



冲击地压煤层智能开采关键技术研究与实践

祁和刚 夏永学 智宝岩 秦子晗 程健 王凯 王书文 王宾昌 杨光宇

引用本文：

祁和刚, 夏永学, 智宝岩, 等. 冲击地压煤层智能开采关键技术研究与实践[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 112–124.
QI Hegang, XIA Yongxue, ZHI Baoyan. Engineering application and demonstration of intelligent mining control technology for rockburst coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 112–124.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2024-0859>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冲击地压矿井智能化防冲控采技术的思考

Thinking about intelligent technology of rockburst prevention and controlled mining in rockburst mine
煤炭科学技术. 2022, 50(1): 151–158 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f503f7d9-59e4-44fd-b799-727274e93ca0>

冲击地压煤层如何实现安全高效智能开采

How to realize safe–efficient–intelligent mining of rock burst coal seam
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 1–14 <https://doi.org/10.12438/est.2023-1656>

冲击地压智能化防治系统架构及关键技术

Structure and key technologies of intelligent prevention and control system of rock burst
煤炭科学技术. 2022, 50(8): 1–7 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e93c494b-dde5-4f4b-814f-dad7537b3f3c>

冲击地压巷道“卸-支”协同防控理念与实现路径

Idea and implementation of “stress relief–support reinforcement” cooperative control in rockburst roadway
煤炭科学技术. 2021, 49(4): 90–94 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.04.011>

薄煤层智能开采技术研究现状与进展

Current situation and development of intelligent mining technology for thin coal seams
煤炭科学技术. 2020, 48(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7aa9378c-a13b-499c-8c85-cedc4e865375>

井上下煤层顶板区域压裂防治冲击地压系统及应用

System and application of regional fracking of coal seam roof on and under the ground to prevent rockburst
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 106–115 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-0903>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

祁和刚, 夏永学, 智宝岩, 等. 冲击地压煤层智能开采关键技术研究与实践[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 112-124.
QI Hegang, XIA Yongxue, ZHI Baoyan, et al. Engineering application and demonstration of intelligent mining control technology for rockburst coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 112-124.



祁和刚, 男, 上海人, 教授级高工, 中国矿业大学兼职教授。曾任中国中煤能源集团有限公司总工程师, 中煤能源股份公司副总裁, 中煤能源技术研究总院院长, 中国煤炭学会副理事长。现任中国煤炭科工集团有限公司科学技术委员会顾问委员, 特聘专家, 清华大学互联网产业研究院顾问委员。主要成果: 主持和参与国家 863、科技支撑计划项目以及国家级科技项目 10 余项, 获得国家科技进步二等奖 1 项, 省部级科技进步奖 30 余项, 出版专著 3 部。研究方向: 长期从事采矿工程、技术研究和战略规划等工作。先后获得全国优秀科技工作者、孙越崎能源大奖、全国杰出工程师奖, 煤炭工业突出贡献专家、享受国务院政府特殊津贴。

冲击地压煤层智能开采关键技术研究与实践

祁和刚¹, 夏永学², 智宝岩³, 秦子晗², 程健⁴, 王凯⁵, 王书文⁶, 王宾昌³, 杨光宇²

(1. 煤炭科学研究院, 北京 100013; 2. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 3. 中煤陕西榆林大海则煤业有限公司, 陕西榆林 719000;

4. 煤炭科学研究院 矿山人工智能研究院, 北京 100013; 5. 北京天地玛珂电液控制系统有限公司, 北京 100013;

6. 中国中煤能源集团有限公司, 北京 100120)

摘要: 如何实现深部冲击地压煤层智能安全高效开采是煤炭开采面临的一项重大工程技术难题。该问题的核心内涵在于冲击地压煤层开采的智能化、无人化和本质安全化, 通过煤岩冲击风险的智能精准感知与预警, 以及采掘工程的自适应与自优化, 形成智能防冲控采技术, 实现由工程致灾向工程防灾、工程减灾的根本转变。通过开采源头设计、顶板区域压裂、局部靶向治理、强化巷道支护等措施为冲击地压煤层安全高效开采创造低应力环境和巷道安全空间。在此基础上, 开发融合静态地质、动态监测、工况环境、人员定位、生产组织、历史数据等信息的大数据分析软件平台, 以及融合冲击地压决策信息的智能化开采控制系统, 将防冲信息源转化为智能开采控制源, 形成了“低压快推, 中压慢采, 高压停产”的柔性智能推采新模式。通过现场应用表明, 在智能防冲控采区, 工作面及巷道矿压显现程度更小, 煤岩能量释放更稳定, 有利于冲击产能的合理释放。

关键词: 冲击地压; 智能控采; 区域卸压; 靶向防范; 风险感知

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)09-0112-13

Engineering application and demonstration of intelligent mining control technology for rockburst coal seam

QI Hegang¹, XIA Yongxue², ZHI Baoyan³, QIN Zihan², CHENG Jian⁴, WANG Kai⁵, WANG Shuwen⁶,
WANG Binchang³, YANG Guangyu²

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 3. China Coal Shaanxi Yulin
Dahaize Coal Industry Co., Ltd., Yulin 719000, China; 4. Research Institute of Mine Artificial Intelligence, Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013,
China; 5. Beijing Tiandi Marco Electric-hydraulic Control System Co., Ltd., Beijing 100013, China; 6. China National Coal Group
Corporation, Beijing 100120, China)

Abstract: How to achieve intelligent, safe and efficient mining of rockburst coal seams is a major engineering and technical challenge fa-

收稿日期: 2024-05-02 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.12438/cst.2024-0859

基金项目: 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项资助项目(2021-TD-ZD007); 国家自然科学基金面上资助项目(52174118)

作者简介: 祁和刚(1959—), 男, 上海人, 教授级高级工程师, 硕士。E-mail: qiheg@chinacoal.com

通讯作者: 夏永学(1980—), 男, 湖南郴州人, 研究员, 博士。E-mail: 14563277@qq.com

cing deep coal mining. The core connotation of this issue lies in the intelligent, unmanned, and inherently safe mining of coal seams with rockburst. Through accurate perception and intelligent early warning of coal and rock burst risks, as well as self-adaptation and self-optimization of mining engineering, intelligent anti-burst and mining control technologies are formed to achieve a fundamental shift from engineering-induced disasters to engineering-prevented and mitigated disasters. By implementing measures such as mining source design, roof area fracturing, localized targeted management, and strengthening roadway support, a low-stress environment and safe roadway space are created for the safe and efficient mining of coal seams with rock burst. On this basis, a big data analysis software platform that integrates static geological, dynamic monitoring, working conditions, personnel positioning, production organization, historical data and other information, as well as an intelligent mining control system that integrates impact pressure decision-making information, has been developed. The anti-impact information source has been transformed into an intelligent mining control source, forming a new flexible intelligent mining model of "low pressure fast pushing, medium pressure slow mining, and high pressure production stop". Field application shows that in the intelligent anti-impact and control mining area, the degree of mine pressure in working face and roadway is smaller, and the energy release of coal and rock is more stable, which is conducive to the reasonable release of impact mine production capacity.

Key words: rockburst; intelligent mining control; regional pressure relief; targeted prevention; risk perception

0 引言

2022年我国煤炭占一次能源消费比重达56%，煤炭作为我国能源安全的“压舱石”作用仍未改变。近年来，我国在煤炭智能化开采装备与技术上实现了许多关键技术突破，智能化水平显著提高，煤矿作业劳动力得到解放，生产效益和安全效益显著提高。2022年煤矿事故起数、死亡人数、煤矿百万吨死亡率比2012年分别下降75.8%、77.6%和86%，年人均工效则由750 t提高到1 800 t以上，增幅达240%。随着浅部煤炭资源日益枯竭，矿井开采深度以每年10~25 m的速度向深部延深，煤炭资源的深部开采势在必行。目前，我国埋深1 000 m以下的煤炭储量2.5万亿t，约占已探明总储量的53%，但深部矿井条件更为复杂，与之相伴的冲击地压灾害已成为制约我国煤炭资源安全高效开采的主要瓶颈^[1-2]。智能化代表先进生产力的重要发展方向，是我国煤炭工业实现高质量发展的核心技术支撑，也是实现“减人、防灾、提效”的必由之路，因此冲击地压煤层智能化开采的有效突破，将是破解我国煤矿深部开采与冲击地压矿井重大安全、技术与理论难题的有效途径，是确保我国能源安全的战略举措^[3]。

近年来，我国在冲击地压发生机理、预测预报与治理技术方面取得了许多重要的研究成果，冲击地压事故逐年下降，但现有研究尚停留在“救火救急”阶段，距离从根本上和源头上消除冲击灾害隐患、实现冲击地压的源头防治目标仍存在相当大的差距，尤其在风险量化、精准预警、高效防治及智能防冲等方面仍面临严峻挑战^[4]。存在主要问题如下：一是受制于井下采掘环境的不确定性和地质条件的复杂性，冲击地压风险预测往往采用定性或半定量化的方法，难以实现定量精准预测；冲击地压监测数据在精度和可靠性方面仍存在不足，多参数监测往往造成监测结果不一致，因此“致灾源找不准、预警效能不高”

的问题长期存在^[5]。二是冲击地压灾害防治方法传统落后，需要大量人员投入到巨大的卸压工程中，不仅效率低下，而且难以实现区域防控、精准控，同时危险区域施工人员生命安全也受到严重威胁，距离实现冲击地压矿井“智能化、无人化、本质安全化”的发展目标还存在巨大差距。同时局部卸压技术的防治效果难以评估量化也进一步加剧了矿井灾害治理难度和风险^[6]。三是煤矿冲击地压防治与智能化开采系统难以匹配。目前智能开采的综采设备群在装备结构适应性和控制灵活性方面尚无法实现对深部复杂环境的快速精准响应，智能决策系统难以同步感知冲击风险，智能开采装备系统无法实现智能卸压调控，使得防冲预警与智能开采系统相脱离^[7-8]。

综上可知，以当前的煤炭工业科技水平还难以支撑深部煤炭资源智能、安全、高效开采，要实现我国能源战略安全和国民经济的持续健康发展，必须在冲击地压煤层智能安全高效开采这一领域加速开展战略性、前瞻性研究^[9-10]。2023年中国科协组织年度重大科学问题、工程技术难题和产业技术问题征集活动，由笔者推荐的“如何实现冲击地压煤层智能安全高效开采”入选2023年我国十大产业技术问题。该问题的核心内涵在于冲击地压煤层开采的智能化、无人化和本质安全化，即通过冲击地压风险的智能精准感知与预警，以及井下采掘工程的自适应与自优化，形成智能防冲开采技术，实现工程致灾向工程防灾、工程减灾的转变，最大限度实现减冲、无冲，使大量煤炭资源从冲击风险产能转变为安全、先进产能。该问题的有效突破，将是破解我国深部矿井冲击地压防控技术难题的有效途径，对实现煤炭行业高质量发展将起到重大的推动作用。

1 冲击地压煤层智能安全开采技术路径

由于冲击地压存在灾害机理不清、难以精准预警、源头防治困难、智能化程度低等问题，因此冲击

地压煤层要实现智能安全高效开采,需要在工程地质、开采设计、区域卸压、监测监控、开采装备等方面进行系统思考和整体研究,形成矿井采掘工程源头防冲,过程减冲,系统无冲的防冲技术链、减灾工程链。同时应构建适用于矿井全生命周期的智能让压、卸压、低压开采的新理论与新技术,使冲击地压矿井由工程致灾转变为工程防灾、工程减灾,最大限度的实现防冲、减冲、无冲。实现冲击地压煤层智能安全高效开采的主要技术路径如图1所示。



图1 冲击地压煤层智能安全高效开采技术路径

Fig.1 Technical path for intelligent, safe, and efficient mining of rockburst coal seam

1)超前设计实现冲击地压源头防治^[1]。深部开采条件下,原岩应力增大,岩石破坏过程强化,加之采掘动态多变,应力叠加、巷道变形、采场失稳,冲击风险日益凸显。因此,制约冲击地压煤层开采的核心因素是高应力,而合理的开拓布置和开采布局对于避免应力集中和叠加、防止冲击地压关系极大,是实现冲击地压煤层智能安全高效开采的根本举措。制定开采设计要充分考虑冲击地压因素,防冲设计要与开采设计同时制定,并纳入到开采设计当中,而且这不是简单的累加组合,要求优先执行冲击地压的区域防治措施。在矿井设计阶段应优先采用降低区域应力的开拓布局、工作面开采顺序、巷道布置方式、煤柱留设等,尽量从源头上避免不利于冲击地压控制的局面出现。

2)区域卸压创造低应力开采环境^[12]。在合理开采设计的基础上,通过在冲击地压主控岩层中实施地面或井下定向长距离钻孔水力压裂破碎顶板岩体,减弱厚硬岩层的整体强度。首先破碎后的岩层可以起到塑性垫层的作用,使上覆岩层应力由“硬传递”转化为“软传递”,可从根本上降低冲击地压发生所需的基础静载荷,为冲击地压煤层开采创造低应力的安全开采环境;其二,在开采过程中,顶板能及时垮落,降低由顶板大面积断裂产生的附加动载荷。

理论和实践证明,采用区域压裂可显著降低压裂区域的整体应力水平和冲击地压发生风险,有望实现冲击地压煤层先压后建、先压后掘、先压后采,实现区域超前源头防冲。

3)冲击地压风险信息识别与预警^[13]。有效且精准的冲击地压预警体系是防治系统的重要组成部分。首先在监测布置上应考虑冲击地压不同载荷源在空间及尺度上分布差异,预警模式要做到分区、分源,同时监测设备应具备较高的监测精度。其次,冲击地压预警应考虑不同监测系统和采掘环境数据,综合得出预警结果,避免不同监测系统相互矛盾的情况。最后预警系统应能够实时查看各监测区域和当前班次的危险状态,具备海量数据的自动化、智能化处理功能。

4)基于冲击风险智能调控开采强度^[14]。开采强度和冲击风险关系密切,目前冲击地压煤层实行限速开采,避免因提高速度而增加冲击风险。但合理的推进速度应该和当前的冲击风险相匹配,因此冲击地压煤层智能开采不仅是装备的智能,而是融入冲击风险自感知的柔性智能。通过将防冲与智能开采技术相结合,将风险感知、防冲预警、精准响应、智能调控、优化开采相结合,能够根据开采过程中的冲击地压风险变化,主动对采掘系统进行调控,降低开采强度,进而避免冲击地压事故的发生。

5)局部冲击危险区精准解危^[15-16]。通过区域卸压技术和防冲控采技术,能够大幅降低采掘工作面的冲击危险,但在区域卸压盲区、局部构造区、上覆遗留煤柱区等仍有可能出现高应力集中,易诱发冲击地压。因此为进一步降低重点区域的应力集中和冲击风险,需要采取局部卸压解危措施。冲击地压解危措施首先应实现精准卸压,直接作用于应力集中区或顶板悬顶区,减少冗余工程量;同时应避免对危险区域支护结构的破坏,影响围岩抗冲击能力;另外解危措施还应满足远程、少人或无人化作业的要求。

6)巷道防冲支护^[17]。巷道支护是防治冲击地压发生的最后一道防线,提高巷道支护可以从2个方面入手,一是采用高强度、高延伸率、高预应力的锚杆(索)提高一次性主动支护效果,使巷道围岩支护区内形成预应力支护承载结构,防止支护区外岩层产生离层,同时改善巷道深部围岩的应力分布状态。二是采用吸能防冲液压支架进行加强支护,目前已经形成自移式、垛式、门式、单元式等形式的巷道吸能防冲支架,在高强度开采条件下,需要支架具备智

能化运移和自适应协同控制等功能。

综上分析,冲击地压煤层智能安全开采不同于当前常规的智能化开采技术,其不仅局限于生产运输等环节的智能化,而是涵盖设计、准备、生产、管理等多个环节。从技术实现路径来看,冲击地压煤层智能化开采要涉及到人工智能决策、环境智能感知、设备智能联动、风险智能预警、灾害精准治理、区域智能防控等多方面。

2 冲击地压煤层智能安全高效开采关键技术

目前,通过开采设计优化实现冲击地压源头防范已成为冲击地压矿井的普遍认识,而冲击地压的监测预警也是当前冲击地压防治智能化程度最高的一个环节,同时随着支护材料和装备水平的提升,采场及巷道支护强度也有了大幅加强。因此从前述技术路径分析来看,大范围区域卸压技术、高危险区精准解

危技术和开采强度智能调控技术将是当前冲击地压煤层智能安全高效开采的关键技术。

2.1 基于水力压裂的区域卸压技术

根据研究表明,矿井主采煤层上覆多层厚硬顶板是冲击启动的主要载荷源之一,一方面采空区厚层顶板大面积悬顶,悬臂弯曲压缩冲击危险煤层,使煤体内积聚大量静载荷;另一方面厚层顶板的大面积突然失稳破断,厚硬顶板中积聚的弯曲弹性能、压缩弹性能释放形成动载荷源,与静载荷叠加,当超过冲击临界载荷后将发生冲击启动。通过大范围区域压裂提前破坏开采区域煤层上覆致灾关键岩层的完整性,使压裂区域下方煤体应力降低,为煤层开采提供了区域大范围低应力作业环境,如图2所示。同时工作面回采期间在采动应力作用下压裂裂缝进一步扩张,弱化改性后的厚硬岩层难以形成大面积悬顶结构,避免造成区域应力集中^[18]。

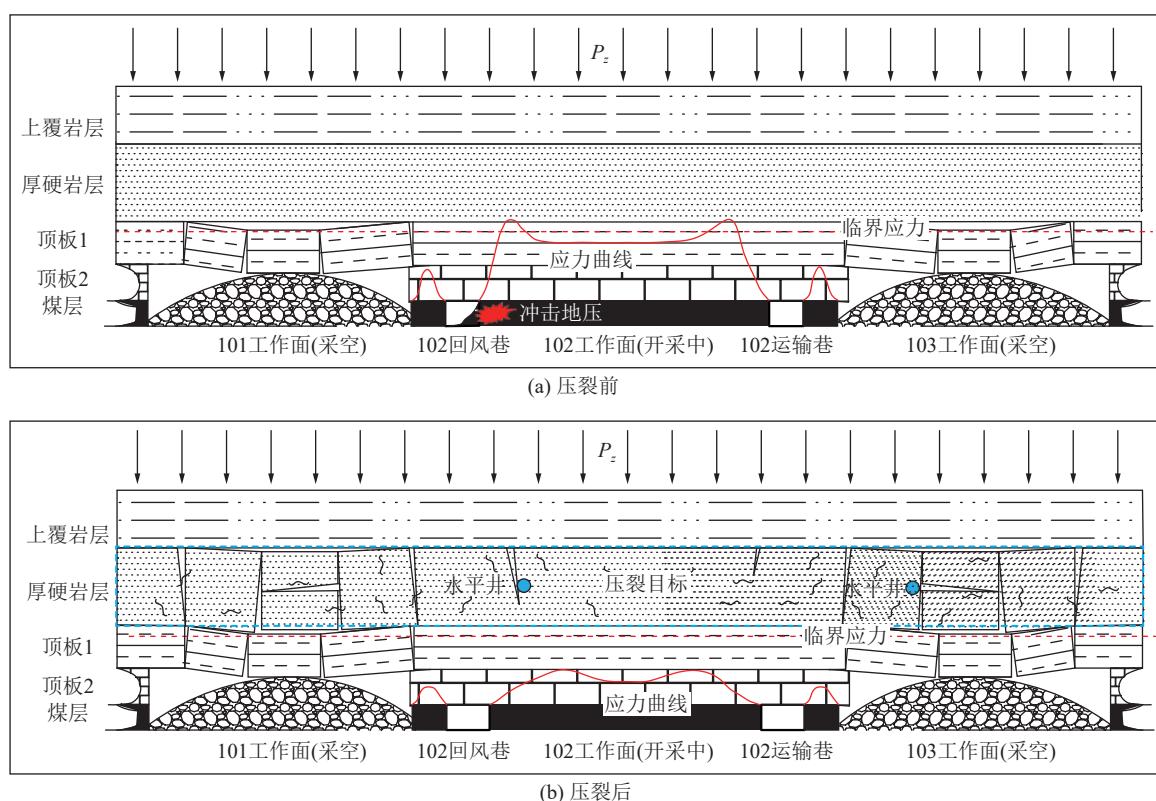


图2 区域压裂卸压防冲原理示意

Fig.2 Schematic diagram of regional fracturing, pressure relief, and anti-collision principle

岩层区域压裂包含地面体积压裂和井下超长孔水平压裂卸压防冲2种,如图3和图4所示。目前已形成了覆岩结构特征分析与冲击地压主控岩层判别、煤岩基础物理力学参数测试与压裂特性分析、顶板区域压裂卸压方案设计和参数优化调整、井上下区域水力压裂工程施工、地面与井下微地震联合水

力压裂全流程监测^[19]、冲击地压区域压裂卸压效果评价组成的“六位一体”成套技术体系,实现了冲击危险事件大幅减少甚至消除,工作面采掘应力环境、巷道变形显著改善,充分压裂区域动力现象根本性消除的效果(图5),属于一项区域、超前、源头卸压防冲技术,目前已在陕西、内蒙古、甘肃、新疆等地区推广应用。

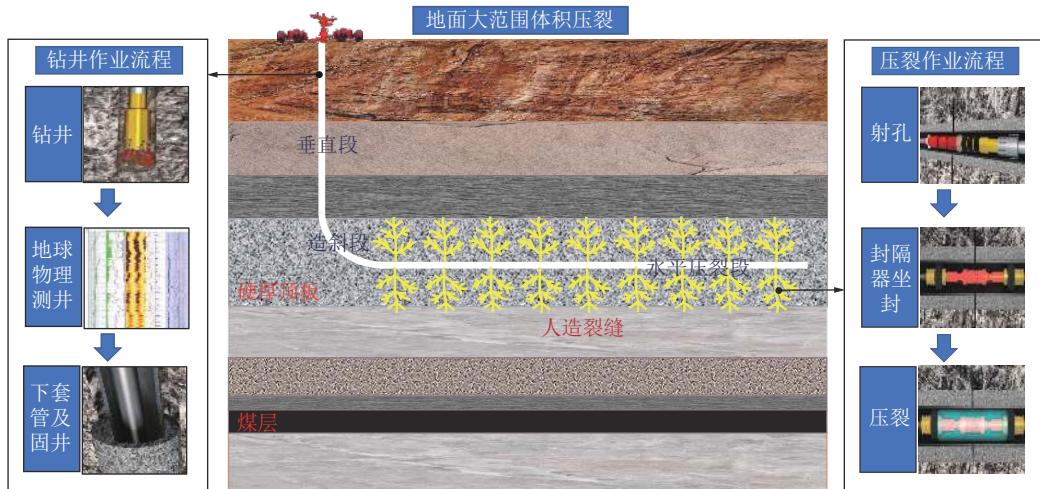


图3 地面区域压裂成套装备示意

Fig.3 Schematic diagram of the complete equipment for fracturing in ground area

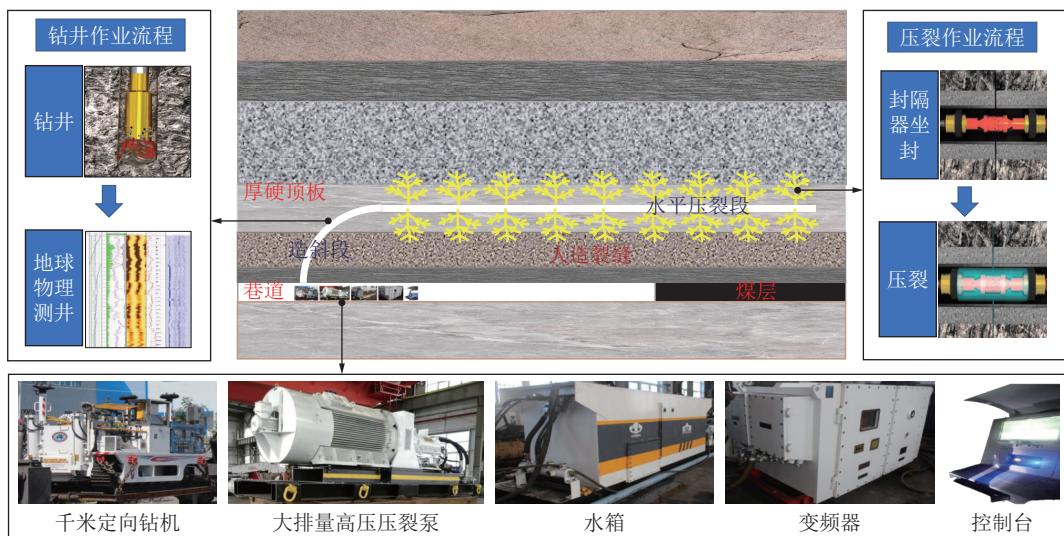


图4 井下区域压裂成套装备示意

Fig.4 Schematic diagram of complete equipment for fracturing in underground areas

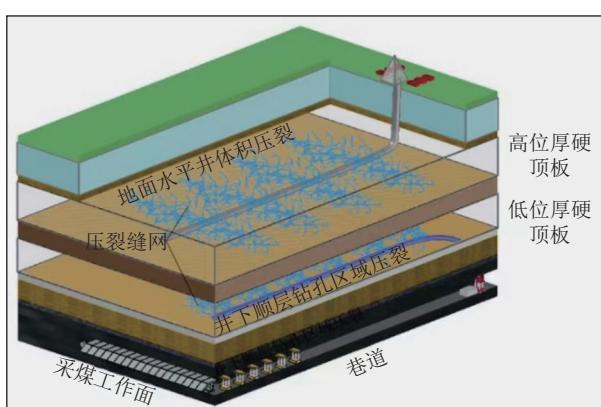


图5 区域压裂效果示意

Fig.5 Schematic diagram of regional fracturing effect

2.2 防冲开采智能控制关键技术

近年来,冲击地压在透明地质、优化设计、区域

卸压、监测预警、智能装备方面都取得较大突破,但采掘工程的诱冲机理与灾害工程环境效应未能根本突破,造成防冲设计与采掘工程相分离、防冲预警与智能开采不相融,难于满足主动卸压、设备联动、高效开采的要求。

2.2.1 智能防冲控采技术架构

要实现冲击地压煤层智能高效开采的目标,需要突破精准地质、风险感知、综合预警、智能调控、卸压开采等关键技术难题。通过构建融合静态地质、动态监测、工况环境、人员定位、生产组织、历史数据等信息的大数据分析模型,实现冲击地压风险的智能精准感知与预警,以及井下采掘工程的自适应与自优化,将防冲信息源转化为智能开采控制源,实现工程致灾向工程防灾、工程减

灾的转变,最大限度实现减冲、无冲,有助于将大量深部煤炭资源由冲击风险产能向安全产能、先

进产能内在基因的转变。智能防冲控采系统架构如图6所示。

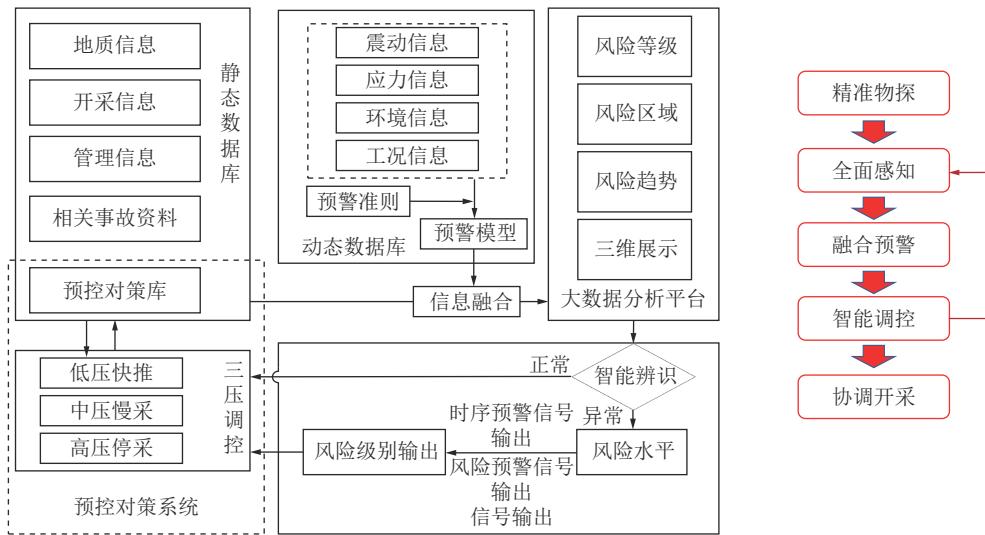


图 6 智能防冲控采的技术框架

Fig.6 Technical framework of intelligent anti-shock control mining

2.2.2 大数据融合分析

防冲智能控采的关键技术之一在于风险信息智能感知,包含静态信息和动态信息。静态信息主要有历史监测数据、地质条件和开采技术条件,动态信息主要包括各种监测系统实时获得的监测数据,包括微震、地音、煤体应力、电磁辐射、围岩变形、岩层位移、支护体受力、人员定位、支架工况、作业工序等。静态信息的风险评估采用改进综合指数法和震波CT探测相结合的方法^[20],提前确定工作面不同区域的静态风险区域及等级,动态信息的风险评估采用采用改进D-S证据理论等方法对多源监测数据进行融合分析与预警,确定冲击风险动态监测预警等级。

将静态信息和动态信息评估结果按图7进行综合,得到工作面当前的冲击风险状态,根据历史数据分析确定不同风险状态下工作面的合理推进速度,制定开采调控策略,动态调控工作面推进速度。

2.2.3 工作面设备协同控制

面向冲击地压工作面智能防冲管控要求,智能开采控制系统以“综采工作面采煤作业时无人进入采煤机、刮板输送机及液压支架联合作业区,实现无人化采煤”为目标,通过在地面控制中心部署智能无人采煤一体化控制平台和新型地面控制中心操作岛,建设“井上下万兆主干通信平台+两巷监控中心千兆网络交换平台+工作面有线、无线通信融合”的综采工作面通信控制网络平台,部署高集成度的多通道

视频摄像仪、采煤机机载音频监控装置。结合采煤工艺驱动引擎调控系统软件,实现工作面设备运行监控、参数在线设置、数据汇总、分析、故障提示预警及后台决策,配合深度融合综采开采工艺的采煤控制引擎,实现基于“1套采煤工艺、2道控制工序、3项控制参量”的采煤机、液压支架全自动化控制技术方法,实现采煤机、支架的上位机调度控制,从而指导采煤机、液压支架实现自动化作业。综采工作面智能开采控制系统拓扑如图8所示。

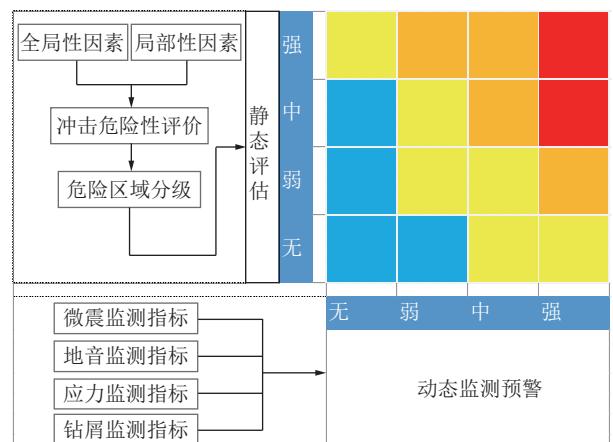


图 7 综合预警模型

Fig.7 Comprehensive early warning model diagram

智能控制系统将冲击地压大数据预警软件作为辅助决策支持层其中一环。冲击地压大数据预警软件将工作面冲击地压风险评估结果自动传输到智能开采控制系统。智能开采控制系统依据风险评估结

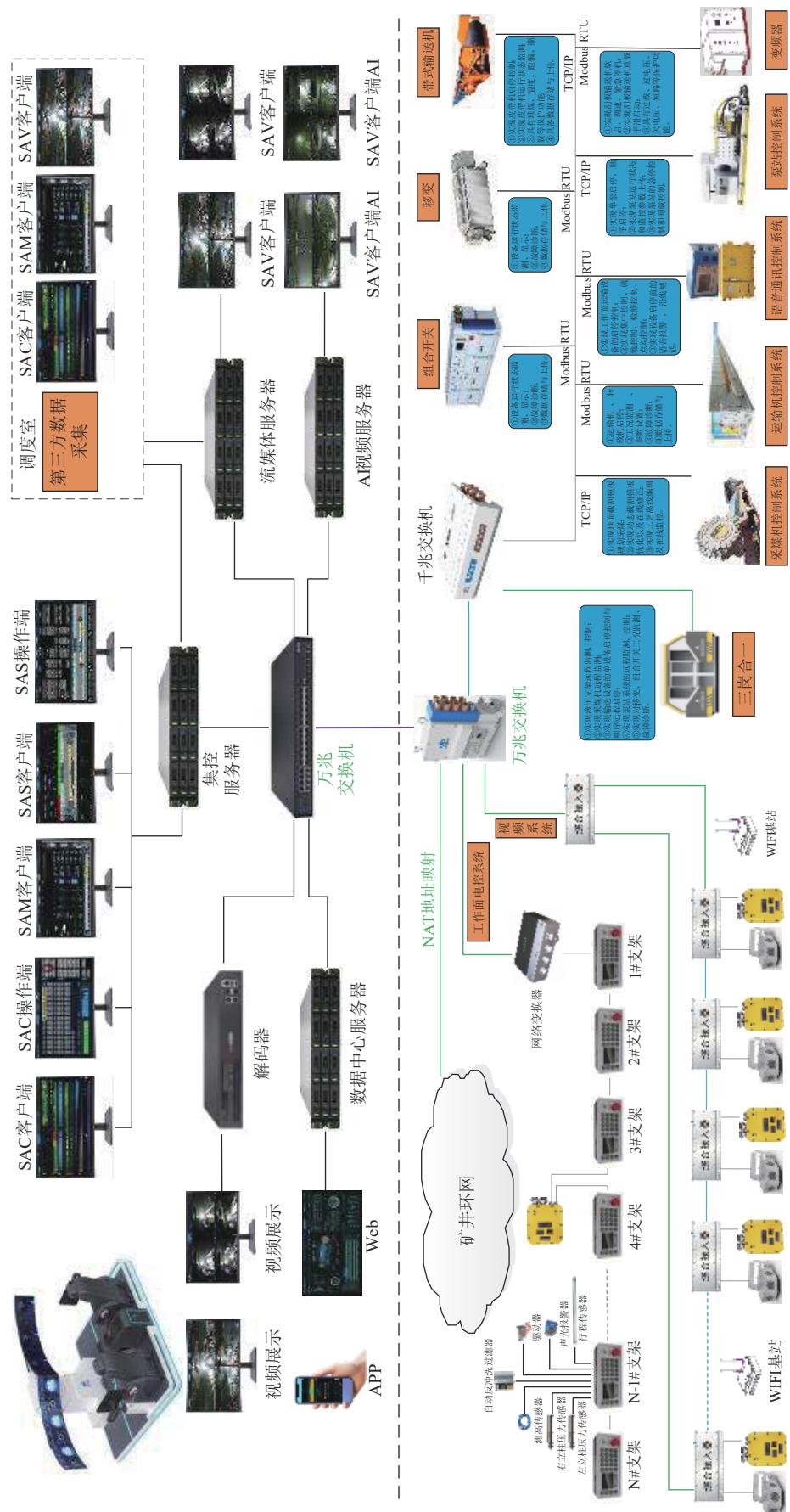


图 8 综采工作面的智能开采控制系统拓扑

Fig.8 Topology of intelligent mining control system for fully-mechanized mining face

果进行决策, 实现对采煤机制煤速度调控。

2.3 基于高压水射流的煤岩层精准卸压技术

目前应用最多的卸压手段是爆破卸压和煤层大直径孔。爆破卸压存在工程量大、工艺复杂、干扰生产、易产生有害气体、存在瞎爆、残爆和爆破诱发冲击等安全隐患。煤层大直径钻孔卸压空间小, 煤体应力在短时间内重新恢复, 需要进行重复卸压, 不仅工程量大, 而且极易破坏巷道支护结构, 降低巷道围岩的整体抗冲击能力, 易造成严重冲击显现。同时, 高危险区域的冲击地压频繁预警, 需要反复解危, 不仅影响工作面正常生产, 而且危险区域的卸压施工存在诱发冲击地压的隐患, 对作业人员的生命安全造成了严重威胁。

磨砂射流轴向切顶压裂技术和煤层水力旋切扩孔掏槽技术是用于冲击地压局部卸压的新技术, 具备安全高效、靶向精准和一次性卸压充分的显著优势(图9)。磨砂射流轴向切顶压裂技术, 通过在巷道顶板钻孔内实施预制轴向裂缝、定向水力压裂等工序, 使巷道走向和倾向方向上均形成最有利于顶板垮落的人造裂缝网, 达到精准卸压的目的。煤层水力旋切扩孔掏槽技术采用孔内水射流旋切技术, 使煤层钻孔高应力核区形成一个远大于钻孔直径的人造卸压空间, 通过卸压空间煤体的变形破坏释放压力, 形成侧向卸压保护带, 显著降低甚至消除冲击地压灾害隐患。上述技术已在陕西、新疆、内蒙古、甘肃等大量冲击地压矿区进行了成功应用。

3 现场应用

陕西某矿设计生产能力2 000万t/a, 目前主采2号煤层埋深在547.95~654.95 m(图10), 煤层厚度4.41~10.97 m, 平均厚度6.32 m, 采用一次采全高综采采煤工艺, 煤层上覆多层厚硬顶板, 开采过程中难以及时垮落。为了防治动压及冲击地压问题, 矿井开展了从建设到生产的系统防冲规划研究。

3.1 开采设计

秉持区域设计先行、局部治理跟进原则, 在矿井设计阶段充分考虑了冲击地压因素, 通过合理优化开采设计, 从设计源头上降低或消除冲击致灾隐患, 实现战略防冲。

1) 开拓开采布局上(图11)形成了采矿工程三区分离, 即: 分区开拓, 分区布置、分区开采。矿井同时打开2个独立采区, 每个采区双翼布置, 每翼首采工作面均位于采区中部, 从中部向两侧顺序开采。通过合理规划设计, 避免形成孤岛工作面开采, 同时, 矿井实现了采掘分离、协调开采, 降低了采掘相互影响, 避免采掘接续紧张对防冲工作带来的不利影响。

2) 加大工作面倾向长度。冲击地压主要发生在巷道, 研究表明, 工作面长度超过300 m后, 随着长度的增加, 侧向及超前支承压力变化并不明显, 而顶板破坏高度也趋于稳定。因此工作面长度增加一般不会直接造成冲击风险的增加。但工作面长度增加后能够更有效控制推进速度, 避免因提高速度而增加冲击风险。因此, 矿井工作面倾向长度均按300 m

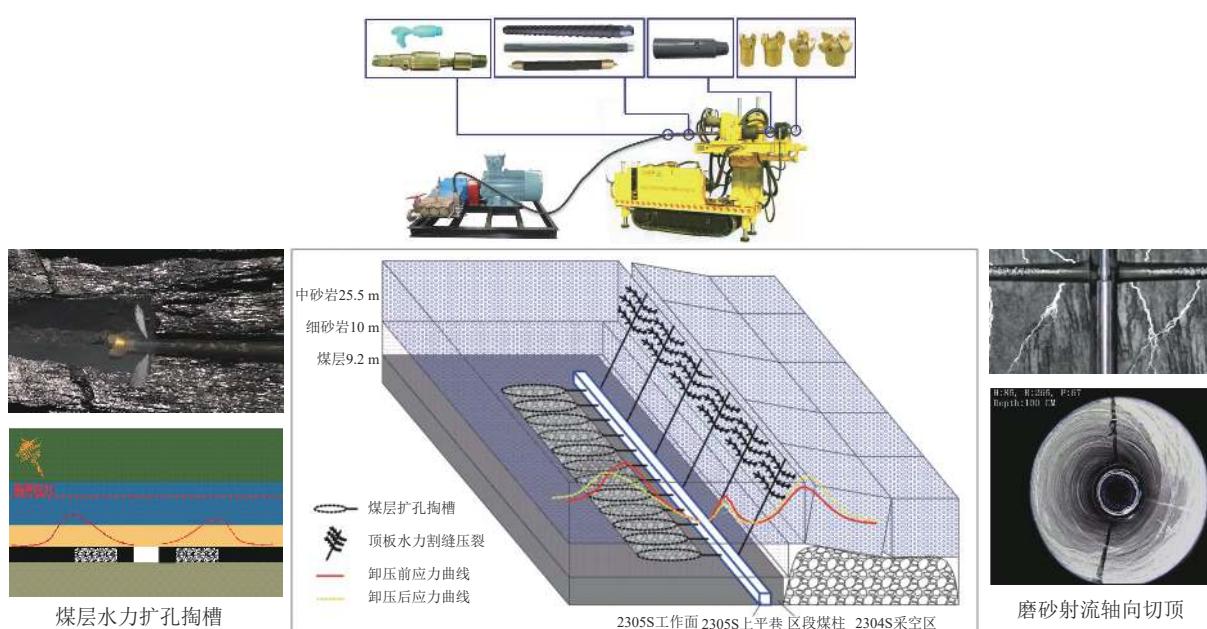


图9 局部靶向卸压工艺示意

Fig.9 Schematic diagram of local targeted pressure relief process

柱状	累深	层厚	岩性	岩性描述
	546.80	2.00	泥岩	灰绿色, 水平层理, 见滑动面, 岩芯以短柱状为主
	568.60	21.80	粉砂岩	灰绿色, 夹细粒砂岩薄层, 不显层理, 见滑动面, 岩芯以长柱状为主
	574.00	5.40	中粒砂岩	灰绿色, 浅灰白色, 成分以长石、石英为主, 分选性差, 棱角状, 大型交错层理, 含菱铁矿结核, 岩芯以长柱状为主
	606.73	32.73	粉砂岩	灰绿色, 夹多层细粒砂岩、砂质泥岩薄层, 不显层理, 见滑动面, 遇水及空气泥化, 呈碎块状, 与下伏地层过渡接触
	609.63	2.90	细粒砂岩	灰绿色, 成分以长石、石英为主, 分选性差, 块状层理菱铁矿结核
	619.01	9.38	中粒砂岩	灰绿色、灰白色, 成分以长石、石英为主, 分选性差, 棱角状, 块状层理, 含古泥粒、炭屑、菱铁矿结核, 与下伏地层明显接触
	628.86	9.85	砂质泥岩	灰绿、灰黑色, 水平层理, 含植物化石碎片, 遇水及空气崩解, 呈薄片状及碎块状, 与下伏地层明显接触
	629.86	1.00	细粒砂岩	灰白色, 成分以长石、石英为主, 分选性好, 小型交错层理, 炭屑
	645.94	16.08	粉砂岩	深灰色、灰黑色, 波状层理, 缓波状层理, 含植物化石碎片, 见滑动面, 遇水崩解, 呈碎块状
	652.72	6.78	2号煤	黑色, 条痕褐黑色, 断口阶梯状, 煤层结构单一
	663.46	10.74	粉砂岩	灰色, 夹细粒砂岩薄层, 波状层理, 小型交错层理, 含植物化石碎片, 见滑动面, 与下伏地层明显接触

图 10 矿井典型钻孔柱状
Fig.10 Typical borehole column of the mine

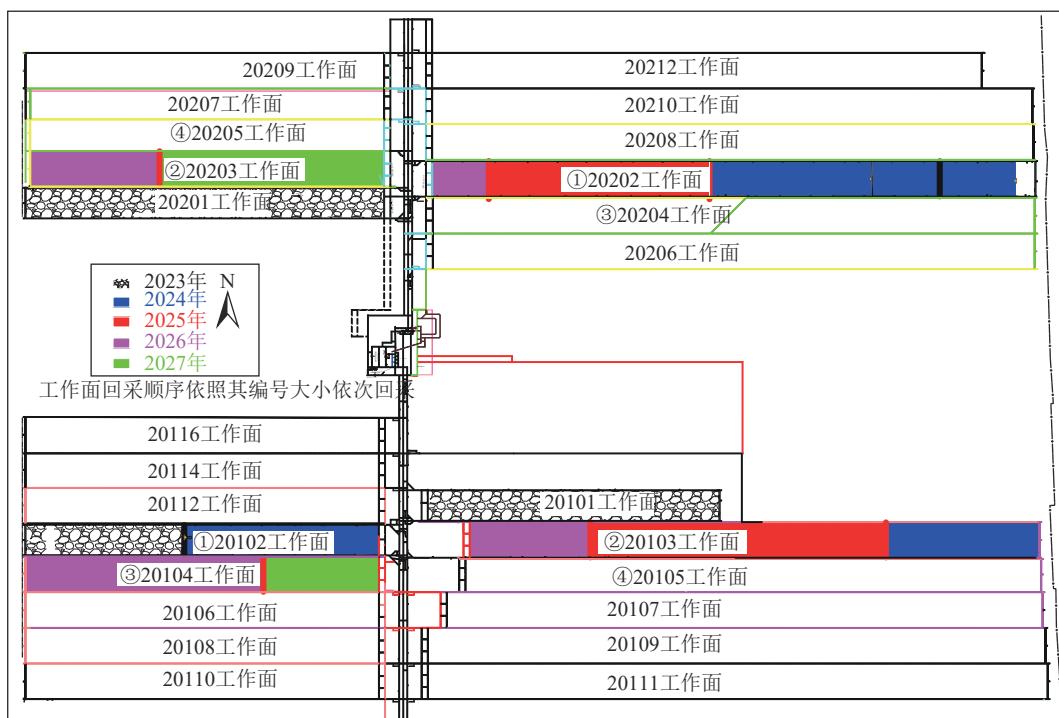
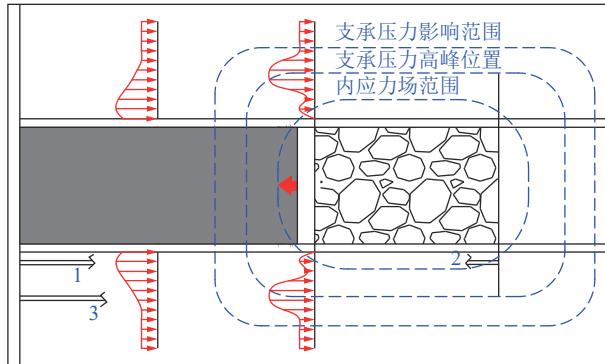


图 11 矿井初期开采布局
Fig.11 Initial mining layout of mine

以上设计。

3)合理煤柱尺寸。区段煤柱留设是冲击危险的

主要途径之一, 采空区边缘煤体存在高、低应力区 (图 12)。当临空巷道位于高应区时, 应力叠加程度



1—高应力区掘巷; 2—沿空掘巷; 3—宽煤柱掘巷

图 12 巷道位置与支承压力分布

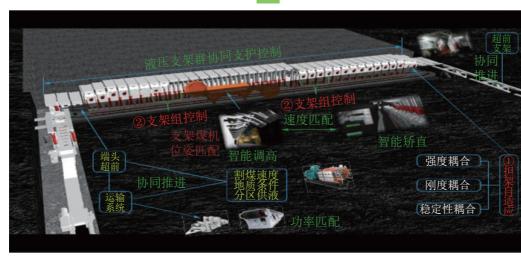
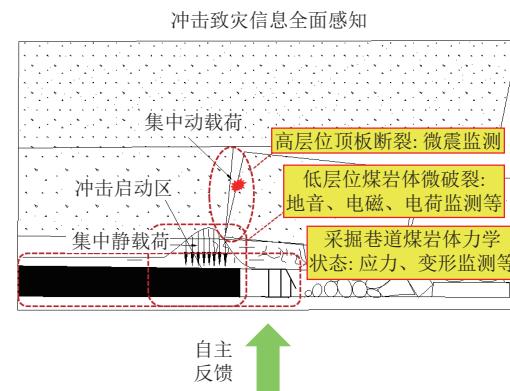
Fig.12 Location of roadway and distribution of bearing pressure

高, 煤柱内容易形成高应力弹性核, 在开采扰动下容易诱发煤柱失稳冲击。为此, 区段煤柱设计为 6 m, 使巷道布置在低应力区, 有利于减小巷道变形及冲击风险。

4) 大断面巷道沿底布置。该矿井采深大, 地压高, 易导致巷道整体变形, 因此设计采用大断面巷道并允许有较大的变形空间, 这对大型智能化装备的正常运行尤为必要, 在大变形条件下不仅能满足通风、行人、运输的要求, 不影响工作面正常推进, 同时也有利于降低巷道维修量, 减小甚至杜绝因巷道维修导致的冲击地压事故。

3.2 井上下协同顶板区域压裂

由前述可知, 矿井主采煤层上覆多层坚硬顶板,



智能防冲开采

针对上覆中高位顶板设计并实施了地面区域水力压裂工程(图 13), 通过地面大范围区域压裂提前破坏开采区域煤层上覆目标顶板的完整性, 避免形成高位岩层大空间结构造成的区域应力集中。针对低位基本顶, 在井下采用磨砂射流轴向切顶技术进行定向精准切顶, 使采空区顶板垮落更充分, 来压步距缩短。通过井上下联合针对煤层上方低、中、高位顶板的有效处理, 显著降低了工作面大面积悬顶导致的基础静载荷和附加动载荷, 消除冲击启动的力源基础。

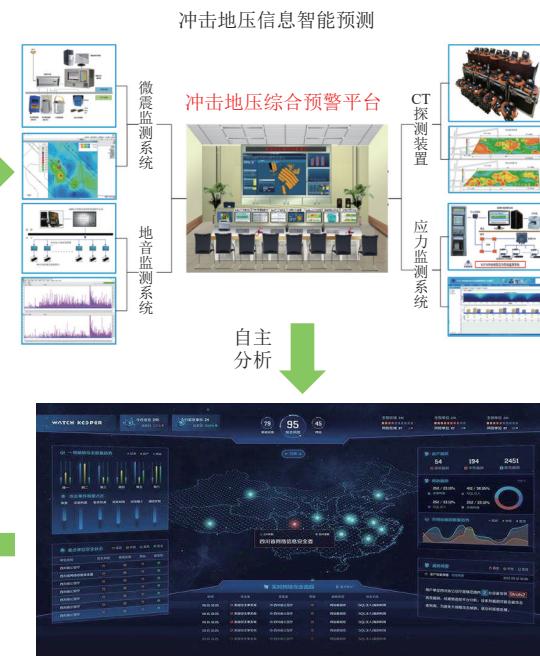
3.3 智能防冲控采体系建设

将防冲预警与智能开采技术相结合, 矿井实现了风险感知、防冲预警、精准响应、智能调控、优化开采的有机结合, 构建形成了智能防冲控采技术体系, 如图 14 所示。



图 13 井上下顶板区域压裂防冲示意

Fig.13 Schematic diagram of fracturing and anti-scouring in roof area above and below the well



冲击地压大数据智能分析

Fig.14 Schematic diagram of intelligent anti-scouring and control mining technology route

3.3.1 开发大数据分析系统

在系统研究矿井地质历史、煤层赋存、开采布局等静态信息,以及监测数据、环境空间、设备工况等动态信息与冲击地压相关性基础上,建立了冲击地压风险评价指标体系;形成了冲击地压多源信息数据库(图15),通过对多源信息的系统分析及有机融合,建立了冲击地压多源综合预警模型。在此基础上进行软件集成,开发形成了煤矿冲击地压智能防控大数据分析系统。



图 15 大数据平台实时监测界面

Fig.15 Real-time monitoring interface of big data platform

3.3.2 防冲智能开采控制系统

在冲击地压多源信息识别与大数据融合分析的基础上,开发了融合冲击风险信息的智能化开采控制系统(图16),主要包括智能采煤机控制系统、智能刮板输送机控制系统、自适应液压支架控制系统、智能供液系统、智能供电系统等,系统通过冲击地压大数据分析平台给出的风险状态信息,结合工作面矿压数据以及当前综采工作面采煤设备群的运行数据,给出工作面采煤工艺优化调整的决策方案并下发指令给对应的智能化控制子系统。当工作面预警结果为无或弱冲击风险时,工作面按照设定速度正常推采,当预警结果为中等冲击风险时,工作面在当前推

采速度基础上自主下调,当工作面预警为强冲击风险时,工作面停止推进等待危险解除,实现了综采工作面低压快采、中压慢采和高压停采的自控开采模式。



图 16 冲击地压智能控采地面监控中心

Fig.16 Intelligent control and mining ground monitoring center for impact ground pressure

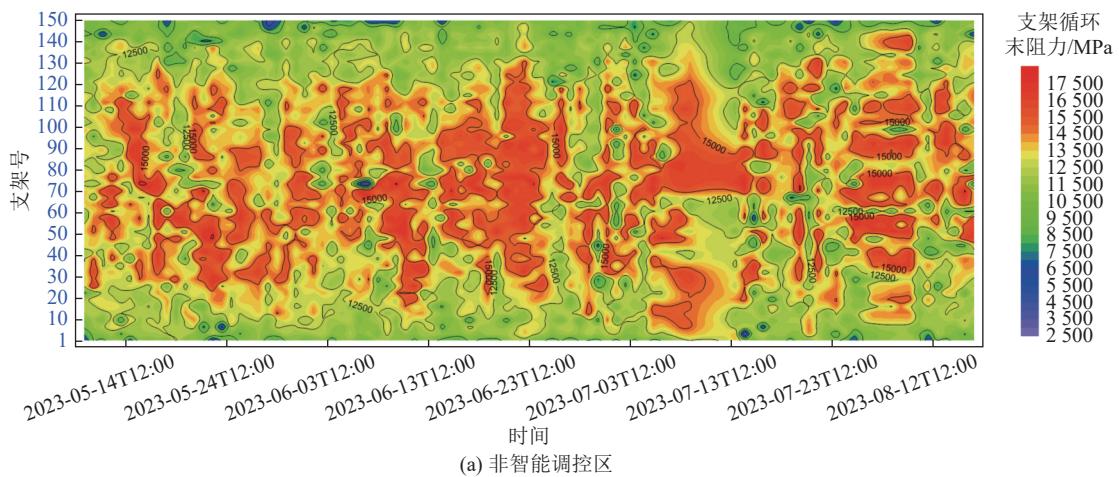
3.4 应用效果分析

为了验证智能控采技术的应用效果,将20201综采工作面沿走向划分5个区段,包含2个智能控采区和3个非智能控采区。

1)工作面压力显现。对比图17可见,智能调控区支架整体受力更均衡,来压布局略低且离散性更小,来压强度低、动载系数小;同时工作面片帮显现相对更少,压力显现更稳定。

2)能量释放情况(图18),智能调控区平均日推进度8.1 m/d,非智能调控区平均日推进度7.7 m/d,整体推进更快且更均衡;同时,在智能调控区每米微震频次略多,但能量释放更小,大能量事件发生概率更低,表明采用智能控采技术更有利于工作面能量的均衡稳定释放,对防冲和高效开采有利。

3)效益分析。通过采用智能防冲控采技术,工作面动压显现情况得到了显著改善,大幅减少了针



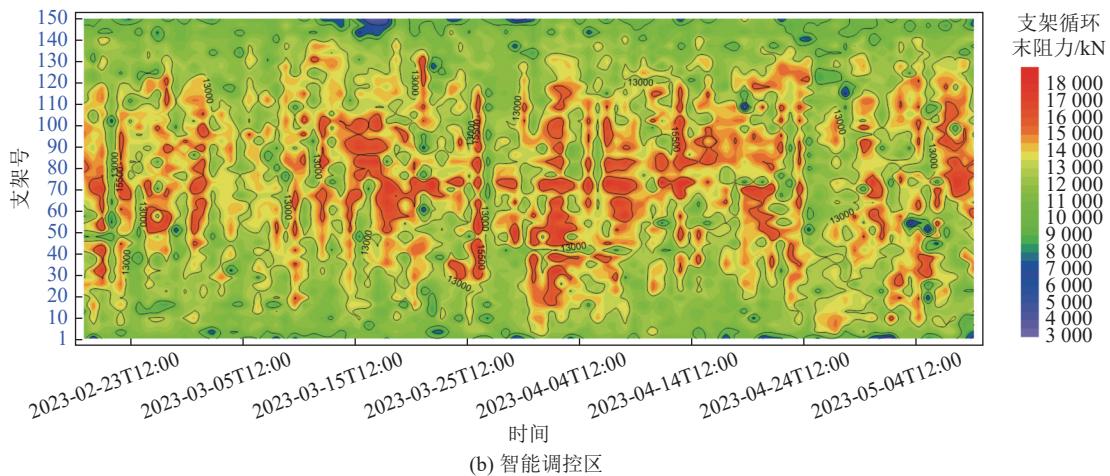
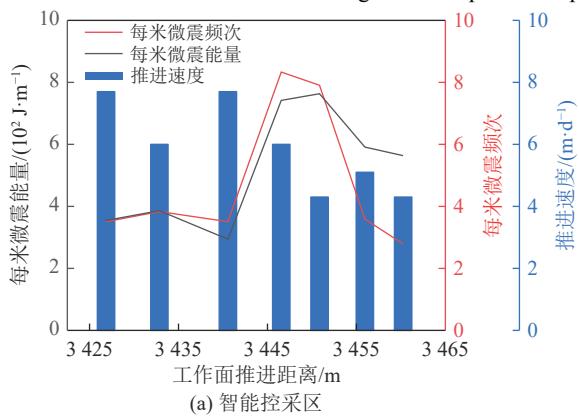


图 17 工作面压力显现情况对比

Fig.17 Comparison of pressure manifestation on working face



(a) 智能控采区

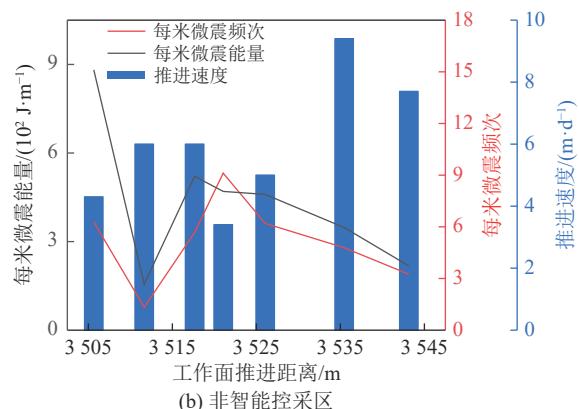


图 18 微震监测情况对比

Fig.18 Comparison of microseismic monitoring

对巷道变形的维护和卸压工程量,当年节约资金2 000余万元,同时相对传统防治技术,工作面每年可增加产量近100万t,利润增加近亿元。

4 结论与建议

4.1 主要结论

1)冲击地压矿井的智能化开采面挑战。随着矿井开采深度的增加,冲击地压灾害成为制约安全高效开采的主要问题,现有冲击地压煤层的智能化开

采进程仍相对滞后,无法实现对深部复杂环境的智能卸压调控。

2)提出了冲击地压煤层智能化开采技术路径。要实现冲击地压煤层智能化安全高效开采,需要从源头防治设计、区域大范围卸压、风险信息识别与预警、开采强度智能调控、局部精准解危和巷道防冲支护等方面进行系统思考和整体研究。

3)确定了冲击地压煤层智能化开采所需关键技术。实现冲击地压煤层智能安全高效开采的关键在于技术创新,包括基于水力压裂的区域卸压技术、防冲开采智能控制关键技术(包括智能防冲控采技术、大数据融合分析、工作面设备协同控制)以及基于高压水射流的煤岩层精准卸压技术。

4)开展了冲击地压煤层智能开采的现场实践。针对试验矿井开展了源头防冲设计、实施了顶板区域压裂、构建了智能防冲控采体系,有效降低了矿井冲击地压风险,实现了安全高效开采。

4.2 建议

实现冲击地压煤层智能安全高效开采是一项长期化的系统性工程,涉及国家政策、人才培养、科技创新等方方面面。

1)加强深部冲击地压灾害治理基础理论、关键技术与成套智能装备研究,增强科技储备和原始创新能力,实现煤炭开采颠覆性工艺与技术革新。

2)建立冲击地压煤层智能安全高效开采人才培养机制,联合高校、科研院所、煤矿企业实施相关人才知识更新工程。

3)鼓励煤矿企业探索实现超千米深井煤炭安全高效开采和冲击地压矿井产能提升的可能性,形成若干典型冲击地压示范矿井,进一步解放受冲击地压等灾害影响的深部煤炭资源。

参考文献(References):

[1] 潘一山,肖永惠,罗浩,等.冲击地压矿井安全性研究[J].煤炭学报,2023,48(5):1846-1860.
PAN Yishan, XIAO Yonghui, LUO Hao, et al. Study on safety of rockburst mine[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1846-1860.

[2] 齐庆新,潘一山,李海涛,等.煤矿深部开采煤岩动力灾害防控理论基础与关键技术[J].煤炭学报,2020,45(5):1567-1584.
QI Qingxin, PAN Yishan, LI Haitao, et al. Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1567-1584.

[3] 王国法,潘一山,赵善坤,等.冲击地压煤层如何实现安全高效智能开采[J].煤炭科学技术,2024,52(1):1-14.
WANG Guofa, PAN Yishan, ZHAO Shunkun, et al. How to realize safe-efficient-intelligent mining of rock burst coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 1-14.

[4] 潘俊锋,夏永学,王书文,等.我国深部冲击地压防控工程技术难题及发展方向[J].煤炭学报,2024,49(3):1291-1302.
PAN Junfeng, XIA Yongxue, WANG Shuwen, et al. Technical difficulties and emerging development directions of deep rock burst prevention in China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1291-1302.

[5] 窦林名,田鑫元,曹安业,等.我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J].煤炭学报,2022,47(1):152-171.
DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al. Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152-171.

[6] 秦子晗,李伟东,冯美华,等.冲击地压智能化防治系统架构及关键技术[J].煤炭科学技术,2022,50(8):1-7.
QIN Zihan, LI Weidong, FENG Meihua, et al. Structure and key technologies of intelligent prevention and control system of rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 1-7.

[7] 姜福兴,张翔,朱斯陶.煤矿冲击地压防治体系中的关键问题探讨[J].煤炭科学技术,2023,51(1):203-213.
JIANG Fuxing, ZHANG Xiang, ZHU Sitao. Discussion on key problems in prevention and control system of coal mine rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 203-213.

[8] 张俊文,宋治祥,刘金亮,等.煤矿深部开采冲击地压灾害结构调控技术架构[J].煤炭科学技术,2022,50(2):27-36.
ZHANG Junwen, SONG Zhixiang, LIU Jinliang, et al. Architecture of structural regulation technology for rock burst disaster in deep mining of coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 27-36.

[9] 潘一山,肖永惠,李忠华,等.冲击地压矿井巷道支护理论研究及应用[J].煤炭学报,2014,39(2):222-228.
PAN Yishan, XIAO Yonghui, LI Zhonghua, et al. Study of tunnel support theory of rockburst in coal mine and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 222-228.

[10] 祁和刚,马世志,郑忠友,等.井工煤矿技术变革研究与中煤集团具体实践[J].中国煤炭,2023,49(5):80-86.
QI Hegang, MA Shizhi, ZHENG Zhongyou, et al. Research on the technological transformation of underground coal mine and concrete practice of China National Coal Group[J]. China Coal, 2023, 49(5): 80-86.

[11] 姜耀东,赵毅鑫.我国煤矿冲击地压的研究现状:机制、预警与控制[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2188-2204.
JIANG Yaodong, ZHAO Yixin. State of the art: investigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2188-2204.

[12] 潘俊锋,康红普,闫耀东,等.顶板“人造解放层”防治冲击地压方法、机理及应用[J].煤炭学报,2023,48(2):636-648.
PAN Junfeng, KANG Hongpu, YAN Yaodong, et al. The method, mechanism and application of preventing rock burst by artificial liberation layer of roof[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 636-648.

[13] 潘俊锋,冯美华,卢振龙,等.煤矿冲击地压综合监测预警平台研究及应用[J].煤炭科学技术,2021,49(6):32-41.
PAN Junfeng, FENG Meihua, LU Zhenlong, et al. Research and application of comprehensive monitoring and early warning platform for coal mine rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 32-41.

[14] 祁和刚,夏永学,陆闯,等.冲击地压矿井智能化防控采技术的思考[J].煤炭科学技术,2022,50(1):151-158.
QI Hegang, XIA Yongxue, LU Chuang, et al. Thinking about intelligent technology of rockburst prevention and controlled mining in rockburst mine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 151-158.

[15] 夏永学,张晨阳,杜涛涛,等.磨砂射流轴向切顶压裂工艺研发及应用[J].煤炭学报,2024,49(S1):36-44.
XIA Yongxue, ZHANG Chenyang, DU Taotao, et al. Process research and application of axial roof cutting technology of abrasive jet and fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S1): 36-44.

[16] 夏永学,鞠文君,苏士杰,等.冲击地压煤层水力扩孔掏槽防冲试验研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2020,2(1):84-91.
XIA Yongxue, JU Wenjun, SU Shijie, et al. Experimental study on hydraulic reaming of gutters in coal seam with impact pressure[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(1): 84-91.

[17] 康红普,王国法,姜鹏飞,等.煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J].煤炭学报,2018,43(7):1789-1800.
KANG Hongpu, WANG Guofa, JIANG Pengfei, et al. Conception for strata control and intelligent mining technology in deep coal mines with depth more than 1000m[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1789-1800.

[18] 康红普,冯彦军,赵凯凯.煤矿岩层压裂技术与装备的发展方向[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,6(1):5-8.
KANG Hongpu, FENG Yanjun, ZHAO Kaikai. Development trends in hydraulic fracturing technology and equipment for strata control in underground coal mines[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(1): 5-8.

[19] 夏永学,潘俊锋,谢非,等.井下超长水平孔分段压裂防冲机理及效果[J].煤炭学报,2022,47(S1):115-124.
XIA Yongxue, PAN Junfeng, XIE Fei, et al. Anti-scour mechanism and effect of segmented fracturing in ultra-long horizontal hole underground[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(S1): 115-124.

[20] 夏永学,冯美华,王书文,等.基于理论和现场探测相结合的冲击危险性评价方法[J].采矿与岩层控制工程学报,2021,3(4):112-119.
XIA Yongxue, FENG Meihua, WANG Shuwen, et al. Risk assessment method of rock burst based on the combination of theory and field detection[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(4): 112-119.