



浅埋多煤层群协调绿色开采关键技术研发与实践

吴群英 胡俭 刘凯 李杨 谢晓深 张德生

引用本文：

吴群英, 胡俭, 刘凯, 等. 浅埋多煤层群协调绿色开采关键技术研发与实践[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 19–30.

WU Qunying, HU Jian, LIU Kai. Research and practice on key technologies for coordinated green mining of shallowly buried multi-coal seam groups[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 19–30.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1095>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

浅埋深厚煤层高强度开采地表沉陷规律研究

Research on surface subsidence law in high-intensity mining of shallow buried with thick coal seam

煤炭科学技术. 2023, 51(5): 11–20 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0821>

浅埋深煤层开采沉陷预测方法应用及研究

Application and research on prediction method for mining subsidence in shallow buried deep coal seam

煤炭科学技术. 2019(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/343a3cef-e604-427d-8073-b7e6b59769f5>

浅埋煤层群裂隙演化规律及组合承载结构载荷研究

Research on the fracture evolution law and combined bearing structure load of shallow buried coal seam group

煤炭科学技术. 2023, 51(9): 65–76 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1108>

气煤叠置区高强度开采浅埋管道破坏时序规律研究

Study on time series rule of buried pipe failure under high-intensity coal mining in a gas-coal overlapping area

煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 152–164 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0107>

黄土沟谷区浅埋煤层开采覆岩破坏与地表损伤特征研究

Study on overburden and surface damage characteristics of shallow-buried coal seam mining in loess gully area

煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e2e70fbd-d9b8-40b4-993b-4015877a7e95>

倾斜碎软煤层群煤层气协调开发关键技术

Key technologies for coordinated development of coalbed methane in inclined soft coal seam groups: a case study of Aiweigou Mining Area

煤炭科学技术. 2024, 52(1): 211–220 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0005>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

“煤炭行业卓越工程师”专题



移动扫码阅读

吴群英, 胡 俭, 刘 凯, 等. 浅埋多煤层群协调绿色开采关键技术研发与实践[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 19–30.

WU Qunying, HU Jian, LIU Kai, *et al.* Research and practice on key technologies for coordinated green mining of shallowly buried multi-coal seam groups[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 19–30.



吴群英, 男, 陕西韩城人, 博士, 正高级工程师, 享受国务院政府特殊津贴专家, 现任陕西有色金属控股集团有限责任公司党委书记、董事长。研究方向: 煤矿智能化技术及装备, 煤炭绿色开发及生态协调治理, 矿区高效开发与高质量发展。主要成果: 技术成果在 10 余个矿区推广应用, 取得显著经济社会效益, 为我国大型煤矿区高质量开发做出重要贡献。获得国家科技进步二等奖 1 项, 省部级特等奖 2 项、一等奖 5 项。获国家发明专利 10 项, 发表论文 23 篇, 出版专著 5 部, 制定标准 5 项。

浅埋多煤层群协调绿色开采关键技术研发与实践

吴群英¹, 胡 俭², 刘 凯^{3,4}, 李 杨³, 谢晓深⁵, 张德生⁴

(1. 陕西有色金属控股集团有限责任公司, 陕西 西安 710075; 2. 陕煤集团神木张家峁矿业有限公司, 陕西 榆林 719316; 3. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083; 4. 中煤科工开采研究院有限公司 智能开采装备分院, 北京 100013; 5. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 西部矿区多煤层赋存条件导致了“采面布局矛盾、覆岩结构多变、地表运移叠加”的突出性、普遍性问题, 探索适应多煤层高强度开采的协调绿色开采技术成为西部矿区多煤层安全、高效开采的关键。针对浅埋厚煤层群高强度开采面临的主要技术难题, 从多煤层开采时空布局、工作面岩层稳定性控制、重复扰动下的地表沉陷等方面, 系统地阐述了浅埋多煤层群协调绿色开采的几项关键技术。研究结果如下: ①揭示了西部多煤层高强度开采层间相互作用机理, 构建了多煤层重复开采扰动定量判据与评价方法, 创新提出了以层间最小扰动为目标的“薄、中、厚”煤层交错分布协调开采技术; ②提出了多煤层工作面岩层稳定控制技术, 建立了全覆岩结构破断模型, 揭示了全覆岩结构破断条件下的支架与围岩相互作用规律, 在此基础上针对多煤层开采工作面支护在不同的位置需要采用不同支护策略的需求, 研发了工作面支架抗冲双伸缩立柱和超前巷道支护状态监测系统, 实现工作面多区域安全高效稳定支护; ③通过揭示浅埋多煤层斜交叠置开采下地表动态移动特征和地表裂缝发育规律, 给出地表下沉系数的确定方法, 研发了塌陷区裂缝“土壤重构-原位充填-微地形改造”组合的治理关键技术, 有效防治黄土沟壑区的采煤地表塌陷。上述核心技术在张家峁、柠条塔、红柳林等 20 余个大型煤矿成功应用, 为我国西部矿区高质量、可持续开发提供了技术支撑。

关键词: 浅埋多煤层; 高强度开采; 层间扰动; 智能化装备; 地表沉陷

中图分类号: TD82; TD327

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)09-0019-12

Research and practice on key technologies for coordinated green mining of shallowly buried multi-coal seam groups

WU Qunying¹, HU Jian², LIU Kai^{3,4}, LI Yang³, XIE Xiaoshen⁵, ZHANG Desheng⁴

(1. Shaanxi Non-ferrous Metals Holding (Group) Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 2. Shenmu Zhangjiamao Mining Co., Ltd., of Shanxi Coal and Chemical Industry Group, Yulin 719316, China; 3. School of Energy and Mining, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 4. Branch

收稿日期: 2024-08-20

责任编辑: 常 琛

DOI: 10.12438/cst.2024-1095

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52274207); 工业和信息化部科技项目(202216705)

作者简介: 吴群英(1968—), 男, 陕西韩城人, 正高级工程师。E-mail: wuqunying68@163.com

通讯作者: 刘 凯(1999—), 男, 辽宁朝阳人, 博士研究生。E-mail: lk1999z@163.com

of Intelligent Equipment, CCTEG Coal Mining Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China; 5. College of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The multi-seam occurrence conditions in the western mining area have brought forth prominent and common issues such as "contradictions in mining face layout, variable overburden structure, and superimposed surface migration". Exploring the coordinated green mining technology suitable for high-intensity mining of multiple coal seams is the key to the safe and efficient mining of multiple coal seams in the western mining area. In response to the main technical challenges faced in the high-intensity mining of shallow-buried thick coal seam groups, several key technologies for the coordinated green mining of shallow-buried multi-seam groups have been systematically expounded from aspects such as the spatio-temporal layout of multi-seam mining, the stability control of the rock strata in the working face, and the surface subsidence under repeated disturbances. The following research results have been obtained: ① The interlayer interaction mechanism of high-intensity mining of multiple coal seams in the western region has been revealed. A quantitative criterion and evaluation method for repeated mining disturbances of multiple coal seams have been constructed. An innovative coordinated mining technology with the staggered distribution of "thin, medium, and thick" coal seams aiming at minimizing inter layer disturbances has been proposed. ② The stability control technology of the rock strata in the multi-seam working face has been put forward. The full overburden structure failure model has been established, and the interaction law between the support and the surrounding rock under the condition of full overburden structure failure has been revealed. On this basis, in response to the demand of using different support strategies at different positions of the multi-seam mining working face, an anti-impact double telescopic column for the working face support and a monitoring system for the support state of the advanced roadway have been developed to achieve safe, efficient and stable support in multiple areas of the working face. ③ By revealing the dynamic movement characteristics of the surface and the development law of surface fractures under the oblique superimposed mining of shallow-buried multi-seam coal seams, the determination method of the surface subsidence coefficient has been given. The key treatment technology combining "soil reconstruction – in-situ filling – micro-topography modification" for fractures in the subsidence area has been developed, effectively preventing the surface subsidence of coal mining in the loess gully area. The above core technologies have been successfully applied in more than 20 large-scale coal mines such as Zhangjiamao, Ningtiaota, and Hongliulin, providing technical support for the high-quality and sustainable development of the western mining area in China.

Key words: shallow-buried multiple coal seams; high-intensity mining; inter-seam disturbance; intelligent equipment; surface subsidence

0 引言

在全球能源结构调整和碳排放控制的背景下,煤炭智能开采与绿色开采技术装备成为能源领域的重要研究方向^[1-4]。晋、陕、蒙、新等西部矿区是中国的主要煤炭生产区域,其煤炭储量占全国总储量的66.2%。这些地区的煤炭资源丰富,可采煤层数量多(超过5层),埋藏较浅,且煤质坚硬,厚度差异显著,从0.8 m的薄煤层到超过10 m的特厚煤层不等。开采这些煤层采面布局矛盾、覆岩结构多变、地表运移叠加,难以实现矿区的安全、高效、高回收率、绿色开采。

现阶段多煤层开采研究已取得一定进展,但仍有许多技术难题亟待解决。近年来,学者们对多煤层开采过程中层间扰动和应力分布进行了大量研究,揭示了部分煤层间相互作用的基本规律。刘一龙等针对沟谷区多煤层开采覆岩破坏规律采用地表勘察、InSAR动态观测、降雨—径流分析和数值模拟等综合方法开展研究分析,分析了沟谷区多煤层下行开采引发覆岩破坏与地表沉降的空间扩展全过程^[5]。阎跃观等^[6]针对黄河流域中下游多煤层矿井,分析

了多煤层时空协调开采地表移动规律和岩层控制机理。谷拴成等^[7]采用数值模拟、现场实测、数据分析相结合的方法,分析了充填采煤过程中受采空区及煤柱影响下的覆岩应力分布规律、周期来压规律及支架受力特性。任中华等^[8]开展了针对平煤股份八矿多煤层远距离重叠开采留设煤柱及采空区对底板卸压效果影响分析。刘贵等^[9]分析了水库水体及坝体下多煤层开采的可行性,为水文复杂条件下的多煤层安全开采提供了依据。上述研究为矿井多煤层时空协调开采提供了理论依据,既可以保证了资源采出率,又能有效地控制岩层和地表移动。然而,对于浅埋多煤层开采的覆岩及地表损害机制的认识尚不充分,且多煤层协调开采模式仍不明晰,这些问题极大地限制了开采技术水平的进一步提升。现有的开采装备和技术水平难以完全适应复杂多变的煤层条件,导致开采效率低下、安全风险高。在生态环境影响方面,多煤层开采对生态系统的破坏也日益严重^[10]。由于频繁的地质扰动和重复采动,致使覆岩裂隙发育机理及裂缝带高度与单煤层开采不同^[11],地表植被和土壤结构的破坏程度增加^[12],地表变形加剧、产生大量地裂缝且存在形成地表水下渗通道

的可能^[13],生态环境修复难度加大。现有的生态恢复技术多集中于单一层面的治理,缺乏针对多煤层开采特性的综合治理方案,这不仅延缓了生态恢复的进程,也增加了环境治理的成本和难度。

目前,对于西部浅埋多煤层开采认识有待进一步深入,多煤层开采覆岩及地表损害规律不清楚,限制了多煤层安全绿色开采技术的发展。因此,在系统揭示多煤层开采覆岩运移及地表损害规律的基础上,提出以层间最小扰动为目标的多煤层交错分布协调开采方法;针对多煤层开采构建多煤层工作面岩层稳定控制技术体系,实现工作面多区域安全高效稳定支护;研发塌陷区裂缝“土壤重构-原位充填-微地形改造”组合的治理技术,进一步保障西部大型煤矿安全、智能、绿色开发。

1 浅埋多煤层协调绿色开采面临的技术难题

榆林、神木矿区多为多煤层开采,可采煤层有 2^{-2} , 3^{-1} , 4^{-2} , 4^{-3} , 4^{-4} , 5^{-2} , 5^{-3} 号等7层煤。多煤层高强度开采重复扰动、持续时间长、破坏性大,对地表和生态环境产生较大的负面影响,给我国西部矿区高质量、可持续开发带来重大难题和挑战^[14]。笔者详细总结了目前我国西部多煤层高强度开采面临的关键技术难题与发展瓶颈。

1)高强度开采层间扰动下的多煤层时空布局难以协调。多煤层间的扰动机制复杂且多变,影响开采时空布局的科学合理性^[15]。煤层间扰动不仅增加了预测难度,还对矿区的稳定性构成了潜在威胁,增加了开采过程中的不确定性和风险;在多煤层开采过程中,不同煤层的厚度、倾角、硬度等物理特性各异,导致传统的开采方法难以适应这种多样化的开采环境,从而影响了整体回采效率;由于层间扰动的不确定性,煤层开采过程中可能会出现冒顶、煤壁片帮等安全事故,对矿区的持续稳定运营造成了巨大挑战。因此亟需建立开采层序优化选择、采掘接续智能规划的多煤层高效协调开发模式,实现西部矿区多煤层安全高效开发。

2)全覆岩破断下的工作面岩层稳定性难以控制。传统的岩层控制方法主要依赖于经验和标准化的技术手段^[16],难以应对多煤层开采条件下复杂多变的覆岩移动状况,岩层稳定性控制难度增加;多煤层重复采动过程中,不同煤层的开采条件和覆岩运动特征各不相同,对采掘设备的灵活性和适应性提出了更高的要求;在多煤层开采环境中,难以有效协调不同煤层的开采进程和设备运行,难以实现高效协同

开采,导致开采效率的下降。针对以上难题,亟需多煤层开采围岩稳定性控制理论与技术。

3)重复扰动下的地表塌陷难以治理。多煤层工作面的开采对上覆岩土体造成了多次扰动,显著增加了地面塌陷治理和生态环境修复的难度^[17]。这种多次扰动效应,不仅引发了地质结构的复杂变化,还对地表生态系统产生了深远的负面影响。在多煤层开采背景下,生态环境的恢复不仅需要解决地质结构的稳定性问题,还需应对由采动引发的水土流失、植被破坏等一系列生态问题。因此,研发科学有效生态治理修复技术,解决多煤层开采“煤—生态”协调发展难题是西部煤炭开发的重大技术难题。

2 多煤层开采层间扰动影响评价及协调开采模式

2.1 多煤层高强度开采层间扰动影响分析

基于陕北某煤矿赋存情况,以两个相邻煤层(上方为2-2煤层,采高为8 m;下方为3-1煤层,采高为3 m)为例,建立Flac^{3D}数值模型,边界采用位移约束,研究其多煤层开采相互扰动规律。上下煤层采用一次采全高的方式进行开采,工作面设置长度为250 m。

由于该矿为近水平煤层,垂直应力占主导地位,开采过程中的应力如图1所示,位移如图2所示,3-1煤基本顶应力及位移变化曲线如图3所示。图1a为先开采2-2煤,再开采3-1煤;图1b为仅开采3-1煤。

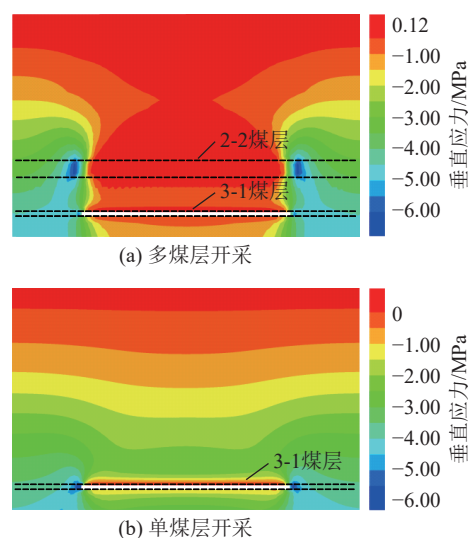


图1 垂直应力云图

Fig.1 Vertical stress cloud map

由图中可以看出,多煤层开采时,上方煤层开采会导致应力重新分布,对下方煤层造成影响。如图1a

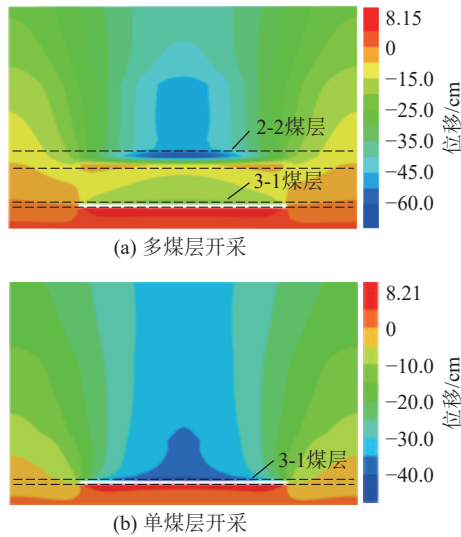


图 2 位移云图

Fig.2 Displacement cloud map

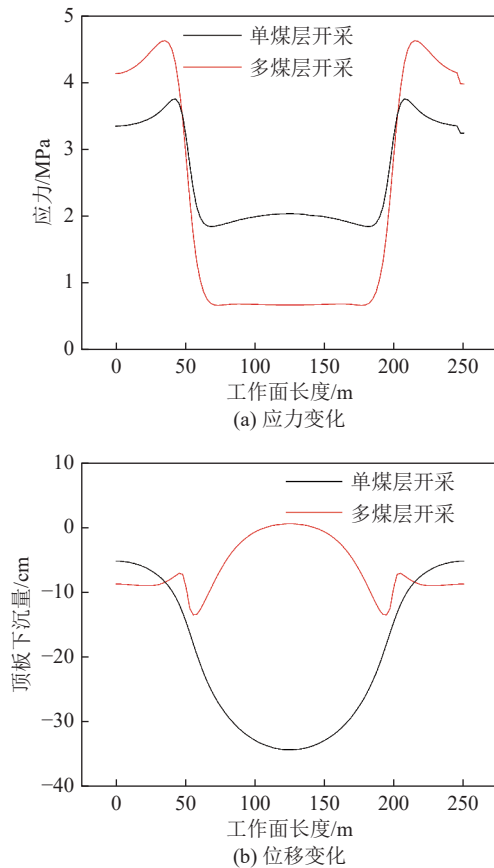


图 3 基本顶应力及位移变化曲线

Fig.3 Basic top stress and displacement variation curve

所示,上方煤层开采过程中在两巷煤柱侧产生应力集中区域,应力集中向下方转移,造成下方煤层两巷煤柱侧应力集中程度变大,应力集中峰值从单煤层开采时的 5.97 MPa 增加到 6.25 MPa。

上方煤层采动影响导致下方煤层工作面顶板压力减小,如图 3a 所示,单煤层开采时,工作面中部顶

板最大压力约为 2.04 MPa,上方煤层开采后,最大顶板压力减小为 0.67 MPa,上方煤层开采对下方煤层具有卸压作用;上方煤层采动影响导致下方煤层顶板下沉量减小,如图 3b 所示,工作面顶板最大下沉量从 34.3 cm 减小到 12.55 cm,且工作面端头顶板下沉量大于中部。

此外,上方煤层开采会导致下方煤层超前支承压力显著减小,超前支承压力影响范围减小。基于建立的多煤层开采相互扰动 Flac3D 数值模拟模型,通过采用 History 和 profile 内置程序分别模拟了模型开挖完成前后工作面基本顶中部位置布置测线,得到工作面推进到相关位置的应力和位移变化曲线,从而分析工作面开挖过程中超前支承压力变化,得到超前支承压力变化情况,如图 4 所示。由图 4 中可以看出,推进距离均为 300 m 时,多煤层开采超前支承压力最大值为 3.23 MPa,影响范围约为 30 m,单煤层开采时超前支承压力最大值为 4.39 MPa,影响范围约为 55 m。

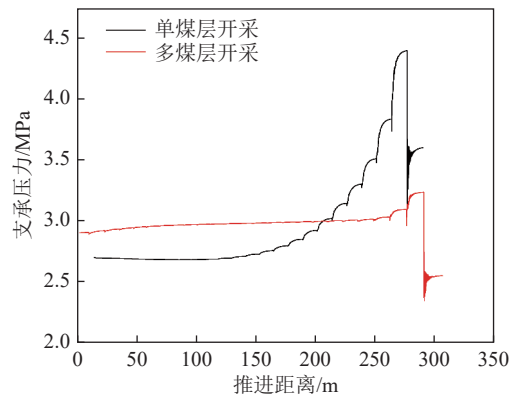


图 4 超前支承压力变化曲线

Fig.4 Advance support pressure variation curve

因此,多煤层开采时,上方煤层的采动会对下方煤层卸压,下方煤层开采工作面顶板压力、超前支承压力及顶板下沉量均减小,但由于上方煤层工作面两侧应力集中向下方转移,从而导致下方煤层工作面两侧应力集中程度增加,巷道破坏的可能性增大。

2.2 多煤层高强度开采层间相互扰动评价

多煤层开采过程中,各煤层间的相互扰动主要通过应力传递和岩层运移破坏来实现。在开采一个煤层时,开采扰动会引起周围岩层的应力重新分布。这种应力变化会传递到上下相邻的煤层,影响这些煤层的稳定性和开采难度。在采动影响下,煤层上覆岩层会出现破裂和塌陷,破坏模式主要包括拉伸破坏和剪切破坏,这种破坏模式会影响到其他煤层

的稳定性^[18]。另外,地下水的存在会使得岩层软化,进一步加剧岩层的破坏和变形,在高强度开采区域,含水层对岩层的稳定性有显著影响^[19]。

多煤层开采过程中的层间影响因素主要为采高、埋深和煤层间距^[20]。采高的增加会导致更大的矿压显现,从而引起更显著的岩层变形和破坏;埋深越大,原岩应力越高,岩层的破坏和变形也越严重,埋深对开采稳定性有直接影响;煤层间距较小时,层间相互扰动更为显著。相邻煤层的开采扰动还会相互影响,增加工作面开采难度。

在极值约束下,多煤层开采扰动度计算模型^[21-23]的公式如下:

$$\varphi = \frac{DM}{\lambda \sum_{i=1}^n \left(K_{pi} \frac{H_i}{H} R_{ii} \right) H^2 + CDM} \quad (1)$$

其中, φ 为主关键层扰动度; λ 为主关键层扰动度影响因子; C 为地质常数; M 为煤层厚度; H 为主关键层与煤层之间岩层的厚度; D 为煤层埋深; H_i , R_{ii} , K_{pi} 分别表示第 i 层岩石的厚度、抗拉强度和碎胀系数。

基于上述模型,形成了多煤层开采扰动强度等级定量评价标准,如图 5 所示,分 3 个等级^[21]:

轻微扰动: $\varphi < 4$; 中等扰动: $4 < \varphi < 6$; 扰动强烈: $\varphi > 6$ 。

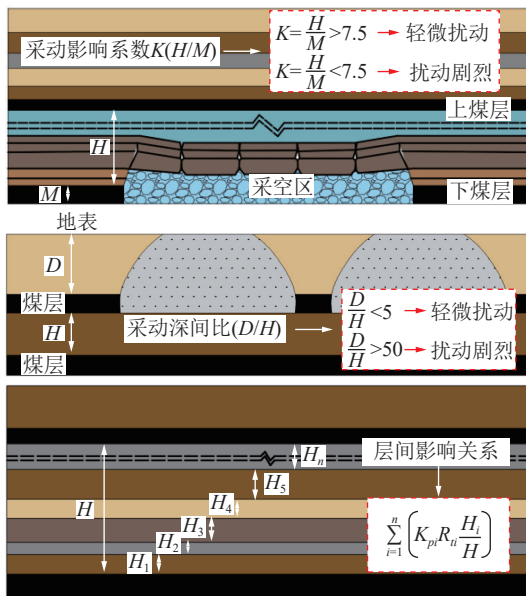


图 5 多煤层开采扰动评价标准

Fig.5 Evaluation criteria for disturbances in multi-seam mining

在此基础上,开发了多煤层开采扰动程度定量评价系统,集地质赋存、协同监测和扰动评价等于一体,具体实现过程包括:①收集和整理地质钻孔资料,统计各相关参数;②设计交互实验方案,计算主关键

层扰动度和下沉量;③对数据进行归一化处理,确定扰动度与下沉量的耦合关系;④基于耦合关系进行扰动影响等级划分;⑤建立数据库,通过 ArcMap 绘制扰动度分布图,分析扰动影响。

2.3 浅埋多煤层协调开采模式

浅埋多煤层协调开采模式是指在浅埋煤层群中,通过合理的开采顺序和空间布局,实现多煤层间的协调开采,最大限度地提高资源采出率并减少地表沉降和开采对环境影响。要实现浅埋多煤层的协调开采,需要在开采过程中充分考虑各煤层的赋存条件、煤层间的相互影响以及地质构造的复杂性。通过数值模拟和现场试验,研究浅埋多煤层协调开采的应力分布规律和岩层移动特征,优化工作面布置和采掘计划,确保开采过程的安全性和经济性。

基于西部多煤层赋存条件,通过采集相关地质数据,利用 FLAC 仿真软件,通过理论计算与数值模拟不同煤层协调开采顺序,可以得到多煤层赋存条件协调开采应力演化情况,如图 6 所示。在多煤层赋存条件下,当一个煤层被开采时,周围岩层的应力会集中在未被开采的区域,形成高应力场。这些高应力场会导致岩层的破坏和变形,增加上覆岩层和相邻煤层的开采难度。但随着开采的进行,部分区域的应力会逐渐释放,形成采空区卸压空间,减少了多煤层应力层间集中影响,高应力场转化为低应力场。这些低应力场可以被利用以减轻岩层的破坏,并有助于围岩的稳定,从而实现全部煤层的回收。

同时,这些低应力场也为相邻煤层的开采提供了有利条件,降低了后续开采的难度和风险。因此,深入研究应力场的动态变化规律及其对多煤层开采的影响,不仅有利于优化工作面空间布局与开采顺序,还能有效解决传统下行开采中因应力逐层叠加引发“多米诺”效应的难题。此外,通过科学的开采策略规划,可以大幅降低浅埋多煤层开采过程中大面积台阶下沉的风险,减缓地表下沉,从而提高整体开采的安全性与稳定性。

总体而言,多煤层协调开采的工作面布置是一项复杂的系统工程,需要综合考虑多种因素,如地质条件、各煤层赋存条件、开采顺序、支护设计等,以确保安全高效开采^[24]。多煤层开采工作面布置的主要原则包括:

1) 工作面布置应考虑与煤层应力集中区位置的关系,尤其是与邻近煤层位置的关系,避免布置在应力集中区域;

2) 工作面布置应最大限度地减少水平位移和应

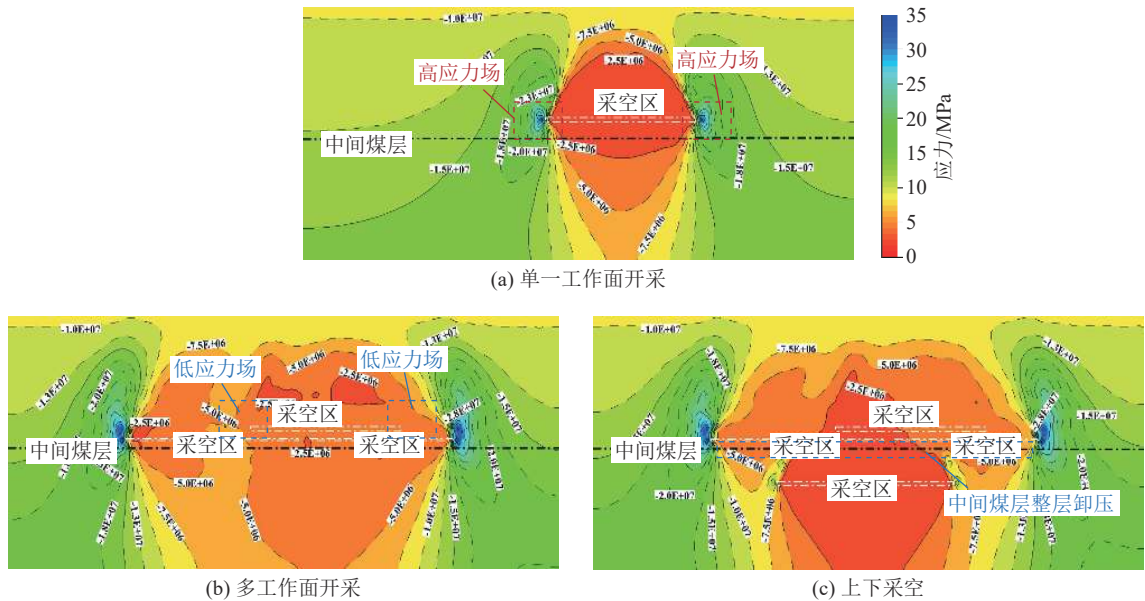


图 6 协调开采应力演化
Fig.6 Coordinated mining stress evolution

力的变化,避开巷道水平变形最大的位置;
3)当煤层处于覆岩裂隙带时,煤柱设计应以窄煤柱为主,维持覆岩稳定性的同时,减少煤柱向下的应力传递,降低对下伏煤层层的压应力作用。
针对榆神矿区浅埋多煤层赋存特征,为实现层间最小扰动,提出了“薄、中、厚”煤层的交错分布上下行协调开采模式^[24]。如图 7 所示,根据煤层厚度呈“薄—中—厚”交错分布的特点,为保障矿井产量,同时避免相邻煤层开采造成的应力叠加影响,优先开采了下部的特厚煤层,通过其采空区形成的低应力场为上部煤层的开采创造有利条件;其次,根据其形成的低应力场范围进行最上部特厚煤层的开采,有效减小了最上部特厚煤层开采对地表的影响;随后,依次下行开采中间的厚煤层与薄煤层,通过科学的开采顺序和合理的工艺设计,最大限度地减少层间的相互干扰和应力叠加效应;最后开采最下部的

中厚煤层,充分考虑上部煤层开采后的应力分布情况,采取相应的支护和防护措施,确保开采过程安全和稳定。
上下行协调开采模式通过充分利用“扰动破坏”高应力场与“卸压利用”低应力场的相互转换关系,有效减轻了对邻近煤层及地表的扰动,同时减少了顶板和围岩的破坏风险。其在榆神矿区的成功应用,不仅有效保障了矿井的整体产量,同时显著降低了开采过程中的应力叠加效应和层间扰动,减缓了地表下沉,保障了矿井的安全生产和可持续发展。这一模式的提出和应用,为类似矿区的煤层开采提供了宝贵的经验和借鉴。

3 多煤层工作面岩层稳定控制技术

3.1 全覆岩结构破断条件下的支架与围岩相互作用规律

通过煤层交错分布上下行协调开采,可尽量减少层间扰动影响、降低开采难度。然而,多个煤层开采采场影响范围必然增加,很多时候可能造成全覆岩结构破断;尤其是在浅埋条件下,裂隙甚至有贯穿地面的风险。

为实现全覆岩结构破断条件下的采场稳定支护,建立了综合考虑“围岩破断特征—层间采动影响—装备承载极限”的全覆岩结构破断模型^[25-26]。如图 8 所示,多煤层开采扰动主要受到多煤层层间扰动影响,在上方煤层开采活动结束后,根据煤层间岩层性质不同,可分为 3 种情况:当煤层间存在多层岩层时,下方

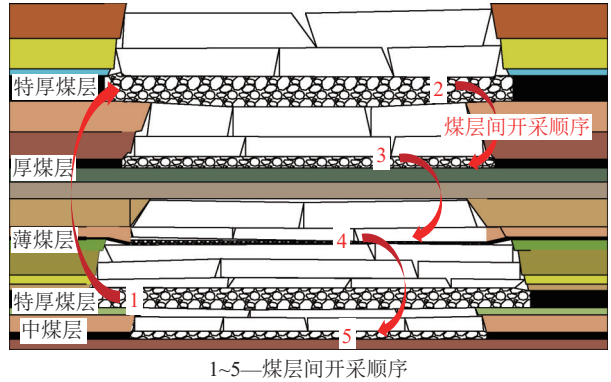


图 7 榆神矿区上下行协调开发模式
Fig.7 Up-down coordinated development model

煤层基本顶形成“砌体梁”承载铰接结构,此时煤层间的相互扰动较小;当煤层间仅存在基本顶和直接顶两层岩层时,下方煤层基本顶形成“块—散”铰接平衡状态;当煤层间仅存在薄岩层时,下方煤层采空区与上覆煤层采空区相连,形成“散体”给定载荷状态,此时煤层间相互扰动较大。根据上述 3 种不同的结构状态,分别建立 3 种对应的围岩与装备力学模型。

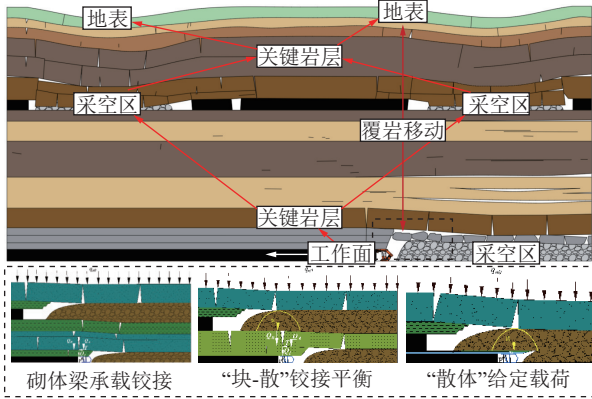


图 8 全覆岩结构破坏模型

Fig.8 Full overburden structure failure and surrounding rock and equipment structural dynamics model

1) 砌体梁承载铰接状态下力学模型:

$$P = Q_1 + Q_{A+B} - \frac{l_B Q_B}{2(h_2 - \delta)} \tan(\varphi - \theta) \quad (2)$$

2) “块—散”铰接平衡状态下力学模型:

$$\begin{cases} P = Q_1 + Q_{A+B} - l_B Q_B \tan(\varphi - \theta) / [2(h_2 - \delta)] + P_s \\ Q_{A+B} = Q_A + Q_B \\ Q_A = Q_B = b(\gamma_2 \times h_2 + q_{n1}) l_B \end{cases} \quad (3)$$

3) “散体”给定载荷状态下力学模型:

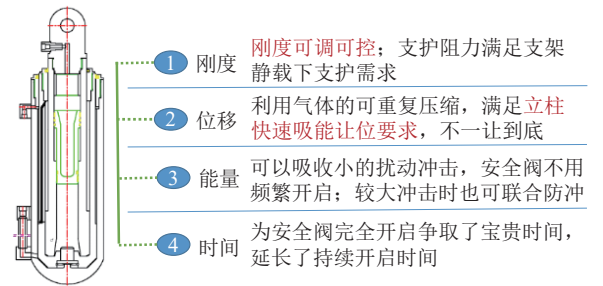
$$\begin{cases} P = Q_1 + P_s \\ Q_1 = \gamma_1 \times h_1 \times l_1 \\ P_s = [\sum h l_C - k \tan^2 \alpha' l_C^3 / (12 \sum h)] b \gamma \end{cases} \quad (4)$$

其中, P 为支架工作阻力, kN; Q_1 为直接顶的重力, kN; Q_{A+B} 为岩块 A 与 B 的重力及其载荷, kN; Q_A , Q_B 为岩块 A 和岩块 B 的重力, kN; l_B , l_C 为岩块 B 岩块 C 的长度, m; h_2 为基本顶岩层厚度, m; δ 为 B 岩块的下沉量, m; φ , θ 为岩块的内摩擦角与破断角, ($^\circ$); P_s 为“散体拱”作用于支架的重力, kN; α 为岩石的破断角, ($^\circ$); b 为单个支架的宽度, m; $\sum h$ 为“散体拱”拱高, 即采高与垮落散体岩层厚度之和, m; l_C 为“散体拱”跨距, 即安全的控顶距与长度之和, m; k 为安全系数, $k=1.2 \sim 1.5$ 。根据上述 3 个模型可计算不同煤层层间距离情况下各煤层开采时的支护力, 从而更好地实现多煤层开采围岩的稳定支护。

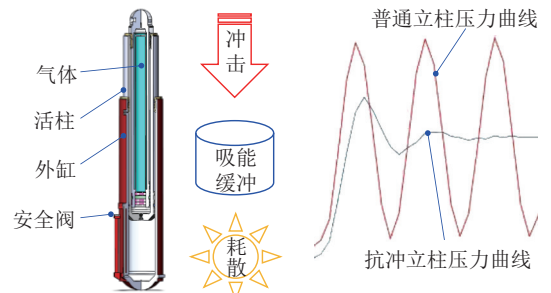
3.2 工作面多区域安全高效稳定支护系统

根据前述分析, 浅埋多煤层开采过程中, 不同煤层间的开采活动会相互扰动, 导致应力重新分布和能量积累。多煤层开采工作面支护在不同的位置需要针对上覆岩层的情况采用不同的支护策略。在工作面中部, 工作面动载强烈, 对液压支架的抗冲性能提出较高的要求; 在工作面端头和超前巷道, 受上下煤层采动影响, 同时叠加锚杆支护应力、超前支架支护应力, 围岩稳定性保障难度增加^[27]。为建立工作面多区域安全高效稳定支护系统, 在提升液压支架支护工作阻力及适应性的基础上, 开展了两方面的研究工作:

1) 工作面支架抗冲双伸缩立柱研究。现有技术中的双伸缩立柱抗冲击性能依靠安全阀实现的, 具有响应时间慢和缓冲能力有限等缺点, 容易出现缸筒胀缸、缸盖开裂等形式的失效破坏^[28], 严重影响多煤层条件下的工作面的安全性。针对上述问题, 发明了一种气—液耦合缓冲抗冲击双伸缩立柱 (图 9),



(a) 缓冲立柱结构及其特点



(b) 缓冲立柱原理



(c) 抗冲立柱现场装配图

图 9 液压支架抗冲击立柱

Fig.9 Hydraulic support impact-resistant column

在立柱上腔内充氮气形成隔离缓冲气室。缓冲室气体压力设置和立柱下腔安全阀调定压力相平衡,当立柱承受载荷在液压支架工作阻力以下(安全阀未开启)时,和普通立柱工作原理相同;当立柱在冲击载荷作用下超过安全阀设定值时,缓冲室压缩吸能,安全阀开启溢流,缓冲和释放过程同时进行。由于缓冲室类似弹簧弹性,通过降刚度吸收了能量,减小安全阀的释压要求,当峰值过后,缓冲腔复位过程压力继续通过安全阀缓慢释放直至达到安全阀设定值,具有对冲击响应快速,减小压力峰值和波动等特点,对安全阀及液压支架本体具有良好的保护作用。

抗冲击立柱形成缓冲气室、安全阀两级防护体系,提高立柱的可靠性和抗冲击能力,吸能缓冲效果好,能够反复承受冲击作用而不损坏,可与现有立柱进行互换,具有良好的可复制性和推广性,现已在张家岭 8 m 超大采高工作面进行试验应用(图 9c),支护效果良好。

2)超前巷道支护状态监测。超前支架组承载特性对于超前巷道围岩稳定性具有决定性作用。目前对于超前支架承载特性缺乏监控,无法指导多点协同支护;支架接顶与锚杆冲突造成支护系统失效,发生安全隐患。为此,研发了超前支架综合监控系统(图 10),由压力、位移、角度、距离等感知传感器,以及控制器、远程控制软件等组成。

超前支架组内的油缸安装压力—位移一体式传感器,监测推移行程和运动过程中的压力异常;毫米

波测距传感器安装在超前支架侧面,可监测超前支架到煤壁的距离,实现防碰撞预警;倾角采高传感器分别安装在超前支架底座和顶梁上,用于监测超前支架的采高及运行过程中的倾角。超前支架控制器可高速采集超前支架压力、倾角、采高等数据,并在边缘端进行初步处理,计算得到每一架超前支架与巷道之间的相互位置关系。每个超前支架配置一个控制器,多个控制器之间通过高速通信系统实现传感器数据同步,得出超前支架组在超前巷道空间中的位姿。同时,利用超前支架立柱上安装的压力传感器,对超前支架立柱受力进行分析,得出超前支架承载特性,分析超前巷道围岩状态,利用超前控制器对立柱的初撑力进行控制。

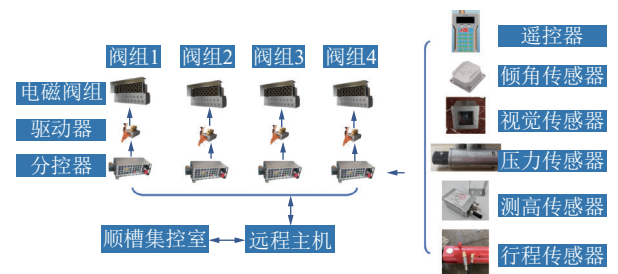


图 10 超前支架综合监测系统

Fig.10 Advanced support integrated monitoring system

远程控制系统根据超前支架组的位姿、承载特性状态、运行工艺下发控制指令,实现超前支架自动控制。超前支架控制系统架构如图 11 所示。

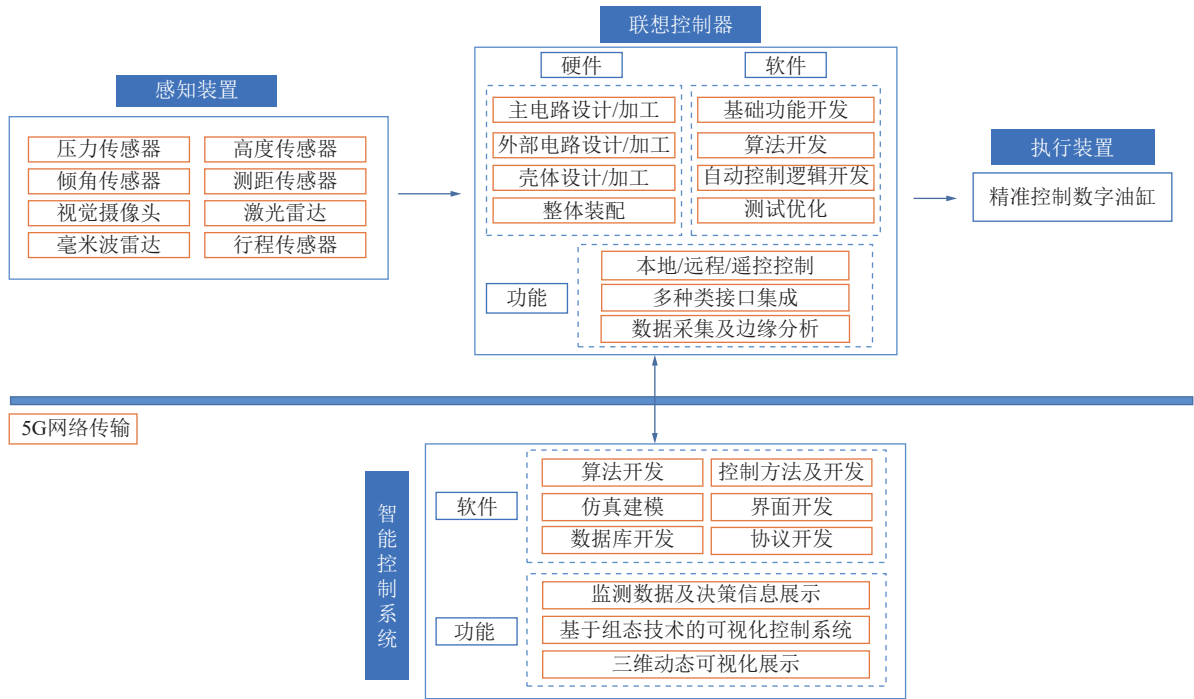


图 11 超前支架控制系统架构

Fig.11 Advanced support control system architecture

超前支架综合监控系统能够实现对超前支架的姿态、承载特性等实时监控,通过在柠条塔煤矿、黄陵一号煤矿等工作面开展应用,解决了复杂空间内超前液压支架自动控制问题,提高了装备适应巷道变形、动载矿压的能力,减少了顶板反复支撑而发生破坏的风险,大幅提升采煤作业中的围岩稳定性控制能力。

4 多煤层开采重复扰动下的地表生态治理修复技术

4.1 浅埋多煤层斜交叠置开采下地表动态移动特征和地表裂缝发育规律

浅埋多煤层矿井的高强度开采会导致地表在短时间内快速下沉,表现为“启动快、周期短、下沉大”的动态移动特征。具体来说,开采初期地表下沉启动迅速,短时间内形成明显的下沉现象;下沉周期较短,地表频繁出现沉降;下沉幅度大,地表形成较深的沉陷区域。同时,地表裂缝的发育呈现快速形成、多样化分布和动态变化的规律(图12)。裂缝在开采初期迅速出现并扩展,形态复杂,包括网状和条状等多种形式,并随着开采进程不断扩展和演变。这些特征和规律的研究,为多煤层开采中的地表沉降控制和裂缝防治提供了重要的理论依据和实践指导。

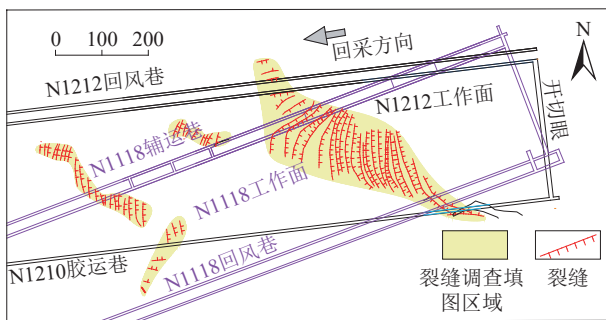


图12 多煤层开采地表裂缝发育规律图^[29-30]

Fig.12 Multi-seam mining surface crack development pattern diagram^[29-30]

4.2 黄土沟壑区地表下沉系数的确定方法

黄土沟壑区多煤层开采地表下沉系数的确定方法^[31]通过现场测量、定期观测、数据分析、模型建立和结果验证等步骤实现。在采矿区域内设立监测点,记录初始地表高度,并定期进行测量,积累高度变化数据。通过对比初始数据和定期数据,绘制地表下沉曲线,并结合地质条件和采矿参数,建立地表下沉数学模型,计算下沉系数并进行校准和验证。

采用无人机测定地表下沉量^[32],利用无人机搭载高精度传感器,根据研究区的地形地貌、范围、位

置和地面分辨率规划无人机飞行航线。无人机按照设定航线飞行并间隔航拍,采集研究区高分辨率影像和点云数据,生成三维地形模型。通过对比不同时期的地形模型,计算地表高度变化,生成下沉分布图,并通过对比分析和数据验证,确保结果的准确性。这种技术提供了高效、精准地动态监测地表下沉的方法,解决了多煤层开采地表移动变形监测和预测难题。

4.3 “土壤重构-原位充填-微地形改造”组合的采煤塌陷地治理关键技术

根据裂缝的深度、宽度和周围地质条件,在高阶地势区域设置剥挖区,裂缝位置为充填区,如图13所示。在充填区域内设计不同层次的土壤重构剖面,包括表土层、覆盖层、生土层、垫层。土壤重构剖面旨在恢复土壤结构并种植适宜的植被,以防止水土流失和进一步的地表塌陷。首先对原有的表层土壤进行重构,恢复其原有的结构和功能,确保其具备良好的透水性和稳定性;在覆盖层区域,使用施工废土和其他合适的填料,起到覆盖裂缝的作用,防止进一步的裂缝扩展;在生土层区域,使用填充材料(如砂石混合物)进行填充,确保裂缝的填充密实,防止2次塌陷。在垫层处,使用稳定性高的基底材料(如碎石、黏土等)进行填充,以提供稳定的基底支撑。

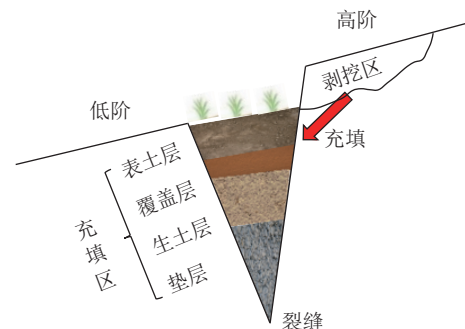


图13 土壤重构及裂缝分区治理^[33]

Fig.13 Soil reconstruction and crack partition management^[33]

“分段剥离-交错回填”的原位充填施工工艺通过分段剥离和交错回填的方式,对塌陷裂缝进行原位充填,如图14所示。先将裂缝两侧的土体进行分段剥离,逐段处理裂缝,防止大规模开挖导致的环境破坏,剥离后的裂缝区域进行分段回填,每段回填的土体相互交错,增加结构稳定性,防止裂缝再次出现。在施工过程中,实时监测填充材料的质量和压实效果。确保每层填充的密实度和稳定性,避免出现空隙或松散层。填充完成后,对地表进行微地形改造,恢复地表的自然形态。同时改造

过程中,注意保持地表排水和植被生长条件,防止水土流失。

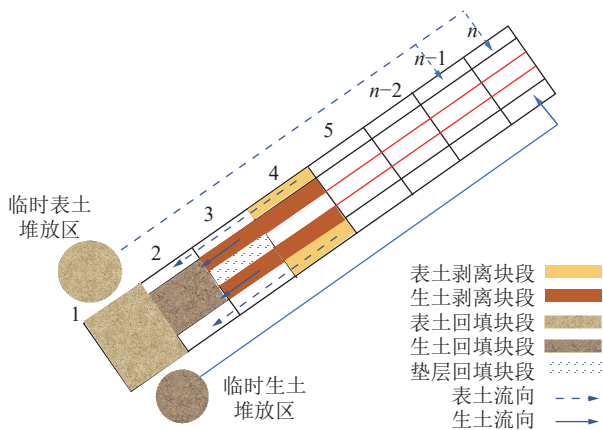


图 14 裂缝原位填埋工艺^[33]

Fig.14 In-situ crack filling process^[33]

微地形改造技术采用黄土沟壑采煤塌陷区小沟谷治理的“截流沟+植物篱+土谷坊”技术^[33-34]。截流沟:用于截流和引导雨水,防止雨水直接冲刷裂缝区域,减少水土流失。植物篱:在截流沟周围种植耐旱植被,增加地表稳定性,防止水土流失。土谷坊:利用土方工程,在裂缝区域构建小型土堤,进一步阻止雨水对裂缝的冲刷,形成稳定的微地形环境。

以上技术组合应用于张家峁、柠条塔、红柳林等 20 余个大型煤矿,治理塌陷地超过 6 000 hm²,生态修复区建设超过 1 000 hm²,实现了西部矿区多煤层智能、协调、绿色开采。

5 技术应用与效果

针对西部矿区多煤层赋存条件下的安全高效开采,通过分析多煤层开采覆岩运移及地表损害规律,提出以层间最小扰动为目标的多煤层交错分布协调开采方法,构建多煤层工作面岩层稳定控制技术体系,研发塌陷区裂缝“土壤重构-原位充填-微地形改造”组合的治理技术,形成西部矿井多煤层智能安全绿色开采核心技术体系。

5.1 多煤层协调开采及工作面岩层稳定控制技术应用实例

技术成果在陕西煤业化工集团有限责任公司的张家峁煤矿、柠条塔煤矿、小保当煤矿等煤矿开展了技术应用。这些煤矿是典型的陕北侏罗纪多煤层共存煤田,亟需多煤层协调开采模式,提升矿井生产效率和资源产出率。

小保当煤矿坐落于陕北侏罗纪煤田腹地的榆神矿区内,该矿区资源丰富,全区共探明可采煤层

5 层,煤层厚度覆盖广泛,包括薄煤层(最小厚度 0.55 m)、中厚煤层及厚煤层(最大厚度达 5.65 m)。这些煤层的煤体结构相对简单,煤质稳定,为高效开采提供了有利条件。通过创新性地应用“薄、中、厚”煤层交错分布协调开采技术,并研发配套了“薄、中、厚”多煤层开采成套技术装备(图 15),小保当煤矿成功实现了多煤层的安全、高效开采,有效节约了设备和工程投入成本,减少了井下作业人员的数量,从而进一步提升了开采效率和煤炭产量,其中煤炭开采效率相比传统方法提高了约 20%,资源采出率提升 12% 以上。

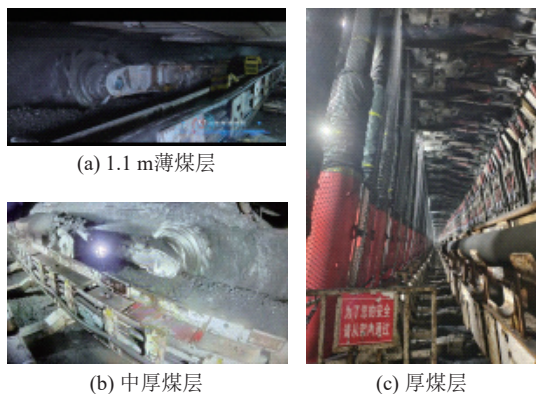


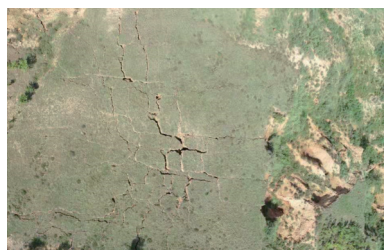
图 15 多煤层开采技术装备现场应用

Fig.15 Application of multi-seam mining technology and equipment

5.2 生态治理修复技术应用实例

柠条塔煤矿位于榆神府矿区中东部,井田分南、北两翼,北翼属典型的黄土沟壑地貌,地形起伏多变。北翼开采 1-2 煤层(采高约 2.0 m)和 2-2 煤层(采高约 4.0 m),两层煤采深均小于 200 m,属浅埋多煤层开采。北翼 1-2 和 2-2 煤层开采后地表裂缝叠加发育,且坡体裂缝诱发了滑坡、崩塌等次生灾害,地表生态遭到严重破坏。为探索黄土沟壑区多煤层开采生态修复和治理模式,提升煤矿区生态环境质量,采用上述提出的采煤塌陷地治理技术对柠条塔井田北翼浅埋多煤层开采塌陷地进行了治理,并规划建设了生态修复示范区,如图 16 所示。

基于柠条塔煤矿浅埋多煤层开采地面塌陷治理的成功,地表塌陷治理技术被逐步推广应用,累计治理采煤塌陷区 14 163.7 亩,土壤质量和生产力得到大幅提高,实现了矿区地表生态环境治理修复,进一步促进了植被复生,增加了植被覆盖面积,保障了物种数量和种群数量快速发展。生态脆弱区生态环境的快速治理恢复实现了西部生态脆弱区多煤层资源的绿色协调开采。



(a) 多煤层开采“网格状”裂缝及次生滑坡



(b) 多煤层开采地表塌陷治理技术应用

图 16 柠条塔煤矿地面塌陷特征及治理技术应用

Fig.16 Characteristics of ground collapse and application of control technology in Ningtiaota Coal Mine

6 结 论

1)揭示了西部多煤层高强度开采层间相互作用机理,构建了多煤层重复开采扰动定量判据与评价方法;形成了以层间最小扰动为目标的“薄、中、厚”煤层交错分布协调开采技术,解决了多煤层工作面开采时空布局、接续协调优化等难题。

2)建立了“围岩破断特征—层间采动影响—装备承载极限”的全覆岩结构破断模型;研发了反复重载冲击下的液压支架抗冲击结构和超前支护状态监测系统,解决了多煤层开采全覆岩大范围不均匀运动的围岩稳定性控制难题。

3)揭示了浅埋多煤层开采重复扰动下地表“启动快—周期短—下沉大”动态变形特征及地表裂缝发育规律;提出了地表下沉量的确定方法;研发了塌陷区裂缝“土壤重构—原位充填—微地形改造”组合的治理关键技术。解决了生态脆弱区多煤层开采塌陷地治理技术难题。

参考文献(References):

- [1] 王国法,杜毅博,徐亚军,等.中国煤炭开采技术及装备50年发展与创新实践——纪念《煤炭科学技术》创刊50周年[J].煤炭科学技术,2023,51(1):1-18.
WANG Guofa, DU Yibo, XU Yajun, *et al.* 50 Years of Development and innovation practice of coal mining technology and equipment in china—commemorating the 50th anniversary of the founding of “coal science and technology” [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 1-18.
- [2] 王国法,任怀伟,庞义辉,等.煤矿智能化(初级阶段)技术体系研究与工程进展[J].煤炭科学技术,2020,48(7):1-27.
WANG Guofa, REN Huaiwei, PANG Yihui, *et al.* Research and

engineering progress of coal mine intelligentization(primary stage) technical system [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 1-27.

- [3] WANG Guofa, XU Yongxiang, REN Huaiwei. Intelligent and ecological coal mining as well as clean utilization technology in China: review and prospects[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29: 161-169.
- [4] 王国法,徐亚军,张金虎,等.煤矿智能化开采新进展[J].煤炭科学技术,2021,49(1):1-10.
WANG Guofa, XU Yajun, ZHANG Jinhu, *et al.* New progress in intelligent coal mining [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 1-10.
- [5] 刘一龙,杨天鸿,马凯,等.沟谷区多煤层开采覆岩破坏及径流危害防治研究[J].煤炭科学技术,2023,51(7):243-254.
LIU Yilong, YANG Tianhong, MA Kai, *et al.* Research on overburden failure and runoff water hazard prevention in multi-seam mining in valley areas[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 243-254.
- [6] 阎跃观,朱元昊,戴华阳,等.多煤层时空协调开采模式与岩层控制机理[J].采矿与安全工程学报,2022,39(6):1143-1153.
YAN Yueguan, ZHU Yuanhao, DAI Huayang, *et al.* Spatio-temporal coordinated mining mode and rock strata control mechanism for multi-seam mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(6): 1143-1153.
- [7] 谷拴成,贺恒炜,黄荣宾.多煤层充填采煤矿压显现及支架适应性研究[J].西安科技大学学报,2021,41(6):979-987.
GU Shuancheng, HE Hengwei, HUANG Rongbin. Research on mine pressure manifestation and support adaptability in multi-seam filling mining[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(6): 979-987.
- [8] 任中华,寇建新,高建成,等.煤柱影响下远距离多煤层重叠开采覆岩运动规律[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2021,40(1):7-13.
REN Zhonghua, KOU Jianxin, GAO Jiancheng, *et al.* Overburden movement law of long-distance multi-seam overlapping mining under the influence of coal pillars[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science Edition), 2021, 40(1): 7-13.
- [9] 刘贵,汪义龙,高超,等.水库水体及坝体下多煤层开采可行性分析[J].煤炭科学技术,2020,48(10):185-191.
LIU Gui, WANG Yilong, GAO Chao, *et al.* Feasibility analysis of multi-seam mining under reservoir water bodies and dam bodies[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10): 185-191.
- [10] 张明媚,薛永安.多煤层重复开采地表下沉系数演变研究[J].煤炭工程,2024,56(2):152-156.
ZHANG Mingmei, XUE Yongan. Study on the evolution of surface subsidence coefficient in multi-seam repeated mining[J]. Coal Engineering, 2024, 56(2): 152-156.
- [11] 李友伟,张玉军,肖杰.多煤层重复采动覆岩破坏高度发育规律研究[J].煤炭工程,2022,54(7):97-103.
LI Youwei, ZHANG Yujun, XIAO Jie. Study on the development law of overburden failure height in multi-seam repeated mining[J]. Coal Engineering, 2022, 54(7): 97-103.
- [12] 马云祥.近浅埋煤层群开采地表移动变形规律及减损控制研究[D].西安:西安科技大学,2022.
MA Yunxiang. Study on surface movement and deformation law and damage control of near-shallow coal seam group mining [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2022.
- [13] 刘一龙,杨天鸿,叶强,等.山区多煤层重复采动下地表变形特

- 征[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(3): 507–516.
- LIU Yilong, YANG Tianhong, YE Qiang, *et al.* Characteristics of surface deformation under repeated multi-seam mining in mountainous areas[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2022, 39(3): 507–516.
- [14] 于斌. 多煤层上覆破断顶板群结构演化及其对下煤层开采的影响[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 261–266.
- YU Bin. Evolution of overlying broken roof group structure in multi-seam mining and its impact on lower seam extraction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(2): 261–266.
- [15] LI Yang, REN Yuqi, LI Tiezhen, *et al.* Calculation method and system of working resistance of support for coordinated mining of close-distance coal seam groups[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(7): 268–277.
- [16] 任怀伟, 杜毅博, 侯刚. 综采工作面液压支架-围岩自适应支护控制方法[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 150–155, 191.
- REN Huaiwei, DU Yibo, HOU Gang. Adaptive support control method of hydraulic support-roof rock in fully mechanized working face[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(1): 150–155, 191.
- [17] 陈秋计, 朱小雅, 侯恩科, 等. 矿区复垦林地生态修复无人机监测研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 192–197.
- CHEN Qiuji, ZHU Xiaoya, HOU Enke, *et al.* Study on UAV monitoring of ecological restoration of reclaimed forest land in mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(10): 192–197.
- [18] LI Yang, REN Yuqi, PENG SYD S, *et al.* Measurement of overburden failure zones in close-multiple coal seams mining[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(8): 43–50.
- [19] SUN Kui, FAN Limin, XIA Yucheng, *et al.* Impact of coal mining on groundwater of Luohe Formation in Binchang mining area[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2021, 8(1): 88–102.
- [20] 李杨, 王建鹏, 陈一鼎, 等. 多煤层开采中间岩层对覆岩移动的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4): 246–255.
- LI Yang, WANG Jianpeng, CHEN Yiding, *et al.* Study on the impact of intermediate rock layers on overburden movement in multi-seam mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(4): 246–255.
- [21] 李杨, 王楠, 雷兴海, 等. 一种基于下沉量的主关键层扰动影响综合评价方法[P]. 中国: CN202210530296.2, 2022.05. 16.
- LI Yang, WANG Nan, LEI Xinghai, *et al.* A comprehensive evaluation method for the disturbance effect of the main key rock layer based on subsidence [P]. China: CN202210530296.2, 2022.05. 16.
- [22] LI Yang, WANG Nan, SONG Yifei, *et al.* Quantitative criterion and applications for assessing the impact of coal seam mining on overlying strata[J]. *Mining Metallurgy & Exploration*, 2024, 41(2): 937–955.
- [23] 李杨, 雷明星, 郑庆学, 等. 近距离“薄-中-厚”交错分布煤层群上行协调开采定量判别研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(S2): 410–418.
- LI Yang, LEI Mingxing, ZHENG Qingxue, *et al.* Quantitative discrimination study on upward coordinated mining of close-distance “thin-medium-thick” staggered coal seam groups[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S2): 410–418.
- [24] LI Yang, WANG Jiachen, CHEN Yiding, *et al.* Overlying strata movement with ground penetrating radar detection in close-multiple coal seams mining[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2019, 15(8): 1550147719869852.
- [25] 王国法, 庞义辉, 李明忠, 等. 超大采高工作面液压支架与围岩耦合作用关系[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 518–526.
- WANG Guofa, PANG Yihui, LI Mingzhong, *et al.* Relationship between Hydraulic Support and Surrounding Rock in Ultra-Large Mining Height Working Faces[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(2): 518–526.
- [26] 周凯, 任怀伟, 华宏星, 等. 基于油缸压力的液压支架姿态及受载反演[J]. 煤矿开采, 2017, 22(5): 36–40.
- ZHOU Kai, REN Huaiwei, HUA Hongxing, *et al.* Inversion of hydraulic support posture and load based on cylinder pressure[J]. *Coal Mining Technology*, 2017, 22(5): 36–40.
- [27] 任怀伟, 韩哲, 呼少平, 等. 一种运输顺槽无反复支护控制系统[P]. 中国: CN202111327834. X, 2021.11.10.
- REN Huaiwei, HAN Zhe, HU Shaoping, *et al.* “A control system for transportation roadway without repetitive support” [P]. China: CN202111327834.
- [28] 马端志, 马英, 佟友, 等. 一种具有两级支撑功能的三伸缩立柱[P]. 中国: ZL201910196051.9, 2019.06. 25.
- MA Duanzhi, MA Ying, TONG You, *et al.* A three-telescopic pillar with two-stage support function [P]. China: ZL201910196051.9, 2019.06. 25.
- [29] 苗彦平, 谢晓深, 陈小绳, 等. 浅埋煤层开采地表裂缝发育规律及机理研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(4): 209–215.
- MIAO Yanping, XIE Xiaoshen, CHEN Xiaosheng, *et al.* Study on the development law and mechanism of surface cracks in shallow coal seam mining[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(4): 209–215.
- [30] 侯恩科, 从通, 谢晓深, 等. 基于颗粒流的浅埋双煤层斜交开采地表裂缝发育特征[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(1): 20–28.
- HOU Enke, CONG Tong, XIE Xiaoshen, *et al.* Development characteristics of surface cracks in oblique mining of shallow double coal seams based on particle flow[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2020, 2(1): 20–28.
- [31] 赵兵朝, 刘飞, 凡奋元, 等. 黄土沟壑区下斜交叠置开采地表下沉系数研究[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(5): 54–57.
- ZHAO Bingchao, LIU Fei, FAN Fenyuan, *et al.* Study on the surface subsidence coefficient of oblique overlapping mining in loess gully area[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2016, 43(5): 54–57.
- [32] 侯恩科, 首召贵, 徐友宁, 等. 无人机遥感技术在采煤地面塌陷监测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(6): 102–110.
- HOU Enke, SHOU Zhaogui, XU Youning, *et al.* Application of UAV remote sensing technology in monitoring coal mining ground subsidence[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(6): 102–110.
- [33] 侯恩科, 谢晓深, 冯栋, 等. 浅埋煤层开采地面塌陷裂缝规律及防治方法[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 30–40.
- HOU Enke, XIE Xiaoshen, FENG Dong, *et al.* Laws and prevention methods of ground subsidence cracks in shallow coal seam mining[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(12): 30–40.
- [34] 侯恩科, 黄庆享, 毕银丽, 等. 浅埋煤层开采地面塌陷及其防治[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- HOU Enke, HUANG Qingxiang, BI Yinli, *et al.* Ground subsidence and its prevention in shallow coal seam mining[M]. Beijing: Science Press, 2020.