



冲击地压数字化源头防控体系架构

王旭东 郑建伟 李海涛 齐庆新 董俊亮 吕谋 张良 刘义勤 张海宽 薛珊珊 刘化广 杜伟升 郭富城

引用本文:

王旭东, 郑建伟, 李海涛, 等. 冲击地压数字化源头防控体系架构[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(9): 41–52.

WANG Xudong, ZHENG Jianwei, LI Haitao. Architecture research of digitalized source governance system for rock burst prevention: A case study of Xinjie Taigemiao Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(9): 41–52.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0821>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤炭开采等地下工程问题的数字岩石力学解决方案

Digital rock mechanics solutions for underground engineering problems such as coal mining

煤炭科学技术. 2024, 52(9): 150–161 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0852>

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.enki.cst.2021.04.011>

煤矿动力灾害广义“三因素”机理探讨

Discussion on generalized “Three Factors” mechanism of coal mine dynamic disaster

煤炭科学技术. 2021, 49(6): 42–52 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/458ba319-e64e-468e-9855-1beb97f89735>

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-dad7537b3f3e>

冲击地压煤层智能开采关键技术研究与实践

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

煤炭科学技术. 2024, 52(9): 112–124 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0859>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

“煤岩动力灾害防治理论与技术”专题



移动扫码阅读

王旭东, 郑建伟, 李海涛, 等. 冲击地压数字化源头防控体系架构: 以新街台格庙矿区为例[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(9): 41-52.

WANG Xudong, ZHENG Jianwei, LI Haitao, *et al.* Architecture research of digitalized source governance system for rock burst prevention: A case study of Xinjie Taigemiao Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(9): 41-52.

冲击地压数字化源头防控体系架构

——以新街台格庙矿区为例

王旭东¹, 郑建伟^{2,3,4}, 李海涛^{2,3,4}, 齐庆新^{2,3,4}, 董俊亮¹, 吕 谋¹, 张 良^{2,3,4}, 刘义勤^{2,3,4},
张海宽^{2,3,4}, 薛珊珊^{2,3,4}, 刘化广², 杜伟升^{2,3,4}, 郭富城^{2,3,4}

(1. 神华新街能源有限责任公司, 内蒙古鄂尔多斯 017200; 2. 煤炭科学研究总院有限公司 深部开采与冲击地压防治研究院, 北京 100013;
3. 煤炭智能开采与岩层控制国家重点实验室, 北京 100013; 4. 天地科技股份有限公司 北京技术研究分公司, 北京 100013)

摘要: 新街台格庙矿区周边均为典型冲击地压矿井, 按照工程类比的原则基本上可以确定, 未来冲击地压会对本矿区的安全高效开采产生显著的影响。得益于本矿区正处于建设窗口期, 可以基于“数字岩石力学+源头防控”的理念, 构建出“面向源头、兼容差异、自主适应”的冲击地压数字化源头防控体系, 以此最大限度地为安全、绿色、高效生产提供保障。对比周边矿井现状, 分析台格庙矿区潜在冲击主控因素, 基于数字岩石力学建立台格庙矿区冲击地压数字化源头防控体系架构。通过矿井原生全要素的数字化, 构建新街台格庙矿区“物理级透明”的模型, 为矿井智能化建设提供更为全面的数据底座; 借助能够还原真实工程行为的数字岩石力学推演技术, 完成对采掘布局、防控体系等多场景技术方案的超前优选; 依托“数据+知识”驱动的方法, 实现冲击危险的源头识别及预测, 并依据“优化布局无源头, 防控到位灭源头, 措施精准控源头, 超前预见避源头”的原则, 构建起能够自主生成具有数据和理论支撑的差异化防控决策生成模块; 未来通过在新街台格庙矿区的应用示范, 将从源头实现冲击地压矿井全生命周期的差异化防控, 为冲击地压煤层的智能安全高效开采以及产能的科学释放, 给出“新街方案”。

关键词: 冲击地压; 数字化; 源头防控; 广义“三因素”; 新街台格庙矿区; 数字岩石力学

中图分类号: TD324; TD315 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2025)09-0041-12

Architecture research of digitalized source governance system for rock burst prevention: A case study of Xinjie Taigemiao Mining Area

WANG Xudong¹, ZHENG Jianwei^{2,3,4}, LI Haitao^{2,3,4}, QI Qingxin^{2,3,4}, DONG Junliang¹, LYU Mou¹,
ZHANG Liang^{2,3,4}, LIU Yiqin^{2,3,4}, ZHANG Haikuan^{2,3,4}, XUE Shanshan^{2,3,4},
LIU Huaguang², DU Weisheng^{2,3,4}, GUO Fucheng^{2,3,4}

(1. Shenhua Group Xinjie Energy Co., Ltd., Ordos 017200, China; 2. Deep Mining and Rockburst Prevention Institute, Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China; 3. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China; 4. Beijing Technology Research Branch, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: Surrounding mines of the Xinjie Taigemiao Mining Area are all typical rock burst-prone collieries. Based on the principle of engineering analogy, it can be conclusively determined that future rock burst events will significantly jeopardize the safe and efficient min-

收稿日期: 2025-06-05 策划编辑: 朱恩光 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.12438/cst.2025-0821

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52474147, 52404128); 国家能源集团科技资助项目(GJNY-23-137)

作者简介: 王旭东(1981—), 男, 江苏徐州人, 高级工程师。E-mail: 10000105@ceic.com

通讯作者: 郑建伟(1989—), 男, 陕西榆林人, 副研究员, 博士。E-mail: zhengjianvy@163.com

ing operations within this area. Benefiting from the current critical construction period, a digital rock mechanics-enabled source governance system is proposed, characterized by source-oriented design, differentiation compatibility, and self-adaptive capabilities. This system will maximize safeguarding of safe, green, and high-efficiency production. Analyzing dominant controlling factors of potential rock burst in taigemiao mining area through comparative study of adjacent mines, and establishing a digital source governance system framework based on digital rock mechanics. Through comprehensive digitalization of native mine elements, a physically-transparent geological model will be constructed, providing a robust data foundation for intelligent mine development. Leveraging digital rock mechanics simulation technology that replicates authentic engineering behaviors, we will achieve proactive optimization of technical solutions for multiple scenarios including mining layouts and prevention systems. Driven by a “data-knowledge dual-engine” methodology, the system enables: source identification and prediction of rock burst hazards, autonomous generation of differentiated prevention decisions, guided by the principle: “optimized layout eliminates sources, rigorous control extinguishes sources, precision measures contain sources, proactive foresight avoids sources”. Validated through demonstration at Xinjie Taigemiao, this approach achieves differentiated lifecycle rock burst governance from the source. It delivers the “Xinjie Solution” for intelligent, safe, and efficient mining of rock burst-prone coal seams while enabling scientific production capacity release.

Key words: rock burst; digitization; source governance; generalized “Three Factors”; Xinjie Taigemiao Mining Area; digital rock mechanics

0 引言

2024年我国原煤产量47.8亿t^[1],比上年增长1.2%,预计到2050年煤炭仍将在我国能源结构中发挥重要作用。与此同时,我国煤炭生产逐步向西部地区集中,整体呈现出总量增长、区域集中、单矿产能提升的特点。新街台格庙矿区^[2-3]是国务院批准的国家重点项目,是国家煤炭战略储备基地。在当前经济高质量发展、“双碳”目标、黄河流域生态保护、释放优质产能增强保供能力等战略背景下,该矿区的高质量安全开发尤为关键。值得指出的是,新街台格庙矿区周边的门克庆煤矿、葫芦素煤矿、石拉乌素煤矿和红庆河煤矿都为典型冲击地压矿井,目前平均开采深度不超过800m,但都出现过不同程度的冲击地压显现^[4-5]。要实现新街台格庙矿区煤炭资源的安全高效开发,必须科学解决好冲击地压防治问题。

通过多年的研究积累,我国煤炭行业在冲击地压防治方面取得了显著的进展。潘一山等^[6]提出了煤体压缩型、顶板断裂型、断层错动型冲击地压防治措施,提出来开采解放层、采区合理布置等源头防控方法。窦林名等^[7]基于强度弱化减冲理论,给出了在矿井设计和生产规划阶段提出的区域防治方法。齐庆新等^[8]利用“三因素”理论,从内在因素、力源因素、结构因素3个角度,提出了冲击地压防治理念。蓝航等^[9]、姜耀东等^[10]、谭云亮等^[11]梳理了我国冲击地压矿井防治措施,将冲击地压防治方法归纳为3类:开采设计优化、主动解危和加强支护。其中,开采设计优化方法是从源头上消除应力高度集中,降低冲击地压危险的一类方法。经过煤矿现场应用,

发现合理开拓部署是冲击地压治本的技术,经济且安全,是首选的防冲措施。也就是说对于新建矿井,采用合理开拓部署措施能从源头防治冲击地压^[12]。随着煤矿进入深部开采,煤岩体面临着高应力、强扰动、复杂构造等力学环境,使得冲击地压防控愈发严峻^[13-17]。张俊文等^[18]融合了系统科学与工程的观点,提出了煤矿深部开采冲击地压结构调控理念。事实上,高应力及开采扰动作用下煤岩体具有典型的时效变形特征,使得巷道围岩时效变形破坏^[19-22]、蠕变型冲击地压^[15,23-25]等灾害频发。对于深井蠕变型冲击地压,姜福兴等^[23]给出了合理布置巷道、长期监测等源头防控建议;张良等^[24-26]认为结构演化和应力调整是煤岩体蠕变损伤破坏的关键;这些研究推动了围岩时效控制、蠕变型冲击地压防治领域的发展。潘俊锋等^[27]从深部冲击地压防控工程现场出发,根据“三高一低”工程技术诉求,提出了深部冲击地压区域源头防控等技术。近三年来,随着人工智能、数字岩石力学^[4-5,28]的兴起和发展,为充分兼容冲击地压极高的复杂度,以及真正从源头实现差异化防控,提供了全新的方法和技术路径。齐庆新等^[4]针对行业发展现状,认为我国煤矿冲击地压“头痛医头、脚疼医脚”的原因是冲击地压发生源头、孕灾机理不清,明确提出了冲击地压源头防治的学术思想。李海涛等^[5,28]分析了冲击地压源头防控的要求与挑战,给出了煤炭开采等地下工程问题的数字岩石力学解决方案。

在煤矿数字化、智能化建设方面,我国取得了长足的进步,但整体仍处于从示范推广向全面普及的转型阶段。截至2024年6月,全国已累计建成智能化采煤工作面2201个、掘进工作面2269个,智能

表 1 相邻矿井地质生产及冲击地压情况比较

Table 1 Comparative analysis of geological conditions, mining operations, and rock burst hazards in adjacent collieries

对比项目	新街一井	红庆河煤矿	葫芦素煤矿	门克庆煤矿	石拉乌素煤矿	母杜柴登煤矿	大海则煤矿
埋深/m	743 ~ 873	584 ~ 862	650 ~ 900	677 ~ 707	589 ~ 751	600 ~ 700	548 ~ 655
构造	单斜构造	单斜构造	单斜构造	单斜构造	单斜构造	单斜构造	单斜构造
地质构造	主要地层倾角/(°)	1 ~ 3	5 ~ 10	小于10	1 ~ 3	3 ~ 8	小于5
	其他构造	局部区域发育断层	次级褶皱和断层较少	断层和褶皱不发育	局部区域发育小型褶皱和断层	局部区域发育小型褶皱和断层	断层和褶皱不发育
水文地质条件类型	复杂	复杂	复杂	复杂	复杂	复杂	复杂
水平应力与垂直应力比值	0.8 ~ 1.2	0.8 ~ 1.2	0.9 ~ 1.1	局部地区超过1.5	1.0 ~ 1.3	0.8 ~ 1.0	0.7 ~ 1.0
开采设计	生产能力/(Mt · a ⁻¹)	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	5.0
	开拓方式	立井开拓	立井开拓	立井开拓	立井开拓	立井开拓	立井开拓
冲击地压	煤层冲击倾向性	弱	弱	弱	弱	弱	弱
	是否发生冲击地压事故	—	是	是	是	是	无
	显现频率	—	较多	较多	较多	中等	较少
	显现特征	—	巷道围岩的局部破坏, 如顶板的小块垮落、两帮的片帮等	多发生在开采深度较大区域, 可能有煤体抛出、巷道底鼓现象, 煤炮声频繁	可能出现强烈震动, 巷道变形严重, 支架损坏	巷道断面急剧缩小, 顶板下沉速度加快, 煤壁片帮严重且煤体抛出距离较远	—

综上, 台格庙矿区冲击地压由“深部高应力场+厚硬顶板动载+煤体强冲击倾向性+高强度采动扰动”多因素耦合所致, 需结合地质与工程特征针对性防治。

1.2 台格庙矿区冲击地压潜在主控危险因素评估

结合周边矿井与新街台格庙矿区的情况, 分析新街一井冲击地压潜在主控因素:

地质构造导致的应力集中: 新街台格庙矿区与红庆河煤矿构造相似, 地层的轻微挠曲等变形可能导致局部应力集中, 可能会增加冲击地压发生的概率。其次, 矿区局部地区煤层分布不均匀, 在煤层分布不均匀的过渡地带, 容易出现应力集中现象, 进而引发冲击地压。

大埋深高应力因素: 新街一井 2-2_上煤层等 10 层煤层平均埋深均大于 800 m(最上层 2-2_上煤层平均埋深 806.67 m), 超过周边矿井的普遍开采深度, 煤岩体所处的应力环境更加复杂, 更易集聚弹性能。

顶板厚硬砂岩层: 2-2 煤层基本顶岩性为粉砂岩、细粒砂岩, 厚 5.00 ~ 27.41 m, 砂岩整体较好, 节理裂隙率低, 砂体胶结致密, 顶板潜在关键层破断风险高, 容易引发冲击地压。

煤层及顶板的冲击倾向性: 2-2 煤的单轴抗压强度 R_c 为 13.33 MPa、煤的弹性能指数 W_{ET} 为 4.94、动

态破坏时间 D_T 为 944 ms、冲击能量指数 K_E 为 6.25, 通过综合指数法鉴定其为弱冲击倾向性。

采掘规划设计因素: 如新街一井工作面规模与周边矿井类似, 也会受到顶板断裂动载和采动静载的影响。大规模的工作面开采会使顶板断裂释放的能量更大, 采动引起的应力变化更复杂, 从而增加冲击地压发生的风险。

2 冲击地压数字化源头防控体系架构

目前, 新街台格庙矿区新街一井正处于设计建设阶段, 具备从设计阶段即开始进行矿井冲击地压源头防控的有利条件。基于新街台格庙矿区冲击地压潜在危险主控因素的评估分析, 结合目前先进的数字化技术, 可以为矿区冲击地压数字化源头防控体系的建立提供良好的基础条件。

2.1 冲击地压数字化源头防控理论基础

冲击地压的本质是大量弹性能的突然、剧烈释放, 其形成是一个“从无到有”的过程, 这也是对其进行源头防控的事实依据, 有效介入越早, 防控效果越好和难度也越低。而且, 冲击地压虽然影响因素众多, 但整体上遵循“物性提供储能基础、结构控制过程、应力触发灾变”的内在逻辑。广义三因素理论^[33]将煤岩体物理力学性质(如弹性能指数、裂隙发育程

度等物性因素)、地质构造与采掘布局(如断层分布、煤柱留设等结构因素)、地应力场与采动应力叠加(如原岩应力、构造应力等应力因素)作为核心要素,揭示了灾害发生的多场耦合机制(图 2)。

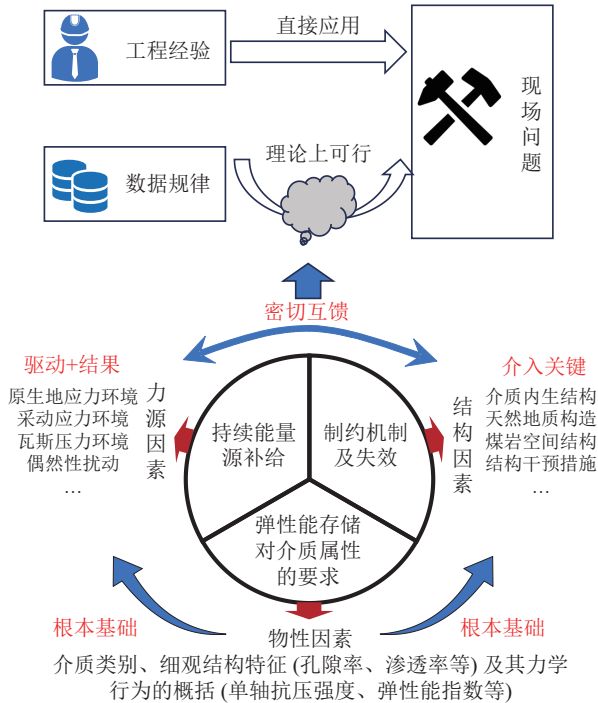


图 2 广义“三因素”逻辑框架^[33]

Fig.2 Framework of “Three Factors” logical relationship^[33]

同时,智能化矿井中已有装备(设备)与物联网技术深度融合,拓宽了数据获取渠道,实现了多源数据间的有机互动,完成技术类数据、监测类数据和管理类数据的融合互通,从而获得海量基础数据。冲击地压的复杂逻辑即蕴含在这些海量的数据中,结合成熟的大数据技术,提取多源异构数据中与冲击地压相关的内在逻辑知识和有效信息,就成为冲击地压量化研究的基础。

而针对新建矿井,天然具备从真正意义上实现源头防控的条件,即从矿井设计伊始就考虑避免冲击地压源头的形成,也称之为“无源头”。为了实现“无源头”设计,以新街一井为例:通过矿井原生全要素数字化研究,构建新街一井“物理级透明”的模型,筑牢矿井智能化建设的数据底座;借助能够还原真实工程行为的推演技术,自主完成对采掘布局、防控体系等多场景技术方案的分析优选,最大限度避免冲击地压源头的形成,以上就是新建矿井冲击地压源头防控的基本逻辑。

而在无法完全避免冲击地压源头形成的前提下,就需要依托“数据+知识”驱动的方法,实现冲击危险源头的超前识别及预测,并依据“优化布局无源头,

防控到位灭源头,措施精准控源头,超前预见避源头”的目标,自主生成具有充分数据和理论依据的防控决策,实现“灭源头”。当面临埋深等无法完全消除的源头要素时,则需要通过推演系统和决策生成算法,给出完整而系统的防控策略,进行“控源头”。进一步地,在面对地质构造等无法改变的源头时,则需要给出最优的采掘路径,完成“避源头”。

整体而言,数字化源头防控的理念就是在海量数据的支撑下,充分考虑冲击地压复杂度,并结合行业积累的大量有效知识,针对矿井自身的赋存条件和采掘规划,从源头上灵活而准确地进行冲击地压差异化防控,真正实现“一矿一策、一面一策”的科学防冲。

2.2 冲击地压数字化源头防控技术流程

尽管新街台格庙矿区冲击地压影响因素十分复杂,但地质构造、坚硬顶板、煤柱及采深是四大主要因素,是需要重点监测的原生素素。这 4 类要素的动态变化与冲击地压风险具有显著关联性,是冲击地压预测过程中需要动态感知的重要指标。鉴于此,文献 [5] 提出了一种基于数字岩石力学思想来解决地下工程问题的基本技术流程包括工程素描—物理嵌入—业务融合—决策生成,针对新街台格庙矿区数字化源头防控则可以分为:

1) 在工程素描环节,基于矿区周边典型冲击地压矿井灾害及大能量事件的地质、开采和监测数据,分析不同类型冲击地压灾害的主控因素,明确其量化指标,提取所有原生素素,同时建立三维地层及井巷系统模型,形成后续工作的模型基础。

2) 在物理嵌入环节,基于 4 种基础冲击地压类型及复合型冲击地压,结合采集的矿区周边冲击地压灾害发生时的地质构造、采场结构、煤柱留设、煤岩冲击倾向性、上覆坚硬岩层、工作面推进度等关键信息,以及实体煤的特征量化数据,在建立的模型基础上,赋予上述矿井全要素的量化信息,分析不同类型冲击地压的原生素素组合及其动态响应特征。

3) 在业务融合环节,冲击地压是地质赋存与采掘活动共同作用的结果,首先利用卷积神经网络(CNN)、前向神经网络(FNN)和循环神经网络(RNN)将新街一井信息的图像、文本及监测数据映射为统一维度信息向量;随后采用可学习的表示向量和位置编码算法,提取新街一井地质、开采和监测属性,构建原生素素及动态响应的表示向量;再结物理嵌入环节中的原生素素组合及动态响应特征作为提示信息,设计融合算法实现动态特征融合,形成具有

兼容不同矿井条件的冲击地压预警算法。

4) 在决策生成环节, 基于 4 种原生素素动态响应的预测结果, 结合新街一井地质-开采条件, 评估其对工作面和巷道的威胁程度, 输出冲击危险范围、危险程度及主控因素的量化信息, 实现对冲击地压的精准预警。借助决策生成算法, 结合煤矿具体场景, 在海量有效历史数据的支撑下, 产出具有更强的准确性、时效性和针对性的防冲解危措施。

3 冲击地压数字化源头防控体系实现关键技术

3.1 新街合格庙矿区原生全要素数字化及模型构建

依据新街一井的地质勘探数据和采掘工程平面设计图, 建立能够精确还原地下空间结构的三维数字化模型, 将地质信息等全要素完整包含在模型中, 实现新街一井的工程素描, 该模型也是开展矿区应力场推演和制定冲击地压防控措施的基础。煤岩体空间结构和物理力学性质随着地质勘探工作而逐步透

明化, 其几何建模过程需要采用特定算法推测地质界面并不断更新数据, 传统有限元软件的几何建模能力难以胜任以上需求。新街合格庙矿区采用以三维地质结构建模、井巷工程参数化建模和地质结构模型动态更新技术为核心的矿区原生全要素数字化建模技术, 构建了地质与井巷工程一体化数字模型(图 3)。

一体化数字模型是开展数字岩石力学推演的基础模型, 通过网格划分可以生成初始有限元模型。传统有限元划分方法以无约束的自由网格划分方法为主, 主要原因在于地质、井巷等数字模型导入商业有限元软件之后, 其结构语义信息几乎完全损失。新街一井可采用结构化体元剖分技术, 以地层结构语义为约束条件, 直接将地质模型转化为有限元网格, 并采用模型-属性一体化计算技术, 将位于井巷、硐室外轮廓面位置的有限单元模型标记为力学计算边界条件, 保证空区范围内的有限单元模型不参与推演计算, 从而生成矿区应力场推演所需的计算载体。

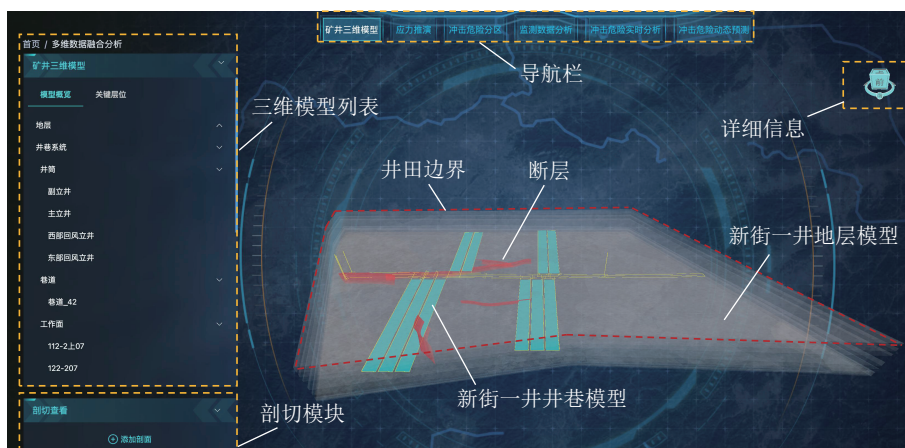


图 3 地质与井巷工程一体化数字模型

Fig.3 Integrated geological and shaft-tunnel engineering digital model

3.2 冲击地压矿井多场景全生命周期工程推演技术

地质与井巷工程一体化数字模型的建立是矿井开展多场景全生命周期工程推演的基础, 结合工程展布方法获取新街一井三维矿井模型对应的物性信息(图 4), 并赋值到数字模型中。工程展布方法以煤岩样本力学试验获得的物理力学参数为数据源, 依据样本在建模空间中的三维坐标位置, 对整个建模空间不同坐标位置具有的物理力学参数进行空间插值计算, 从而使得数字模型含有力学参数三维属性场, 成为岩石力学求解的数字载体。在具体空间插值计算过程中, 可以根据需要采用反距离权重插值(IDW)、克里金插值(Kriging)、离散光滑插值(DSI)等不同方法, 本文采用了克里金插值方法。

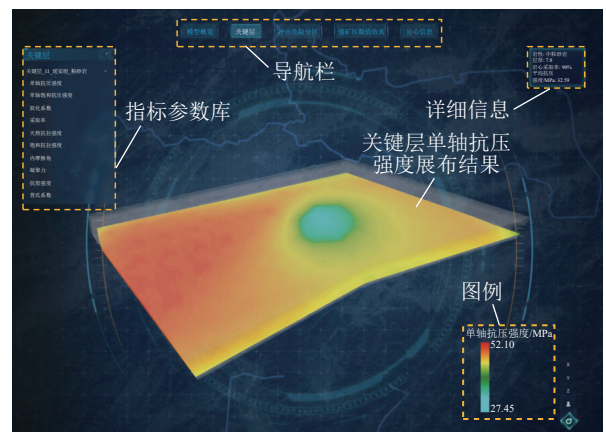


图 4 数字模型中关键层属性信息展布

Fig.4 Spatial characterization of key stratum attribute information in digital models

地质与井巷工程一体化数字模型的建立是矿井开展多场景全生命周期工程推演的基础,结合工程展布方法获取新街一井三维矿井模型对应的物性信息(图 4),并赋值到数字模型中。

新街一井为建设期矿井,矿井多场景主要包括井巷系统布置、采掘工作面参数设计、采掘接续优化、区段煤柱设计、防控效果评估、采掘强度合理确定等,具体涉及多个工作面不同开采顺序对矿井应力变化情况、不同煤柱宽度对工作面采空区的应力影响、采掘速度对工作面应力分布的影响,以及不同采掘工作面布置下采场应力的分布等。同时,基于多年的防冲研究可知,单一场景对防冲效果的贡献是有限的,需要同时结合多个场景,开展多个开采顺序方案下,不同煤柱厚度及采掘速度的推演,基于应力分布的结果确定合理的多场景参数。

矿井全生命周期推演流程如图 5a 所示,在矿井

开采前,基于矿井结构数字化和物性数字化结果构建数字模型。然后,根据新街冲击地压矿井工作面接续设计图、煤柱厚度和推采速度等设计参数,通过基于有限离散元方法开发的 FDEMYMs 数字岩石力学求解器,对空间应力状态连续还原和推演。推演开采前后、防控措施实施前后煤岩体应力场演化规律(图 5b),评估新街台格庙矿区矿井现有接续计划的合理性,确定冲击危险性较小的开采推进速度和煤柱宽度。

在矿井开采中,动态获取现场应力测定设备的监测结果,结合数字岩石力学求解器的推演结果,通过数据驱动方法补充和优化新街台格庙矿区矿井的空间应力状态分布结果,实现工程级应力信息的动态更新,并结合物性信息和结构信息,识别新街一井潜在冲击危险区,服务现场冲击地压监测和预警。

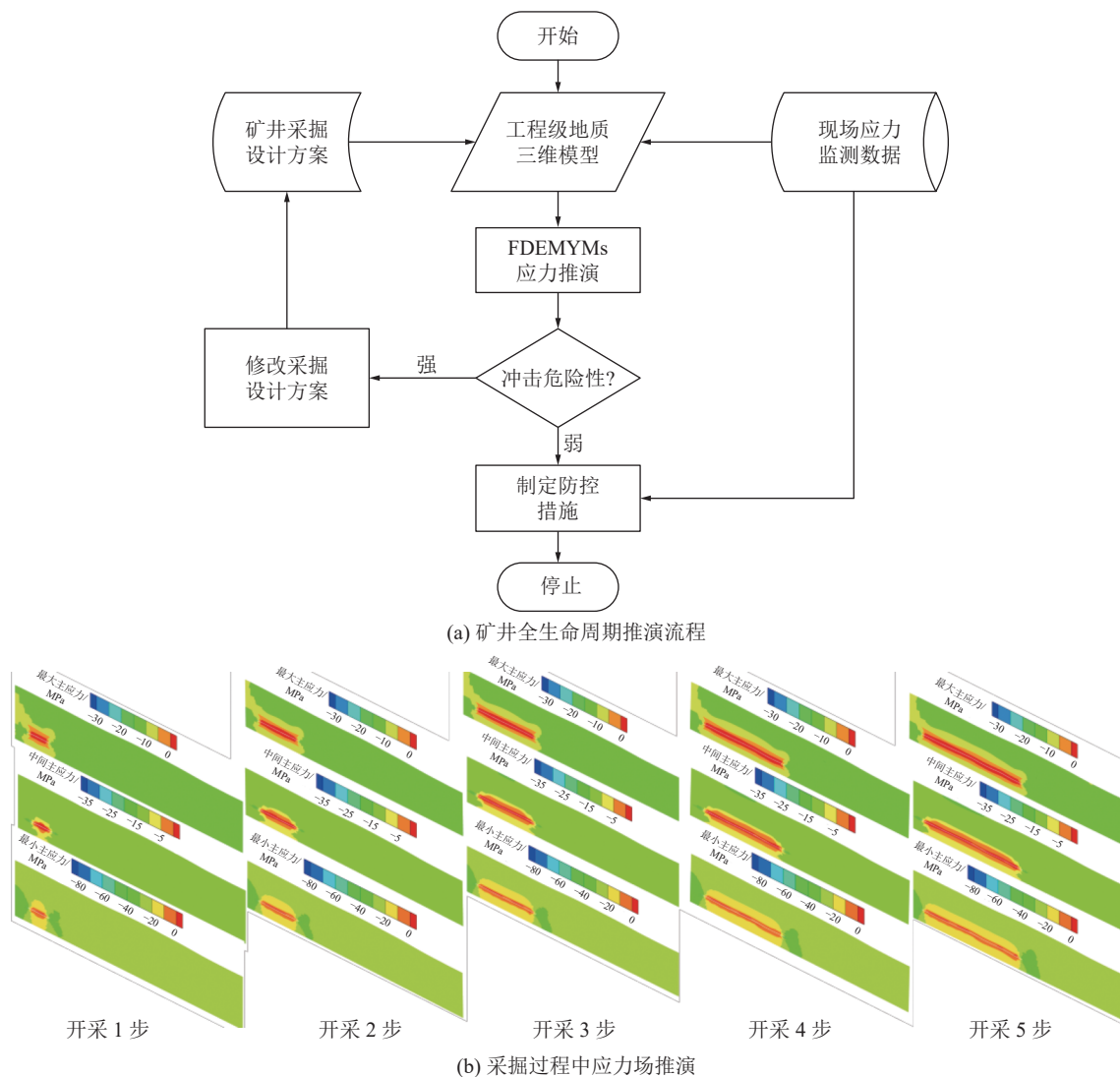


图 5 多场景推演流程及应力场推演示意

Fig.5 Multi-scenario simulation workflow and mining stress field schematic diagram

3.3 原生要素+动态感知的冲击危险源头辨识及预测

基于新街台格庙矿井的工程地质特征,运用多种地球物理探测技术实施高精度勘探与持续动态监测,构建覆盖矿井全生命周期的结构状态智能感知体系。在矿井建设阶段,通过地面施工垂直钻孔穿透至目标岩层,部署三维应变传感装置并设置地表观测基准点,确保监测设施不受开采扰动干扰,完成水平四向、斜向双向及垂向单向的线应变数据采集。在首采区地表投影边界外围优选钻孔位置,精准定位目标监测层位,利用三维应变传感设备实时捕捉采动过程中顶板岩层三维应力场的时空演变规律。巷道掘进及后续生产阶段,集成应用单点单向、多参数钻孔、多维单点等应力监测装置,构建深部岩体自适应调节与智能感知协同的单点-多点阵列及分布式监测网络,最终形成覆盖巷道系统与采煤工作面的立体化应力监测架构。

基于新街台格庙矿区矿井的物性特征、结构特征及应力分布的工程数字化成果,结合冲击地压风险评估方法,识别开采前矿井及工作面范围内的潜在冲击危险区(图 6)。

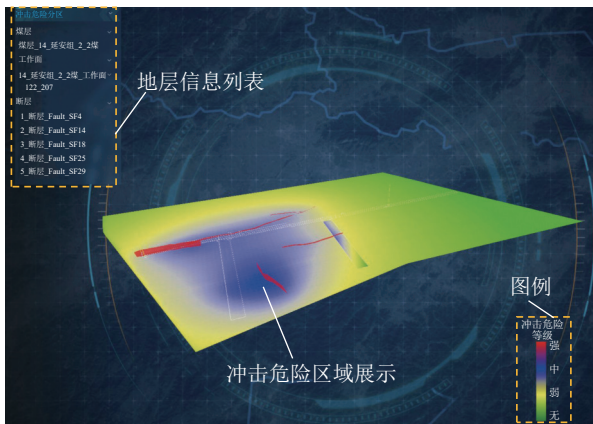


图 6 新街一井冲击危险动态评估展示

Fig.6 Dynamic rock burst risk assessment visualization for No.1 Xinjie Mine

通过对危险区域的物性、结构及应力数字化数据进行格式分析与数据量统计,运用数据清洗与增强算法对多源信息进行预处理,并将处理后的物性、结构、应力数字化特征作为输入变量,以潜在危险区稳定性评估结果作为分类标签,构建涵盖矿区全要素的冲击地压预测预警数据集;采用卷积神经网络(CNN)处理图像数据、循环神经网络(RNN)分析时序信号、前馈神经网络(FNN)解析文本信息,将多模态数据统一转换为维度一致但长度可变的隐式特征

向量。基于危险区稳定性判别准则,设计适配矿井全要素数据的多模态融合模型(图 7),最终输出冲击危险概率的量化预测结果。

通过对危险区域的物性、结构及应力数字化数据进行格式分析与数据量统计,运用数据清洗与增强算法对多源信息进行预处理,并将处理后的物性、结构、应力数字化特征作为输入变量,以潜在危险区稳定性评估结果作为分类标签,构建涵盖矿区全要素的冲击地压预测预警数据集。物性和结构特征数据需要来自于现场实测和权威报告,包括地层分布、煤层顶底板信息、钻孔对应岩性信息、地质构造、工作面和巷道规划情况、煤柱规划信息等。应力分布则是通过应力测定设备和 3.2 节中的推演结果获取。采用卷积神经网络(CNN)处理图像数据、循环神经网络(RNN)分析时序信号、前馈神经网络(FNN)解析文本信息,将多模态数据统一转换为维度一致但长度可变的隐式特征向量;利用交叉注意力机制融合隐式特征向量,得到包含矿井冲击危险信息的代表性向量,最终通过全连接层获取未来冲击危险范围、危险程度和主控因素。基于危险区稳定性判别准则,设计适配矿井全要素数据的多模态融合模型(图 7),最终输出冲击危险概率的量化预测结果。

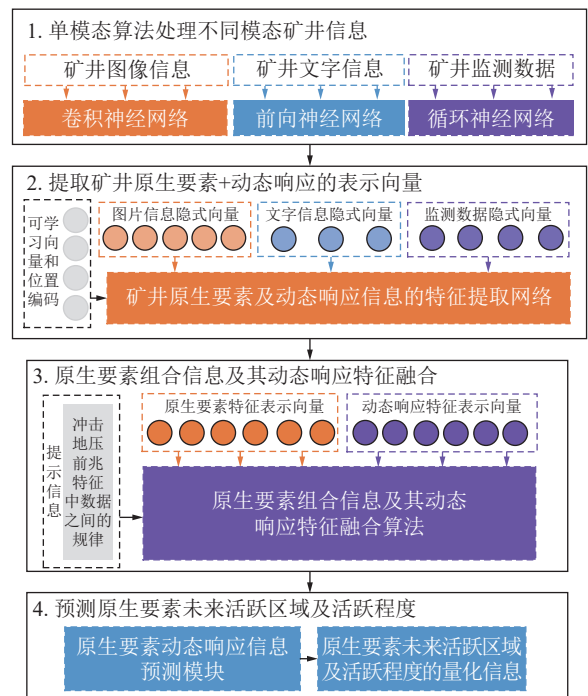


图 7 冲击地压原生要素动态响应预测算法

Fig.7 Dynamic response prediction algorithm for primary factors of rock burst

通过整合矿区邻近矿井(包括门克庆、葫芦素、石拉乌素及红庆河煤矿)的数据,建立了专门用于冲

击地压预测的数据集合。基于该数据集对预训练的多模态算法进行针对性优化,随后将改进后的预测模型应用于新街一井实际场景,并在运行过程中持续优化调整。解析新街一井地质要素与冲击灾害之间的非线性关联,当输入完整的地质参数后,能智能评估指定区域发生冲击地压的潜在风险,以量化概率形式呈现危险等级。此外,通过深度解析多模态模型中各参数的贡献度,可明确不同主控因素在冲击危险形成过程中的相对重要性,具体如图 8 所示。

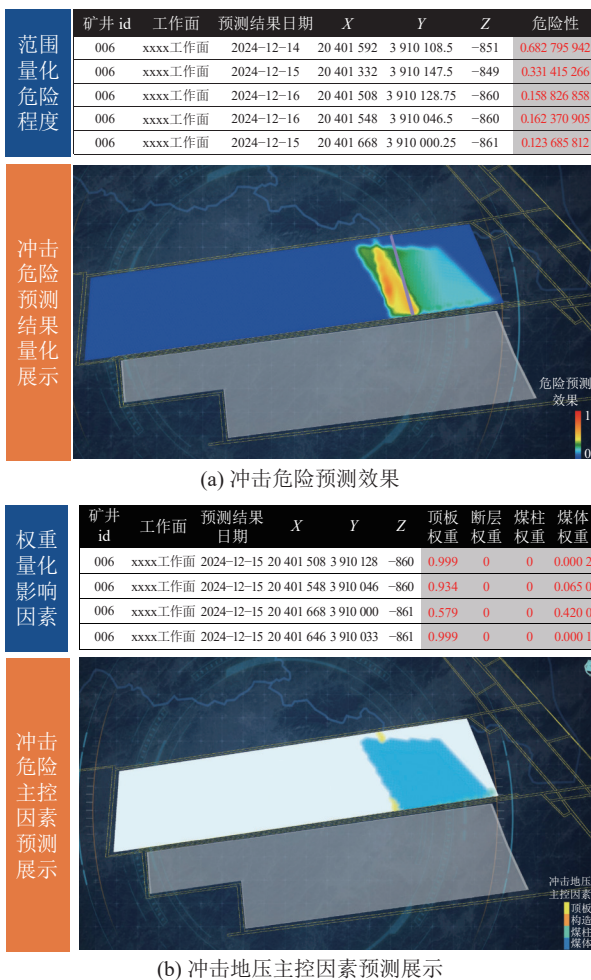


图 8 冲击地压预测结果的量化信息

Fig.8 Quantitative information on rock burst prediction results

3.4 冲击地压源头差异化防控智能决策自主生成技术

针对井筒建设等不同的决策场景,基于冲击危险源头辨识及预测结果,对不同场景下冲击地压致灾的应力源头进行分析,针对不同场景冲击地压的致灾源头类型,开展冲击地压源头差异化防控智能决策自主生成技术研究,差异化防控智能决策自主生成逻辑如图 9 所示。

井巷布局优化通过深度学习模型,结合不同布置方式的推演结果,以物性、结构、应力要素为输入,

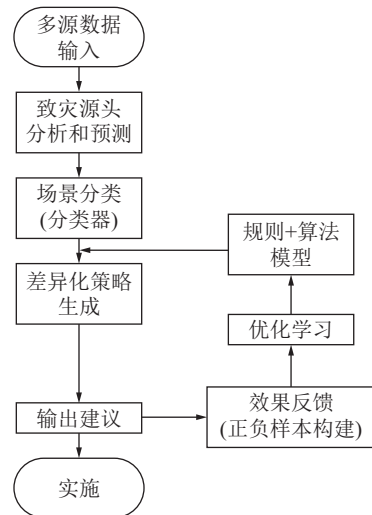


图 9 差异化防控智能决策自主生成逻辑

Fig.9 Autonomous generation logic for differentiated prevention intelligent decision-making

输出优化后的井巷布局,从而优化新街一井井巷系统空间应力场分布,为新街一井冲击地压防治提供理论演算依据。

在井筒及大巷掘进期间围岩控制方面,通过不同围岩控制措施下的推演结果,形成开展深度学习的基础数据集。以掘进期间最新获得的物性、结构、应力要素数字化结果为输入,以优化后的措施为输出,给出新街一井井巷掘进期间的防冲措施。与此同时,通过冲击地压,反向调整开采强度,在采掘速度的优化调整方面,以不同回采区域采掘速度下的推演结果为开展深度学习的基础数据集,以回采区域的物性、结构、应力要素数字化结果为输入,以优化后的采掘速度为输出,对新街一井在冲击地压影响下合理的开采速度给出科学建议。

在冲击地压预测预警方面,设计兼容新街一井全要素数据的多模态模型,以潜在冲击危险区域的物性、结构、应力要素数字化结果为输入,以矿区潜在冲击危险区发生冲击地压事故的概率为输出,预测潜在危险区域的危险程度,给出冲击危险形成过程中各类要素的影响权重,为矿区冲击地压危险区域的差异化防治提供科学依据。

以冲击地压“优化布局无源头,实现防控到位灭源头,措施精准控源头,超前预见避源头”为防治目标,构建面向冲击地压灾害的多层级“数据+知识”的数字岩石力学中台系统,搭建数据采集层—数据处理层—智能决策层—应用服务层为主线的技术框架(图 10),全面梳理不同类型资料的文件类型、文件内容和关键信息,确保对新街台格庙矿区等相关煤矿数据实现全生命周期覆盖管理。通过深入研究不同

数据之间的逻辑关联性、时间关系和空间位置关系，构建全面的数据管理框架，确保各类数据能够互相

关联并具备矿井全维度信息的存储、管理与推演，实现冲击地压灾害智能判识、预警与防控等功能。

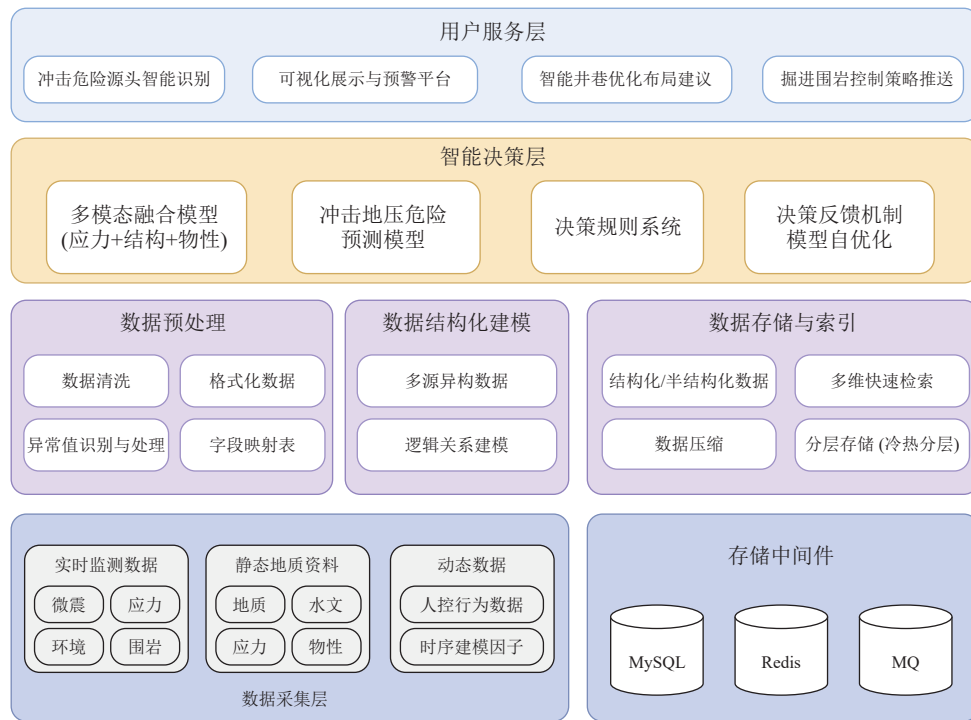


图 10 新街能源冲击地压防控中台设计框架

Fig.10 Design framework of Xinjie rock burst prevention-control middle platform

目前新街一井正处于井筒施工阶段，基于数字岩石力学开发了井筒施工期的“虚实同步”功能(图 11)，接入并回传建井终端的定位数据，实现秒级的互馈响应，将不同埋深岩层物理力学特性参数在井筒三维模型中展示。基于 3.2 节中的推演技术实现对井筒施工过程中和未来应力场信息的获取，保障井筒施工中的安全，并记录井筒施工过程中不同工况下岩层及井壁响应特征，为掌握新街一井整体岩层层位的特性提供详实数据，也为矿井全生命周期数字化提供基础。

通过在新街一井的应用示范，实现冲击地压矿井全生命周期的差异化防控，为冲击地压煤层的智能安全高效开采以及产能的科学释放，提供“新街方案”。

4 结 论

1) 依据工程类比法，基本可以确定新街台格庙矿区未来会受到冲击地压的影响。而作为正在建设的整装煤田，具备从源头就开始进行冲击地压防控的有利条件，并提出“优化布局无源头，防控到位灭源头，措施精准控源头，超前预见避源头”的目标，以此最大限度降低冲击地压防控的难度和成本投入，并充分保障现代化矿井产能的科学释放。

2) 新街台格庙矿区的冲击地压是“深部高应力场+厚硬顶板动载+煤体强冲击倾向性+高强度采动扰动”共同作用的结果，其源头防控需要充分考虑上述因素复杂的作用机制。基于数字岩石力学的思想，提出了新街台格庙矿区冲击地压数字化源头防控的理念，在不做简化的前提下，实现矿区冲击地压风险的预辨识，以及基本防控策略的构建。

3) 依托新街一井形成了系列化的源头防控工具模块，实现了矿井数字化模型的精准构建，并开发了

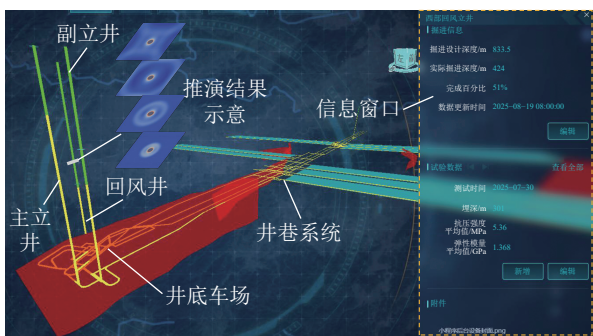


图 11 井筒施工期“虚实同步”模块

Fig.11 Digital-physical interactive coupling module for shaft sinking phase

工程行为推演系统、采掘布局优选模块、冲击风险辨识算法、决策生成框架等,形成了冲击地压数字化源头防控的系列化定制工具,并开始支持矿井的建设过程,为冲击地压煤矿的智能安全高效开采这一难题给出“新街方案”。

参考文献(References):

- [1] 《2024 煤炭行业发展年度报告》发布[J]. 中国煤炭工业, 2025(5): 32.
- [2] 杨俊哲, 王旭东, 辛德林, 等. 新街台格庙矿区高质量发展实施路径研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(2): 1-6.
YANG Junzhe, WANG Xudong, XIN Delin, et al. Implementation path of high quality development in Xingjie Taigemiao mining area[J]. Coal Engineering, 2023, 55(2): 1-6.
- [3] 王旭东, 辛德林, 武书军, 等. 新街台格庙矿区地面空间布局研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(1): 1-5.
WANG Xudong, XIN Delin, WU Shujun, et al. Ground space layout of Xingjie Taigemiao mining area[J]. Coal Engineering, 2023, 55(1): 1-5.
- [4] 齐庆新, 马世志, 孙希奎, 等. 煤矿冲击地压源头防治理论与技术架构[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1861-1874.
QI Qingxin, MA Shizhi, SUN Xikui, et al. Theory and technical framework of coal mine rock burst origin prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1861-1874.
- [5] 李海涛, 齐庆新, 杜伟升, 等. 煤炭开采等地下工程问题的数字岩石力学解决方案[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 150-161.
LI Haitao, QI Qingxin, DU Weisheng, et al. Digital rock mechanics solutions for underground engineering problems such as coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 150-161.
- [6] 潘一山, 李忠华, 章梦涛. 我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1844-1851.
PAN Yishan, LI Zhonghua, ZHANG Mengtao. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1844-1851.
- [7] 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.
- [8] 齐庆新, 毛德兵, 康立军, 等. 我国冲击地压现状与研究进展[C]//中国煤炭学会. 煤炭科学研究总院北京开采研究所建所 50 周年论文集. 2007: 88-101.
- [9] 蓝航, 齐庆新, 潘俊锋, 等. 我国煤矿冲击地压特点及防治技术分析[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 11-15, 36.
LAN Hang, QI Qingxin, PAN Junfeng, et al. Analysis on features as well as prevention and control technology of mine strata pressure bumping in China[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(1): 11-15, 36.
- [10] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205-213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [11] 谭云亮, 郭伟耀, 辛恒奇, 等. 煤矿深部开采冲击地压监测解危关键技术研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 160-172.
TAN Yunliang, GUO Weiyao, XIN Hengqi, et al. Key technology of rock burst monitoring and control in deep coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 160-172.
- [12] 齐庆新, 李一哲, 赵善坤, 等. 我国煤矿冲击地压发展 70 年: 理论与技术体系的建立与思考[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 1-40.
QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun, et al. Seventy years development of coal mine rock burst in China: Establishment and consideration of theory and technology system[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 1-40.
- [13] 齐庆新, 潘一山, 舒龙勇, 等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害多尺度分源防控理论与技术架构[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1801-1810.
QI Qingxin, PAN Yishan, SHU Longyong, et al. Theory and technical framework of prevention and control with different sources in multi-scales for coal and rock dynamic disasters in deep mining of coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1801-1810.
- [14] 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.
- [15] 张良, 齐庆新, REN Ting, 等. 基于显微 CT 扫描和统计强度的煤岩损伤破裂特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 1-12.
ZHANG Liang, QI Qingxin, REN Ting, et al. Study on damage and fracture characteristics of coal and rock based on micro-CT scanning and statistical strength[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 1-12.
- [16] ZHAO T B, GUO W Y, TAN Y L, et al. Case studies of rock bursts under complicated geological conditions during multi-seam mining at a depth of 800 m[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(5): 1539-1564.
- [17] ZHOU J, LI X B, MITRI H S. Evaluation method of rock burst: State-of-the-art literature review[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 81: 632-659.
- [18] 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.
- [19] 康红普, 姜鹏飞, 张农, 等. 煤矿复杂条件巷道快速智能掘进研究策略及关键技术与装备分析[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(2): 237-257.
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, ZHANG Nong, et al. Key tech-

- nology and equipment analysis and research strategies of rapid and intelligent driving in complex roadways of coal mines[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2025, 54(2): 237–257.
- [20] 康红普. 煤炭开采与岩层控制的时间尺度分析[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2021, 3(1): 5–27.
KANG Hongpu. Temporal scale analysis on coal mining and strata control technologies[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2021, 3(1): 5–27.
- [21] 康红普, 高富强, 王晓卿, 等. 煤矿巷道断层滑移型冲击地压试验系统研制与试验验证[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(9): 3701–3710.
KANG Hongpu, GAO Fuqiang, WANG Xiaoqing, et al. Development and experimental validation of a test system for simulation of fault-slip rock bursts in coal mine roadways[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(9): 3701–3710.
- [22] KANG H P, GAO F Q, XU G, et al. Mechanical behaviors of coal measures and ground control technologies for China's deep coal mines: A review[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(1): 37–65.
- [23] 姜福兴, 冯宇, KOUAME K J A, 等. 高地应力特厚煤层“蠕变型”冲击机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(10): 1762–1768.
JIANG Fuxing, FENG Yu, et al. Mechanism of creep-induced rock burst in extra-thick coal seam under high ground stress[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(10): 1762–1768.
- [24] 张良, 王来贵, REN Ting, 等. 强扰煤岩体蠕变过程中跨尺度非连续结构演化研究进展[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(10): 47–59.
ZHANG Liang, WANG Laigui, REN Ting, et al. Advances in research on the evolution of trans-scale discontinuous structures during the creeps of strongly disturbed coals[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(10): 47–59.
- [25] ZHANG L, LI X C, REN T. A theoretical and experimental study of stress-strain, creep and failure mechanisms of intact coal[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(12): 5641–5658.
- [26] ZHANG L, REN T, LI X C, et al. Acoustic emission, damage and cracking evolution of intact coal under compressive loads: Experimental and discrete element modelling[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 252: 107690.
- [27] 潘俊峰, 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.
- [28] 李海涛, 杜伟升, 齐庆新. 冲击地压源头防控的破局之道[J]. *智能矿山*, 2024, 5(7): 25–29.
LI Haitao, DU Weisheng, QI Qingxin. The way to break the situation of prevention and control of rock burst source[J]. *Journal of Intelligent Mine*, 2024, 5(7): 25–29.
- [29] 王国法, 富佳兴, 王忠鑫. 煤矿智能化重要进展与高质量发展方向[J]. *智能矿山*, 2025, 6(1): 2–12.
WANG Guofa, FU Jiaying, WANG Zhongxin. Important progress and high-quality development direction of coal mine intelligence[J]. *Journal of Intelligent Mine*, 2025, 6(1): 2–12.
- [30] 王国法, 任怀伟, 富佳兴. 煤矿智能化建设高质量发展难题与路径[J]. *煤炭科学技术*, 2025, 53(1): 1–18.
WANG Guofa, REN Huaiwei, FU Jiaying. Challenge and path of high-quality development of coal mine intelligent construction[J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53(1): 1–18.
- [31] 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 Shankun, et al. How to realize safe-efficient-intelligent mining of rock burst coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(1): 1–14.
- [32] 潘一山. 冲击地压工程学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2022.
- [33] 李海涛, 齐庆新, 赵善坤, 等. 煤矿动力灾害广义“三因素”机理探讨[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(6): 42–52.
LI Haitao, QI Qingxin, ZHAO Shankun, et al. Discussion on generalized “Three Factors” mechanism of coal mine dynamic disaster[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(6): 42–52.