

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508488

基于电磁矢量空间特征的煤样损伤时空演化趋势监测方法*

杨 桢 冯 丰 李 鑫 张钧博 张翘楚 刘昊原

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院 葫芦岛 125105)

摘要:煤岩动力灾害的产生与煤体损伤状态关系密切,为实现实时监测煤体内部裂纹发展趋势,构建基于等效电磁辐射源的受载煤体内部裂隙定位模型,研究受载煤体裂隙发展监测方法及其求解算法,利用单加载实验分析煤样产地、加载速率对所提裂隙发展监测方法效果的影响并验证其普适性。结果表明,受载煤体电磁辐射来源有电型源与磁型源两种,二者的共同作用使煤体内部裂纹扩展与闭合时产生电磁辐射,基于此构建的带电裂隙的等效电磁辐射场源模型可用于煤体内部损伤监测;利用三轴磁通门传感器可构建受载煤样电磁辐射监测阵列,其非共面布置方式较共面布置方式在缓解误差放大效应上更有利;联合路径规划算法(BFGS-integrated pathfinding strategy, BIPDS)对典型多峰函数的求解精度提升至传统类牛顿寻优算法的10倍以上,标准差降低约99%,为所提基于垂直距离误差的辐射源定位模型提供了算法支撑;煤样损伤监测模型所得的贯通裂纹倾角为78°,其空间位置与实际裂纹分布基本相同,不同实验条件下电磁辐射合成矢量强度变化趋势基本一致,煤体产地、加载速率并不会影响模型监测效果,模型监测效果良好且具有一定普适性。研究成果有利于进一步探究受载煤体损伤发展机理,可为煤岩动力灾害防治提供技术支持。

关键词:煤岩动力灾害;电磁辐射;裂隙发展;损伤监测;BIPDS算法

中图分类号: TN972+.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Monitoring method for spatiotemporal evolution trend of coal sample damage based on electromagnetic vector space features

Yang Zhen Feng Feng Li Xin Zhang Junbo Zhang Qiaochu Liu Haoyuan

(School of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: The occurrence of coal-rock dynamic disasters is closely related to the damage state of coal. To achieve real-time monitoring of the crack development trend within coal underload, a localization model for internal fractures based on an equivalent electromagnetic radiation source is constructed. This study explores a monitoring method for fracture development in loaded coal and its corresponding solution algorithm. Additionally, a uniaxial loading experiment is conducted to analyze the effects of coal sample origin and loading rate on the proposed monitoring method, thereby verifying its general applicability. The results indicate that the electromagnetic radiation (EMR) generated by loaded coal originates from both electric-type and magnetic-type sources. The combined effects of these sources contribute to EMR emission during the expansion and closure of internal cracks in the coal. The constructed equivalent EMR source model for charged fractures can be utilized for monitoring coal damage. By employing a triaxial fluxgate sensor, an EMR monitoring array for loaded coal samples can be established. The non-coplanar arrangement of the sensors proves more effective than the coplanar configuration in mitigating error amplification effects. The BFGS-integrated pathfinding strategy (BIPDS) enhances the accuracy of solving typical multimodal functions by more than tenfold compared to traditional algorithms, while reducing the standard deviation by approximately 99%, thereby providing algorithmic support for the proposed radiation source localization model based on vertical distance error. The fracture monitoring model determines a through-crack inclination angle of 78°, with its spatial position closely matching the actual crack distribution. Under different experimental conditions, the variation trends of the synthesized EMR vector intensity remain

收稿日期: 2025-06-21 Received Date: 2025-06-21

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51604141, 51204087)、辽宁省教育厅科技创新团队项目(LJ222510147002)、辽宁省应用基础研究计划项目(2023JH2/101300138)资助

consistent, indicating that coal sample origin and loading rate do not affect the monitoring performance. The method demonstrates reliable monitoring effectiveness and general applicability. These findings contribute to understanding the damage evolution mechanism of loaded coal and provide technical support for advancing research on the prevention and control of coal-rock dynamic disasters.

Keywords: coal-rock dynamic disasters; electromagnetic radiation; fracture development; damage monitoring; BIPDS algorithm

0 引言

随着煤矿开采深度的增加,采掘空间结构越发复杂,煤与瓦斯突出等煤矿动力灾害尤为严重,极易造成重大安全生产事故^[1]。煤岩动力灾害产生时常伴随深部煤层内损伤区域的集聚与扩大^[2],其引发的煤体结构失稳是此类灾害发生的根源^[3]。因此,明确煤体受载破裂过程中的损伤发展规律是保障煤矿安全生产的重大科学问题之一。

通常煤体的损伤与其内部微裂隙萌生与扩展密切相关^[4],因此分析受载煤体中裂隙特征演化规律有助于从根本上揭示煤岩动力灾害的来源与传播路径,进而采取合理的防治措施。近年来,众多学者采用室内试验法、数值模拟等方法对受载煤体内部裂隙演化特征开展了大量研究,并取得了一定的成果。Liang 等^[5]利用 RFPA3D 软件再现了翼裂纹和壳状裂纹的扩展过程,提出了均质度是影响裂纹扩展路径的关键因素。Jing 等^[6]实验研究了不同加载速率下煤体的力学特性参数和损伤模式,阐明了裂纹扩展特性和加载速率之间的内在相互作用。Hao 等^[7]研究了静态轴向预应力和加载速率对煤样动态抗拉强度和裂纹扩展特性的影响,结果表明随着静态轴向预应力的增加,煤样的平均动态抗拉强度先增加后降低。Sun 等^[8]分析了不同层理面参数对模式 II 主导载荷下煤裂纹扩展的影响,论证了层理角、强度和弹性模量对煤的裂纹发展特性有显著影响。Wang 等^[9]利用分离式霍普金森压杆和动态缺口半圆弯曲法测试了煤样在冲击荷载下的动态断裂韧性,发现冲击速度和层理角显著影响断裂韧性及应变特性。上述研究在受载煤岩力学特性参数与裂纹扩展规律方面取得了大量成果,但主要围绕裂纹扩展的力学特性展开,侧重于应力、加载速率、层理角等因素的影响。由于煤体损伤是一个复杂的多因素过程^[10],特别是在复杂应力环境和动态加载条件下,仅考虑煤体损伤的力学特征难以实现煤体损伤演化全过程监测。煤体受载过程中,裂纹萌生与扩展伴随着能量释放,产生声发射、红外辐射与电磁辐射等地球物理信号^[11],因此,众多学者基于煤岩体破坏过程中地球物理信号的演化特征,开展受载煤岩试样裂纹萌生与扩展的特征信息研究。Dai 等^[12]阐明了声发射频域信息与裂纹扩展模式之间的相关性,并采用无监督聚类方法对特定裂纹扩展模式的声发射信号进行分类,最大分类误差为 3.8%。

Zhou 等^[13]引入了声发射事件的统计 b 值和 β_i 值(损伤参数),发现 b 值的突然下降以及 β_i 值的指数增长可以被视为裂纹扩展的特征指标。Li 等^[14]通过分析红外辐射与耗散应变能在能量演化中的比例定义了损伤变量,用于表征煤体从裂纹萌生、扩展到失效的演化过程。Shan 等^[15]研究了裂纹扩展引起的声发射时频响应和红外辐射在头尾差分和一阶差分处理后的变化,进一步得出了裂纹产生红外辐射和声发射响应特性。Liu 等^[16]基于空间噪声校正方法提取了与加载岩石微裂隙相关的红外辐射温度特征,实现了损伤发展趋势的量化。Chen 等^[17]提出了一种数据驱动的策略深度学习模型,用于预测即将发生裂纹事件的位置和能量。Liu 等^[18]应用微震监测系统刻画了煤岩微裂隙空间宏观演化趋势,证明了异常应力区域与微裂纹持续发展区域相匹配。上述研究从声发射、红外辐射、微震监测等角度研究了煤岩损伤演化过程的特征提取、损伤变量定义及前兆信息识别,为煤体破裂的损伤监测提供了重要参考,但仍存在环境适应性差、信号衰减快等问题^[19]。因此,探寻更稳定、抗干扰能力强且适用于复杂环境的煤体损伤监测手段至关重要。

低频电磁辐射监测技术最初用于地震预测^[20],相较于声发射、红外辐射等监测手段,电磁辐射信号在复杂环境下具有更强的穿透性和抗干扰能力,因而被广泛应用于煤岩动力灾害监测^[21]。通过分析低频电磁信号特征,不仅能够实现对煤岩裂隙孕育与发展的监测预警,还可用于识别应力集中区域,以评估煤体内部应力状态及破裂风险。Li 等^[22]推导并建立了应力-电磁辐射耦合的数学模型,明确了受载复合煤岩的电磁辐射特性频带为 15~20 kHz,为煤岩损伤机理的电磁响应研究奠定了理论基础。进一步地,Qiu 等^[23]通过煤岩低频电磁辐射测试实验,提出电磁辐射(electromagnetic radiation, EMR)信号分离技术,为电磁辐射监测在煤岩裂纹演化预警中的应用提供了关键科学依据,进一步推动了 EMR 技术在煤矿动力灾害监测中的发展。以上研究主要通过前兆信号时序变化监测预警煤岩受载破裂的发生,忽视了电磁辐射信号的空间矢量特征。运用电磁辐射信号空间几何参数监测煤体失稳破裂方面的研究已取得一些成果。Zhao 等^[24]研究了煤岩破坏 EMR 矢量响应机制,发现裂隙尺寸、测点距离和裂隙方位角是其特性的重要影响因素。宋大钊等^[25]利用新型电磁矢量传感器提出了煤岩破坏裂纹定位方程,并利用实验对其定位效果进行了验证。Wei

等^[26]研发了三轴天线来测量岩石破裂产生的近场电磁辐射矢量,证明了对于相同的断裂裂纹,同一传感器位置的信号实际上是3个坐标方向的分量。李成武等^[27]利用两个正交天线电磁信号能量与其接收夹角余弦平方的比例关系来确定电磁信号的到达角,从而实现确定裂隙的空间位置。以上研究对受载煤样电磁辐射的矢量特征展开了深入分析,为利用电磁辐射空间几何参数实现矿山动力灾害监测提供了充足的理论依据。但目前应用电磁辐射主要集中在单一点源与二维平面定位,对受载试样裂纹的时序发展三维空间损伤监测研究较少,导致现有研究难以全面反映煤体内部裂隙的时序演化过程。

针对以上问题,本文对受载煤样电磁辐射矢量信息进行分析,构建基于电磁辐射矢量信息与磁感应强度约束的煤样损伤监测模型,并提出基于混合元启发式算法的模型求解方法。之后,通过搭建电磁矢量传感器监测阵列与单轴加载实验平台,开展不同加载速率与不同产地实验煤样的单轴加载实验。最后,通过对比解算位置与实际裂纹的时空演变过程分析,验证所提损伤趋势监测方法的有效性与普适性,为深部煤矿开采过程中煤体损伤监测预警提供技术支持和理论指导。

1 基于电磁辐射的受载煤样损伤趋势监测原理

1.1 受载煤岩损伤电磁辐射产生机理

由于煤的内部成分十分复杂,其内部含有多种物理、化学性质不同的化合物与矿物质元素,因此具有明显的各向异性的同时其内部也存在大量电荷,但由于电荷运动的无序性导致实际对外不显电性。关于纯煤外加载荷时电磁辐射的产生机理,主要由裂纹拓展引起电偶极子振荡与内部微电流环等效磁偶极子共同产生^[28],两种电磁辐射具体产生方式如图1所示。

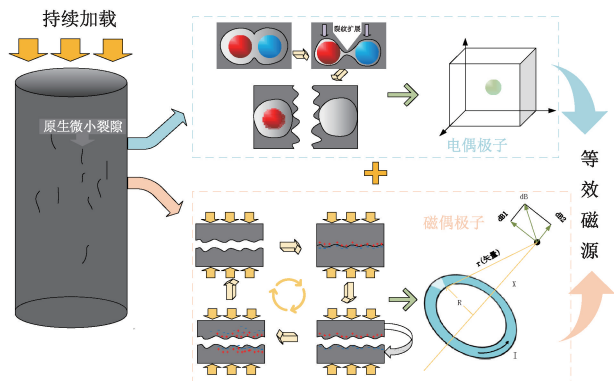


图1 受载煤样电磁辐射产生机理

Fig. 1 The mechanism of electromagnetic radiation generated by loaded coal samples

由图1可见,受载煤样的电磁辐射分为电型源和磁型源2种。一方面,在单轴加载过程中由于裂纹的拓展导致成对的异种电荷相互分离,同时由于裂纹尖端的应力集中导致电荷受迫振荡,根据不同的震荡方式,其产生的电磁辐射矢量在空间内任意一点的磁感应强度 B_e 为^[29]:

$$\begin{cases} B_{e_1} = -\frac{\mu_0 p_0 \omega}{4\pi r^2} \sin\theta \sin\omega\left(t - \frac{r}{c}\right) \hat{f} (1 - e^{-\alpha(t-\frac{r}{c})}) \\ B_{e_2} = -\frac{\mu_0 p_0 \omega}{4\pi r^2} \sin\theta \cos\omega\left(t - \frac{r}{c}\right) \hat{f} [1 - e^{-\beta(t-\frac{r}{c})}] \\ B_e = B_{e_1} + B_{e_2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: B_{e_1} 与 B_{e_2} 分别为电荷受迫分离与振荡产生的电磁辐射; μ_0 为真空磁导率; r 为真空磁偶极子到测点的矢径; c 为光速; α 与 β 为常数; $\hat{f}$ 为方向向量。

另一方面,在外加载荷的作用下,纯煤中原生微小裂隙闭合,同时裂隙两端正负离子相互吸引成电荷平衡状态;由于持续施加外部载荷的作用,纯煤内部产生微震或滑移,此时重新产生的微裂隙将成对的异种电荷相互分离;之后,微裂隙表面的单一电性电荷通过静电感应吸引不同种的电荷以达到静电平衡,此时由于电子的定向移动,纯煤内部开始有微电流产生。如图1所示,将此微电流圆形回路在其上任取一电流元 $Id\vec{l}$,各电流元在 P 点的磁感应强度大小相等,方向各不相同,但各 $d\vec{B}_m$ 与轴线成一相等的夹角。把 $d\vec{B}_m$ 分解为平行于轴线的分矢 $d\vec{B}_{m\parallel}$ 与垂直于轴线的分矢量 $d\vec{B}_{m\perp}$ 。由于对称关系,任一直径两端的电流元在 P 点的磁感应强度的垂直轴线的分量 $d\vec{B}_{m\perp}$ 大小相等,方向相反,因此,载流圆线圈上电流在 P 点 $d\vec{B}_{m\perp}$ 互相抵消,而 $d\vec{B}_{m\parallel}$ 互相加强。所以 P 点磁感应强度为圆形线圈上所有电流元 $d\vec{B}_m$ 的代数和,其空间内任意一点磁场强度表达式为:

$$\begin{cases} B_m = \int_L dB_{m\parallel} = \frac{\mu_0 I \sin\theta}{4\pi r^2} 2\pi R \\ r^2 = R^2 + x^2 \\ \sin\theta = \frac{R}{r} = \frac{R}{(R^2 + x^2)^{1/2}} \end{cases} \quad (2)$$

在实际应用中,远离微电流线圈处即 $x \gg R, x \approx r$,则轴线上各点的 B_m 值最终近似为式(3),其方向与线圈平面的法线方向相同。

$$B_m = \frac{\mu_0 I S}{2\pi x^3} = \frac{\mu_0 I S}{2\pi r^3} \quad (3)$$

式中: $S = \pi R^2$ 为微电流线圈的面积。

按照叠加原理,观测的电磁响应可看成是电型源和磁型源独立产生的场的叠加^[30],等效点辐射源的总功率是所有电型源和磁型源产生辐射总功率的和。因此,可以将产生电磁辐射的带电裂隙等效为一个点辐射源模型。

1.2 带电裂隙等效辐射源定位模型

通过上述分析可知,要实现对带电裂隙的等效场源定位需要通过对空间中的磁场矢量信息进行监测分析。三轴磁通门传感器能够测量相互正交的 3 个方向的磁场变化,且传感器三轴参数完全一致,能够满足多方向同步监测电磁辐射信号的需求。应用三轴磁通门传感器搭建的受载煤样裂纹定位空间几何模型示意图如图 2 所示。

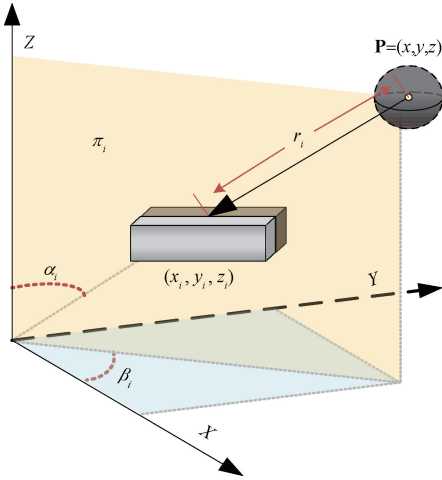


图 2 受载煤岩裂纹定位空间几何模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the spatial geometric model for the positioning of coal rock cracks under load

如图 2 所示,假设电磁矢量传感器三维空间坐标为 $S_i (i=1, 2, \dots, n)$, 其中 $S = (x_i, y_i, z_i)$, i 为电磁矢量传感器编号,传感器总数为 n 。受载煤岩裂纹等效电磁辐射源处在电磁矢量传感器有效工作范围内的任意位置,位置为 $P = (x, y, z)$ 。根据三轴磁通门传感器工作原理,其输出的磁场矢量 $\vec{B}_i$ 方向实际上是该传感器位置处的磁场方向。给定一个平面 π_i , 电磁辐射沿 π_i 传播,该平面的法向量是第 i 个传感器得到的磁场矢量 $\vec{B}_i$, 该平面过传感器的位置 $S = (x_i, y_i, z_i)$, 则平面方程的通式为:

$$B_{x_i}(x - x_i) + B_{y_i}(y - y_i) + B_{z_i}(z - z_i) = 0 \quad (4)$$

同时,由麦克斯韦方程组可知,电磁辐射的传播方向一定垂直于电场与磁场所构成的平面且辐射源产生电磁辐射的传播方向 $\vec{k}$ 始终垂直于磁场方向 $\vec{B}_i$ ^[31], 因此辐射源的空间位置一定为平面 π_i 上一点。根据空间几何理论,3 个平面相交可确定点辐射源的位置,受载试样裂纹

等效磁源与电磁矢量传感器位置之间的方位关系满足:

$$\begin{cases} B_{x_1}(x - x_1) + B_{y_1}(y - y_1) + B_{z_1}(z - z_1) = 0 \\ B_{x_2}(x - x_2) + B_{y_2}(y - y_2) + B_{z_2}(z - z_2) = 0 \\ B_{x_3}(x - x_3) + B_{y_3}(y - y_3) + B_{z_3}(z - z_3) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

如图 2 所示,使用俯仰角与方位角构成的方向向量来可以描述点辐射源的方位信息,在实际测量中 α_i 为第 i 个磁场矢量传感器与等效磁偶极子所成俯仰角, β_i 为第 i 个磁场矢量传感器与等效电磁辐射源所成方向角,二者计算公式如下:

$$\alpha_i = \arccos\left(\frac{z_i - z}{\|\mathbf{P} - \mathbf{S}_i\|}\right) + \varepsilon_i \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$\beta_i = \arctan\left(\frac{y_i - y}{x_i - x}\right) + \delta_i \quad i = 1, \dots, n \quad (7)$$

式中: ε_i 与 δ_i 分别为俯仰角与方向角由传感器位置或精度造成的噪声误差,二者均服从标准正态分布,即 $\varepsilon_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\varepsilon_i}^2)$ 且 $\delta_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\delta_i}^2)$ 。因此,测量得到的方向向量可以表示为:

$$\mathbf{d}_i = \begin{bmatrix} \cos(\beta_i + \delta_i) \cos(\alpha_i + \varepsilon_i) \\ \sin(\beta_i + \delta_i) \cos(\alpha_i + \varepsilon_i) \\ \sin(\alpha_i + \varepsilon_i) \end{bmatrix} = \mathbf{d}'_i + \boldsymbol{\varphi}_i \quad (8)$$

式中: $\mathbf{d}_i$ 为实测方向向量; $\mathbf{d}'_i$ 为理想方向向量; $\boldsymbol{\varphi}_i$ 为方向向量误差。

通过求解式(5)确定目标点的位置至少需要 4 个已知位置的传感器,定位问题的目标是根据每个传感器的电磁矢量方向信息与强度信息求解磁源的未知位置,理想情况下,应满足以下方程:

$$\mathbf{p} = \mathbf{s}_i + r_i \mathbf{d}_i \quad (9)$$

式中: r_i 是传感器到磁源的距离。

考虑误差的情况下位置估计误差为:

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{p} - \mathbf{p}' = r_i(\mathbf{d}_i - \mathbf{d}'_i) = r_i \boldsymbol{\varphi}_i \quad (10)$$

式中: $\mathbf{p}'$ 为等效磁源理想坐标。

由式(10)可知,传感器误差对定位结果的影响本质上通过 $\boldsymbol{\varphi}_i$ 进入几何约束残差并被目标函数累积,因此需要从测量误差与方向误差的映射关系角度建立统一的误差传播描述。三轴磁通门传感器第 i 个测点的磁矢量测量模型可写为:

$$\mathbf{B}_{m,i} = K_i \mathbf{B}_i + b_{0,i} + \mathbf{e}_i \quad (11)$$

式中: $\mathbf{B}_{m,i}$ 与 $\mathbf{B}_i$ 分别为实测与真实磁场矢量; K_i 描述灵敏度不一致等线性误差; $b_{0,i}$ 为零偏项; $\mathbf{e}_i$ 为随机噪声。实验中通过加载前静态背景采样估计并忽略零偏,同时对各轴增益差异进行统一尺度校正,可得到修正磁矢量 $\mathbf{B}_i = K_i^{-1}(\mathbf{B}_{m,i} - b_{0,i})$, 在小扰动条件下,对归一化映射在 $\mathbf{B}_i$ 处一阶展开,可得方向误差的主导项为:

$$\boldsymbol{\varphi}_i \approx \frac{1}{\|\mathbf{B}_i\|} \left(1 - \frac{\mathbf{B}_i \mathbf{B}_i^T}{\|\mathbf{B}_i\|^2} \right) \delta \mathbf{B}_i \quad (12)$$

式(12)表明测量误差仅通过其在 $\mathbf{B}_i$ 正交子空间的分量影响方向估计,且误差幅值与 $\|\mathbf{B}_i\|^{-1}$ 成反比,从而为弱场区或远场区方向不确定性上升及其引发的定位误差放大提供了统一解释。进一步考虑随机噪声的统计传播,设噪声满足方差为0,则在一阶近似下方向误差协方差可由式(13)直接得出:

$$\text{Cov}(\boldsymbol{\varphi}_i) \approx \frac{\sigma^2}{\|\mathbf{B}_i\|^2} \left(1 - \frac{\mathbf{B}_i \mathbf{B}_i^T}{\|\mathbf{B}_i\|^2}\right) \mathbf{K}_i^{-1} \mathbf{K}_i^{-T} \left(1 - \frac{\mathbf{B}_i \mathbf{B}_i^T}{\|\mathbf{B}_i\|^2}\right) \quad (13)$$

当 $\mathbf{K}_i$ 为单位阵时,方向不确定性与 $\|\mathbf{B}_i\|^2$ 同阶,并在与真实磁场方向正交的平面内呈现各向同性扩散,意味着随机噪声主要增加定位结果的随机不确定性而非引入方向性偏差;同时,加载前采集 1 min 背景数据并进行均值扣除与时间平均处理可等效降低 σ^2 ,从而压缩 $\text{Cov}(\boldsymbol{\varphi}_i)$ 并提升几何残差的稳定性。

对于多传感器采样时间不同步问题,本文定位模型由方向向量构造几何约束,不涉及传播时延或相位差参数,因此时间不同步不会以显式形式进入定位方程,其影响仅可能通过磁矢量方向随时间变化所引入的附加方向扰动体现。远小于随机噪声与方向测量误差所对应的典型扰动幅值,该项可视为二阶小量,其对定位结果的影响将被随机方向误差所主导。

综上,零偏、灵敏度不一致与随机噪声均通过式(12)与式(13)映射为方向误差,并进一步影响由方向向量构造的几何约束残差;因此,通过忽略零偏与灵敏度校正压制系统性误差,通过背景统计处理降低噪声方差,并结合时间不同步影响给出保守上界,可在方法层面提升电磁矢量测量的稳定性与裂隙定位结果的可靠性。

由式(10)可知,位置误差 $\Delta \mathbf{p}$ 受距离 r 和方向向量误差 $\boldsymbol{\varphi}_i$ 的影响,在距离 r 无法改变的情况下,将方向向量误差 $\boldsymbol{\varphi}_i$ 尽可能降低显得尤为重要。常用传感器布置方法为共面方式布置^[32],假设4个传感器位于同一个平面上(例如 $z=0$ 平面),如图3所示。

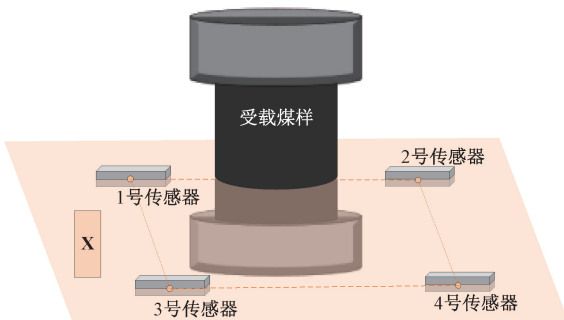


图3 三轴电磁矢量传感器网络共面构型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a three-axis electromagnetic vector sensor network

此时方向向量的误差容易沿平面扩展,特别是在方向向量接近平行时,误差会呈指数级扩展。这种误差放大效应可以描述为:

$$\Delta \mathbf{s} = r_i \left(\frac{\partial \mathbf{d}_i}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial \mathbf{d}_i}{\partial \beta_i} \Delta \beta_i \right) \quad (14)$$

为定量研究布阵参数对定位稳定性的影响,本文在带电裂隙等效辐射源定位模型基础上引入几何敏感性指标,并对关键布阵参数进行扫描分析。根据式(4)中由磁矢量构造的平面约束,可将 m 个传感器约束堆叠可写为线性形式 $\mathbf{A}\mathbf{p} = \mathbf{c}$, 其中,矩阵 $\mathbf{A}$ 的第 i 行为 $\mathbf{n}_i^T$ 。在含噪条件下,位置估计的几何稳定性由 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 的可逆性与病态程度决定。本文采用两个互补的几何指标,分别为条件数指标 κ 和类几何精度因子 (geometric dilution precision, GDOP) 指标,与 Fisher 信息矩阵下界一致如式(15)所示。

$$\begin{cases} \kappa = \kappa(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \\ \text{GDOP} = \sqrt{\text{tr}((\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1})} \end{cases} \quad (15)$$

式中: κ 与 GDOP 越大,表示几何约束越接近退化,方向误差在某些空间方向上的放大越显著。共面或近共面布置时, $\mathbf{n}_i^T$ 的空间张成不足会使 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 的最小特征值显著变小,从而导致 κ 与 GDOP 急剧恶化;非共面布置通过引入高度差使 $\mathbf{n}_i^T$ 在三维空间更接近满秩张成,从而改善上述病态特征。

本文采用的4个传感器坐标分别为(17.5, 13, 2)、(27, 0, 2)、(0, 0, 2)、(27, 0, 5.5)。其中传感器4相对其余3点的高度差 $H=3.5$ cm。为评估高度差对几何稳定性的影响,固定平面内布局不变,仅令传感器4的高度 Z_4 在 2~7 cm 范围内扫描,并在与实验尺度一致的目标空间区域内统计 κ 与 GDOP 的分布特征,结果如图4所示。

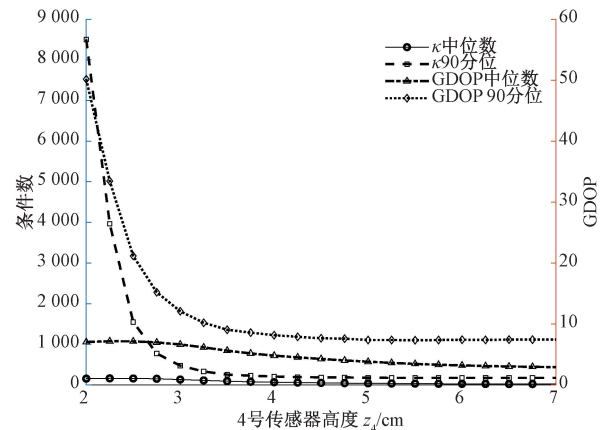


图4 非共面高度差对阵列几何稳定性的影响

Fig. 4 Effect of non-coplanar height differences on array geometric stability

如图4所示,当 $Z_4 = 2\text{ cm}$ 严格共面条件下, κ 的中位数约为56.8,90分位约为650.7,GDOP的中位数约为4.58,90分位约为14.9;当采用非共面高度 $Z_4 = 5.5\text{ cm}$ 时, κ 中位数降至约32.2,90分位降至约156.9,GDOP中位数降至约3.15,90分位降至约7.2。可见,引入非共面高度差后,几何病态在偏不利工况下得到显著抑制,且对误差放大的控制效果尤为突出。进一步增大高度差仍可继续改善指标, κ 中位数约23.4,GDOP中位数约3.15,说明本文构型处于高度差增益显著但尚未饱和的有效区间;考虑到实验平台空间与安装约束,本文选取 $Z_4 = 5.5\text{ cm}$ 作为兼顾可实施性与稳定性的布置方案。除高度差外,平面内间距与方位分散度也会影响 $\mathbf{n}_i^T$ 的独立性。为分析间距敏感性,以平面坐标为基准对阵列进行等比例缩放,并在同一目标空间区域内统计 κ 与GDOP的变化,结果如图5所示。

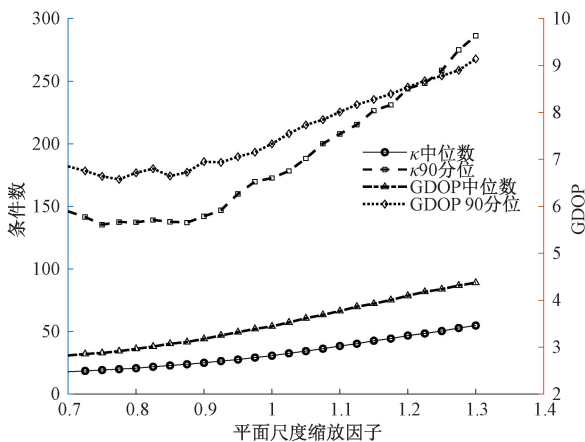


图5 平面尺度变化对阵列几何稳定性的影响

Fig. 5 Impact of planar scale variation on the geometric stability of the array

如图5所示,当平面尺度在基准的0.8~1.2倍范围内变动时, κ 中位数约在23.7~46.6变化,GDOP中位数约在3.17~4.05变化,表明平面间距对几何稳定性存在较大影响,但在基准构型附近变化幅度变小。本文采用的平面尺度处于该缓变区间内,几何指标未出现突变,说明当前布局对间距变化具有一定鲁棒性。

为将上述几何指标与方向误差融合,利用克拉美劳下界(Cramer-Rao lower bound, CRLB)给出位置不确定性的尺度关系;当方向向量扰动方差水平固定时,有:

$$\text{Cov}(\hat{\mathbf{P}}) \propto (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \quad (16)$$

由式(15)与(16)可知,降低 κ 与GDOP等价于提高 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 的最小特征值,从而压缩位置方差下界并抑制误差放大。综上,本文通过对高度差与平面尺度的敏感性扫描验证发现,非共面构型能够显著降低几何畸变并处于误差放大受控的稳定区间,从而满足裂隙等效辐射源定

位对稳定性与可实施性的综合要求。据此确定本文传感器安放示意图如图6所示。

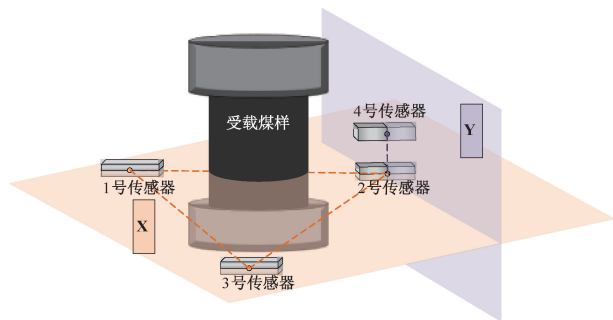


图6 三轴电磁矢量传感器网络构型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of a three-axis electromagnetic vector sensor network

2 基于混合元启发式优化算法的裂纹定位模型

2.1 定位目标函数的建立

由式(5)可知,求解受载煤岩裂纹等效磁源位置的数学模型只有等式约束,理论上仅存在唯一真值。即理论计算值 (x, y, z) 与真值 (x^*, y^*, z^*) 相等,二者误差为0。但在大多实际求解过程中发现,等式约束因其苛刻性难以符合实际或由于传感器记录数据误差的存在造成数学模型无解,同时如果定位平面为平行或共面分布,则无法确定辐射源的位置。因而可将求解问题的等式约束转化为不等式约束。点 $\mathbf{P} = (x, y, z)$ 到平面 π_i 的垂直距离误差可以通过式(17)计算。

$$\text{err}(x, y, z) = \sum_{i=1}^3 d_i^2 = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{B_{x_i}(x - x_i) + B_{y_i}(y - y_i) + B_{z_i}(z - z_i)}{\sqrt{B_{x_i}^2 + B_{y_i}^2 + B_{z_i}^2}} \right)^2 \quad (17)$$

将求解的 (x, y, z) 代入式(17)后所得结果越小,证明求解的辐射源位置距离所有平面交点越近,求解结果越逼近真值 (x^*, y^*, z^*) 。

存在一个各向同性的理想偶极子的情况下,辐射的能量是沿着球面扩展的,辐射源的总功率 p 均匀地分布在这个球面上^[33]。单位面积上的磁场强度 B_i 可以表示为总功率与球面面积之比,即空间中某点的磁场强度与距离的关系遵循反平方定律。在空间中某一位置 $\mathbf{S} = (x_i, y_i, z_i)$ 处,磁场强度 B_i 随辐射源的距离 r 变化,且满足以下关系:

$$B_i = \frac{B_0}{r_i^2} \quad (18)$$

式中: B_0 是辐射源的强度常数; $r_i = \|\mathbf{P} - \mathbf{S}_i\|$ 是传感器 i 到辐射源的位置 p 的距离。

由此可得同时引入辐射源方位约束与强度衰减约束的目标函数为:

$$\mathcal{L}(x, y, z, B_0) = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{B_{x_i}(x - x_i) + B_{y_i}(y - y_i) + B_{z_i}(z - z_i)}{\sqrt{B_{x_i}^2 + B_{y_i}^2 + B_{z_i}^2}} \right)^2 + \sum_{i=1}^4 \left[\left\| \mathbf{P} - \mathbf{S}_i \right\|^2 - \frac{B_0}{B_i} \right]^2 \quad (19)$$

在此基础上可得目标函数的 Hessian 矩阵为:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial x \partial z} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial x \partial B_0} \\ \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial y \partial z} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial y \partial B_0} \\ \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial z \partial x} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial z \partial y} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial z^2} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial z \partial B_0} \\ \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial B_0 \partial x} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial B_0 \partial y} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial B_0 \partial z} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial B_0^2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

对主对角项分别进行计算易得 $\frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial z^2}$ 均恒大于 0, $\frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial B_0^2}$ 计算结果为:

$$\frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial B_0^2} = - \sum_{i=1}^4 \frac{1}{B_i^2} \quad (21)$$

由于 $\frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial B_0^2}$ 为负值,且其他主对角项为正, Hessian 矩

阵存在正负混合的特征值,因此目标函数不是严格凸函数,可能存在多个局部极值,难以通过常规解析法求解。因此,本文引入优化算法进行求解。

2.2 探路者 (path finder algorithm, PFA) 优化算法

由于式(17)是一个多峰函数,普通优化算法在迭代过程中易陷入局部最优。为了精确求解裂纹等效辐射源空间位置,引入 PFA 优化算法^[34]。其具有强大的探索能力,能够避免陷入局部最优并有效搜索整个解空间,适用于寻找潜在的最优解区域。

在 PFA 算法中,每个成员在解空间中都有相应的位置,假设目标函数的所有候选解都是群体成员的位置矢量,因此群体中的个体可以在解空间中移动,寻找目标函数最优解。在任何时刻中,如果群体中的某个成员位于目标函数最符合期望的位置上,那么该成员就会被选为探路者,其运动方式如式(22)所示

$$\begin{cases} X_p^{N+1} = X_p^N + 2rand \cdot (X_p^N - X_p^{N-1}) + A \\ A = \gamma \cdot e^{\frac{-2N}{N_{\max}}} \end{cases} \quad (22)$$

式中: X_p^{N+1} 、 X_p^N 和 X_p^{N-1} 分别表示探路者更新后、当前和上一代的位置; N 为算法的当前迭代次数; $N_{\max}$ 表示算法的最大迭代次数; $rand$ 为 $[0, 1]$ 范围的随机向量; A 表示影响探路者移动的随机数,由迭代次数与 γ 决定,后者为

$[-1, 1]$ 范围内的随机向量,旨在通过此参数允许个体移动到他们之前的位置,增加算法的鲁棒性。

跟随者为了寻找猎物或栖息区域跟随探路者进行移动,个体跟随者移动速度不仅与探路者和迭代次数有关,同时也受到其他跟随者的影响,其位置更新方法如式(23)所示。

$$\begin{cases} X_i^{N+1} = X_i^N + \mu \cdot \gamma_1 \cdot (X_j^N - X_i^N) + \nu \cdot \gamma_2 \cdot (X_p^N - X_i^N) + s \\ s = (1 - \frac{N}{N_{\max}}) \cdot rand \cdot D_{ij} \\ D_{ij} = \|X_i - X_j\| \end{cases} \quad (23)$$

式中: X_i^{N+1} 、 X_i^N 分别表示跟随者 i 更新后与当前的位置; X_j^N 为其他跟随者 j ; γ_1 、 γ_2 为 $[0, 1]$ 范围内的随机向量; s 表示影响跟随动的随机数; D_{ij} 为跟随者 i 与跟随者 j 之间的距离; μ 与 ν 为不同成员之间的交互系数。

位置更新后 PFA 计算每个成员的新适应度值,当任何一名成员的位置优于当代探路者时,它将被选定为新的探路者。之后, PFA 使用这种规则不断更新种群位置,直至满足迭代准则。

综上,探路者算法由于本身的随机性与实时更换领导者的特性,在算法执行初期大范围解空间中寻找优质解区域的能力突出,保证了算法能够快速准确的定位到最优解的大致位置,有助于避免陷入局部最优。但在优化的后期阶段,即搜索接近最优解时,由于 PFA 主要依赖个体间的信息交换和随机扰动,其收敛速度通常远低于基于梯度的信息优化方法。因此,在局部搜索阶段,继续使用 PFA 可能导致算法收敛精度降低。

2.3 基于联合路径规划算法 (BFGS-Integrated Pathfinding Strategy, BIPDS) 的混合元启发式算法

本文待求解问题为受载试样裂纹定位问题,求解时在算法初期需要尽可能分散搜索,而在求解后期需要对解空间进行精细搜索,现有的探路者算法在此过程中对于后期精细搜索能力略显不足。拟牛顿算法 (broyden-fletcher-goldfarb-shanno, BFGS) 利用一阶梯度信息和 Hessian 近似信息进行优化,能够在局部范围内找到最优解。由于本文目标函数是连续可微的,因此 BFGS 能够在局部搜索阶段精确逼近最优解。本文将算法求解过程划分为全局搜索阶段与局部优化阶段两个部分,总体流程如图 7 所示。

由图 7 可知,首先使用 PFA 算法进行全局搜索,找到一个较好的磁源位置。通过探索者算法的群体智能性和随机性在解空间中获取一个较为优质的解,之后将这个解作为 BFGS 的初始点,使用 BFGS 算法对该解进行局部优化。BFGS 算法通过目标函数的梯度信息,利用二阶导数的近似来精细调整解,进一步改善求解精度,求解具体步骤如下。

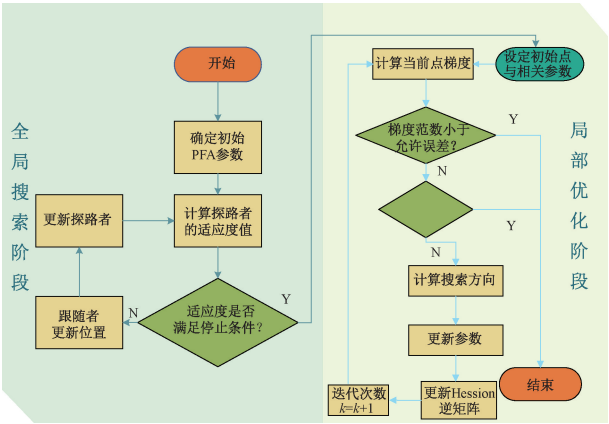


图 7 BIPDS 算法总体流程

Fig. 7 Flowchart of the hybrid originality-inspired algorithm

- 1) 生成初始点坐标。
- 2) 由式 (23) 更新探索者位置, 计算探索者的适应度值。
- 3) 判断是否满足 PFA 迭代停止条件, 若满足则进行步骤 4); 若不满足, 则跟随者根据式 (23) 更新位置, 分配新的探索者并返回步骤 2)。
- 4) 设定初始 Hessian 矩阵逆 $\mathbf{B}_0^{-1}$ 、容许误差 ϵ 和最大迭代次数 max_iter 。

5) 利用式 (24) 计算当前点的梯度。

$$\mathbf{g}_k = -\nabla f(\mathbf{x}_k)$$

(24)

6) 检查梯度的范数 $\|\mathbf{g}_k\|$ 是否小于容许误差, 或者是否达到最大迭代次数, 若符合条件则停止迭代。

7) 通过线搜索选择合适的步长 α_k , 计算搜索方向 $\mathbf{p}_k$:

$$\mathbf{p}_k = -\mathbf{B}_k^{-1} \cdot \mathbf{g}_k$$

(25)

8) 利用式 (22) 对下次求解点进行迭代:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k \cdot \mathbf{p}_k$$

(26)

9) 利用 BFGS 算法更新 Hessian 逆矩阵 $\mathbf{B}_{k+1}^{-1}$:

$$\mathbf{B}_{k+1}^{-1} = \mathbf{B}_k^{-1} + \frac{\mathbf{y}_k \mathbf{y}_k^T}{\mathbf{y}_k^T \mathbf{s}_k} - \frac{\mathbf{B}_k^{-1} \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^T \mathbf{B}_k^{-1}}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{B}_k^{-1} \mathbf{s}_k}$$

(27)

式中: $\mathbf{y}_k = \nabla f(\mathbf{x}_{k+1}) - \nabla f(\mathbf{x}_k)$ 是梯度变化量; $\mathbf{s}_k = \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k$ 是参数的变化量。

- 10) 更新迭代次数, 返回步骤 5) 直至结束。
- 11) 满足终止条件后输出最优解 $\mathbf{x}^*$ 和最优值 $f(\mathbf{x}^*)$, 从而获得受载试样裂纹等效辐射源位置。

在优化领域, 多峰测试函数是衡量优化算法搜索能力的重要标准。本文采用 Griewank、Rastrigin、Ackley、Schwefel 及 Michalewicz 5 种典型多峰测试函数, 分别测试 PFA、BFGS、BIPDS 等算法在优化问题中的表现, 结果如表 1 所示。

表 1 不同优化算法在多峰测试函数上的优化性能对比

Table 1 Comparison of optimization performance of different algorithms on multimodal test functions

测试函数	PFA(均值±标准差)	BFGS(均值±标准差)	BIPDS(均值±标准差)	PSO(均值±标准差)	GA(均值±标准差)
Griewank	0.004 1±0.002 3	0.003 7±0.002	0.000 2±0.000 1	0.006 3±0.003 1	0.008 5±0.004 7
Rastrigin	1.72±0.85	1.41±0.76	0.18±0.09	3.21±1.02	4.53±1.65
Ackley	0.021±0.009	0.018±0.007	0.002±0.001	0.057±0.023	0.083±0.031
Schwefel	7.31±3.14	6.82±2.95	0.98±0.035	9.45±3.87	12.63±4.42
Michalewicz	0.143±0.062	0.126±0.054	0.008±0.004	0.189±0.081	0.263±0.117

由表 1 可知, 在典型多峰函数测试中, 多数情况下 5 种寻优策略均可寻找到十分近似于理论最小值的数值解, 误差量级多数小于 10^{-1} 。其中, 在复杂的 Rastrigin 函数上, BIPDS 算法寻优所获数值解均值与其他算法结果相差一个数量级, 显著优于其他算法, 说明其在高维多峰优化问题中具有更优的全局搜索能力。此外, 在 Schwefel 函数的寻优过程中, BIPDS 算法的标准差相较其余算法差距最大可达 10^2 , 说明该方法具备更强的稳定性和收敛性。这一结果表明, PFA 通过群体智能进行全局搜索, 提供了良好的初始解, 而 BFGS 通过梯度信息进一步优化局部解, 能够有效克服优化过程中的局部最优问题, 从而实现更优的寻优性能。

3 实验验证

3.1 实验环境搭建与试样制备

在单轴加载实验中, 煤内部裂隙的扩展与贯通是导致试样失稳破裂的关键因素。当动态应力达到峰值时, 内部裂隙逐渐连接并形成贯通裂纹, 宏观上表现为试样整体破坏的临界点^[35]。研究表明, 单一贯通裂纹的扩展是煤体失稳破裂的主因, 相较于局部微小损伤, 单一贯通裂纹的电磁辐射矢量特征更为显著, 电磁辐射能量的变化更剧烈。这主要是由于在主裂隙为单一贯通裂纹的情况下, 裂纹扩展方向较为清晰, 电磁辐射发生位置相对集中, 同时裂隙延展及摩擦效应更强, 从而增强

了电磁辐射信号矢量特征的可识别性。因此,通过提取单一贯通裂纹的电磁辐射特征能够监测煤体受载破裂裂纹时序动态演化,更好地掌握煤体损伤演化的关键过程。

考虑到单一贯通裂纹在煤体失稳破裂中的主导作用,选择适当的裂隙倾角进行实验验证显得尤为重要。相关研究表明^[36],单条预制裂隙试样在不同裂隙倾角条件下的破裂模式存在差异,其中60°裂隙倾角试样的峰值破坏瞬时通常形成单条拉剪混合裂纹。这是由于裂隙边缘在受力时产生较强的应力集中,使裂纹更易在该部位萌生、扩展并最终贯通。因此,选取60°预制裂隙试样进行单轴加载实验,不仅具有广泛的普适性,还能够有效验证裂纹定位方法的定位精度,为煤体损伤趋势监测方法

提供可靠依据。实验系统示意图与预制裂隙煤样示意图如图8(a)所示。

如图8(a)所示,实验系统主要由4个模块组成,分别为三轴磁通门电磁矢量传感器阵列、电磁监测系统上位机、单轴加载控制系统与UTM系列微机控制电子万能试验机组成。在单轴压力机控制系统的控制下,单轴加载试验机采用位移速率控制加载方式,三轴磁通门电磁传感器阵列采用hwt3100-ttl电磁矢量传感器构建,通过TTL串口与上位机进行通信,电磁矢量量程为-800~+800 μT,灵敏度为13 nT/LSB,满足电磁辐射监测需求。搭建的实验系统如图8(b)所示,通过单轴加载实验模拟实际工况下裂纹的产生过程,采用4组三轴磁通门传感器采集受载试样破裂诱发的电磁矢量信号。

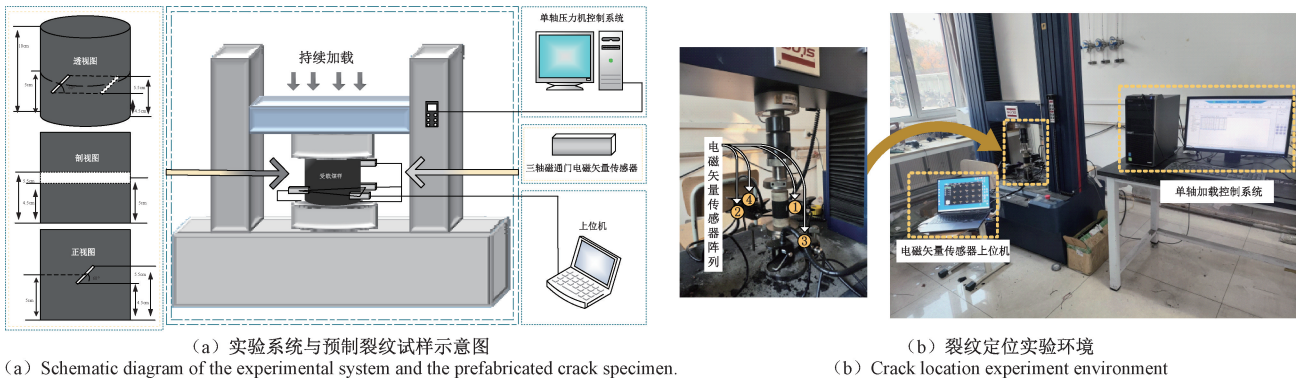


图8 预制裂纹试样与电磁定位实验环境

Fig. 8 Diagram of prefabricated crack patterns and electromagnetic positioning experimental environment

为了验证损伤监测方法的普适性,实验试样选取内蒙古鄂尔多斯、山西大同和河北唐山无烟煤,通过取芯打磨等工序后将大块原煤制成直径为50 mm、高度为100 mm的标准圆柱试样,使用0.1 mm钻头对煤样进行穿透钻孔后使用金刚砂线切割打磨出预制裂纹。为保证加载过程平稳对试样顶面与底面进行抛光处理并在加载实验前涂抹凡士林。3种产地每组试样准备6个,保证不同加载速率下至少可重复实验2次,降低实验的偶然性,试样基本信息如表2所示。

具体实验过程如下:

1) 搭建三轴磁通门电磁传感器监测网络如图5(b)所示,使用夹具将电磁矢量传感器固定到对应位置后将试样固定在压力机中心,以3号传感器为原点建立笛卡尔坐标系后测量每个传感器与试样所对应的空间坐标。

2) 启动上位机电磁矢量监测软件,采集1 min未进行实验时的实验环境电磁辐射数据用于实验后对实验数据进行降噪处理^[37]。结束后将设备复位。

3) 将该组实验的加载方式与加载速率参数输入单轴加载控制系统后启动压力机,观察记录应力时变曲线。

表2 受载试样基本信息

Table 2 Basic information of the loaded specimen			
编号	试样产地	底面直径/	试样高度/
		mm	mm
1	鄂尔多斯	50.10	99.95
2	鄂尔多斯	50.02	99.50
3	鄂尔多斯	50.00	99.54
4	鄂尔多斯	50.04	99.60
5	鄂尔多斯	49.98	99.67
6	鄂尔多斯	50.13	99.77
7	大同	50.02	99.35
8	大同	49.98	100.02
9	大同	50.07	99.76
10	大同	50.21	100.20
11	大同	49.94	99.84
12	大同	50.31	100.32
13	唐山	49.97	99.98
14	唐山	50.11	99.80
15	唐山	50.20	100.05
16	唐山	50.03	100.03
17	唐山	50.03	99.85
18	唐山	49.95	99.87

4)当轴向应力越过应力峰发生跌落且平稳不再上升后,立即停止压力机加载与电磁上位机数据记录,导出应力与电磁矢量数据。

5)重复以上步骤,直至完成所有实验。

3.2 预制裂纹试样定位实验结果分析

根据上述实验方案,通过单轴加载实验模拟不同实际工况下裂纹的产生过程。实验系统中的 4 组三轴磁通门传感器分别测量 3 个正交方向的电磁辐射信号,若对所有测量分量进行逐一分析,数据处理较为复杂且不够直观。为简化分析,本文引入电磁辐射合成矢量综合表征 3 路信号的整体特征,从而更清晰地反映受载试样破裂过程中电磁辐射的演化趋势。根据矢量合成原理,传感器所在测点某一时刻的磁感应强度可由三分量信号计算得到,如式(28)所示。

$$\boldsymbol{B} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \tag{28}$$

将第 2 组实验中 1 号传感器 3 轴方向的磁场信息代入上式,所得矢量合成结果如图 9 所示。

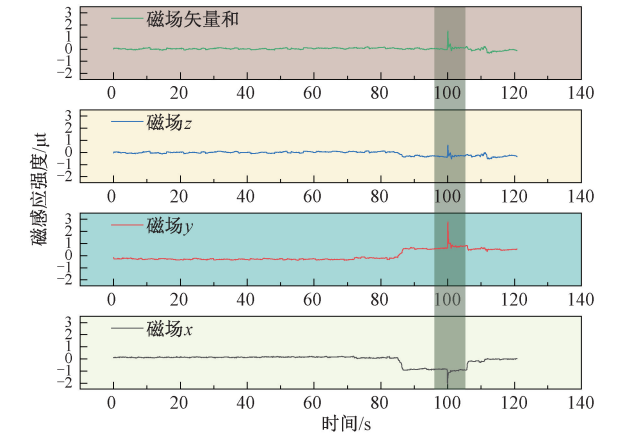


图 9 三轴电磁信号变化曲线

Fig. 9 The variation curve of three-axis electromagnetic signals

由图 9 可见,3 轴电磁辐射信号的突变时间基本一致,并具有相同的持续时间。电磁矢量信号在破裂过程中变化显著,与未触发时的电磁矢量特征存在明显差异。因此,合成矢量信号可视为传感器测点处 x 、 y 、 z 三轴方向电磁辐射信号的合成量,并可用于表征受载煤岩的破裂程度。所有试样抗压强度与合成矢量强度峰值如表 3 所示。

受载试样电磁辐射强度与抗压强度受内部破裂情况与含水量等诸多条件影响^[38]。对表 3 中的实验数据进行分析可知,不同试样具有不同的抗压强度与电磁辐射矢量峰值。其中,试样 2 实验数据中电磁矢量峰值为(1.48,0.32,16.19,0.42),其合成矢量峰值显著高于其他试样组。实验前、后试样 2 的结构如图 10 所示,可见试样 2 的破裂形式为单一贯穿式裂纹,其电磁辐射主

要来源更为明确,因而更易体现定位方法的有效性。综合考虑,选取第 2 组实验结果进行定位分析与验证。

表 3 受载试样实验结果

Table 3 Results of the loaded sample experiment

编号	加载速率/ (mm/min)	抗压强度/MPa	电磁矢量峰值/ μT
1	0.3	7.931	(0.17,5.58,3.69,0.37)
2	0.3	7.625	(1.48,0.32,16.19,0.42)
3	0.3	6.432 8	(0.63,3.23,1.63,0.45)
4	0.2	5.041 2	(0.75,0.43,1.24,0.35)
5	0.2	5.137 4	(0.35,4.53,1.77,0.29)
6	0.4	7.728 3	(1.25,2.23,0.15,0.98)
7	0.3	5.918 6	(0.35,4.78,2.13,1.56)
8	0.3	8.121 8	(1.93,0.89,5.67,2.34)
9	0.2	7.904 5	(1.23,4.56,0.27,3.98)
10	0.2	9.045 2	(1.45,5.12,0.31,4.67)
11	0.4	6.334 7	(0.45,3.21,5.89,1.78)
12	0.4	7.460 1	(2.32,0.56,2.78,3.45)
13	0.3	6.525 4	(0.68,5.34,0.29,4.12)
14	0.3	5.834 5	(3.78,2.56,0.34,5.23)
15	0.2	7.604 5	(0.89,4.23,3.45,1.67)
16	0.2	7.365 0	(2.34,5.78,0.32,3.12)
17	0.4	6.046 1	(1.45,4.67,0.28,2.89)
18	0.4	7.803 1	(1.61,0.78,5.34,1.23)



图 10 实验试样示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the experimental sample

电磁矢量监测网络中的 4 组传感器测得电磁矢量信息与压力机上位机导出的应力信息如图 11 所示。

由图 11 可见,4 组传感器的电磁辐射合成矢量信号与应力非线性变化关系密切。当应力非线性突变时,试样内部裂隙增多且发展速度加快,因此其对应的受载煤样电磁辐射合成矢量特征也将发生剧烈变化。结合本领域相关研究与上述实验结果分析,应力变化与电磁辐射矢量变化之间具有良好的对应关系,因此应用试样因受载破裂产生的电磁矢量信息对试样裂纹进行定位是完全可行的。

现有研究表明,受载试样破裂诱发的电磁辐射贯穿

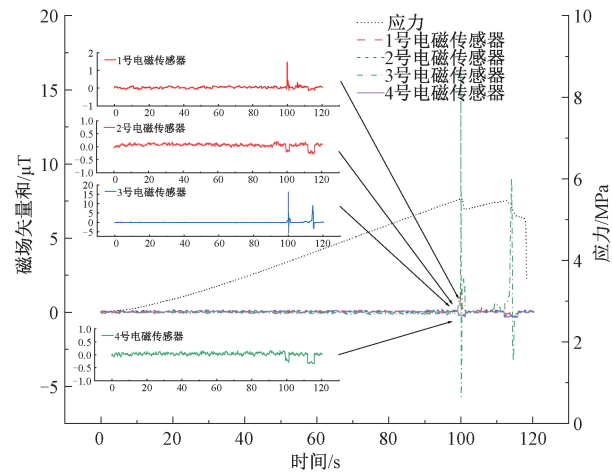


图 11 煤样压缩过程电磁辐射矢量变化曲线
Fig. 11 Electromagnetic radiation vector variation curve of coal sample compression process

整个加载过程,不仅发生在试样破裂前后,在弹性前期、弹性后期、屈服阶段和临近破裂阶段均有电磁信号产生。其中,屈服阶段与临近破裂阶段裂纹活动最为剧烈,电磁辐射矢量峰值显著高于弹性阶段。因此,电磁辐射不仅能够用于带电裂隙等效磁源的空间定位,更重要的是,其动态变化特征可用于跟踪裂隙的演化趋势,进而反映煤体损伤的演变过程。基于此,本文选取屈服阶段与临近破裂阶段 4 个不同时间点的电磁辐射矢量峰值数据,结合时序跟踪定位方法,分析裂纹等效磁源的时空演化规律,以揭示受载煤岩裂隙扩展的动态演化趋势。相关测点坐标与电磁矢量数据如表 4 所示。

将所测得数据与模型相关参数代入基于混合元启发式裂纹定位算法中,定位结果如表 5 所示。

为了更加直观展示等效磁源、传感器与受载试样之间的位置关系,将表中的空间坐标进行三维可视化,其结果如图 12 所示。

表 4 多时刻电磁辐射特征参数

Table 4 Characteristic parameters of multi-moment electromagnetic radiation

		1 号传感器	2 号传感器	3 号传感器	4 号传感器
测点坐标		(17.5,13,2)	(27,0,2)	(0,0,2)	(27,0,5.5)
时刻 1	x 轴	0.069	-0.077	-0.409	-0.090
	y 轴	-0.116	-0.013	-0.083	-0.034
	z 轴	0.259	0.124	0.092	-0.089
	磁感应强度标量	0.330	0.130	0.050	0.066
时刻 2	x 轴	-0.061	0.144	1.047	0.131
	y 轴	-0.025	-0.117	1.087	0.096
	z 轴	-0.053	-0.097	-0.272	0.093
	磁感应强度标量	0.060	0.170	0.710	0.244
时刻 3	x 轴	-1.556	0.196	2.035	0.118
	y 轴	2.783	0.000	2.257	0.018
	z 轴	0.597	-0.110	0.586	0.054
	磁感应强度标量	1.480	0.230	0.210	0.184
时刻 4	x 轴	-0.035	0.209	0.878	0.144
	y 轴	0.482	0.000	-8.585	0.083
	z 轴	-0.261	-0.123	-7.721	0.171
	磁感应强度标量	0.050	0.250	9.020	0.304

表 5 受载试样裂纹定位结果

Table 5 Results of crack location in loaded samples

等效磁源 编号	等效磁源空间坐标	电磁辐射矢量产生时间/s
1	(16.221 8,3.109 1,1.819 9)	95.781
2	(16.493 0,4.146 9,2.313 7)	100.05
3	(16.331 2,2.820 3,5.529 6)	105.76
4	(16.010 1,2.891 1,6.990 8)	114.12

由图 12 可见,利用电磁矢量监测网络所采集的电磁辐射矢量数据可获得在受载试样内的等效磁源空间位置,其中,4 个等效磁源分布在三维空间的不同坐标点

上,等效磁源 x - y 平面位置坐标相差不大且高度坐标具有合理差异。造成等效辐射源位置变化的原因是由于在试样单轴加载过程中内部高应力区域的发展与转移导致内部原生微小裂隙的闭合与扩张导致的,将整个加载过程中 4 个时间点的等效磁源位置按照发生时间顺序连接,得到预测裂纹的空间方位情况。图 10 和 12 中预制裂纹煤样在受载时裂纹的产生与拓展实际情况对比如图 13 所示。

由图 13 可见,由等效磁源位置变化趋势代表的带电裂纹扩展情况与实际加载破坏过程中主裂隙的时序发展情况基本相似,损伤演化结果裂纹倾角为 78° 与实际裂隙倾角基本相同,证明了本文方法的正确性。

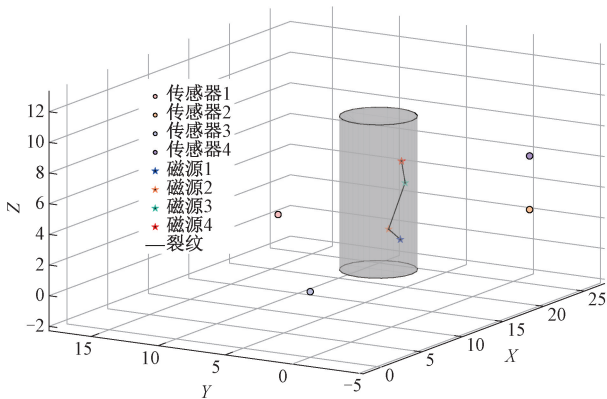


图 12 试样 2 裂纹空间位置示意图
Fig. 12 Schematic diagram of the spatial position of cracks in sample 2

3.3 裂纹定位方法普适性验证

在煤的实际开采过程中,受应力、采动等多种因素的

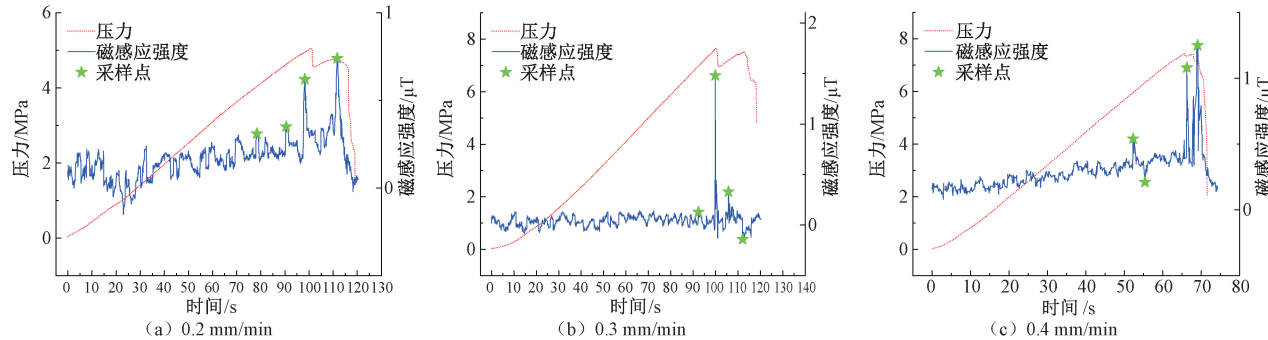


图 14 不同加载速率下 1 号传感器电磁辐射时序变化曲线
Fig. 14 Time sequence variation curve of electromagnetic radiation of sensor 1 under different loading rates

图 14(a)~(c) 分别的加载速率分别为 0.2、0.3 和 0.4 mm/min。在 0.2 mm/min 加载条件下试样 4 抗压强度为 5.041 MPa,0.3 mm/min 加载条件下试样 2 抗压强度为 7.625 MPa,0.4 mm/min 加载条件下试样 6 抗压强度为 7.728 MPa。各加载速率下电磁辐射合成矢量强度变化趋势基本一致,图 14(c) 中,在 65 s 时,试样进入屈服与临近破裂阶段,电磁辐射强度开始上升。在 68 s 时电磁辐射强度达到最大值 1.25 μT ,此时在外部可以观察到裂隙逐渐增大,并且产生宏观破碎。通过上述分析可知,电磁辐射强度在应力达到峰值前后出现最大值,且不同加载速率下电磁辐射变化趋势与应力变化趋势一致。

将试样 4 与试样 6 的 x 轴、 y 轴与 z 轴分矢量电磁辐射强度数据和合成电磁辐射强度数据代入式 (17) 中,裂隙空间定位结果示意图如图 15 所示。

由图 15 可见,等效磁源定位点均在试样内部区域,

影响,裂隙的扩展模式并不恒定。针对不同加载速率模拟的不同开采工况的裂纹定位场景,选取 3 组不同加载速率下的预制裂纹纯煤试样的实验数据进行分析,如图 14 所示。

定位点之间高度差与距离差均处在合理范畴之内。对比图 12 和 15 可知,等效磁源位置的时序变化反映了裂纹的发展趋势,表明本文所提定位模型在不同工况下具有较好的适用性。

不同产地的煤样由于地质成因、埋藏深度、成煤环境等因素的不同,其物理力学特性可能存在显著差异。因此,其在受载过程中产生的裂纹扩展模式会有所不同,这将直接影响电磁辐射信号的产生和传播。为了进一步验证所提定位模型的普适性,对产自鄂尔多斯、大同与唐山的实验煤样进行实验分析,其中试样 8 与试样 13 的电磁辐射时序变化曲线如图 16 所示。

不同产地试样加载试验 1 号传感器电磁辐射时序变化曲线如图 16 所示,对比图 14(a) 和 16 可知,不同产地试样的应力与电磁辐射时序变化趋势基本相同,电磁辐射最大值发生时间与应力降发生时间仍然具有明显的关联性,试样 8 与试样 13 的定位结果如图 17 所示。

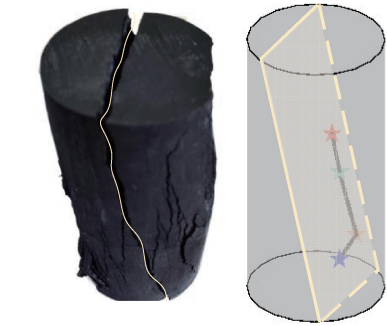


图 13 定位结果与实际裂纹位置对比图
Fig. 13 Comparison between the positioning results and the actual crack location

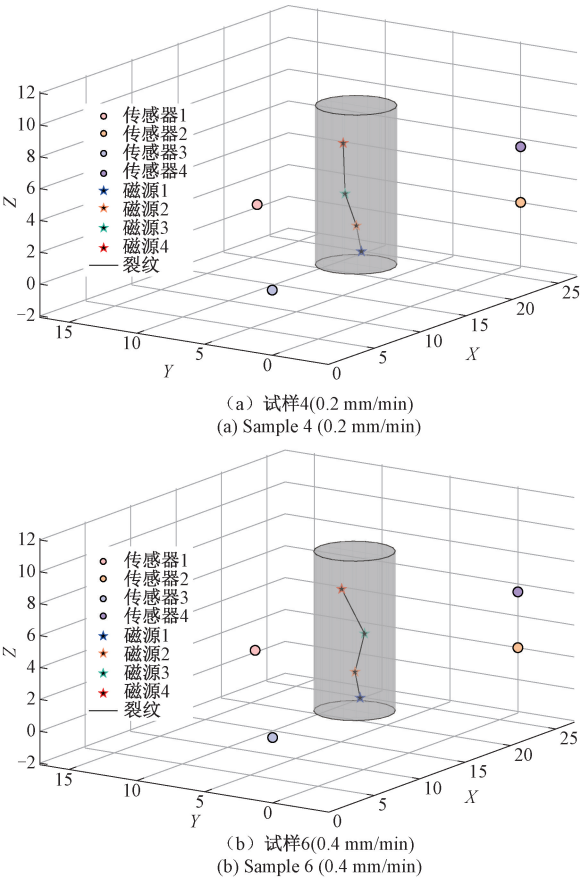


图 15 不同加载速率受载试样裂纹空间位置示意图
Fig. 15 Schematic diagram of the spatial location of cracks in the specimen under different loading rates

由图 17 可知,本研究提出的裂纹定位方法在不同产地的受载煤样加载实验中均能准确表征其带电裂隙等效电磁辐射源的空间分布,并实现对煤体损伤趋势的实时监测。即在不同煤体的赋存条件下,电磁辐射矢量信号依然能够有效反映裂纹扩展及损伤演化趋势,为基于电磁辐射信号的煤岩动力学监测提供了一种可靠的创新方法。

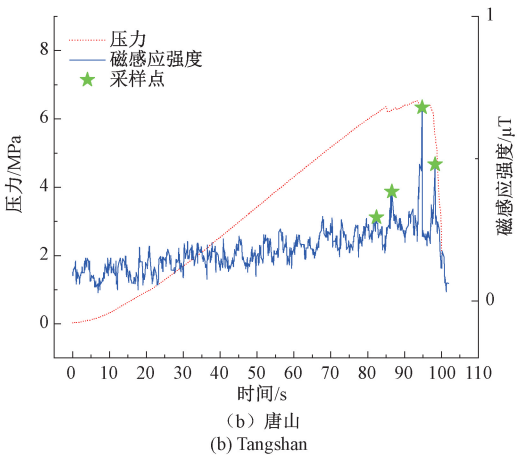
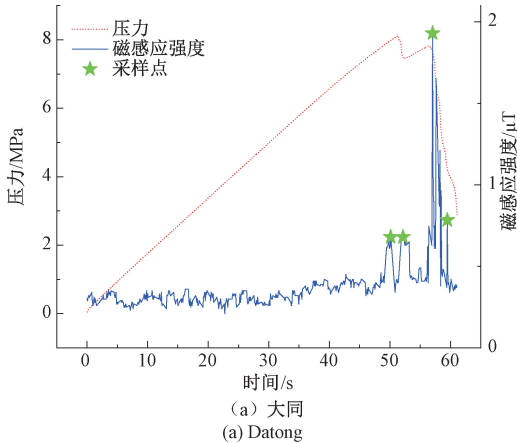


图 16 不同产地试样加载试验 1 号传感器
电磁辐射时序变化曲线
Fig. 16 Time sequence variation curve of electromagnetic radiation from sensor 1 during loading tests of samples from different origins

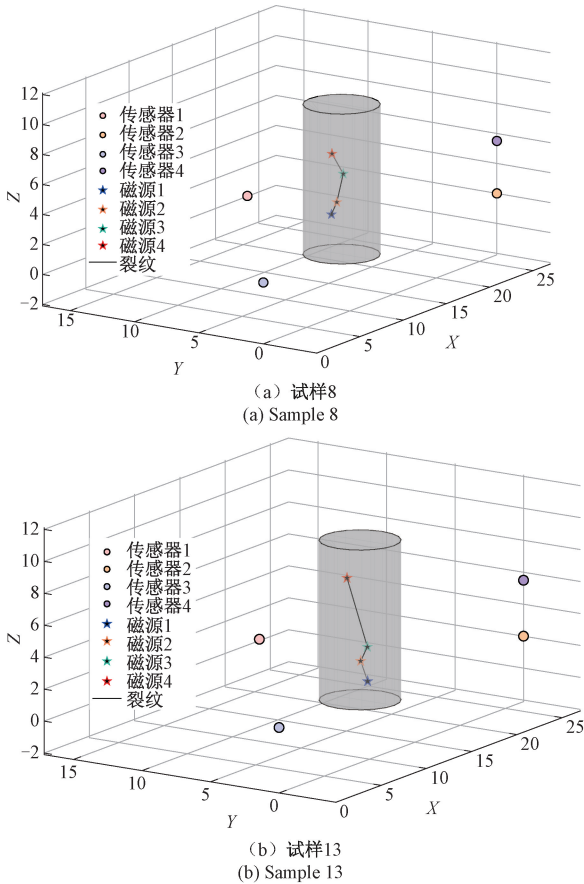


图 17 不同产地受载试样裂纹空间位置示意图
Fig. 17 Schematic diagram of crack spatial locations of samples under load from different origins

4 结 论

本文建立了基于电磁辐射空间矢量特性与甚低频电磁波衰减规律的受载煤样损伤监测模型,并提出裂隙时序演化全过程定位方法及其优化求解策略。通过预制裂纹试样单轴加载实验,分析不同煤样产地与加载速率对所提监测方法的影响,得到如下结论。

1) 基于煤体内部裂纹扩展电磁辐射生成机理,构建了带电裂隙的等效电磁辐射场源模型,根据场源模型与空间几何理论,提出了煤样损伤时空演化趋势监测方法;设计了一种适用于受载煤体电磁辐射监测的三轴磁通门传感器阵列构型,并从传感器标定、零偏校正、灵敏度一致性处理及噪声特性等方面对磁矢量测量过程进行了误差约束分析,通过非共面空间布置增强其空间可观性,并结合阵列几何敏感性与统计可估性分析验证了该构型在定位稳定性方面的合理性。利用其测得电磁数据分析等效辐射源时空分布特征可实现对煤体损伤的全过程监测。

2) 通过5种典型多峰测试函数对所提BIPDS优化算法进行验证,其计算结果相较于BFGS等传统算法误差缩小10倍以上,标准差降低约99%,能够实现对等效辐射源空间位置的高精度解算,为煤体稳定性评估和损伤状态监测提供了重要的算法支撑。

3) 电磁辐射合成矢量变化趋势能够表征 $x-y-z$ 三轴信号的整体特征,通过峰值指标选取煤样加载全过程中4个不同时间点的电磁辐射矢量峰值数据,并根据损伤监测方法实现对煤体裂隙发展过程的监测与追踪。经受载煤样定位试验验证,煤样损伤监测模型所得的贯通裂纹倾角为 78° ,其空间位置与实际裂纹分布基本相同,裂纹损伤监测效果理想。

4) 所提损伤监测模型的监测效果不受煤样的产地和加载速率等因素影响,实验结果表明该模型在不同条件下均能稳定监测煤体损伤演化过程,具有良好的准确性和普适性。

参考文献

- [1] CAI M, BROWN T E. Challenges in the mining and utilization of deep mineral resources [J]. Engineering, 2017, 3(4): 432-433.
- [2] 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 Q X, LI Y ZH, ZHAO SH K, 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.
- [3] 谢和平,高峰,鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.
- XIE H P, GAO F, JU Y. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [4] HE Q Y, LI Y C, LI D Q, et al. Microcrack fracturing of coal specimens under quasi-static combined compression-shear loading [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12: 1014-1026.
- [5] LIANG Z Z, XING H, WANG S Y, et al. A three-dimensional numerical investigation of the fracture of rock specimens containing a pre-existing surface flaw [J]. Computers and Geotechnics, 2012, 45: 19-33.
- [6] JING C, JI X, YANG W, et al. Crack propagation characteristics of coal body around the borehole under different loading rates [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 133: 104498.
- [7] HAO X, DU W, ZHAO Y, et al. Dynamic tensile behaviour and crack propagation of coal under coupled static-dynamic loading [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2020, 30(5): 659-668.
- [8] SUN Z, ZHAO Y, GAO Y, et al. Effects of bedding characteristics on crack propagation of coal under mode II loading: Laboratory experiment and numerical simulation [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2025, 17(2): 1037-1052.
- [9] WANG Y, YANG R. Study of the dynamic fracture characteristics of coal with a bedding structure based on the NSCB impact test [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 184: 319-338.
- [10] SONG S K, REN T, DOU L M, et al. Fracture features of brittle coal under uniaxial and cyclic compression loads [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2023, 10(9).
- [11] 袁亮,姜耀东,何学秋,等. 煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 306-318.
- YUAN L, JIANG Y D, HE X Q, et al. Research progress of precise risk accurate identification and monitoring early warning on typical dynamic disasters in

- coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 306-318.
- [12] DAI J J, LIU J F, ZHOU L L, et al. Crack pattern recognition based on acoustic emission waveform features [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 56(2): 1063-1076.
- [13] ZHOU X, LIU X F, WANG X R, et al. Acoustic emission characteristics of coal failure under triaxial loading and unloading disturbance [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 56(2): 1043-1061.
- [14] LI B, HE Y Z, LI L, et al. Damage evolution of rock containing prefabricated cracks based on infrared radiation and energy dissipation [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 125: 103853.
- [15] SHAN T C, LI Z H, ZHANG X, et al. Infrared radiation and acoustic emission of damage evolution and failure precursory for water-bearing coal [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(12): 7657-7674.
- [16] LIU W, MA L Q, JABOYEDOFF M, et al. Extraction of the key infrared radiation temperature features concerning stress and crack evolution of loaded rocks [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2024, 34(8): 1059-1081.
- [17] CHEN J, ZHU C, DU J S, et al. A quantitative pre-warning for coal burst hazardous zones in a deep coal mine based on the spatio-temporal forecast of microseismic events [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 159: 1105-1112.
- [18] LIU C, LI S G, CHENG C, et al. Identification methods for anomalous stress region in coal roadways based on microseismic information and numerical simulation [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(3): 525-530.
- [19] DI Y Y, WANG E Y, LI Z H, et al. Comprehensive early warning method of microseismic, acoustic emission, and electromagnetic radiation signals of rock burst based on deep learning [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 170: 105519.
- [20] FRID V, RABINOVITCH A, BAHAT D. Seismic moment estimation based on fracture induced electromagnetic radiation [J]. Engineering Geology, 2020, 274: 105692.
- [21] WANG E Y, HE X Q, WEI J P et al. Electromagnetic emission graded warning model and its applications against coal rock dynamic collapses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(4): 556-564.
- [22] LI X, ZHOU J, YANG Z, et al. Time-frequency evolution of electromagnetic radiation in deformation and fracture of composite coal-rock under different loading rates [J]. Construction and Building Materials, 2024, 453: 139030.
- [23] QIU L M, LIU Z T, WANG E Y, et al. Early-warning of rock burst in coal mine by low-frequency electromagnetic radiation [J]. Engineering Geology, 2020, 279: 105755.
- [24] ZHAO Y J, HE X Q, LIU Y, et al. Research on vector characteristics and applications of electromagnetic radiation induced by rock failure [J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(4): 045904.
- [25] 宋大钊,何学秋,韦梦菡,等.煤岩破坏电磁辐射定位技术方法[J].煤炭学报,2022,47(10): 3654-3667.
- SONG D ZH, HE X Q, WEI M H, et al. Electromagnetic radiation location technology for coal and rock failure [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3654-3667.
- [26] WEI M H, SONG D Z, HE X Q, et al. A three-axis antenna to measure near-field low-frequency electromagnetic radiation generated from rock fracture [J]. Measurement, 2021, 173:108563.
- [27] 李成武,杨威,王启飞.利用煤体破裂电磁信号进行局部震源定位方法研究[J].地球物理学报,2014, 57(3): 1001-1011.
- LI CH W, YANG W, WANG Q F. A method to determine the location of local mine earthquake source by using coal fracture electromagnetic signal [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(3):1001-1011.
- [28] HE X Q, CHEN W X, NIE B S, et al. Electromagnetic emission theory and its application to dynamic phenomena in coal-rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(8): 1352-1358.
- [29] 韦梦菡.岩体破裂近场低频电磁定位方法研究[D].北京:北京科技大学,2022.
- WEI M H. A near-field localization method for rock fractures using generated low-frequency electromagnetic field [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.
- [30] 王桥,唐新功,胡文宝.地中电偶极源极低频电磁场的分布与传播特征[J].地球物理学报,2024, 67(4): 1527-1545.

- WANG Q, TANG X G, HU W B. Distribution and propagation characteristics of extremely low frequency electromagnetic field of electric dipole source in the earth [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2024, 67(4): 1527-1545.
- [31] WEI M H, SONG D Z, HE X Q, et al. Generation mechanism of fracture-induced electromagnetic radiation and directionality characterization in the near field [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 273: 108684.
- [32] 赵天贺, 汪伟, 陈海龙. 平面三轴加速度传感器阵列振动测试方法研究 [J]. 电子测量技术, 2019, 42(15): 117-122.
- ZHAO T H, WANG W, CHEN H L. Research on vibration testing method of planar array of tri-axis accelerometer [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(15): 117-122.
- [33] XU H L, GU T T, ZHU Y, et al. Communication with a magnetic dipole: Near-Field propagation from air to undersea [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(2): 1052-1064.
- [34] YAPICI H, CETINKAYA N. A new meta-heuristic optimizer: Pathfinder algorithm [J]. Applied Soft Computing Journal, 2019, 78: 545-568.
- [35] 冯帆, 谢志伟, 陈绍杰, 等. 真三轴卸载-动力扰动下含裂隙砂岩破坏特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(3): 618-637.
- FAN F, XIE ZH W, CHEN SH J, et al. Investigation on the failure characteristics of fissured sandstone under true triaxial unloading and dynamic disturbance condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(3): 618-637.
- [36] 蒋力帅, 杨一鸣, 赵阳, 等. 动载下含内部裂隙类岩体力学响应与能量耗散规律 [J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(2): 137-150.
- JIANG L SH, YI Y M, ZHAO Y, et al. Mechanical response and energy dissipation law of rock-like mass with internal fractures under dynamic load [J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(2): 137-150.
- [37] 李鑫, 刘志勇, 杨桢, 等. 基于 CEEMD-IDWT 的受载煤岩微震电压去噪算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(8): 124-136.
- LI X, LIU ZH Y, YANG ZH, et al. Micro seismic voltage denoising algorithm for loaded coal rock based on CEEMD-IDWT [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(8): 124-136.
- [38] LI H R, QIAO Y F, SHEN R X, et al. Electromagnetic

radiation signal monitoring and multi-fractal analysis during uniaxial compression of water-bearing sandstone [J]. Measurement, 2022, 196: 111245.

作者简介



研究方向为矿山电工理论与新技术。

E-mail: yangzhen1980219@163.com

Yang Zhen (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2002, M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2006, and Ph. D. degree from Liaoning Technical University in 2016. Now he is a professor in the School of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University. His main research interests include theory and new technology of mining electrician.



Feng Feng received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2023. Now he is a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. His main research direction is mine electrical theory and new technology.



E-mail: lixinyz@126.com

Li Xin received her B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2003, M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2006, and Ph. D. degree from Liaoning Technical University in 2016. Now she is a professor in the School of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University. Her main research direction is mine disaster intelligent early warning technology.



E-mail: 19202469387@163.com

杨桢 (通信作者), 2002 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 2006 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 2016 年于辽宁工程技术大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学电气与控制工程学院教授, 主要研究方向为矿山电工理论与新技术。

冯丰, 2023 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为矿山电工理论与新技术。

E-mail: 15831508590@163.com

李鑫, 2003 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 2006 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 2016 年于辽宁工程技术大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学电气与控制工程学院教授, 主要研究方向为矿山灾害智能预警技术。

张钧博, 2019 年于湖南科技大学获得学士学位, 2023 年于韩国又石大学获得硕士学位, 现为辽宁工程技术大学博士研究生, 主要研究方向为矿山电工理论与新技术。

Zhang Junbo received his B. Sc. degree from Hunan University of Science and Technology in 2019, M. Sc. degree from Yeungnam University in South Korea in 2023. He is currently a Ph. D. candidate at Liaoning Technical University. His primary research focus on mining electrical engineering theory and new technologies.



张翹楚, 2024 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为矿山电工理论与新技术。

E-mail: 1322624266@qq.com

Zhang Qiaochu received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2024. Now he is a

M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. His main research direction is the theory and new technologies of mine electrical engineering.



刘昊原, 2023 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为矿山电工理论与新技术。

E-mail: 1535284524@qq.com

Liu Haoyuan received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2023. He is currently a M.Sc. candidate at the Liaoning Technical University in 2024. His main research interests include the theory of mine electrical engineering and new technologies.