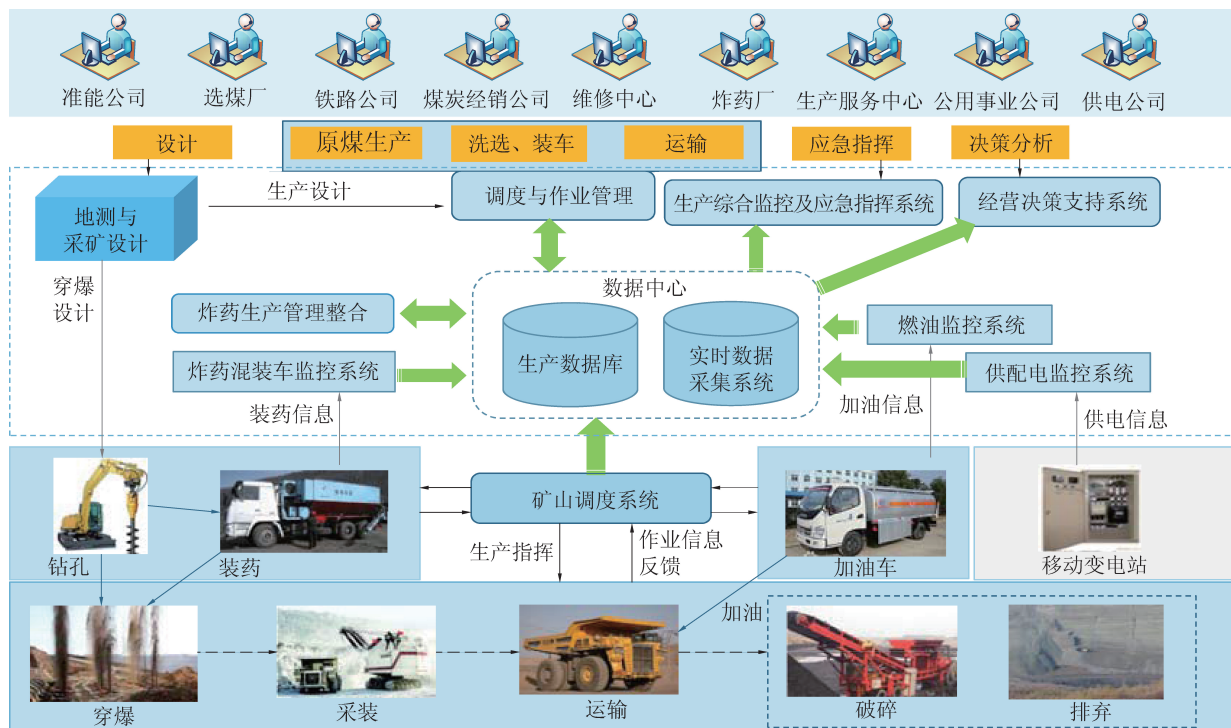


图5 煤炭生产执行系统

Figure 5 Coal production executive system

2) 卡车智能调度系统^[37]。在大型露天煤矿普遍应用此系统,主要应用现代化信息化技术,在采装、运输设备安装智能终端,通过数据采集和综合分析,实现车铲匹配、车辆防撞、动态监测、自动报警、智能决策等功能,提高效率和水平,胜利一号露天煤矿卡调系统(图6)。

3) 矿用轮胎全寿命管理系统^[38]。实时采集、监控、记录轮胎温度及压力信息,跟踪轮胎和车辆运行情况,实时监测并分析轮胎气压和温度数据,通过智能分析,动态调整车辆运行速度、合理确定不同路段最佳行驶速度、规范司机的操作,实现了轮胎的科学化管理,国家能源投资集团露天煤矿在用该系统,使国产轮胎平均寿命由1 957 h提升到3 757 h,卡车前轮换位时间由5 500 h的提升为27 500 h。

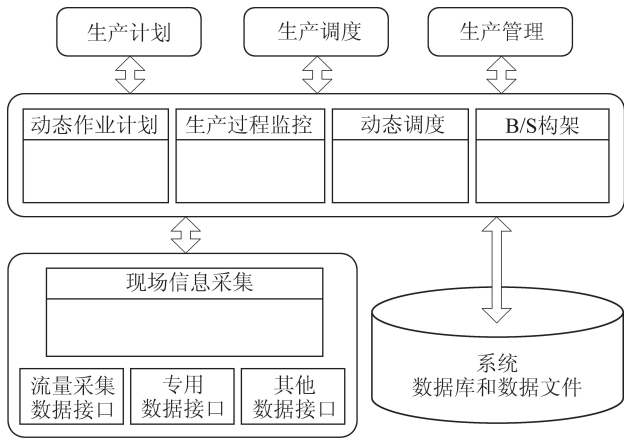
4) 智能爆破系统^[40]。是集“爆破设计、穿孔引

导、装药、起爆”为一体智能化爆破技术。爆破数字化综合处理系统、爆破设计软件(图7a)实现了计算机爆破优化设计、爆破过程模拟及安全性分析、爆破前效果模拟与评估。智能化穿孔引导技术(图7b)实现了计算机自动布孔、GPS智能引导穿孔,精度提高了80%。智能化装药及保障技术(图7c),在GPS导航的引领下,根据接收的炮孔装药信息实现了智能化装药,提高了装药效率和装药精度。抛掷爆破采用数码电子雷管(图7d),实现了延期范围宽、延时精度高、安全高效的智能化起爆网络技术。

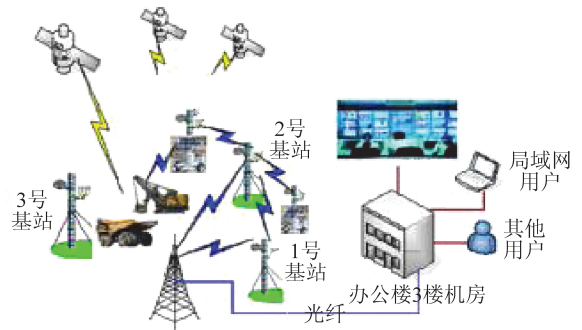
5) 疏干智能排水系统^[39]。利用GPRS无线传输模块,合理设计远程操作端与现场操作端接线方式,依靠液位监测装置、声光报警装置,设置主站与从站,利用无线远程控制系统来实现蓄水池水位最

优控制,实现了露天采场水仓异地排水无线远程控制

制如图8所示。



(a) 系统软件体系功能结构



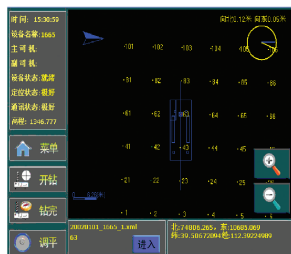
(b) 通信拓扑

图6 北电胜利一号露天煤矿卡车智能调度系统

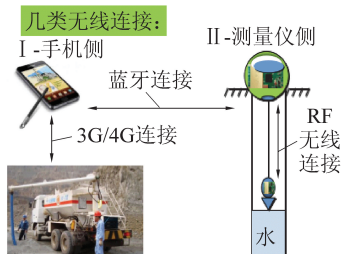
Fig.6 Truck intelligent dispatching system in Beidian-Shengli No.1 Open-pit Coal Mine



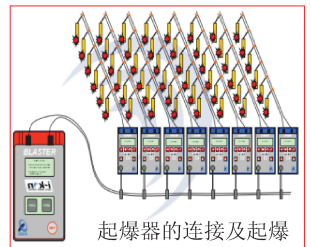
(a) 爆破数字化综合处理系统



(b) 智能化穿孔引导系统



(c) 智能化装药保障系统



(d) 智能化起爆网络

图7 智能爆破成套系统

Fig.7 Intelligent blasting system

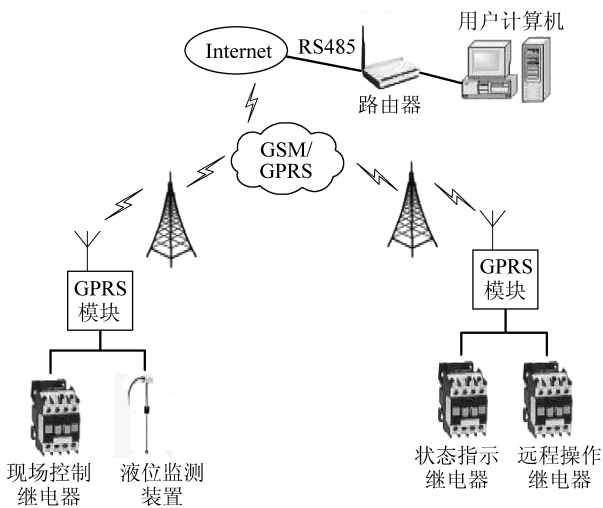


图8 疏干智能排水系统框架

Fig.8 Framework of water intelligent supply and drainage system

3.5 安全生产先进适用技术

据统计,露天煤矿发生的安全事故,边坡事故损失最为惨重、运输事故最为频繁,还有小煤窑采空区塌陷、水等重大危险源引起的重大事故。近几年,通

过防治技术创新进步,事故率大幅下降,现场应用较多且效果较好的主要防治技术如下。

1) 边坡监测技术^[41],采用滑坡雷达监测预警系统,综合了步进频率连续波技术、差分相位干涉测量技术、合成孔径雷达技术和永久散射体技术等四项国际领先技术,用于边坡微小位移变化监测、预警,装备及预警情况如图9所示。同时配套边坡锚索监测系统,实时监测加固锚索预应力变化,实现多参量立体监测,超前采取措施保障安全生产。

车辆运输事故智能防控技术包括以下内容。卡车防撞预警系统,能够提示司机防范周围车辆,有效防止车辆碰撞事故。超速预警系统,实现车辆行驶速度的实时监测,跟踪记录车辆运行参数,防止超速行驶。盲区监控系统,能够对车辆盲区实施监测,可实现卡车360°可视,杜绝重大运输事故。卡车电动轮主机架实时裂纹监控系统^[42],能够在线、实时检测电动轮主机架的应变及裂纹的扩展情况,可在主机架彻底断裂前发出报警,避免卡车倾翻、碰撞等安全事故。



图9 滑坡雷达监测预警系统

Fig.9 Radar monitoring and early warning system for landslide

2) 疏排水技术^[43]是解决露天煤矿水害的有效措施,在伊敏、胜利、白音华等矿区普遍应用。当前疏排水采取“外围预先降水+采场工作面水仓集水疏干”联合技术,采场外围周边疏干井强行抽水形成降落漏斗,提前将含水层中水疏排至矿坑外;采场内在内排土场与采掘场非工作帮、端帮之间建立隔水墙,阻止周边地下水对内排土场的渗入,配合设置临时集水仓,抽排或利用,保障内排土场岩土稳定。大雁泥扎河露天煤矿,创造性的建造地下混凝土连续墙约5 500 m,对渗水通道进行帷幕截流,达到水害治理、边坡稳定、保护生态环境的目的。

我国露天煤矿开采范围内小煤窑采空区塌陷是安全开采重大隐患,集成高密度电磁法、瞬变电流法、井地地震CT成像法等手段勘探采空区,并采取塌陷爆破、剥离物回填等方法对勘探出的采空区进行治理,保证了安全生产,降低了对水资源和地貌破坏程度,宝日希勒露天煤矿应用此技术后,未发生一次安全事故^[44]。

3.6 生态恢复技术

露天煤矿开采对生态环境扰动强烈,破坏了原始生态环境,专家学者通过攻关研究,形成了系列绿色开采技术成果,综述如下。

1) 特大型露天煤矿区域绿色开发关键技术^[45]。准能集团依托黑岱沟和哈尔乌素两大露天煤矿,研究出基于生态保护、节能减排、安全高效三个方面全生命周期露天煤矿开采扰动效应评价理论,研发了邻矿协调高效开采、智能开采、智能爆破、卡车防撞、新型炸药、抛掷爆破、水土保持、生态重建等八大绿色开发关键技术,构建了特大型露天煤矿区“采-复-农-园”四位一体协同开发模式,生态环境得到根本改善,走出了一条脆弱环境下特大型露天煤矿绿色开发的新路,技术构架如图10所示。

2) 生态修复与综合整治技术,研究了东部草原区域露天煤矿长期高强度开采驱动下的生态累积效应,评估了对区域生态安全的影响阈值,提出生态影

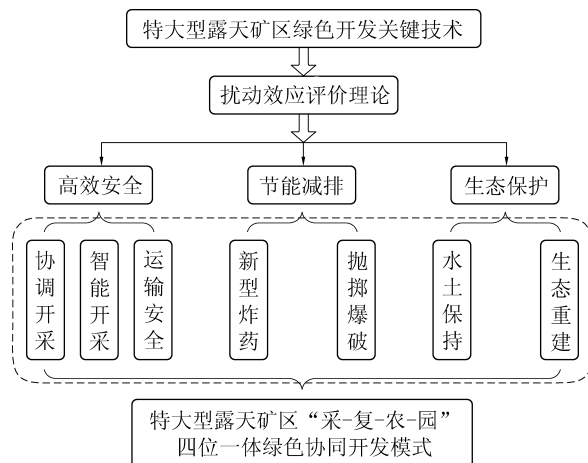


图10 特大型露天煤矿区绿色开发关键技术构架

Fig.10 Key technology framework of green development in large open-pit coal mine

象途径及表征(图11),探索出矿区土地整治、植被恢复、土壤重构和景观生态恢复等关键生态恢复技术体系。

3) 采矿复垦一体化技术成为当前露天煤矿复垦的主要治理技术^[46],实现了采矿过程的各个工序有序结合,同时结合GPS、GIS及三维可视化技术,对露天煤矿采场、排土场复垦前后情况进行虚拟展示,实现边开采、边复垦、边预控的目的,在晋、陕、蒙生态环境脆弱地区取得显著成效。

4) 土地复垦仿地貌重建技术^[47],采用各类先进技术获取排土场沉降规律及系数,收集分析参照区域气候、土壤、植被等支撑数据,提取缓坡地形特征数据,提出了近自然缓坡地形的仿自然地貌重塑技术,胜利露天煤矿区构建了排土场景观全生命周期近自然重塑模式,开展了内外排土场等典型待修复斑块选址与近自然形态设计,减少排土场水土流失,增加边坡稳定性。

5) 微米级干雾抑尘技术,是在破碎站易产生尘区域安装微米级干雾抑尘设备,生产过程中在起尘区域形成抑尘“雾池”,实现对起尘点的粉尘抑制效果。

6) 新型筑路技术,为改善雨雪天气对露天煤矿道路影响,引进应用一种适用于黏土基土壤的新型筑路材料 FRT,将黏土中的束缚水转变成自由水排

出,使黏土不再吸水,将土壤颗粒、砂石等紧密粘结合在一起,达到路面平整度、强度等各项指标良好效果。

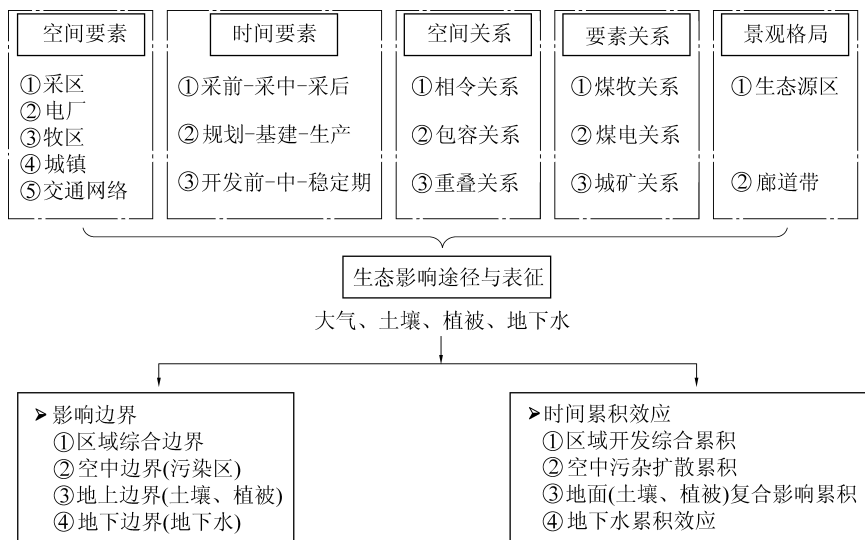


图 11 大型煤电基地生态影响途径与表征框架

Fig. 11 Ecological influence pathways and representation frame work of large coal and electricity base

4 露天煤矿开采发展存在的主要问题

我国露天煤矿开采技术取得了长足进步,同时也存在诸多不足和瓶颈问题,主要体现在以下 7 个方面。

1) 国家指导政策与露天煤矿发展速度不同步。在发展过程中,因为露天煤矿单矿规模不断增大,采矿用地数量快速增加,而地方用地政策未及时做出调整,导致露天煤矿用地规划指标紧缺,加之征地手续繁杂、审批时间较长,煤矿出现无地可用被迫停产现象,开采用地成为制约露天煤矿可持续发展的瓶颈问题。国家生态环保政策趋紧,历史欠账较多的露天煤矿无法短时间内达到标准,当前露天煤矿复垦绿化不满足生态环保要求。

2) 露天煤矿开采模式相对单一。我国露天煤矿开采仅是传统的一矿一坑,按矿划分资源、同一煤田露天井工单列开采的模式,严重制约了高产高效的发挥,限制了大型露天装备的应用,降低了资源的回采率。

3) 全国露天煤矿开采技术发展不平衡。纵观全国露天煤矿数量,中小煤矿数量占比 85%,仍是以传统的小型挖掘运输设备和开采工艺为主,复垦绿化不达标,开采技术相对落后。占比不足 15% 的大型露天煤矿也仅有千万吨级超大矿引进采购大型挖掘、运输等设备,采用综合开采工艺,提升了开采技术水平,但全国露天煤矿开采技术整体发展不平衡。

4) 露天煤矿大型关键设备及零配件仍依赖进口。我国露天煤矿使用的电铲、卡车、破碎机、轮斗、吊斗铲等大型关键设备及零配件主要依赖进口,在一定程度上制约了露天煤矿快速发展。

5) 高效的露天开采工艺应用较少。目前,我国露天煤矿开采工艺主要是单斗-卡车间断工艺,而轮斗连续、自移式破碎机半连续、吊斗铲倒堆等高效开采工艺应用较少,普适性高效开采新工艺攻关难以突破。

6) 恢复生态原貌技术尚不成熟。当前露天煤矿仅是开采造成的生态破坏进行绿化复垦,整套的损坏鉴定、采复同步、原貌恢复等关键技术尚不成熟。

7) 重大灾害治理技术仍需突破。露天煤矿水害有效治理、边坡失稳精准预警、露天大片火区灭火等新技术需要攻关突破。

5 露天煤矿开采技术的发展趋势

高质量发展是我国新时代经济社会发展的风向标,推进煤炭产业高质量发展是必然趋势。露天煤矿开采技术已经具备了高质量发展的基础条件,未来将在开发模式、智能开采、安全高效、绿色矿山、职业人才等 5 个方面迎来新的发展。

1) 探索露天煤矿开发开采新模式。未来我国露天开发煤炭资源模式有 2 个方向:①根据我国可用于露天开采的大型煤田资源的赋存特点,借鉴美国北羚羊露天煤矿、罗切斯特煤矿开采模式,研究一

矿多坑或一矿多点开发开采模式,减少易采煤炭资源因人为划界留设煤柱导致资源损失和影响开采效率,实现煤炭资源无界、高效、协调、节约开发;②研究浅部露采、深部井采协同开采新模式,提出先露后井、露井同采开采顺序界定标准,充分利用露采空间资源,设计井工开采方式,减少煤矿投资、提高资源回采率、延长煤矿服务年限。

2)研发高端智能装备为建设智慧矿山提供支撑。露天煤矿高端智能装备及关键部件主要依赖进口,制约了露天煤矿智能发展。研发吊斗铲、无人卡车、大型破碎机采剥运破高端装备,实现大型卡车电动机、电动轮、轮胎和大型电铲电控系统等设备国产化,是加快智能矿山建设、降低煤矿生产成本、保障生产持续稳定的关键。因吊斗铲价格昂贵、缺乏配件,在我国应用较少,美国等发达国家大型露天煤矿主要依靠吊斗铲,进行多台吊斗铲集中布置,实现单矿亿吨产能规模,研发吊斗铲实现国产化能够大幅提高露天煤矿生产水平,为实现一矿多坑开发模式提供关键装备。随着以互联网、物联网、大数据、云计算、人工智能等信息化技术快速发展,为智能化开采提供了自动感知、识别、分析、决策、控制等功能路径,将现代信息技术与开采工艺涉及的采剥爆装破运等装备和安全监控进行整合连接,建立一张网连接、一个平台控制的智能开采模式,实现少人无人、提高生产效率。

3)创新安全高效生产新技术。安全方面需要进一步研究2项技术:①对于目前露天煤矿,通过建设智能平台,实现各类设备的少人无人操作、运输车辆距离速度控制、边坡失稳超前预警等技术功能,让人处于安全的环境;②建立设备易损关键零部件及关联部件的实时监控平台,让设备及主要零部件在动态运转中处于透明可控的状态,实现设备及主要零部件的本质安全,避免因物不安全带来人的不安全。高效方面,发展趋势是研究突破适合各类地质条件的露天煤矿半连续、连续开采工艺整套技术和关键装备,快速提高生产效率效益。

4)创建绿色矿山成套技术体系。随着我国生态文明建设的不断深入,绿色开发开采是露天煤矿发展的必然趋势。建设绿色矿山需要在3个方面取得突破:①因地制宜制定绿色矿山在设计、开发、闭坑全寿命过程中剥、采、运、爆、填、垦等标准,建立煤矿开采过程中噪音、粉尘、绿化、水系恢复等规范,形成纵横覆盖的绿色矿山标准;②攻关露天煤矿开采对环境损坏程度的精准判断技术、开采与生态环境保护协调同步技术、高质量土地复垦技术,为现有露

天煤矿生态恢复提供技术支撑^[48];③从长远谋划露天煤矿生态原貌恢复技术,实现煤矿在开采过程中和闭坑后对生态环境零影响。

5)培养露天煤矿职业开采技术人员。职业开采是专业开采、精准开采的更高体现,需要培养与露天煤矿开发开采新模式、新技术、新工艺、新装备等相适应相匹配的职业开采人才队伍。企业、煤炭高等院校研究建立新的培养职业开采人才队伍平台,培养适合智能、绿色开采管理、技术及操作新型职业人员,建立分工明确、专业精湛、安全高效的专业化服务和运营队伍。

综上所述,改革开放40年来,我国露天煤矿在规模、工艺、装备、绿色等开采技术方面取得了较大进步,但距世界一流尚有较大的差距。因此,露天煤矿应以我国推进经济高质量发展为契机,聚焦模式创新、研发提高国产装备水平、探索连续生产工艺、建立绿色矿山标准体系、培养适应智能绿色开采技术的职业队伍人才,推进我国露天煤矿开采技术进入世界一流行列,同时为促进我国煤炭产业高质量发展提供重要支撑。

参考文献(References):

- [1] 才庆祥,洪宇.露天煤矿高效开采新技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2008.
- [2] 田会,才庆祥,甄选.中国露天采煤事业的发展展望[J].煤炭工程,2014,46(10):11-14.
TIAN Hui, CAI Qingxiang, ZHEN Xuan. Development prospects of surface coal mining industry in China[J]. Coal Engineering, 2014, 46(10):11-14.
- [3] 张峰玮,甄选,陈传玺.世界露天煤矿发展现状及趋势[J].中国煤炭,2014,40(11):113-116.
ZHANG Fengwei, ZHEN Xuan, CHEN Chuanxi. Development status and tendency of world open-pit coal mine[J]. China Coal, 2014, 40(11):113-116.
- [4] 国家能源技术经济研究院.全球及中国煤炭市场形势分析报告[M].北京:中国财富出版社,2018:31-37.
- [5] 有道.罗切斯特煤矿[DB/OL].http://dict.youdao.com/w/罗切斯特煤矿/,2019.
- [6] 宋晓波.中国适宜露天开采的煤炭资源分布及其评价研究[J].煤炭工程,2015,47(12):124-126,129.
SONG Xiaobo. Distribution and Evaluation of coal resources suitable for open-pit mining in China[J]. Coal Engineering, 2015, 47(12):124-126,129.
- [7] 国家能源局.关于促进煤炭工业科学发展的指导意见[Z].北京:国家能源局,2015-02-04.
- [8] 赵红泽,甄选,厉美杰.中国露天煤矿发展现状[J].中国矿业,2016,25(6):12-15,34.
ZHAO Hongzeng, ZHEN Xuan, LI Meijie. Development status of open-pit coal mines in China[J]. China Mining Magazine, 2016,

- 25(6):12-15,34.
- [9] 国家能源局.2019年2号公告[Z].2019-03-15.
- [10] 中国煤炭工业协会煤炭工业技术委员会,中国煤炭学会露天开采专业委员会,煤炭工业规划设计研究院有限公司.中国露天煤炭事业百年发展报告(1914-2013)[M].北京:煤炭工业出版社,2015.
- [11] 张洪.露天煤矿开采理论及工艺技术发展趋势[J].露天采矿技术,2019,34(1):1-9.
ZHANG Hong. Open-pit coal mine mining theory, technology and development trend[J]. Opencast Mining Technology, 2019, 34(1):1-9.
- [12] 姬长生,张幼蒂.合理经济剥离比合理性探讨[J].煤炭设计,1998(7):15-17.
JI Changsheng, ZHANG Youdi. Discussion on rationality of reasonable economic stripping ratio[J]. Coal Design, 1998(7):15-17.
- [13] 于汝绶,张瑞新,张桂军.当量经济剥离比新概念[J].中国矿业大学学报,1998,27(1):1-4.
YU Rushou, ZHANG Ruixin, ZHANG Guijun. New concept of equivalent economic stripping ratio[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1998, 27(1):1-4.
- [14] 于汝绶.露天矿设计理论的新发展[J].中国矿业大学学报,2003,32(1):4-10.
YU Rushou. New development of open-pit mine design theory[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(1):4-10.
- [15] 宋子岭,白润才,伊伯良.市场经济条件下露天矿生产剥离比控制方法[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2000,22(5):454-457.
SONG Ziling, BAI Runcai, YI Boliang. The Control method of surface mining of the operational stripping ratio on condition of market-economy[J]. Journal of Liaoning University of Engineering and Technology: Natural Science Edition, 2000, 22(5):454-457.
- [16] 王满仓,谢志勤,姜振兴.经济合理剥离比在确定露天煤矿开采境界中的计算和应用[J].中国矿山工程,2014,43(2):31-34.
WANG Mancang, XIE Zhiqin, JIANG Zhenxing. Computation and application of economic stripping ratio in open-pit limit determination[J]. China Mine Engineering, 2014, 43(2):31-34.
- [17] 刘闯,白润才,刘光伟,等.复合煤层露天矿下部煤层开采境界优化[J].煤炭学报,2015,40(9):2085-2090.
LIU Chuang, BAI Runcai, LIU Guangwei, et al. Optimization of mining limits of deep-seated coal seams in multi-seams surface coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9):2085-2090.
- [18] 张艳博,李占金,康志强.露天煤矿滑坡灾变机理及控制对策研究[J].中国矿业,2011,20(1):94-99.
ZHANG Yanbo, LI Zhanjin, KANG Zhiqiang. Study on landslide catastrophe mechanism and control strategy for open-pit coal mine[J]. China Mining Magazine, 2011, 20(1):94-99.
- [19] 王建鑫.露天煤矿排土场不同土岩比情况下边坡稳定性分析[J].露天采矿技术,2016,31(7):18-21.
WANG Jianxin. Slope stability analysis under different soil rock ratio in open-pit coal mine dump[J]. Opencast Mining Technology, 2016, 31(7):18-21.
- [20] 赵锡刚.露天煤矿边坡地质灾害及其影响因素分析[J].现代矿业,2013,33(1):61-63.
ZHAO Xigang. Analysis on slope geologic disasters of open-pit coal mine and the influence factors[J]. Modern Mining, 2013, 33(1):61-63.
- [21] 才庆祥,马从安,韩可琦,等.露天煤矿生产与生态重建一体化系统模型[J].中国矿业大学学报,2002,31(2):162-165.
CAI Qingxiang, MA Congan, HAN Keqi, et al. Integrative model of open-pit mine production and ecological reconstruction[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(2):162-165.
- [22] 韩义朝,向迪,刘宇,等.露天煤矿绿色开采理论体系研究[J].露天采矿技术,2016,31(1):81-83.
HAN Yichao, XIANG Di, LIU Yu, et al. Research on green mining theoretical system in open-pit coal mine[J]. Opencast Mining Technology, 2016, 31(1):81-83.
- [23] 缪海滨.大型露天煤矿绿色开采理论与评价方法[J].煤矿安全,2017,48(9):230-233.
MIAO Haibin. Theory and evaluation method of green mining in large open-pit coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(9):230-233.
- [24] 田会,白润才,赵浩.中国露天采矿的成就及发展趋势[J].露天采矿技术,2019,34(1):1-9.
TIAN Hui, BAI Runcai, ZHAO Hao. Achievements and development trends of open-pit mining in China[J]. Opencast Mining Technology, 2019, 34(1):1-9.
- [25] 姬长生.露天矿生产工艺系统分类的思考[J].中国矿业,2011,20(11):64-66.
JI Changsheng. Classification of surface mining systems[J]. China Mining Magazine, 2011, 20(11):64-66.
- [26] 李克民,马军,张幼蒂,等.拉斗铲倒堆剥离工艺及在我国应用前景[J].煤炭工程,2005(10):46-48.
LI Kemin, MA Jun, ZHANG Youdi, et al. Open cast method and its application prospect in surface[J]. Coal Engineering, 2005(10):46-48.
- [27] 张志,刘闯,薛应东,等.相邻露天矿境界重叠区边帮压煤协调开采技术[J].煤炭科学技术,2013,48(9):91-95.
ZHANG Zhi, LIU Chuang, XUE Yingdong, et al. Coordination mining technology of coal under side slopes in crossed limit area of two adjacent open pits[J]. Coal Science and Technology, 2013, 48(9):91-95.
- [28] 尚涛,才庆祥,刘勇,等.露天矿分区过渡期间合理开拓运输系统选择[J].中国矿业大学学报,2004,33(4):412-416.
SHANG Tao, CAI Qingxiang, LIU Yong, et al. Optimal selection of pit haulage system in the transition period for mining-in-areas[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(4):412-416.
- [29] 王桂林.黑岱沟露天煤矿与哈尔乌素露天煤矿协调开采方案研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2015.
- [30] 张润廷.宝日希勒露天煤矿开拓运输系统改造与优化研究

- [J].煤炭工程,2018,50(3):27-29.
ZHANG Runtong. Optimization and transportation of Baorixile Open-pit Mine development and transportation system[J].Coal Engineering,2018,50(3):27-29.
- [31] 白润才,付恩三,刘光伟,等.露天煤矿过无煤区留“岛”搭桥开采方案优化[J].重庆大学学报,2014,27(9):128-135.
BAI Runcai, FU Ensan, LIU Guangwei, *et al.* Optimization research on leaving an “island” and building a bridge through non-coal-zone in surface coal mine[J].Journal of Chongqing University,2014,27(9):128-135.
- [32] 马力,李克民,孙健东,等.抛掷爆破-拉斗铲倒堆工艺台阶采掘带宽度优化[J].煤炭学报,2017,42(11):2867-2874.
MA Li, LI Kemin, SUN Jiandong, *et al.* Optimization of mining panel width for stripping technology of blast casting-dragline working bench[J].Journal of China Coal Society,2017,42(11):2867-2874.
- [33] 高克智.露天矿冻土爆破技术探究[J].露天采矿技术,2013,28(3):24-25.
GAO kezhi. Exploration on blasting technology of frozen soil in open-pit mining[J].Opencast Mining Technology,2013,28(3):24-25.
- [34] 周永利,罗怀廷.端帮陡帮开采技术在哈尔乌素露天煤矿的应用[J].煤炭工程,2016,48(3):11-14.
ZHOU Yongli, LUO Huaiting. Application of steep end slope mining technology for Haerwusu Open-Pit Coal Mine[J].Coal Engineering,2016,48(3):11-14.
- [35] 尚涛,舒继森,才庆祥,等.露天煤矿端帮采煤与露天采排工程的时空关系[J].中国矿业大学学报,2001,30(1):27-29.
SHANG Tao, SHU Jisen, CAI Qingxiang, *et al.* Space-time relationship between end-slope coal extraction and dumping and mining of open-pits[J].Journal of China University of Mining & Technology,2001,30(1):27-29.
- [36] 周桐,甄选.中国露天煤矿装备发展现状与展望[J].露天采矿技术,2014,29(1):1-4,7.
ZHOU Tong, ZHEN Xuan. Present situation and prospect of equipment development in open-pit coal mines in China[J].Opencast Mining Technology,2014,29(1):1-4,7.
- [37] 史海平.GPS卡车智能调度系统在露天矿生产中的应用[J].露天采矿技术,2013,28(1):50-52.
SHI Haiping. Application of GPS truck intelligent dispatching system in open-pit mine production[J].Opencast Mining Technology,2013,28(1):50-52.
- [38] 何涛.卡车轮胎全寿命管理系统[J].露天采矿技术,2015,30(3):59-61.
HE Tao. Truck tire total life management system[J].Opencast Mining Technology,2015,30(3):59-61.
- [39] 张玉均,卢永芳,王晓卫.基于CAN总线及以太网的矿井排水系统智能化实践[J].煤矿机械,2016,36(4):274-277.
ZHANG Yujun, LU Yongfang, WANG Xiaowei. Intelligent design of mine drainage system based on CAN bus and Ethernet[J].Coal Mine Machinery,2016,36(4):274-277.
- [40] 韩新平,吴崇,王明君.基于物联网的露天矿智能爆破系统设计研究[J].金属矿山,2015(4):250-254.
HAN Xiping, WU Chong, WANG Mingjun. Design of intelligent blasting system in open pit mine based on internet of things[J].Metal Mine,2015(4):250-254.
- [41] 闫国斌,陶志刚,孙光林,等.边坡雷达在矿区边坡监测区域的应用分析[J].工业安全与环保,2015,41(10):57-60.
YAN Guobin, TAO Zhigang, SUN Guanglin, *et al.* Application analysis of slope stability radar in the mine slope monitoring risk area[J].Industry Safety and Environmental Protection,2015,41(10):57-60.
- [42] 杨秀芝,行舒乐,华文林,等.一种裂纹自动测量与监控的虚拟仪器设计[J].湖北理工学院学报,2017,33(5):1-4.
YANG Xiuzhi, XING Shule, HUA Wenlin, *et al.* Design of a virtual instrument for automatic crack measurement and monitoring[J].Journal of Hubei Polytechnic University,2017,33(5):1-4.
- [43] 余长超.胜利露天矿采场涌水综合治理[J].露天采矿技术,2015,30(3):59-61.
SHE Changchao. Comprehensive governance of gushing water in Shengli Open-pit Mine slope[J].Opencast Mining Technology,2015,30(3):59-61.
- [44] 徐开宇,李浩荡.基于瞬变电磁法的露天煤矿开采界内小窑采空区探测技术[J].煤矿安全,2013,44(7):95-97.
XU Kuaiyu, LI Haodang. A detection technology for small gob zones in open-pit mining area based on transient electromagnetic method[J].Safety in Coal Mines,2013,44(7):95-97.
- [45] 周永利,田露,米俊珍,等.准格尔露天矿“采-复-农-园”协同开发模式[J].资源节约与环保,2019(1)7-9.
ZHOU Yongli, TIAN Lu, MI Junzhen, *et al.* Cooperative development model of “Mining-Rehabilitation-Agriculture-Garden” in Zhungeer Open-pit Mine[J].Resources Economization & Environment Protection,2019(1)7-9.
- [46] 栗嘉彬.露天矿采-排-复一体化应用技术及效果评价研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
- [47] 马从安,才庆祥,韩可琦,等.基于SD的露天矿生产与生态重建一体化系统模型[J].中国矿业,2004,13(4):45-47.
MA Congan, CAI Qingxiang, HAN Keqi, *et al.* The SD-based model of unification system of open-pit mine production and ecological reconstruction[J].China Mining Magazine,2004,13(4):45-47.
- [48] 胡振琪.我国土地复垦与生态修复30年:回顾、反思与展望[J].煤炭科学技术,2019,47(1):25-35.
HU Zhenqi. The 30 years' land reclamation and ecological restoration in China: review, rethinking and prospect[J].Coal Science and Technology,2019,47(1):25-35.