

# 中国露天煤矿 70 年成就回顾及高质量发展架构体系

才庆祥<sup>1</sup>, 陈彦龙<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:**露天煤矿作为我国煤炭工业的重要组成部分,具有生产能力大、开采成本低、安全条件好等优势,近年来在建设规模、生产总量、开采工艺及技术装备等多方面均取得了跨越式的发展,有力保障了煤炭作为国家能源安全稳定供应的“压舱石”地位。首先回顾了新中国成立后我国露天煤矿 70 年来的发展历程,将其划分为起步恢复阶段(1949—1979 年)、快速发展阶段(1980—1999 年)、综合发展阶段(2000—2020 年)和智能化初级发展阶段(2021 年以后)4 个时期;系统总结了每个时期的产量与数量规模、开采理论与技术、开采工艺与装备、资源开发与环境保护方面取得的突出成就。然后,探讨了现阶段露天煤矿发展面临的 4 个方面的主要问题,包括发展布局不均衡、可持续发展面临瓶颈、关键技术难题需深入攻关、人才短缺培养机制不完善。最后,提出构建以“安全、高效、绿色、低碳、智能”为总体目标的全链条、全周期、全要素露天煤矿高质量发展架构体系,其内涵特征包括以时效边坡理论、开采扰动指数理论、绿色开采理论、生态型开采理论、零碳负碳开采理论、智能化开采理论 6 种学术思想为理论基础,以灾害安全监测防控、复杂条件协同保障、生态源头减损开采、节能减排利用、数字-自动-智能同建 5 类技术体系为核心支撑,以透明地质模型动态重构、边坡蠕滑全程精准预测、深大孔低扰动控制爆破、采空区超前探测与处置、粉尘抑制及煤自燃防治等 30 项关键技术为重点突破,以设计理念先进化、安全保障标准化、建设规模大型化、生产工艺综合化、开采装备智能化、核心制造国产化、矿区生态绿色化、煤炭利用清洁化、组织管理科学化、人才队伍国际化的“十化型”露天矿山为建设任务;同时给出了以规划引领为基础,以科技创新为驱动,以人才培育为保障的露天煤矿高质量发展实现路径。最终为推动我国露天煤矿向持续健康高质量方向发展提供指导。

**关键词:**露天煤矿;建设历程;高质量发展;煤炭工业;架构体系;实现路径

中图分类号:TD315 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2024)01-0235-26

## Review of 70 years' achievements and high-quality development architecture system of surface coal mining in China

CAI Qingxiang<sup>1</sup>, CHEN Yanlong<sup>2</sup>

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory for Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** As an important component of China's coal industry, surface coal mines have the advantages of large production capacity, low mining costs, and great safety conditions. In recent years, surface coal mines in China have achieved a leapfrog development in construction scale, total production, mining technology, and technical equipment, which strongly

收稿日期:2023-11-10 修回日期:2024-01-08 责任编辑:郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1479

基金项目:新疆维吾尔自治区重大科技专项资助项目(2023A01002);国家自然科学基金资助项目(51974295)

作者简介:才庆祥(1958—),男,黑龙江桦南人,教授,博士生导师,博士。E-mail: qxcai@cumt.edu.cn

通讯作者:陈彦龙(1982—),男,河北承德人,研究员,博士生导师,博士。E-mail: chenyanlong@cumt.edu.cn

引用格式:才庆祥,陈彦龙.中国露天煤矿 70 年成就回顾及高质量发展架构体系[J].煤炭学报,2024,49(1): 235–260.

CAI Qingxiang, CHEN Yanlong. Review of 70 years' achievements and high-quality development architecture system of surface coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 235–260.



移动阅读

guarantees the status of coal as the “ballast” for the safe and stable supply of national energy. Firstly, the development process of surface coal mines in China over the past 70 years after the founding of the People’s Republic of China was reviewed, which was divided into four stages: the initial recovery stage (1949–1979), the rapid development stage (1980–1999), the comprehensive development stage (2000–2020), and the intelligent primary development (after 2021). A systematic summary was made for the outstanding achievements made in the production and quantity scale, mining theory and technology, mining technology and equipment, and resource development and environmental protection in each stage. Then, four main problems faced by the development of surface coal mines at the current stage were discussed, including uneven development layout, bottlenecks in sustainable development, key technological problems that need to be deeply researched, and the shortage of talents and imperfect cultivation mechanism. Finally, it was proposed to construct a high-quality development architecture system for surface coal mines with the overall goal of “safe, efficient, green, low carbon and intelligent” in the whole chain, whole cycle and whole elements. Its connotative features include theoretical basis: six academic ideas, i.e. time-dependent slope theory, mining disturbance coefficient theory, green mining theory, ecological mining theory, zero carbon and carbon negative mining theory, and intelligent mining theory; core support: five technical systems, i.e. disaster monitoring and prevention and control, collaborative support in complex conditions, ecological source damage reduction mining, energy conservation, pollution reduction and clean utilization, and digital-automatic-intelligent construction; key breakthroughs: 30 key technologies, i.e. dynamic reconstruction of transparent geological models, accurate prediction of slope creep and slide, deep and large-hole low-disturbance control blasting, advanced detection and disposal of goaf, and dust suppression, spontaneous combustion prevention and control, and so on; construction tasks: “ten transformable type” surface mines with the evolution of design concepts, standardization of safety guarantees, large-scale construction, comprehensive production processes, intelligent mining equipment, localization of core manufacturing, ecological greening of mining areas, clean utilization of coal, scientific organization and management, and internationalization of talent teams. At the same time, the realization path of high-quality development of surface coal mines based on planning guidance, driven by scientific and technological innovation, and guaranteed by talent cultivation was provided. Ultimately, it provides guidance to promote the sustainable, healthy, and high-quality development of surface coal mines in China.

**Key words:** open-pit coal mine; construction process; high-quality development; coal industry; architecture system; realization path

中国露天煤矿开采起源于 1914 年辽宁抚顺古城子露天掘 (今抚顺西露天矿前身), 史称中国第一露天煤矿, 至今已有 110 a 的历史。但露天煤矿真正的大发展始于新中国成立, 蓬勃发展始于改革开放<sup>[1]</sup>。特别是进入 21 世纪以来, 我国露天煤炭开采产量已超过其他产煤国家, 跃居世界第 1 位, 中国露天煤炭事业形成了跨越式发展的新局面。在这期间, 中国露天煤矿事业抒写了由小到大、从弱到强的壮阔篇章。

综合新中国成立后露天煤矿 70 a 来的建设发展历程来看, 在露天开采理论与技术方面, 历经起步恢复、中西融合交流、西方技术消化吸收再创新再到完全自主知识产权, 至今已走在世界的前列; 在露天开采工艺方面, 完成了从间断开采工艺到半连续开采工艺、连续开采工艺, 再到综合开采工艺的发展; 在露天开采设备方面, 实现了由几立方米斗容、十几吨装载量的小型设备到近百立方米斗容、几百吨装载量, 以及连续采掘配合高速宽胶带的大型采运设备的跨越; 在露天原煤总产量方面, 实现了从百万吨、千万吨、亿

吨再到十亿吨的飞跃; 在露天开发模式方面, 逐步实现了由单一煤炭资源开发向可持续循环经济方向质变发展<sup>[2-5]</sup>。

2022 年, 我国露天煤矿产能与产量首次双双突破 10 亿 t, 以占比约 8% 的煤矿数量, 贡献了全国约 23% 的煤炭产量, 开启了露天煤炭开采事业的新起点<sup>[6]</sup>。在产量供应能力持续增强的同时, 露天煤矿的智能化水平也加速提升, 以智能综合管控平台、无人驾驶、智能监测预警、智能钻爆等为代表的智能化应用场景不断丰富<sup>[7]</sup>。然而, 露天煤炭开采事业蓬勃发展的同时, 也面临着一些问题, 如土地挖损压占、大气污染、地下水流失等环境问题<sup>[8]</sup>, 开采过程中共伴生资源利用率低以及边帮滞留资源浪费等问题也亟待解决。

综上, 值此中国露天煤矿事业在曲折中不断前进、发展、创新、登高之际, 笔者首先回顾了新中国成立 70 a 来露天煤矿的建设历史及发展历程, 对各时期露天煤矿产量与数量规模、露天开采理论与技术、露天

开采工艺与装备、资源开发与环境保护等方面取得的突出成就进行了系统总结;然后分析了现阶段露天煤矿发展面临的主要问题;最后根据新时期下露天煤矿建设的总体目标和发展趋势,提出了我国露天煤矿高质量发展架构体系及实现路径。以期为推进我国露天煤矿持续、快速、健康、高质量发展提供参考。

## 1 中国露天煤矿建设历程

新中国成立之后,伴随着社会主义建设的前进步伐,中国露天煤矿事业取得了巨大的成就。根据不同时期露天煤矿的数量、产量、开采理论技术及工艺装备等发展指标,将我国露天煤矿建设历程自1949年至今归纳划分为4个发展阶段:包括起步恢复阶段(1949—1979年)、快速发展阶段(1980—1999年)、综合发展阶段(2000—2020年)及智能化初级发展阶段(2021年以后)4个时期。

### 1.1 起步恢复阶段(1949—1979年)

以阜新海州露天煤矿及稍后的抚顺西露天煤矿改扩建为标志,我国露天煤矿建设进入起步恢复期,这一时期划定在新中国成立后到改革开放前的30 a间。

新中国成立后,经过3 a国民经济恢复建设,国家统筹规划了第1个五年计划(1953—1957年)。“一五”计划共确定3处露天煤矿项目,分别是阜新海州露天煤矿、抚顺西露天煤矿、抚顺东露天煤矿<sup>[9]</sup>。伴随着

“一五”计划的稳步推进以及原有露天煤矿的恢复生产,1957年我国露天煤矿年产量高达10.08 Mt,其产量占当年煤炭总产量的6.75%,相较于1949年露天原煤产量,提高了213%。“一五”计划末期,全国共有露天煤矿20多处,总设计产能10.33 Mt/a,至此,我国露天煤矿事业步入了健康发展的轨道。

基于“一五”计划的建设成效,“二五”计划及3年调整期内(1958—1965年),国家陆续规划设计了哈密三道岭、义马北、可保、依兰、平庄西、公乌素、鹤岗岭北、布沼坝等露天煤矿,同时对海州露天煤矿、抚顺西露天煤矿进行了扩建与技术改造。相比于“一五”计划期间,露天煤矿年产能约增加8 Mt,露天煤矿数量增至30多处,总设计产能超过17 Mt/a。同时,露天煤矿的分布范围也从辽宁逐渐扩展至河南、新疆、山东等地。随着露天煤矿数量与生产能力的提升,1960年我国露天年产量达到24.62 Mt。但由于前期开采导致采剥比失衡,加上当时技术制约,使得“二五”期间全国露天煤炭产量连年降低,至“二五”计划末期(1965年),全国露天产量陷入最低峰,国有重点露天煤矿年产量仅有4.22 Mt,露天产量占全国煤炭总产量比例降至1.8%。

1966—1979年期间,“三五”“四五”计划陆续完成,伴随着平庄西、扎赉诺尔灵泉、云南可保、义马北、哈密三道岭、鹤岗岭北、海勃湾公乌素和石炭井大峰等露天矿的建成投产<sup>[10]</sup>,全国露天煤炭产量开始回升。1966—1979年,国有重点露天煤矿年产量从7.6 Mt增至16.56 Mt,提高118%。

在此阶段,中国露天煤炭产量经历了“起步发展—陷入低谷—逐渐恢复”3个过程(图1),我国的露天煤矿事业也在曲折中发展,在发展中调整,在调整中恢复,在恢复中巩固,在巩固中提高,为步入快速发展阶段奠定了良好的基础。

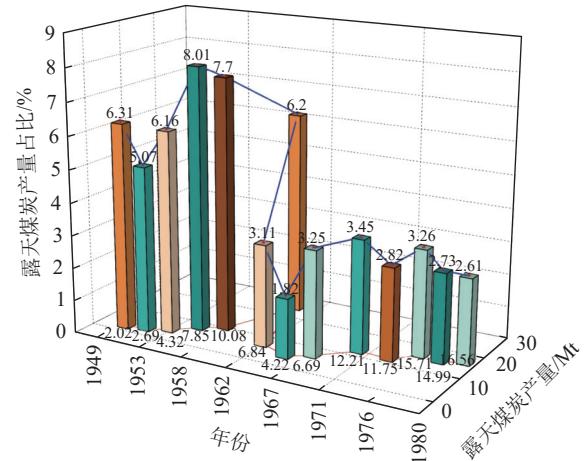


图1 起步恢复阶段露天煤矿年产量及占煤炭总产量比例

Fig.1 Annual production of open-pit coal mines and its proportion in total coal production during the start-up rehabilitation stage

### 1.2 快速发展阶段(1980—1999年)

改革开放后,我国露天煤矿建设进入快速发展阶段,以霍林河、伊敏、元宝山、黑岱沟、安太堡五大露天煤矿建设投产为该时期的主要标志,时间集中在1980—1999年的20 a间。

在改革春风的催生下,以“优先发展露天煤矿”和“尽量打开大露天”的国家政策为指导方针,我国露天煤矿建设进入快速发展期。通过引进大型露天开采设备、合作设计五大露天煤矿、合作开发运营安太堡露天矿等方式,极大推动了我国露天煤矿的建设进程,有力促进了中西技术与建设理念的融合。这一时期,我国露天煤矿开采在技术上和建设规模上都取得了显著的成就。

1980年,全国露天煤矿年产能0.3 Mt及以上的有18座,总设计生产能力达21.30 Mt/a,全国露天煤炭产量16.99 Mt,占全国煤炭总产量的2.7%;1985年全国露天煤矿年产量达到25.32 Mt,占全国煤炭总产量的2.9%,正式超过1960年露天煤炭产量;1995年,

全国露天煤炭年产量 41.53 Mt, 占全国煤炭总产量的 3.2% (图 2)。在此期间, 我国与美国岛溪公司合作开发的特大型露天煤矿——平朔安太堡露天煤矿以及我国自主设计、自行施工的年产能 5 Mt 以上的黑岱沟、霍林河露天、小龙潭等 8 座大型露天煤矿也陆续投产, 总设计年产能高达 48 Mt。

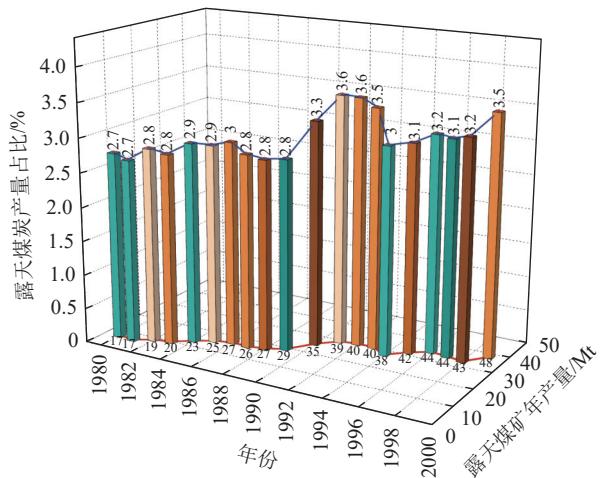


图 2 快速发展阶段露天煤矿年产量及占煤炭总产量比例

Fig.2 Annual production of open-pit coal mines and its proportion in total coal production during the rapid development stage

全国露天煤炭产能、产量大幅度增长的背后离不开开采理论技术与开采工艺的进步。快速发展期内, 原有露天煤矿的开拓运输系统被优化, 单斗-卡车间断工艺逐渐替代了原有的单斗-铁道间断工艺并进行了大规模推广, 轮斗连续工艺、半连续工艺与综合开采工艺也逐渐开始应用<sup>[11]</sup>。这一时期内, 露天大型开采设备主要以国外引进为主, 国产设备为辅。同时, 露天煤矿的建设和管理模式也逐渐呈现出市场经济的特点, 在兼顾产能的同时, 也开始对环境保护以及共伴生资源的有效利用等要素加以关注<sup>[12-13]</sup>。

### 1.3 综合发展阶段 (2000—2020 年)

进入 21 世纪以来, 随着市场经济和改革开放的深入, 国民经济发展对能源需求激增, 使得露天煤矿建设迎来了新的发展机遇。在注重生产安全、建设大型露天矿、提高煤炭资源回采率、绿色开采等政策背景下, 我国露天煤矿在产量规模、开采理论、开采工艺等方面均取得了突破性成就, 时间集中在 2000—2020 年的 20 a 间。

截至 2020 年, 全国共有 4 Mt/a 及以上的大型露天煤矿 53 处, 总产能 6.37 亿 t, 其中千万吨级大型露天煤矿 26 处, 产能 4.93 亿 t, 占全国露天产能的 51.9%。产量方面, 露天煤矿年产量由 2000 年的 0.5 亿 t 增长

至 2020 年的 8 亿多 t, 占全国煤炭总产量的比例由 4% 增长至 21% (图 3); 开采工艺方面, 单斗-自移式破碎机-带式输送机-推土机工艺得到大力发展, 拉斗铲工艺得到应用<sup>[14]</sup>; 开采理论方面, 提出了现代露天煤矿开采设计中确定经济合理采剥比的方法、建立了露天绿色矿山理论、形成了具有中国特色的露天煤矿综合评价体系。同时, 我国露天煤矿行业在市场化改革、资源整合、安全整治、建设大基地、绿色开采等方面均取得了创新性成就, 形成了具有自身特点的露天煤矿技术体系。

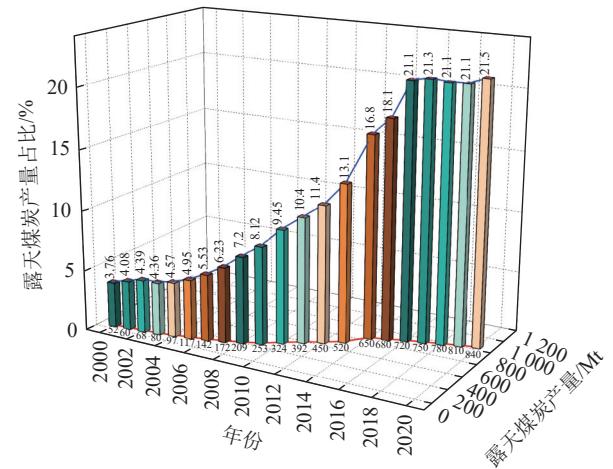


图 3 综合发展阶段露天煤矿年产量及占煤炭总产量比例

Fig.3 Annual production of open-pit coal mines and its proportion in total coal production during the comprehensive development stage

### 1.4 智能化初级发展阶段 (2021 年以后)

2020 年以来, 随着国家发改委、能源局、应急部、煤矿安监局等八部委联合发布《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》、中国煤炭工业协会发布《煤炭工业“十四五”高质量发展指导意见》、能源局与矿山安监局发布《煤矿智能化建设指南 (2021 年版)》等一批煤矿智能化建设法规的出台<sup>[15]</sup>, 露天煤矿进入了智能化建设的新阶段, 目标是通过科技创新驱动开采技术、工艺装备和智能化水平的整体提升, 实现露天煤矿安全、绿色、少人、高效发展。

2021 年 12 月, 国家能源局印发了《智能化示范煤矿验收管理办法 (试行)》(国能发煤炭规 (2021)69 号), 对确定的 71 个国家首批智能化示范煤矿的验收管理工作提供了要求和依据。同年, 各煤炭大省 (自治区) 开始进行智能化煤矿验收工作, 如截至 2021 年年底内蒙古自治区已经完成了 12 座大型露天煤矿的智能化验收工作。

目前, 我国露天煤矿智能化建设工作主要围绕 5G+多网络融合、大数据采集与分析、智能综合管控

平台、边坡监测、三维地质模型构建、人员车辆安全监控、破碎站智能控制、带式输送机智能巡检、无人驾驶、智能钻爆、智能运输、智能装车、智能分选、固定岗位无人值守等方面为中心建设内容,在这些方向均取得了一定的进展<sup>[16]</sup>。5处露天煤矿入选国家首批智能化示范煤矿,约300台无人驾驶车辆在30余处露天煤矿开展试验<sup>[17]</sup>。上述一系列成就标志着我国露天煤矿发展逐渐步入智能化建设阶段。

虽然露天行业的智能化建设取得许多成就,但从总体上看,大部分露天煤矿的智能化建设工作重心都集中在信息化、可视化、无人化等方面,且大多露天煤矿智能化工作都未将外委承包施工部分纳入建设范畴,而外委承包施工在我国露天煤矿是普遍存在且占有较大比重的。由此可见,智能化与业务系统的融合深度还远远不够,尚停留在展示、辅助、备用阶段。与国外一体化、集成化矿山智能化应用相比,我国露天煤矿智能化系统性、综合性程度相对较低,还处在探索和初级发展阶段<sup>[18]</sup>。

回顾我国露天煤矿建设历程,从1949—1979年的起步恢复阶段到2021年以后的智能化初级发展阶段,全国露天煤炭产能、产量大幅度增长,整体呈上升趋势(图4)。露天煤炭产量从1949年最初的201.8万t,增长到2022年的10.57亿t,提高了520多倍。

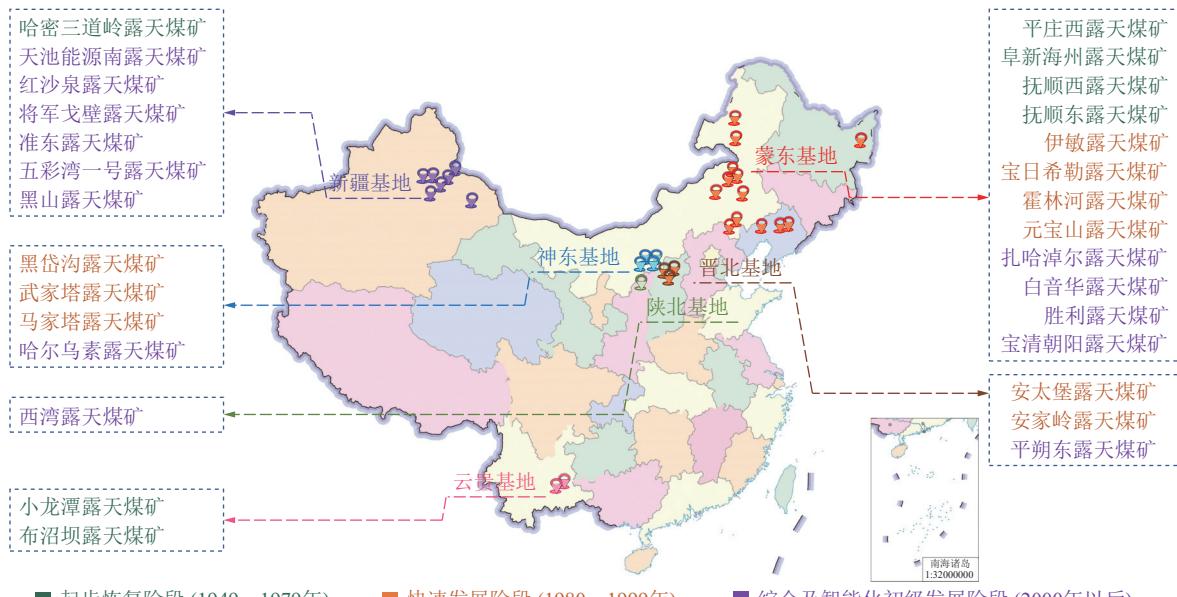


Fig.5 Distribution of typical open-pit coal mines at different development stages

在起步恢复阶段,经初期调整和恢复原有露天煤矿生产建设,我国露天煤炭工业逐渐进入快速发展轨道。在此期间,代表性的新建及改扩建露天煤矿包括阜新海州露天煤矿、抚顺东露天煤矿、哈密三道岭露天煤矿、抚顺西露天煤矿等。到1979年,国有重点露天

露天煤炭开采事业呈跨越式发展,为我国煤炭工业发展乃至中国工业大发展做出了突出贡献。

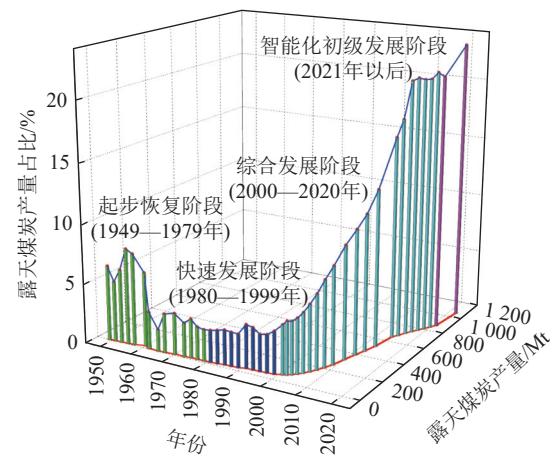


图4 1949—2022年露天煤矿年产量及占煤炭总产量比例

Fig.4 Annual production of open-pit coal mines and its proportion in total coal production from 1949 to 2022

## 2 露天煤矿70年发展成就回顾

### 2.1 露天煤矿产量及数量规模

新中国成立至今,露天煤矿产量及数量规模均不断发展,在露天煤矿建设历程不同阶段建成的典型露天煤矿分布情况如图5所示。



天煤矿产量为16.56 Mt,是1949年建国时的8.2倍。露天工业在国家发展中不断调整,在调整中产能与产量逐渐增加,相关产业同步稳定发展,为下一时期的快速发展阶段奠定了基础。

在快速发展阶段,1980年全国露天煤矿产量

16.99 Mt, 占全国煤矿总产量的 2.7%。已建成 0.3 Mt/a 及以上的主要露天煤矿有 18 座, 设计生产能力为 21.3 Mt/a。改革开放以后, 我国经济快速发展, 煤炭需求增加, 面对煤炭供需紧张、供不应求问题, 在原煤炭工业部的“优先发展露天煤矿”和“要尽快打开大露天”的方针指导下, 建设了五大露天煤矿: 霍林河露天煤矿、元宝山露天煤矿、伊敏露天煤矿、黑岱沟露天煤矿和安太堡露天煤矿<sup>[19]</sup>。与此同时, 也相继建设了武家塔、马家塔、宝日希勒等露天煤矿, 并对原有的霍林河、小龙潭、布沼坝、海州、抚顺西等露天煤矿进行技术升级和改造。其中, 中美合资的安太堡露天煤矿设计生产能力为 15.33 Mt/a; 霍林河南露天煤矿于 1981 年 9 月开工投产, 设计生产能力为 3 Mt/a, 在 1988 年开始进行扩建, 在 1992 年建成了 7 Mt/a 的二期扩建工程; 伊敏露天煤矿一采区在 1984 年建成, 设计生产能力 1 Mt/a, 1992 年开始扩建, 1998 年扩建完成, 2000 年达产设计能力 5 Mt/a。在快速发展阶段期间, 露天煤矿产量大幅度提高, 单矿设计能力从 5 Mt/a 以下提高到最大 15.33 Mt/a, 露天煤矿事业在技术、建造规模和数量上取得了显著成就。

进入综合发展阶段, 随着经济的快速发展, 我国能源需求不断增加, 对煤炭的需求也呈现出快速增长的趋势。为了满足这一需求, 国家在煤炭开采领域进行了大量的投资和创新支持, 露天煤矿的产量和数量规模不断扩大, 露天煤炭资源产量占全国煤炭总产量的比例越来越高, 我国露天煤矿发展也迎来了“黄金十年”, 在建设规模和生产产量等取得了显著性的进步。如平朔东、哈尔乌素、白音华、胜利等一批大型特大型露天煤矿建成投产; 2014 年, 黑岱沟露天煤矿产能核增至 34 Mt/a, 哈尔乌素露天煤矿和宝日希勒露天煤矿产能均核增至 35 Mt/a。

进入智能化初级发展阶段, 新疆天池能源有限责任公司南露天煤矿产能核增至 40 Mt/a, 开创了我国露天煤矿单矿产能新局面。截止到 2022 年, 我国露天煤矿产量首次突破 10 亿 t, 达到 10.57 亿 t, 露天煤炭产能和产量比例均已占到全国的 20% 以上。目前, 我国露天煤矿数量达 350 余处, 产能达 11.62 亿 t; 已建成安全高效露天煤矿 101 处, 千万吨级露天煤矿超 30 处; 露天煤矿产能分布全国 11 个省区, 其中内蒙古、新疆两地的露天煤矿合计产能占全国露天煤矿的比重达到 85% 以上。露天煤矿已成为我国煤炭行业不可或缺的重要组成部分, 其在我国产能调节过程中的“缓冲仓”地位愈加明显, 对于发挥煤炭在能源中的基础和兜底保障作用意义重大。

## 2.2 露天开采理论与技术

### 2.2.1 露天煤矿地质模型构建

在起步恢复阶段, 20 世纪 60 年代国内露天煤矿开始了地质模型构建的相关研究。最初地质模型基本为信息量单一、功能简单的等值线模型、多边形模型和格网模型等可视化程度较低的二维模型。

进入快速发展阶段后, 一些科研机构和露天煤矿合作开发了适应单一煤层赋存的地质模型, 但由于数据更新困难、准确度差、操作界面复杂等原因, 模型仅用于科研和生产技术优化, 在露天煤矿中的实际应用极少。1986 年, 安太堡露天煤矿引入了 Morrison 公司开发的 Eagles 软件, 地质模型首次被用于露天煤矿生产规划设计中。此后, 国内相关领域科研工作人员结合已有理论实践, 逐步形成了矿床地质模型的构建技术。通过对软件操作系统的汉化和改进, 国外地质建模商用软件逐渐应用于露天煤矿的生产规划设计领域。期间安太堡露天煤矿和元宝山露天煤矿引入的 VULCAN 软件是国外商用软件在国内露天煤矿生产设计应用的典型代表<sup>[20]</sup>。

进入综合发展阶段后, 随着计算机技术和地理信息系统 (GIS)、全球定位系统 (GPS)、遥感系统 (RS), 以及虚拟现实 (VR) 组成的空间信息技术的成熟应用和发展, 露天煤矿地质模型构建逐步实现了精细化的三维块体和三维实体可视化。三维地质模型具有精度高、信息量大、功能齐全、运算能力强、可视化程度高等优点, 能够有效实现地形地物、矿床地质资料的高度数字化, 实现地质信息、储量管理、开采设计的可视化, 地质预报、测量验收的精准化, 使得矿山的地质、测量、设计、安全和施工管理的信息能够共享, 实现采矿决策总体优化、生产过程优化预控, 提高了矿山企业的现代化管理水平。在该阶段, 国内也开发了多款三维地质建模软件, 如 3DMine、DiMine 等。

进入智能化初级发展阶段以后, 露天矿山智能开采对地质模型构建提出了新的更高的要求。通过进一步提高勘探精度, 建立高精度三维地质模型, 进而准确反映煤层赋存地质状态、地质构造和煤岩特征, 提高矿山地质的透明化水平, 为建设智能露天矿山提供精准地质保障<sup>[21-22]</sup>。

### 2.2.2 露天煤矿规划与设计

在起步恢复阶段之初, 新建的海州露天煤矿和抚顺西露天煤矿改扩建工程属于前苏联援建工程, 设计工作由前苏联列宁格勒煤矿设计院完成, 采用单斗-铁道间断工艺, 开拓方式为非工作帮固定折返坑线和工作帮移动折返坑线开拓运输系统。20 世纪 50 年代后期, 在掌握了前苏联的设计方法的基础上, 国内设

计院开始自行完成了一批露天煤矿规划与设计,如1958年沈阳设计院完成了中国第1个露天煤矿工程设计——设计能力3 Mt/a的平庄西露天煤矿。该阶段我国露天煤矿设计能力一直保持在5 Mt/a以下,开采工艺以单一的单斗-铁道间断工艺为主。

进入快速发展阶段后,相关设计单位在“五大露天煤矿建设”过程中多方位学习和消化国外技术,露天煤矿设计突破了原有铁道运输-走向拉沟-全区开采-外部排土的传统模式,开始设计分区开采-压帮内排,并在拉沟方案和开采程序上进一步改进;霍林河、黑岱沟露天煤矿设计突破了千万吨级规模;单斗-车间间断工艺和单斗-卡车-半固定破碎站半连续工艺在安太堡、黑岱沟、伊敏和元宝山等露天煤矿应用;轮斗连续工艺在国内首次被小龙潭和布沼坝露天煤矿三期扩建过程中引进应用。专家学者们进一步创新了露天煤矿的设计理论,如田会<sup>[23]</sup>提出了适用于煤岩量计算的相交图形法;张幼蒂和杨荣新<sup>[24]</sup>总结了现有的各种露天开采境界优化设计方法的共性问题,给出了动态综合优化露天开采境界的原则和方法;杨荣新<sup>[25]</sup>分析了基于静态经济分析理论的局限性,提出按动态经济分析确定露天开采境界的理论和方法;姬长生和张幼蒂<sup>[26-27]</sup>以单位储量净现值最大及合理匹配各要素之间相互关系为准则,运用系统工程方法和规模经济理论建立了露天矿山生产能力综合优化模型。在此期间,《露天煤矿采矿设计手册》《露天煤矿工程设计规范》等露天煤矿标准规范的陆续制定,使得我国露天煤矿设计体系得以进一步完善。

进入综合发展阶段后,国内露天煤矿设计理念由注重剥采工程技术、均衡生产向注重资源开发可行性研究转变,更加关注经济效益、安全效益和环保效益,呈现出规模大型化、生产集约化和高产高效的特点。露天煤矿开始全面进入20~40 Mt/a的规模时代。拉斗铲倒堆工艺、单斗-自移式破碎机半连续工艺分别在黑岱沟露天煤矿、伊敏露天煤矿首次设计并应用。随着《煤炭工业露天矿工程建设项目可行性研究报告编制标准》《煤炭工业露天矿设计规范》《煤炭工业露天矿工程建设项目设计文件编制标准》《煤炭工业露天矿矿山运输工程设计标准》《煤炭工业露天矿边坡工程设计标准》等一系列国家、行业标准规范的编制和实施,国内露天煤矿完整的建设项目设计工作体系逐步建立。

### 2.2.3 露天煤矿采区划分与转向

在起步恢复阶段,国内露天煤矿单矿开采面积相对较小,运距对于单斗-铁道间断工艺的生产成本影响较小,因此主要采用缓工作帮、全境界开采方式不

断延深露煤。

进入快速发展阶段后,单矿开采面积大幅增加,全境界开采方式受到限制。20世纪80年代以后,安太堡露天煤矿首次引入分区开采的新理念,快速推动了国内露天煤矿分区开采和转向技术的发展。分区开采有效降低了初期基建工程量,在优先开采有利区段、降低运距、快速实现内排等方面优势明显。工作线长度是露天煤矿采区划分的基础和依据,直接影响剥离运距,进而影响煤矿的生产能力和经济效益。期间于汝缓和习永峰<sup>[28]</sup>从剥离总费用最小的角度出发推导了露天矿经济工作线长度的计算公式图解方法。为解决采区转向期间造成的运距增加、出现剥离“洪峰”、生产管理复杂、露煤量偏少等问题<sup>[29]</sup>,才庆祥和姬长生<sup>[30]</sup>以安家岭露天煤矿一采区向二采区转向为例提出了4种可行的采区转向方案,通过定量计算与定性分析确定了最佳采区转向方式,研究方法与结论对其他类似条件的矿山提供了重要指导;顾正洪等<sup>[31]</sup>分析了间断式和连续式2种采区转向方式的特点,并以霍林河南露天矿为例对不同转向方式进行了技术经济分析,对不同条件下露天矿采区转向方式的选择提供了参考。

进入综合发展阶段后,专家学者们进一步丰富和优化了采区转向理论。刘宪权等<sup>[32-33]</sup>、徐志远等<sup>[34]</sup>以安太堡露天煤矿为例分析了采区转向接续期间存在的作业空间不足与快速延深需求的矛盾、内排土场空间不足、运距增大、原煤生产接续困难和运输系统复杂化等问题,提出了内排搭桥、反向高段内排及“树枝形”运输系统等开采程序优化措施;姬长生<sup>[35]</sup>总结分析了近水平露天煤矿中直角缓帮、扇形推进和重新拉沟3种转向方式的特点;周伟等<sup>[36]</sup>以安太堡露天煤矿为例提出采用采区间搭桥、反向内排和筑路式组沟开拓运输系统方式解决大型近水平露天煤矿转向期间内排空间不均衡、运距过长的问题。

### 2.2.4 露天煤矿剥采比调节

在起步恢复阶段,国内露天煤矿主要采用单斗-铁道间断工艺,由于运距对该工艺的生产成本影响不大,因此多采用剥采比均衡法优化剥采计划,达到均衡生产的目的。但剥采比均衡法以超前剥离为代价,前期投资较大且投资回收期长。陈百玉<sup>[37]</sup>根据投资经济效果原则就采用单斗-铁道工艺的大中型露天煤矿的前期生产剥采比和最大生产剥采比及维持年限进行了讨论。

进入快速发展阶段后,单斗-车间间断工艺和半连续工艺在国内开始大规模应用,采剥运距随矿山规模发展而不断增加。但剥采比均衡法无法解决采剥

运距增大带来的生产成本提高的问题,同时剥离“洪峰”过去后采掘与运输之间存在矛盾<sup>[38]</sup>。因此,考虑经济效益的剥采比优化方法开始应用于露天煤矿设计及生产中,但仍然无法解决矿山生产的稳定和剥离“洪峰”削减的现实问题。

进入综合发展阶段后,计算机技术的广泛应用使得露天煤矿可以基于地质模型模拟优化生产进度,剥采比优化理论进一步革新。于汝绶<sup>[39]</sup>提出了剥离运输功均衡法,将剥采比和采剥运距相结合,既考虑了矿山生产的均衡,有效地削减了剥离“洪峰”,又充分发挥了主要设备的效率,改善了矿山的经济效益。此外,相关学者对于特殊条件下的生产剥采比优化也进行了研究。白润才等<sup>[40]</sup>针对元宝山露天煤矿受境界内河流影响引起的剥采比波动问题,提出了采用双坑配采的方法调节生产剥采比,实现采剥工程的平稳过渡;赵红泽等<sup>[41]</sup>分析了近水平转倾斜煤层煤矿的生产能力约束指标,提出了双坑动态剥采调节方法。

### 2.2.5 露天煤矿开拓运输系统优化

在起步恢复阶段,露天煤矿多采用单斗-铁道间断工艺,开拓运输方式主要为非工作帮固定坑线、工作帮移动坑线和联合坑线方式。如海州露天煤矿采用底板折返固定坑线开拓;抚顺西露天煤矿开采初期剥离采用北帮移动坑线系统,中期形成了工作帮直进与折返混合的准轨铁道移动坑线开拓;平庄西露天煤矿采用底帮固定折返坑线与顶帮移动折返坑线的联合坑线开拓方式。

进入快速发展阶段后,各露天煤矿因地制宜,纷纷探索更适合本矿的开拓方式。同时,由于开采工艺的转变,铁道运输系统逐渐减少,公路开拓运输系统、带式输送机运输系统在露天煤矿中的比例不断增大。如安太堡露天煤矿采用单斗-卡车开采工艺和多出入沟-直进回返移动坑线-内排的开拓方式;布沼坝露天煤矿应用了轮斗挖掘机-带式输送机-排土机连续开采工艺的剥离系统,采用采剥分离的双出入沟固定坑线的开拓运输系统。

进入综合发展阶段后,为适应各种开采条件和不同的开采深度,联合开拓运输方式得到广泛应用,专家学者们也提出了不同条件下开拓运输系统的优化方法。如尚涛等<sup>[42]</sup>分析了近水平露天煤矿分区开采过渡期间开拓运输系统的特点、问题和解决途径,提出了该时期开拓运输系统优化的思路和方法;车兆学和才庆祥<sup>[43-44]</sup>针对传统开拓运输系统将内排运输道路布置于端帮造成的运距增加及端帮压煤问题创新性地提出了中间迈步式搭桥开拓运输系统。刘福明

等<sup>[45]</sup>进一步给出了露天煤矿中间搭桥的适用条件,确定了中间搭桥的高度和宽度等关键参数。刘光伟等<sup>[46]</sup>建立了基于选线道路费用成本最优化的数值计算模型,优化后的线路费用成本更低,能快速、有效地解决矿山运输系统定线问题。

### 2.2.6 露天煤矿安全开采保障

在起步恢复阶段伊始,党中央国务院就高度重视煤矿的安全生产工作。1949年第1次全国煤矿工作会议提出了“煤矿生产,安全第一”的方针,多级安全监察机构相继成立,并陆续制定和发布了大量的煤矿安全生产行政法规、规程和规章。到1952年底,全国煤矿安全生产管理体系初步形成,保障了露天煤矿的安全发展。1961年,党中央重申“安全为了生产,生产必须安全”,并提出了“调整、巩固、充实、提高”的8字方针。总体来看,在此时期内我国露天煤矿安全管理处于传统的被动管理模式。

进入快速发展阶段后,原煤炭工业部相继发布了《煤矿安全工作试行条例》《煤矿安全监察试行条例》《煤矿安全规程》等安全政策方针,并提出了执行“安全第一”方针的10条标准,露天煤矿安全生产状况逐渐改观。1993年2月3日原能源部颁布了我国历史上第1部露天煤矿安全技术法规——《煤矿安全规程(露天煤矿)》,为提升露天煤炭企业安全管理水平提供了重要保障。与此同时,学者们对露天煤矿安全开采中最重要问题之一的边坡稳定性开展了研究。如白占平和郭增涛<sup>[47]</sup>采用有限元方法分析了五龙矿井开采对海州露天煤矿西南帮应力与位移的影响;周昌寿<sup>[48]</sup>分析了露天煤矿内排土场的主要变形类型以及稳定性影响因素,提出了保证内排土场稳定的措施;曹兰柱等<sup>[49-50]</sup>采用离散单元法和模型试验分析了海州露天煤矿南帮随露天开挖的应力变化和岩移特征,揭示了边坡岩移机理和潜在滑坡模式;芮勇勤等<sup>[51]</sup>根据老化理论提出了露天煤矿边坡中软弱夹层的一般流变方程,建立了长期抗剪强度与应力作用时间变化的关系,为蠕动边坡动态稳定性分析提供了理论依据。总体来看,在此时期,露天煤矿安全管理整体仍处于“被动安全”向“主动安全”过渡阶段。

进入综合发展阶段后,以《安全生产法》和《煤矿安全监察条例》为主体的煤矿安全生产法律法规体系基本形成。各露天煤矿以“安全第一、预防为主、综合治理”为安全生产方针,从安全质量标准化入手,总结煤矿法律法规和安全管理经验,建立和完善了安全管理制度化管理体系。同时,露天煤矿边坡稳定性理论研究进一步丰富。舒继森等<sup>[52-53]</sup>通过理论分

析和物理相似模型试验改进了使用极限平衡法计算岩体边坡平面滑动时的水压分布假设;才庆祥等<sup>[54]</sup>提出了露天矿时效边坡理论,以边坡的暴露时间作为边坡时效性评价的指标,为露天煤矿实现靠帮开采提供了安全保证;杨天鸿等<sup>[55]</sup>建立了基于微震监测信息反演的边坡岩体内部损伤演化模型;王东等<sup>[56]</sup>研究了断层位置对露天矿顺倾层状边坡稳定性的影响;陈彦龙等<sup>[57-58]</sup>考虑了大型运输设备作业对边坡覆岩的循环加卸载效应和爆破冲击动载作用,研究了边坡煤岩体的动态力学特性;韩流等<sup>[59]</sup>提出了平面和圆弧两种失稳模式的时效稳定系数计算方法,建立了边坡时效稳

定分析的理论模型;刘福明等<sup>[60]</sup>研究了压实区与非压实区渗透速率不同的内在原因,提出了提高露天矿排土场边坡稳定性的建议。目前随着露天煤矿智能化建设和安全避险系统等进一步的研发,露天煤矿已经向全面实现“主动安全”方向发展。

在我国露天煤矿过去70 a的发展建设历程中,在开采理论与技术发展方面,我国露天煤矿在地质模型构建、规划与设计、采区划分与转向、剥采比调节、开拓运输系统优化以及安全开采保障等领域均获得了长足的发展,各领域随露天煤矿发展阶段的不同特征及发展趋势总结如图6所示。

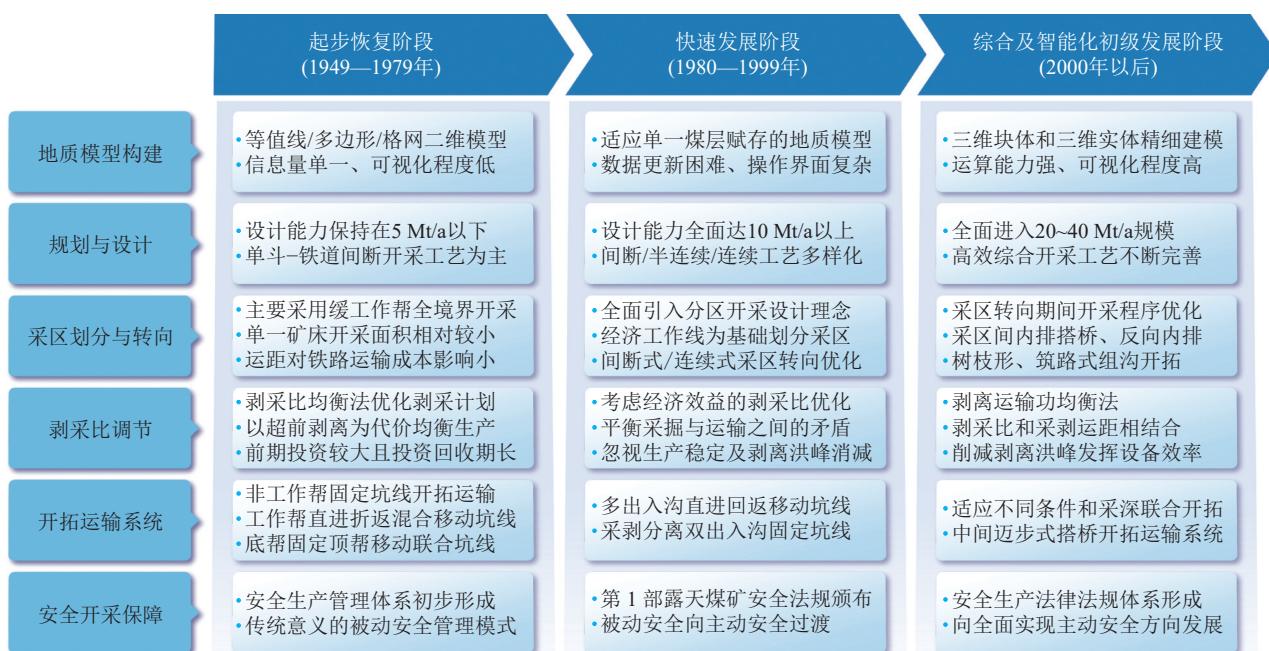


图6 露天煤矿开采理论与技术发展趋势

Fig.6 Development trends in theory and technology of open-pit coal mining

### 2.3 露天开采工艺及装备

在起步恢复阶段,受国内设备制造能力和开采技术的限制,单斗-铁道工艺是国内露天煤矿的主要工艺。如抚顺西、海州、平庄西、三道岭等露天煤矿均采用单斗-铁道开采工艺。彭世济等<sup>[61-62]</sup>研究总结了单斗-铁道工艺中采运环节之间的联系与配合问题,确定了车铲比的合理值;骆中洲和王世辉<sup>[63-64]</sup>研究了电子计算机模拟露天矿生产系统的步骤与方法,用于匹配设备数量及列车的调度。在此阶段,国内露天煤矿开采设备主要依赖于从前苏联进口,1954年抚顺挖掘机厂成功研制斗容为0.5 m<sup>3</sup>的挖掘机,标志着我国露天煤矿开采装备由进口向自主研发的转变。之后,4 m<sup>3</sup>电铲、80~150 t电机车和蒸汽机车等国产装备逐渐应用到露天开采作业中,自主研发的装备制造体系逐渐完善。

进入快速发展阶段后,金智求<sup>[65]</sup>总结了国内外露

天开采的经验,指出应大力开展新工艺、新技术及相应的开拓开采等课题的研究工作,各露天煤矿应根据具体条件发展综合工艺系统。习永峰等<sup>[66]</sup>建立了卡车重车、空车的多目标规划模型,推导出“最小比值方差”调车准则;彭世济等<sup>[67]</sup>讨论了露天煤矿连续工艺系统可靠性的计算方法,可估计出系统的年有效工作小时数,为轮斗系统中设备规格的选取提供依据。

在此期间,安太堡露天煤矿从美国引进了单斗-卡车开采工艺及成套装备,随后单斗-卡车开采工艺开始在伊敏、霍林河、黑岱沟等露天煤矿陆续应用。1983年5月,国务院讨论通过了《关于抓紧研制重大技术装备的决定》,确定了年产千万吨级的大型露天煤矿成套设备为国家重点建设项目,包括年产1 000万t级和2 000万t级露天煤矿单斗-卡车开采工艺及连续、半连续开采工艺的成套设备。1984年,抚顺西露天煤矿投入使用了第1套单斗-卡车-半固定破碎

站-带式输送机半连续开采工艺系统,标志着我国露天煤矿正式进入半连续工艺发展阶段。1986年7月,云南小龙潭露天煤矿剥离首先采用小型轮斗挖掘机连续生产工艺,扩建后采用中型轮斗挖掘机连续开采工艺。随后,元宝山、黑岱沟露天煤矿等轮斗连续工艺系统相继投产,为我国连续开采工艺的应用打开局面。1987年,年产1 000万t级露天煤矿单斗-卡车开采工艺成套设备完全实现国产化,在霍林河露天煤矿等投入使用。同时,国外技术与国内技术的联合应用催生了大量具有重大意义的产品,如年产2 000万t级的露天煤矿单斗-卡车开采工艺成套设备、23 m<sup>3</sup>单斗挖掘机及154 t电动轮自卸车在平朔矿区应用。

进入综合发展阶段后,张幼蒂<sup>[68-70]</sup>、尚涛<sup>[71]</sup>、李克民等<sup>[72]</sup>围绕拉斗铲倒堆工艺,分析了我国大型煤田采用倒堆剥离方法的有利条件及应用前景,提出了拉斗铲选择的基本思路与方法,指出了运煤系统的优化选择关键在于运煤通道的设置,并给出了抛掷爆破与剥离台阶的开采参数。车兆学等<sup>[73-75]</sup>提出了一种新型轮式软岩破碎机,与单斗挖掘机和带式输送机组成了新式露天煤矿表土剥离半连续开采工艺系统,填补露天采矿工艺的一项空白。2007年,黑岱沟露天煤矿引进了国内第1台拉斗铲,采用拉斗铲无运输倒堆开采工艺配合抛掷爆破技术,年剥离能力达2 000万m<sup>3</sup>。同年,伊敏露天煤矿投入了国内第1套自移式破碎机半连续工艺装备用于采煤,带动了我国露天煤矿单斗-自移式破碎机-带式输送机半连续工艺的繁荣发展。至此,世界主要先进露天采煤工艺在我国都得以应用。

露天煤矿采用单一开采工艺模式限制了生产规模和经济效益的提高,根据露天煤矿煤层赋存条件,同时使用2种或以上工艺的综合开采工艺能够获得高生产效率和最佳经济效益<sup>[76]</sup>。为了进一步明确开采工艺对不同场景的应用效果,各学者针对各种开采工艺的适用条件、参数优化等进行了大量研究。车兆学等<sup>[77]</sup>提出了破碎站移设步距的确定过程及方法,给出了确定破碎站移设步距的原则及计算公式。李克民等<sup>[78]</sup>采用理论计算结合拉斗铲剥离倒堆工艺应用实践,进一步改进与完善了抛掷爆破参数;宋子岭<sup>[79]</sup>建立了露天开采工艺系统适应性评价指标体系和各种常用露天开采工艺系统的适用条件模型;尚涛等<sup>[80]</sup>优化了自移式破碎机半连续工艺系统工作面参数;姬长生等<sup>[81]</sup>分析了半连续工艺系统的生产能力,建立了半连续工艺应用边界条件模型;陈树召<sup>[82]</sup>建立了以系统生产成本最低为目标的卡车优化模型、破碎站位置与移设优化模型、半连续工艺服务范围模型、组合台阶开采模型和采掘带宽度优化模型;马力<sup>[83]</sup>构建了抛

掷爆破效果综合评价模型,分析了抛掷爆破在露天煤矿的应用条件及与后续剥离工艺间的匹配关系。在该阶段,配套的露天开采装备制造水平也进入了新高度,自主研制的75 m<sup>3</sup>矿用电铲、400 t级矿用自卸卡车、大型自移式破碎机、全液压轮斗挖掘机、大功率推土机等相继投入使用或试运行。我国露天煤矿装备实现了从依赖进口到国内自主生产的大跨越。

进入智能化初级发展阶段后,露天煤矿无人运输项目开始实地测试。2020年,天池能源南露天煤矿已投放近百台百吨级新能源无人驾驶矿卡;2021年9月,宝日希勒露天煤矿运行了世界首个极寒(-40℃以下)环境无人矿卡编组;2022年,胜利一号露天煤矿完成7台220 t级矿用自卸卡车的无人化改装,并连续开展7×24三班编组无安全员运输作业,创造了无安全员运输效率的新纪录;2023年3月,准能集团完成了首台NTE330型矿用卡车无人驾驶改造,开辟了国内载质量最大330 t矿卡无人驾驶新纪元。

可以看出,我国露天煤矿开采工艺从最初单一的单斗-铁道工艺发展到目前单斗-卡车间断工艺、单斗-卡车-半固定破碎站半连续工艺、轮斗连续工艺、单斗-自移式破碎机半连续工艺、拉斗铲倒堆工艺等多工艺综合应用的局面,整体上呈现出从单一化向连续化、综合化的发展趋势。开采装备伴随着开采工艺的变革,向着大型化、国产化、智能化的方向发展,如图7所示。

## 2.4 资源开发与环境保护

露天煤炭资源大规模开发的同时,也带来了一系列的环境问题,开采和剥离物的外排会挖损和压占大量土地,破坏地表土壤和植被<sup>[84-85]</sup>,同时伴随着水和溶质的运移,造成土壤肥力流失和重金属积累<sup>[86-87]</sup>。此外,钻爆、采装、运输、排土等各环节均会产生大量的粉尘,造成大气污染<sup>[88-89]</sup>等。回顾过往的70 a,我国露天煤炭资源开发与环境保护主要经历了重开发轻治理、先开发后治理再到边开发边治理3个阶段,如图8所示。

### (1) 起步恢复阶段的重开发轻治理。

在起步恢复阶段,由于当时历史条件、开采工艺和技术手段等方面的限制,这一时期的露天开采对环境造成的损害尚未得到重视,为了追求更高的经济效益,往往重开发轻治理。在这种开采模式下,露天煤炭开采对土地造成了严重的挖损和压占。统计数据显示,我国露天煤矿正常生产后每开采万吨煤需要挖损土地约0.08 hm<sup>2</sup>,每万吨煤排土场压占土地约0.16 hm<sup>2</sup><sup>[1,90]</sup>。大量土地被剥离、压占,矿区地表生态遭到严重破坏;同时,矿区土壤大量剥离以及采动影



图7 露天煤矿不同发展阶段代表性开采工艺及开采装备

Fig.7 Representative mining techniques and equipment at different development stages of open-pit coal mines



图8 露天煤矿资源开发与环境保护发展阶段

Fig.8 Development stages in resource development and environmental protection of open-pit coal mines

响,也导致了地下水资源流失,间接引起了土地盐碱化、沙化和贫瘠化等问题,严重破坏了露天矿区的生态环境。

## (2) 快速发展阶段的先开发后治理。

在快速发展阶段,国内露天煤矿开采工艺和技术迅猛发展,开采强度逐年增加,对环境的负面影响日

趋严峻。1988年我国颁布了《土地复垦规定》,正式拉开了我国露天矿山生态治理的序幕。安太堡、伊敏、准格尔等大型露天矿区率先响应政策号召,在建矿初就按照生态环保理念设计并实施土地复垦方案。同时学者们也开展了大量的露天矿生态保护的相关研

究,胡振琪<sup>[91]</sup>运用地质统计学方法分析了露天煤矿复垦土壤物理特性的空间变异性,指出土壤空间变异性与采矿方向密切相关,土壤剖面内的空间变异呈明显的规律性;何书金等<sup>[92]</sup>指出了煤矿区土地复垦的原则、方向、程序模式以及相应的主要技术措施;白中科等<sup>[93]</sup>分析了安太堡露天煤矿不同区域的水土流失特征,并提出了排土场水土保持综合治理措施。

在此时期,露天矿生态治理手段仍较为单一,强化内排、土地复垦是该阶段对露天矿生态恢复的主要措施。这一阶段露天煤矿在资源开发后通过矿山公园改造,生物改良等措施对矿区生态进行了修复,但尚未根据整个矿区的条件,按照生态学、经济学等原理,科学合理的进行多业、综合、协调的生态恢复研究,也没有将露天开采和生态重建形成一体化体系,其环境保护与治理也未贯穿露天煤矿开发规划、设计、生产全过程<sup>[94]</sup>,致使生态环境改善不明显,生态恢复未带来明显的环境效益。

### (3) 综合发展阶段之后的边开发边治理。

进入综合发展阶段后,随着国家对环境保护的重视,以及可持续发展理念的普及,资源开发与生态恢复一体化理念逐步成为共识。钱鸣高院士<sup>[95-97]</sup>率先提出了煤矿绿色开采的概念,分析了研究煤炭资源绿色开采的必要性和意义,阐述了资源与环境协调开采技术体系;白中科等<sup>[98]</sup>指出矿区生态重建应在开采之前就预测可能发生的环境问题,在开采中尽量避免或减少开采对环境的破坏;卞正富等<sup>[99]</sup>认为矿山生态建设需进行采前的规划和开采过程中的生态保护,矿山生态建设需要以系统工程的方法贯穿于采矿全过程。

2008年,国务院颁布的《全国矿产资源规划(2008—2015年)》提出了发展绿色矿业、建设绿色矿山的要求。基于绿色矿山建设理念,资源开发与生态恢复一体化的治理理念开始被提出。才庆祥等<sup>[100]</sup>研究了露天煤矿表土层剥离与土地复垦一体化作业方法及相关参数,提出采用线性规划对表土资源的流量和流向进行优化控制;宋子岭等<sup>[101-102]</sup>提出了露天煤矿绿色度评价方法,建立了矿区生态环境评价指标体系;田会和王忠鑫<sup>[103]</sup>提出了“扰动系数”的概念和技术方法,用于量化露天开采对环境的综合扰动程度;李全生等<sup>[8, 104-105]</sup>提出了露天煤矿源头减损—过程控制—末端治理的生态修复理念,研发了立体储水及联合调用、开采节地减损、物料跨时空调配储用和“生态窗口期”协同修复等技术,创建了露天煤矿生态型开采理论与技术体系;毕银丽等<sup>[106]</sup>提出干旱半干旱露天矿排土场近地表高效低成本的表土生态层—涵水层—隔水层的3层土层重构结构模型,研发物探检测成套技术与装

备,监测矿坑水来源、排土场土层结构与含水率,保证生态工程水资源有效利用。

现阶段,随着智能化开采技术的不断发展,传统的采矿设计和工艺已不能适应无人驾驶、新能源等智能装备的发展,“双碳”背景下对原有的生产模式提出了新的挑战。谢和平院士<sup>[107]</sup>科学研判碳达峰碳中和目标下我国能源消费结构和煤炭消费演变趋势,提出了实现碳达峰碳中和与能源安全稳定供应双重目标的路径。顾清华等<sup>[108]</sup>提出低碳、连续、高效、安全的露天矿智能化建设新模式,从构建多能互补的可再生能源系统、探索露天矿山低碳连续生产工艺、开发碳封存与生态碳汇技术体系3个方面探讨了该模式的技术路径。目前边开发边治理的模式取得了明显成效,依托矿区丰富的土地资源,创新发展出适合不同矿区的土地复垦和生态重建技术体系;同时,也逐步完善了适合不同露天矿特色的循环产业经济体系,充分利用了煤炭开采过程中伴生资源、地下水资源、矸石等固体废弃物,让环境保护和生态修复产生了良好的经济与社会效益。

## 3 露天煤矿现阶段存在的主要问题

我国露天煤矿历经70 a的发展取得了一系列突出成就的同时,现阶段仍存在发展布局不均衡、可持续发展面临瓶颈、关键技术难题需深入攻关、人才短缺培养机制不完善4个方面的问题,如图9所示。

### 3.1 露天煤矿发展布局不均衡

(1) 生产规模不均衡,特大型、大型露天煤矿在数量上占比低,且主要集中于生态脆弱区,而中小型露天煤矿占比高、分布广。根据中国煤炭工业协会发布的数据,截至2022年底,全国共有露天煤矿350余处,产能达11.62亿t,其中特大型、大型露天煤矿有60余处,产能约8.6亿t,即特大型、大型露天煤矿以约17%的露天煤矿数量贡献了70%以上的露天煤矿产能。而特大型、大型露天煤矿主要集中分布于新疆、内蒙古、山西等干旱少雨戈壁区、高寒易沙化草原区及水土流失严重的黄土高原区等北方生态脆弱地区。同时,产能在100万t以下的小型露天煤矿多达170余处,占全国露天煤矿总数的比例高达50%,并且广泛分布于内蒙古、新疆、山西、云南、陕西、黑龙江、辽宁、吉林、宁夏、贵州等多个省区。

(2) 开采工艺不均衡,单斗—卡车间断工艺仍占主导,综合工艺推广不足。由于中小型露天煤矿数量上占比高,因此我国约2/3的露天矿采用单一的单斗—卡车间断工艺,采用外包生产经营模式,面临设备能力小、数量多、油耗大的突出问题,导致作业人员多、安



图9 露天煤矿现阶段存在的主要问题

Fig.9 Main problems currently existing in open-pit coal mines

全隐患大、管理难度高。我国特大型、大型露天煤矿经多年实践,探索出了与矿区地质条件相适应的综合工艺,具有良好的示范效应,剥离采用单斗-车间断工艺、单斗-卡车-半固定破碎站/单斗-自移式破碎机半连续工艺、轮斗连续工艺、拉斗铲倒堆工艺中的2种及以上组合而成;采煤采用单斗-卡车-半固定破碎站半连续工艺为主。但从全国露天煤矿来看,综合工艺的推广范围还远远不足。

(3)装备水平不均衡,部分装备或核心配件的国产化亟待突破,高端、智能化装备的产能有待提升。虽然我国露天煤矿的装备制造水平一直处于稳步发展的进程中,然而,总体来看,我国露天煤矿装备制造业的发展却始终落后于露天工艺系统的变革与发展,赶超世界先进制造水平仍是艰巨的任务。特别是电铲、轮斗、吊斗铲、矿卡、破碎机等大型设备或核心配件的国产化亟待突破。此外,厚煤层的全连续分层开采装备,寒区露天煤矿的冻土、硬岩采剥装备,大倾角带式输送机装备、边帮采煤机装备等高端、智能化装备的产能还有待提升。

(4)相关规程标准修订速度不平衡。《煤矿安全规程》露天部分的一些条款不全不细,不能覆盖全国的各种矿山情况,对于近年出现的露天采矿机、端帮采煤机、端帮巷道输煤、无人驾驶等均未包括;煤矿安全生产标准化管理体系中露天部分的一些条款还不具体,很多条款都是要求“有设计”“符合设计”“不符合要求不得分”,但对设计的内容未做要求,应符合哪些要求也未予明确。其根源还是在于露天矿规范标准太少,标准化的各项条款没有支撑、没有依据。GB50197—2015《煤炭工业露天矿设计规范》发布至今已8a多,近年来对绿色矿山、智能矿山建设的新要求,均未涉及,设计理念陈旧,亟待修订。目前涉及露天煤矿的国家标准、行业标准不到30项,多为设计标准,生产技术、安全管理方面的标准规范太少,严重制约着露天煤矿高质量安全发展<sup>[109]</sup>。

### 3.2 矿山可持续发展面临瓶颈

(1)高强度开采导致服务年限显著缩短。近年来,在煤炭市场供需偏紧、煤炭价格高位波动的背景下,部分露天煤矿盲目追求产能核增,持续高强度开采,不但造成露天煤矿生产接续紧张、剩余服务年限严重不足,还会导致灾害治理不到位,安全风险不断累积加剧,为矿山中后期持续建设增加难度,给露天矿的安全生产带来巨大的隐患。同时,高强度开采也会造成矿区生态环境破坏,直接影响到露天煤矿的可持续发展。

(2)采深增加加剧高边坡失稳风险。随着露天煤矿产量增加,开采深度日益增加,目前在产的露天煤

矿平均采深近200m,胜利东二号露天煤矿采深最深达623m,为世界露天煤矿开采深度之最。随着开采深度加深,露天煤矿边坡高度不断加大,易形成高陡边坡,一旦暴露时间过长,会导致岩层强度进一步降低,不利于边坡的稳定性。同时,开采深度也限制了跟踪内排的进度,不仅提高了外排的运输成本,也延缓了内排压帮护坡。

(3)征地用地困难限制矿山发展。近些年露天煤矿产能得以快速释放,导致露天矿征地用地规模也随之迅速增长,但现行的用地征地政策未及时做出相应调整。因采矿用地属于建设用地范畴,煤矿需要办理征、转等手续,但建设用地指标是每年统一分配、逐级下发,用地指标严重不足。与此同时,在国家绿色发展、生态环保及守住耕地红线等硬要求下,企业必须严格办理草原征占用、土地复垦等手续,手续办理需要多个部门审批,程序复杂且周期较长。部分特大型、大型露天煤矿出现无地可用而被迫减产、停产的情况,严重影响矿山的长期发展。

(4)环保政策约束下矿区生态治理难度大。在国家环保政策逐步完善和“双碳”背景下,我国露天煤矿正加速向绿色低碳方向发展,故露天煤矿生态治理需求迫切。但生态治理是一项多学科、多专业交叉的系统工程,目前仍缺乏大量的专业工程研究机构和专业人员,且矿山生态修复技术尚不完善。此外,尽管有《土地复垦规定》《中华人民共和国土地管理法》《中华人民共和国煤炭法》等法律法规,对复垦工作起到了一定的作用,但我国露天煤矿土地复垦率低,甚至复垦速度赶不上损毁速度。除此之外,大量历史遗留的矿山存在生态破坏问题,导致生态治理工程量巨大,修复周期长,短时间内难以满足生态环保要求。此外,矿山生态修复施工审批程序繁琐、审批难、且办理耗时过长,导致施工难,这些都大大增加了矿区生态治理的难度。

(5)废弃露天矿坑治理模式仍需探索。在经历大规模的矿产资源开采活动后,我国产生了大量资源枯竭型露天矿区<sup>[110-111]</sup>。废弃露天矿坑会带来安全隐患、空间资源浪费以及能源储备安全等问题。对于露天煤矿开采后造成的废弃矿坑,最简单直接的做法是填土掩埋,但是填土掩埋存在着回填物难以获取,且工程量巨大、耗时长、成本高等问题<sup>[112-113]</sup>。国内对于废弃露天矿坑的治理工作主要采取了生态修复和景观设计等手段<sup>[114]</sup>,如呼伦贝尔扎赉诺尔国家矿山公园,阜新海州露天矿国家矿山公园等。但目前废弃露天矿坑的治理手段较为单一,改造利用模式仍局限于生态修复方面,经济效益不明显,矿坑利用价值未充分

发掘,治理模式需进一步探索和创新。

### 3.3 关键技术难题需深入攻关

(1) 高大边坡变形监测及滑坡预警技术。伴随着露天矿山开采深度的增加,高大边坡的变形监测和滑坡预警对滑坡地质灾害防控具有重要意义。大型露天矿山的边坡高、坡度陡、落差大,影响因素众多,并且具有复杂、隐蔽、多尺度、多阶段和大变形等特征<sup>[115]</sup>,给高大边坡变形监测及滑坡预警技术带来诸多困难。伴随着现代测绘科学与技术的不断发展,各种新型监测预警手段不断涌现,如滑坡GPS自动化监测预警系统、GNSS监测、微震监测、基于北斗系统的滑坡监测、雷达差分干涉测量(D-InSAR)、无线传感在线监测系统、远距离三维激光扫描(TLS)等<sup>[116-120]</sup>。边坡及滑坡监测预警正逐渐从传统的点式监测向面式、体式监测发展。但是,不同监测方法均因各自的固有缺陷而有不同的适用性和局限性。现阶段边坡及滑坡监测预警模型主要建立在历史数据统计和分析基础上,通过对边坡监测数据的分析和研判进而对边坡稳定性进行预警<sup>[121]</sup>。针对现有滑坡预警技术存在的失败率高、预警错误、局限性大等问题,滑坡预警模型发展需综合考虑边坡地质特征、演化过程、滑坡机理等关键特性,与边坡稳定性分析方法相结合,构建多平台、多手段联合的空-天-地-深协同式智能监测预警方法与技术体系,提高滑坡预警准确性与普适性。因而,进一步明晰高大边坡岩石力学参数随时间变化规律及滑坡蠕变机理,实现对高大露天矿山重点区域、关键环节重大滑坡风险的识别监测和精准研判,推动露天矿山滑坡监测预警向远程化、可视化、智能化方式转变,成为当前亟需解决的关键技术问题。

(2) 边帮滞留煤安全高效开采技术。据相关统计,在我国40个露天矿区中,边帮压煤数量达到50 Mt以上的矿区达到一半以上<sup>[122]</sup>,全国露天煤矿边帮滞留煤总量高达100亿t以上,约占露天矿总资源量的10%。边帮滞留煤的弃采不仅造成大量优质煤炭资源的巨大浪费,还留下煤层自燃、边坡失稳等重大安全隐患。针对边帮滞留煤开采,许多露天煤矿都进行了开采技术的实践。①露井联采技术<sup>[123-129]</sup>。基于近水平煤层的赋存条件,通过合理科学安排开采空间距离与次序,使得井工平巷开采与露天开采同时进行的开采技术。②靠帮开采技术<sup>[54, 130-132]</sup>。基于分区开采采场的时空变化特征,利用端帮暴露时间及服务周期,提出了时效边坡理论和靠帮开采技术。在短时间暴露对整体边坡稳定性影响较小的情况下,提高端帮边坡角,将煤炭资源通过快速开采、内排压帮的方式采出。③相邻露天矿协调开采技术<sup>[133-135]</sup>。对于同一矿权内的相

邻露天煤矿边帮压煤通过贯通采场、排土场,构筑采场至排土场临时运输排土桥,技术参数优化及工程位置协调控制等协调开采技术实现边帮滞留煤的回收。④端帮采煤机开采技术<sup>[136-139]</sup>。当露天开采剥采比达到所规定的经济阈值后,将端帮采煤机布置在滞留煤层的一侧,对露天煤矿端帮剩余煤炭资源进行远程探入式开采,采硐间形成了支撑煤柱用于支撑上覆岩层,防止发生滑坡等灾害。虽然部分露天煤矿对不同滞留煤资源开采技术进行了成功应用,但随着安全高效开采理念的不断深入,对开采过程中厚煤层采出率以及强扰动下边坡稳定性的控制都有了更高的要求,同时,也需要对多工艺间时空配合方式及与既有露天采排生产规划间的时空协调机制进行持续深入研究。

(3) 智能矿山建设技术。我国露天煤矿智能化发展起步较晚、建设时间较短,但已经取得了一系列的成就。①钻爆环节智能化。应用钻机自动导航钻孔技术,实现钻机状态自动检测、钻机自动导航及钻进控制、地层岩性识别等功能;应用5G、人工智能、大数据、云计算等新一代信息技术,实现爆破环节信息深度感知、精准控制自执行等功能。②采装及运输环节智能化。霍林河南露天煤矿远程操作智能化电铲项目完成交付,西湾露天煤矿、平朔东露天煤矿、伊敏露天煤矿等实现了5G+矿卡无人驾驶常态化运行,各特大型、大型露天煤矿逐步进行了采装与运输环节智能化的探索。③地面生产系统智能化。基于大数据与人工智能技术,胜利能源露天矿实现了基于机器人的智慧运维新模式,科学的完成了高低压停送电任务,实现了配电室智慧化无人值守。五彩湾一号露天煤矿搭建了智慧物流平台,精准控制进出矿区社会车辆信息,地面生产系统智能化正式拉开序幕。虽然,我国露天煤矿智能化取得许多成果,但目前露天煤矿智能化建设多体现在“单一部件、单一设备、单一环节”上,在跨设备、跨工艺环节、跨工艺系统、跨业务范畴的信息共通共享、高效利用上仍有欠缺<sup>[140]</sup>。同时,行业对露天矿山智能化建设的路径认知不足,露天矿山智能化建设涉及的规划内容、实施途径等尚未体系化以及露天矿山智能化建设评价体系标准和智能化建设标准不统一等问题也需要通过科学、合理的规划去解决。

(4) 共伴生资源及废弃物资源化利用技术。针对煤系共伴生资源的综合性利用问题,许多露天矿进行了探索。①煤系金属矿产资源综合利用技术。基于煤系金属品位,选择具有回收价值的原煤,针对不同金属种类,选择不同工艺提炼锗、镓、铝伴生金属元素。②煤系非金属矿产综合利用技术。根据煤系非金属

矿产的种类不同,选取不同处理工艺对非金属矿产进行处理,如煤矸石发电技术,通过粉碎、分选、喂料、燃烧、发电等工艺,将煤矸石中的可燃物质转化为电能,显著提高了煤矸石的综合利用水平。③煤系能源矿产综合利用技术。针对铀等能源矿产,通过选矿分离、灰化、煤灰浸出和浸出液提取铀等工艺完成对原煤中铀元素的提炼与利用,目前较为少见。虽然部分露天矿对煤系伴生资源进行了回收利用,但煤中锗、硫铁矿、铀矿等煤系共伴生矿产资源开采仍然存在开采理论水平较低、开采技术落后等现象。因此,需要突破传统的单一煤炭资源开发利用模式,着力解决开采混乱、技术落后等短板,延伸煤系产业链,提高对煤系共伴生矿产资源的综合勘查开发利用水平,促进煤系伴生资源利用产业化、工业化发展<sup>[14]</sup>。

### 3.4 人才短缺培养机制不完善

(1)露天开采专业人才供给不足。随着信息化和智能化技术的快速发展,露天专业人才匮乏的问题愈发凸显。在高等人才培养层面,在本科生培养阶段,开设露天采矿专业的高校仅有中国矿业大学与辽宁工程技术大学等极少数高校;在研究生培养阶段,开设露天开采专业方向的高校也不足10所。每年毕业的应届本科与研究生总人数不超过百人,导致露天采矿专业人才供给严重不足。同时,行业发展急需的领军型人才和智能矿山建设等高端领域的专业人才也极其匮乏,了解现代企业管理、资本运作、技术转化、风险管控等高级管理人才以及高技能人才缺口更大。

(2)人才培养机制不完善。目前露天开采专业人才主要通过高等院校、职业院校及培训机构培养,但高等院校对企业人才需求了解不充分,关于露天煤矿企业人才缺口较大的智能化建设、矿区生态修复等领域的学科体系还不完整;职业院校及培训机构与露天煤矿企业在专业人才培养方案制定、专业实践等合作培养环节未完全打通。同时,露天煤矿企业对人才培养的主体作用不明显,培训体系不完善,在职员工知识更新和技能培训的途径少。总的来看,人才队伍建设机制存在欠缺,高素质综合型企业管理人才及行业内“高精尖人才稀缺”,技能型人才培养未被重视;人才评价机制尚不完善,行业内职业资格和职称资格尚未贯通,跨区域跨企业职称互认工作存在壁垒,人才考核评价体系尚不健全。

## 4 我国露天煤矿高质量发展展望

### 4.1 露天煤矿高质量发展架构体系

在不同历史阶段,露天煤矿建设的主要目标一直伴随国家经济建设的发展而不断变化。在起步恢复

阶段(1949—1979年),国家经济处于复苏和稳步发展阶段,露天煤矿建设的主要目标为“产能恢复”;在快速发展阶段(1980—1999年),国家经济处于快速增长时期,露天煤矿建设的主要目标也逐渐转化为“高产高效开采”;在综合发展阶段(2000—2020年),随着国家对环保的重视程度越来越高,露天煤矿建设的主要目标也逐渐转化为“安全、高效、环保”;进入智能化初级发展阶段(2021年以后)以来,在国家“双碳”战略的指引下,煤炭作为我国主体能源,按照绿色低碳的发展方向,对标实现碳达峰、碳中和目标任务,推进煤炭消费转型升级。同时,随着露天煤矿建设的持续推进,预计到“十四五末”,露天煤矿总产量占全国煤炭总产量的比例将超过25%,到“十五五末”,将达到30%以上<sup>[16]</sup>。因此,在创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念下,我国露天煤矿也应积极构建以“安全、高效、绿色、低碳、智能”为总体目标的全链条、全周期、全要素高质量发展新体系。

(1)坚守底线思维,推动露天煤矿全链条安全高效发展。经多年发展,我国露天煤矿企业的安全保障能力有了显著提升,2022年度命名的101处安全高效露天煤矿,全部实现安全生产“零死亡”。但同时也面临着安全生产理念不牢固、安全管理体系不完善、安全技术措施不健全等现实问题。随着赋存条件趋于复杂、多重灾害并存与安全生产作为首要位置的矛盾凸显,需按强化露天煤矿安全监测预警,提高防灾减灾救灾能力;严格落实露天煤矿安全生产规定,有效防范和化解生产过程中的滑坡、土地破坏、水体污染、大气污染、地质灾害等生态环境风险;强化煤矿开采全链条中的安全生产和风险管控,加强环境安全和地质灾害治理,切实提高煤矿安全保障能力。

(2)促进生态文明,践行露天煤矿全周期绿色低碳发展。加强“采剥、运输、排弃、复垦”一体化科学优化设计,完善矿区生态补偿机制,从规划设计、开发利用、闭坑转型等全生命周期系统抓好生态治理,重点抓好生态脆弱区和黄河流域等重要生态功能区的生态治理。加快推动煤炭清洁高效发展,实现高碳能源低碳化利用。要立足我国煤炭消费结构实际情况,推动煤炭洗选加工和分级分质梯级利用,加强商品煤全过程质量跟踪检测与管理,加强煤炭利用与转化效率研究。贯彻新发展理念,坚持降碳、减污、扩绿、增长协同推进。完善矿区的节能减排标准,鼓励开发综合利用余热、余压、节水、节电等综合利用节能项目,加强生产和生活区域的绿色化改造,探讨制定能耗预算管理制度。

(3)激发创新动力,驱动露天煤矿全要素智能发展。

露天煤矿当前处于智能化初级发展阶段,以无人驾驶矿用卡车为代表的智能装备发展迅速,但仍处于技术探索和试点试验阶段,未能形成规模化应用。未来应继续加大科研投入,加强技术创新,进一步丰富智能化应用场景。同时智能矿山建设方面还处于独立的模块智能化,矿山智能化运行缺乏系统性。智能化作为新兴的专业交叉领域,缺乏针对矿业特殊场景下业务关联信息以及缺乏矿业、计算机、自动化等交叉专业学科领域经验共享的知识体系。

进一步地,笔者提出露天煤矿高质量发展架构体系,如图10所示。该架构体系的内涵特征是以时效边坡理论<sup>[54]</sup>、开采扰动指数理论<sup>[103]</sup>、绿色开采理

论<sup>[96-97]</sup>、生态型开采理论<sup>[8]</sup>、零碳负碳开采理论<sup>[142-143]</sup>、智能化开采理论<sup>[144]</sup>6种学术思想为理论基础,以灾害安全监测防控、复杂条件协同保障、生态源头减损开采、节能减污清洁利用、数字-自动-智能同建5类技术体系为核心支撑,以透明地质模型动态重构、边坡蠕滑全程精准预测、深大孔低扰动控制爆破、采空区超前探测与处置、粉尘抑制及煤自燃防治等30项关键技术为重点突破,以设计理念先进化、安全保障标准化、建设规模大型化、生产工艺综合化、开采装备智能化、核心制造国产化、矿区生态绿色化、煤炭利用清洁化、组织管理科学化、人才队伍国际化“十化型”露天矿山为建设任务。

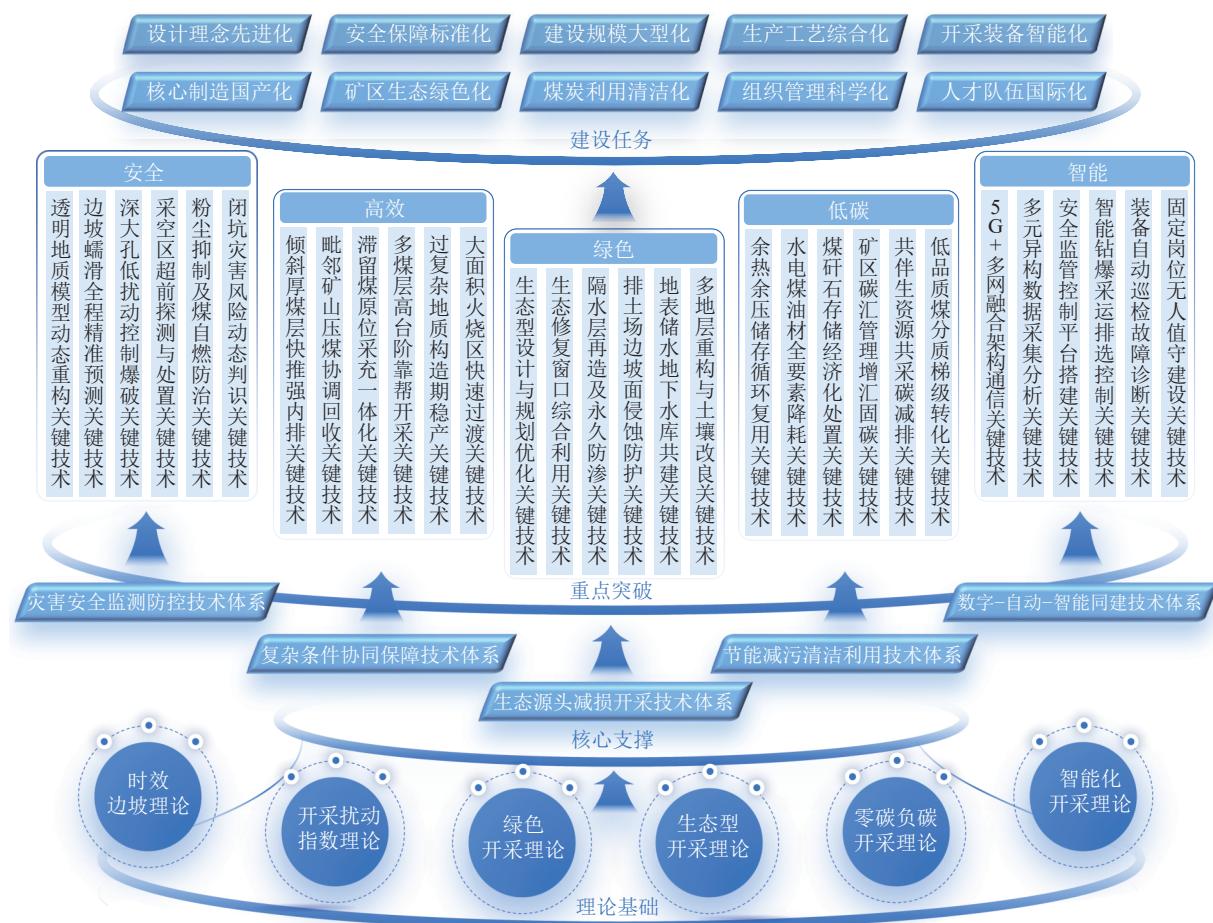


图10 露天煤矿高质量发展架构体系

Fig.10 High-quality development architecture system of open-pit coal mines

## 4.2 露天煤矿高质量发展实现路径

### 4.2.1 规划引领是露天煤矿高质量发展的基础

我国露天煤炭资源禀赋条件相对复杂,发展不平衡、布局不合理等问题相对突出,必须强化规划引领与顶层设计,这是露天煤矿高质量发展的基础。

(1) 优化露天煤矿建设布局,加强产业顶层设计。统筹考虑国家矿区布局规划、基础设施建设、相关产业发展布局等,明确各地区的露天矿区开发重点和发

展方向;基于不同地区煤炭需求与资源分布情况,优化矿权设置布局,合理分配矿权,减少因人为划界造成的煤炭资源损失,确保露天煤炭资源的高效利用;围绕建设优质产能和淘汰落后产能两大任务,进行减量置换和优化布局,严格控制新建煤矿的准入,优先建设特大型、大型露天煤矿,加大淘汰落后产能的力度,支持资源枯竭露天煤矿有序退出;深入了解露天煤炭资源的分布、质量和开采条件,科学评估露天煤

炭资源的可采储量,明确大型露天矿区的生产潜力。根据市场需求变化调整生产计划,调控露天煤矿开采产能,建立露天煤矿弹性生产机制,确保煤炭资源弹性供给、市场供需平衡。

(2) 调整露天煤矿产业结构,深化煤矿企业改革。加快露天煤矿产业结构优化升级、提升优质先进产能比重。充分发挥煤炭资源优势,聚焦煤电、煤化工、煤基新材料等领域,深度推动露天煤炭产业强链、补链、延链,提高露天煤炭产业链条的发展水平,实现露天煤炭产业的全面升级;鼓励露天煤矿企业主体加强合资合作或兼并重组,促进资源整合和优势互补,提高企业的市场竞争力和效益水平;继续深化国有煤炭企业改革,积极支持企业做大做强做精做优,增强企业的创新能力和适应能力,拓展露天煤矿企业内涵式增长的质量效益。

(3) 完善露天煤矿规程标准,规范行业健康发展。对照露天煤矿从初步设计、开工建设、生产运行、直至闭坑退出的各环节要素,全面评估当前露天煤矿建设的相关规程标准,厘清存在的问题和不足,对比分析国内外露天煤矿规程标准的差异,借鉴先进的理念和技术,明确完善规程标准的方向和重点;通过对露天煤矿相关规程标准的修订与完善,实现规程标准在露天煤矿建设全生命周期的全覆盖;在规程标准的实施过程中,要持续跟踪监测实际效果,及时进行调整和改进,确保规程标准的适用性和有效性;同时持续关注露天煤矿行业的动态变化和新技术发展,及时对标准规范进行调整和优化,以适应不断变化的市场需求和行业发展趋势。

#### 4.2.2 科技创新是露天煤矿高质量发展的驱动

煤炭工业低碳转型和高质量发展的双重压力对露天行业的科技创新工作提出了更高要求,加强以信息化、大数据、绿色化、智能化等为特征的原始科技创新是露天煤矿高质量发展的驱动。

(1) 完善科技创新机制体系,构建科技创新的制度氛围。强化科技创新的市场导向机制,建立以解决露天煤矿企业实际生产需求为导向的产学研用深度融合的科技创新体系;优化科技创新决策机制,充分发挥科学家主导创新的决策作用;完善科研项目管理机制,积极探索适合露天行业健康发展的“揭榜挂帅”等新型科研项目管理模式。

(2) 发挥企业创新主体作用,加大科研投入力度。露天企业需建立以科技创新为导向的发展机制,不断加强自身创新能力建设,主动开展全球性的产业创新布局,在企业发展过程中,将科研创新作为重要的资产进行管理;改变创新模式,从单一的技术创新模式

向模仿创新和自主创新的协同共用模式转变。同时,露天煤矿企业还应加大科研经费投入力度,持续加强科研平台建设和运行经费支持,建立长期稳定支持原创性基础研究、应用基础研究、产业化前期研究、技术标准制修订研究等研发方向的专项资金投入机制。

(3) 加强行业创新协调联动,加快关键核心技术攻关。聚焦露天开采中的重大灾害防控、高效智能开采、核心装备制造、绿色低碳发展等领域的重大基础理论、应用基础理论和关键核心技术的迫切需求,充分加强露天行业内的创新协调联动,科学布局重点攻关方向,全方位加大对重点攻关方向的政策、资金、人才、设施等方面的支持力度,重点实施一批具有原始创新和战略前瞻性的长周期、高风险、非共识、颠覆性的重大基础研究项目,圈定基础研究团队,打造原创技术策源地。

#### 4.2.3 人才培育是露天煤矿高质量发展的保障

针对目前露天行业人才短缺、人才质量不高及发展不均衡等问题,扩大培养规模、创新培养模式、完善培养机制是实现露天行业高质量发展的必要保障。

(1) 扩大培养规模,增加露天专业技术人才数量。从国家层面,应加大对露天采矿相关专业高等教育的支持力度,同步加强师资力量及教学平台建设;从教育主管部门层面,应深化教育体制改革,重视多学科交叉融合发展,优化调整露天煤矿相关专业设置,扩大招生规模,增加本科及研究生等高层次专业人才的招生数量;从社会层面,应该积极进行引导,广泛宣传露天煤矿行业优秀人才典型和先进事迹,打造高度重视人才的良好氛围,吸引更多优秀人才加入露天行业。

(2) 创新培养模式,提高专业技术人才质量。增强高校创新人才的培养功能,鼓励高等院校充分了解露天煤矿企业的人才需求,以新工科建设为载体,进一步做好学科建设工作,推动校企共同制定人才培养方案,强化产教研融合,创新培养模式,建设校企合作协同育人平台和运行机制;增强职业院校和培训机构技能人才的培养功能,充分调动职业院校和培训机构等资源,服务露天煤矿人才培养;增强企业实用人才的培养功能,推动露天煤矿企业完善培训体系,依托企业创新培训模式,通过多种途径进行在职人员知识更新、专业技能和实用技能培训,提升人才培训质量。

(3) 完善培养机制,促进行业高层次人才可持续发展。完善露天煤矿行业人才评价标准体系建设,推动跨区域跨企业职称互认、职业和职称资格贯通,建立各类人才能力素质标准,分层分类建立各类人才考核评价办法,推动优化人才薪酬分配和激励机制,引导企业形成行之有效的激励措施,激发人才动力、释放

人才活力;露天全行业要强化高层次人才培养意识,积极响应国家重大科技人才实施计划,充分落实对国家人才的配套支持政策,培养一批具有国际影响力的露天行业领军型人才,从而带动整个行业的人才队伍建设,为露天煤矿高质量发展提供有力的人才保障。

## 5 结 论

(1) 回顾了新中国成立后我国露天煤矿的建设历程,即起步恢复阶段(1949—1979年)、快速发展阶段(1980—1999年)、综合发展阶段(2000—2020年)及智能化初级发展阶段(2021年以后)。

(2) 从露天煤矿产量及数量规模、露天开采理论与技术、露天开采工艺及装备、资源开发与环境保护4个方面系统总结了我国露天煤矿70 a来发展取得的突出成就。

(3) 提出了现阶段露天煤矿发展面临的4个方面的主要问题,包括露天煤矿发展布局不均衡、矿山可持续发展面临瓶颈、关键技术难题需深入攻关、人才短缺培养机制不完善。

(4) 提出构建以“安全、高效、绿色、低碳、智能”为总体目标的全链条、全周期、全要素露天煤矿高质量发展架构体系,概括了该架构体系的内涵特征,阐释了规划引领、科技创新、人才培育分别是露天煤矿高质量发展的基础、驱动和保障。

## 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 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): 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, 31(2): 55—58.
- [3] 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.  
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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 丁怡婷. 去年我国露天煤矿产量首次突破10亿吨[N]. 人民日报, 2023—08—11.
- [7] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1—27.  
WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 1—27.
- [8] 李全生. 煤炭生态型露天开采理论与技术体系及其应用[J]. 煤炭学报, 1—18[2023—05—16]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0021>.  
LI Quansheng. Theory and technical system of coal ecological open-pit mining and its application[J]. Journal of China Coal Society, 1—18[2023—05—16]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0021>.
- [9] 徐行. 对“一五”时期能源工业建设的重新审视[J]. 当代中国史研究, 2007(2): 78—84.  
XU Xing. Reconsideration of the energy industry development in the first five-year plan period[J]. Contemporary China History Studies, 2007(2): 78—84.
- [10] 卫代福. 我国露天煤矿发展初步分析[J]. 露天采矿, 1989(1): 1—6.  
WEI Daifu. Preliminary analysis on the development of open pit coal mine in China[J]. Opencast Mining, 1989(1): 1—6.
- [11] 姬长生. 我国露天煤矿开采工艺发展状况综述[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(3): 297—300.  
JI Changsheng. On development of surface coal mining systems in China[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2008, 25(3): 297—300.
- [12] 白中科, 王治国, 赵景逵, 等. 大型露天煤矿废弃地生态环境重建的研究[J]. 生态经济, 1996(2): 32—36.  
BAI Zhongke, WANG Zhiguo, ZHAO Jingkui, et al. Study on rebuilding eco-environment of waste land within the large opencut coal mining[J]. Ecological Economy, 1996(2): 32—36.
- [13] 宋子岭, 范军富, 王来贵, 等. 露天矿绿色开采工艺及工艺环节匹配关系模型[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2018, 37(3): 456—461.  
SONG Ziling, FAN Junfu, WANG Laogui, et al. Surface mine green-mining technology system and reasonable matching relationship between technology units model[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2018, 37(3): 456—461.
- [14] 才庆祥, 周伟, 彭洪阁, 等. 厚覆盖层下拉斗铲剥离与半连续采煤系统的可靠性[J]. 煤炭学报, 2009, 34(11): 1456—1459.  
CAI Qingxiang, ZHOU Wei, PENG Hongge, et al. Reliability of dragline stripping and semi-continuous mining coal system under the thick overburden[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(11): 1456—1459.
- [15] 王忠鑫, 孙鑫, 曾祥玉, 等. 我国露天煤矿智能化建设现状及困境与发展路径[J]. 露天采矿技术, 2022, 37(3): 1—7.  
WANG Zhongxin, SUN Xin, ZENG Xiangyu, et al. Current situation and dilemma and development path of intelligent construction of open-pit coal mine in China[J]. Opencast Mining Technology, 2022, 37(3): 1—7.
- [16] 中国煤炭工业协会. 关于印发《露天煤矿高质量发展指导意见》

的通知[EB/OL]. [2023-10-20]. <https://www.coalchina.org.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=61&id=150352>.

[17] 马晓敏. 数字科技赋能现代矿山建设——中国工程院院士邵安林谈如何推进智慧矿山建设[N]. 中国矿业报, 2023-08-17.

[18] 杨晓伟, 王妍, 刘欣, 等. 我国露天煤矿发展现状及展望[J]. 中国煤炭, 2023, 49(6): 126-133.  
YANG Xiaowei, WANG Yan, LIU Xin, et al. Present situation and prospect of the development of open-pit coal mine in China[J]. China Coal, 2023, 49(6): 126-133.

[19] 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]. Opencast Mining Technology, 2019, 34(1): 1-9.

[20] 宋子岭, 白润才, 谢雨志. VULCAN 系统在我国露天矿中应用前景[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2000, 19(4): 344-347.  
SONG Ziling, BAI Runcai, XIE Yuzhi. Prospect of VULCAN system application in China's surface mine[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2000, 19(4): 344-347.

[21] 彭苏萍. 我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2331-2345.  
PENG Suping. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2331-2345.

[22] 王国法, 张良, 李首滨, 等. 煤矿无人化智能开采系统理论与技术研发进展[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 34-53.  
WANG Guofa, ZHANG Liang, LI Shoubin, et al. Progresses in theory and technological development of unmanned smart mining system[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 34-53.

[23] 田会. 露天开采方案选择煤岩计算的计算机方法相交图形法[J]. 煤炭学报, 1987, 12(4): 65-73.  
TIAN Hui. Intersection graphic method——a method for calculating quantity of coal and rock by using a computer for selection of surface mining schemes[J]. Journal of China Coal Society, 1987, 12(4): 65-73.

[24] 张幼蒂, 杨荣新. 露天开采境界动态优化的探讨[J]. 中国矿业大学学报, 1991, 20(1): 10-15.  
ZHANG Youdi, YANG Rongxin. Discussion on the dynamic optimization for open pit mining limit[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1991, 20(1): 10-15.

[25] 杨荣新. 露天开采境界[J]. 中国矿业大学学报, 1993, 22(3): 1-11.  
YANG Rongxin. Open pit mining limit[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1993, 22(3): 1-11.

[26] 姬长生, 张幼蒂. 露天矿生产能力及储量优化[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(3): 250-253.  
JI Changsheng, ZHANG Youdi. Optimization of surface mine production rate and reserves[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1998, 27(3): 250-253.

[27] 姬长生, 张幼蒂. 露天矿生产能力的优化[J]. 煤炭学报, 1998, 23(5): 550-555.  
JI Changsheng, ZHANG Youdi. Optimization of productive capacity of surface mine[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(5): 550-555.

[28] 于汝缓, 习永峰. 露天矿工作线长度的优化[J]. 中国矿业学院学报, 1986(1): 14-28.  
YU Rushou, XI Yongfeng. Optimization of the economical length of working-line in open pit mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1986(1): 14-28.

[29] 白润才, 李成盛, 刘光伟. 蒙东能源西二号露天煤矿采区转向方式研究[J]. 科技导报, 2014, 32(22): 57-61.  
BAI Runcai, LI Chengsheng, LIU Guangwei. Research on mining area transition mode in Mengdong Western No.2 surface coal mine[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(22): 57-61.

[30] 才庆祥, 姬长生. 大型露天煤矿采区转向方式研究[J]. 中国矿业大学学报, 1996, 25(4): 45-49.  
CAI Qingxiang, JI Changsheng. Transition method from one mining area to the next in large surface coal mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1996, 25(4): 45-49.

[31] 顾正洪, 李曙光, 于汝缓. 近水平矿床露天矿采区的过渡方式[J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版), 1997, 16(1): 26-29.  
GU Zhenghong, LI Shuguang, YU Rushou. The study of the methods of mine block transition in mines of approximate horizontal deposit[J]. Journal of Fuxin Mining Institute (Natural Science), 1997, 16(1): 26-29.

[32] 刘宪权, 段起超. 安太堡露天矿开采程序优化[J]. 煤炭工程, 2006(11): 5-6.  
LIU Xianquan, DUAN Qichao. Optimization of mining procedures for the Antaibao open pit mine[J]. Coal Engineering, 2006(11): 5-6.

[33] 刘宪权, 李志强, 史建华. 分区开采转向接续期间存在的问题及对策[J]. 露天采煤技术, 2001(4): 8-9.  
LIU Xianquan, LI Zhiqiang, SHI Jianhua. Problems and countermeasures during transition period for mining in section surface coal mine[J]. Opencast Mining Technology, 2001(4): 8-9.

[34] 徐志远, 才庆祥, 刘宪权. 安太堡露天煤矿采区转向过渡若干问题及对策[J]. 煤炭工程, 2006(12): 9-12.  
XU Zhiyuan, CAI Qingxiang, LIU Xianquan. A number of problems and countermeasures during transition period for mining in Antaibao coal mine[J]. Coal Engineering, 2006(12): 9-12.

[35] 姬长生. 露天煤矿相邻条区间转向方式研究[J]. 煤炭工程, 2011(12): 1-3, 7.  
JI Changsheng. Study on turning method between neighboring mining panels in surface mine[J]. Coal Engineering, 2011(12): 1-3, 7.

[36] 周伟, 才庆祥, 谢廷堃, 等. 大型近水平露天煤矿转向期间开拓运输系统优化研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(4): 404-408.  
ZHOU Wei, CAI Qingxiang, XIE Tingkun, et al. Optimization of in-pit development transport system during transitional period in large open pit mine with flat coal deposit[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(4): 404-408.

[37] 陈百玉. 露天煤矿生产剥采比的确定[J]. 煤炭学报, 1988(2): 59-63.  
CHEN Baiyu. Determination of stripping ratio of opencast mine[J]. Journal of China Coal Society, 1988(2): 59-63.

[38] 宋子岭, 白润才, 伊伯良. 市场经济条件下露天矿生产剥采比控

制方法[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2000,19(5):454-457.

SONG Ziling, BAI Runcai, YI Bailiang. The control method of surface mining of the operational stripping ratio on condition of market-economy[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science Edition), 2000, 19(5): 454-457.

[39] 于汝缓.露天矿设计理论的新发展[J].中国矿业大学学报,2003,32(1): 1-7.

YU Rushou. New development of theories of open-pit mine plan[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(1): 1-7.

[40] 白润才,吴东海,刘光伟,等.元宝山露天矿改河期间剥采工程接续方式[J].金属矿山,2015,44(1): 20-24.

BAI Runcai, WU Donghai, LIU Guangwei, et al. Stripping and mining engineering splice during the river diversion in yuanbaoshan surface mine[J]. Metal Mine, 2015, 44(1): 20-24.

[41] 赵红泽,张瑞新,刘宪权,等.露天煤矿双坑动态剥采调节新方法[J].煤炭学报,2014,39(5): 855-860.

ZHAO Hongze, ZHANG Ruixin, LIU Xianquan, et al. New double pits dynamic regulating mode for stripping and mining in surface coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 855-860.

[42] 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 transition period for mining-in-areas[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(4): 412-416.

[43] 车兆学.安家岭露天煤矿内排开拓运输系统优化[J].采矿与安全工程学报,2007,24(4): 494-497,501.

CHE Zhaoxue. Optimization of internal dumping development haulage system in anjialing surface coal mine[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, 24(4): 494-497,501.

[44] 车兆学,才庆祥.露天煤矿内排时期下部水平开拓运输系统优化[J].煤炭科学技术,2007,35(10): 33-37.

CHE Zhaoxue, CAI Qingxiang. Optimization of horizontal development and transportation system at bottom of open pit mine during internal dumping period[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(10): 33-37.

[45] 刘福明,才庆祥,陈树召,等.露天煤矿中间搭桥适用条件与关键参数的确定[J].煤炭学报,2015,40(1): 73-79.

LIU Fuming, CAI Qingxiang, CHEN Shuzhao, et al. Applicable condition and key parameters determination of pit-middle bridging in open pit coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 73-79.

[46] 刘光伟,柴森霖,白润才,等.露天矿山开拓运输系统道路选线算法[J].煤炭学报,2019,44(12): 3931-3940.

LIU Guangwei, CHAI Senlin, BAI Runcai, et al. Route selection algorithm of open-pit mine transportation system[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3931-3940.

[47] 白占平,郭增涛.井工开采对边坡稳定性影响的有限元分析[J].中国矿业大学学报,1991,20(4): 82-86.

BAI Zhanping, GUO Zengtao. A finite element analysis of the influence of underground mining on the slope stability of open-pit mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1991, 20(4): 82-86.

[48] 周昌寿.露天煤矿内排土场的稳定性[J].中国矿业大学学报,1992,21(1): 28-33.

ZHOU Changshou. Stability of the waste dump inside open pit mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1992, 21(1): 28-33.

[49] 曹兰柱,白占平,刘志斌.逆倾岩层边坡稳定性数值分析[J].露天采煤技术,1997(1): 34-36.

CAO Lanzhu, BAI Zhanping, LIU Zhibin. Numerical analysis of stability of counter-inclined strata slope[J]. Opencast Mining Technology, 1997(1): 34-36.

[50] 曹兰柱,刘志斌,白占平.逆倾岩层边坡稳定性物理模拟研究[J].阜新矿业学院学报(自然科学版),1997,16(5): 517-520.

CAO Lanzhu, LIU Zhibin, BAI Zhanping. Model test study on the stability of counter-inclined strata slope[J]. Journal of Fuxin Mining Institute(Natural Science), 1997, 16(5): 517-520.

[51] 芮勇勤,徐小荷,马新民,等.露天煤矿边坡中软弱夹层的蠕动变形特性分析[J].东北大学学报,1999,20(6): 612-614.

RUI Yongqin, XU Xiaohe, MA Xinmin, et al. Study on non-linear creep property of weak layer in slope of openpit coal mine[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 1999, 20(6): 612-614.

[52] 舒继森,王兴中,周毅勇.岩石边坡中滑动面水压分布假设的改进[J].中国矿业大学学报,2004,33(5): 509-512.

SHU Jisen, WANG Xingzhong, ZHOU Yiyong. Improving on assumption for water pressure distributing on failure surface in rock slope[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(5): 509-512.

[53] 舒继森.露天煤矿边坡稳定关键影响因素及边坡治理与采矿一体化方法研究[D].徐州:中国矿业大学,2009.

SHU Jisen. Study on key factors influencing slope stability and integration of mining and slope control in surface mines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.

[54] 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.

[55] 杨天鸿,张锋春,于庆磊,等.露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势[J].岩土力学,2011,32(5): 1437-1451.

YANG Tianhong, ZHANG Fengchun, YU Qinglei, et al. Research situation of open-pit mining high and steep slope stability and its developing trend[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1437-1451.

[56] 王东,王珍,曹兰柱,等.断层位置对露天矿顺倾层状边坡稳定性的影响研究[J].中国安全科学学报,2014,24(12): 83-89.

WANG Dong, WANG Zhen, CAO Lanzhu, et al. Influence of fault's position on stability of dip bedded slope in surface mines[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(12): 83-89.

[57] 陈彦龙,崔慧栋,李明,等.实时低温条件下露天矿饱和损伤煤系砂岩动态力学特性及其破坏机制[J].煤炭学报,2022,47(3):

1168–1179.

CHEN Yanlong, CUI Huidong, LI Ming, et al. Dynamic mechanical properties and failure mechanism of saturated coal-measure sandstone in open pit mine with damage under real-time low-temperature conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1168–1179.

[58] 陈彦龙, 李明, 浦海, 等. 考虑循环载荷初始损伤效应的煤样动态力学特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 2123–2137.

CHEN Yanlong, LI Ming, PU Hai, et al. Experimental study on dynamic mechanical characteristics of coal specimens considering initial damage effect of cyclic loading[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2123–2137.

[59] 韩流. 露天矿时效边坡稳定性分析理论与实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.

HAN Liu. Theory analysis and experimental research for time-dependent slope stability of surface mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.

[60] 刘福明, 才庆祥, 周伟, 等. 露天矿排土场边坡降水入渗规律试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1534–1540.

LIU Fuming, CAI Qingxiang, ZHOU Wei, et al. Experimental study on the rainfall infiltration rule in the dump slope of surface mines[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1534–1540.

[61] 彭世济. 露天矿电铲与铁道运输工作配合的几个问题[J]. 北京矿业学院学报, 1956(2): 70–78.

PENG Shiji. A few problems in matching electric shovels with railroad transportation work in open pit mines[J]. Journal of Beijing Institute of Mining and Technology, 1956(2): 70–78.

[62] 彭世济, 骆中洲, 顾培亮, 等. 露天矿生产工艺联系问题[J]. 煤炭学报, 1964, 1(1): 61–76.

PENG Shiji, LUO Zhongzhou, GU Peiliang, et al. Issues related to the production process of open-pit mines[J]. Journal of China Coal Society, 1964, 1(1): 61–76.

[63] 王世辉, 骆中洲. 铁道运输露天矿设备合理匹配的计算机模拟研究[J]. 中国矿业学院学报, 1983(1): 25–38.

WANG Shihui, LUO Zhongzhou. Computer simulation as applied to rationalization of matching of equipment in open pits with railway transportation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1983(1): 25–38.

[64] 骆中洲, 王世辉. 用电子计算机模拟露天矿生产系统[J]. 煤炭科学技术, 1982(7): 32–39.

LUO Zhongzhou, WANG Shihui. The production system of open pit mine is simulated by electronic computer[J]. Coal Science and Technology, 1982(7): 32–39.

[65] 金智求. 关于露天采煤技术发展问题的探讨[J]. 煤矿设计, 1982(4): 10–13.

JIN Zhiqiu. Discussion on the development of open-pit coal mining technology[J]. 1982(4): 10–13.

[66] 习永峰, 彭世济, 张达贤. 露天矿卡车调度模型及其应用[J]. 中国矿业学院学报, 1988(2): 37–45.

XI Yongfeng, PENG Shiji, ZHANG Daxian. A truck dispatching model for open-pit mining and its application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1988(2): 37–45.

[67] 彭世济, 张达贤, 习永峰. 露天煤矿连续工艺系统可靠性分析[J]. 煤炭学报, 1991, 16(3): 12–20.

PENG Shiji, ZHANG Daxian, XI Yongfeng. Reliability analysis of a continuous mining system in a surface mine[J]. Journal of China Coal Society, 1991, 16(3): 12–20.

[68] 张幼蒂, 傅洪贤, 王启瑞, 等. 抛掷爆破与剥离台阶开采参数分析——露天矿倒堆剥离开采方法系列论文之四[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(1): 30–33.

ZHANG Youdi, FU Hongxian, WANG Qirui, et al. Casting blast and analysis of mining parameters of stripping bench—Technical paper series for open cast method in surface mines (IV)[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(1): 30–33.

[69] 张幼蒂, 郭昭华, 杨云浩, 等. 倒堆剥离拉斗铲规格选择——露天矿倒堆剥离开采方法系列论文之二[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(5): 4–6.

ZHANG Youdi, GUO Zhaohua, YANG Yunhao, et al. Selection of draglines for open cast mining—Technical paper series for open cast method in surface mines (II)[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(5): 4–6.

[70] 张幼蒂, 李克民, 尚涛, 等. 露天矿倒堆剥离工艺的发展及其应用前景——露天矿倒堆剥离开采方法系列论文之一[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(4): 4–7.

ZHANG Youdi, LI Kemin, SHANG Tao, et al. Open cast method and its application prospect in surface mines in China—Technical paper series for open cast method in surface mines (I)[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(4): 4–7.

[71] 尚涛, 张幼蒂, 李克民, 等. 露天煤矿拉斗铲倒堆工艺运煤系统优化选择——露天矿倒堆剥离开采方法系列论文之三[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(6): 27–30.

SHANG Tao, ZHANG Youdi, LI Kemin, et al. Optimal selection of coal haulage systems in open cast mining—Technical paper series for open cast method in surface mines (III)[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(6): 27–30.

[72] 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 mines in China[J]. Coal Engineering, 2005(10): 46–48.

[73] 车兆学. 轮式软岩破碎机的应用[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(10): 6–8, 22.

CHE Zhaoxue. Application of wheel type soft rock crusher[J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(10): 6–8, 22.

[74] 车兆学, 才庆祥. 黑岱沟露天煤矿剥离黄土半连续工艺研究[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(6): 673–677.

CHE Zhaoxue, CAI Qingxiang. Study on semi-continuous mining system for loess stripping in surface mines of heidaigou[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(6): 673–677.

[75] 车兆学, 才庆祥, 姬长生, 等. 露天矿表土剥离半连续开采工艺研究[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 110–112.

CHE Zhaoxue, CAI Qingxiang, JI Changsheng, et al. Study on half-continuous technology of topsoil stripping in surface mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(1):

110–112.

[76] 张达贤,卢明银.综合开采工艺及其在中国露天矿的应用[J].化  
工矿山技术,1992,21(4):6–10.

ZHANG Daxian, LU Mingyin. Combined mining system and its  
application in Chinese surface mining[J]. Industrial Minerals &  
Processing, 1992, 21(4): 6–10.

[77] 车兆学,翟正江,杨云浩.露天矿破碎站移设步距的研究[J].中国  
矿业大学学报,2001,30(4):399–402.

CHE Zhaoxue, ZHAI Zhengjiang, YANG Yunhao. Study on ad-  
vancing distance of crushing station in surface mines[J]. Journal of  
China University of Mining & Technology, 2001, 30(4): 399–402.

[78] 李克民,张幼蒂,傅洪贤.露天煤矿抛掷爆破参数分析[J].采矿与  
安全工程学报,2006,23(4):423–426.

LI Kemin, ZHANG Youdi, FU Hongxian. Analysis of casting blast  
parameters in surface coal mines[J]. Journal of Mining and Safety  
Engineering, 2006, 23(4): 423–426.

[79] 宋子岭.现代露天矿设计理论与方法研究[D].阜新:辽宁工程技  
术大学,2007.

SONG Ziling. Study on the design theory and method for modern  
surface mining[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2007.

[80] 尚涛,才庆祥,陈树召,等.带自移式破碎机半连续工艺系统工作  
面参数优化[J].中国矿业大学学报,2010,39(6):820–825.

SHANG Tao, CAI Qingxiang, CHEN Shuzhao, et al. Working face  
parameter optimization for a semi-continuous technology having a  
self-advancing crusher[J]. Journal of China University of Mining &  
Technology, 2010, 39(6): 820–825.

[81] 姬长生,陈清华,孙金龙.半连续开采工艺应用边界条件模型研  
究[J].中国矿业大学学报,2014,43(4):577–581.

JI Changsheng, CHEN Qinghua, SUN Jinlong. Investigation of the  
boundary conditions of modeling semi-continuous mining  
system[J]. Journal of China University of Mining & Technology,  
2014, 43(4): 577–581.

[82] 陈树召.大型露天煤矿他移式破碎站半连续工艺系统优化与应  
用研究[D].徐州:中国矿业大学,2011.

CHEN Shuzhao. Optimization and application research on semi-  
continuous technology system with mobile crusher in large open  
pit coal mines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Tech-  
nology, 2011.

[83] 马力.近水平露天煤矿抛掷爆破条件下多煤层开采关键技术研  
究[D].徐州:中国矿业大学,2015.

MA Li. Key techniques of multi-coal seams mining under condi-  
tion of adopting blast casting[D]. Xuzhou: China University of  
Mining and Technology, 2015.

[84] GAO Yuan, WANG Jinman, ZHANG Min, et al. Measurement and  
prediction of land use conflict in an opencast mining area[J]. *Re-  
sources Policy*, 2021, 71: 101999.

[85] ZHANG Min, WANG Jinman, LI Sijia. Tempo-spatial changes  
and main anthropogenic influence factors of vegetation fractional  
coverage in a large-scale opencast coal mine area from 1992 to  
2015[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 232: 940–952.

[86] CHENG Wei, LEI Shaogang, BIAN Zhengfu, et al. Geographic  
distribution of heavy metals and identification of their sources in  
soils near large, open-pit coal mines using positive matrix factoriz-  
ation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 387: 121666.

[87] ZHEN Qing, ZHENG Jiayong, ZHANG Xingchang, et al. Changes  
of solute transport characteristics in soil profile after mining at an  
opencast coal mine site on the Loess Plateau, China[J]. *Science of  
the Total Environment*, 2019, 665: 142–152.

[88] ZHOU Gang, XU Yixin, WANG Yongmei, et al. Study on MICP  
dust suppression technology in open pit coal mine: Preparation and  
mechanism of microbial dust suppression material[J]. *Journal of  
Environmental Management*, 2023, 343: 118181.

[89] 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. Prob-  
lems and countermeasures in green, safe and efficient mining of  
large-scale open-pit mines in Xinjiang[J]. *Journal of Mining and  
Safety Engineering*, 2022, 39(1): 1–12.

[90] 程建龙,陆兆华,范英宏.露天煤矿区生态风险评价方法[J].生态  
学报,2004,24(12):2945–2950.

CHENG Jianlong, LU Zhaohua, FAN Yinghong. Method of ecolo-  
gical risk assessment for opencast mine area[J]. *Acta Ecologica  
Sinica*, 2004, 24(12): 2945–2950.

[91] 胡振琪.露天煤矿复垦土壤物理特性的空间变异性[J].中国矿业  
大学学报,1992,21(4):31–37.

HU Zhenqi. Spatial variability of physical properties of reclaimed  
soil in surface coal mine[J]. *Journal of China University of Mining  
& Technology*, 1992, 21(4): 31–37.

[92] 何书金,郭焕成,韦朝阳,等.中国煤矿区的土地复垦[J].地理研  
究,1996,15(3):23–32.

HE Shujin, GUO Huancheng, WEI Chaoyang, et al. A study on the  
land restoration in coal mining fields in China[J]. *Geographical Re-  
search*, 1996, 15(3): 23–32.

[93] 白中科,王治国,赵景逵,等.安太堡露天煤矿水土流失特征与控  
制[J].煤炭学报,1997,22(5):96–101.

BAI Zhongke, WANG Zhiguo, ZHAO Jingkui, et al. Characteris-  
tics of soil erosion and its control in Antaibao open pit mine[J].  
*Journal of China Coal Society*, 1997, 22(5): 96–101.

[94] 宋子岭,范军富,王来贵,等.露天煤矿开采现状及生态环境影响  
分析[J].露天采矿技术,2016,31(9):1–4,9.

SONG Ziling, FAN Junfu, WANG Laigui, et al. Impact analysis on  
mining status and ecological environment in open-pit coal mine[J].  
*Opencast Mining Technology*, 2016, 31(9): 1–4,9.

[95] 钱鸣高,缪协兴,许家林.资源与环境协调(绿色)开采及其技术  
体系[J].采矿与安全工程学报,2006,23(1):1–5.

QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Resources and envir-  
onment harmonics (green) mining and its technological system[J].  
*Journal of Mining and Safety Engineering*, 2006, 23(1): 1–5.

[96] 钱鸣高,缪协兴,许家林.资源与环境协调(绿色)开采[J].煤炭  
学报,2007,32(1):1–7.

QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Green mining of coal  
resources harmonizing with environment[J]. *Journal of China Coal  
Society*, 2007, 32(1): 1–7.

[97] 钱鸣高,许家林,缪协兴.煤矿绿色开采技术[J].中国矿业大学学  
报,2003,32(4):5–10.

QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiexing. Green technique in

coal mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2003, 32(4): 5–10.

[98] 白中科, 赵景逵, 朱荫湄. 试论矿区生态重建[J]. *自然资源学报*, 1999, 14(1): 35.

BAI Zhongke, ZHAO Jingkui, ZHU Yinmei. Discussion on ecological rehabilitation of mining areas[J]. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(1): 35.

[99] 卞正富, 许家林, 雷少刚. 论矿山生态建设[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(1): 13–19.

BIAN Zhengfu, XU Jialin, LEI Shaogang. Discussion on mine ecological construction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(1): 13–19.

[100] 才庆祥, 高更君, 尚涛. 露天矿剥离与土地复垦一体化作业优化研究[J]. *煤炭学报*, 2002, 27(3): 276–280.

CAI Qingxiang, GAO Gengjun, SHANG Tao. Optional study of integrating operation of mining and land reclamation in surface mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2002, 27(3): 276–280.

[101] 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.

[102] 宋子岭, 赵东洋, 张宇航, 等. 露天煤矿绿色开采生态环境评价体系模糊评判研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(10): 58–66.

SONG Ziling, ZHAO Dongyang, ZHANG Yuhang, et al. Study on evaluation model and application of green mining ecological environment evaluation system in open-pit coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(10): 58–66.

[103] 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.

[104] 李全生. 蒙东草原区大型露天煤矿减损开采与生态修复关键技术[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(5): 905–915.

LI Quansheng. Key technologies for damage reduction mining and ecological restoration of large-scale open pit coal mines in grassland area of eastern Inner Mongolia[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2023, 40(5): 905–915.

[105] 李全生, 李琳. 东部草原区露天煤矿减损开采与生态系统修复技术及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 484–492.

LI Quansheng, LI Lin. Technology and application of damage reduction mining and ecosystem restoration of open-pit coal mines in eastern grassland area[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 484–492.

[106] 毕银丽, 彭苏萍, 杜善周. 西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1355–1364.

BI Yinli, PENG Suping, DU Shanzhou. Technological difficulties and future directions of ecological reconstruction in open pit coal mine of the arid and semi-arid areas of Western China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1355–1364.

[107] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(7): 2197–2211.

XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(7): 2197–2211.

[108] 顾清华, 李学现, 卢才武, 等. “双碳”背景下露天矿智能化建设新模式的技术路径[J]. *金属矿山*, 2023(5): 1–13.

GU Qinghua, LI Xuexian, LU Caiwu, et al. Technical path of new intelligent mode of open-pit mine under the background of “Dual Carbon” [J]. *Metal Mine*, 2023(5): 1–13.

[109] 赵浩. 露天煤矿高质量安全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.

[110] 钱鸣高, 许家林. 煤炭工业发展面临几个问题的讨论[J]. *采矿与安全工程学报*, 2006, 23(2): 127–132.

QIAN Minggao, XU Jialin. Discussion of several issues concerning the development of coal industry in China[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2006, 23(2): 127–132.

[111] 王家臣, KRETSCHMANN Jürgen, 李杨. 关闭煤炭矿区资源利用与可持续发展的几点思考[J]. *矿业科学学报*, 2021, 6(6): 633–641.

WANG Jiachen, KRETSCHMANN Jürgen, LI Yang. Reflections on resource utilization and sustainable development of closed coal mining areas[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 6(6): 633–641.

[112] 高文文. 废弃露天矿坑再利用模式研究及实证[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.

GAO Wenwen. Research and empirical study on the reuse patterns of abandoned open pits[D]. Beijing: China University of Geosciences Beijing, 2017.

[113] 曹寿鹤, 陈树召, 尚涛, 等. 废弃露天矿坑储油蓄能综合利用模式研究[J]. *中国矿业*, 2021, 30(6): 89–94.

CAO Shouhe, CHEN Shuzhao, SHANG Tao, et al. Comprehensive utilization model of oil storage and energy storage of abandoned open-pit[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(6): 89–94.

[114] 吴振华, 雷少刚, 袁庆武, 等. 景观生态网络构建控制露天煤矿开采对景观生态影响: 以半干旱草原区为例[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 133: 108403.

WU Zhenhua, LEI Shaogang, YAN Qingwu, et al. Landscape ecological network construction controlling surface coal mining effect on landscape ecology: A case study of a mining city in semi-arid steppe[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 133: 108403.

[115] 刘善军, 吴立新, 毛亚纯, 等. 天-空-地协同的露天矿边坡智能监测技术及典型应用[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 2265–2276.

LIU Shanjun, WU Lixin, MAO Yachun, et al. Spaceborne-airborne-ground collaborated intelligent monitoring on open-pit slope and its typical applications[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2265–2276.

[116] 廖明生, 唐婧, 王腾, 等. 高分辨率 SAR 数据在三峡库区滑坡监测中的应用[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(2): 217–229.

LIAO Mingsheng, TANG Jing, WANG Teng, et al. Landslide monitoring with high-resolution SAR data in the Three Gorges region[J]. *Science China Earth Science*, 2012, 42(2): 217–229.

[117] 刘超, 高井祥, 王坚, 等. GPS/伪卫星技术在露天矿边坡监测中的应用[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(5): 755–759.

LIU Chao, GAO Jingxiang, WANG Jian, et al. GPS /pseudolites technology for the slope deformation monitoring in open-pit mine[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(5): 755–759.

[118] 盛业华, 同志刚, 宋金铃. 矿山地表塌陷区的数字近景摄影测量监测技术[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 411–415.

SHENG Yehua, YAN Zhigang, SONG Jinling. Monitoring technique for mining subsidence with digital terrestrial photogrammetry[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2003, 32(4): 411–415.

[119] 吴立新, 高均海, 葛大庆, 等. 工矿区地表沉陷 D-InSAR 监测试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, 26(8): 778–782.

WU Lixin, GAO Junhai, GE Daqing, et al. Experimental study on surface subsidence monitoring with D-InSAR in mining area[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2005, 26(8): 778–782.

[120] 许志华, 吴立新, 陈绍杰, 等. 基于无人机影像的露天矿工程量监测分析方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 84–88.

XU Zhihua, WU Lixin, CHEN Shaojie, et al. Method of engineering volume monitoring and calculation for open-pit mine from UAV images[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2016, 37(1): 84–88.

[121] 王忠鑫, 田会, 王东, 等. 露天采矿科学目标的演变与未来发展趋势[J/OL]. 煤炭学报, 1–26[2023–12–25]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0041>.

WANG Zhongxin, TIAN Hui, WANG Dong, et al. Evolution and future prospect of scientific objectives of open-pit mining[J/OL]. Journal of China Coal Society, 1–26[2023–12–25]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0041>.

[122] 丁鑫品. 露天矿端帮采场覆岩运移规律与边坡稳定控制方法研究[D]. 北京: 煤炭科学研究院, 2022.

DING Xinpин. Study on overburden movement law and slope stability control method in the end slope mining field of an open-pit mine[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2022.

[123] 丁鑫品, 李绍臣, 王俊, 等. 露天矿端帮煤柱回收井工开采工作面推进方向的优化[J]. 煤炭学报, 2013, 38(11): 1923–1928.

DING Xinpин, LI Shaichen, WANG Jun, et al. Optimization of underground mining development direction about end slope coal pillar recovery of open-pit coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(11): 1923–1928.

[124] 蓝航. 基于 FLAC3D 的边坡单元安全度分析及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(4): 570–574.

LAN Hang. Analysis of zone safety degree of slopes and its application based on FLAC3D[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(4): 570–574.

[125] 刘宪权, 朱建明, 冯锦艳, 等. 水平厚煤层露天联合开采下边坡破坏机理[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1346–1350.

LIU Xianquan, ZHU Jianming, FENG Jinyan, et al. Mechanism of the slope failure of horizontal thick coal seam under the condition of combined mining[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1346–1350.

[126] 武懋. 露天联采下煤层倾角对岩体运移规律的影响[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 281–284.

WU Mao. Influence of coal seam dip angle on rock mass migration law under open-pit combined underground mining[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(10): 281–284.

[127] 徐志远. 平朔矿区露井联采技术综述[J]. 煤炭工程, 2015, 47(7): 11–14.

XU Zhiyuan. A review on combined open-underground mining technology in pingshuo mining area[J]. Coal Engineering, 2015, 47(7): 11–14.

[128] 朱建明, 冯锦艳, 彭新坡, 等. 露井联采下采动边坡移动规律及开采参数优化[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1089–1094.

ZHU Jianming, FENG Jinyan, PENG Xinpo, et al. The failure law of mine slope and the optimization of boundary parameter between open-pit and underground combined mining[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1089–1094.

[129] 朱建明, 张宏涛, 周保精, 等. 井工开采对露井联采边坡稳定影响的塑性极限分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 344–350.

ZHU Jianming, ZHANG Hongtao, ZHOU Baojing, et al. Plastic limit analysis of stability of the open-pit slope subject to underground mining[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 344–350.

[130] 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, 36(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, 36(6): 743–747.

[131] 韩流, 周伟, 舒继森, 等. 时效边坡下的端帮易滑区靠帮开采方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(5): 756–760.

HAN Liu, ZHOU Wei, SHU Jisen, et al. Steep mining method in slippery area of end-slope under slope timeliness[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(5): 756–760.

[132] 尚涛, 韩流, 舒继森, 等. 节地减损开采模式下边坡结构及应力发展规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3644–3654.

SHANG Tao, HAN Liu, SHU Jisen, et al. Slope structure and stress development rule under mining mode of land saving and ecological detraction[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3644–3654.

[133] 白润才, 刘闯, 薛应东, 等. 相邻露天矿边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.

[134] 刘闯, 白润才, 刘光伟, 等. 基于协调开采技术的相邻露天矿开采程序优化[J]. 重庆大学学报, 2016, 39(4): 103–111.

LIU Chuang, BAI Runcai, LIU Guangwei, et al. Optimization of minings sequence based on coordination mining technology between two adjacent open pits[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2016, 39(4): 103–111.

[135] 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, 41(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,

41(9): 91–95.

[136] WU Haoshuai, CHEN Yanlong, LV Haoyan, et al. Stability analysis of rib pillars in highwall mining under dynamic and static loads in open-pit coal mine[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2022, 9: 38.

[137] 陈彦龙, 吴豪帅. 露天矿端帮开采下的支撑煤柱突变失稳机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(5): 859–865.

CHEN Yanlong, WU Haoshuai. Catastrophe instability mechanism of rib pillar in open-pit highwall mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(5): 859–865.

[138] 丁鑫品, 李凤明, 付天光, 等. 端帮采场覆岩移动破坏规律及边坡稳定控制方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2883–2894.

DING Xinp, LI Fengming, FU Tianguang, et al. Overburden movement and failure law of coalface in end slope and the slope stability control method[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 2883–2894.

[139] 王东, 姜聚宇, 韩新平, 等. 褐煤露天矿端帮开采边坡支撑煤柱稳定性研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(12): 62–67.

WANG Dong, JIANG Juyu, HAN Xinp, et al. Stability of supporting coal pillar for slope highwall mined in lignite surface mine[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(12): 62–67.

[140] 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.

[141] 郭子一, 刘建荣, 郭志宾, 等. 我国煤系共伴生矿产资源综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(6): 1–9.

GUO Ziyi, LIU Jianrong, GUO Zhibin. Research progress on comprehensive utilization of associated mineral resources in coal-bearing strata in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(6): 1–9.

[142] 谢和平, 张吉雄, 高峰, 等. 煤矿负碳高效充填开采理论与技术构想[J/OL]. 煤炭学报, 1–11[2023–10–31]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1091>.

XIE Heping, ZHANG Jixiong, GAO Feng, et al. Theory and technical conception of carbon negative and efficient backfill mining in coal mines[J/OL]. Journal of China Coal Society, 1–11[2023–10–31]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1091>.

[143] 卞正富, 伍小杰, 周跃进, 等. 煤炭零碳开采技术[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2613–2625.

BIAN Zhengfu, WU Xiaojie, ZHOU Yuejin, et al. Coal mining technology with net zero carbon emission[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2613–2625.

[144] 王国法, 杜毅博, 任怀伟, 等. 智能化煤矿顶层设计研究与实践[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1909–1924.

WANG Guofa, DU Yibo, REN Huawei, et al. Top level design and practice of smart coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1909–1924.