

露天采矿科学目标的演变与未来发展趋势

王忠鑫^{1,2}, 田会^{1,3}, 王东¹, 田凤亮², 宋波², 赵明², 辛凤阳², 陈洪亮², 王金金²,
苏振宁², 曾祥玉²

(1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁阜新 123000; 2. 中煤科工集团沈阳设计研究院有限公司, 辽宁沈阳 110015; 3. 中国煤炭学会, 北京 100013)

摘要:露天开采是矿产资源开采的重要方式, 国家与地方对露天矿开采提出了更高的要求。因此, 将露天采矿作为一门科学开展系统性研究, 揭示采矿过程和发生现象的规律, 并做出科学的解释显得尤为迫切。首先从露天开采基础理论、关键成套装备研制与爆破工程技术3个方面梳理了近40a来我国固体矿产资源露天开采领域取得的重大技术成果。而后采用现代科学计量学和信息计量学技术对近40a来7128篇文献进行了多元动态分析, 以聚类分析法对主要研究主题在包括时间维度上的发展演化过程进行了多维度定量刻画。发现研究主题的演变是技术发展、开采现状、政策环境等多因素耦合影响的结果。以现有重大科技成果以及客观的文献计量结果为基础, 指出了未来露天采矿科学的目标为形成系统全面的露天矿安全绿色高效智能开采技术体系, 并给出了实现路径, 即形成露天采矿工艺系统及重大装备热点研究主题, 强化现有热点研究与露天采矿工艺系统及重大装备之间深度交叉融合, 并给出了行业内外的各主题优势资源进行联合重大科技攻关, 实现多主题间实质性协同创新的有益建议。最后从能源和生态视角的矿区规划理论、智能采矿设计原理、智能集群调度理论、煤炭开采易自燃特厚煤层安全高效开采技术、高大边坡稳定性控制技术、复杂工况带式输送机高效运输技术、智能化露天矿山系统工程7个方面展望了未来露天采矿科学的重大基础理论技术的发展方向; 从高效率移动式破碎设备、模块式半固定破碎设备、连续开采工艺系统装备、大倾角运输装备、大型排土机5个方面展望了未来露天开采装备的发展方向。

关键词:露天矿; 采矿科学; 科学目标; 知识图谱; 文献计量; Citespace

中图分类号: TD824 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)S1-0129-25

Evolution and future prospect of scientific objectives of open-pit mining

WANG Zhongxin^{1,2}, TIAN Hui^{1,3}, WANG Dong¹, TIAN Fengliang², SONG Bo², ZHAO Ming², XIN Fengyang²,
CHEN Hongliang², WANG Jinjin², SU Zhenning², ZENG Xiangyu²

(1. College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. CCTEG Shenyang Engineering Company, Shenyang 110015, China; 3. China Coal Society, Beijing 100013, China)

Abstract: Surface mining is an important way of mining mineral resources. The state and local governments have put forward higher requirements for surface mining in China. Therefore, it is particularly urgent to take surface mining as a science to carry out systematic research, reveal the laws of mining process and phenomenon occurred, and make scientific ex-

收稿日期: 2023-01-09 修回日期: 2023-05-14 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0041

基金项目: 中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业基金专项重点资助项目(2020-ZD002); 中煤科工集团沈阳设计研究院有限公司科技创新资助项目(NK023-2021)

作者简介: 王忠鑫(1984—), 男, 内蒙古赤峰人, 教授级高级工程师, 博士研究生。E-mail: wzx_syy@qq.com

通讯作者: 田凤亮(1992—), 男, 内蒙古赤峰人, 工程师, 博士。E-mail: fliangtian@foxmail.com

引用格式: 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]. 煤炭学报, 2024, 49(S1): 129-153.

WANG Zhongxin, TIAN Hui, WANG Dong, et al. Evolution and future prospect of scientific objectives of open-pit mining[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S1): 129-153.



移动阅读

planations. First of all, the major technical achievements in the field of surface mining of solid mineral resources in China in the past 40 years were summarized from three aspects: the basic theory of surface mining, the development of key complete sets of equipment and blasting engineering technology. Then, the modern scientific metrology and information metrology technologies were used to conduct a multivariate dynamic analysis of 7 128 papers and reports in the past 40 years, and a multi-dimensional quantitative description of the development and evolution process of the main research topics, including the time dimension, was carried out by the cluster analysis. It is found that the evolution of research topics is the result of the coupling effect of many factors, such as technological development, mining status, policy environment, etc. Based on the sorting of the existing major scientific and technological achievements and the objective literature measurement results, it is pointed out that the goal of the future surface mining science is to form a systematic and comprehensive safe, green, efficient and intelligent surface mining technology system, and the realization path is given, that is, to form a hot research topic of surface mining technology system and major equipment, and to strengthen the deep cross integration between the existing hot research and surface mining technology system and major equipment. It also provides some useful suggestions on how to jointly tackle major scientific and technological problems with the advantageous resources of various themes inside and outside the industry to achieve a substantial collaborative innovation among multiple themes. Finally, from the perspective of energy and ecology, the paper looks forward to the development direction of major basic theories and technologies of the future surface mining science from seven aspects: mining area planning theory, intelligent mining design principle, intelligent cluster scheduling theory, safe and efficient mining technology of coal mining in spontaneous combustion prone extra thick coal seams, high slope stability control technology, efficient belt conveyor transportation technology under complex working conditions, and intelligent surface mine system engineering. The development direction of the future surface mining equipment is prospected from five aspects: high efficiency mobile crushing equipment, modular semi-fixed crushing equipment, continuous mining process system equipment, large inclination transportation equipment and large dump machine. It is expected that the study can be used as a reference for scientists and engineers in the surface mining field.

Key words: surface mine; mining science; scientific objective; knowledge map; bibliometrics; Citespace

矿产资源是人类社会生存和发展的重要物质基础。与其他自然资源相比,矿产资源具有区位分布不均衡、不可再生、赋存隐蔽等特点,致使对其开发利用过程始终面临着层出不穷的技术难题。因此,对矿产资源开发利用技术的研究是人类的永恒课题。根据矿床埋藏深度的不同和技术经济条件的差异,固体矿产资源主要分为露天开采和地下开采2种开采方式^[1]。露天开采具有单矿生产能力大、安全性好、生产效率高、职业健康条件好、产能释放速度快、柔性供给保障能力强等优势,始终是我国矿产资源开发的优选方式。据统计,我国52%的有色金属矿石、77%的铁矿石、70%的化工原料矿石、100%的建材和砂石骨料以及21%的煤炭均为露天开采^[2]。

近40 a来,中国露天采矿技术从理论方法到工艺装备都发生了深刻的变化,取得了一系列重大科技成果。然而随着矿业高质量发展要求的提出,露天采矿技术的发展也面临着全新的挑战。从学科发展和理论体系的角度来看,将露天采矿作为一门“技术科学”开展系统性研究,揭示数字化、绿色化等新框架下露天采矿过程和发生现象的规律,并做出科学的解释,

进而从复杂巨系统范式的视角管控其演进过程就显得尤为重要和迫切。

鉴于此,笔者系统梳理了近40 a来我国固体矿产资源露天开采领域取得的10个方面的重大技术成果,基于现代科学计量学技术客观分析呈现了1979—2022年文献中关于“露天采矿”问题的学科结构、研究重点和研究热点,阐述了露天采矿科学目标的演变过程和致变因素,分析预测了未来科学目标,探讨了未来基础理论研究与技术创新的13个主要方向,以期为中国露天采矿科学和技术的发展提供参考。

1 中国露天采矿重大科技成果

1.1 露天采矿基础理论

1.1.1 地质空间信息理论

露天采矿活动是在地质空间环境中进行的。地质体形态复杂、勘探数据有限、矿体(煤层)内部属性非均一、采剥工程时空动态变化等特点,使得真实描述矿山三维空间及各类实体之间的动态联系始终是研究者面临的巨大挑战,研究地质体结构模型和属性模型的地质空间信息理论形成并取得了较大发展。

自 1983 年原沈阳煤矿设计院 (现中煤科工集团沈阳设计研究院有限公司) 开始承担国家科技任务“微机在煤矿地质中的应用”开始,“七五”国家重点科技攻关项目“大型露天铁矿开采和锰铁选矿技术”相继启动,我国煤炭和冶金领域率先开始了计算机信息技术在露天矿应用的研究并取得了大量成果。在基于面 (Facial model)、体 (Volumetric model) 和混合表示模型 (Hybrid model) 的基础上,提出了结构建模与属性建模的混合空间数据模型^[3-5],使模型可同时表征地质体空间位置形态和内部属性特征,解决了矿山三维信息模型构建难题;针对工程量计算问题,研发了矿体切割算法和实体模型之间和开放网格模型之间的布尔运算算法^[4],解决了露天矿表面模型“复合”难题以及采剥工程量计算和三维可视化等难题;研究了正断层、逆断层、褶皱、陷落柱、复杂结构煤层、矿体分叉尖灭等复杂地质体的三维精细化建模方法,扩大了矿床模型的适用范围,提高了模型的精度和可靠性^[6-7];针对地质属性的局部随机和各向异性特征数字化精准表达难题,在储量估算和属性估值中应用了地质统计学方法,提高了储量估算的科学性和计算精度^[8];为了解决模型生成速度慢和建模精度低这一制约三维地质模拟技术深入发展应用的瓶颈问题,我国学者相继提出了基于剖面、钻孔数据、离散点、多层 DEM、多源数据等适用于不同类型矿床和地质赋存条件的露天矿地质模型构建方法^[9-10],开发了 3DMINE、DIMINE、SmartMiner、SMCAD 等自主知识产权的露天采矿设计软件并逐步推广应用,使露天采矿设计由二维向三维发展,设计精细化程度和效率大幅提升。

1.1.2 露天采矿最优化理论

露天采矿的技术决策过程就是开采境界、开拓运输系统、开采程序、开采参数、剥采比、生产能力和服务年限等技术要素的综合优化过程。经过几十年的研究和实践,形成了较为系统的露天采矿优化理论体系。露天开采境界优化方法由静态经济分析法发展到了考虑货币时间价值、矿岩经济属性的动态性以及生态成本等多因素的动态境界优化方法^[11-12]。在开采程序方面,近水平和缓倾斜矿体露天矿由全境界开采逐渐发展为分区开采,先后研究提出了采区宽度、相邻采区内排压帮高度、边坡角度等优化方法,形成了采区划分和开采顺序设计方法并成功应用^[13-16];关于采区转向过渡方式及过渡期间开拓运输系统优化等问题,发明了“搭桥”“留桥”、反向内排、扇形过渡等技术^[17-18],并先后在安太堡、黑岱沟、霍林河、伊敏河等露天矿取得应用。倾斜和急倾斜矿体露天矿由全境界开采逐步发展为分期开采,主要通过陡帮开采

的方式实现。分期开采优化主要研究各分期间的开始过渡时间、过渡终了时间以及过渡期间扩帮区和正常生产区的矿岩量分配问题。自 20 世纪 70 年代开始,我国金属露天矿就开始进行陡帮开采技术的研究,“露天矿陡帮开采及运输方式研究”被列入“八五”国家重点科技攻关项目并在南芬露天铁矿成功进行了工业性试验,至 20 世纪 90 年代我国露天矿分期开采方法基本形成^[19-21],在酒钢西沟矿、南芬铁矿、德兴铜矿、大孤山铁矿、水厂铁矿等取得了广泛应用。在开采境界、开采程序和开拓运输系统既定的前提下,与之匹配的开采参数优化是改善矿山技术经济面貌和社会效益的关键,“八五”国家重点科技攻关项目“深凹露天矿开采综合技术研究”针对台阶高度、平盘宽度、爆破参数等优化问题在南芬铁矿开展了工业性试验,为我国露天矿开采参数的优化奠定了理论基础和试验依据^[22-23]。排土工程是露天矿采掘、运输和排土 3 个子系统之一,对露天采矿的技术经济面貌有着重要影响,因此,我国学者对露天矿排土工程优化问题主要从排土场位置选择、土岩流向流量规划、排土参数优化、排土场边坡稳定及控制技术等方面进行了系统研究,并在霍林河、哈尔乌素等露天矿的设计中得到了应用^[24-28]。针对单一开采要素优化没有考虑要素间的相互作用,使得到的结果往往是局部最优而非全局最优这一难题,20 世纪 90 年代,东北大学王青教授等提出了露天开采整体优化理论与方法,开发的优化软件系统在南芬露天铁矿、赞比亚铜矿、元宝山露天煤矿等得到了应用^[29]。

1.1.3 开采扰动效应评价理论

露天采矿的本质是有用矿物与暂时无用剥离物的大规模空间移运。开采过程使得矿区地形、地貌发生变化,甚至会影响到矿区周边的生态环境,如土地的挖损与压占、粉尘与噪声、水污染物与大气污染物的排放等。如何在资源开采过程中寻求经济效益与环境保护的平衡是矿山实现绿色开采的本质要求。为此,许多学者做了大量关于露天采矿对生态环境扰动效应的前沿基础理论研究,主要包括以下 2 大理论体系。

(1) 1992 年加拿大 William E.Rees 教授提出的生态足迹理论体系,以生态成本和环境压力量化评价理论为代表^[30-31],将生态生产性土地面积作为衡量矿山企业生产过程中需要消耗的各种资源以及排放的废弃物多少的统一标准,并与矿区生态承载力进行比较,从而判断矿区的可持续发展程度。露天开采生态足迹模型框架如图 1 所示。

(2) 我国学者田会、王家臣、王忠鑫等先后提出并

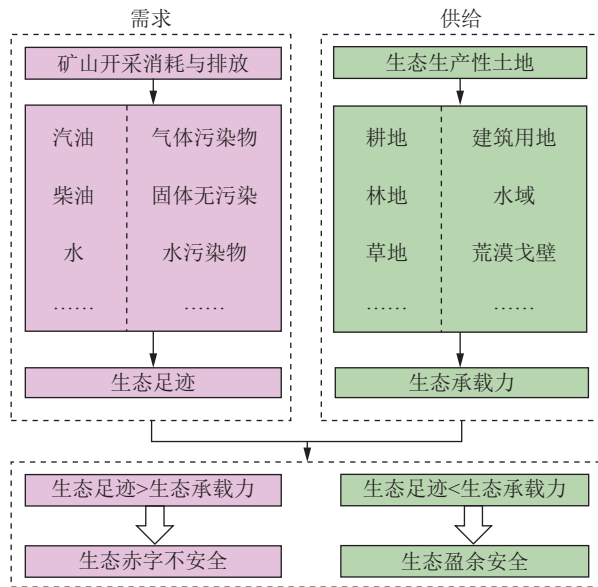


图1 露天开采生态足迹模型框架

Fig.1 The eco-footprint model framework of the open-pit mine

不断发展的露天矿开采扰动指数理论体系,以开采扰动效应评价理论和控制技术为基础^[32-34],用露天矿开采扰动指数来全面、量化揭示露天矿开采活动对矿山外部要素(自然环境、生态环境、经济环境和社会环境)的扰动机理、扰动程度、扰动效应变化趋势及扰动补偿机制,从而指导露天矿实现绿色、高效开采,研究主要侧重于矿山开采技术的扰动控制效果方面,旨在从根本上减少露天采矿对土地的扰动。

露天矿开采扰动效应评价指标体系见表1。

表1 露天矿开采扰动效应评价指标体系
Table 1 Evaluation indexes of open pit mining disturbance effect

扰动频现指标 (负向扰动, 14个)	扰动补偿指标 (正向扰动, 9个)
土地挖损强度; 土地压占强度; 粉尘排放强度; 气体污染物当量排放强度; 水污染物当量排放强度; 地下水疏干强度; 坑下排水强度; 剥离物外排强度; 频发噪声最大声级; 偶发噪声最大声级; 采掘场境界面积指数; 排土场境界面积指数; 矿岩采剥强度; 能耗强度	生态环境状况指数; 土地挖损恢复率; 土地压占复垦率; 土地生产力弹性系数; 电能比重系数; 内排采空区面积指数; 粉尘收集率; 三废处理率; 采复一体化指数

综上, 2种理论的出发点和落脚点不同。生态足迹理论主要从露天开采生态资源占用视角,对矿山的可持续发展程度进行评价。开采扰动指数理论则专注露天开采致使自然环境要素状态发生改变的机理和规律,既在生态足迹理论的基础上进一步研究了开采扰动程度的量化方法,也揭示了扰动效应的变化趋

势,还基于扰动效应的“双向性”特征重点研究了扰动控制技术,最终形成了更具科学性与可行性的露天矿绿色开采的技术路径。

1.1.4 露天采矿系统工程理论

露天采矿系统工程是露天采矿工程学和系统工程相结合形成的交叉学科。依据露天采矿工程的内在规律和基本原理,通过系统论及数学方法研究和解决采矿工程综合优化问题^[35]。其研究内容主要包含露天矿采矿设计、生产规划、卡车调度和辅助决策等方面^[36]。露天开采工艺类型多、工序环节高度耦合、时空动态演化机理复杂、基于有限信息的预测决策风险高,是一种典型的复杂巨系统^[37]。

在生产规划设计方面,自20世纪80年代开始,我国露天采矿系统工程的理论研究初具规模^[38],以德兴铜矿为代表的一批露天矿在金属矿山生产计划优化设计领域进行了有益探索^[39]。1982年,在湘潭大学召开的露天矿优化设计程序鉴定会上,北京有色冶金设计研究总院等单位提出了包含采剥工程进度计划编制的设计程序^[40]。1985年,棒锤山铁矿开发了“优化设计系统应用软件”,初步具备了开采进度计划编制等功能^[41]。同一时期,水厂铁矿、南芬铁矿等矿山也进行了相关研究和试验应用,并将功能范围延伸到了排土规划。进入21世纪,基于系统工程理论的生产计划优化研究从单时段规划优化向多时段规划优化发展,并兼顾了开采规整性、长短期规划等问题^[42-43]。规划优化算法从线性规划、整数规划向多阶段决策的动态规划、非线性规划、多目标规划发展^[44-46]。

在卡车调度方面,1983年,原沈阳煤矿设计院(现中煤科工集团沈阳设计研究院有限公司)在伊敏露天煤矿一采区《初步设计》中首次提出了露天矿卡车调度系统的理念和技术思路。“七五”期间,南芬铁矿和南山铁矿针对汽车和铁道运输工艺,首先进行了计算机辅助调度技术的研究,紧随其后,白云鄂博、东鞍山和大冶铁矿等露天矿也陆续做了大量的研究和试验工作。20世纪80年代末,齐大山铁矿建立了卡车调度模型和简易的试验系统^[47],云浮硫铁矿、霍林河煤矿、依兰煤矿等随后也开展了相关研究工作。1997年,煤科总院抚顺分院等单位联合开发了卡车电铲优化调度系统,并在伊敏露天煤矿投入使用,实现了国内露天矿卡车调度系统的首次应用。1998年,德兴铜矿在已有成果的基础上进一步引入与发展了路径优化、车流规划和设备调度动态规划等理论,并开发了配套的系统模块。国家“十五”重点科技攻关项目“有关大型露天矿汽车自动调度的研究”课题组以

水厂铁矿为依托,联合北京科技大学和清华大学等高校进行了科技攻关,在车辆终端硬件研发、优化调度模型、地图动态显示等方面取得了技术突破。随着露天矿智能化建设,卡车调度理论的研究不断深入,理论体系不断完善,目前卡车调度理论的研究热点主要集中在车流动态规划、路网演化及自动提取、智能配矿、地图更新和智能集群调度等方面^[48-52]。

在辅助决策和专家系统方面,20世纪80—90年代,郭连军等研究建立了露天矿开拓运输、爆破设计和开采方法专家系统^[53]。鞍山冶金矿山设计研究院等单位联合开发了成套的露天矿设计软件。国家“七五”重点科技攻关项目“大型露天铁矿计算机管理信

息系统的研究”课题组在南芬露天铁矿建立了包括采矿设计、生产计划管理、生产调度等功能的矿山管理信息系统,之后陆续在梅山、兰尖、歪头山、白云鄂博铁矿等进行了推广应用。20世纪90年代开始,部分学者研究了遗传算法等仿生算法在露天矿领域的应用,并开发了应用软件^[54]。2000—2010年,人工神经网络和粒子群算法等智能算法被广泛关注^[55]。2010年以后,机器学习算法成为主流,支持向量机、随机森林等方法被广泛应用于露天矿设备运行状态预测、爆破工程模拟、设备故障预测、边坡稳定预测、粉尘浓度预测等方面^[56-59]。露天采矿系统工程重大科技成果演进过程如图2所示。

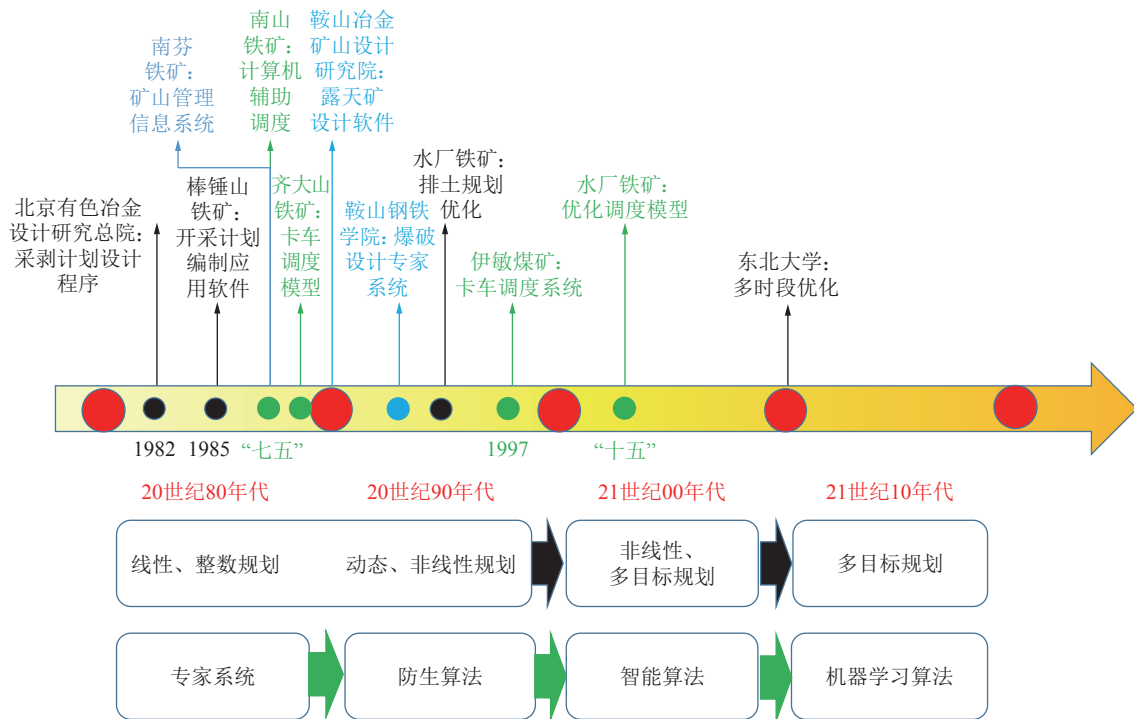


图2 露天采矿系统工程重大科技成果演进过程

Fig.2 Scientific and technological achievements Evolution process of open pit mining system engineering

1.1.5 露天矿山边坡工程基础理论

边坡安全是贯穿于露天矿山开采过程中的关键性问题。稳定性分析、边坡监测、滑坡预警和边坡治理共同构成保障深凹露天矿边坡安全的科学技术体系。边坡稳定性分析方法作为边坡工程的基础,近40年来已从工程地质分析方法和二维极限平衡法,发展为以有限元法和有限差分法为代表的三维数值分析法、结合岩体结构和破坏机理的三维极限平衡法以及可靠度分析方法相结合的综合方法体系。露天矿边坡变形监测是掌握边坡稳定动态的重要保障,我国露天矿边坡监测由传统的人工监测逐步发展为地面三维激光扫描技术、“3S技术”“InSAR技术”等多方

法、多系统融合的协同监测体系^[60],使监测效率和精度得以大幅提升,且克服了单一监测技术的不足。滑坡预警核心是提出滑坡判据及建立预警模型,我国学者经过大量的研究,先后提出了几十种滑坡判据及预警模型,主要包括确定性预警模型、统计预警模型、非线性预警模型及宏观预警模型4类,分别在南芬露天铁矿、黑岱沟露天煤矿、海州露天煤矿、齐大山铁矿、德兴铜矿等露天矿得到应用。我国露天矿滑坡预警方法和边坡监测手段技术进展如图3所示。

露天矿边坡的地质结构、力学特性及自身的发展演变过程较为复杂。从应用的效果来看,各预警模型均具有一定局限性,可用于特定类型或阶段的预警,

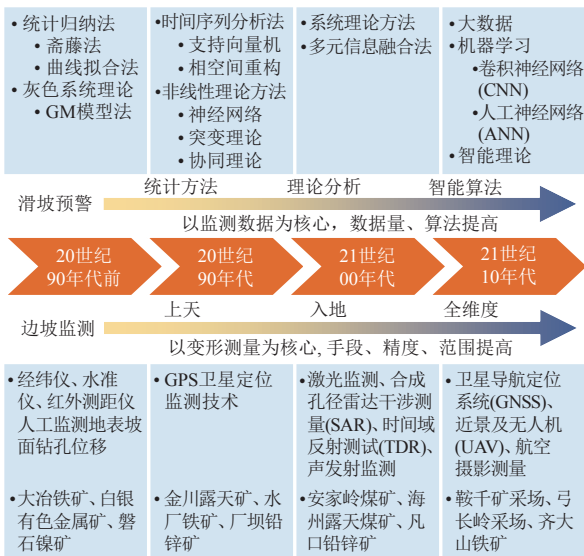


图3 我国露天矿滑坡预警方法和边坡监测手段技术进展

Fig.3 Development of landslide early warning methods and slope monitoring methods in open pit mines in China

尚未实现普适性^[61-62]。在边坡治理方面, 20世纪90年代初, 针对大冶露天铁矿滑体整治问题提出了“挡、疏、减、抗、锚、护”的综合治理措施。常见的边坡治理方法可分为水害治理、增大抗滑力、增加岩体强度3类, 具体有疏干排水法、削坡减载法、锚索加固法、抗滑桩法、挡土墙法、注浆加固法等。随着对滑坡机理认识的不断深入, 具有复杂岩体结构的岩质边坡破坏问题受到众多研究者关注。同时, 人工神经网络、灰度理论、混沌理论、多源信息融合等各类智能算法逐步应用于稳定分析和滑坡预警, 涌现出了大量的研究成果^[62]。

1.1.6 露天矿生态修复与治理

露天矿的开采方法与开采工艺决定了对周边生态环境的扰动效应具有时间长、观感差、因素多、治理难等特点。露天矿生态修复与治理的重点研究内容包括协调矿山生产与生态修复之间的关系、重塑矿区地貌、改良或重构土壤满足植被生长需求以及恢复植被与生物复垦实现生物多样性。协调矿山生产与生态修复之间的关系本质上是对修复治理理念的研究与探索, 其研究重点已从最初的先破坏后治理到开采过程源头控制迁移到边开采边治新型修复理念, 而“采排复一体化”已成为露天矿生态修复与治理的主流理念^[63]。在地貌景观重塑上, 针对受损景观的获取方法从单纯的野外调查逐步发展到遥感、GPS、RTK、无人机和三维激光扫描等技术为基础的新型方法, 信息的获取更加便利高效。为避免重塑景观与周围景观和生态的不相容, 形成了包括景观生态学、微地形塑造、仿自然地貌等矿区受损土地景观规划技术体系。

对于土壤重构改良材料和方法的选择优化方面, 利用煤矸石、剥离物、表土、粉煤灰等材料优化配比重构土壤, 掺入改良剂的方法解决了表土稀缺露天矿的生态修复治理的核心难题。植被恢复与生物复垦方面, 利用丛枝菌根真菌复垦技术挖掘土壤中的肥力、改善废弃基质理化性质、修复受损根系、加速养分的生物循环的方法填补了我国干旱半干旱地区微生物复垦修复技术与应用的空白^[64]。地下水疏干排水方面, 提出了帷幕、挡水墙截水等新方法, 采用截水技术取代传统疏排水技术, 由被动疏水变为主动截水, 并在内蒙古元宝山、扎泥河等露天煤矿成功应用^[65], 为露天煤矿地下水控制及安全绿色开采提供了新思路、新技术与新工艺。“十三五”国家重点研发计划“东部草原区大型煤电基地生态修复与综合整治技术及示范”项目首次揭示了大型煤电基地开发生态影响规律并量化了其累积效应, 研发并创建了露天煤矿“地下水库-近地表含水层-分布式保水控蚀设施-地面水库”立体保水和大型露天开采水-土-植被一体化修复技术体系, 建成了胜利露天矿、宝日希勒露天矿和敏东一矿井工矿区3处示范工程。以该项目为代表的一批科技成果的出现, 极大推进了我国矿山生态修复工作的进程, 我国矿山生态修复治理面积趋势如图4所示。

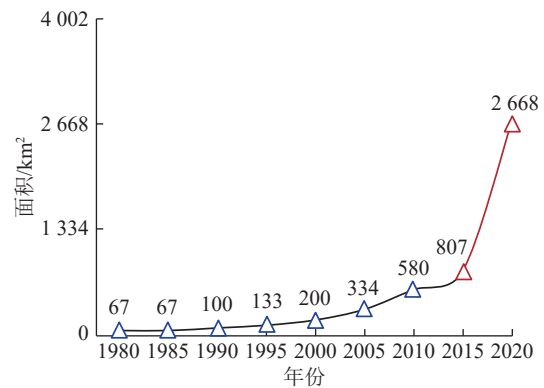


图4 我国矿山生态修复治理面积趋势

Fig.4 Trend of eco-rehabilitation area of mines in China

1.2 露天开采工艺系统大型成套装备研制

露天开采工艺系统大型成套装备是为开采各类矿物的大型露天矿剥离、采矿和运输提供的成套设备, 包括单斗-卡车间断开采工艺及连续、半连续开采工艺系统的成套设备。40 a来, 通过引进、消化吸收和再创新, 我国逐步完成了包含间断和部分半连续开采工艺的成套装备研制。露天矿开采工艺成套装备及系统谱系演化如图5所示。

1.2.1 间断开采工艺系统成套装备

在1980年以前, 国内除大峰露天矿采用单斗-卡

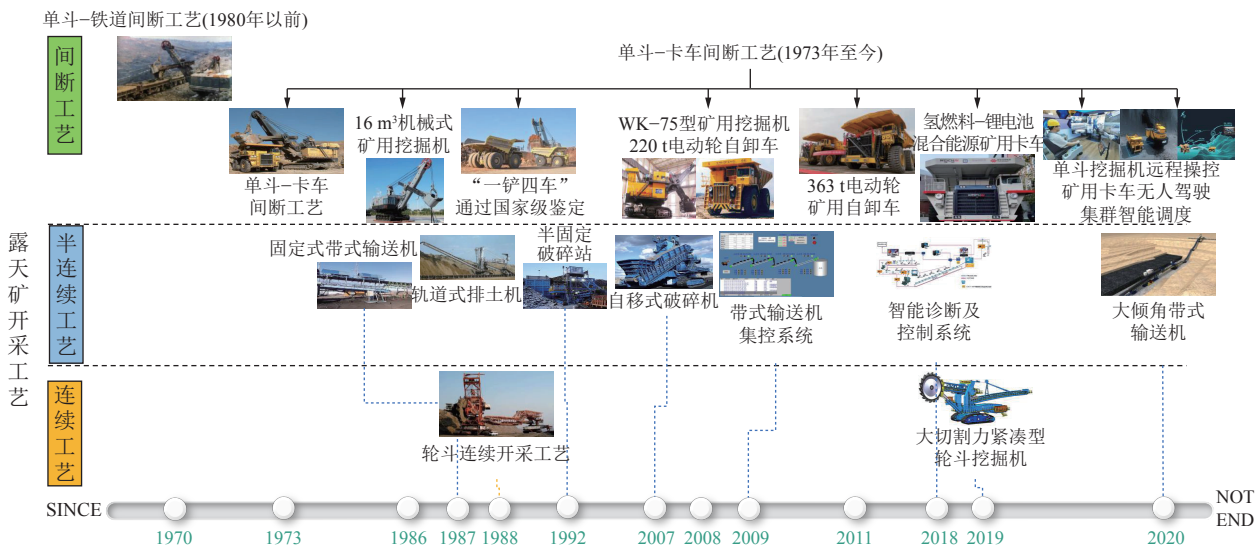


图 5 露天矿开采工艺成套装备及系统谱系演化

Fig.5 Open pit mining process complete equipment and system pedigree

车间断工艺外,普遍采用单斗-铁道开采工艺,1980年以后随着国外开采工艺和装备的引进,单斗-卡车工艺才开始陆续在国内露天矿试验和使用。“七五”期间,通过“煤炭高效开采工艺与装备”重点研发计划项目,我国成功地研制了十余项新的采矿机械与设备,并推广使用。1987年,由1台10 m³矿用挖掘机和4台108 t电动轮自卸车组成的首套间断开采工艺系统成套装备通过国家鉴定,标志着我国自行研制的1 000万 t/a级露天矿单斗-卡车主采设备研制成功,极大促进了露天矿设备国产化进程。2008年和2012年,太重研制的我国首台斗容55 m³和75 m³的矿用挖掘机下线,零部件国产率达到97%,标志着我国大型矿用挖掘机基本实现了国产化替代。目前,我国正在研发适应不同应用场景的智能化单斗挖掘机系列产品,如徐工XE40型遥控式液压挖掘机^[65-67]、山河智能SWEROB2009型智能挖掘机^[68]、三一重工智能遥控挖掘机^[69]等。2008年湘电成功研制出220 t级电动轮自卸车,2011年,自主研发的300 t级交流传动电动轮自卸车和363 t电动轮矿用自卸车下线,标志着我国电传动矿用自卸车全面实现国产化,自卸车总体技术性能达到国际先进水平。近年来,在露天矿智能化推动下,矿用自卸车也在逐步向着无人驾驶和新能源汽车方向迈进^[70-71]。2019年以后,在单斗-卡车间断开采工艺系统智能化和无人化方面,白云鄂博铁矿、洛阳钼业、黑岱沟露天煤矿、伊敏露天煤矿、宝日西勒露天煤矿等均开展了无人驾驶系统的研发和试验,并取得了阶段性成果^[72]。在新能源装备方面,研究主要聚焦在纯电动、油电混合和氢能源卡车的研发领域,2019年首台国产200 t级氢燃料-锂电池混合能源矿

用卡车下线,随后徐工、湘电等相继开发了纯电动车、氢能源等系列卡车产品。总体来看,我国单斗-卡车间断开采工艺系统成套装备的发展速度较快,装备水平及系统智能化水平已达到国际先进水平。

1.2.2 半连续开采工艺系统成套装备

半连续开采工艺于1979年随苏联英古列茨露天矿的应用案例和经验被引入国内^[73],其核心装备主要包括半移动破碎站、自移式破碎站、带式输送机和排土机等。1987年北京起重运输机械设计研究院成功设计并研制了轨道式排土机和带式输送机。1989年,洛矿设计研究院设计完成了2 000 t/h半移动破碎机,1992年联合原沈阳煤矿设计院、北票矿务局机电总厂完成了半移动破碎站的样机试制,并在内蒙古霍林河露天煤矿进行了工业性试验,基本达到了预期目标。此后,国内的北方重工、三一、洛矿等相继完成了2 500~4 000 t/h破碎机的研制,在破碎机工作原理、整机结构形式、机械结构等方面取得了系列成果^[74-80]。1984年,小龙潭露天煤矿联合华锐重工研制了我国第一套排土机,排土能力为1 000 t/h,此后40 a来,我国先后自主研发了能力为3 000~10 000 t/h、臂长最大达到50 m的排土机系列产品,并在酒钢露天铁矿、元宝山露天煤矿、齐大山露天铁矿等推广应用,在重型履带行走机构、大跨度钢结构稳定性及轻量化设计等方面取得了系列成果^[81-85]。在工艺系统智能化方面,2018年北方重工实现了设备能耗实时监测和电机节能状态诊断及控制等功能模块^[86]。半移动破碎站实现了运行状态监测预警、车流密度远程监控、卸载台位智能分配等功能,具备无人值守能力。采用永磁直驱电动机、永磁滚筒等变频驱动控制技术^[87],实现了

带式输送机平稳启动和制动、带速自适应调整及系统设备顺序启动等^[88]。采用视频图像识别、红外识别、振动检测、温度检测、声音识别等技术实现了带式输送机运行状态监测^[89-90],为带式输送机智能控制和无人化运维提供了技术路径,已在露天矿逐步开展了试验性应用。

1.2.3 连续开采工艺系统成套装备

连续开采工艺于1979年由原沈阳煤矿设计院(现中煤科工集团沈阳设计研究院有限公司)罗德权首次针对工艺系统的工艺设计系列问题进行了系统研究^[91]。该系统主要由轮斗挖掘机、转载机、受料车、带式输送机和排土机等设备构成。1976年,我国自行研制了WUD400/700型轮斗挖掘机,成功应用于小龙潭露天煤矿,生产能力为525 m³/h。1988年,沈重、大重、沈矿联合制造的2套理论能力为3 600 m³/h的轮斗挖掘机连续开采工艺系统成套设备用于剥离工程,极大促进了我国露天采矿重型装备的研发和制造水平。但之后我国关于轮斗挖掘机的研制工作进展非常缓慢,直到2020年中煤科工集团沈阳设计研究院针对我国露天矿剥离和采煤的实际需求,开始研发具有完全自主知识产权的大切割力紧凑型轮斗挖掘机,并开发了轮斗连续开采工艺系统智能管控平台、斗齿健康状态监测及预警、无人化自主作业、运行状态监测预警等智能化系统^[92-96],还开发了轮斗连续开采工艺系统设备群精准定位、多机联动、自动对中、多机协同和智能控制等功能^[97-99]。

1.3 露天矿山爆破工程技术

露天矿山爆破工程是露天矿开采的首个环节,其爆破效果的好坏直接影响后续采装、运输的效率。因受地质条件、岩石硬度、设计参数、炸药类型、起爆方式等因素的影响,故爆破效果往往难以达到工程预期。近年来,业界专家学者对露天矿爆破设计手段、技术方法、数字化、智能化等方向进行了广泛研究,并取得了大量成果。爆破技术发展历程整体上可分为控制爆破、精细爆破、数字爆破、智能爆破4个阶段。20世纪80年代起,国内各科研单位陆续开展了对露天矿控制爆破技术的研究,此阶段主要对控制爆破块度、控制爆破公害和炸药能量利用等方面进行理论研究,随后在煤矿、金属矿等露天矿台阶爆破、预裂爆破、光面爆破、缓冲爆破、微差爆破等不同爆破应用场景进行了推广应用^[100]。2000年以后,随着钻孔、装药设备和爆破器材等新装备技术的发展,露天矿爆破技术进入了精细化阶段,对露天矿微差爆破技术的作用原理、合理微差间隔时间的选取进行了深入的理论与试验^[101],随后在露天矿提高岩石破碎效率,降低爆

破振动影响等方面取得了显著成果。2010年以后,随着数字化技术在矿山领域的广泛应用,矿山爆破信息化经历了计算机辅助设计、计算机仿真、爆堆数字图像分析、爆破设计专家系统等阶段,这些虽然对矿山爆破设计和管理起到了重要作用,但由于功能单一、信息孤岛现象严重,无法在矿山各工艺环节实现信息共享^[102],无法实现上下游环节的打通与联动。针对以上问题,学者们在钻孔岩性识别方面做了大量研究和试验,实现了钻机进行钻进的过程中实时地进行岩性及位置的采集,然后将采集数据通过网络远程传输至设计平台进行数字爆破设计,提高了爆破设计的精细程度^[103]。2020年以来,随着智能矿山建设的提出,汪旭光院士等^[104]针对爆破过程的多元异质信息难以获取、缺乏有效的爆破环境感知技术、爆破施工精度需要进一步提高、缺乏统一的数据交互与信息处理机制等瓶颈问题进行了系统性研究,并基于5G、人工智能、大数据、云计算等新一代信息技术以及我国爆破行业的发展趋势,提出了利用人工智能技术分析爆破过程、利用物联网采集与处理爆破多元异质信息、利用传感技术感知爆破环境、利用全球卫星导航系统精准定位设备的“智能爆破”概念。露天矿山爆破工程技术发展历程如图6所示。

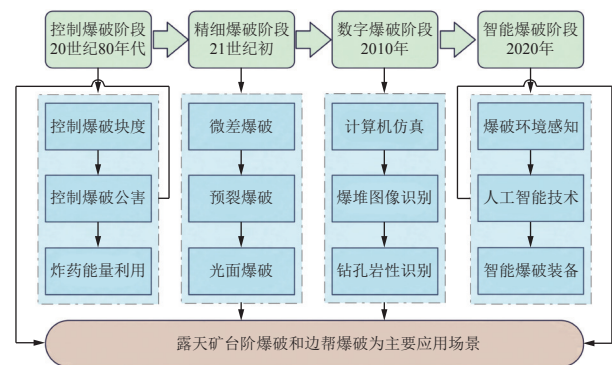


图6 露天矿山爆破工程技术发展历程

Fig.6 Development of open-pit mine blasting technology

2 露天开采科学目标的演变过程与预测

2.1 研究方法

从前文对我国露天采矿重大科技成果梳理的结果看,虽然我国第1座露天煤矿——抚顺西露天矿和第1座露天铁矿——大孤山铁矿的开采历史都已经超过100年,但中国露天采矿科学和技术的系统性研究是自20世纪80年代开始的,随着露天采矿业的发展,研究内容和主题不断变化、逐步深入。虽然在不同时期都有学者对露天采矿的研究进展进行了文献综述,但面对庞大的文献数量,以阅读、归纳法进行分

析必然存在一定的局限性、主观性和片面性,也不利于准确把握学科发展的历史规律和未来发展趋势。因此,运用现代科学计量学和信息计量学技术对露天采矿领域的海量文献数据进行多元动态分析,对主要研究主题在时间维度上的发展演化过程进行多维度定量刻画,以揭示露天采矿学科的研究特征、演变趋势、不同研究主题之间的交叉互动关系,为露天采矿领域的科学研究、技术开发和行业发展指明方向,就显得尤为重要和迫切。

本文运用 CiteSpace V6.1.R3 对 1979—2022 年中国露天采矿研究文献进行分析,旨在准确表达研究主题的演变过程,并通过聚类分析、时间切片和关键词突显分析等揭示研究内容的演变特征,预测发展趋势,以期为研究者提供启发。

2.2 数据来源

本文选用 CNKI 中国学术期刊网络出版总库,以“优先保证查全率,兼顾查准率”为原则,制定了检索策略。数据来源共分 2 个部分。首先选择中文核心期刊和 CSSCI 来源期刊数据库,按表 2 所示检索策略进行检索,获得 5 205 篇检索结果,剔除期刊会议征稿、卷首语、个人学术成果介绍、书评、无作者文献及其他不相关条目等无效数据,共得文献 4 212 篇。考虑到国内的《露天采矿技术》《露天采矿》《矿业工程》3 本期刊虽然不是中文核心期刊,但是露天采矿领域的专业期刊或重要成果的发表刊物,为了确保查全率,又针对上述 3 本期刊制定了表 3 所示的检索策略并进行了文献检索,获得 3 366 篇检索结果,剔除井工煤矿相关文献、期刊会议征稿、卷首语、个人学术成果介绍、书评、无作者文献及其他不相关条目等无效数据,共得文献 2 909 篇。综上所述,本文研究的样本数据来源文献共 7 128 篇。

表 2 中文核心期刊和 CSSCI 来源期刊检索策略

Table 2 Search strategy of chinese core and CSSCI

检索条件	内容设置
主题	露天矿/露天采矿/露天开采/露天矿山/ 露天采煤/露天煤矿/露天铁矿/露天金属矿
时间范围	1979—2022年
来源类别	北大核心、CSSCI
文献语种	中文

2.3 研究热点分析

研究热点反映了一个领域的研究重点和某一时期的重要研究方向,对于理解和深入分析该领域的研究内容具有重要价值。本文采用关键词聚类分析法对露天采矿的研究热点进行分析,提取近 40 a 来我国

表 3 露天采矿专业期刊检索策略

Table 3 Search strategy of open pit mining periodicals

检索条件	内容设置
主题	露天矿/露天采矿/露天开采/露天矿山/ 露天采煤/露天煤矿/露天铁矿/露天金属矿
期刊名称	露天采矿技术/露天采矿/矿山工程
时间范围	1979—2022年
来源类别	全部期刊
文献语种	中文

露天开采领域的核心研究主题。

聚类分析法中的 Modularity(聚类模块值, Q) 是判断网络模块化的标准, Q 越大,说明得到的聚类结果越好。 Q 取值是 $[0,1]$,当 $Q > 0.4$ 时,得到的聚类效果比较明显,一般认为是可靠的。 Q 的计算方法为

$$Q = \frac{1}{2} \sum (a_{ij} - p_{ij}) \sigma(C_i, C_j) \quad (1)$$

其中, a_{ij} 为网络的邻接矩阵; p_{ij} 为 i 与 j 两个节点之间连线数的期望值; C_i 和 C_j 分别为 i, j 节点在网络中所属的聚类。如果 2 个节点属于一个聚类,则 $\sigma=1$, 否则 $\sigma=0$ 。

聚类分析法中的 Silhouette(聚类平均轮廓值, S) 是衡量网络同性质的指标, S 越接近 1,网络的同性性质就越好。当 $S > 0.7$ 时,聚类结果具有较高可靠性;当 $S > 0.5$ 时,聚类结果合理。 S 的计算方法^[105]为

$$S_i = \begin{cases} 1 - a(i)/b(i), & a(i) < b(i) \\ 0, & a(i) = b(i) \\ b(i)/a(i) - 1, & a(i) > b(i) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $a(i)$ 为 i 节点与其他节点的平均距离; $b(i)$ 为与 i 节点最接近各节点的平均距离。

基于筛选得到的 7 128 篇有效样本数据文献,运用 CiteSpace V6.1.R3 分析绘制露天采矿研究成果关键词聚类知识网络图谱(图 7)。本文形成的知识网络图谱中共有 879 个节点,节点间网络共有 1 790 条,网络共现密度 0.004 6。经计算,聚类模块值 $Q=0.571 3$,聚类平均轮廓值 $S=0.856 9$,因此,图 7 聚类分析的结果可靠性较高,是可信的。

图 7 中不同的颜色代表了不同的聚类,图中的数字代表了聚类标签的编号,数字之后的文字为聚类分析所得到的关键词标签。编号越小代表该标签类中的关键词在研究周期内的研究热度越高,也即研究的热点。由图 7 可知,我国露天采矿领域 1979—2022 年的研究热点前 7 名排序为:露天矿、数值模拟优化、爆破参数、露天煤矿、土地复垦、智能化主题,说明中国露天采矿科学和技术的研究主要聚焦于采矿优化、

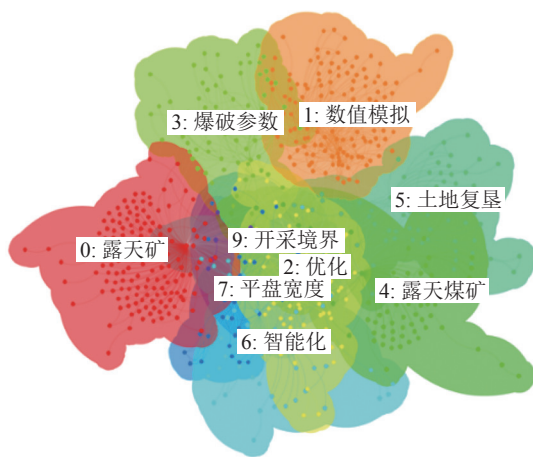


图7 1979—2022年中国露天采矿关键词聚类知识图谱

Fig.7 Keywords clustering from 1979 to 2022

爆破工程、生态恢复、边坡稳定、智能矿山等方向。关键词知识图谱聚类分析结果揭示了我国露天采矿领域 1979—2022 年的研究热点主题,但尚不明确这些主题在近 40 a 时间历程上的演进过程和规律,因此,本文进一步对主要聚类的关键词网络时间线知识图谱进行了分析。

2.4 研究热点的变迁及科学目标演变分析

关键词时间线聚类知识图谱可展现各聚类(即子

领域)研究热点的发展演变过程和演进趋势。基于筛选得到的 7 128 篇样本数据文献,运用 CiteSpace V6.1.R3 分析绘制了 1979—2022 年中国露天采矿领域研究成果的关键词时间线聚类知识图谱(图 8)。从图 8 可以看出,聚类分析得到的排序前 7 位热点主题中数值模拟、优化、爆破参数、土地复垦和智能化这 5 个主题是中国露天煤矿在不同时期的研究重点,分别在不同的时期出现了研究热度的峰值区间和重大成果。为了清晰展现 5 个关键主题的时间演化历程,将分别对每个关键主题的时间线图做进一步分析。

“数值模拟”的研究内容主要是针对露天矿边坡稳定方面开展的系列研究工作成果,是露天矿安全开采这一目标涉及的主题之一;“优化”主要涉及露天矿开采技术要素方面开展的系列研究工作成果,而“爆破参数”既涉及安全目标又涉及高效这一目标;“土地复垦”这一主题是绿色矿山的重要研究课题之一;“智能化”这一主题的时间线聚类则可以反映学界对于露天矿智能化的研究趋势。以上述 5 个主题为切入点,分别讨论各个主题的演变趋势,以分析露天开采安全、高效、绿色、智能这 4 个研究目标的动态变化。

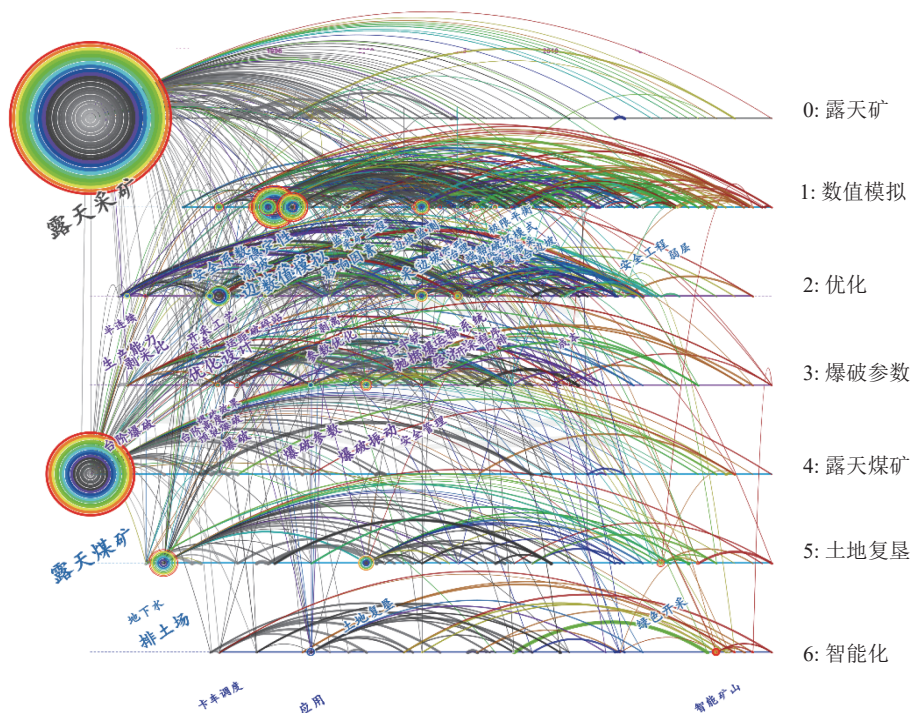


图8 1979—2022年中国露天采矿关键词时间线聚类图谱

Fig.8 Time line clustering of keywords from 1979 to 2022

2.4.1 “数值模拟”主题时间线聚类

运用 CiteSpace V6.1.R3 绘制了“数值模拟”主题时间线聚类知识图谱细节图(图 9)。从图 9 可以看出,“数值模拟”的研究内容主要是针对露天矿边坡稳定

方面开展的系列研究工作成果,研究的高热度区间有 2 个,分别为 1990—2000 年和 2003—2010 年。其中,第 1 个阶段(1990—2000 年)主要研究露天矿边坡稳定系数与稳定性分析评价方法等,研究尚处于起步阶

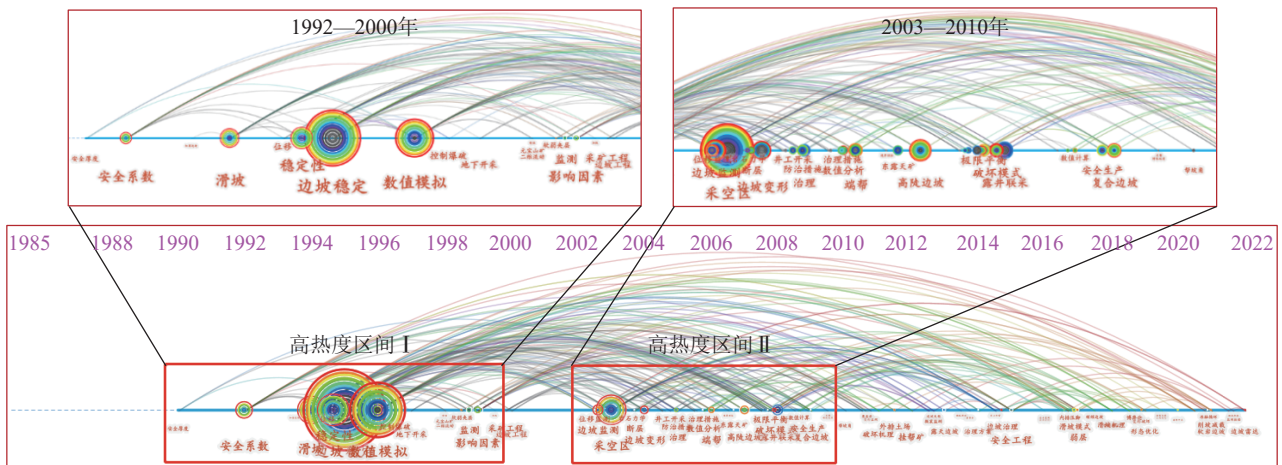


图 9 1979—2022 年中国露天采矿领域“数值模拟”主题时间线聚类图谱

Fig.9 Cluster atlas of “numerical simulation” theme timeline in China’s open-pit mining field from 1979 to 2022

段;第 2 个阶段(2003—2010 年)的研究内容呈现多元化的趋势,研究热点包括高陡边坡、极限平衡理论、时效边坡理论、边坡监测、露井联采、复合边坡等,这一时期我国露天边坡工程的基础理论和技术得到了快速发展。2010 年以后的研究重点主要聚焦于滑坡治理和边坡监测方面,这是因为近 10 年来,我国的露天金属矿山和露天煤矿均已进入深部开采,边坡失稳现象非常普遍,对露天矿的安全稳定生产造成了严重威胁,边坡治理和综合监测技术的发展即成为了必然。综上可知,从 1979—2022 年的整个时间维度上看,关于露天边坡的研究整体上一保持着比较高的活跃度,可以认为以边坡安全为代表的“安全”始终是我国露天采矿的科学目标之一。但标志性的成果数量呈现逐渐下降的趋势,高热度区间主要集中在 2010 年前,峰值出现在 1994—1996 年。

2.4.2 “优化”主题时间线聚类

运用 CiteSpace V6.1.R3 绘制了“优化”主题时间

线聚类知识图谱细节图(图 10)。从图 10 可以看出,“优化”的研究内容主要是针对露天矿开采技术要素方面开展的系列研究工作成果,研究的高热度区间有两个,分别为 1986—1996 年和 2001—2007 年。其中,第 1 个阶段(1986—1996 年)主要研究露天矿的生产能力优化、剥采比均衡、开采工艺优选、半连续工艺的可靠性、单斗-卡车间断开采工艺的运距优化等,重点解决了我国第 1 批设计建设的霍林河、伊敏、安太堡等露天煤矿面临的基础性技术问题,以及解决了大孤山铁矿、德兴铜矿、齐大山铁矿等露天金属矿山进行半连续开采工艺技术改造面临的开采工艺优化问题。第 2 个阶段(2001—2007 年)的研究热点主要包括抛掷爆破技术、拉斗铲倒堆工艺、开拓运输系统优化、开采境界优化、开采程序优化、设备选型优化以及排土工程规划优化等。2003 年黑岱沟露天煤矿引入抛掷爆破-拉斗铲倒堆工艺,单斗-卡车运距的增加也逐渐受到关注,2009 年霍林河南露天矿研究论证引

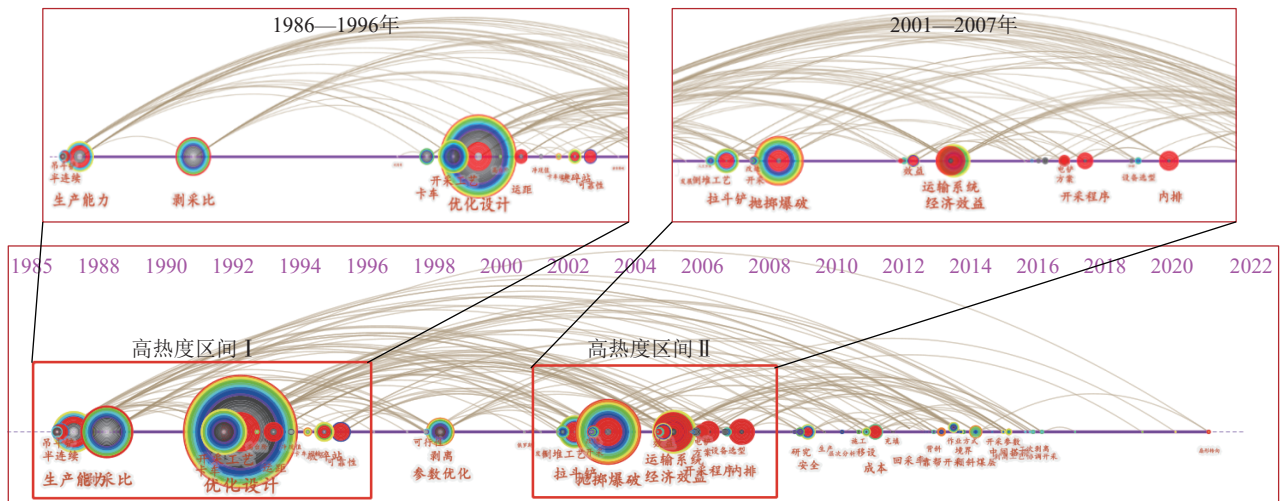


图 10 1979—2022 年中国露天采矿领域“优化”主题时间线聚类图谱

Fig.10 Cluster atlas of “optimization” theme timeline in China’s open-pit mining field from 1979 to 2022

工作,主要研究了绿色开采、扰动指数、扰动效应评价、无人机监测、植被恢复演替模式、土壤生物改良等,以“十三五”国家重点研发计划项目“东部草原区大型煤电基地生态修复与综合整治技术及示范”为代表的一批国家重点科技项目在该方向给予了支持。从图 12 可以看到,自 2013 年开始关于绿色矿山方面的研究成果数量开始逐渐增多,2015 年出现了明显的高热度节点,2018 年出现了近年来的又一个高热度节点,这在其他主题时间线图谱上是很少出现的。呈现上述规律的主要原因是:2013 年 11 月,《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020 年)》正式印发,要求大力推进绿色矿山建设;2015 年,我国就生态文明建设出台了第 1 个全面专题部署文件,明确把发展绿色

矿业、加快绿色矿山建设作为重要任务,从此绿色矿山建设的进程大大加快;2018 年自然资源部发布了煤炭、冶金、有色、非金属等九大行业的绿色矿山建设规范,为绿色矿山相关技术研发和示范工程建设提供了更加清晰的指引。综上所述,从 1979—2022 年的整个时间维度上看,关于土地复垦的研究热度整体上呈现持续上升的趋势,高热度区间主要集中在 2000 年左右和 2015 年以后,这 2 个期间相关研究的科学目标可分别概况为“土地复垦的最佳模式”和“全面建设绿色化矿山”。

2.4.5 “智能化”主题时间线聚类

运用 CiteSpace V6.1.R3 绘制了“智能化”主题时间线聚类知识图谱细节图,如图 13 所示。

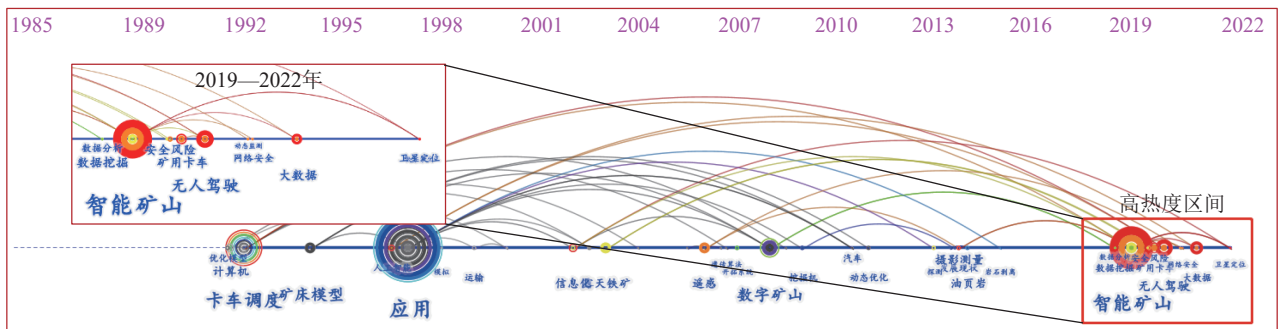


图 13 1979—2022 年中国露天采矿领域“智能化”主题时间线聚类图谱

Fig.13 Cluster atlas of “intelligent open pit mine” theme timeline in China’s open-pit mining field from 1979 to 2022

从图 13 可以看出,“智能化”的主题演化路径起点为 1992 年左右提出的卡车调度系统,经历了 1997 年左右出现的专家系统和智能决策系统、2008 年左右兴起的数字矿山研究,到 2019 年,智能矿山快速成为新的研究热点。上述研究热点演化路径形成的原因是:1991 年的海湾战争证明了 GPS 的军事价值,紧随其后,霍林河露天矿和伊敏露天矿联合国内高校与研究院于 1993 年相继开始了基于 GPS 的卡车调度系统的研发,基于路标定位的卡车调度系统建设思路逐渐被摒弃,围绕 GPS 卡车调度系统形成了大量的研究成果,1997 年华能伊敏露天矿投入了第 1 套露天煤矿卡车调度系统。1997 年,土耳其坎姆胡利耶特大学的 B.爱勒乌利教授,提出了一种基于运筹学中的动态规划和人工智能中的机器学习专家系统理论的新方法,用该方法所得出的矿块开采顺序既能使净现值达到最大,同时又满足一个露天矿开采作业的所有技术和经济约束条件,从此开启了将运筹学、遗传算法和人工智能等学科与露天采矿进行交叉融合的研究。2006 年开始国家“863”计划项目和“十一五”重点科技攻关项目在数字矿山理论、复杂地学建模、遥感与监测等方向给予了项目支持,在其后的 10 余年里始

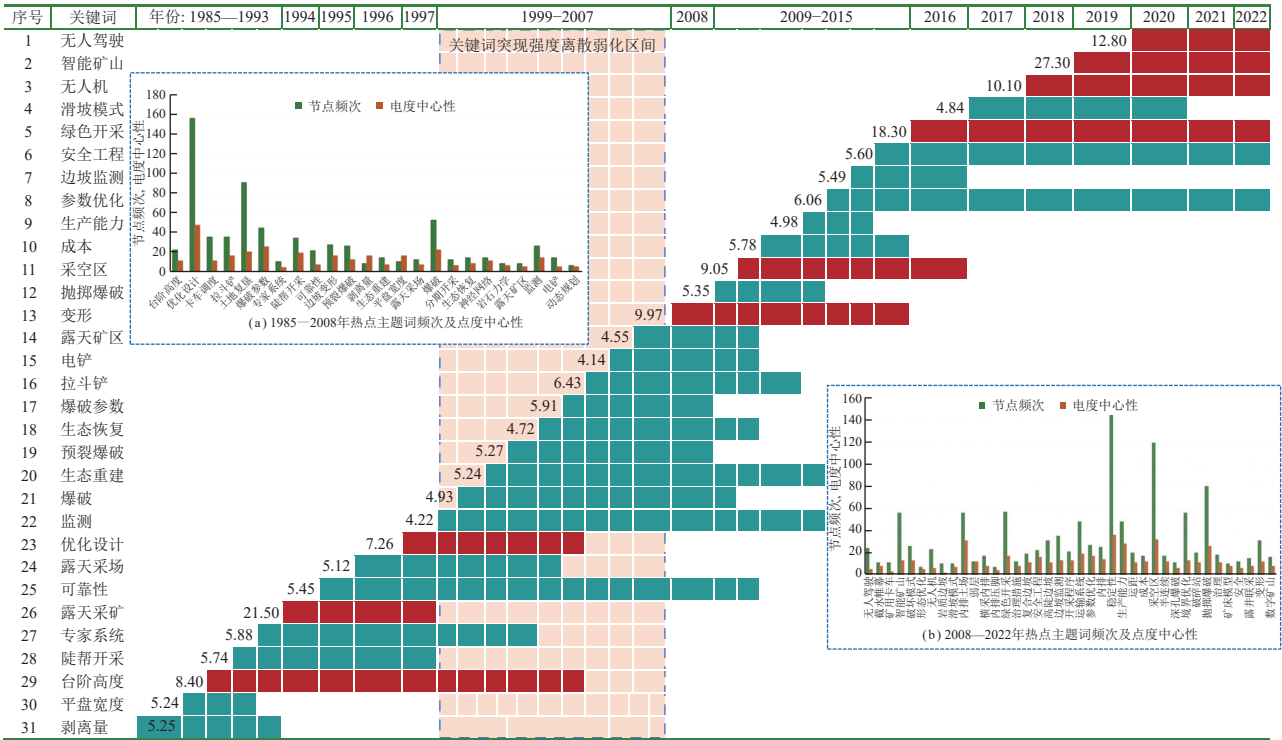
终保持了一定的研究热度和持续性。随着新一代信息技术的快速发展,逐步解决了系统架构、数据互通、数据治理、辅助决策及高级计算等问题,为推动智能矿山建设奠定了基础。自 2019 年开始,国家给予了大力倡导和政策支持,提出了立足矿山行业特点,推进物联网、大数据、云计算、人工智能等前沿技术在矿山的应用要求。自此,我国露天矿的智能化进入了快速发展时期,无人驾驶、大数据、高精定位、网络安全等同步成为研究热点。综上所述,从 1979—2022 年的整个时间维度上看,关于智能矿山的高热度区间主要集中在本文研究所选择时间段的两端,即 1992—1997 年和 2019 年以后,2 个期间的研究热点分别为“卡车调度系统和智能决策系统”与“智能化矿山”,相关研究的科学目标可分别概况为“运筹学和系统工程理论在露天采矿领域的应用”及“新一代信息技术与露天采矿技术的深度融合”。

2.4.6 科学目标预测

对未来科学目标进行预测本质上是对露天采矿领域的研究前沿和趋势进行标定与展望。研究首先厘清了本领域研究主题的分布与演化情况,以揭示不同时期内的热点领域、分析视角及研究方法的变化。

通过高频关键词突现强度分析揭示了露天采矿领域的研究热点与前沿,具有突现性的关键词可反映在某一时间段内该领域的研究前沿。基于本文筛选获得的7 128篇样本数据文献,运用CiteSpace V6.1.R3进

行关键词突现强度分析,绘制了1985—2022年中国露天采矿研究领域研究热点突现强度时间序列演化规律图谱(图14),以及我国露天采矿关键词时间线聚类图谱分时间切片图(图15)。



注: 因为1986年、1988年、1989年、1990年、1998年未出现突现词, 所以未体现上述5个年份。

图 14 1985—2022 年中国露天采矿研究领域研究热点突现强度时间序列演化规律图谱

Fig. 14 Evolutionary law of emergence intensity time series of research hotspots in china open pit mining from 1985 to 2022

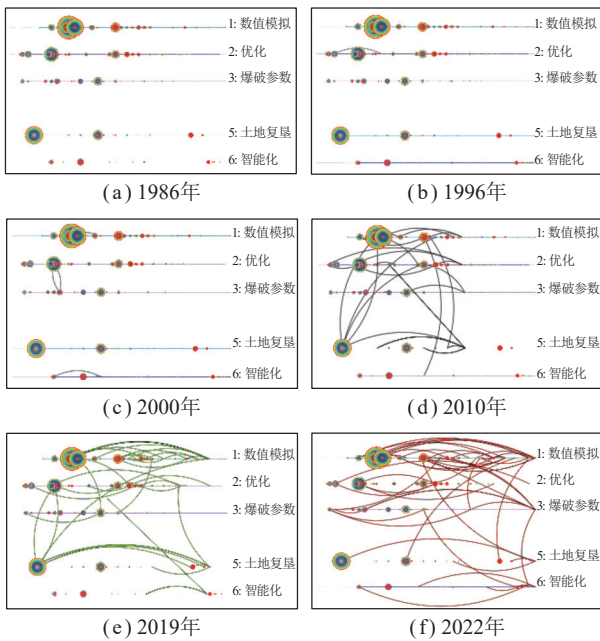


图 15 典型时段关键词聚类分析图谱时间切片

Fig. 15 Time slice of keyword cluster analysis graph

关键词突现可以用来分析该领域的研究前沿,突

现强度的大小表示该关键词在一定时间内的增加情况,强度越大则表示该关键词越可以代表该领域的研究前沿。从图14可知,1985年以来我国露天采矿领域研究热点突现词的出现主要集中在3个时期。第1个时期为1991—1997年,出现了3个突现词分别为“台阶高度”、“露天采矿”和“优化设计”,3个突现词的突现强度分别为8.4、21.5和7.3,强度保持时间分别为14、5、8 a。从3个突现关键词可以看出,这一时期的研究主要集中在露天矿开采技术要素和关键技术参数的优化方面。第2个时期为2008—2010年,出现了2个突现词分别为“采空区”和“变形”,2个突现词的突现强度分别为10和9.1,突现词的强度保持时间分别为8、7 a。从2个突现关键词可以看出,这一时期的研究主要聚焦在露天矿边坡稳定和露天矿隐蔽采空区等方面。第3个时期为2016年后,连续出现了4个突现词,分别为“绿色开采”、“无人机”、“智能矿山”和“无人驾驶”,4个突现词的突现强度分别为18、10、27和13,其中智能矿山为1985年以来突现强度最高的关键词,至2022年

(本文研究的截止时间)4个突现词的强度均一致保持较高水平。从4个突现关键词可以看出,这一时期的研究主要面向露天矿绿色开采和智能化矿山等方面。综上所述,以上研究主题突现分析的结果与聚类分析结果是一致的。

从图14可知,未来我国露天采矿领域的研究前沿和热点将聚焦于绿色开采和智能开采及其相关领域。从我国露天采矿关键词时间线聚类图谱分析结果(图8)及时间切片分析结果(图15)来看,在过去近40年里,我国露天采矿领域的几个热点主题之间的交叉融合研究不够,在2000年前基本没有交叉(图15(a)),这也是9个高强度突现词中的6个出现在2000年后的原因。从图15也可以看到,各热点主题的时间线聚类图谱中的高热节点都是2个或多个主题之间交叉融合的结果。从聚类图谱的时间切片规律来看,结合中国露天矿未来高质量发展的实际需求,可以确定露天采矿未来的科学目标为:形成系统全面的露天矿安全绿色高效智能开采技术体系。目标的实现路径是:形成露天采矿工艺系统及重大装备热点研究主题,强化现有5大热点研究主题与露天采矿工艺系统及重大装备之间深度交叉融合,尽量规避图15中呈现的“主题内自主繁衍、主题之间互不交叉”的现象,而是各主题方向的优势科技资源进行联合攻关,以实现多主题间的实质性协同创新。

3 露天开采重大基础理论与技术创新方向

3.1 基于能源和扰动视角的矿山规划理论

露天开采的过程是首先将矿体上部覆盖的岩土层剥离后再将矿物采出,因此,开采境界之内的地层都会被按一定的时空顺序予以移运并在新的地点按一定的时空顺序重构地层和重塑地貌,必然造成露天矿开发的全生命周期内占用大量的土地,矿岩移运过程也会消耗大量的能源。本文提出的未来露天矿山规划设计理论将由传统的技术经济视角向能源和生态视角转变,主要指图8中“土地复垦”、“新能源”与“露天开采”3条主线间的交叉融合。主要有三重含义:一是随着新能源领域技术的不断发展和在矿山领域的应用,露天开采过程中的能源消耗已由以柴油为主逐渐演变为“油电结合”,未来必然向“以绿电和清洁能源替代柴油”的方向发展,如以连续和半连续工艺替代部分单斗-卡车工艺、纯电驱动或氢能卡车替代燃油卡车等,随之对露天矿的规划设计原理、设计技术标准、工程最优化目标及生产组织管理模式等方面都带来巨大的影响和深刻变革,相应的规划设计理论和设计技术都需要同步发展。二是重新审视“露天

矿占用土地面积较大”这一特点的“优劣”并加以科学利用,即露天矿不再是单一的矿物提供者,还将是一个多类型能源供应的综合体。露天矿除了可采出矿物外,还有经技术和场地改造后可开发的绿色电能,如风光互补发电、抽水蓄能发电等。三是露天开采对环境扰动的最直接表现形式即对土地的扰动,而影响扰动程度强弱的关键因素是矿区的矿业权设置。一个矿区中设置的矿业权越多,外排量越大,扰动系数越大^[33],因此,基于系统工程理论的以最小扰动系数为最优目标的矿区开发规划设计理论是控制扰动的关键,也是实现露天矿与环境和谐共存的重要技术保障。无论是矿业权设置还是矿区规划均应符合扰动系数最小的原则。

3.2 易自燃特厚煤层安全高效开采技术

随着我国煤炭资源开发重心的西移,新疆将成为我国露天煤矿开发的重点区域。新疆地区生态条件恶劣,水资源缺乏、生态环境脆弱、风大、常年干旱、降水稀少。新疆全区煤层巨厚,个别煤田单层煤厚度可达到100 m以上甚至达到200 m,开采深度一般为100~500 m,个别露天煤矿埋深达到700 m,多数煤层属Ⅱ类自燃煤层,具有爆炸性,存在火烧区。该地区煤炭资源的大规模高效开采与易自燃特厚煤层的赋存条件和极脆弱生态环境保护之间的矛盾愈来愈突出,现有露天开采技术亟待变革和创新。

易自燃特厚煤层安全高效开采重点需解决以下难题:①本底环境为荒漠戈壁,生态脆弱,砾幕层再生难,大风天气频次高,开采扰动强烈、粉尘和沙尘逸散范围广、危害大、控制难;②煤变质程度低,自然发火期短,矿区风大高温,干燥少雨,煤层巨厚,煤壁裸露时间长,煤层自燃或火区复燃事故频发,灭火难度大、监控技术缺失、资源损失量大、环境污染严重,威胁矿山安全;③开采工艺及装备水平低,多以单斗-卡车间断开采工艺为主,采用小型化设备外委施工,外排运距与提升高度大,设备及人员数量多、智能化程度低、安全风险高、开采效率低、能源消耗强度高、污染物排放量大;④开采深度大,火烧区发育,富水、含弱层,顶帮边坡高大长陡,边坡稳定控制难、严重威胁安全生产;⑤同一矿区露天矿数量多,煤层巨厚,层数多,边帮压覆资源量巨大,压覆资源安全高效回收难、缺少系统的开采理论和技术体系。上述难题的研究涉及图8中“露天采矿”、“设计优化”、“边坡工程”、“土地复垦”与“智能化”等主题的深度交叉融合。

3.3 智能采矿设计原理

露天采矿设计原理除了研究剥离和采矿在时间和空间上的关系外,还要研究它们之间的数值的制约

关系,并把矿山与经济效益结合起来,以求得最佳设计。露天采矿设计主要包括开采境界、采区划分、开采程序、开拓运输系统、开采参数、设备选型、开采进度计划、排土工程计划、开采扰动系数等内容。面向露天矿智能化的开采场景,保障智能采剥系统常态化安全高效运行的前提下,露天矿主要开采技术要素的设计将会发生根本性变化,主要研究内容可总结为以下2个方面:

(1) 研究智能化技术对设计技术要素(设计对象)的影响。如为保障电铲远程+卡车无人驾驶的采剥系统安全高效运行,台阶高度、平盘宽度、台阶坡面角度、运输系统布局、排土工程发展、辅助作业设备配置要求等,与传统开采方式相比均会发生较大变化;露天矿新水平延深的开拓工程中,出入沟和开段沟的形状、参数、施工方法等,在智能化露天煤矿的设计中必须充分考虑智能化设备作业的需要。此外,总图布置、机修、供电、控制及通信辅助生产设施、行政福利设施的设计影响因素、技术标准、功能设置等也会发生较大变化。

(2) 研究智能化技术对设计过程的影响。它包括建立露天矿三维作业场景,以地测采空间地理信息为主线,将露天矿生产实时数据、业务应用数据按照统一标准进行组织;建立全业务流程协同设计机制,围绕“全周期全环节生产作业计划协同设计和全流程信息数字化管理”实现设计、施工一体化贯通。其中贯通场景主要体现在地测采多源异构数据融合、矿山一张图显示、中长期计划分解、日计划协同编排、日作业任务自动复核等。

3.4 智能集群调度理论

调度问题是露天矿智能化研究中的热点问题,当问题规模扩大至矿山全局级别的智能集群调度时,几乎很难找到最优解。集群调度系统架构设计、调度模型实时构建以及大规模调度问题的快速求解是智能集群调度理论的主要研究内容。

(1) 集群调度系统架构是大规模移动设备调度的基础。区别于传统卡车调度,移动设备集群调度考虑了推土机、洒水车、加油车、装载机、平路机、换点卡车等不同类型和用途的设备,调度业务更加复杂。调度系统架构设计的目标是实现多类型大规模设备作业的高协同与低耦合。

(2) 优化的前提是建模,而数据驱动的调度模型的实时构建是保证调度顺利开展的有效手段。但调度所需数据来源广泛、数据结构各异、数据精度不高且一致性差,有效的数据融合十分困难。再者,露天矿山的数据多为设备层或部件层数据,难以直接指导工

艺层调度的开展,建立设备数据到生产工艺的映射十分关键。最后调度模型建立的效果又限制了优化调度模型的求解策略与求解速度。

(3) 大规模调度问题的求解是智能调度理论能否落地的关键。首先,由于调度问题的复杂性,调度模型并不能保证自身的可求解性,局部极小值甚至是无解问题都有可能出现;其次,调度问题对于模型的求解效率有很高的要求,若在最佳执行时机之后才给出调度决策,则调度的意义将不复存在。

上述3个方面的研究内容涉及图8中“露天采矿”、“设计优化”、“智能化”与“露天采矿装备”等主题的深度交叉融合,是相互联系的有机整体。调度架构设计的目的是合理分解调度业务,实现大规模设备协同作业,调度模型构建的目的是以数据描述分解后的问题,而大规模优化问题的快速求解是解决调度问题的关键。各研究内容关键技术如图16所示。

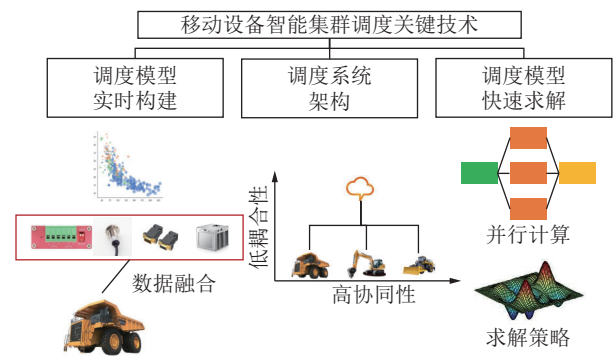


图16 移动设备智能集群调度关键技术

Fig.16 Time slice of keyword cluster analysis graph

3.5 高大边坡稳定性控制技术

随着露天矿开采深度增加,边坡工程也面临更大的挑战。实现高大边坡稳定控制在稳定性演化规律、边坡监测数据融合、滑坡预警模型、边坡治理技术等方面有待开展更加深入的研究。

(1) 以极限平衡理论为基础的稳定性分析方法在面对岩石边坡中非均质非连续结构复杂特性以及渐进破坏过程的时变演化特性仍力有不逮。针对边坡长期演化、破坏过程、破坏机理及影响因素尚需进行深入研究,交叉融合多学科提出更全面多因素的稳定性分析方法是保证边坡稳定控制的基础。对复杂条件下露天矿边坡开展针对性稳定分析方法研究,如广泛存在折线形、曲线形、鼻梁子等特殊几何形态边坡,存在含断层(群)、内排局部压帮、露井联采等特殊结构边坡,以及富水、冻融等极端条件的边坡。

(2) 随着矿山监测信息化、智能化、多元化的发展,需对边坡监测信息多维度有机融合,通过边坡监测信

息反演边坡特性及实时演化状态将为滑坡预警和边坡加固设计提供重要信息及关键支撑。

(3) 现阶段滑坡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对边坡稳定性进行预报。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,与稳定性分析方法相结合,提高滑坡预警准确性与普适性。

(4) 边坡治理是边坡安全的最后防线,露天矿山工程边坡治理应因地制宜,针对开采工艺、边坡地质结构、破坏机理、露天矿环境等特征采用经济合理的边坡治理手段,提高露天矿的经济性与安全性。

3.6 复杂工况带式输送机高效运输技术

带式输送机是一种绿色高效的散料输送设备,在露天矿生产系统中广泛应用。随着露天矿带式输送机应用场景多元化、工况条件复杂化、运行操作简单化、系统控制智能化等新趋势和新需求的出现,露天矿带式输送机亟待突破一系列技术难题以满足露天矿大规模散料连续输送的新需求。这些技术包括:

(1) 移置式、半固定带式输送机性能提升。移置式、半固定带式输送机是露天矿连续、半连续系统最常见的输送设备,随着露天矿产能的不断增加,剥离运输系统的能力需求不断增大,单一剥离半连续系统的生产能力需求已达每年 3 000 万 m^3 ,配套带式输送机小时输送能力需达到 20 000 t/h 以上,现有最大带宽 2 400 mm 的带式输送机难以满足运量需求。开发大运量大带宽移置式与半固定带式输送机机头站、机尾站以及配套滚筒、托辊、输送带等关键部件的需求迫在眉睫。与工作面带式输送机衔接的半固定带式输送机在工作面设备移设时需要延长或缩短,以便实现搭接。以延长为例,每次延长都需断开输送带并接一段新输送带再重新硫化连接,导致带式输送机延长工作耗时耗力,而且输送带接头数量的增多致使输送带断带风险增加。研发露天矿用大容量储带装置并与机头站或机尾站集成实现半固定带式输送机不断带延长,是露天矿用半固定带式输送机发展的重要方向之一。

(2) 工作面带式输送机快速移设。露天矿连续、半连续工艺系统工作面带式输送机与采掘设备和排土设备配合密切,但当移设时,工作面带式输送机移设速度显著慢于履带行走的采掘设备和排土设备,成为工作面设备移设效率的主要制约因素。工作面带式输送机上增设履带^[86],实现与工作面设备同步自主快速横移是工作面带式输送机的必然发展方向。工

作面带式输送机长度大多在 1.5~2.0 km,需要设置多组履带,多履带行走路径规划、设备位姿检测与调整以及履带行走误差调整算法等技术是实现工作面横移带式输送机多履带协同行走亟待解决的关键难题。履带属于露天矿重型装置,其传动单元误差、履带板间隙、地面起伏等诸多因素导致履带行走位置精度难以精准控制,容易导致机身变形损坏设备^[106]。工作面带式输送机必然要解决桁架与履带之间以及桁架与桁架之间的连接方式与约束释放等难题,实现对履带行走误差的吸收,避免损坏桁架支承结构,保障工作面横移带式输送机的移设安全。

(3) 特种带式输送机应用于露天矿生产。露天矿边坡角度在 $20^\circ\sim 40^\circ$,普通带式输送机输送角度小于 15° ,难以沿端帮布置输送矿物,导致高效的带式输送机连续输送技术无法服务露天矿深部矿物的运输。压带带式输送机采用覆盖带增加物料与输送带之间的摩擦力,提高带式输送机输送角度,可沿任何角度的端帮表面布置,实现从坑底到地面短距离连续运输矿物^[107]。悬索带式输送机采用 2 组缆索支承输送带输送物料,其主要特点为跨度大,相邻支点之间的距离可达 1 km 以上。悬索带式输送机须在露天矿坑底和地面各设置一个支点,便可实现露天矿深部矿物从坑底到地面的连续运输。悬索带式输送机在端帮不设支承,不影响端帮运输和端帮稳定性,是露天矿深部矿物出坑运输的理想解决方案。压带带式输送机、悬索带式输送机等特种带式输送机在露天矿应用可打通露天矿深部矿物运输与地面连续运输系统,使得高效连续的带式输送机运输系统服务露天矿深部矿物运输成为可能,探索压带带式输送机、悬索带式输送机等特种带式输送机在露天矿运输系统中的应用是未来一段时间内露天矿带式输送机技术的重要发展方向。

(4) 带式输送机系统智能化进一步深入。随着传感器技术、大数据、物联网、人工智能等技术在露天矿山领域应用的不断深入,带式输送机在运行智能控制、在线检测与故障预测、机器人自动维检、运输系统智能管控等方面的研究将不断深入。基于煤量监测技术^[108]实现带式输送机系统顺逆煤流自适应启动控制、煤量自适应调速和多级设备协同控制^[109]等技术将不断完善;实时检测电机、减速器、滚筒、输送带等关键部件的运行状态的在线检测技术全面应用,故障预测准确率与设备出功率等将进一步提升;带式输送机维护机器人将实现托辊更换、输送带调偏、轴承注油等带式输送机常见简单维护工作的无人干预智能维护;基于智能感知技术、海量数据存储、大数据分

析及预测、智能决策、自动执行的带式输送机运输系统智能管控平台的智能化水平不断提升^[110]。

3.7 智能露天矿山系统工程

露天矿包括间断工艺、半连续工艺、连续工艺和倒堆工艺多种开采工艺系统,每种工艺系统又组合应用于同一露天矿;同时包含穿孔、爆破、采装、运输、排土等多项生产环节,是一项复杂的巨系统工程。随着露天矿智能化建设的快速实施,搭建了多个智能化子系统,如卡车无人驾驶系统、设备远程操控系统、带式输送机无人巡检系统和信息管理系统等^[70,111-112]。智能化建设须作为一项系统工程科学有序推进,智能化露天矿山系统工程面临新的挑战,需要解决新的基础理论问题和关键技术难题(表4)。

表4 露天矿山系统工程未来发展方向及关键技术

Table 4 Development direction of open pit mine system engineering

发展方向	关键技术
全工艺全流程优化	设计与露天矿优化问题相适应的多目标决策变量,有效构建精确的多目标模型
多维度多数据决策优化	有效处理众多变量和约束条件,提高优化模型规模和速度
全生命周期整体优化	准确预测未来数据和模型参数取值,提高算法鲁棒性
智能设计决策	提高深度学习技术与模型的适用性和泛化能力

(1) 基于露天矿多开采工艺并存的情况,如黑岱沟露天煤矿采用单斗-卡车间断工艺、单斗-半移动破碎站半连续工艺、轮斗连续工艺和拉斗铲倒堆工艺的综合开采工艺,露天矿分析、优化及评价不能仅局限于单一开采工艺,而应该是全工艺全流程的优化决策,需要进行多环节多目标优化。如何设计与露天矿优化问题相适应的多目标决策变量,有效构建精确的多目标模型是求解问题的关键。

(2) 随着露天煤矿智能化场景的不断丰富,露天矿从单一信息化向多系统融合智能化方向发展,从而形成大量多源异构数据,需要进行大数据挖掘分析,构建多维度多数据决策优化。如何有效处理众多变量和约束条件,提高优化模型规模和速度需要进一步研究。

(3) 露天矿是随时间变化而动态发展的,不能只是单时段的分段优化和局部优化,需要进行露天矿全生命周期的整体优化。如何依据历史数据准确预测未来数据和模型参数取值,解决收敛速度慢、提高算法鲁棒性是今后需要重点解决的问题。

(4) 矿山设计是露天矿智能化建设的重要组成部分

分,采矿设计需要实现智能设计决策,解决生产中存在的随机事件等问题。针对露天矿生产过程的不确定性,需要提高深度学习技术与模型的适用性和泛化能力。

4 露天开采装备的发展方向

改革开放以来,我国开展了年产千万吨级大型露天矿成套设备、连续和半连续开采工艺成套设备研发工作,均得到成功应用。目前,国内自主研制的斗容 75 m^3 级矿用电铲、300 t级自卸式矿车、大型半移动式破碎机、大功率推土机、排土机等相继投入使用或试运行。露天开采设备已由改革开放初期的全部进口发展为部分国产化替代。但总体上看,仍存在以下问题:①单斗-卡车工艺占比高、车铲规格小、设备数量多、用人多;②半连续、连续开采工艺占比小、大能力破碎机、轮斗挖掘机、大型排土机国产化程度低;③破碎站的移动灵活性差、搬迁移设耗时长、施工复杂;④连续工艺系统中的轮斗挖掘机切割力不足、适用条件严苛、使用范围受限;⑤满足露天矿智能化高效运行的重型装备研制仍面临系列难题,装备的可靠性和稳定性有待提升。受限于环境和成本的双重约束,以及招人难、留人难、人口老龄化等因素的影响,矿山企业必须改变现有的生产方式,从工艺技术革新到装备升级同步变革。开采工艺主要向大能力的半连续开采工艺以及连续开采工艺发展,随之配套的核心装备也须向大型化、智能化方向发展。

4.1 高效率移动式破碎设备

移动式破碎设备由于能够随着前端采掘设备在采剥工作面灵活移动,采掘物料直接装载进自移式破碎机进行破碎后,即可进入带式输送机运输,因此以自移式破碎站为核心的半连续开采工艺的先进性和高效性非常明显。但半连续系统能否高效运行的关键在于系统设备的可靠性,即核心设备自移式破碎机的可靠性和稳定性。未来在以自移式破碎机为代表的高效率移动式破碎设备研发方面,主要聚焦解决以下关键技术难题:

(1) 机动灵活的移动技术。自移式破碎站集受料、给料、破碎、转载、行走等多种功能于一体,具有伴随电铲等采装设备灵活移动的功能,使得诸多方面都应用半移动式破碎站半连续开采工艺,但是如何实现受料斗高度、破碎站旋转角度、行进方向、排料带式输送机的回转等可以根据实际生产需要灵活调整,是装备研制过程中需要解决的难题。

(2) 运行过程中承受的载荷复杂、随机、多变。破碎站各部件在运行中承受的电铲卸载物料冲击力、

碎物料过程中的冲击力、刮板机和带式输送机运行冲击载荷、运动中工作面不平整对设备的冲击载荷等多种动载荷都将传递到自移式破碎站,再加上设备所受的无规律交变风载荷,如此复杂的载荷作用下设备的稳定性和可靠性是巨大挑战。

(3) 设备机械结构设计和关键元部件研发方面,须重点攻克大转矩、低转速重载传动技术,高强度破碎齿耐磨材料和热加工成形技术,复杂地形条件下大型挠性机体轻量化及自平衡设计技术,重载底盘行走转向控制技术,卸料臂机电液一体化的多自由度调节技术等。

(4) 针对自移式破碎站运行、维护等全生命周期中的智能化运行和管理问题,重点突破全面感知、数据实时传输与深度治理、高精度运动控制、故障诊断与预测、无人化运行维护等关键技术,实现单机设备的机器人化。

4.2 模块式半固定破碎设备

针对不适合采用自移式破碎站半连续开采工艺的露天矿,往往采用单斗-卡车-半移动破碎站半连续开采工艺。破碎站一般需要根据采剥工作面推进情况定期进行移设,如应用于煤炭、冶金、建材等不同行业露天矿的齿辊式破碎站、立轴冲击破碎站、颚式破碎站等。传统移设方式是将半移动破碎站按小部件拆解移设,虽便于运输,但拆装工作量大、部件变形后重新安装难度大,导致移设耗时长,直接影响到半连续系统移设复产速度。为了提高移设效率,有必要设计引入模块化理念,将半移动破碎站划分为数个模块,以履带车等辅助设备进行模块整体移设,是半移动破碎站未来主要的发展方向之一。半移动破碎站布置位置地质条件各异,为适应不同地质条件、移设周期等实际需求,破碎站挡墙形式发展出了混凝土挡墙、钢结构挡墙、无挡墙(卸车栈桥式)以及自然料斗等多种结构形式,但后 3 种形式的应用不多,主要面临安全性、轻量化、卸载效率等方面的问题需要进一步解决。此外,与自移式破碎站一样,半移动破碎站也面临承受复杂、随机、多变载荷,10 000 t/h 以上的大能力半移动破碎站机械结构设计和关键元部件、单机设备机器人化等难题亟待突破。

4.3 连续开采工艺系统成套装备

研制适合我国蒙东及新疆地区露天煤矿的全系列、标准化轮斗挖掘机成套装备是未来一段时期内关于露天开采装备的重要科技攻关任务。轮斗挖掘机是连续运输系统的核心装备,其采掘的物料可直接进入带式输送机运输。轮斗挖掘机在国外应用广泛且效益良好,但目前在我国的应用较少,主要原因是现有

装备线切割力一般为 100~120 kN/m,只能用于表土剥离和部分单一结构低硬度煤层(抗压强度 < 10 MPa)的开采,而我国露天矿表土占采剥总量不足 10%,对于煤矿而言,还普遍存在煤层结构复杂、硬度较大(一般在 10~45 MPa)等特点,轮斗挖掘机亟需提高切割力水平以适应我国露天矿的煤岩特性,大切割力紧凑型轮斗挖掘机是未来一段时期轮斗挖掘机的主要发展方向之一。斗齿是轮斗挖掘机的主要切割部件,在采掘过程中斗齿磨损速度快,斗齿断裂等问题时有发生,不仅增加了维护成本,而且影响设备的安全连续运行,研究高强度耐磨材料减缓斗齿磨损速度、减少斗齿断裂频率是提高轮斗挖掘机效能的重要基础技术研究方向,亟待快速突破。此外,随着煤矿智能化建设的发展,轮斗挖掘机亟需攻克图像识别、自主定位、自适应切割、机器人化等智能化关键技术,实现轮斗挖掘机智能自主采掘是轮斗挖掘机发展的必然趋势。

4.4 大倾角运输装备

露天矿矿石运输主要以卡车运输为主,卡车沿帮折返运输运距长、污染大、运输成本高的问题十分突出,亟待研制实现沿边帮“点对点直线式连续运输”的大倾角运输成套装备。主要有 2 个研究方向:一是大倾角带式输送机研制,二是大倾角卡车提升系统研制。

(1) 大倾角带式输送机研发方面,我国露天矿端帮角度一般在 20°~50°,普通带式输送机难以沿端帮表面以最终边坡角度直接提升至地面,露天矿深部矿石的出坑运输首先要解决带式输送机沿端帮大角度敷设和安全高效运行的难题。压带、深槽、波纹挡边等类型的带式输送机是针对不同角度等工况下可实现矿石运输的技术方案。对于具备采空区内部排土条件的露天矿而言,内排随工作面推进而同步跟进,若采用出入沟机道的方式,则因沟道移动灵活性较差,将严重制约内排推进,同时截断了内排卡车运输通路,增大剥离运输距离,增加剥离运输成本。因此,端帮上布置的大倾角带式输送机还要能够随工作面推进而实时移动,这是针对这一类露天矿大倾角运输系统的基本要求,也是最重要的要求,是大倾角带式输送机的必然发展方向。露天矿深度大端帮从坑底到地面的距离长,带式输送机往往需要多组履带支承在端帮上行走,亟需解决多履带协同行走精准控制难题;同时,受地质地形条件影响,端帮各级运输平盘的标高呈随机性变化,该类设备还需解决适应端帮形态变化和自适应位姿调整等难题。

(2) 大倾角卡车提升系统研制方面,在适应边坡角度、灵活移设、边坡形态变化、姿态自适应调整等方

面与带式输送机的要求基本一致。除此之外,还要研究提升机结构设计、大吨位整车提升与单斗-卡车间断工艺的高效协同等难题,特别是要综合考虑电铲装车、卡车提升、重车卸载及空中车路段行驶等时间分布,计算卡车数量、系统的运行效率等的综合优化和协同调度问题。

4.5 大型排土机

随着露天矿剥采比的不断增大和产能的增加,剥离量总量不断增大,国内露天煤矿单矿年最大剥离量已突破2亿 m^3 ,现有剥离半连续系统排土机单机排土能力小,难以满足露天矿的实际需求,因此,排土机的大型化是必然趋势,单机排土能力将突破20 000 t/h。需要重点攻克以下技术难题:①研究排土能力20 000 t/h的大型排土机结构形式,实现对整体结构布置的优化;②研究排土机不同工况条件下位姿变化规律,监测排土机重心变化,补偿排土机的重心偏移,实现精确控制重心的位置,提高整机的稳定性;③设计合理的履带行走机构,解决多履带协同移动技术问题;④解决履带式卸料车与工作面输送机的精准对中问题。同时,排土机的单机智能化方面,同样要在具备过载保护、重心监测调整、卸料车自动纠偏调整等智能化功能的基础上,实现单机设备机器人化。

5 结 语

(1) 经过近40年的发展,我国在露天采矿基础理论、露天开采工艺系统大型成套装备研制、露天矿山爆破工程技术等方面均取得了较大突破。露天采矿基础理论方面,地质空间信息理论、开采最优化理论、开采扰动效应评价理论、露天采矿系统工程、边坡工程、生态修复与治理等体系不断丰富与完善,取得了一系列重要成果;露天开采工艺系统大型成套装备方面,间断开采工艺系统成套装备发展较快且已基本成熟,半连续和连续开采工艺系统重大装备中半移动破碎站、排土机等取得了重大突破,轮斗挖掘机、10 000 t/h级半移动破碎站、自移式破碎机和万吨级以上重型排土机仍需要进一步攻关;露天矿山爆破工程技术方面,成果主要集中于爆破设计方法、设计软件、数字化爆破、智能化等方面。

(2) 近40年来CNKI数据库中关于露天采矿的文献关键词聚类分析和研究主题突现强度结果表明,我国露天采矿领域1979—2022年露天采矿科学和技术的研究主要聚焦于采矿优化、爆破工程、生态恢复、边坡稳定、智能矿山5个方向。伴随着我国煤炭、冶金、有色等大型露天矿的建设和工艺技术改造的技术需求与国家重大科技项目支持,每个关键主题研究热

点的发展演变过程和演进趋势呈现不同的规律性与阶段性特征。在过去近40年里,我国露天采矿领域热点主题间的交叉融合研究不够,在2000年前基本没有交叉,1998—2008年未出现高突现强度的研究热点。我国露天采矿未来的科学目标为形成系统全面的露天矿安全绿色高效智能开采技术体系。需要形成露天采矿工艺系统及重大装备热点研究主题,强化现有5大热点研究主题与露天采矿工艺系统及重大装备之间的深度交叉融合,实现实质性协同创新。

(3) 结合我国露天采矿的实际,研究认为未来的重大基础理论与技术创新方向主要聚焦于基于能源和扰动视角的矿山规划理论、易自燃特厚煤层安全高效开采技术、智能采矿设计原理、智能集群调度理论、高大深陡边坡稳定控制技术、复杂工况带式输送机高效运输技术、智能化矿山系统工程以及符合我国露天矿山需求的系列智能化成套装备研发等。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 王运敏.冶金矿山采矿技术的发展趋势及科技发展战略[J].金属矿山,2006(1):19-25,60.
WANG Yunmin. Development trend and science & technology development strategy of mining technology for metallic mines[J]. Metal Mine, 2006(1): 19-25,60.
- [3] 潘懋,方裕,屈红刚.三维地质建模若干基本问题探讨[J].地理与地理信息科学,2007,23(3):1-5.
PAN Mao, FANG Yu, QU Honggang. Discussion on several foundational issues in three-dimensional geological modeling[J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(3): 1-5.
- [4] 张幼蒂,姬长生.大型矿山生产规模及其相关决策要素综合优化[J].中国矿业大学学报,2000,29(1):15-19.
ZHANG Youdi, JI Changsheng. Comprehensive optimization of production rate and related decision making factors for large mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(1): 15-19.
- [5] 周智勇,陈建宏,李欢,等.基于属性驱动的矿体动态建模[J].工矿自动化,2018,44(10):48-54.
ZHOU Zhiyong, CHEN Jianhong, LI Huan, et al. Dynamical modeling of orebody based on property-driven[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(10): 48-54.
- [6] 翁正平.复杂地质体三维模型快速构建及更新技术研究[D].武汉:中国地质大学,2014.
WENG Zhengping. Fast building and refreshing three-dimensional models of geological entity[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014.

- [7] 李静静, 陈健, 卢新明, 等. 含交叉断层的复杂地质体 3 维建模算法研究[J]. *测绘科学技术学报*, 2007, 24(3): 219–222.
LI Jingjing, CHEN Jian, LU Xinming, et al. The algorithm study of 3D modeling the complicated geological body containing cross-bedded faults[J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 2007, 24(3): 219–222.
- [8] 孙立双, 王恩德, 杨文博. 基于幂变换的插值方法在矿体储量计算中的应用[J]. *金属矿山*, 2007(6): 13–15, 24.
SUN Lishuang, WANG Ende, YANG Wenbo. Application of interpolation method based on power transformation in orebody reserve calculation[J]. *Metal Mine*, 2007(6): 13–15, 24.
- [9] 田会, 田丰, 刘向东, 等. 三角剖分算法及其在矿床模拟中的应用[J]. *沈阳工业学院学报*, 1997, 16(1): 72–77.
TIAN Hui, TIAN Feng, LIU Xiangdong, et al. Triangle split algorithm and its applications in mine simulation[J]. *Journal of Shenyang Ligong University*, 1997, 16(1): 72–77.
- [10] 赵景昌. 露天煤矿数字化开采模型构建与应用技术研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.
ZHAO Jingchang. Study on technology of open pit coal mine digital mining model construction and application[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2023.
- [11] 彭庆书, 樊志超. 井田境界画法探讨[J]. *煤炭工程*, 2012, 44(1): 5–7.
PENG Qingshu, FAN Zhichao. Discussion on drawing method of mine field boundary[J]. *Coal Engineering*, 2012, 44(1): 5–7.
- [12] 顾晓薇, 胥孝川, 王青, 等. 露天矿最终境界的经济-生态-一体化优化[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(9): 1347–1351.
GU Xiaowei, XU Xiaochuan, WANG Qing, et al. Economic-ecological integration optimization of the ultimate boundary of metal open-pit mine[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2013, 34(9): 1347–1351.
- [13] 周伟, 才庆祥, 李玉鹏, 等. 大型近水平露天煤矿内排压帮高度研究[J]. *煤炭科学技术*, 2009, 37(1): 53–55.
ZHOU Wei, CAI Qingxiang, LI Yupeng, et al. Study on inner dumping covering height in large near horizontal surface mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2009, 37(1): 53–55.
- [14] 王忠鑫, 苏迁军, 刘玲, 等. 相邻露天矿无煤柱联合开采技术及其协同效应分析[J]. *煤炭工程*, 2017, 49(9): 31–35.
WANG Zhongxin, SU Qianjun, LIU Ling, et al. Non-coal pillar combined mining technology and synergistic effect of adjacent open pit mines[J]. *Coal Engineering*, 2017, 49(9): 31–35.
- [15] 王东, 曹兰柱, 翟栋. 露天矿高陡边坡稳定性数值模拟[J]. *金属矿山*, 2009(S1): 120–122, 126.
WANG Dong, CAO Lanzhu, ZHAI Dong. Numerical simulation on open-pit high and steep slope stability[J]. *Metal Mine*, 2009(S1): 120–122, 126.
- [16] 王忠鑫, 王焯欣, 冯丹丹, 等. 宝明油页岩露天矿开采程序优化分析[J]. *露天采矿技术*, 2012, 27(6): 35–38.
WANG Zhongxin, WANG Yexin, FENG Dandan, et al. Optimization analysis of mining procedure in Baoming oil shale open pit mine[J]. *Opencast Mining Technology*, 2012, 27(6): 35–38.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 牛成俊, 姜志能, 张绍志, 等. 南芬露天铁矿陡帮开采的均衡生产剥采比研究[J]. *金属矿山*, 1991(10): 21–26.
NIU Chengjun, JIANG Zhineng, ZHANG Shaozhi, et al. Study on balanced production stripping ratio of steep slope mining in Nanfen open-pit iron mine[J]. *Metal Mine*, 1991(10): 21–26.
- [20] 张幼蒂, 张达贤. 中国露天采煤的战略发展[J]. *中国矿业*, 1993, 2(1): 17–21.
ZHANG Youdi, ZHANG Daxian. The strategic development of surface coal mining in China[J]. *China Mining Magazine*, 1993, 2(1): 17–21.
- [21] 王忠鑫, 王焯欣, 赵世成. 分期开采方法在宝明油页岩露天矿的应用[J]. *露天采矿技术*, 2014, 29(11): 22–25.
WANG Zhongxin, WANG Yexin, ZHAO Shicheng. Application of phased mining method in Baoming oil shale open-pit mine[J]. *Opencast Mining Technology*, 2014, 29(11): 22–25.
- [22] 于汝媛. 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.
- [23] 王青, 喻海飞. 露天矿台阶高度与开采选别性的经济评价研究[J]. *金属矿山*, 2002(12): 14–16.
WANG Qing, YU Haifei. Economic evaluation of open-pit bench height through mining selectivity[J]. *Metal Mine*, 2002(12): 14–16.
- [24] 王东, 尹立, 付一鸣. 软基底排土场周边地表变形解析分析[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(3): 193–200.
WANG Dong, YIN Li, FU Yiming. Analytical analysis of surface deformation around soft foundation dump[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2022, 41(3): 193–200.
- [25] 王忠鑫, 王金金, 宋波. 露天矿排土场形态参数整体优化研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(9): 166–171.
WANG Zhongxin, WANG Jinjin, SONG Bo. Study on overall optimization of morphological parameters of open-pit mine dumping site[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(9): 166–171.
- [26] 孙豁然, 陈庆凯, 赵兴全, 等. 南芬露天铁矿高陡边坡研究现状与展望[J]. *中国矿业*, 2003, 12(7): 41–43.
SUN Huoran, CHEN Qingkai, ZHAO Xingquan, et al. Research status and prospect of the high-deep slope in Nanfen open-pit iron mine[J]. *China Mining Magazine*, 2003, 12(7): 41–43.
- [27] 王忠鑫, 王焯欣. 排土场综合优化若干关键问题及技术方向[J]. *露天采矿技术*, 2013, 28(2): 46–48, 51.
WANG Zhongxin, WANG Yexin. Some key problems and technical direction of comprehensive optimization of dump[J]. *Open-*

- cast Mining Technology, 2013, 28(2): 46–48,51.
- [28] 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, 2008.
SONG Ziling. Study on the design theory and method for modern surface mining[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2008.
- [29] 王青, 顾晓薇, 胥孝川, 等. 露天矿生产规划要素整体优化方法及其应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(12): 1796–1800.
WANG Qing, GU Xiaowei, XU Xiaochuan, et al. Holistic optimization of production planning elements and its application for open-pit mine[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2014, 35(12): 1796–1800.
- [30] 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(自然科学版), 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 (Natural Science), 2010, 31(12): 1777–1781.
- [31] 张琨, 林乃峰, 徐德琳, 等. 中国生态安全研究进展: 评估模型与管理措施[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(12): 1057–1063.
ZHANG Kun, LIN Naifeng, XU Delin, et al. Research advance on ecological security in China: assessment models and management measures[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(12): 1057–1063.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 王忠鑫, 王金金, 王卫卫. 露天矿开采扰动效应评价指标体系及评价模型[J]. 露天采矿技术, 2018, 33(2): 11–15.
WANG Zhongxin, WANG Jinjin, WANG Weiwei. Mining disturbance effect evaluation index system and evaluation model of the open-pit mine[J]. Opencast Mining Technology, 2018, 33(2): 11–15.
- [35] 顾清华, 卢才武, 江松, 等. 采矿系统工程研究进展及发展趋势[J]. 金属矿山, 2016(7): 26–33.
GU Qinghua, LU Caiwu, JIANG Song, et al. Technical progress and development trends of mining systems engineering[J]. Metal Mine, 2016(7): 26–33.
- [36] 顾清华, 江松, 李学现, 等. 人工智能背景下采矿系统工程发展现状与展望[J]. 金属矿山, 2022(5): 10–25.
GU Qinghua, JIANG Song, LI Xuexian, et al. Development status and prospect of mining system engineering under the background of artificial intelligence[J]. Metal Mine, 2022(5): 10–25.
- [37] 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.
- [38] 张幼蒂. 矿业系统工程的发展与展望[J]. 金属矿山, 2003(1): 1–3, 10.
ZHANG Youdi. Development and prospect of mining systems engineering[J]. Metal Mine, 2003(1): 1–3, 10.
- [39] 云庆夏, 陈永锋. 我国采矿系统工程的技术进展[J]. 金属矿山, 1999(11): 7–11.
YUN Qingxia, CHEN Yongfeng. Technological advance in China's mining systematic engineering[J]. Metal Mine, 1999(11): 7–11.
- [40] 姚曼华. 冶金部召开露天矿优化设计程序评议、鉴定会[J]. 有色金属(矿山部分), 1982, 34(4): 9.
YAO Manhua. The Ministry of Metallurgy held a review and appraisal meeting on the optimization design procedure of open pit mine[J]. Nonferrous Metals (Mining), 1982, 34(4): 9.
- [41] 潘振海. 棒锤山露天铁矿设计中的计算机应用[J]. 冶金自动化, 1988, 12(1): 60–61, 9.
PAN Zhenhai. The computer application for the design of Bangchuishan opencut iron mine[J]. Metallurgical Industry Automation, 1988, 12(1): 60–61, 9.
- [42] 李建祥, 王青. 多时段露天开采短期计划优化[J]. 金属矿山, 2001(4): 1–4, 18.
LI Jianxiang, WANG Qing. Optimization the short term production scheduling of multi period opencasting[J]. Metal Mine, 2001(4): 1–4, 18.
- [43] 孙效玉, 张维国, 陈毓, 等. 根据露天矿长期计划自动形成短期计划的0-1整数规划方法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(7): 1139–1143.
SUN Xiaoyu, ZHANG Weiguo, CHEN Yu, et al. Automatic formation of short-term plan based on the long-term plan on open-pit mine using 0-1 integer programming[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(7): 1139–1143.
- [44] 付策. 应用线性规划编制金堆城露天矿1982年下半年及1983年最优排岩计划[J]. 有色矿山, 1984, 13(3): 12–17.
FU Ce. Using linear programming to compile the optimal rock discharge plan of Jinduicheng open-pit mine in the second half of 1982 and 1983[J]. China Mine Engineering, 1984, 13(3): 12–17.
- [45] 石瑞民, 陈怡南, 董晓波. 露天矿生产中车辆安排问题的非线性规划模型[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2004, 13(3): 5–8.
SHI Ruimin, CHEN Yinan, DONG Xiaobo. Non-linear programming model of the transporting arrangement in production of strip mine[J]. Journal of Huaihai Institute of Technology, 2004, 13(3): 5–8.
- [46] 顾清华, 张伟, 程平, 等. 基于模糊多目标的石灰石露天矿配矿优化模型[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(12): 181–187.
GU Qinghua, ZHANG Wei, CHENG Ping, et al. Optimization model of ore blending of limestone open-pit mine based on fuzzy multi-objective[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(12): 181–187.
- [47] 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, 17(2): 21–28.
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, 17(2): 21–28.
- [48] 田凤亮, 王忠鑫, 孙效玉, 等. 基于速度场的露天矿卡车多路段行程时间组合预测模型[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(6): 95–99, 146. TIAN Fengliang, WANG Zhongxin, SUN Xiaoyu, et al. Combined prediction model of truck multi-section travel time in open-pit mine based on velocity field[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(6): 95–99, 146.
- [49] 李学现, 顾清华, 阮顺领, 等. 考虑能耗动态变化的露天矿卡车运输最优路径规划[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(S1): 590–600. LI Xuexian, GU Qinghua, RUAN Shunling, et al. Optimal transportation path planning of truck in open-pit mine under dynamic energy consumption[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S1): 590–600.
- [50] 顾清华, 刘海龙, 卢才武, 等. 基于采选流程下的露天矿多金属多目标配矿优化模型[J]. *金属矿山*, 2020(3): 56–63. GU Qinghua, LIU Hailong, LU Caiwu, et al. Multi-metal multi-objective ore optimization model for open-pit mine based on mining and beneficiation process[J]. *Metal Mine*, 2020(3): 56–63.
- [51] 孙效玉, 田凤亮, 张航, 等. 基于 GPS 数据的露天矿道路网自动提取[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(11): 3059–3064. SUN Xiaoyu, TIAN Fengliang, ZHANG Hang, et al. Automatic extraction of road network in open-pit mine based on GPS data[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(11): 3059–3064.
- [52] 孙效玉, 田凤亮, 张航, 等. 兼顾固定配车需要的露天矿车流规划模型[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(S2): 583–588. SUN Xiaoyu, TIAN Fengliang, ZHANG Hang, et al. Traffic flow model in open pit mine for needs of fixed assignment of truck[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(S2): 583–588.
- [53] 郭连军, 范文忠. 露天矿深孔爆破设计专家系统的研究[J]. *中国矿业*, 1993, 2(6): 56–59. GUO Lianjun, FAN Wenzhong. The study of expert system used in opencut blast designing[J]. *China Mining Magazine*, 1993, 2(6): 56–59.
- [54] 吴洪词. 遗传算法在露天矿开采设计中的应用[J]. *金属矿山*, 1997(3): 1–4. WU Hongci. Application of genetic algorithms in mining design of open pit[J]. *Metal Mine*, 1997(3): 1–4.
- [55] 彭娟, 程健, 韩仿仿, 等. 基于粒子群算法的自动配煤系统多目标优化[J]. *工矿自动化*, 2009, 35(10): 25–28. PENG Juan, CHENG Jian, HAN Fangfang, et al. Multi-target optimization for automatic blending coal system based on PSO algorithm[J]. *Industry and Mine Automation*, 2009, 35(10): 25–28.
- [56] 丁恩杰, 俞啸, 廖玉波, 等. 基于物联网的矿山机械设备状态智能感知与诊断[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 2308–2319. DING Enjie, YU Xiao, LIAO Yubo, et al. Key technology of mine equipment state perception and online diagnosis under Internet of Things[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2308–2319.
- [57] 袁亮, 俞啸, 丁恩杰, 等. 矿山物联网人-机-环状态感知关键技术研究[J]. *通信学报*, 2020, 41(2): 1–12. YUAN Liang, YU Xiao, DING Enjie, et al. Research on key technologies of human-machine-environment states perception in mine Internet of Things[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(2): 1–12.
- [58] 顾清华, 马平平, 闫宝霞, 等. 基于机器学习方法的露天矿卡车运行状态时间预测研究[J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(7): 149–155. GU Qinghua, MA Pingping, YAN Baoxia, et al. Research on time prediction of truck running state in open-pit mine based on machine learning method[J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(7): 149–155.
- [59] 李凤明, 李宏艳, 孙维吉. 基于支持向量机的露天矿边坡地表变形预测[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(5): 492–495. LI Fengming, LI Hongyan, SUN Weiji. Forecast of surface deformation of slope of strip mine based on support vector machine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(5): 492–495.
- [60] 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.
- [61] 韩猛, 封海洋, 李金典, 等. 我国露天煤矿边坡研究现状及发展趋势[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(10): 276–280, 284. HAN Meng, FENG Haiyang, LI Jindian, et al. Research status and development trend of open-pit coal mine slope in China[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(10): 276–280, 284.
- [62] 杨天鸿, 王赫, 董鑫, 等. 露天矿边坡稳定性智能评价研究现状、存在问题及对策[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 2277–2295. YANG Tianhong, WANG He, DONG Xin, et al. Current situation, problems and countermeasures of intelligent evaluation of slope stability in open pit[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2277–2295.
- [63] 胡振琪. 矿山土地复垦与生态修复领域“十四五”高质量发展的若干思考[J]. *智能矿山*, 2021, 2(1): 29–32. HU Zhenqi. Some thoughts on high-quality development in the field of mine land reclamation and ecological restoration during the 14 th Five-Year Plan[J]. *Journal of Intelligent Mine*, 2021, 2(1): 29–32.
- [64] 胡振琪. 我国土地复垦与生态修复 30 年: 回顾、反思与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 25–35. HU Zhenqi. The 30 years' land reclamation and ecological restoration in China: Review, rethinking and prospect[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1): 25–35.
- [65] 谢和平, 王金华, 王国法, 等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(5): 1187–1197. XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(5): 1187–1197.
- [66] 宋慧延, 刘强, 牛大伟. 一种挖掘机电控系统性能测试平台的设计[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(3): 250–252. SONG Huiyan, LIU Qiang, NIU Dawei. A design of performance testing platform for electronic control system on excavator[J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2014, 35(3): 250–252.
- [67] 纪伟, 崔乔乔. 徐工首台遥控液挖挖掘机试制成功[J]. *工程机械*, 2010, 41(12): 111.

- Ji Wei, Cui Qiaoqiao. Xugong's first remote control hydraulic excavator was successfully trial-produced[J]. *Construction Machinery and Equipment*, 2010, 41(12): 111.
- [68] 王莹. 山河智能 SWEROB2009 型智能挖掘机[J]. *今日工程机械*, 2010(3): 131.
WANG Ying. Shanhe intelligent SWEROB2009 intelligent excavator[J]. *Construction Machinery Today*, 2010(3): 131.
- [69] 王刚, 汪瑒, 崔丽媛. 三一遥控挖掘机抢险救援利器[J]. *交通建设与管理*, 2017(9): 26.
WANG Gang, WANG Yang, CUI Liyuan. Sany remote control excavator rescue weapon[J]. *Transport Construction & Management*, 2017(9): 26.
- [70] 王忠鑫, 辛凤阳, 陈洪亮, 等. 我国露天矿智能运输技术现状及发展趋势[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(6): 15-26.
WANG Zhongxin, XIN Fengyang, CHEN Hongliang, et al. Current status and development trend of intelligent transportation technology in China's open-pit mines[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(6): 15-26.
- [71] 李庆玲, 张慧祥, 赵旭阳, 等. 露天矿无人驾驶自卸卡车发展综述[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(2): 29-34.
LI Qingling, ZHANG Huixiang, ZHAO Xuyang, et al. Overview of unmanned mining trucks in open-pit mine[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(2): 29-34.
- [72] 赵浩, 毛开江, 曲业明, 等. 我国露天煤矿无人驾驶及新能源卡车发展现状与关键技术[J]. *中国煤炭*, 2021, 47(4): 45-50.
ZHAO Hao, MAO Kaijiang, QU Yeming, et al. Development status and key technology of driverless and new energy trucks in open-pit coal mine in China[J]. *China Coal*, 2021, 47(4): 45-50.
- [73] АНДРЮЩЕНКО А В, 杜永锡. 英古列茨露天矿半连续采矿工艺的改进[J]. *国外金属矿采矿*, 1979(2): 27-31.
АНДРЮЩЕНКО А В, DU Yongxi. Improvement of semi-continuous mining technology in Inguletz open pit mine[J]. *Mining Engineering*, 1979(2): 27-31.
- [74] 张瑞新, 刘煜, 郑群飞, 等. 基于 EDEM 的双齿辊破碎机破碎效率影响因素仿真分析[J]. *金属矿山*, 2018(2): 154-159.
ZHANG Ruixin, LIU Yu, ZHENG Qunfei, et al. Simulation analysis of influencing factors of double-gear roller crusher crushing efficiency based on EDEM[J]. *Metal Mine*, 2018(2): 154-159.
- [75] 张幼蒂, 张达贤, 杨树才, 等. 露天矿半连续运煤系统及其在我国应用前景[J]. *中国矿业*, 1995, 4(2): 16-20.
ZHANG Youdi, ZHANG Daxian, YANG Shucai, et al. Open-pit cyclic-flow coal transport system and its application prospect in China[J]. *China Mining Magazine*, 1995, 4(2): 16-20.
- [76] 赵丽梅, 陈伦军, 苏明, 等. 反击式破碎机破碎过程建模与仿真分析[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(8): 1496-1502.
ZHAO Limei, CHEN Lunjun, SU Ming, et al. Modeling and simulation on crushing process of impact crusher[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(8): 1496-1502.
- [77] 董钢, 范秀敏, 张曦, 等. 基于层压破碎理论的圆锥破碎机破碎力分析及运动学研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(17): 159-164.
DONG Gang, FAN Xiumin, ZHANG Xi, et al. Crushing force and kinematics analysis of cone crusher based on interparticle breakage[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(17): 159-164.
- [78] 高强, 张建华. 破碎理论与破碎机的研究现状与展望[J]. *机械设计*, 2009, 26(10): 72-75.
GAO Qiang, ZHANG Jianhua. Current status and prospects on the study of crush theory and crusher[J]. *Journal of Machine Design*, 2009, 26(10): 72-75.
- [79] 王进军. 双齿辊破碎机辊齿强度分析[J]. *煤矿机械*, 2007, 28(11): 65-66.
WANG Jinjun. Strength analysis of tooth of double roll crusher[J]. *Coal Mine Machinery*, 2007, 28(11): 65-66.
- [80] 潘永泰, 张新民. 分级破碎机的研究及应用[J]. *矿山机械*, 2002, 30(4): 13-15, 4.
PAN Yongtai, ZHANG Xinmin. Research and application of sizer crusher[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2002, 30(4): 13-15, 4.
- [81] 姚振强, 马立峰, 吴凤彪, 等. 排土机排料臂输送机振动研究分析[J]. *煤矿机械*, 2020, 41(1): 75-77.
YAO Zhenqiang, MA Lifeng, WU Fengbiao, et al. Research and analysis on vibration of discharging arm conveyor of spreader[J]. *Coal Mine Machinery*, 2020, 41(1): 75-77.
- [82] 许波, 李琳琳, 卢寿福, 等. 排土机配重臂的优化设计与有限元分析[J]. *矿山机械*, 2013, 41(8): 35-39.
XU Bo, LI Linlin, LU Shoufu, et al. Optimization design and FEA of counterweight boom of dumping spreader[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2013, 41(8): 35-39.
- [83] 肖艳军, 于大海, 张晓光, 等. 基于 ADAMS 的排土机底盘振动分析与结构改进[J]. *矿山机械*, 2013, 41(8): 42-45.
XIAO Yanjun, YU Dahai, ZHANG Xiaoguang, et al. Vibration analysis and structural improvement of chassis of dumping spreader based on ADAMS[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2013, 41(8): 42-45.
- [84] 丛立明, 王春玲, 赵明. PLK 3000.50 型排土机上部回转结构有限元仿真分析[J]. *矿山机械*, 2000, 28(11): 30-32.
CONG Liming, WANG Chunling, ZHAO Ming. Finite element simulation analysis on PLK3000.50 spreader's upper revolution structure[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2000, 28(11): 30-32.
- [85] 张允真, 杨鼎春. 大型排土机结构的力学分析[J]. *工程力学*, 1989, 6(4): 79-87.
ZHANG Yunzhen, YANG Dingchun. Structural analysis of a large scale spreader[J]. *Engineering Mechanics*, 1989, 6(4): 79-87.
- [86] 刘宗伟, 张文杰, 乔建强, 等. 基于 WinCC 的自移式破碎站能源管理系统开发[J]. *煤炭技术*, 2018, 37(7): 251-253.
LIU Zongwei, ZHANG Wenjie, QIAO Jianqiang, et al. Development of energy management system of self-propelled crusher based on WinCC[J]. *Coal Technology*, 2018, 37(7): 251-253.
- [87] 蒋卫良, 郝存根, 宋兴元, 等. 煤矿带式输送机关键技术发展现状与展望[J]. *智能矿山*, 2020, 1(1): 98-104.
JIANG Weiliang, XI Cungen, SONG Xingyuan, et al. Development status and prospect of key technology of coal mine belt conveyor[J]. *Journal of Intelligent Mine*, 2020, 1(1): 98-104.
- [88] 李臻, 梁虹, 贾洪钢, 等. 煤矿带式输送机轴承监测诊断系统及其应用[J]. *工矿自动化*, 2011, 37(12): 15-18.
LI Zhen, CAO Hong, JIA Honggang, et al. Bearing monitoring and diagnosis system of belt conveyor of coal mine and its

- application[J]. *Industry and Mine Automation*, 2011, 37(12): 15-18.
- [89] 曹艳军, 柳骁. 原煤运输系统智能化关键技术研究[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(S2): 56-59.
CAO Yanjun, LIU Xiao. Research on key technologies of intelligent raw coal transportation system[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(S2): 56-59.
- [90] 毛君, 陈迪, 白杨溪, 等. 一种带式输送机工作状态下的托辊更换车: CN112975830B[P]. 2022-06-14.
- [91] 罗德权. 关于露天矿连续开采工艺的几个问题[J]. *煤炭科学技术*, 1979, 7(6): 27-31.
LUO Dequan. Several problems about continuous mining technology of open pit mine[J]. *Coal Science and Technology*, 1979, 7(6): 27-31.
- [92] 辛凤阳, 王忠鑫, 田凤亮, 等. 基于 BS 架构的露天矿连续工艺一体化管控平台设计与实现[J]. *金属矿山*, 2021(12): 177-182.
XIN Fengyang, WANG Zhongxin, TIAN Fengliang, et al. Design and implementation of integrated management and control platform for open pit continuous process based on BS architecture[J]. *Metal Mine*, 2021(12): 177-182.
- [93] 曾祥玉, 辛凤阳, 王忠鑫, 等. 自动识别轮斗挖掘机斗齿健康状态的装置及方法: CN112834183A[P]. 2021-05-25.
- [94] 王国法, 王虹, 任怀伟, 等. 智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 295-305.
WANG Guofa, WANG Hong, REN Huaiwei, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 295-305.
- [95] 张景权, 宋波, 王忠鑫, 等. 一种露天矿大型轮斗挖掘机智能控制系统: CN215907845U[P]. 2022-02-25.
- [96] 初宪武, 张志荣, 王鹏飞. 一种斗轮挖掘机数据远程监测单元: CN109709873A[P]. 2019-05-03.
- [97] 辛凤阳, 曾祥玉, 王忠鑫, 等. 一种轮斗挖掘机-卡车协同配合装车对准装置: CN216787286U[P]. 2022-06-21.
- [98] 辛凤阳, 曾祥玉, 王忠鑫, 等. 一种轮斗挖掘机-卡车协同配合装车对准装置及方法: CN113668640A[P]. 2021-11-19.
- [99] 张景权, 王忠鑫, 宋波, 等. 一种轮斗挖掘机取料臂回转检测系统及回转方法: CN113833037A[P]. 2021-12-24.
- [100] 陈积松. 关于露天矿控制爆破技术发展方向探讨[J]. *金属矿山*, 1984(8): 2-6, 26.
CHEN Jisong. Discussion on the development direction of controlled blasting technology in open pit mine[J]. *Metal Mine*, 1984(8): 2-6, 26.
- [101] 谢先启, 黄小武, 姚颖康, 等. 露天深孔台阶精细爆破技术研究进展[J]. *金属矿山*, 2022(7): 7-18.
XIE Xianqi, HUANG Xiaowu, YAO Yingkang, et al. Study prospect of precision blasting technology in open-pit deep hole bench[J]. *Metal Mine*, 2022(7): 7-18.
- [102] 郭连军. 露天矿山数字爆破研究与应用[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2013.
GUO Lianjun. Research and application of digital blasting in open pit mines[D]. Anshan: Liaoning University of Science and Technology, 2013.
- [103] 朱海成, 韩新平, 冀常鹏, 等. 钻孔岩性识别条件下的数字爆破技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(10): 184-189.
ZHU Haicheng, HAN Xinping, JI Changpeng, et al. Research on digital blasting technique with lithology identification of borehole[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(10): 184-189.
- [104] 汪旭光, 吴春平. 智能爆破的产生背景及新思维[J]. *金属矿山*, 2022(7): 2-6.
WANG Xuguang, WU Chunping. Background and new thinking about intelligent blasting[J]. *Metal Mine*, 2022(7): 2-6.
- [105] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. *科学学研究*, 2015, 33(2): 242-253.
CHEN Yue, CHEN Chaomei, LIU Zeyuan, et al. The methodology function of Cite Space mapping knowledge domains[J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(2): 242-253.
- [106] 刘先彪. 朝阳露天煤矿工作面智能化横移带式输送机[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(S1): 99-100, 111.
LIU Xianbiao. Intelligent transverse belt conveyor in Chaoyang open-pit coal mine working face[J]. *Industry and Mine Automation*, 2022, 48(S1): 99-100, 111.
- [107] 刘增杰, 盛伟青, 杨洋. 智能化履带高效移置带式输送机的研究[J]. *煤矿机械*, 2022, 43(10): 128-130.
LIU Zengjie, SHENG Weiqing, YANG Yang. Research on intelligent crawler high-efficiency displacement belt conveyor[J]. *Coal Mine Machinery*, 2022, 43(10): 128-130.
- [108] 袁海鹏. 带式输送机多样化及发展趋势的研究[J]. *煤矿机械*, 2021, 42(11): 45-47.
YUAN Haipeng. Research on diversification and development trend of belt conveyor[J]. *Coal Mine Machinery*, 2021, 42(11): 45-47.
- [109] 王海军, 王洪磊. 带式输送机智能化关键技术现状与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(12): 225-239.
WANG Haijun, WANG Honglei. Status and prospect of intelligent key technologies of belt conveyor[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(12): 225-239.
- [110] 蒋卫良, 王兴茹, 刘冰, 等. 煤矿智能化连续运输系统关键技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(7): 134-142.
JIANG Weiliang, WANG Xingru, LIU Bing, et al. Study on key technology of coal mine intelligent continuous transportation[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7): 134-142.
- [111] 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.
- [112] 王忠鑫, 田凤亮, 辛凤阳, 等. 露天煤矿智能化建设 构建场景生态是关键[J]. *智能矿山*, 2022, 3(6): 93-100.
WANG Zhongxin, TIAN Fengliang, XIN Fengyang, et al. Intelligent construction of open-pit coal mine and construction of scene ecology are the key[J]. *Journal of Intelligent Mine*, 2022, 3(6): 93-100.