

煤炭科学技术 Coal Science and Technology ISSN 0253-2336,CN 11-2402/TD

《煤炭科学技术》网络首发论文

题目: 煤矿冲击矿压动静载危险源头分类、辨识与监测方法

作者: 窦林名,孙振于,曹安业,牟宗龙,巩思园,蔡武,马志锋,李家卓,周坤 友

网络首发日期: 2025-07-09

引用格式:

窦林名,孙振于,曹安业,牟宗龙,巩思园,蔡武,马志锋,李家卓,周坤 友.煤矿冲击矿压动静载危险源头分类、辨识与监测方法[J/OL].煤炭科学技 术.https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20250708.1714.016



www.cnki.net

网络首发:在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认:纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国 学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷 出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出 版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首 发论文视为正式出版。

doi: 10.12438/cst.2025-0794

煤矿冲击矿压动静载危险源头分类、辨识与监测 _{方法}

窦林名 1.2.3,孙振于 2.4,曹安业 1.2.3,牟宗龙 1.2.3,巩思园 1.2.3,蔡武 1.2.3,马志锋 2.4,李家卓 5.周坤友 5

(1.中国矿业大学 江苏省矿山地震监测工程实验室,江苏 徐州 221116; 2.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116; 3.中国矿业 大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室,江苏 徐州 221116; 4. 徐州弘毅科技发展有限公司,江苏 徐州 221116; 5.安徽理工大学矿业工程 学院,安徽 淮南 232001)

摘 要:煤矿冲击矿压防治必须从源头抓起,其中冲击矿压动静载危险源头分类、辨识与 监测是实现冲击矿压源头治理的重要前提。基于动静载叠加诱冲理论,总结了冲击矿压的 动静载危险源和作用方式,其中静载危险源主要分为地质沉积属性类、地质构造类和采掘 应力集中类共 16 种常见危险源: 对冲击矿压的作用方式主要包括煤岩性质不同使冲击发生 的临界应力不同、巨厚坚硬岩层和断层运动产生强动载以及地质沉积微相的存在使煤岩体 内静载应力升高 3 种方式。动载危险源主要分为震动波动载、受迫动载和炸药冲击动载 3 类;对冲击矿压的作用方式主要包括使煤岩体内应力瞬时升高、强动载作用下冲击临界载 荷降低及长时间动载作用下煤岩体和支护体累计损伤3种方式。针对静载冲击危险源头辨 识问题,提出了基于地应力场反演的地质沉积静载危险源辨识方法,通过构建矿井地应力 场反演模型并采用地应力实测数据矫正反演矿井地应力场分布状态,找出地质沉积静载危 险区:提出了基于应力场 CT 反演技术的高静载危险源辨识方法,通过大范围长时间定期 CT 反演, 找出高静载危险区。针对顶板岩层动载冲击危险源头辨识问题, 提出了矿震关键 层理论,构建了矿震关键层判别模型和方法。针对冲击静载危险源头监测,开发了主被动 双源震动波一体化应力场监测技术,集成了主动和被动 CT 技术,实现了冲击静载危险源 头实时、连续性的应力场反演分析。针对冲击动载危险源头监测,开发了井地一体微震监 测技术,克服了传统微震监测技术垂直定精度差和冲击动载源头找不准的弊端,大幅度提 高了微震监测精度和感知能力。基于现场应用,验证了上述技术方法的有效性,以期为冲 击矿压源头治理提供参考。

关键词:冲击矿压;动静载危险源头;源头分类;源头辨识;源头监测 中图分类号:TD324 文献标志码:A

Classification, identification and monitoring of static-dynamic load hazard

sources in coal mine rock burst

DOU Linming^{1,2,3,} SUN Zhenyu^{2,4}, CAO Anye^{1,2,3}, MU Zonglong^{1,2,3,} GONG Siyuan^{1,2,3,} CAI Wu^{1,2,3,}MA Zhifeng^{2,4}, LI Jiazhuo⁵, ZHOU Kunyou⁵

(1. Jiangsu Engineering Laboratory of Mine Earthquake Monitoring and Prevention, China University of Mining and Technology,

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFC3004603);国家自然科学基金项目(52304197,52274098)

作者简介:窦林名(1963一),男,青海平安人,教授,博士,从事矿山压力、冲击矿压、采矿地球物理等方面的科研与教学工作。E-mail:lmdou@126.com 通讯作者:孙振于(1993一),男,河南鹿邑人,工程师,硕士研究生,从事煤矿冲击地压科研和技术服务工作。E-mail:ds23020177p32dk@cumt.edu.cn

Xuzhou 221116, China; 2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Xuzhou Hongyi Technology Development Co., Ltd., Xuzhou 221116, China; 5. School of Mining Engineering, Anhui University of Science & Technology,

Huainan, Anhui232001, China)

Abstract: The prevention and control of rock burst in coal mines must begin at the source, where classification identification and monitoring of static-dynamic load hazard sources are essential prerequisites for source control. Based on the superposition theory of static-dynamic loads triggering rock bursts, hazard sources and their action modes are summarized. Static load sources comprising 16 common types are classified into geological deposition attributes, tectonic structures and mining-induced stress concentrations; Their action modes include variation in critical rock burst stress due to coal-rock properties, strong dynamic loads generated by massive hard strata and fault movement, and elevated static stress in coal-rock masses caused by sedimentary microfacies. Dynamic load sources are divided into seismic wave loads, forced dynamic loads and blasting shock loads. Their action modes comprise instantaneous stress increase in coal-rock masses, reduced critical impact load under strong dynamic loads, and cumulative damage to coal-rock and support systems under prolonged dynamic loading. For identification of static hazard sources, a geological deposition static source identification method is proposed through in situ stress field inversion where mine-scale stress distribution is inverted and calibrated with field measurements to locate geological static hazard zones. A high-static-hazard source identification method is developed using stress field CT inversion technology where high static hazard zones are identified through large-scale periodic CT inversion. For identification of dynamic roof-layer hazard sources, the key stratum theory for mine tremors is proposed and a discriminant model and method for key tremor strata are established. For monitoring dynamic load hazard sources, an underground-ground integrated microseismic monitoring system is developed, overcoming the limitations of traditional microseismic monitoring, such as poor vertical positioning accuracy and difficulty in pinpointing dynamic load sources. This system significantly enhances the accuracy and sensitivity of microseismic monitoring. The effectiveness of above methods has been validated through field applications, providing valuable insights for source control strategies aimed at mitigating rockburst hazards. Key words: rock burst; static-dynamic load hazard sources; source classification; source identification; source monitoring

随着我国煤矿开采深度和强度的不断加大, 冲击矿压灾害防控形势面临着严峻挑战。近几十 年来,随着对煤矿冲击矿压防治技术的深入研究, 政府、企业及科技人员认识到冲击矿压防治须从 源头抓起,并取得了显著成果[1-3]。在冲击矿压源 头致灾机理方面,国内外学者在早期强度、能量、 刚度和冲击倾向性等理论基础上提出了三因素理 论^[4]、动静载叠加诱冲机理^[5]、扰动失稳理论^[6]、 蠕变失稳理论[7]、冲击启动理论[8]等,这些理论揭 示了冲击矿压孕育、演化、致灾过程和条件,为冲 击矿压源头防治奠定了坚实的基础。在冲击矿压 危险源头监测和辨识方面,目前应用范围较广的 监测方法包括钻屑法、应力法、微震法、地音法、 电磁辐射法等,判识方法则包括综合指数法^[9]、多 因素耦合法[10]及可能性指数诊断法[11]等;此外国 内外学者借助统计学、大数据和人工智能等技术 手段在传统监测方法监测数据基础上提出了多参

量综合监测技术[12]、冲击变形指数[13]、机器学习 冲击危险预测[14]、物理指标和数据驱动融合冲击 危险预测等技术方法[15],并取了良好的预警效果, 为冲击危险预测指出了新的研究思路和奠定了良 好基础。在冲击矿压危险源头防治措施方面,提出 了"区域先行、局部跟进、分区管理、分类防治"的 原则,在采掘布局上尽可能避免形成应力集中区; 近些年来我国学者提出"负煤柱"[16]、错层布置[17]、 无煤柱布置[18]和保护层开采[19.20]等区域优化技术 真正践行了冲击矿压源头治理的理念;在主动解 危方面,除常规的大直径钻孔、煤体爆破和顶板爆 破等技术外,提出了煤层顶板区域水力压裂[21]、 地面深孔爆破[22]和覆岩高位整层爆破卸压[23]等技 术解决了常规卸压手段无法处理高位顶板冲击危 险源头的问题。上述理论和技术方法切实指导和 推动了我国煤矿冲击矿压源头治理技术的进步。

煤矿冲击矿压防治必须从源头抓起,其中冲

击矿压动静载源头分类、辨识与监测是实现冲击 矿压源头治理的重要前提。针对动静载冲击危险 源头分类、辨识及监测问题,笔者基于动静叠加诱 冲机理,系统总结了冲击矿压的动静载致灾源头, 阐明了其对冲击矿压的控制作用,提出了动静载 危险源头辨识和监测方法,以期为冲击矿压源头 治理提供参考。

1 冲击矿压动静载源头分类

1.1 动静载叠加诱冲理论

根据能量准则,冲击矿压是煤体-围岩系统在 其力学平衡状态破坏时所释放的能量大于所消耗 的能量时产生的动力现象,可用式(1)表示:

$$\frac{dU_R}{dt} + \frac{dU_C}{dt} + \frac{dU_S}{dt} > \frac{dU_B}{dt}$$
(1)

式中: U_R 为围岩中储存的能量, U_C 为煤体中储存的能量, U_S 为矿震能量, U_B 为冲击矿压发生时消耗的能量。

煤岩体中储存的能量和矿震能量、冲击矿压 发生时消耗的最小能量均可以用应力表示。因此, 冲击矿压的发生需要满足如下条件,即:

$$\sigma_S + \sigma_d \ge \sigma_{bmin}$$

其中, σ_s 为煤岩体中的静载荷, σ_d 为矿震形成的动载荷, σ_{bmin} 为发生冲击矿压时的最小载荷。

也就是说,采掘空间周围煤岩体中的静载荷 与矿震形成的动载荷叠加超过了煤岩体发生冲击 矿压的临界应力时,煤岩体就会发生冲击矿压动 力灾害,即动静载叠加诱冲机理^[5],如图1所示。





图2为几种动静载叠加诱发冲击的类型,主要 分为三种类型。①低静载+强动载型:浅部煤层开 采时,采场围岩原岩应力较低,但由于坚硬顶板或 易活化断层存在, 矿震强度和频度很大, 长时间动 载作用下采场煤岩体和支护体累计损伤,直至一 次超临界动载与静载应力叠加超过临界载荷导致 煤体冲击破坏。另外,在强动载高加载速率下,煤 样的冲击倾向性比标准状态下更强,导致冲击临 界载荷降低,更易发生冲击矿压。②高静载+低动 载型:深部开采或强构造应力环境中,采场原岩应 力或工作面开采产生的应力集中很高,此时静载 应力水平已接近临界载荷,中低强度动载即可满 足动静载叠加诱冲条件,发生冲击矿压灾害。③高 静载+强动载型: 在深部开采、强构造应力、坚硬 顶板等因素共同存在的复杂环境中,采场周边静 载应力以及矿震动载应力均较高,极易满足动静 载叠加诱冲条件,发生冲击矿压灾害。



(2)

图 2 动静载叠加诱发煤岩冲击矿压的类型

Fig. 2 Classification of rockburst induced by the superposition of static and dynamic loads

1.2 冲击矿压的静载危险源

根据动静载叠加诱冲原理,冲击矿压是能量 聚集与释放和应力集中与转移、覆岩结构破断、断 层活化等动、静载源头叠加作用的结果,其危险源 头主要分为静载危险源和静载危险源两类。 根据煤矿冲击矿压事故的调查和统计分析, 控制冲击矿压的静载源头总体可分为三大类,分 别为地质沉积属性类、地质构造类和采掘应力集 中类,常见的共约16种危险源。如图3所示,地质 沉积属性类主要包含煤层开采深度、煤岩的冲击 倾向性、顶板岩层结构等;地质构造类主要包含断 层构造、煤层分叉合并、褶皱构造、火成岩入侵及 巨厚覆岩等危险源。采掘应力集中类包括区段煤 柱区、上下层遗留煤岩柱区、工作面停采线外错 区、切眼外错区、采掘面向采空区推进、煤层巷道 叠加、底煤、工作面来压与见方区域等危险源。

地质沉积属性类与地质构造类危险源是由地 层沉积及其运动产生的,每一种危险源都对冲击 矿压起着不同的作用。其作用方式主要体现在三 方面,①沉积环境不同导致煤岩的性质不同,使冲 击矿压发生所需的临界应力不同,如强冲击倾向 煤层发生冲击矿压所需的临界应力更小。②地层 沉积及运动产生巨厚坚硬岩层和断层等,巨厚坚 硬岩层破断、滑移和断层活化等运动过程会释放 强动载,易导致冲击矿压的发生。③地质沉积微相 的存在使其周边静载应力升高,该作用方式较普 遍。

采掘应力集中类危险源对冲击矿压的作用方 式相对单一,主要是工作面采掘后在其周边煤岩 体中产生的支承应力及其相互叠加应力。工作面 回采后超前移动支承压力集中系数一般为2.0~2.5, 巷道掘进后两侧的固定支承应力集中系数一般为 1.5~2.0,不同煤柱宽度条件下应力集中系数变化 较大,一般为1.5~3.0,在多种因素相互叠加条件 下,其应力集中系数甚至可达到5.0,所以采掘布 局不合理的情况下所造成的应力集中程度将远超 地质沉积属性及地质构造所产生的应力集中,是 诱发冲击矿压的关键源头。



图 3 冲击矿压的动静载危险源



1.3 冲击矿压的动载危险源

冲击矿压矿井的动载危险源主要有3种类型 ^[24],如图3所示。I类为震动波传播的动载,对冲击 矿压影响较大的主要有岩层运动和断层滑移产生 的动载。II类为顶板岩层破断和滑移、断层滑移、 煤岩体破裂时面力瞬间消失或减小产生的瞬间载 荷(受迫动载)。如图4所示,以顶板岩层破断为例, 顶板岩层破断将产生两类动载,其一,岩层破断弯 曲能量以震动波的形式释放,震动波传播到煤体 和支护体产生I类动载;其二,顶板断裂块体由于 断裂面应力消失或减小,将对煤体和支护体产生 瞬间动载荷,该动载为II类动载。III类为炸药爆炸 爆破中心高压气体产生的冲击动载。II类、III类动 载产生的同时,在远距离处将演变为I类动载。







动载危险源对冲击矿压的作用方式主要有以 下3种:①动载本身使煤岩体内应力瞬时升高,与 静载叠加诱发冲击矿压发生。②在强动载高加载 速率下,煤样的冲击倾向性比标准状态下更强,导 致冲击临界载荷降低,更易发生冲击矿压^[5]。③长 时间动载作用下采场煤岩体和支护体累计损伤, 使冲击临界载荷降低[25]。

2 冲击矿压动静载冲击危险源头辨识

2.1 基于地应力场反演的地质沉积静载危 险源辨识

在各类静载危险源中,采掘应力集中类危险 源由于是矿井开采形成的,位置和赋存情况清晰, 经过多年大量学者的研究,基本明确了其影响范 围和应力集中程度,并提出了多种判别方法,如综 合指数法、多因素耦合法和应力集中系数叠加法 等。但地质沉积属性类和地质构造类即地质沉积 危险源具备隐蔽性,现有技术手段尚不能全部探 明,这给矿井冲击矿压防治工作带来了很多风险。

地质沉积危险区一般地应力高于其他区域, 现有技术中,地应力测试可以在一定程度上对矿 井地应力场分布特征进行探测,但矿井有限几个 点的地应力测试数据无法准确的反应矿井地应力 场分布状态,可以构建矿井地应力场反演模型反 演矿井地应力场分布状态。首先根据矿区地质构 造分布特征、三维地震和钻孔勘探等资料由地层 从老到新的顺序,绘制相关层位顶底层面标高等 值线图,依次构建三维地质模型,如图5所示。然 后在三维地质模型和矿井岩石力学测试数据基础 上,利用多元线性回归方法,可以对矿井地应力场 进行反演,最后利用矿井地应力实测数据对反演 结果进行校正可以相对真实的量化矿井地应力场 分布特征^[26,27],可以在一定程度上揭示矿井地质 沉积危险区分布情况。







陕西某矿开采4煤层,煤层平均厚9.7m,倾角 0~8°,放顶煤开采,埋深800m~1000m,煤层鉴定 具有强冲击倾向性,评价具有强冲击危险性,矿井 开采期间发生多次冲击显现。图6和图7分别为该 矿最大水平主应力场和侧压系数分布反演结果, 由图可以看出最大水平主应力、侧压系数分布与 褶曲和断层分布具有明显的耦合关系。图中大巷 位置自2017年2月至2019年7月发生了5次冲击显 现,工作面巷道位置自2019年9月至2021年11月出 现了5次冲击显现,全部冲击显现位置和多数高能 矿震位于最大水平主应力和侧压系数高值区,验 证了地应力场反演方法辨识地质沉积危险区的可 行性。



图 6 陕西某矿最大水平主应力场反演结果

Fig. 6 Inversion results of the maximum horizontal





图 7 陕西某矿侧压系数反演结果



2.2 基于应力场 CT 反演的高静载危险源辨 识

应力场CT反演技术在过去十几年的研究和 应用过程被证明了可有效探测矿井应力场分布状 态,通过长期大范围的应力场CT反演可探明矿井 高静载冲击危险区。山东某矿三采区开采3煤层, 煤层平均厚度为8.0m,平均倾角为8°,放顶煤开采, 埋深为1110m~1280m,煤层鉴定具有强冲击倾向 性,评价具有中等冲击危险性,采区开采过程中发 生过多次冲击显现。利用应力场CT反演技术从 2016年至2020年每月一次持续对该矿三采区应力 分布状态进行了反演,部分结果如图8所示。通过 总结应力场反演结果,绘制出了三采区目前已探 明的高静载应力场平面分布图,如图9所示。由图 8和图9可以看出,三采区高应力区是不断转移变 化的,这是不同采掘阶段及采掘扰动引起的区域 应力场不断转移的结果,但对于某些特殊区域,如 上山大巷及其保护煤柱、向斜轴部和部分断层附 近区域经常存在应力集中,受工作面推采影响较小,可以推断这些区域为高静载冲击危险区。由图 9可知,三采区在采掘过程中发生的高能矿震和几次冲击显现分布与高静载冲击危险区之间具有高度耦合性,证明了高静载应力区冲击危险明显高于其他区域。图9中位于采区边缘的几次高能矿震和3302工作面中部的一次冲击事件未处于圈定的高静载冲击危险区内,这是由于这些区域位于采区边缘,未处于微震监测系统有效监测范围内, CT反演技术不能有效对这些区域进行应力场探测。



Fig. 8 Distribution characteristics of the static load stress field during different mining periods in the third mining area of a



图9 高静载冲击危险区示意图

Fig. 9 Schematic diagram of high static load rockburst hazard areas

2.3 基于矿震关键层理论的动载危险源头 辨识

在各类动载危险源中,顶板岩层运动所产生 的动载占大多数。根据关键层理论,采场上覆岩 层的运动主要是由几层关键层控制,对于煤矿矿 震而言具有类似的性质。很多研究表明,对某个 具体区域而言,上覆岩层中存在一层或一组坚硬 厚岩层,高能矿震主要是由该岩层运动产生的。 因此,借鉴关键层思想,提出"矿震关键层"的概念, 指煤层顶板中对矿震发生和分布起着控制作用的 岩层或岩层组^[28,29]。通过研究,矿震关键层主要有 两个特征,①矿震关键层是关键层,它的运移对 上覆岩层运动起着重要作用;②与其他关键层相 比,矿震关键层中积累了更多弹性能,其破断、运 动易形成高能矿震。

基于上述特征提出了矿震关键层判别模型, ①工作面充分采动时, 矿震关键层应为裂隙带上 方的第一层关键岩层(组);②处于非充分采动时, 矿震关键层应为裂隙区内厚度最大的关键岩层 (组)。因此,结合主关键层位置、采高Hm以及是 否处于充分采动等条件可以初步确定工作面上覆 矿震关键层的层位。矿震关键层判别流程如图10 所示,共分为五步。第一步,选取具有代表性的柱 状图; 第二步, 基于关键层理论计算出各关键层 位置; 第三步, 计算主关键层距煤层距离L; 第四 步,判断主关键层距煤层距离与裂隙带发育高度 之间的关系;第五步,判断矿震关键层,主要分为 四种情形,具体如图10所示。由于不同区域煤层 上覆岩层赋存状态不同,所以矿震关键层亦不相 同,这是不同工作面或者工作面不同回采时期冲 击机理不同的原因之一。



Fig.10 Flow chart of key stratum of mining-induced

seismicity

内蒙古某矿开采3-1煤层,平均倾角2°,平均 煤厚4.75m,平均埋深约700m。3102工作面为采区 内第二个工作面,处于非充分采动状态,工作面 宽300m左右,与上一工作面间留有35m煤柱,开 采该工作面时高能矿震频发,部分高能矿震诱发 了现场冲击显现,为矿井安全生产带来了巨大的 影响,部分高能矿震统计如表1所示。

表1 3102 工作面部分高能矿震统计

 Table 1
 Statistics of high-energy microseismic events in the 3102 working face

5102 Working face							
序号	日期	能量 (J)	煤层上方距 离(m)	是否 诱冲			
1	1-07	2.7E+05	5	否			
2	1-09	1.2E+06	0	否			
3	1-24	7.6E+05	27	否			
4	1-26	3.9E+06	121	否			
5	2-14	1.5E+05	0	否			
6	3-03	1.0E+07	98	是			
7	3-10	6.6E+05	33	否			
8	3-13	9.8E+05	66	否			
9	3-22	9.5E+05	47	否			
10	3-26	2.0E+06	36	否			
11	4-02	1.3E+06	9	否			
12	4-08	3.3E+07	72	是			
平均距离(m) 42.83							

图11为3102工作面附近的柱状图(简化),按 照矿震关键层判别流程对该区域矿震关键层进行 了判别。经判别,距煤层约36m~98m位置的亚关 键层二为矿震关键层,表1中高能矿震震源平均距 煤层距离为42.83m,考虑震源定位误差,矿震关 键层判别结果与现场监测结果基本一致。

柱状图	层厚/m	岩层	关键层判别		
	115	砂岩组	亚关键层三		
	25	粉砂岩			
	62	中砂岩	亚关键层二 矿震关键层		
	4	粉砂岩			
	3	泥岩			
	9	粉砂岩			
	4	细砂岩			
	16	中砂岩	亚关键层一		
	5	3-1煤层			
图 11 柱状图及矿震关键层判别					

Fig.11 Columnar diagram and discrimination of key strata of mine earthquake

3 冲击矿压危险致灾源头监测

3.1 冲击静载源头监测

在煤矿静载应力场监测中钻屑法和应力监测 法被广泛应用,能够直观的反应煤体内的应力水 平。钻屑法是以钻粉率指数和钻进过程的动力效 应为基础确定冲击危险的方法,施工较为便利, 能够较准确的获取不同位置煤体受力特征,但该 方法耗时、耗力、探测效率低,施工时存在一定危 险,且易受人为操作、断层、夹矸、含水等影响。 应力监测法可以直接监测煤体内应力变化趋势, 能够长时间不间断监测,但该方法难以适应脆性 煤体刚度的变化、变形和断裂等特性,很多情况 下监测效果较差。上述两种监测方式为点监测, 监测空间有限,难以满足日益增长的安全需求。

震动波层析成像技术,又称应力场CT反演技 术,其原理是震动波在煤岩体中传播速度与煤岩 体中的应力呈正比^[30]。通过反演可以确定震动波 速场的分布特征,从而获取应力场分布特征。根 据反演所采用的震源不同,该技术可分为主动CT 技术和被动CT技术。主动CT技术采用人工激发震 源,震源位置可控和坐标精确,反演出的应力场 区域可控、分布精细且可靠,但施工成本相对较 高; 被动CT技术采用矿井采掘过程自发矿震为震 源进行反演,具有实施便捷的优点,但震源位置、 能量和数量具备不确定性,对技术人员要求较高。 针对上述问题,近些年来团队开发了主被动双源 震动波一体化应力场监测技术,采用双触发机制 集成了主动和被动CT技术,既可以单一使用其中 一种模式,也可以混合使用,具备较强的实用性 和先进性。该技术通过在工作面两巷高密度布置 传感器,实现了工作面范围内震源的高精度定位 和微小震动的超强感知,基于监测到的大量震动 数据以及人工补偿震源可以做到实时、连续性的 应力场反演分析,从而确定冲击静载危险源头分 布和演化规律, 克服了传统钻孔应力监测和钻屑 监测范围小,劳动强度高、监测效果不佳的缺点。 图12(a)为陕西某矿主被动双源震动波一体化应 力场监测系统布置示意图,图12(b)为一次应力 场反演结果,由图可以看出应力集中区主要分布 在工作面超前15~70m运输巷侧多条巷道交汇处, 应力场反演结果与现场情况吻合较好。



(a) 主被动双源震动波一体化应力场监测系统布置示意



(b) 主被动双源震动波一体化应力场监测结果
 图 12 主被动双源震动波一体化应力场监测技术
 Fig.12 Integrated stress field monitoring technology using active and passive dual-source seismic waves

3.2 冲击动载源头监测

地音法、电磁辐射法和微震法是目前冲击矿 井最常用的动载监测方法。地音法主要监测采掘 工作面局部发生的能量小于100J的、频率大于 150Hz的地音现象,通过地音信号获取能量聚集前 兆,一般以班次为时间段,以单位时间内地音的 能量和频次变化率为指标判别冲击危险。电磁辐 射法通过监测煤岩体破坏过程中产生的电磁辐射 信号判别冲击危险,有移动式和在线式两种方式, 一般以电磁强度和脉冲两种指标判别冲击危险。 上述两种动载监测方式易受背景噪音干扰影响, 易产生误判,对技术人员水平要求较高。

微震法记录微震波形,通过记录、分析计算微 震发生的时间、震源的坐标、震动释放能量等参 数来确定煤岩体破断的时间、位置和释放的能量, 以此为基础,进行冲击危险的判别。微震监测方 法可对全矿井范围进行监测,是一种区域性监测 方法。传统微震监测技术将传感器布置在井下巷 道内,受井下空间限制无法形成全覆盖的立体空 间监测台网,存在着垂直方向定位精度差和冲击 动载源头找不准的弊端。近些年来团队在井下微 震监测技术基础上开发了井地一体微震监测技术, 在地面和井下联合布置微震传感器,地面监测单 元数据采用无线传输,井下监测单元数据采用有 线传输,采用4\5G通讯技术、井上下架构融合、高 精度授时和异构数据融合等技术将井上下监测网 络融合一体,大幅度提高了微震监测精度和感知 能力,系统示意图如图13所示。





表2为在甘肃某矿依次采用300g、450g、600g、 750g、3000g炸药爆破震源对井地一体微震监测系 统定位精度进行验证的结果,现场验证表明系统 垂直和三维定位精度均小于15m。图14为采用井 下微震监测系统定位震源和井地一体微震监测系 统定位震源分布情况,由图可以看出井地一体微 震监测技术的应用大幅度提升了微震震源垂直定 位精度,这对矿井找出动载冲击危险源头、研究 冲击致灾机理和防治冲击矿压具有重要意义。此 外,三维立体式空间监测台网的构建,大幅提升 了微震监测台网覆盖率和对矿井远场采空区、高 位顶板、低位底板和独头掘进巷道等复杂环境下 的微震感知能力。

表 2 井地一体微震监测技术定位精度测试结果 Table 2 Positioning accuracy test results of integrated underground-ground microseismic monitoring system

underground-ground interoseisine monitoring system						
编号	装药量/g	垂向误差/m	三维误差/m			
1	300	1.88	8.97			
2	450	3.02	9.87			
3	600	6.64	13.89			
4	750	8.29	10.9			
5	3000	0.64	7.35			



图 14 井地一体和井下微震监测系统定位震源对比 Fig.14 Comparison of focal location accuracy between the underground-ground integrated and underground microseismic monitoring systems

4 结论

总结了冲击矿压的动静载危险源及作用方式, 其中静载危险源主要分为地质沉积类、地质构造 类和采掘应力集中类共16种常见危险源,动载危 险源主要分为震动波动载、受迫动载和炸药冲击 动载3类。

提出了基于地应力场反演的地质沉积静载危险源辨识、基于应力场CT反演的高静载危险源辨识和基于矿震关键层理论的动载危险源头辨识方法。

开发了主被动双源震动波一体化应力场监测 技术,集成了主动和被动CT技术,实现了冲击静 载危险源头实时、连续性的应力场反演分析。

开发了井地一体微震监测技术,克服了传统 微震监测技术垂直定位精度差和冲击动载源头找 不准的弊端,大幅度提高了微震监测精度和感知 能力。

参考文献(References):

- 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.
- [2] 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,CA0 Anye,et al. Present situation and problems of coal mine roek burst prevention and control in China[]]. Joural of China Coal Society, 2022,47(1):152-171.
- [3] 《关于加强煤矿冲击地压源头治理的通知》(发改能源
 (2019)764 号)[S].北京:国家煤矿安监局,2019.
- [4] 齐庆新,刘天泉,史元伟,等.冲击地压的摩擦滑动失稳机理
 [J].矿山压力与顶板管理,1995,3(4):174-177.
 QI Qingxin, LIU Tianquan, SHI Yuanwei, et al. Mechanism of friction sliding destability of rockburst[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1995, 3(4): 174-177.
- [5] 窦林名,何 江,曹安业,等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其 防治[J]. 煤炭学报,2015,40(7):1469-1476.

Dou Linming,He Jiang,Cao Anye,et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(7):1469-1476.

- [6] 潘一山.煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用[J]. 煤炭学报,2018,43(8): 2091-2098.
 PAN Yishan. Disturbance reponse instability theory of rockburst incoal mine[J]. Journal of China Coal Socety,2018,43(8):2091-2098.
- [7] 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,KOUAME K. J. A, 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.
- [8] 潘俊锋,丁宇,毛德兵,等. 煤矿开采冲击地压启动理论[J]. 岩石 力学与工程学报,2012,31(03): 586-596.
 PAN Junfeng,DING Yu,MAO Debing,et al. Theory of rockburst start-up during coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(3):586-596.
- [9] 窦林名,何学秋.煤矿冲击矿压的分级预测研究[J].中国矿业 大学学报,2007,36(6):717-722.
 DOU Linming, HE Xueqiu. Technique of classification forecastingrock burst in coal mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(6):717-722.
- [10] 牟宗龙,窦林名,巩思园,等.煤矿井下冲击矿压分区分级预测 方法[P]. 江苏省: CN103256073B,2015-07-29.
- [11] 姜福兴,冯宇,刘晔. 采场回采前冲击危险性动态评估方法研究
 [J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(10):2101-2106.
 JIANG Fuxing,FENG Yu,LIU Ye. Dynamic evaluation method for rockburst risk before stopping[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(10):2101-2106.
- [12] 窦林名,周坤友,宋士康,等.煤矿冲击矿压机理、监测预警及防 控技术研究[J].工程地质学报,2021,29(04):917-932.
 Dou Linming, Zhou Kunyou, Song Shikang, et al. 2021. Study on The Occurrence Mechanism, Monitoring and Prevention Technology of Rockburst in Coal mines[J]. Journal of Engineering Geology, 2021,29(04):917-932.
- [13] CAI Wu, DOU Linming,Si Guangyao,et al. A new seismic-based strain energy methodology for coal burst forecasting in underground coal mines[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2019,123,104086.
- [14] 陈结,高靖宽,蒲源源,等. 冲击地压预测预警的机器学习方法[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2021,3(1):013026.
 CHEN Jie, GAO Jingkuan, PU Yuanyuan, et al. Machine learning method for predicting and warning of rockbursts[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(1):013026.
- [15] 曹安业,刘耀琪,杨旭,等.物理指标与数据特征融合驱动的 冲击地压时序预测方法[J].煤炭学报,2023,48(10): 3659-3673.
 CAO Anye, LIU Yaoqi, YANG Xu et al. Physical index and data

CAO Anye, LIU Yaoqi, YANG Xu et al. Physical index and data fusiondriven method for coal burst prediction in time sequence[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(10): 3659–3673.

- [16] 王志强,乔建永,武 超,等.基于负煤柱巷道布置的煤矿冲击地 压防治技术研究[J]. 煤炭科学技术,2019,47(1):69-78.
 WANG Zhiqiang,QIAO Jianyong,WU Chao,et al.Study on mine rock burst prevention and control technology based on gateway layout with negative coal pillars[J]. Coal Science and Technology,2019,47(1):69-78.
- [17] 郭晓强,窦林名,徐必根,等. 邻近采空区巷道外错布置防治冲击地压技术[J]. 煤炭科学技术,2014,42(2):1-5.
 GUO Xiaoqiang,DOU Linming,XU Bigen,et al. Technology of Preventing Rock Burst by Lateral Layout Roadway Near Goaf[J].
 Coal Scienceand Technology,2014,42(2):1-5.
- [18] 何满潮.无煤柱自成巷开采理论与110工法[J].采矿与安全工程 学报,2023,40(05):869-881.

He Manchao. Theory and engineering practice for non-pillars mining with automagical entry formation and 110 mining method[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2023,40(05):869-881.

- [19] 吴向前,窦林名,吕长国,等.上解放层开采对下煤层卸压作用研 究[J].煤炭科学技术,2012,40(03):28-31+61.
 Wu Xiangqian, Dou Linming, Lv Changguo, et al. Study on depressurization effect of mining in upper liberated layer on lower coal seam [J]. Coal Science and Technology,2012,40(03):28-31+61.
- [20] 姜福兴,刘 烨,刘 军,等.冲击地压煤层局部保护层开采的减压 机理研究[J].岩土工程学报,2019,41(2):368-375.

Jiang Fuxing, Liu Ye, Liu Jun, et al. Pressure-releasing mechanism of local protective layer in coal seam with rock burst [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(2):368-375.

- [21] 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(02):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.
- [22] 国家矿山安全监察局内蒙古局.内蒙古鄂尔多斯市吴盛能源石 拉乌素煤矿圆满完成世界首例煤矿地面深孔预裂爆破工程 [EB/OL]. https://zyny.org.cn/newsinfo/2901135.html.
- [23] 郝宪杰,孙希奎,唐忠义,等.覆岩高位整层爆破卸压"人造预 裂层"源头防治冲击地压技术体系及应用[J].煤炭学报,2024,49(3):1318-1331.

HAO Xianjie, SUN Xikui, TANG Zhongyi, et al. Technology system and application of "artificial prefracture layer" by high level whole layer blasting for pressure releasing to source prevention and control of rockburst[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1318–1331.

- [24] 何江.煤矿采动动载对煤岩体的作用及诱冲机理研究[D].中国 矿业大学,2013.
- [25] 周坤友,窦林名,曹安业,等. 矿震诱发高应力巷道厚顶煤动力 失稳机制[J]. 煤田地质与勘探,2024,52(10):25-35.
 ZHOU Kunyou,DOU Linming,CAO Anye,et al. Mechanisms behind mine earthquake-induced dynamic instability of thick top coals in high-stresses roadways[J]. Coal Geology & Exploration,2024,52(10):25-35.

- [26] Zhang J, Cheng X, Qiao W, et al. Risk Assessment of Rockburst with a LS-FAHP-CRITIC Method: A Case in Gaojiapu Coal Mine, North of China[J].Geofluids, 2022, 2022.
- [27] Cheng X, Qiao W, Dou L, et al. In-situ stress field inversion and its impact on mining-induced seismicity[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2023,14(1): 176-195.
- [28] 曹晋荣.巨厚覆岩型矿震发生机理与致灾机制研究[D].中国矿 业大学,2023.
- [29] 窦林名,曹晋荣,曹安业,等.煤矿覆岩矿震关键层及其破断释能机制[J].煤炭学报,2025,50(01):180-192.
 [29] DOU Linming,CAO Jinrong,CAO Anye, et al. Key strata of mining-induced seismicity in overburden rocks in coal mines and the energy-releasing mechanism of its fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2025,50(01):180-192.
- [30] 巩思园,田鑫元,郑有雷,等.弹性波 CT 反演识别煤岩体空区实验研究[J].采矿与安全工程学报,2020,37(04):759-766.
 GONG Siyuan1,TIAN Xinyuan1,ZHENG Youlei, et al. Empty area recognition technology of coal and rock mass by elastic wave ct inversion[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2020,37(04):759-766.