

基于波速场与应力场的硬煤岩冲击危险性评价

贾永福¹, 刘伟建¹, 张正宇¹, 王浩楠¹, 董森森²

(1. 中原工学院建筑工程学院, 河南 郑州 451191;

2. 安岩智能科技(常州)有限公司, 江苏 常州 213000)

摘要 目的: 为解决硬煤矿开采过程中对硬煤岩的冲击危险性评价不准确的问题, 通过对硬煤岩波速和应力的试验研究, 分析硬煤岩在单轴加载过程中应力场和波速场的变化规律与其冲击危险性之间的关系。方法: 通过单轴压缩试验与微震监测相结合, 引入了波速阻尼系数这一参数, 将波速场与应力场进行动态和静态联合, 以评估硬煤岩的冲击危险性。结果: 研究表明, 基于波速场和应力场的冲击危险性评价方法对硬煤岩内部高应力区域的监测和灾变预警具有较高的评估准确性。结论: 对硬煤岩的波速场和应力场进行联合监测, 对其冲击危险性评价是非常必要的。

关键词 波速场; 应力场; 单轴加载试验; 冲击危险性评价

基金项目: 国家自然科学基金项目(项目编号: 52104157); 张家港市科技计划项目(项目编号: zkcxy2112)。

中图分类号: TD8

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)10-0004-03

1 研究背景

我国煤炭资源需求日益增长, 地下开采活动不断向地球深处延伸。就煤炭开采领域而言, 全国范围内已有超过 50 对矿井的开采深度突破了 1 000 m, 而最深的矿井更是达到了惊人的 1 500 m^[1]。随着我国煤炭开采进入深部区域, 对于是否发生冲击地压进行危险性评价是进行冲击地压防治的基础性工作^[2]。目前, 煤矿冲击地压的治理方法主要有: 煤层应力监测、声发射监测、震动波主被动 CT 反演等^[3]。这些方法在煤矿冲击地压预警治理中都发挥了很多作用, 然而采用单一指标存在着一些不可避免的缺陷, 比如监测预警不准确等。李宝富等^[4]的研究表明, 水平应力是导致底板冲击地压的主要因素, 提出了水平应力的计算方法; 窦林名等^[5]为了对冲击地压进行有效防治, 采用纵波波速确定冲击危险性, 建立了冲击危险性动态预测评价的震动波 CT 探测技术; 邓志刚等^[6]通过循环加载的实验研究了不同冲击倾向性煤岩纵波波速与应力之间的相关关系。并且, 形成了较为完整的冲击危险性评价理论体系; 窦林名等^[7]在冲击地压研究中提出了综合指数法; 邓志刚^[8]应用三维地应力场反演技术进行相关研究, 综合考虑结构应力、采动影响等, 实现了对采集区域的冲击危险评价。

依据硬煤岩体的内部应力与微震前兆信息特征参数的相互关系, 结合实验室试验来说明“震动波波速场—应力场”联合监测预警技术在园子沟煤矿上应用

的可靠性, 最终将其应用到园子沟煤矿 1012102 工作面的监测上, 从而实现煤矿开采过程中对硬煤岩冲击危险性特征的连续不间断监测, 并以此建立冲击危险性评价体系。

2 综合波速与应力场的冲击危险性评价方法

2.1 应力场监测原理

冲击危险性监测的核心问题在于认识其根本: 即冲击问题实质上源自岩体内部的应力情况。因此, 对岩体的冲击性进行较为准确的危险性评价, 关键在于应力的监测。钻屑监测、微震监测等方法就是通过监测相应的物理量, 进而间接地反映出煤岩体当前的 TD8 应力状态, 并根据应力变化趋势准确评估不同区域的冲击危险性。

传统的矿震活动分布图以不同符号标识矿震发生位置及其对应的能量级别, 这种表达方式直观形象, 有利于学者进行主观的定性分析。然而, 由于这种方式缺乏量化指标, 它并不适用于定量分析比较, 这在一定程度上限制了其在矿震研究中的应用范围。

本文将监测区域划分为 100 个单位为 1 的立方体网格单元, 采用公式(1)计算出每个网格的应力, 分别将网格沿着 y 轴方向扫过的区域进行应力叠加, 将叠加后的应力除以 100 求平均应力, 以此生成二维应力场云图。

$$\varepsilon_E = \log_{10} \left(\frac{\sum E_n}{VT} \right) \quad (1)$$

E_n 为落入某个网格内第 n 个矿震的能量 (J)； V 为该网格体积 (mm^3)； T 为统计时间 (ms)。

2.2 波速场 CT 探测原理

基于震动波波速反演的硬煤岩冲击危险评价方法是近年来备受关注的研究热点之一。该方法建立在硬煤岩受应力影响其内部震动波传播速度发生改变这一理论基础之上。具体而言，硬煤岩体所受应力越高，其内部震动波的传播速度就越快^[9]。

利用全息声发射信号分析仪，可采集硬煤岩中的震动波信号，通过检波器与震源之间的距离 L 和震动波的初至传播时间 T ，采用 *SIRT* 技术即可反演区域内的慢度 $S_{(x,y,z)}$ 分布，进而得出波速 $v_{(x,y,z)}$ 分布。

将监测区域划分为 100 个单位为 1 的立方体网格单元，假设每个小单元中存在 i 条射线路径， j 是其中的一条路径，以 l_j 表示此射线在网格内的长度， L_j 将作为此射线的总长度， T_j 表示此射线的传播时间，那么此射线通过网格单元的平均时间为 (2)：

$$t_j = T_j \frac{l_j}{L_j} \quad (2)$$

此单元内所有射线的总时间为 (3)：

$$T_i = \sum_{j=1}^i t_j \quad (3)$$

i 条射线路径的总距离为 (4)：

$$L_i = \sum_{j=1}^i l_j \quad (4)$$

该单元内的平均慢度为 (5)：

$$S_i = \frac{T_i}{L_i} = \frac{\sum_{j=1}^i T_j}{\sum_{j=1}^i l_j} \quad (5)$$

则该单元内的平均波速为 (6)：

$$v_i = \frac{1}{S_i} \quad (6)$$

每一个单元格内的平均波速分别沿着 y 轴方向扫过的区域进行波速叠加，将叠加后的波速除以 100 求均波速，并以此数据生成二维波速云图。

利用上述方法，可反演出分析区域内震动波速的分布图像，从而划分出硬煤岩冲击危险性区域，达到对硬煤岩的不同区域进行冲击危险性评价的目的。硬煤岩波速场反演预警成效的好坏，取决于检波器台网的布置优化、到时算法的优化、波速迭代算法的选择、反演数据的筛选及反演可信区的识别等。

2.3 冲击危险性评价模型

Gardner 公式作为一个经验公式，建立了地震纵波速度与地震波传播所经过的岩石体积密度之间的关系。在已知一定条件下，煤岩密度与其内部应力成正比(7)、应力与波速成正比(8)，利用 Gardner 公式，通过引入波速阻尼系数 P 将波速场与应力场联系起来，并通

过波速阻尼系数分布云图对硬煤岩的冲击危险性建立更为准确的评价体系。

Gardner 公式的原始形式为 (9)：

$$\rho \propto \sigma \quad (7)$$

$$\sigma \propto v \quad (8)$$

$$\rho = av^b \quad (9)$$

$$P = \log_{10} \frac{\sigma}{v} \quad (10)$$

上面关系式中， a 、 b 为常数； σ 为应力； v 为波速； P 为波速阻尼系数。利用 (10) 这个线性关系式来实现波速场与应力场的联合转化，从而建立波速阻尼系数硬煤岩冲击危险性评价体系，并根据波速阻尼系数分布云图，实现对硬煤岩的实时冲击信息监测预警，从而降低煤岩开采过程中冲击地压等灾害带来的人身伤害和财产损失。

3 实验室试验

3.1 硬煤岩试样制备及硬煤岩波速测试装备

硬煤岩试样采取于陕西西子沟煤矿，本次试验选择六块加工制成 $100 \times 100 \times 100$ mm 的正方体试样。总结煤岩体纵波波速与煤岩应力实验的经验，选取试验设备，本次试验主要采用的设备有 2 套：用于单轴压缩的 YAW6206 微机控制电液伺服压力试验机、用于采集波形数据的北京软岛时代有限公司 8 通道 DS5-8B 全息声发射信号分析仪。为了解煤岩的强度，在正式做单压试验之前，对岩体强度进行测试，测得煤试样的抗压强度为 20 MPa。压力机的试样加载速率设定为 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，声发射采集煤样的采样频率设置为 2.5 MHz。

3.2 试验过程

为了更好地呈现单轴压缩试验下煤岩体的破裂状态，对煤岩进行了卸压处理，在岩体中心位置做直径为 10 mm 的卸压孔。对编号 MY-1 到 MY-6 的 6 块煤岩试块进行单轴压缩，直至煤岩破裂。本次试验，将微震检波器探头耦合在硬煤岩试块表面，试验检波器坐标位置为 (0, 50, 10) (0, 50, 50) (50, 0, 10) (50, 100, 90) (100, 50, 90) (100, 50, 50)。

使用 DS5-8B 声发射设备实现对声发射信号数据的接收、采集、分析处理、存储与输出等。试验结束，将测试后的数据文件通过计算机软件进行细致化处理，然后对破裂煤岩试块震动波波速场和应力场进行分析，基于此对冲击危险性进行评价。

3.3 试验结果处理分析

伺服压力试验机依次对编号 MY-1 到 MY-6 的煤岩试块进行单压至煤岩破裂，MY-3 试块沿着泄压孔产生

一条较为完整的断裂带,由于MY-3试块压裂效果较好,因此选择其产生的试验数据进行数据分析。声发射设备采集到的MY-3煤样试块破裂信号,从压力试验机开始施压到煤岩试块破裂一共持续约320 s,煤岩试块破裂产生的信号和破裂特征明显。

在压力试验机加载速率为 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的MY-3煤岩试块共监测到1364个AE(Acoustic Emission)事件并集中分布于稳定与非稳定塑性阶段,其AE事件数量的峰值位于临近破坏阶段,且高能量AE事件主要集中在穿过钻孔的破裂面上。

使用surfer软件,将经过处理后的实验数据进行应力场和波速场的绘制,并将相应点位微震事件的波速与应力通过Gardner公式进行转化,最终形成波速阻尼系数 P 的参数云图。

通过MY-3煤岩试块的波速场、应力场云图对比,可以明显看出MY-3硬煤岩试块的高波速场区、高应力场区基本一致,并且在实验过程中硬煤岩的高波速区域发生破裂,沿着泄压孔所在的界面形成一条断裂带,该断裂带所处区域与MY-3煤岩试块得出的应力云图高应力区域和波速云图高波速区域基本一致。单轴加载试验结果表明,在单轴加载的试验条件下,硬煤岩试样的波速场与应力场具有显著的同步变化特征。

通过波速场与应力场的联合,生成波速阻尼系数 P 的分布图。不难发现,波束阻尼系数 P 的分布图对于高冲击危险性区域的显示体现出了较高的适配性, $P \geq 1.6$ 的危险区域集中分布在泄压孔周围,并且 P 的分布云图呈现出一条带状区域分布,表现出梯度递减的态势,即由高冲击危险区域向低冲击危险性区域梯度递减。因此,基于波速场与应力场的硬煤岩冲击危险性评价是有效的。

4 工程实践

4.1 工程概况

1012102工作面是园子沟煤矿在101盘区布置的第三个综放工作面。该工作面位于101盘区东翼,工作面北部为1012101工作面,东部为101盘区边界保护煤柱,南部紧邻101盘区1012104工作面,西部紧邻铁路保护煤柱。工作面倾向长度200m(实体煤),走向长度2570m,可采长度1954m,工作面面积 0.51 km^2 ,可采面积 0.39 km^2 。工作面内煤层主要受 X_4 向斜影响,在向斜的影响下,工作面回采区域内沿走向总体呈“V”型起伏状,回风巷侧外段煤层起伏频繁,工作面煤层倾角 $0^\circ \sim 12^\circ$,煤层底板标高586~691m,最大高差105m。

4.2 监测预警

在开采过程中,对1012102工作面进行实时监测,最终形成波速阻尼系数 P 的云图,通过云图可知,在开采过程中的采矿区的波速阻尼系数始终要高于未开采区域,并且波速阻尼系数 P 云图由开采部位向未开采部位呈现梯度下降的趋势,而当开采区域内的波束阻尼系数达到1.6左右时,则需要停止煤矿开采,对其进行泄压处理,待波束阻尼系数 P 回归正常之后再进行开采活动。

5 结论

1. 综合考虑应力积聚效应和波速变化,提升冲击危险性评价精度。传统的冲击危险性评价方法主要依靠应力监测,但仅考虑应力因素难以准确反映岩体受力状态。研究表明,硬煤岩体在受力过程中,其波速也会发生明显变化。因此,将波速变化纳入评价指标体系,能够更全面、准确地评估冲击危险性。

2. 震动场、应力场双云图快速识别冲击危险区。基于震动场和应力场的双云图快速识别方法,通过对两类信息的综合分析,能够快速判定冲击危险区域,为现场监测预警提供直观、高效的判定依据。但影响冲击危险性的因素是多方面的,基于波速场和应力场的波阻抗指标是一种潜在的冲击危险性评价指标,其应用价值尚需大量试验与工程实例的检验,以确保其能够有效指导工程实践。

参考文献:

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,16(16):2803-2813.
- [2] 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(02):205-213.
- [3] 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.
- [4] 李宝富,任永康.巷道底板冲击地压诱发机理及影响因素[J].地下空间与工程学报,2016,12(05):1226-1230.
- [5] 窦林名,蔡武,巩思园,等.冲击危险性动态预测的震动波CT技术研究[J].煤炭学报,2014,39(02):238-244.
- [6] 邓志刚,王宏伟,蒋建军,等.不同冲击倾向性煤岩纵波波速与应力相关关系研究[J].煤矿安全,2020,51(11):24-28.
- [7] 窦林名,贺虎,何江,等.冲击危险性评价的相对应力集中系数叠加法[J].煤炭学报,2018,43(02):327-332.
- [8] 邓志刚.基于三维地应力场反演的宏观区域冲击危险性评价[J].煤炭科学技术,2018,46(10):78-82.
- [9] 巩思园.矿震震动波波速层析成像原理及其预测煤矿冲击危险应用实践[D].徐州:中国矿业大学,2011.