

# 露天煤矿安全-绿色-高效-低碳协同开采技术体系

白润才<sup>1</sup>, 付恩三<sup>1,2</sup>, 马 力<sup>3</sup>, 赵 浩<sup>4</sup>, 柴森霖<sup>5</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 应急管理部信息研究院, 北京 100029; 3. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 4. 应急管理部研究中心, 北京 100013; 5. 盐城工学院 经济管理学院, 江苏 盐城 224051)

**摘 要:** 露天煤矿安全绿色高效低碳开采是全球露天煤矿发展的共识性目标。我国露天煤矿资源开发强度与生态承载力呈现逆向发展特征, 我国西北部生态环境脆弱区已成为露天煤炭的主产区, 使得露天煤矿开采与生态环境保护成为亟需解决的重要科学问题、生态问题和发展问题。基于我国露天煤矿发展概况、自然条件及主要影响因素, 阐释了实现露天煤矿安全-绿色-高效-低碳开采内涵特征与总体架构, 针对露天煤矿采前-采中-采后全生命开采周期特点, 从安全开采技术、绿色开采技术、高效开采技术、低碳开采技术4个层次, 归纳总结了时效边坡控制技术、智能预警决策技术、运输环节新模式、矿区生态建设、相邻矿山协调开采、智能采矿设计、电动矿卡应用以及采矿源头生态减损8项关键技术, 明确了露天煤矿安全-绿色-高效-低碳协同开采研究重点工作和方向。在安全-绿色-高效-低碳协同发展措施方面, 从强化顶层设计、加快分布实施、深化科研攻关、提升人才培养以及完善标准规范5个方面, 提出2025年、2030年、2035年不同阶段需要完成的目标任务。新时期露天煤矿要坚定不移走安全-绿色-高效-低碳发展路径, 实现露天煤矿在新时期、新格局下的高质量发展目标。

**关键词:** 露天煤矿; 安全绿色; 架构体系; 低碳开采; 环境保护

**中图分类号:** TD804 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)01-0298-11

## Collaborative mining technological system of safety-green-high efficiency-low carbon for open pit coal mine

BAI Runcai<sup>1</sup>, FU Ensan<sup>1,2</sup>, MA Li<sup>3</sup>, ZHAO Hao<sup>4</sup>, CHAI Senlin<sup>5</sup>

(1. School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Information Institute, Ministry of Emergency Management of the PRC, Beijing 100029, China; 3. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 4. Research Center of Emergency Management Department, Beijing 100013, China; 5. School of Economics and Management, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

**Abstract:** The safe, green, efficient and low-carbon coal mining is the common goal of surface coal mines around the world. The development intensity and ecological carrying capacity of surface coal mine resources in China show the reverse development characteristics, and the vulnerable ecological environment areas in northwest China have become the main surface coal production areas, which makes surface coal mining and ecological environment protection become important scientific problems, ecological problems and development problems to be solved urgently. On the basis of the development situation, natural conditions and main influencing factors of surface coal mines, the connotation characteristics

收稿日期: 2023-11-02 修回日期: 2024-02-04 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1433

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (51974144, 52374123); 公共安全与应急管理研究中心前期资助项目 (YG2022A12)

作者简介: 白润才 (1961—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 教授, 博士生导师。E-mail: bairuncai@126.com

通讯作者: 付恩三 (1988—), 男, 辽宁岫岩人, 工程师, 博士研究生。E-mail: 429001709@qq.com

引用格式: 白润才, 付恩三, 马力, 等. 露天煤矿安全-绿色-高效-低碳协同开采技术体系[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 298-308.

BAI Runcai, FU Ensan, MA Li, et al. Collaborative mining technological system of safety-green-high efficiency-low carbon for open pit coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 298-308.



移动阅读

and overall structure of realizing the safe-green-efficiency-low-carbon mining of surface coal mines were explained. Aiming at the characteristics of the whole life cycle of pre-mining, mid-mining and post-mining of surface coal mines, in terms of four levels: safe mining technology, green mining technology, efficient mining technology and low-carbon mining technology, this paper puts forward eight key technologies including the time-limited slope control technology, the intelligent early warning decision-making technology, the new mode of transportation link, the ecological construction of mining area, the coordinated mining of adjacent mines, the intelligent mining design, the application of electric mining trucks and the ecological damage reduction at mining sources. The key work and direction of safe-green-high efficiency-low carbon cooperative mining in surface coal mines are clarified. In terms of the measures of safety-green-efficiency-low carbon co-development, regarding strengthening a top-level design, accelerating the distributed implementation, enhancing key researches, promoting personnel training, and improving standards and regulations, the paper proposes the target tasks to be accomplished in different stages in 2025, 2030 and 2035. In the new era, surface coal mines should firmly follow the development path of safe-green-high efficiency-low carbon, and realizes the high-quality development goal of surface coal mines.

**Key words:** Keywords: surface coal mine; safe and green; frame system; low-carbon mining; environment protection

截至 2022 年底,我国露天煤矿的产量约为 10.57 亿 t,相较于 2003 年的 0.8 亿 t,增长了 13.21 倍,全年累计剥采量达到 72 亿 m<sup>3</sup> 左右,全国正常生产建设露天煤矿每天约有 3 万台采掘运输设备生产运行。在如此高产能、高设备数量、高土地开挖与征占、高生态扰动的条件下,单一的、落后的开采方式和开采理念不再适应新时代的露天煤矿发展。因此,理应深入开展研究现代露天煤矿安全绿色高效低碳协同开采技术体系,在保证安全和保护生态的前提下,推广应用新装备、新技术、新工艺、新开采理念<sup>[1-3]</sup>,在“双碳”背景下全面实现露天煤矿全生命周期内的科学开采和提升露天煤矿整体安全水平<sup>[4-5]</sup>。现代化露天煤矿建设发展是以全面落实习近平总书记关于能源安全、绿色低碳和煤炭行业的一系列重要论述和指示批示精神为纲领,以“生态优先,绿色发展,安全高效,清洁低碳”为目标。在我国露天煤矿百年的发展进程中,可归纳为旧中国时期、起步恢复期、加速发展期、全面壮大期以及新时代下的智能化阶段。百年进程中,露天采煤人不断创新设计理念、变革开采工艺、持续科技投入、致力安全管控、强化生态一体化规划,取得了一系列成就,在露天煤矿开采工艺、智能化规划建设、边坡控制、透明地质以及生态环保技术应用等方面取得了一系列研究成果<sup>[6-8]</sup>。如何实现露天煤矿生态平衡圈、实现矿区资源和环境承载力相协调,从开采源头上,减污、扩绿、低碳、智能高效协同发展,充分发挥露天煤矿产能调节的弹性和韧性,为我国未来露天煤矿绿色可持续发展提供理论支撑和借鉴具有重要意义。

笔者是在已有研究基础上,充分调研全国 62 处大型、特大型露天煤矿以及 100 余处中小型露天煤矿

的生产现状的基础上,总结凝练当前露天煤矿面临的主要问题,结合当前“双碳”和矿山智能化建设大背景,梳理研究露天煤矿安全-绿色-高效-低碳条件下的技术架构体系(“安全(Safety)、绿色(Green)、高效(Efficient)、低碳(Carbon)”),总结现代露天煤矿安全-绿色-高效-低碳协同开采内涵及特征、关键技术体系,并提出安全-绿色-高效协同开采发展趋势,为我国露天煤矿今后高质量发展提供支撑。

## 1 露天煤矿发展概况及影响因素

### 1.1 露天煤矿发展概况

#### (1) 基础信息情况。

截至 2022 年底,全国有露天煤矿 356 处,核定生产能力约为 11.55 亿 t,见表 1。露天煤矿煤种以褐煤、长焰煤、不黏煤和弱黏煤为主。新中国成立至今,露天煤矿主产区由东北转向西北,产量及分布如图 1 所示。

表 1 全国露天煤矿数量及产能情况

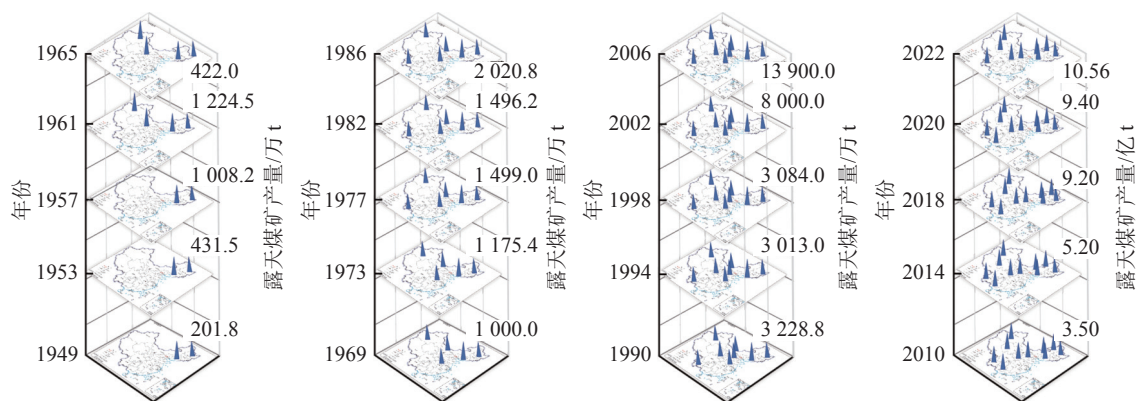
Table 1 Basic information of open-pit coal mines in China

煤矿井型	数量/处	核定产能/Mt	产能占比/%
特大型	17	471	40.74
大型	45	389	33.69
中型	117	201	17.42
小型	177	94	8.15
合计	356	1 155	100

注:数据来自国家矿山局网站。

#### (2) 生产工艺情况。

我国露天煤矿剥离以单斗-卡车间断工艺为主,



注: 审图号 GS(2019)1823 号, 自然资源部监制, 未改底图。

图 1 1949—2022 年我国露天煤矿产量及分布变化

Fig.1 Production capacity and distribution change chart of opencast coal mine in our country of 1949—2022

少数露天煤矿部分剥离物采用半连续工艺和连续工艺;大型特大型露天煤矿采煤以半连续工艺为主,中小型露天煤矿采煤以单斗-卡车间断工艺为主<sup>[9-11]</sup>。从开采工艺可知,目前露天煤矿存在开采工艺单一、外包设备小型化、燃油消耗大等问题。

### (3) 安全生产情况。

相较于井工煤矿来说,露天煤矿整体安全性较好,但近年来也发生了如新井露天煤矿特别重大坍塌事故,给安全生产敲响警钟。从露天煤矿标准化建设情况来看,正常生产建设的 257 处煤矿中,一级标准化煤矿 33 处 (12.84%),二级标准化煤矿 131 处 (50.97%),三级标准化煤矿 47 处 (18.29%),未评定 46 处 (17.90%)。正常生产建设露天煤矿中,标准化煤矿 211 处,占比为 82.10%,仍需进一步提升露天煤矿标准化建设比例,特别是提升一级标准化露天煤矿数量。(注:数据来自国家矿山局网站)

### (4) 绿色矿山情况。

绿色矿山建设方面,截至 2020 年,全国 953 处矿山纳入全国绿色矿山名录,黑岱沟、安家岭、西湾等 18 处露天煤矿纳入全国绿色矿山名录。露天煤矿绿色矿山建设,取得了显著成效,但整体绿色矿山数量少,占比仅为全国露天煤矿数量的 5%,绿色露天煤矿建设仍需要解决关键技术问题。

### (5) 智能化建设情况。

智能化建设方面,首批 71 家智能化示范矿山中,有 5 家为露天煤矿,2023-12-25 国家能源局公布国家智能化示范煤矿 (第 1 批) 共计 47 处,其中 5 处露天煤矿处于智能化中级水平。全国已有 30 余处露天煤矿开展无人驾驶技术应用,300 余台无人驾驶车辆在露天煤矿试验研发应用,大型特大型露天煤矿开展无人内外业测量工作,露天煤矿智能化装备应用已达

到 500 余台套。当前露天煤矿智能化建设呈现不平衡局面,大型特大型露天煤矿开展无人驾驶、无人机测量、智能机器人巡检、智能钻爆、无人值守、远程控制等智能化装备与技术应用,而小型露天煤矿智能化建设主要停留在数据采集、存储与统一集中展示方面。总体分析来看,露天煤矿智能化建设取得了积极进展,但在生产辅助决策方面能力较弱。

## 1.2 自然条件分析

当前,我国露天煤矿区主要分布在山西、内蒙古、新疆、云南等地,资源赋存呈现出非均布的地域特性<sup>[12-13]</sup>。露天煤矿所在地属干旱、荒漠、高原以及草原地带,分布区域干旱少雨,整体生态属脆弱区,生态弹性力小<sup>[14-15]</sup>。全国适合露天煤矿开采的地质储量约为 1 800 亿 t,可采储量约为 1 000 亿 t。露天煤矿资源量约占全国煤炭资源量的 10% 左右。

## 1.3 露天煤矿发展的主要影响因素

(1) 矿权及境界划分衍生问题。露天煤矿边坡特点影响地表与深部境界形态,而同矿权相邻露天煤矿或境界划分过程时按地表与深部同境界大小圈定,导致露天煤矿在开采过程中存在地表境界重叠或端帮压煤问题<sup>[16-17]</sup>。同时,露天煤矿境界形态影响采区划分与剥采均衡,非规则境界容易造成内排紧张与生产组织困难,进而引起矿山安全生产等问题。需要政府、企业、设计单位、行业协会等多方协同发力,从源头上进行资源整合和总体规划。

(2) 征地难、内排利用不充分。现行的用地政策和用地指标存在不同步,导致露天煤矿可用地严重短缺。征地问题严重制约露天煤矿均衡生产,征地滞后将直接导致露天矿出现采剥失调,一旦取得征地,煤矿企业又将抢工期、赶进度,加大推进强度,给安全生产带来一定压力;与此同时,我国水平、近水平露天煤



矿内排空间利用不充分,导致剥离物大量外排,加之  
外排征地难,导致露天煤矿内排关系紧张<sup>[18-19]</sup>。

(3) 智能化关键技术尚未突破。露天煤矿路网系统优化算法研究、露天煤矿生产组织精准调度、露天煤矿开采方案辅助决策等内容仍未取得关键性进展,在边坡监测预警模型、设备故障模型、运输道路模型优化更新方面,仍需要进一步加强基础理论研究<sup>[20-22]</sup>。

(4) 专业技术型人才不足。露天开采与井工开采在开采技术上存在本质区别, 专业技术型人才是优化开采设计、辨识生产安全风险的重要保障。露天开采专业技术型人才培养数量少、到露天煤矿就业比例小, 且更多关注大型国有企业, 中小型企业及所属小型露天煤矿或民营露天煤矿缺少吸引力, 导致缺少专业技术人才。

## 2 安全-绿色-高效-低碳协同开采内涵特征

露天煤矿安全-绿色-高效-低碳内涵为:安全高效发展理念是方向引领、可持续绿色发展理论是理论

基础、创新是核心驱动力、低碳统筹协调是机制保障的绿色低碳转型理论逻辑。

露天煤矿安全-绿色-高效-低碳总体目标是实现可持续发展人与矿区自然和谐共生,建设安全高效技术与新发展理念协同的现代化露天煤矿。露天煤矿安全-绿色-高效-低碳总体架构分成4层,自下而上依次是安全、绿色、高效、低碳。安全是整体的基础,是架构的底层支撑,在建设安全-绿色-高效-低碳的整个环节中,需要保证生产环节中的人员安全、矿工安全、职业卫生安全;绿色涵盖开发之前的绿色勘探、绿色规划和绿色设计;生产之时的环境监测、排土规划、水源治理、协同复垦、电转油替代等内容,闭坑之后的循环经济发展、土壤保护、矿区持续监测与复垦等内容;高效包括先进的开采理念、生态理念、治理理念、开采方法、工艺技术以及开采装备;低碳内容是在露天煤矿生产环节形成新的低碳环节,形成露天煤矿各环节新动能,最终形成露天煤矿融合发展新模式。安全-绿色-高效-低碳总体架构如图2所示。

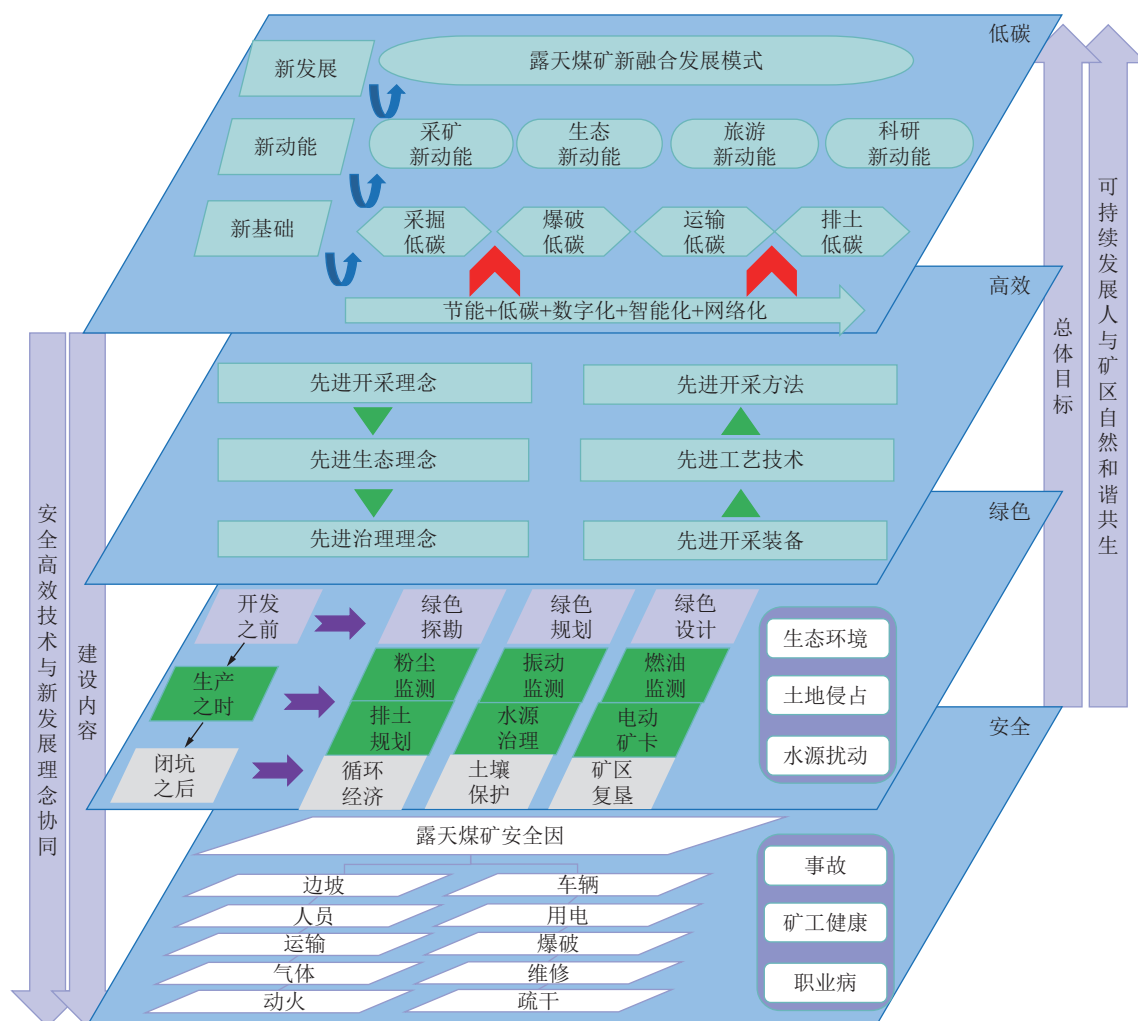


图2 安全-绿色-高效-低碳总体架构

Fig.2 Safety-Green-Efficient-Carbon architecture

### 3 安全-绿色-高效-低碳协同开采技术体系

我国露天煤矿安全-绿色-高效-低碳开采是需要依靠智能化技术以及新型的开采工艺来实现,结合当前国内学者研究与工程效果应用情况,笔者从安全开采技术、绿色开采技术、高效开采技术、低碳开采技术 4 个层次,归纳总结了时效边坡控制技术、智能预警决策技术、运输环节新模式、矿区生态建设、相邻矿山协调开采、智能采矿设计、电动矿卡应用以及采矿源头生态减损 8 项关键技术。但仍要清醒的认识,实现露天煤矿安全-绿色-高效-低碳协同开采紧紧依托上述 8 项关键技术是远远不够的,露天煤矿在今后发展过程中要不断创新工作方法与工作模式,充分结合我国能源结构、充分发挥露天煤矿优势特点,不断提升露天煤矿整体效能。

#### 3.1 安全开采技术层

##### 3.1.1 时效边坡控制开采技术

边坡是露天煤矿的重要组成部分,边坡的稳定与否直接影响露天煤矿安全生产与平稳接续。由于边坡的服务年限不同、地质条件不同、暴露周期不同,采场边坡同一方向的边坡稳定边坡角也存在一定差异<sup>[23-25]</sup>。在对露天边坡的时效稳定性进行分析时,需

要充分考虑边坡中软弱岩体随时间发生蠕变的过程中力学参数逐渐被弱化的性质,根据边坡时效稳定性分析结果动态调整边坡岩体的暴露时间,保证边坡在暴露时间内保持稳定。边坡控制开采技术需要对边坡岩体进行地质构造的深度分析,充分结合采矿设计方案,来对边坡进行治理。控制开采技术包括对局部边坡削坡压脚、对边坡采取锚索、锚网、抗滑桩等措施进行加固。结合边坡三维空间形态及采矿设计开采方案,基于连续介质力学的离散元等方法,揭示边坡角与边坡位移关系,以此来指导露天煤矿安全生产。

##### 3.1.2 智能预警决策分析技术

针对露天煤矿面临的边坡、设备碰撞、采空区等安全问题,建立智能监测预警与专家决策分析系统,实现边坡超前预警以及关键设备的健康监测与故障诊断。根据露天煤矿的监测预警等相应业务应用,实现对露天煤矿多源异构数据进行 flink、Kafka 等方式采集、存储以及数据共享,数据存储以及数据共享。露天煤矿灾害风险数据类型、使用模式、业务场景,结合数据标准体系,在数据资源存储池中建立原始库、资源库、主题库、专题库、配置库等实体库,灾害数据共享服务架构如图 3 所示。

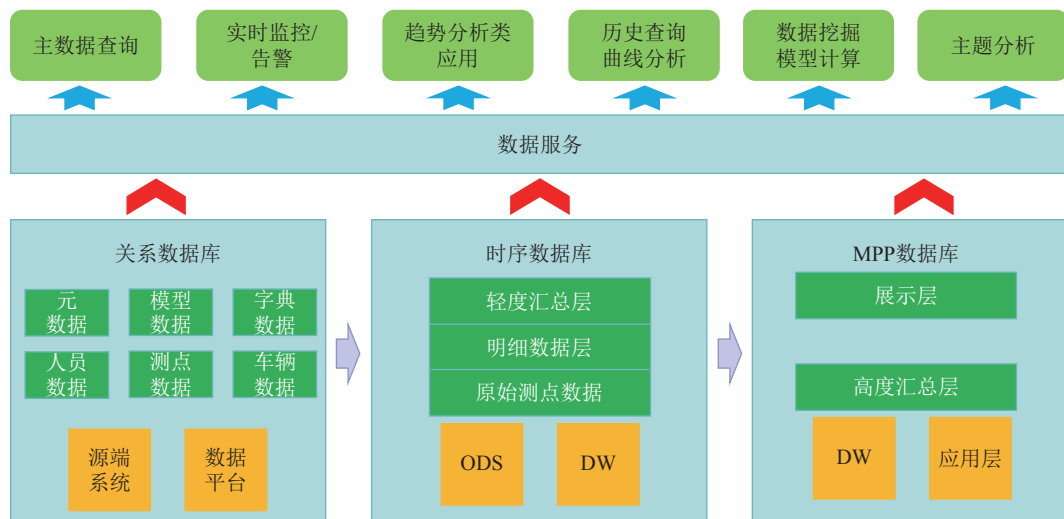


图 3 露天煤矿灾害数据共享服务架构

Fig.3 Open-pit coal mine disaster data sharing service architecture

利用大数据、信息化、智能化技术提高事故风险监测预警精度,同时,针对异常风险,进行预警信息的处置和闭环管理。

#### 3.2 绿色开采技术层

##### 3.2.1 创新矿山运输的新模式

优化运输系统、降低运输距离,创新运输方式,是解决深凹露天煤矿运输距离长、运输道路转弯多等问

题的有效方法。在露天煤矿运输方式上,煤炭科研高校、矿山企业不断创新思路和方法,提出运输新模式,形成了以大倾角轨道提升运输关键技术、可移式桥梁技术、卡车与原煤胶带刚波纹管立交技术、原煤与剥离运输箱涵立交、原煤卡车与原煤胶带钢桥立体交叉、坑内运输排土桥以及长距离胶带等新型运输方式。运输新模式的提出,主要为降低运距、提高运输效率、

降低运输成本,避免剥离与采煤运输环节道路交叉,实现运输环节的绿色化<sup>[26-28]</sup>。新型运输方式如图4所示。

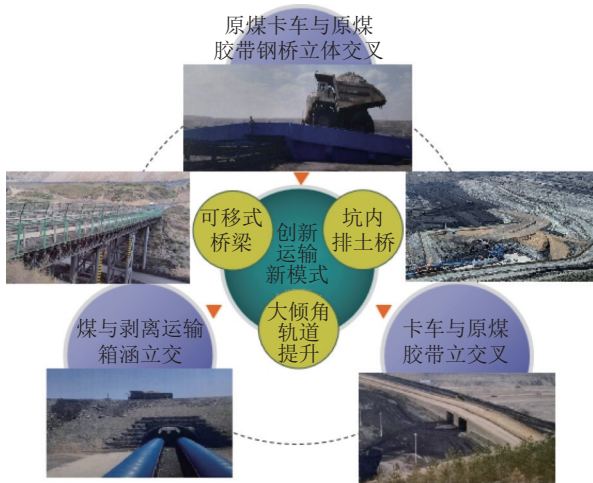


图4 创新运输新模式

Fig.4 Innovating new modes of transportation

### 3.2.2 矿区生态建设关键技术

坚持生态优先,全生命周期的协同发展体系,在资源开发与环境保护上下功夫,坚持清洁低碳,着力培育转型升级的新赛道,推动煤炭转型升级,形成和谐共生,互惠互利的生态融合发展新局面。

矿区生态建设要从生态全要素(水、土、大气、植被、景观)角度出发,重点解决草原地区土地复垦、植被恢复、灌草灌木牧草种植,加强对矿区地下水监测、粉尘监测、抑尘技术以及土壤微生物再造、矿区大气监测、矿区整体景观修复与再造等技术研究。对地表需要改道河流进行改道后河道稳定性、渗透性研究,促进露天煤矿生产向“开采方式科学化、资源利用集约化、企业管理规范化、生产工艺环保化、矿山环境生态化”方式转变,实现露天煤矿资源效益、环境效益和社会效益的协调统一,进一步推动露天矿区生态建设<sup>[29-32]</sup>,如图5所示。



图5 排土场复垦效果

Fig.5 Effect map of reclamation in dump

## 3.3 高效开采技术层

### 3.3.1 相邻矿山协调开采技术

露天煤矿开发规划原因导致同一矿权内,相同矿权人和不同矿权人的相邻露天煤矿端帮压煤严重,由

于相邻露天煤矿时空位置关系的差异性,当相邻煤矿同时内排压帮时,造成矿权内相邻露天煤矿永久压煤,并未达到资源合理高效开发的目标<sup>[33]</sup>。因此,回收露天煤矿端帮煤、治理露天煤矿端帮煤是露天煤矿需面对和解决的问题。相邻露天煤矿压煤如图6所示。

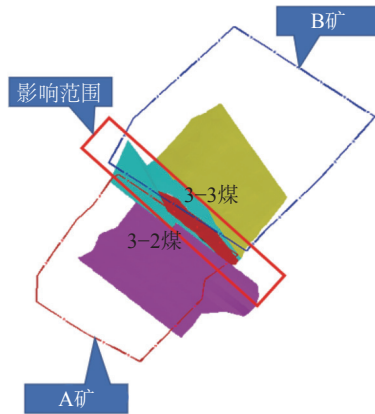


图6 相邻露天煤矿端帮压煤

Fig.6 Adjacent open pit coal mine end slope coal

针对已经进行开采的相邻露天煤矿,需要结合各自开采情况,进行协调开采全流程技术研究,确定相邻煤矿的影响范围、压煤量、剥采比等;研究端帮贯通程序及贯通期间端帮边坡的稳定性,内排土场稳定性等;优化贯通采场后的运输路线,优化研究采运排物料流分配机制;建立资源回收经济置换的分配机制,对相邻端帮回采资源按照当年售价、成本进行当年、当量折算分配补偿<sup>[34]</sup>。相邻露天煤矿协调开采流程如图7所示。

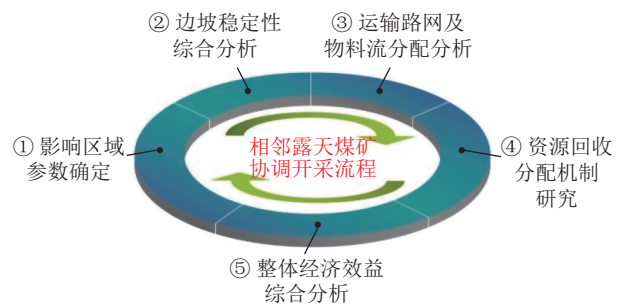


图7 相邻露天煤矿协调开采流程

Fig.7 Coordinate mining process in adjacent open pit mines

### 3.3.2 智能露天煤矿采矿设计

可视化、稳定化的采矿设计软件平台研发应用是提高矿山生产设计效率的重要手段。依托无人机影像数据来进行露天煤矿测量和采矿设计,使得采矿设计环节效率大幅提升。无人机影像数据,可实现采场现状台阶线的快速提取,以无人机DEM影像,叠加CAD现状图,应用布尔运算等算法,融合采矿设计任务功能,实现高效率出图和提升设计环节的可视化效



果。通过导入无人机 DEM 影像数据,在影像图中,任意绘制开采区域,根据开采范围业务需求,快速给出采动区域量,通过拾取封闭区域线,同时考虑设计的帮坡角以及开采逻辑关系,将封闭区域与无人机进行布尔运算,实现采动区域的快速算量<sup>[35-36]</sup>。对短期计划各设备的采动范围循环往复依进行计算后,短期计划以更加直观的方式呈现,提升采矿设计效率、设计环节的执行率以及设计与生产的贴合度,无人机短期计划效果如图 8 所示。



图 8 短期计划开采效果

Fig.8 Effect chart of short-term planned mining

### 3.4 低碳开采技术层

#### 3.4.1 电动矿卡替代技术

通过研发应用电动矿卡替代燃油矿卡运输,降低运输环节的燃油消耗和碳排放,变革运输环节的绿色、低碳模式。为实现电动矿卡运输过程的电力供应平稳,需要对电动矿卡的换电站进行合理化建设和部署。通过分析国内某大型露天煤矿电动矿卡 1 a 来的电动矿卡和燃油车数据,得到如下数据:①通过对电动矿卡实施应用,90 t 级电动矿卡,日平均换电 8 次,每次平均换电时间 7~9 min,电池满电情况下平均运行 4 次,每次平均运行时间 50 min(运距在 3.5 km 左右,重载下坡);②电动矿卡出运率是柴油车的 92.49%;③电车能源费用约为柴油车的 30% 左右;④每年单台电动矿卡可减少二氧化碳排放量约 1 100 余 t。电动矿卡现场运行如图 9 所示。露天煤矿探索新的运输方式和新的运输工艺、新的动力来源,实现运输环节的低交互、低运距、低污染、高效率。

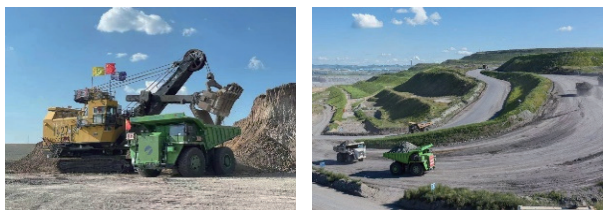


图 9 电动矿卡平稳运行

Fig.9 Electric ore card runs smoothly

#### 3.4.2 采矿源头生态扰动减损技术

露天煤矿采矿源头生态扰动减损技术是贯穿露

天煤矿开采之前、生产之时以及闭坑之后的全过程,需要兼顾开采设计、采矿整体开采过程、闭坑管理全程中的工艺、装备、边坡、开采参数、开采程序、开拓运输系统、总平面布置等多方面开展协同研究。本文以影响采区接续开采时的短工作线方式和提升资源回收的选采技术为例,进行介绍。

(1) 探索短工作线转向技术。水平近水平露天煤矿采用单斗卡车间断开采工艺条件下,露天煤矿相邻采区转向期间的矿山接续工程。通过调整矿山开采的局部工作线长度和矿山开采工作线推进速度等关键参数,优化矿山时空开采位置关系,解决了露天煤矿相邻采区转向期间的内排空间不足、运距大、成本高、外排占地开采扰动大的问题。具体降低扰动,工程流程如图 10 所示(图中,  $h$  为标高)。

(2) 实施煤层精准选采技术。根据露天煤矿煤层特点,研究优化煤层爆破方式,通过优化采煤程序,降低选采过程中煤岩交界处的矸石混入,通过选采提升煤炭采出率,降低煤炭损失。从开采源头实现低碳开采与生态减损。

## 4 安全-绿色-高效-低碳协同开采发展措施

在当前的露天煤矿发展进程中,需要分级分类推动露天煤矿安全-绿色-高效-低碳向纵深发展,到 2035 年全国露天煤矿要实现“三领先+十个百分百”的特征衡量指标。“三领先”即安全管理水平达到国际领先水平;露天煤矿原煤生产人员效率达到国际领先水平,吨煤能耗达到国际领先水平;“十个百分百”即排土场复垦率 100%、原煤入洗率 100%、污水处理率 100%、煤矸石利用率 100%、水土流失治理率 100%、土壤重构率 100%、煤炭分区治理率 100%、边坡智能监测接入率 100%、采空区精准探测实施率 100%、小型设备电动替代率 100%。

在建设过程中要以规划为先,以开采少扰动、快重构,生产高效化、管理智能化为实施过程目标。要形成露天煤矿安全-绿色-高效-低碳科学开采发展措施,围绕露天煤矿安全-绿色-高效-低碳技术体系不健全,需要开展工艺的可适性分析、时效边坡的稳定性分析、矿区生态时空动态复垦以及露天煤矿监测预警等关键技术难题深入分析研究,深入结合矿山大数据、机器学习等先进技术手段,实行一矿一策的技术手段/方法,协同运用新的创新技术,实现露天煤矿安全-绿色-高效-低碳跨越式发展,其发展措施主要包括顶层设计、分步实施、科研攻关、人才培养以及标准规范 5 部分内容,形成安全-绿色-高效-低碳关键技术体系,如图 11 所示。

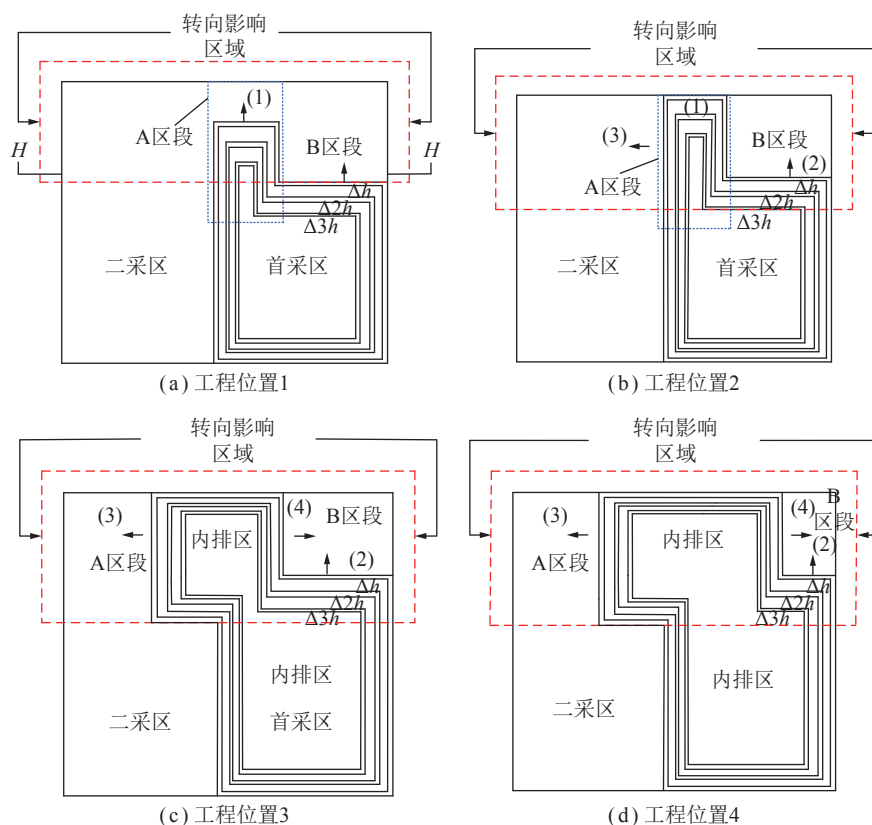


图10 短工作线转向流程

Fig.10 Short work line steering flow

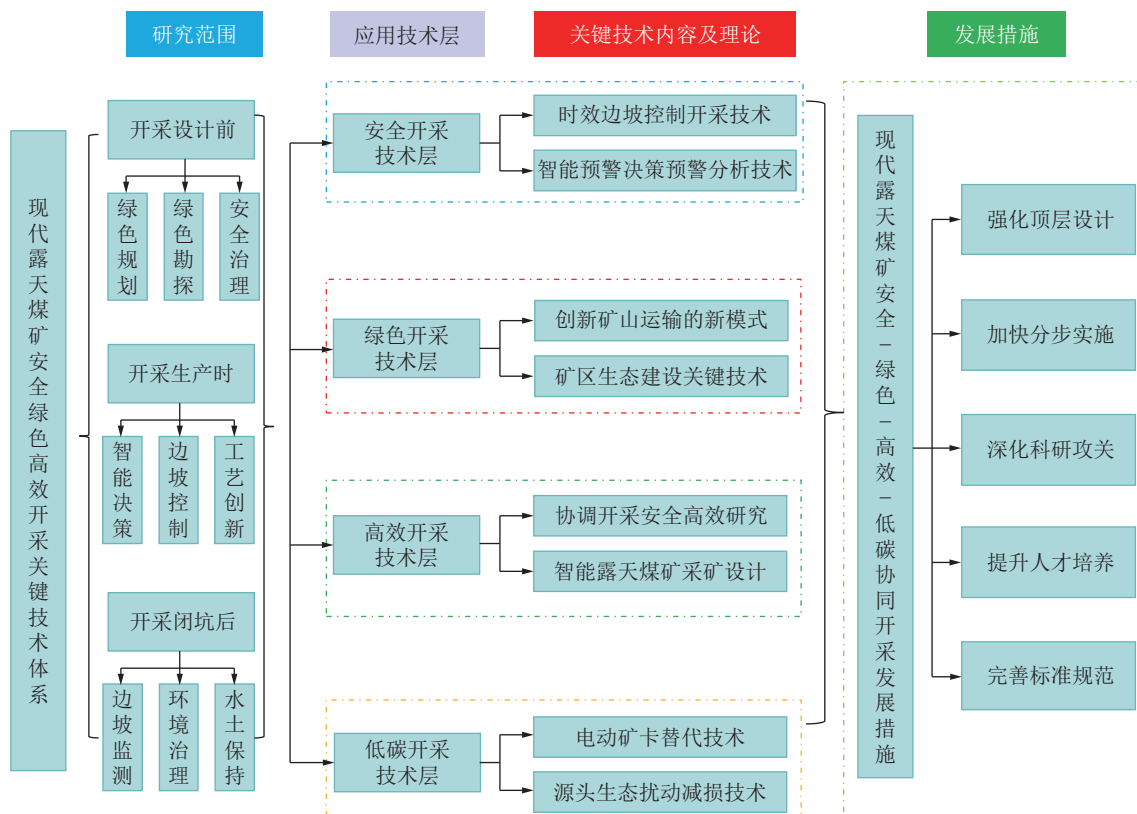


图11 现代露天煤矿安全绿色高效开采关键技术体系

Fig.11 Key technology system of safe, green and efficient mining in modern open-pit coal mine



#### 4.1 顶层设计的强化

露天煤矿安全-绿色-高效-低碳顶层设计首先要坚持统筹发展和安全,坚持系统观念,坚持发展和安全并重,实现高质量发展和高水平安全的良性互动,要以注重规划的整体性和科学性为重点,统筹开采之前、开采之时、闭坑之后的全生命周期建设,统筹“矿区-生态-开采”之间关系,着力提升露天煤矿在安全绿色高效低碳方面的关键技术应用,有力支撑我国露天煤矿高质量发展。到2025年,建立煤矿企业、行业协会、科研院所、政府部门多级协同工作机制,明确各方职责和工作重点,鼓励设计单位、设备厂家、矿山企业创新合作模式,组建“产学研用”一体化模式,形成多方合力协同推动露天煤矿高质量发展。再利用5a时间,2030年实现露天矿区重新规划,制定中小型露天煤矿整合机制,形成大矿区、超大型露天煤矿规划。

#### 4.2 分步实施的加快

在“双碳”背景下,要实现露天煤矿安全-绿色-高效-低碳开采,需要制定整体的实施步骤。露天矿发展规划时间表是基于国家政策、行业发展、装备制造等多因素综合而成,因此,笔者给出未来10a的整体发展规划,主要分成3个阶段,即2025年、2030年和2035年。对于全国356处露天煤矿,需要进行分级分类研究,从生产能力、开采深度、灾害情况等方面进行分级分类,采取分步实施方式。

到2025年,从生态脆弱区和黄河流域功能区出发,构建全链条的绿色发展,深度融合绿色设计、勘探、清洁利用等方面,首先在大型特大型露天煤矿开展技术应用研究,从地质模型、采空区探测、工艺可适应分析、边坡治理、智能化系统建设、生态环境保护等方面进行全面先行试点示范。中小型露天煤矿全部实现边坡治理与联网、重大风险隐患联网、生态复垦等方面工作;

到2030年,实现新疆地区露天资源规划、深部开采研究、世界级超大型露天煤矿开发利用、综合性工艺示范应用,部分小型露天煤矿逐步退出,露天煤矿安全-绿色-高效-低碳常态化效果评价和治理效果评估考核评价体系建成;

到2035年,全国露天煤矿产能达到15亿t,大型特大型露天煤矿数量控制在100处左右,小型露天煤矿全部退出,“三领先+十个百分百”目标全部实现。

#### 4.3 科研攻关的深化

到2030年,攻克露天煤矿重大灾害演化孕育机理与风险防控关键技术。提升重大灾害事故精密监测、精确预警、精准防控技术水平,揭示滑坡事故的孕

育-发生-发展-灾变机理。建立采矿源头低碳减损技术应用,实现露天煤矿剥采排调度和物料流智能分配及路径算法研究。到2035年,实现采运排环节的重大技术装备自主研发,攻克连续性工艺系统应用,支撑露天煤矿工艺装备现代化。

#### 4.4 人才培养的提升

不断壮大人才队伍,营造创新生态环境,鼓励地方政府、企业、高校实施产教融合。充分发挥人才第一资源的作用,不断健全创新人才培养体系,加强露天煤矿复合型人才培养。从现阶段开始,每年形成本科生60~80人的培养规模,硕、博研究生30~40人的培养模式,持续为露天煤矿、设计院所、科研单位年输送100人的专业化人才队伍。到2030年,形成培养专业化、高素质、综合化千人人才队伍目标。持续为企业注入创新人才新动能。与此同时,发挥企业创新主体作用,强化产学研深度合作,完善人才评价激励措施,持续激发科技人才创新活力,督促企业保障相关专业人才待遇,并协调高校与企业加强合作,共建品牌专业。造就一批高水平的战略科技人才、科技领军人才、工程技术人才和创新团队,培养具有国际竞争力的青年科技人才后备军。

#### 4.5 标准规范的完善

到2025年,完成国家层面的露天煤矿安全-绿色-高效-低碳相关标准框架体系的制定工作,如露天煤矿草原区排土场植被恢复、露天煤矿区灌草灌木牧草等技术标准、闭坑后露天煤矿生态恢复技术、露天煤矿重大隐患、露天煤矿智能化建设、技术装备、劳动组织等,到2030年,完成安全-绿色-高效-低碳标准体系编制实施应用工作,以标准化促进露天煤矿安全-绿色-高效-低碳建设。

### 5 结 论

(1) 总结分析了当前我国露天煤矿发展概况、地域分布特征;从矿权及境界划分衍生问题,征地难、内排利用不充分,智能化关键技术尚未突破,专业技术型人才不足等方面分析制约露天煤矿发展的主要因素。

(2) 以可持续发展人与矿区自然和谐共生的安全绿色高效低碳为发展总体目标,归纳总结了露天煤矿安全-绿色-高效-低碳含义内涵、总体架构、开采特征以及开发之前,生产之时和闭坑之后的关键技术体系。

(3) 以“重规划、少剥离、强内排、短运距”为原则,以开采过程少扰动、扰动环节快重构、生产环节高效能、管理环节智能化为目标,提出了露天煤矿安全-绿色-高效-低碳建设中安全开采层、绿色开采层、高效

开采层以及低碳开采层4个方面的关键技术。

(4)提出了从顶层设计、分步实施、科研攻关、人才培养和标准规范5个方面探讨研究露天煤矿安全-绿色-高效-低碳今后发展措施和发展目标,为我国露天煤矿高质量发展提供参考。

## 参考文献(References):

- [1] 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,2014,37(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, 37(9): 128-135.
- [2] 白润才,白文政,刘光伟,等.倾斜煤层窄长形露天矿横采内排分期境界优化[J].煤炭学报,2017,42(10):2601-2608.  
BAI Runcai, BAI Wenzheng, LIU Guangwei, et al. Installment boundary optimization of cross exploitation and inner dumping in the inclined coal seam narrow elongated open-pit mine[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2601-2608.
- [3] 钱鸣高,许家林,王家臣.再论煤炭的科学开采[J].煤炭学报,2018,43(1):1-13.  
QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen. Further on the sustainable mining of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 1-13.
- [4] 张幼蒂.现代露天开采技术国际发展与我国露天采煤前景[J].露天采矿技术,2005(3):1-3.  
ZHANG Youdi. International development of advanced surface mining technology and the prospect of surface mining in China[J]. Open-cast Mining Technology, 2005(3): 1-3.
- [5] 刘峰,郭林峰,赵路正.双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J].煤炭学报,2022,47(1):1-15.  
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1-15.
- [6] 王家臣,王忠鑫,王卫卫,等.露天矿开采扰动效应:概念、特征与评价指标体系框架[J].煤炭学报,2017,42(S2):295-301.  
WANG Jiachen, WANG Zhongxin, WANG Weiwei, et al. Disturbance effect of open-pit mine: concept, characteristics and evaluation index system framework[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S2): 295-301.
- [7] 田会,王忠鑫.露天开采对环境的扰动行为及其控制技术[J].煤炭学报,2018,43(9):2416-2421.  
TIAN Hui, WANG Zhongxin. Disturbance behavior of open-pit mine on environment and its control technology[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2416-2421.
- [8] 付恩三,白润才,刘光伟,等.“双碳”视角下我国露天煤矿的绿色可持续发展[J].科技导报,2022,40(19):25-35.  
FU Ensan, BAI Runcai, LIU Guangwei, et al. Countermeasures and thinking of green and sustainable development of open-pit coal mines in the future from the perspective of “double carbon” [J]. Science and Technology Review, 2022, 40(19): 25-35.
- [9] 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.
- [10] 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. Achievement and developing trend of open-pit mining in China[J]. Open-cast Mining Technology, 2019, 34(1): 1-9.
- [11] 李克民.我国煤炭露天开采技术与装备发展趋势[C]//2010现代露天采矿装备现场研讨会.2010:13-15.
- [12] 赵浩.露天煤矿高质量发展形势分析与对策措施[J].煤矿安全,2022,53(7):251-256.  
ZHAO Hao. Analysis of development situation and countermeasures of high quality safety in open-pit coal mines[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(7): 251-256.
- [13] 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,(2):55-58.  
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, (2): 55-58.
- [14] 杨天鸿,孙东东,胥孝川,等.新疆大型露天矿绿色安全高效开采存在问题及对策[J].采矿与安全工程学报,2022,39(1):1-12.  
YANG Tianhong, SUN Dongdong, XU Xiaochuan, et al. Problems and countermeasures in green, safe and efficient mining of large-scale open-pit mines in Xinjiang[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(1): 1-12.
- [15] 马力,王晓民,张奇峰,等.干旱区露天矿排土场隔水层重构材料试验研究[J/OL].煤炭科学技术,1-10[2024-02-29].<https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0195>.  
MA Li, Wang Xiaomin, Zhang Qifeng, et al. Experimental study on reconstruction material of impervious layer in open pit dump in arid area[J/OL]. Coal Science and Technology, 1-10[2024-02-29]. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0195>.
- [16] 马力,王恒荣,罗科,等.分区内排露天煤矿压帮留沟模式及参数优化[J/OL].煤炭学报,1-11[2024-02-29].<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0307>.  
MA Li, WANG Hengrong, LUO Ke, et al. Optimization of the remaining ditch mode and parameters for end-wall covered of open pit coal mine with partition and inner dumping[J/OL]. Journal of China Coal Society, 1-11[2024-02-29]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0307>.
- [17] 才庆祥,周伟,车兆学,等.近水平露天煤矿端帮靠帮开采方式与剥采比研究[J].中国矿业大学学报,2007,46(6):743-747.  
CAI Qingxiang, ZHOU Wei, CHE Zhaoxue, et al. Research on the mining method and stripping ratio of steep end-slope mining in surface coal mines with flat coal deposit[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 46(6): 743-747.
- [18] 赵红泽,郭锦桦,刘元旭,等.再论露天矿群开采-采排一体化协同采矿技术[J].煤炭科学技术,2022,50(2):47-55.  
ZHAO Hongze, GUO Jinhua, LIU Yuanxu, et al. Discussion on coordination of open-pit mine group mining and integration of mining-

- dumping-reclaiming[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 47–55.
- [19] 曹博, 汪帅, 黄云龙, 等. 倾斜煤层露天矿横采内排采区合理宽度研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(8): 38–44.
- CAO Bo, WANG Shuai, HUANG Yunlong, et al. Study on reasonable width of horizontal mining and internal drainage area in inclined coal seam open-pit mine[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(8): 38–44.
- [20] 张瑞新, 毛善君, 赵红泽, 等. 智慧露天矿山建设基本框架及体系设计[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 1–23.
- ZHANG Ruixin, MAO Shanjun, ZHAO Hongze, et al. Framework and structure design of system construction for intelligent open-pit mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 1–23.
- [21] 王忠鑫, 辛凤阳, 宋波, 等. 论露天煤矿智能化建设总体设计[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 37–46.
- WANG Zhongxin, XIN Fengyang, SONG Bo, et al. Overall design of intelligent construction in open pit coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 37–46.
- [22] 付恩三, 刘光伟, 赵浩, 等. 智慧露天矿山总体框架及关键技术研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(8): 27–32.
- FU Ensan, LIU Guangwei, ZHAO Hao, et al. Research on the overall framework and key technologies of smart open-pit mines[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(8): 27–32.
- [23] 才庆祥, 周伟, 舒继森, 等. 大型近水平露天煤矿端帮边坡时效性分析及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(6): 740–744.
- CAI Qingxiang, ZHOU Wei, SHU Jisen, et al. Analysis and application on end-slope timeliness of internal dumping under flat dipping ore body in large surface coal mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(6): 740–744.
- [24] 曹兰柱, 黄浩轩, 王东, 等. 露天矿土-岩复合边坡形态优化设计[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(3): 957–962.
- CAO Lanzhu, HUANG Haoxuan, WANG Dong, et al. On the optimum layout of the soil and rock composite slope in an open pit mine[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(3): 957–962.
- [25] 曹兰柱, 刘帅, 高峰, 等. 露天煤矿复合煤层边坡空间形态优化[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(6): 131–136.
- CAO Lanzhu, LIU Shuai, GAO Feng, et al. Optimization on spatial form of composite seam slope in surface mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 131–136.
- [26] 周伟, 才庆祥, 张国营, 等. 厚覆盖层拉斗铲工艺的运煤系统研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(1): 49–53.
- ZHOU Wei, CAI Qingxiang, ZHANG Guoying, et al. Study of how the coal haulage system affects dragline stripping with a thick overburden[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(1): 49–53.
- [27] 刘光伟, 李晋, 柴森霖, 等. 基于时空演化的露天矿运输线路存留状态判别算法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2147–2154.
- LIU Guangwei, LI Jin, CHAI Senlin, et al. Spatio-temporal state discrimination and prediction of road transportation system in open-pit mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2147–2154.
- [28] 王东, 梁祖超, 李广贺, 等. 近水平露天煤矿相邻采坑临时中间桥对边坡的支撑效应[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3374–3383.
- WANG Dong, LIANG Zuchao, LI Guanghe, et al. Mechanical retaining effect of middle bridge on slope of adjacent open pit[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3374–3383.
- [29] 宋子岭, 范军富, 祁文辉, 等. 露天煤矿绿色开采技术与评价指标体系研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S2): 350–358.
- SONG Ziling, FAN Junfu, QI Wenhui, et al. Study on the surface coal mine green mining technology and appraising index system[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2): 350–358.
- [30] 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(2): 55–58.
- 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(2): 55–58.
- [31] 顾晓薇, 王忠鑫, 冯民, 等. 矿区经济系统的生态可持续性动态分析[J]. 东北大学学报, 2010, 31(12): 1777–1781.
- GU Xiaowei, WANG Zhongxin, FENG Min, et al. Dynamic analysis of ecological sustainability of mine economic system[J]. Journal of Northeastern University, 2010, 31(12): 1777–1781.
- [32] 王忠鑫, 王金山, 马培忠. 露天开采土地扰动强度量化及演化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 98–105.
- WANG Zhongxin, WANG Jinjin, MA Peizhong. Study on land disturbance intensity quantification and evolution law of open-pit mining[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 98–105.
- [33] 白润才, 刘闯, 薛应东, 等. 相邻露天矿边坡帮压煤协调开采技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 2001–2006.
- BAI Runcai, LIU Chuang, XUE Yingdong, et al. Coordination mining technology for coal underlying the slopes between two adjacent open pits[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 2001–2006.
- [34] 马力, 刘晨东, 罗强, 等. 相邻露天煤矿边坡帮煤开采内排留沟高度优化[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(5): 997–1004.
- MA Li, LIU Chendong, LUO Qiang, et al. Optimization of inner dumping ditch height for end-wall coal mining in adjacent open-pit coalmines[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(5): 997–1004.
- [35] 刘光伟, 成功, 宋佳琛, 等. 非连续煤层实体模型一体化构建技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(5): 205–211.
- LIU Guangwei, CHENG Gong, SONG Jiachen, et al. Study on integrated construction technology of non-continuous coal seam solid model[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(5): 205–211.
- [36] 付恩三. 基于无人机影像露天煤矿短期生产计划可视化编制[J/OL]. 煤炭科学技术, 1–15[2023–12–20]<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231204.1350.008.html>.
- FU Ensan. Short term production planning of open-pit coal mine based on UAV data[J/OL]. Coal Science and Technology, 1–15 [2023–12–20]<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231204.1350.008.html>.