



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

煤岩电磁辐射理论与技术新进展

何学秋 韦梦茜 宋大钊 李振雷 邱黎明 何生全 MAJIDKhan 王安虎

引用本文:

何学秋, 韦梦茜, 宋大钊, 等. 煤岩电磁辐射理论与技术新进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 168–190.

HE Xueqiu, WEI Mengqian, SONG Dazhao. New progress in theory and technology of electromagnetic radiation in coal and rock[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 168–190.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2020>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

近距离煤层水力冲孔破煤时电磁辐射信号响应特征研究

Study on response characteristics of electromagnetic radiation signal of contiguous seams through hydraulic punching
煤炭科学技术. 2019(11) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/fb76f306-10a3-45c0-9864-4b57bccce767>

煤矿井下水泵电动机设备瞬态电磁辐射骚扰的研究

Study on transient electromagnetic radiation disturbance of pump motors in underground coal mines
煤炭科学技术. 2019(9) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5334a0d3-eb96-4c88-8407-b4f6d3aaebc0>

区域和局部突出危险性动态实时监测预警技术研究

Study on real time dynamic monitoring and early warning technology of regional and local outburst danger
煤炭科学技术. 2021, 49(5): 110–119 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7a747374-1b92-4519-9a73-d5f0ed6833e0>

掘进工作面煤与瓦斯突出前兆特征及综合预警研究

Precursor characteristics of acoustic emission electromagnetic radiation and gas and comprehensive early warning of outburst risk in driving face
煤炭科学技术. 2020, 48(11): 147–152 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/09c2b1c3-e491-4ae4-a8e5-4e590cc31166>

煤矿深部开采冲击地压灾害结构调控技术架构

Architecture of structural regulation technology for rock burst disaster in deep mining of coal mine
煤炭科学技术. 2022, 50(2): 27–36 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/832c1706-c116-49d3-ab3e-b9e69c7f8f2e>

预制裂纹煤体静载黏滑亚失稳及声电信号响应特征

Stick-slip meta-instability of coal under uniaxial loading and AE and EMR response characteristics
煤炭科学技术. 2023, 51(5): 72–81 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1015>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

何学秋, 韦梦茜, 宋大钊, 等. 煤岩电磁辐射理论与技术新进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 168–190.

HE Xueqiu, WEI Menghan, SONG Dazhao, *et al.* New progress in theory and technology of electromagnetic radiation in coal and rock[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 168–190.

煤岩电磁辐射理论与技术新进展

何学秋^{1,2,3,5}, 韦梦茜^{1,2,3}, 宋大钊^{1,2,3}, 李振雷^{1,2,3}, 邱黎明^{1,2,3}, 何生全^{1,2,3},MAJID Khan^{1,2,3}, 王安虎^{4,5}

(1. 北京科技大学 大安全科学研究院, 北京 100083; 2. 北京科技大学 金属矿山教育部重点实验室, 北京 100083; 3. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 4. 北京科技大学 金属冶炼重大事故防控技术支撑基地, 北京 100083; 5. 中安安全工程研究院, 北京 100083)

摘要: 煤炭作为我国重要的基础能源和工业原料, 其安全开采是保障国家能源安全、支撑经济社会稳定发展的关键。随着浅部煤炭资源的逐渐枯竭, 深部开采逐渐成为我国煤炭资源开发新常态, 煤岩动力灾害风险随之攀升, 严重制约煤炭安全高效开采, 对我国煤炭工业可持续发展造成了恶劣的社会负面影响。准确可靠的监测手段是进行煤岩动力灾害防治的必要前提, 地球物理监测预警方法通过感知煤岩变形破坏过程中释放的声、电、磁等物理信号来反演煤岩体的损伤破坏状态, 已被广泛应用于煤岩动力灾害预警中。其中电磁辐射监测法具有非接触、无损、实时、前兆性强等优势, 适用于矿山信息化智能化发展要求。因此, 大力推动电磁辐射监测技术的发展, 对于煤岩动力灾害防治具有重要意义, 可为智慧矿山建设提供重要的技术支持。围绕试验现象、机理模型、技术方法3个方面对电磁辐射理论与技术研究成果进行综述, 回顾了电磁辐射现象的发现过程, 分析了电磁辐射信号特征、影响因素、力电耦合效应等煤岩电磁辐射特征规律, 根据典型电磁辐射机理模型与应力作用、裂纹扩展过程的相关性进行了分类评述, 并对现有煤岩电磁辐射监测预警装备及技术方法进行了简要介绍。在此基础上, 详细阐述了近年来在煤岩电磁辐射矢量特性研究、煤岩电磁辐射机理微观尺度验证、煤岩电磁辐射定位技术方面取得的新进展。总结了当前煤岩电磁辐射机理未完全揭示和无法实现孕灾区域定位两大理论与技术研究瓶颈, 为未来煤岩电磁辐射理论与技术的发展提出了新目标。

关键词: 煤岩动力灾害; 电磁辐射; 煤岩破裂; 监测预警

中图分类号: TD76

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)01-0168-23

New progress in theory and technology of electromagnetic radiation in coal and rock

HE Xueqiu^{1,2,3,5}, WEI Menghan^{1,2,3}, SONG Dazhao^{1,2,3}, LI Zhenlei^{1,2,3}, QIU Liming^{1,2,3}, HE Shengquan^{1,2,3},MAJID Khan^{1,2,3}, WANG Anhu^{4,5}

(1. Research Institute of Macro-Safety Science, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Metal Mines, Ministry of Education University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 4. Technical Support Base for Prevention and Control of Major Accidents in Metal Smelting, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 5. Zhongan Academy of Safety Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: As an important basic energy and industrial raw material in China, the safe mining of coal is the key to ensuring the national energy security and supporting the stable development of economy and society. With the gradual depletion of shallow coal resources, deep mining has gradually become the new normal of coal resource development in China, and the risk of coal-rock dynamic disasters has risen, which seriously restricts the safety and efficiency of coal mining, and has caused adverse effects on the sustainable development of coal

收稿日期: 2022-10-25

责任编辑: 常 琛

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-2020

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174162); 山东省重大科技创新工程资助项目(2019SDZY01)

作者简介: 何学秋(1961—), 男, 辽宁辽阳人, 教授, 博士。E-mail: hexq@ustb.edu.cn

通讯作者: 韦梦茜(1996—), 女, 安徽六安人, 讲师, 博士。E-mail: weimh@ustb.edu.cn

industry. Accurate and reliable monitoring methods are considered as the prerequisite for the prevention and control of coal-rock dynamic disasters. Geophysical methods are widely used in the early warning of coal and rock dynamic disasters by sensing the acoustic, electrical, magnetic and other physical signals released during the deformation and failure process to retrieve the damage and failure state of coal and rock mass. Among those methods, the electromagnetic radiation method is a non-invasive, non-destructive, real-time and strong precursory technique suitable for the development requirements of mine informatization and intellectualization. Therefore, the development of electromagnetic radiation monitoring technology is of great significance for the prevention and control of coal and rock dynamic disasters and can provide important technical support for the construction of intelligent mines. The research achievements of electromagnetic radiation theory and technology are summarized in three aspects: experimental phenomena, mechanism models and technical methods. The discovery process of electromagnetic radiation phenomenon is reviewed. The signal characteristics, influencing factors, electromechanical coupling effects and other electromagnetic radiation characteristics of coal-rock are analyzed. According to the correlation between typical electromagnetic radiation mechanism models, stress action and crack propagation process, a classified review is made. The existing coal and rock electromagnetic radiation monitoring and early warning equipment and technical methods are then briefly introduced. On this basis, the new progress made in recent years is described in detail, including the research on vector characteristics of electromagnetic radiation, micro-scale verification of electromagnetic radiation mechanism, and electromagnetic positioning technology of coal-rock fracture. It summarizes the two current theoretical and technical research bottlenecks that the mechanism is not fully revealed and the location of disaster-prone areas cannot be achieved. Finally, a new target for the future development of electromagnetic radiation theory and technology is proposed.

Key words: coal-rock dynamic disaster; electromagnetic radiation; coal-rock fracture; monitoring and early warning

0 引言

煤炭是我国重要的基础能源和工业原料,在未来相当长的一段时期内,煤炭的生产和消耗仍将保持较大规模。煤炭安全高效开采为国家能源安全稳定和经济社会发展提供了有力保障。我国作为采矿大国,拥有数以万计的井工煤矿、非煤矿山,矿区地质条件复杂,煤炭资源埋藏深,近年来浅部煤炭资源逐步枯竭,全国各地许多矿区已经进入了深部开采阶段。随着开采深度增加,煤层赋存条件愈加复杂,深部煤岩体力学行为和工程响应发生根本性变化,导致煤岩动力灾害事故发生的频次和强度随之增加,对矿井安全生产、人员生命和财产安全构成严重威胁^[1-4]。近年来接连发生在山东龙郛煤矿、吉林龙家堡煤矿、贵州广隆煤矿、陕西燎原煤矿等矿井的数起严重的冲击地压、煤与瓦斯突出事故,损失惨重,社会影响极大,引起党和国家的高度重视,要求加强灾害源头治理措施。

煤岩动力灾害的精准预警是防范灾害发生的关键。煤岩动力灾害过程极为复杂,呈现出明显的非线性流变突变特征^[5]。然而,由于煤岩体结构复杂,通过直接观测获取其内部损伤破坏信息难度较大,需要借助声、电、磁等物理信号反演煤岩体的损伤破坏状态,以此实现对煤岩损伤破坏过程的表征。目前,主要采用传统的钻屑法^[6]、应力法^[7],以及微震法^[8]、地音法(声发射)^[9]和电磁辐射法^[10]等地球物理方法进行煤岩动力灾害监测预警。地球物理方法

因实时、无损、能连续动态监测而得到国内外广泛应用^[11-13]。

对煤岩电磁辐射的研究首先基于地震前的电磁异常现象开展^[14],研究表明,煤岩体各个尺度的破裂均会产生明显的电磁信号,电磁辐射与煤岩破坏过程应力变化及裂纹扩展密切相关,通过挖掘电磁辐射包含的信息,可以了解煤岩损伤破坏过程。同时,电磁辐射传输速度快,在传播过程中不易产生明显畸变,保真度高,并且电磁辐射非接触式的信息采集方式可以实现煤岩损伤破坏全过程的信息采集。因此,深入研究电磁辐射技术理论,对于描述煤岩体非线性损伤破坏过程、揭示煤岩动力灾害演化机理至关重要,对于提升煤岩动力灾害防治水平具有重要意义。在矿山智能化发展背景下,自动化程度高、人为干扰少的监测预警技术是煤岩动力灾害监测预警的必然趋势。电磁辐射监测预警技术具有非接触、无损、实时、前兆性强等优势,在灾害预防中发挥了重要作用,其便利性、有效性已经得到了检验。大力推动电磁辐射监测技术的发展,可为智慧矿山建设提供重要的技术支撑。

针对煤岩电磁辐射理论与技术领域研究成果,笔者系统地论述国内外学者在试验、理论、技术方面开展的研究工作,详细阐述团队近年来取得的新进展,并分析现有研究中存在的问题,提出未来研究的重点与发展方向。

1 煤岩电磁辐射现象与特征规律

多种固体材料的变形破裂过程中伴随着电磁辐

射的产生,该现象最早由 Stepanov 在 1933 年观察 KCl 加载过程时发现^[15],随后大量研究围绕离子晶体^[16]、金属^[17]、聚合物^[18]以及煤岩砧体^[19-20]受载过程电磁辐射现象展开。电磁辐射监测系统的基本构成如图 1 所示,通常使用电磁天线或电容式传感器来感知材料变形破裂产生的电磁信号,采集存储后以便监测分析。

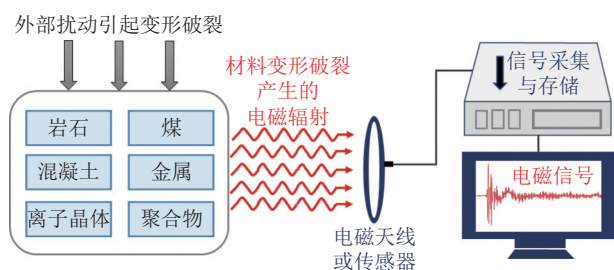


图 1 多种材料受载产生电磁辐射现象

Fig.1 Electromagnetic radiation phenomenon produced by various materials under load

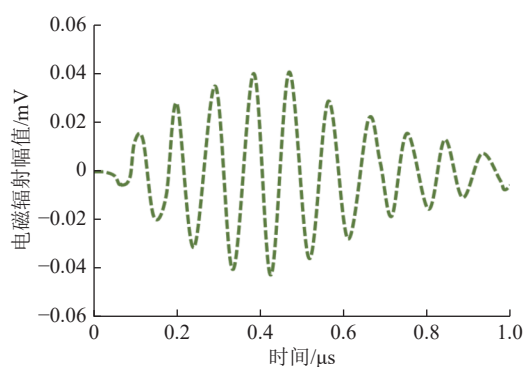
有关煤岩电磁辐射的报道始于 1955 年,М.И. Волярович和Э.И. Пархоменко^[21]在花岗岩、片麻岩和脉石英试样受载过程中观察到了肉眼可见的电磁现象。NITSAN^[22]研究证实含石英岩石破裂会产生无线电频段的电磁波。为研究地震伴随的电磁辐射现象,我国地震学学者^[23-26]开展大量岩石受载实验室试验和野外岩石爆破试验,发现含不同矿物成分的岩石破裂时普遍会引起电磁辐射。考虑到煤矿现场的复杂条件,笔者等^[27-28]首次对含瓦斯煤岩破裂产生的电磁辐射进行了研究,认为煤岩电磁辐射现象可以进行煤与瓦斯突出的非接触预测,FRID 等^[29-30]现场测试的结果也证实了这一结果。为进一步了解这一现象产生的原因,挖掘其应用前景,国内外学者对电磁辐射信号特征、各种因素对电磁辐射的影响机制等开展了多方面研究。

1.1 煤岩电磁辐射信号特征

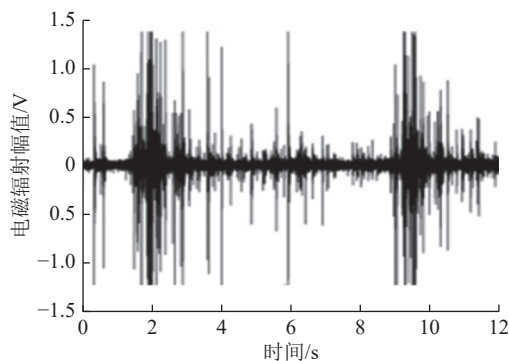
基于各种煤岩在不同加载条件下的破坏试验,许多研究围绕电磁信号的时域、频域特征开展。对于单轴压缩、摩擦、冲击、蠕变等多种不同的加载方式,加载过程中的电磁脉冲数和信号频率存在一定差异^[31-32]。相比之下,单轴压缩、摩擦和冲击破坏产生的电磁信号脉冲数较多、信号频带较宽。而蠕变破坏产生的电磁信号则表现出阶段性差异,与衰减和等速阶段相比,加速阶段的电磁信号脉冲数明显增大,信号频率增高。

电磁辐射信号的典型形状可以用频率、振幅、信号上升时间以及衰减时间和信号能量来描述。

O'KEEFE 等^[33]发现脆性材料断裂产生的电磁信号呈脉冲状,并且提出电磁信号的形状取决于裂纹表面电导率变化。FRID 等^[34]则得出结论,电磁辐射信号的基本波形不受加载方式影响,给出的理想情况下单个裂纹引发的电磁脉冲波形如图 2a 所示。随着裂纹扩展过程,电磁信号的波形表现出振荡式上升和衰减,分别对应于裂纹的持续扩展和扩展终止。而在岩石试样破坏时监测到的结果,以图 2b 中花岗岩单轴压缩产生的电磁信号为例,信号往往表现为多个振荡式脉冲的叠加,无法直接分辨出单个电磁脉冲形状。



(a) 理想电磁脉冲波形



(b) 试验得到的电磁信号

图 2 电磁信号的波形特征^[33-35]

Fig.2 Characteristics of electromagnetic waveforms^[33-35]

表 1 对不同国家不同时期试验得到的煤岩材料单轴压缩破坏过程中产生电磁信号的强度和频率范围进行了粗略统计。尽管由于监测系统响应频率与增益系数的不同,这些试验研究结果难以直接进行比较,但仍可得出,煤岩单轴压缩产生的电磁信号频率范围较宽,涵盖高频、中频、低频、甚低频及以下频段。近年来对于煤岩破坏电磁辐射信号的研究主要集中在低频范围。

1.2 煤岩电磁辐射影响因素

煤岩体是一种多孔非均质材料,煤岩破裂产生电磁辐射的过程是多种影响因素的综合表现。表 2 总

表 1 煤岩单轴压缩产生的电磁信号强度与频率统计

Table 1 Intensity and frequency of electromagnetic signals generated from uniaxial compression of coal-rock

材料类型	电磁信号强度	电磁信号频率	来源及时间
花岗岩	0.5 ~ 5 mV	10 Hz ~ 100 kHz	OGAWA等, 日本, 1985 ^[36]
花岗岩、大理岩等	0.1 ~ 5 V	100 Hz ~ 5 MHz	刘煜洲等, 中国, 1997 ^[37]
石灰岩	0.2 ~ 2 mV	15 kHz ~ 10 MHz	RABINOVITCH 等, 以色列, 2002 ^[38]
煤	0.2 ~ 3 mV	3 kHz ~ 2 MHz	王恩元、何学秋等, 中国, 2003 ^[39]
花岗岩、大理岩等	0.1 ~ 1.4 mV	1 Hz ~ 138 kHz	钱书清、郝锦绮等, 中国, 2003 ^[40,41]
石灰岩、砂岩	0.1 ~ 4 V	0.8 ~ 13 kHz	NARDI 等, 意大利, 2009 ^[42]
大理岩、混凝土	1 ~ 2 μT	1 Hz ~ 10 kHz	LACIDOGNA 等, 意大利, 2011 ^[43]
组合煤岩	0.1 ~ 3 V	0 ~ 600 kHz	聂百胜、何学秋等, 中国, 2016 ^[44]
花岗岩	1 ~ 400 mV	1 ~ 100 kHz	BESPALKO 等, 俄罗斯, 2018 ^[45]
煤	0.2 ~ 2.5 V	1 ~ 25 kHz	何学秋团队, 中国, 2019 ^[46]

结了煤岩单轴压缩试验中产生电磁信号强度的影响因素。随着煤岩试样弹性模量增大, 信号强度也逐渐增大, 煤岩力学性质会对电磁辐射信号产生明显影响^[47]。电磁信号强度与破碎程度、加载速率、预制裂纹倾角等加载破坏参数间同样表现出明显的正相关关系。而水分和孔隙气体则会使得电磁信号强度降低。

表 2 煤岩单轴压缩试验中产生电磁信号强度的影响因素

Table 2 Influencing factors of electromagnetic signal intensity generated in uniaxial compression experiment

影响因素	试验结果
弹性模量	信号强度随弹性模量增大而增大 ^[48-49]
破碎程度	破碎程度越大, 信号强度越大 ^[50]
加载速率	加载速率越大, 信号强度越大 ^[51-52]
预制裂纹倾角	试样裂纹倾角增大, 信号强度明显增大 ^[53]
含水率	随试样含水率增大, 信号强度降低 ^[54]
孔隙气体	孔隙气体使得信号强度整体上降低 ^[55]

刘煜洲等^[56]提出电磁信号主要与岩石脆性破裂有关, 并且分析了岩石矿物成分对电磁信号的影响, 得出含石英、黄铁矿、黄铜矿和长石等矿物的岩石更易产生高强度信号。煤岩节理等结构特征也被认为是影响电磁辐射信号的因素^[57]。王恩元等^[58-59]对煤受热升温过程中和砂岩高温处理后产生的电磁辐射进行了研究, 证实温度会对电磁辐射产生影响, 信号强度随温度升高而增强。

除单轴压缩破坏过程外, 其他破坏方式下产生电磁辐射的影响因素也引起了国内外学者的关注。李成武等^[60]基于霍普金森杆试验, 研究了冲击速度、耗散能、应力应变状态等对煤岩破裂产生电磁辐射

信号的影响, 电磁信号能量随冲击速度和应力增大而增大。KOBAYASHI 等^[61]研究得出岩石三点弯曲试验中的电磁信号强度与最大应力强度因子之间成正比, 并且在动载条件下破坏产生的电磁信号强度要大于准静态加载破坏条件。

煤岩破裂过程可以辐射多个频段的电磁信号, 对电磁辐射信号频率的影响因素研究十分重要。李夕兵等^[62-63]研究并建立了电磁辐射频率与泊松比、弹性模量等岩石物理力学参数之间的定量关系。KOKTAV 等^[64]提出电磁辐射频率可视为与裂纹尺寸有关的函数, 这一观点得到了其他学者的普遍认可^[65]。宋大钊等^[66]基于煤岩破坏过程中电磁辐射频谱的演化规律, 发现随着裂纹尺寸增大, 电磁信号主频降低, 由此建立了电磁信号主频与裂纹参数之间的理论表达式。

1.3 煤岩电磁辐射力-电耦合规律

煤岩破裂产生电磁辐射与煤岩加载损伤过程中的能量转化有关, 肖红飞等^[67]发现电磁能时序演化曲线与单轴加载过程的应力-应变关系曲线相对应。姚精明等^[68]研究得到受载煤体峰值弹性应变能与电磁辐射能量成对数关系。宋大钊等^[69]基于循环加载条件揭示了煤岩损伤耗散能和电磁能之间的关系。

在此基础上, 许多研究进一步揭示了电磁辐射与应力之间的相关性。胡少斌等^[70]研究发现煤岩体受载破裂过程中电磁信号动态非线性特征与应力有关。邱黎明等^[71]则得出随应力增大, 电磁辐射非线性特征趋于明显的结论。CARPINTERI 等^[72]试验得到了煤岩破坏过程中的载荷-声-电响应曲线, 如图 3a 所示, 发现电磁辐射信号主要出现在载荷曲线下降的时刻。娄全等^[73]对于加载全过程的声电信号进行全波形分析, 如图 3b 所示, 发现电磁辐射信号

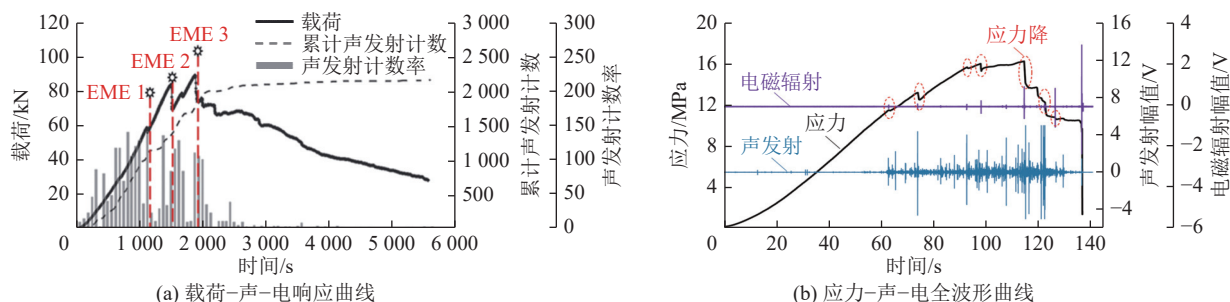


图3 应力降与电磁信号相关性

Fig.3 Correlation between stress drop and electromagnetic signal

与应力降之间有明显的对应性,并统计得到2者之间的相关性系数接近0.9。

根据大量煤岩电磁辐射试验结果,何学秋等^[74]认为,电磁辐射是由煤岩体内部损伤产生的微破裂而向外辐射电磁波的一种现象,电磁辐射与煤岩材料的损伤参量、本构关系等存在一定关系。由此,从煤岩材料中选取一个体元,假设其无损伤状态下具有线弹性性质,强度服从Weibull分布,且破裂时均会产生电磁辐射,则可以得到煤岩破坏过程中某一时刻 t_0 的电磁辐射脉冲数累计为

$$\frac{\sum N}{N_m} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^m\right] \quad (1)$$

根据损伤力学模型,可得一维情况下电磁辐射脉冲数表征的煤岩本构关系:

$$\sigma = E\varepsilon \left(1 - \frac{\sum N}{N_m}\right) \quad (2)$$

式中: σ 为应力; E 为平均弹性模量; ε 为应变; $\sum N$ 为 t_0 时刻电磁辐射累计脉冲数; N_m 为煤岩全破坏时的累计脉冲数; ε_0 和 m 均为常数。

将式(2)转化为如下形式, $\ln[-\ln(1 - \sum N/N_m)]$ 与 $\ln \varepsilon$ 间符合一次函数关系:

$$\ln\left[-\ln\left(1 - \frac{\sum N}{N_m}\right)\right] = m \ln \varepsilon - m \ln \varepsilon_0 \quad (3)$$

将煤岩受载破坏过程中的电磁辐射脉冲数以及煤岩力学参数测量结果根据式(3)中的一次函数关系式进行线性拟合,结果如图4所示,可得拟合曲线的复相关系数均在0.97以上,表明力-电耦合模型能较好地描述煤岩体受载破坏过程中电磁辐射演化趋势和特征。

1.4 煤岩电磁辐射矢量特性

对于煤岩电磁辐射现象的研究主要基于幅值、计数、能量等参数的时序演化规律进行,与电磁辐射

矢量特性相关的研究则鲜少涉及。KOKTAVY^[64], TAKEUCHI等^[75]发现岩石加载破坏过程中天线在不同位置接收到的电磁信号强度有所差异,并提出电磁辐射的方向性差异与微裂纹方向有关。GADE等^[76-77]在聚合物断裂实验中证实了电磁信号强度取决于微裂纹与天线之间的角度。这些试验结果都需要通过不断改变天线布置方式得到,无法在同一测点进行多方向的实时电磁辐射监测。

为解决上述问题,何学秋团队^[78]研制了可实现电磁矢量监测的新型三轴电磁天线。该天线基于磁性多层膜材料的隧道磁阻效应原理监测,可以测量3个正交方向上0.2~300 kHz频段的电磁辐射。由新型三轴电磁天线监测到的典型电磁信号波形如图5a所示,3个通道的信号有明显的上升和衰减过程,虽然上升及持续时长基本一致,但信号波形有明显差异。信号经快速傅里叶变换后得到的频谱如图5b所示,3个通道的信号幅频分布较为相似,主频均为7.81 kHz,其他优势频点的分布也较为一致。3个通道的信号可视为电磁场在3个正交方向上的分量。

在此基础上构建了如图6所示的煤岩破坏电磁矢量监测系统,利用4个中心对称的三轴电磁天线监测石灰岩劈裂破坏过程产生的电磁辐射。提取试样最终劈裂破坏时对应的各组三分量电磁信号,根据矢量合成的原理,由三分量信号可以得到一组矢量合成信号,合成信号的幅值计算方法如下:

$$B_s = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (4)$$

式中, B_s 为合成信号幅值; B_x 、 B_y 、 B_z 分别为三分量信号的幅值。

得到的各测点矢量合成信号如图7a所示,不同测点处的合成信号波形特征较为相似。试样最终劈裂破坏之前的阶段,合成信号幅值极低,此时基本为本底噪声影响。在劈裂破坏发生瞬间,合成信号幅值瞬间上升,在达到某个峰值后迅速降低,随后在一

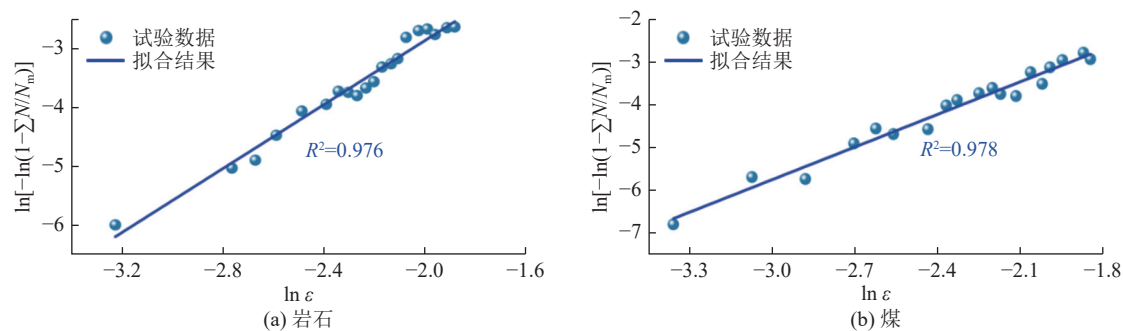


图 4 力-电耦合模型试验验证

Fig.4 Experimental verification of force electrical coupling model

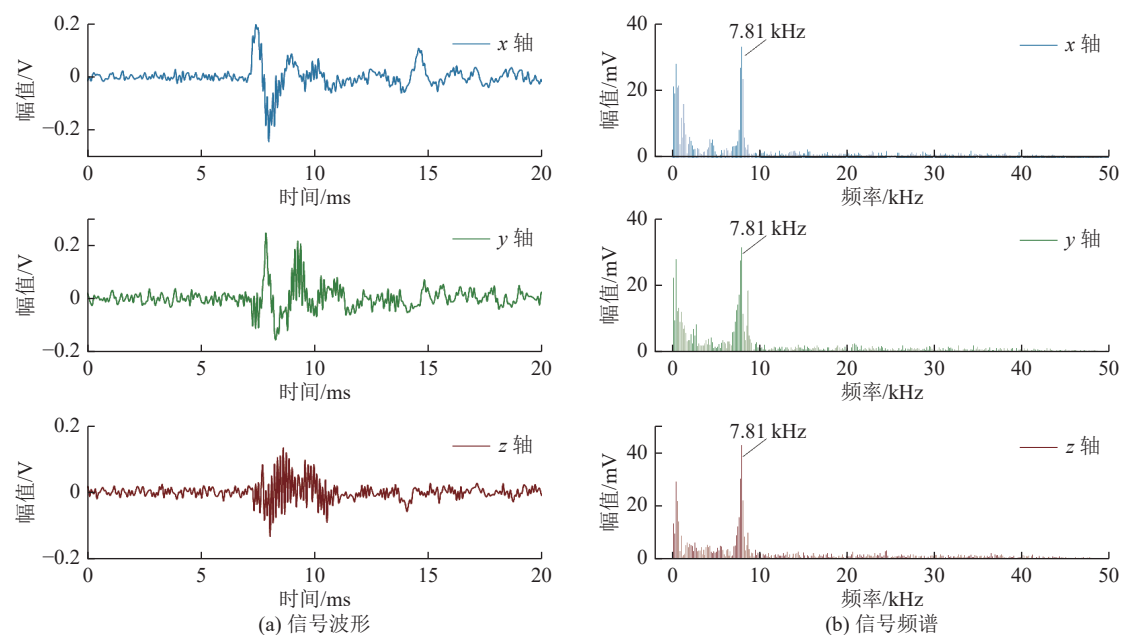


图 5 三轴电磁信号时频特征

Fig.5 Time frequency characteristics of three-axis electromagnetic signals

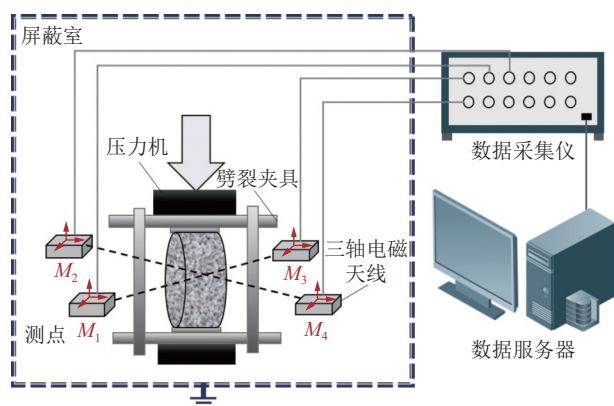


图 6 煤岩破坏电磁矢量监测系统

Fig.6 Electromagnetic vector monitoring system for coal and rock fracture

定水平持续波动,不同测点处波峰出现的时刻和波峰强度都比较相近。为量化对比,统计了 4 个测点处各坐标轴方向上的电磁信号强度以及矢量合成信

号强度,对信号强度的统计取所得信号绝对值的最大值,统计结果如图 7b 所示。除了三轴方向上的信号强度有明显差别,不同测点的三轴信号强度分布也表现出明显的差异。其中, M_1 和 M_3 测点处的三分量信号强度具有相似的特征, y 轴的信号强度均小于 x 轴和 z 轴的信号强度。而 M_2 和 M_4 测点处的三轴信号强度分布则并不具有统一的规律。相比于其他测点的统计结果, M_1 测点处的矢量合成信号强度显著增大。虽然劈裂破坏的宏观裂纹取向相对固定,但宏观裂纹形成过程是非线性的,可能有多个随机取向的微裂纹存在,最终监测到的裂纹所致的矢量电磁场在试样周围呈非均匀分布状态。

根据某一测点不同方向上的电磁信号幅值,可将三分量信号转化为同时包含强度和方向角信息的矢量,其与空间真实的磁感应强度矢量方向一致,大小成正比。方向角可由下式计算:

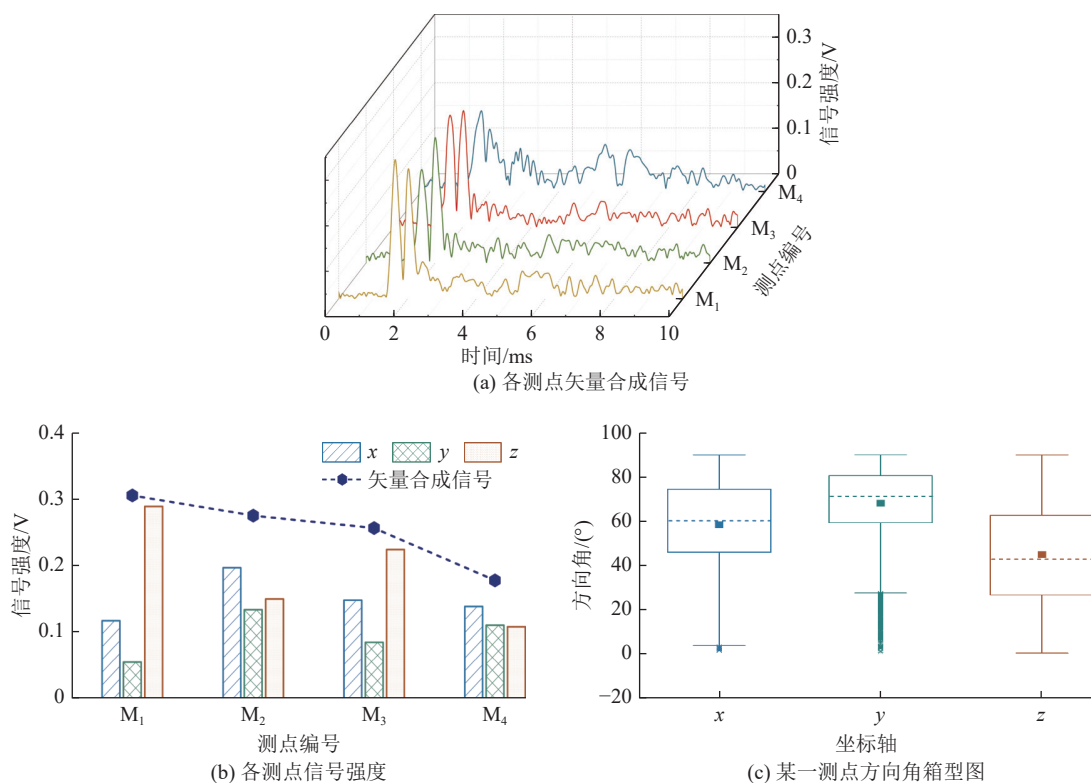


图7 煤岩破坏电磁矢量特征

Fig.7 Electromagnetic vector characteristics of coal and rock fracture

$$\cos \alpha_s = \frac{B_x}{B_s}, \cos \beta_s = \frac{B_y}{B_s}, \cos \gamma_s = \frac{B_z}{B_s} \quad (5)$$

式中, α_s 、 β_s 、 γ_s 分别为合成矢量与各测试轴平面的夹角。

根据上式对于图7a中信号的方向角进行了计算,并对三轴方向角的分布进行统计,得到的箱型图如图7c所示。各轴方向角的分布不符合标准正态分布,箱型的中线明显偏离其中心,特别是y轴上存在一些明显的异常值。根据箱型中线的偏离程度,y轴和z轴的分布均向左倾斜,而x轴分布则向右倾斜。中线的取值范围在40°~80°,从上到下的顺序依次为y轴、x轴和z轴。对于单个测点,由于信号的幅值大小和正负不断变化,信号持续时间内的矢量变化过程复杂,但矢量的3个方向角会分别趋于一定角度范围,因此可以利用矢量合成信号提取特征矢量,以表征电磁辐射矢量特性。

2 煤岩电磁辐射机理

为了利用煤岩电磁辐射实现准确监测预警,必须了解电磁辐射产生的原因。学者们针对不同的材料提出了很多不同的物理机制来解释电磁辐射的产生,但很多机理受到材料性质的限制,目前仍然没有合适的统一理论。并且由于电磁辐射受到多种影响因素的作用,单一的机理难以解释各种不同特征的电磁辐射现象,实际可能是多种机理综合作用的结果。

2.1 基于应力作用的电磁辐射机理

根据观测到的同震电磁异常现象以及对煤岩电磁辐射现象的试验研究,许多学者提出了基于应力作用的电磁辐射机理。其中,压电效应机理首先将电磁辐射与应力之间建立了联系。压电效应最先由PIERRE和JAQUES在描述电气石晶体时提出^[79],当某些晶体类的固体受到应力时会有压电现象发生。YOSHIDA和OGAWA^[80]在干、湿2种状态下花岗岩的单轴压缩破坏试验中均观察到了电磁辐射现象,并对石英这一重要成岩矿物的压电效应进行了描述。石英的压电效应可以用图8表示^[81],未受到应力作用时正负电荷重心重合,电极矩矢量和为0,石英晶体呈电中性,在受到应力作用后,石英晶体结构发生变形,正、负离子的相对位置发生改变,电偶极矩增大。受应力影响的岩石将诱发压电效应,但石英晶体的随机分布、孪晶和对映形态会抵消局部压电电压,使得压电引起的电磁辐射强度较为有限^[82]。

类似地,受岩石矿物成分影响的电磁辐射机理还有压磁效应^[83],在压应力作用下,岩石磁化率及剩余磁化强度发生变化,以致引发短期电磁现象。压磁效应仅限于含有铁磁矿物的岩石或其他材料,例如磁黄铁矿、磁铁矿或其他铁和钛氧化物等,主要发

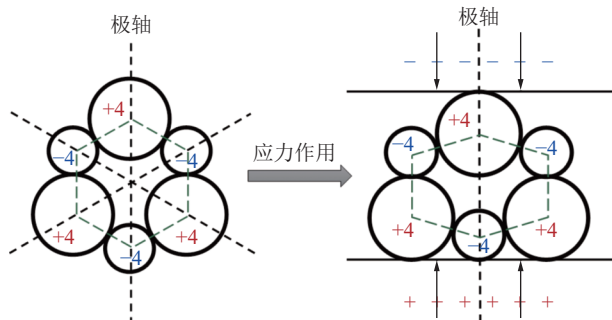


图 8 压电效应示意

Fig.8 Schematic of piezoelectric effect

生在火成岩中,尤其是玄武岩和辉长岩。

TEISSEYRE 等^[84]基于位错动力学过程,对地震电磁前兆的产生机制进行了理论描述。这一移动带电位错的概念首先由 Stepanov 在 1933 年提出^[15],每个晶体都含有位错,这些位错在静态条件下被相反电荷的点缺陷中和,被施加应力后,位错开始移动,移动速度远大于原有中和点缺陷,导致了极化现象。IVANOV 等^[85-86]和 EGOROV 等^[87]认为电磁辐射是带电位错发生横向滑移并集聚直至临界浓度突变发生的结果,并给出了具有不同力-电特征的场源模型。该模型虽然可以解释电磁辐射的矢量特征,但是脆性材料常态下位错密集、相互约束,使得移动位错产生的影响很小。

FREUND 等^[88]提出同震低频电磁现象是在应力作用下空穴载流体激活,电荷逐渐释放的结果。TAKEUCHI 等^[89-90]根据这一过程建立了应力感应电动势模型,如图 9 所示,在非均匀加载条件下,由

于过氧键变形断裂,岩石中的空穴电荷载体激活,导致了岩石表面正电荷化,随着空穴移动,电子不断跃迁产生电势。

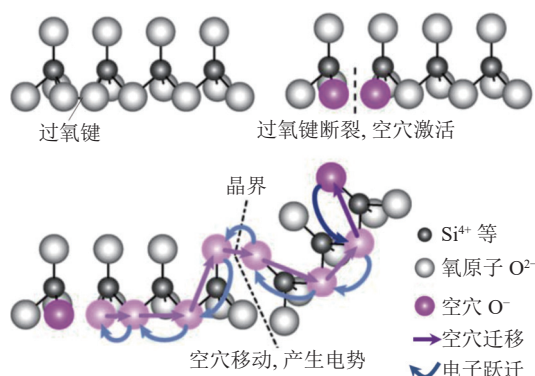


图 9 应力感应电动势模型

Fig.9 Stress induced electromotive force model

在表 3 中对于上述几种电磁辐射机理的优势与局限性进行了总结,主要从对材料性质的依赖性、是否能够解释电磁辐射矢量特征等角度进行分析,可见这几种机理的适用范围相对有限。相比之下,中国学者提出的基于应力作用的电磁辐射机理则较为普适。王恩元等^[91-92]提出了应力诱导极化的模型,岩石内部的电荷在应力作用下发生位移,原有的电荷均衡状态被打破,这一逆电致伸缩效应在煤岩材料中普遍存在。笔者等^[28]提出了应力诱导电偶极子瞬变的机理,认为随着煤岩体内部应力变化,电偶极子的状态也不断发生变化,电偶极子瞬变的过程会向外辐射电磁波。

表 3 部分基于应力作用的电磁辐射机理的优势与局限

Table 3 Advantages and limitations of electromagnetic radiation mechanism based on stress

机理	优势	局限性
压电效应	压电矿物在岩石中十分普遍	取决于材料性质;难以解释电磁辐射矢量特征;产生信号强度过低
压磁效应	可解释瞬态电磁现象	取决于材料性质;难以解释电磁辐射矢量特征
移动带电位错	基本不受材料影响;可以解释电磁辐射矢量特征	在脆性材料中产生信号强度过低
应力感应电动势	可以解释电磁辐射矢量特征	取决于材料性质;必须在非均匀加载条件下

2.2 基于裂纹扩展的电磁辐射机理

煤岩破裂的过程伴随着裂纹的萌生与扩展,许多电磁辐射机理基于裂纹扩展过程提出。其中,裂纹扩展过程中的电荷分离常被视为产生电磁辐射的关键^[93-94]。电荷分离过程示意如图 10 所示,在断裂过程中由于原子键破坏等原因使得裂纹面上产生不同带电区域,在裂纹表面和裂纹面之间可能有电偶极子产生^[95],自由电荷的产生和电荷重新排布的过程

导致了裂纹扩展过程中的电磁辐射。潘一山等^[96-98]证实煤岩加载破坏过程会产生感应电荷,认为自由电荷来源于微裂纹持续扩展引起的裂纹尖端束缚电荷突变。裂纹面周围的非均匀形变^[99]和滑移摩擦^[100]也被认为是自由电荷产生的原因。

由于电荷排布规律的差异,建立了 2 种不同的模型。FINKEL 等^[101]提出在裂纹面两侧正、负电荷是随机排列的,由于裂纹面间距离很小,电势差会导

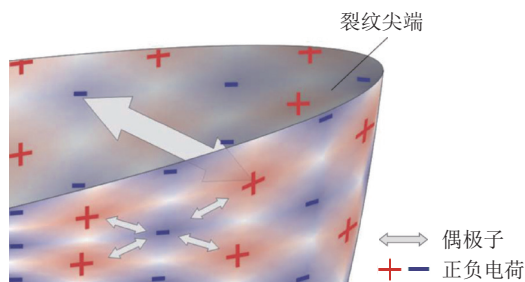


图 10 电荷分离示意

Fig.10 Schematic of charge separation

致放电,从而产生电磁辐射。然而,MIROSH-NICHENKO 和 KUKSENKO^[102]指出,放电辐射的频谱与“白噪声”非常接近,并不符合破裂所致的电磁信号特征。区别于上述放电模型,OGAWA 等^[36]认为电荷重新排布后两裂纹面的电性正好相反,由此构成类似电容器的装置不断在裂纹面周围充电和放电。O'KEEFE 等^[33]建立了关于电容器模型的理论描述和公式,如图 11 所示,将 2 个裂纹面视为平行板电容器的极板,随着裂纹扩展,极板间距离增大导致了电容器的电容变化,电荷沿着两裂纹面间流动形成电流,从而引发了电磁辐射。该模型被认为仅适用于拉伸裂纹,且难以解释部分电磁脉冲形状以及电磁辐射矢量特征。

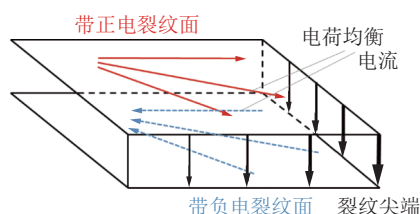


图 11 电容器模型

Fig.11 Capacitor model

裂纹扩展过程中的电荷运动被认为是电磁辐射产生的另一个关键。CRESS 等^[103]认为岩石破裂时的低频电磁辐射源于带电粒子振动及线性运动。ENOMOTO 等^[104]则提出裂纹扩展过程中带电粒子的发射及变速运动过程导致了电磁辐射。郭自强等^[105-107]建立了近场范围的电四极子模型,认为微破裂引起的电子发射导致了低频电磁辐射。朱元清等^[108]提出电磁辐射主要由裂纹尖端电荷的加速运动引起。FRID 等^[109]和 RABINOVITCH 等^[110-111]建立了如图 12 所示的表面振荡波模型,认为裂纹扩展过程中在裂纹面形成表面振荡波,由于原子键断裂,表面电荷的平衡状态被打破,随裂纹面一起振荡并移动,该过程会向外辐射电磁能量。相比之下,该模型不受材料性质的影响,并且可以有效地解释电

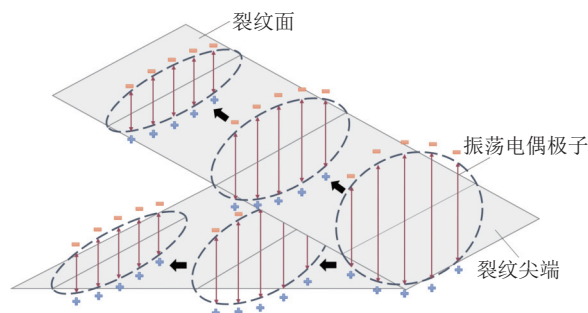


图 12 表面振荡波模型

Fig.12 Surface oscillation wave model

磁辐射的矢量特征,得到了较多学者认可。

2.3 煤岩微表面电性微观尺度验证

目前所提出的电磁辐射机理侧重点不同,但普遍认识到电磁辐射的产生与受载破裂过程中电荷的产生及运动方式相关。由于现有监测手段的局限性,这一过程难以直接与试验监测到的电磁信号建立联系,因此,想要深入揭示煤岩电磁辐射机理,需要探明煤岩材料在微观尺度受载时的电性特征演化机制。

为此,笔者团队基于原子力显微镜和自主设计研制的微观加载装置,搭建了如图 13 所示的煤岩微表面电性测试试验系统。试验采用的原子力显微镜为 Dimension ICON2-SYS 型,具备表面形貌、力学、电学、磁性等多种性质的测试功能^[112-113]。微型加载装置可直接连接并固定于原子力显微镜的测试台并随之移动,以实现煤岩受载过程中微表面电性特征的原位观测,其最大加载力为 2 kN,最小采样间隔为 100 ms。

根据微观加载装置压缩卡槽单元的尺寸,将花岗岩、页岩等多种煤岩切割磨抛后制成 5 mm×5 mm×10 mm 的块状试样。首先在尚未加载的条件下测试煤岩微表面电势分布,得到的结果如图 14 所示。可以发现,煤岩微表面电势以正电势居多,在不同位置的表面电势有所差异,存在局部的高、低电势区域(红圈区域)。煤岩微表面电势跨度较大,且煤微表面电势跨度明显大于岩石。

根据表面电势测试结果,对煤岩微表面不同测量区域的电势均值进行了统计,并由此估算了表面电荷密度,各煤岩试样的统计结果见表 4。

静态条件下煤岩微表面的等效电荷密度集中在 $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{ C/m}^2$ 量级。煤岩微表面等效电荷密度 δ 估算方法如下:

$$\delta = \frac{\varphi(x)}{2\varepsilon_0(\sqrt{x^2 + R^2} - x)} \quad (6)$$

其中, $\varphi(x)$ 为测试区域表面电势均值,测试区域

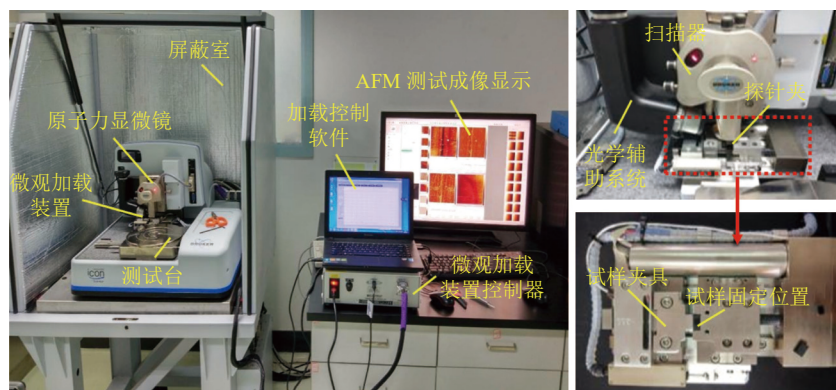


图 13 煤岩微表面电性测试试验系统

Fig.13 Test system for electrical property of coal and rock micro surface

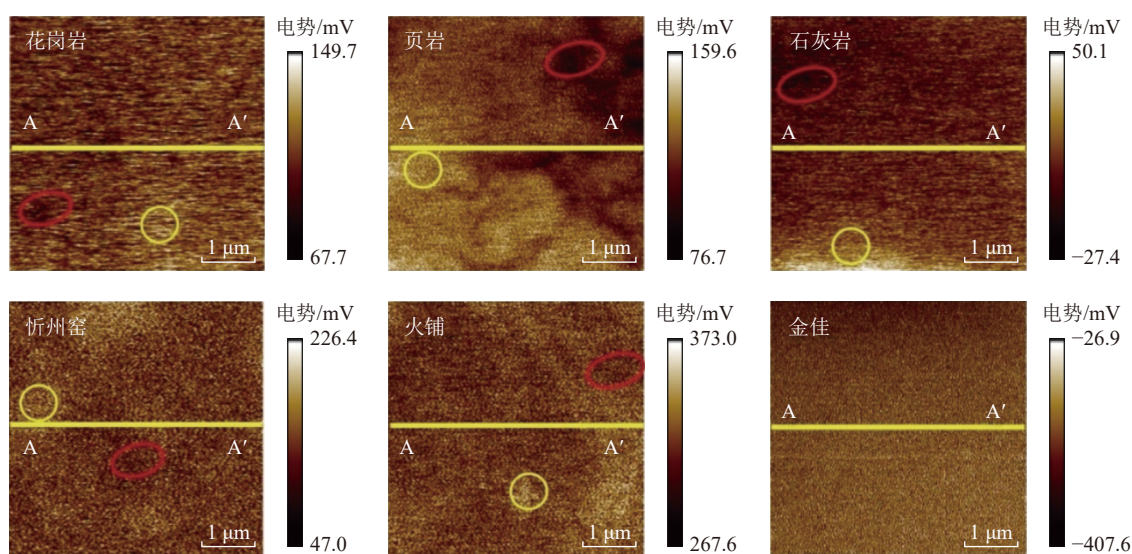


图 14 煤岩微表面电势分布

Fig.14 Distribution of micro surface potential of coal and rock

表 4 煤岩微表面等效电荷密度估算结果

Table 4 Estimation results of equivalent charge density on micro surface of coal and rock

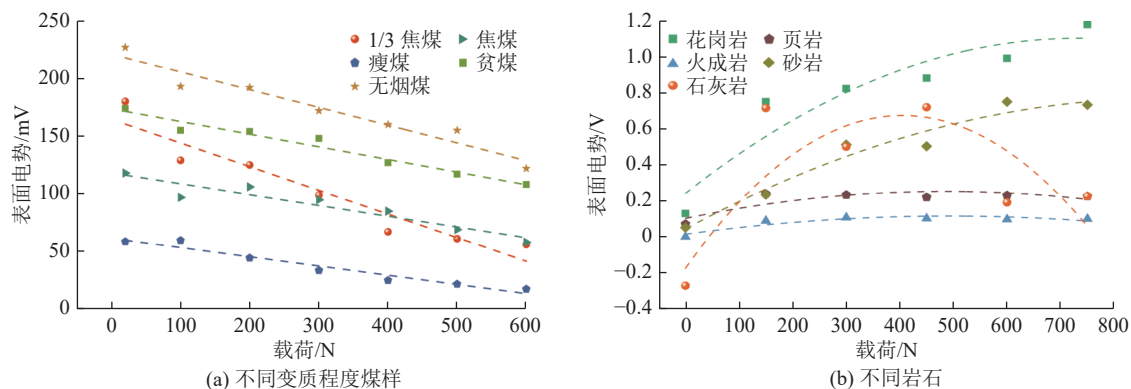
试样	表面电势均值/mV	表面电荷密度/($\mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$)
花岗岩	155.93	1.17
页岩	47.56	0.37
石灰岩	241.50	1.85
忻州窑矿煤样	75.69	0.58
火铺矿煤样	352.67	2.70
金佳矿煤样	551.88	4.23

直径 $R=2.5\ \mu\text{m}$, 探针高度 $x=200\ \text{nm}$, ε_0 为真空介电常数。

动态加载过程中控制加载速度不变, 速度维持在 $0.05\ \text{mm/min}$, 在保载阶段进行微表面电性参数测试, 岩石的载荷梯度设置为 150、300、450、600、750 N, 煤的加载梯度则进一步减小。煤岩微表面电

势随动态加载载荷的变化规律如图 15 所示。由图 15a 可知, 随着载荷增大, 不同变质程度煤样的微表面电势有增有减, 但总体来看, 各煤样微表面电势随载荷增大均呈现递减的趋势。由图 15b 中则可以看到, 随着载荷的增大, 细砂岩、花岗岩表面电势呈现逐渐增大的趋势, 火成岩、页岩、石灰岩的表面电势呈现先增大后减小的趋势, 且均能用 2 次曲线进行拟合。在动态加载情况下, 煤岩微表面电势与加载载荷呈现良好的相关关系。

基于静态和动态加载条件下的微表面电性测试实验, 从微纳米尺度证实了煤岩微表面自身具有荷电性, 且在受载时煤岩微表面会产生电荷的局部运移。表面电势一方面来源于表面孔隙缺陷内电荷的存在和聚集, 另一方面还受表面不同极性基团以及表面衍生带电基团的影响。静态条件下煤岩微表面电荷、带电基团以及休眠态载流子均处于非均匀分布状态。而在载荷增大过程中, 微表面电荷、带电基

图 15 煤岩微表面电势-加载载荷变化分布^[114-115]Fig.15 Distribution of change of coal and rock micro surface potential load^[114-115]

团会随表面变形、偏移产生位置转移,导致了表面电势的重新分布。

3 煤岩电磁辐射监测预警技术

煤岩破裂产生的电磁辐射具有明显的前兆性,电磁前兆已成为地震短临预测的有效手段之一^[116]。在矿山等地下工程现场也常能监测到煤岩引起的电磁辐射现象,钱书清等^[117]在引爆花岗岩山体过程中观测到了低频电磁信号,FRID 等^[118]根据煤矿顶板坍塌前观测到了明显的电磁辐射现象,提出由电磁脉冲数可以反映岩体的应力状态变化。目前,作为一种非接触式的实时监测预警方法,电磁辐射技术被广泛应用于煤岩动力灾害监测预警^[119-121],在地下工程岩体应力状态评估、边坡稳定性监测等领域也实现成功应用^[122-123]。

3.1 煤岩电磁辐射监测预警装备

煤岩电磁辐射理论与技术的研究和监测预警装备的研发相辅相成、共同促进,煤岩电磁辐射理论与实验研究的突破可以为监测预警装备提供科学指导和技术支撑,而电磁监测预警装备的进步可以为理论研究提供更全面、更详细的第一手数据,进一步促进煤岩电磁辐射监测预警技术的发展。针对煤岩电磁辐射监测预警装备,国内外学者开展了大量的研发工作。

俄罗斯学者 VOSTRETISOV 等^[124]研发了 EMRR 系列电磁辐射监测设备(图 16),监测频率范围为 10~70 kHz,经现场验证可满足地下矿山长时监测需求。德国学者 OBERMEYER 等^[125]研发了便携式的 Cerescope 电磁辐射仪,如图 17 所示。Cerescope 电磁辐射仪主要由一个定向天线和一个接收器组成,可在 5~50 kHz 频率范围监测,放大倍数为 90~120 dB,灵敏度可达 5×10^{-6} A/m,具有明显的定向接



图 16 俄罗斯 EMRR 系列电磁辐射监测设备

Fig.16 Russian EMRR series electromagnetic radiation monitoring equipment



图 17 德国 Cerescope 电磁辐射仪

Fig.17 German Cerescope electromagnetic radiometer

收模式。该仪器功耗较低,待机时间长,但内存有限,需在长时测量时配备计算机。俄罗斯矿业地质力学与矿山测量研究所研发了 Angel-M 型电磁辐射仪(图 18),主要部件包括可插拔式电磁天线、接收机和多功能连接器,监测范围在 5~50 kHz 频段内,采频最高可达 467 kHz,放大倍数最高为 90 dB,使用时需设置阈值,对于超过阈值的信号将持续采集 10 s 时长。上述装备在工程现场及地质勘探领域被广泛应用于岩体应力状态评估^[126]。



图 18 俄罗斯 Angel-M 型电磁辐射仪

Fig.18 Russian Angel-M electromagnetic radiometer

我国在电磁辐射设备研发方面走在世界前列。笔者和王恩元等^[127]率先研发了 KBD5 型便携式电磁辐射监测仪和 KBD7 型在线式电磁辐射监测仪,并在我国多个矿井进行了成功应用,突破了必须通过打钻孔测试或接触式监测的技术局限,首次实现非接触实时有效监测预警,该系列是目前国内应用最为广泛的电磁辐射监测仪。之后,又研发了 GDD12 声电传感器和 YDD16 便携式煤岩动力灾害声电监测仪。其中 YDD16 声电监测仪可以通过主动监测煤岩破裂过程中声发射、电磁辐射、超低频电磁感应、震动等信息来预测预报煤岩动力灾害,可用于预测预报煤与瓦斯突出、冲击地压和金属矿山岩爆、监测采空区顶板垮落、监测顶板周期来压等^[128]。基于近期对煤岩电磁辐射矢量特性研究得到的新成果,笔者团队研发了 KBF 型非接触电震矢量监测仪,包括便携式和在线式两种,已取得煤安认证,可在煤矿现场实现电磁辐射矢量与声发射信号的同步监测。

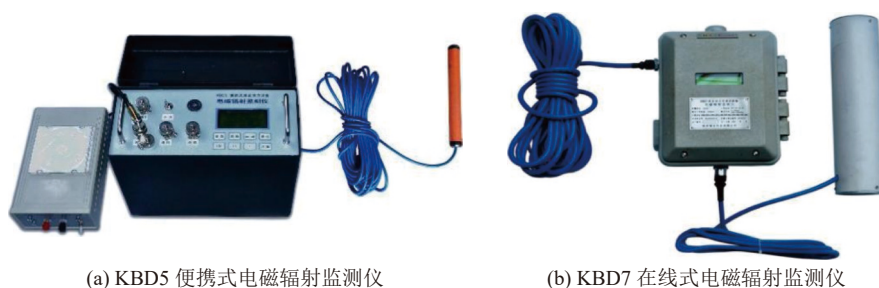
上述仪器设备如图 19 所示。

图 20a 中给出了使用 YDD16 监测仪工作时原理图及其有效监测范围,利用其监测评估工作面应力状态的结果如图 20b 所示,测点间隔设置为 10 m,结果表明,随着距工作面距离的增加,电磁辐射强度先增大后减小,在 20 ~ 40 m 范围内,电磁辐射强度显著高于平均水平,表明该区域是开采引起的应力集中区。电磁辐射监测预警装备的成功应用为煤岩电磁辐射监测预警技术方法发展奠定了坚实的基础。

3.2 煤岩电磁辐射监测预警技术方法

基于研发的电磁辐射监测预警装备,煤岩电磁辐射监测预警按照图 21 中的流程进行,按照煤岩动力灾害危险程度划分为无危险、弱危险、强危险 3 个级别,根据监测预警准则实现分级预警,以指导现场采用相应的防治措施。针对动力灾害电磁辐射预警准则,国内学者开展了大量研究工作。笔者等^[92,130]基于煤岩电磁辐射理论与试验结果,确定了采用电磁辐射脉冲数和强度作为煤岩动力灾害监测预警指标,得出基于电磁辐射脉冲数和电磁辐射强度的监测预警准则分别如下:

$$\begin{cases} K_{N_r} = \frac{\Delta N_r / \Delta \sigma_r}{\Delta N_w / \Delta \sigma_w} = \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_w} \right)^{m-1} \exp \left[\left(\frac{\sigma_w}{\sigma_0} \right)^m - \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_0} \right)^m \right] \\ K_{N_q} = \frac{\Delta N_q / \Delta \sigma_q}{\Delta N_w / \Delta \sigma_w} = \left(\frac{\sigma_q}{\sigma_w} \right)^{m-1} \exp \left[\left(\frac{\sigma_w}{\sigma_0} \right)^m - \left(\frac{\sigma_q}{\sigma_0} \right)^m \right] \end{cases} \quad (7)$$



(a) KBD5 便携式电磁辐射监测仪

(b) KBD7 在线式电磁辐射监测仪



(c) YDD16 便携式煤岩动力灾害声电监测仪

(d) GDD12 声电传感器

(e) KBF 型非接触电震矢量监测仪

图 19 煤岩电磁辐射监测预警装备

Fig.19 Monitoring and early warning equipment of coal and rock electromagnetic radiation

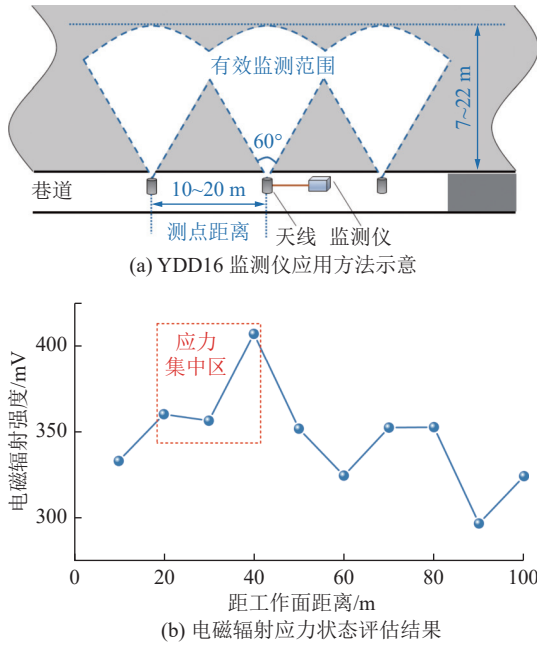


图 20 煤岩电磁辐射监测预警装备应用^[129]

Fig.20 Application of electromagnetic radiation monitoring and early warning equipment for coal and rock^[129]

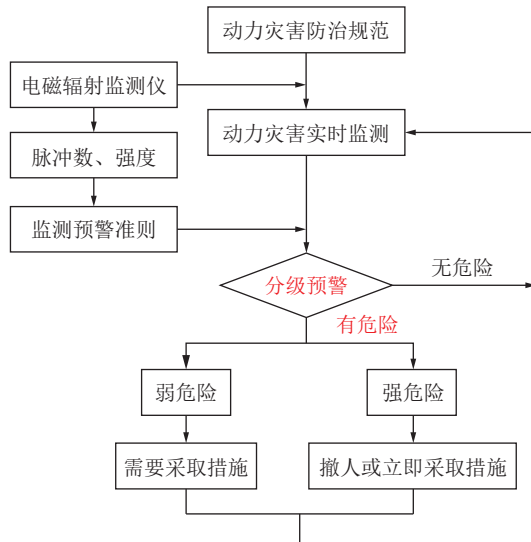


图 21 煤岩电磁辐射监测预警方法流程

Fig.21 Flow of electromagnetic radiation monitoring and early warning method

$$\begin{cases} K_{E_r} = \frac{E_r}{E_w} = \frac{\sigma_r}{\sigma_w} \\ K_{E_q} = \frac{E_q}{E_w} = \frac{\sigma_q}{\sigma_w} \end{cases} \quad (8)$$

式中, K_{N_r}, K_{N_q} 分别为有弱危险和强危险时电磁辐射脉冲数的临界值系数; K_{E_r}, K_{E_q} 分别为有弱危险和强危险时的电磁辐射强度预警临界值系数; σ_w 为没有煤岩动力灾害时的应力; ΔN_w 和 E_w 分别为对应的电磁辐射脉冲数和电磁辐射强度; σ_r 和 σ_q 分别为达到弱危险和强危险时的应力; ΔN_r 和 ΔN_q 为弱危险和强

危险对应电磁辐射脉冲数; E_r 和 E_q 即为相应电磁辐射强度。

在利用电磁辐射实现非接触监测预警时, 往往采用静态临界值方法和动态趋势法相结合的方法, 如图 22 所示。基于现场实测结果, 3 级危险所对应的静态临界值系数和动态趋势变化系数已分别在图中标注, 动态趋势系数 K_E 和 K_N 分别为电磁辐射强度和脉冲数的动态变化系数, 静态基准值 N_w 和 E_w 则是在巷道后方稳定区域测得的电磁辐射脉冲数和强度值。上述预警准则与预警指标已在煤矿现场验证, 实现了对于煤岩动力灾害定向、小区域内的连续监测预警。

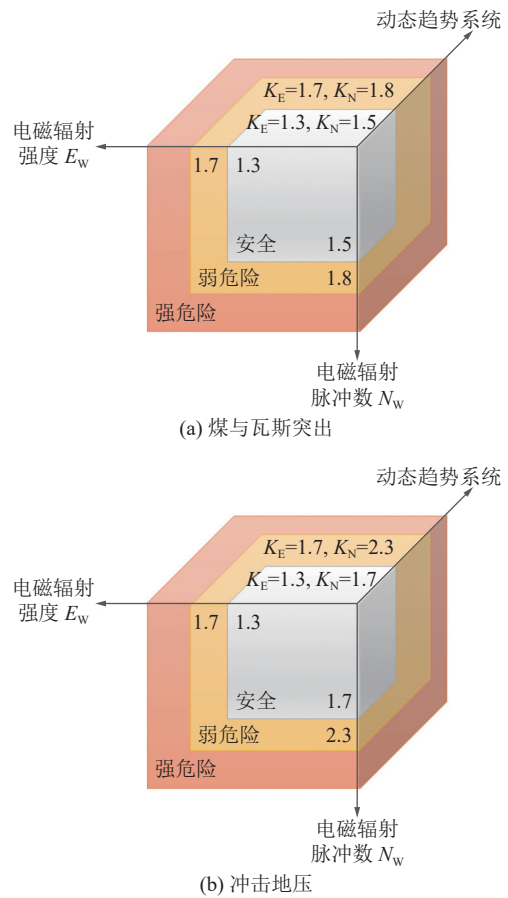


图 22 煤岩动力灾害电磁辐射预警三维图

Fig.22 Three dimensional electromagnetic radiation early warning of coal and rock dynamic disasters

在此基础上, 许多研究围绕电磁辐射预警指标与有效前兆信息识别开展。窦林名等^[131] 提出了冲击倾向的电磁能量指数和电磁脉冲指数, 并给出了判断煤岩冲击倾向性的分级指标值。邹喜正等^[132] 利用电磁辐射强度和脉冲数分形维数异常变化规律进行冲击地压预警。刘贞堂等^[133] 通过研究电磁辐射时序饱和关联维数的变化, 建立了煤岩动力灾害危险性的电磁辐射非线性判据。宋大钊等^[63] 根据电

磁辐射幅频参数的时序变化规律构建了煤岩动力灾害电磁辐射时-频二维预警方法。蒋金泉等^[134]建立了基于神经网络的准则识别器,利用电磁辐射时序混沌特性实现冲击地压预测。刘晓斐^[135]通过数据挖掘构建了冲击地压电磁辐射前兆信息群体识别体系。陈世海^[136]针对现场电磁辐射时序特征,建立了基于支持向量机的煤岩动力灾害电磁辐射前兆信息识别模型。

随着矿山智能化要求日益提高,电磁辐射法作为常用的地球物理法,常与其他地球物理方法联合监测煤岩动力灾害^[137]。王恩元等^[138]建立了煤与瓦斯突出的声电协同监测技术体系。贺虎等^[139]提出了冲击地压灾害的电磁-震动耦合预警方法。笔者等^[140]提出了煤岩动力灾害危险全矿井综合指数评价、区域微震监测与应力场CT探测、局域电磁辐射非接触监测预警的多尺度多元融合监测预警技术方法。团队成员基于数据挖掘,提出了偏差值和偏差

异常持续时间的新电磁辐射预警指标^[141]。图23中分别给出了电磁辐射8、12、24、48 h偏差值对突出危险的响应特征,对于12月10日下午4时的瓦斯超限事件,电磁辐射偏差值自12月9日约9时起均开始持续异常变化,偏差值大于0.5的次数及持续时间段明显增多,电磁辐射偏差值响应时间提前于瓦斯涌出异常响应,且电磁辐射24、48 h偏差值的异常响应较强烈、异常频次多。结合矿井工作制度综合考虑优先选择电磁辐射24 h偏差值作为电磁辐射预警指标,并利用遗传算法建立了突出危险局部多参量监测预警模型。大数据与人工智能技术同样应用于冲击地压灾害监测预警领域,基于深度学习建立了冲击地压震电信号综合预警方法^[142]。在上述研究成果基础上构建了图24中的煤岩动力灾害多元融合预警与智能诊断云平台^[143],实现了监测数据智能挖掘、多源信息融合及动力灾害危险智能辨识,提高了预警时效性。

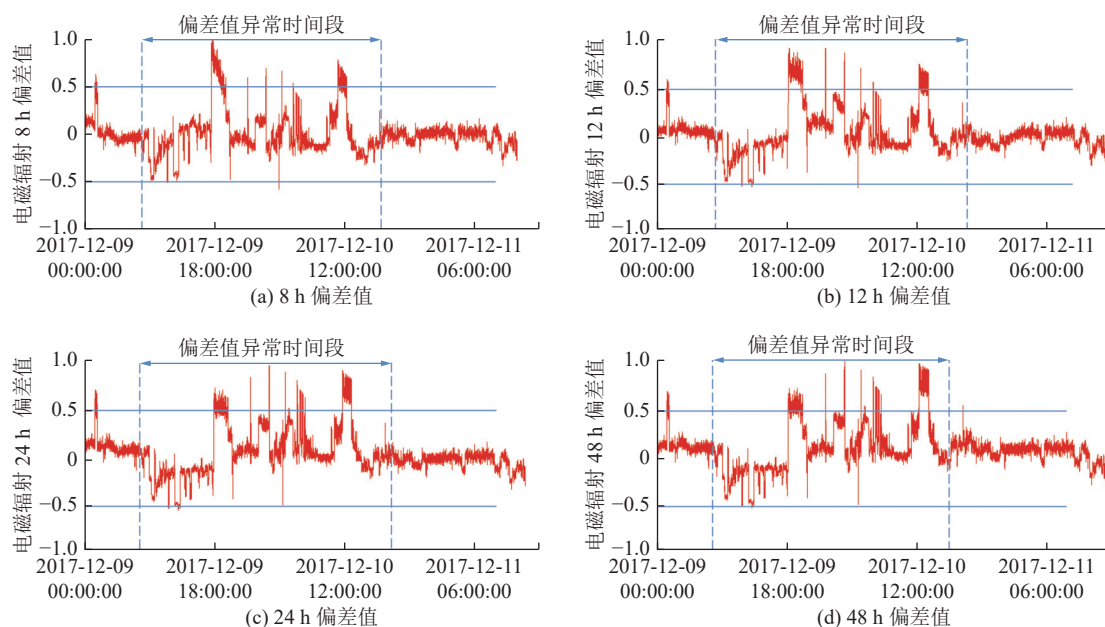


图23 电磁辐射偏差值对突出危险的响应特征

Fig.23 Response characteristics of electromagnetic radiation deviation values to outburst hazards

3.3 煤岩电磁辐射定位技术发展

目前,煤岩电磁辐射监测预警技术主要通过分析电磁信号时序变化来实现,尽管部分学者根据电磁辐射信号在不同方向上的差异来识别最大主应力方向^[144-145],初步利用了电磁辐射的矢量特性,但尚无法实现对于动力灾害孕灾区域的定位,使得该技术的应用与发展受到制约。在石油、煤矿等地下资源开发利用过程中电磁定位技术已经得到了发展,可以实现地质异常体探测^[146]、出事故井距离方位反

演^[147],但是这些这种主动探定位技术需要持续发射参数已知的电磁波,对接收的反射波进行分析和数据处理以达到定位和定向的目的。而煤岩变形破裂过程产生的电磁信号频率和强度会随着时间动态变化,利用监测到的信号直接对破裂源进行定位存在难度,其他领域常用的电磁定位方法并不完全适用,需要针对性地建立煤岩破裂电磁定位方法。

笔者团队基于煤岩电磁辐射矢量特性研究结果,认为煤岩破裂所致的矢量电磁场是很多个电荷分离、

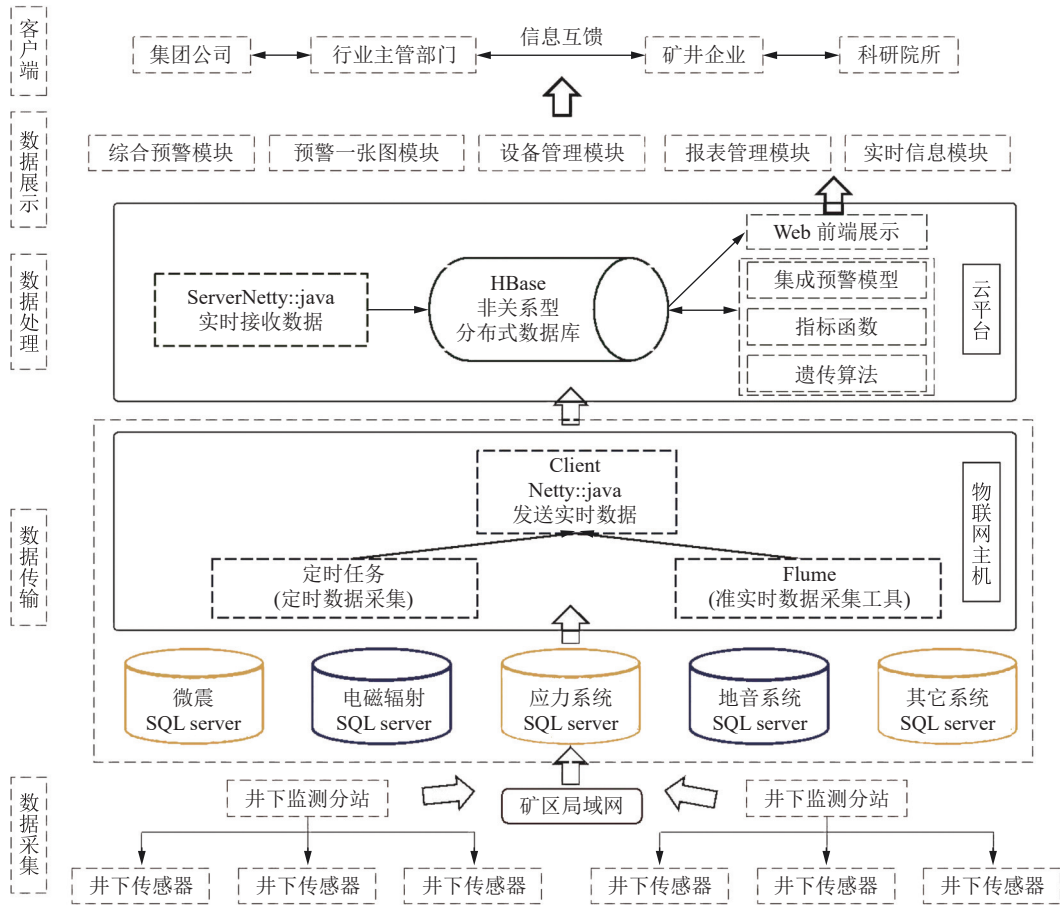


图 24 多元融合预警与智能诊断云平台技术架构

Fig.24 Technical framework of multi fusion early warning and intelligent diagnosis cloud platform

振荡的综合作用所致,可等效为一个电荷聚集体,场源模型可用式 (9) 描述^[148]:

$$\mathbf{B}_q = -\frac{\mu_0}{4\pi|\mathbf{r}_q|^2} [\mathbf{r}_q \times \dot{\mathbf{p}}(t_0)] \quad (9)$$

式中: \mathbf{B}_q 为测点 $Q_0(x_0, y_0, z_0)$ 的磁感应强度矢量; μ_0 为真空磁导率; $\mathbf{r}_q = (x_i - x_0, y_i - y_0, z_i - z_0)$, 为从场源至测点 $M_i(x_i, y_i, z_i)$ 的方向向量; $\dot{\mathbf{p}}(t_0)$ 为电偶极矩的一阶导数。

仅考虑与空间位置有关的变量,煤岩破裂诱发的等效电磁场源可表达为如下形式:

$$\mathbf{B}_q = \mu_q m_q \frac{\mathbf{e}_q \times \mathbf{r}_q}{|\mathbf{r}_q|^2} \quad (10)$$

式中: μ_q 为常数; m_q 为表征磁感应强度的特征标量; \mathbf{e}_q 为表征等效电磁场源方向的单位向量。

由上式建立了煤岩电磁辐射定位模型^[149]。基于空间几何理论可知,磁感应强度矢量 \mathbf{B}_q 与测点方向向量 \mathbf{r}_q 在空间内互相垂直,故等效电磁场源的矢量场具有如下空间位置关系:即等效电磁场源一定存在于过某一测点并与该测点磁感应强度方向垂直的惟一确定的平面上。

因此,根据几组监测得到的磁感应强度矢量,就可以先确定等效电磁场源所在的平面,再由各个平面相交即可确定电磁场源所在区域。即有:

$$\mathbf{B}_q \cdot \mathbf{r}_q = 0, \mathbf{e}_q = \frac{\mathbf{B}_i \times \mathbf{B}_j}{|\mathbf{B}_i \times \mathbf{B}_j|} \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (10) 中可以建立一个非线性定位方程组,通过求解非线性最小二乘问题得到定位结果。

基于上述定位模型和定位方法,在实验室开展了岩石破坏定位试验,分别采用了巴西劈裂和单轴压缩 2 种加载方式,前者破坏形式单一、裂纹面的位置基本确定,后者则同时包括拉伸与剪切破坏,破坏形式相对复杂。因此,针对 2 种破坏定位试验分别采用了不同的监测阵列布置方案,各测点坐标如图 25 所示。

对监测到的 4 组三分量信号分别进行矢量合成和频谱分析,由得到的矢量合成信号特征和频域特征同时提取了时域和频域特征值指标,在已建立的坐标系中,根据提取的指标和传感器坐标求解定位点,将坐标与试样坐标范围较为接近的定位点视为

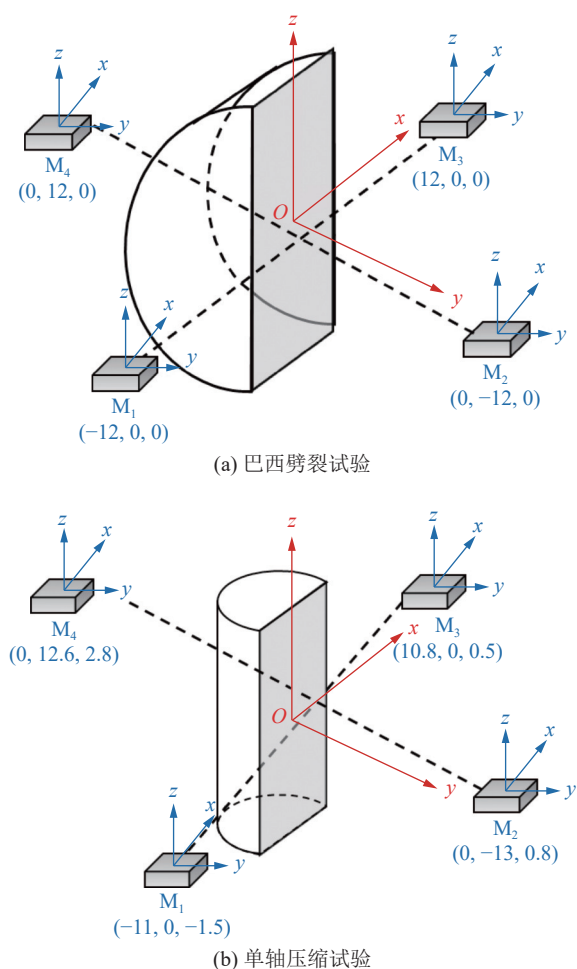


图 25 岩石破坏定位试验监测阵列布置方式

Fig.25 Arrangement of monitoring array for rock failure location experiment

有效定位点。

以石灰岩的定位结果为例,劈裂破坏定位结果如图 26a 所示,可以看出除了一个距离试样较远的定位点之外,其余定位点均分布在试样范围内。根

据试样所在区域的坐标范围($-1.25 \leq x \leq 1.25, -2.5 \leq y \leq 2.5, -2.5 \leq z \leq 2.5$), 5 个内部有效定位点距试样中心的距离由小到大分别为 0.23、0.81、1.26、2.11 和 2.69 cm。单轴压缩破坏定位结果如图 26b 所示,可以看出除两个定位点相对较远,其余定位点均集中分布在试样所在区域附近。根据试样所在区域坐标范围($-1.25 \leq x \leq 1.25, -2.5 \leq y \leq 2.5, -2.5 \leq z \leq 2.5$), 有 4 个有效定位点位于试样内部,距试样中心的距离由近至远分别为 0.53、0.88、1.13 和 1.49 cm,而剩下的一个有效定位点距试样位置非常接近,距试样外表面的距离为 0.01 cm,定位结果较为理想。

表 5 中给出了 5 种岩石破坏定位试验的结果,统计了几组试验中有效定位点数量和最理想与偏差最大的情况。总体上岩石劈裂破坏定位试验的结果较为理想,内部定位点都存在比较接近试样中心的结果,与劈裂破坏特征较为一致。由于系统误差,存在位于试样外表面附近的外部定位点,这些点距试样外表面最远距离没有超过试样本身的尺寸,且小于监测尺度的 5%。岩石单轴压缩破坏定位试验的结果同样较为理想,外部定位点距试样外表面最远距离小于最大监测尺度的 10%,并且存在非常接近外表面的情况。上述试验结果进一步验证了定位模型和定位方法的可行性与有效性,在实验室范围内定位精度可达厘米级。

4 展 望

自煤岩电磁辐射现象发现以来,围绕电磁辐射信号特征、影响因素进行了大量研究,据此提出了多种电磁辐射机理。电磁辐射技术作为一种实时、非

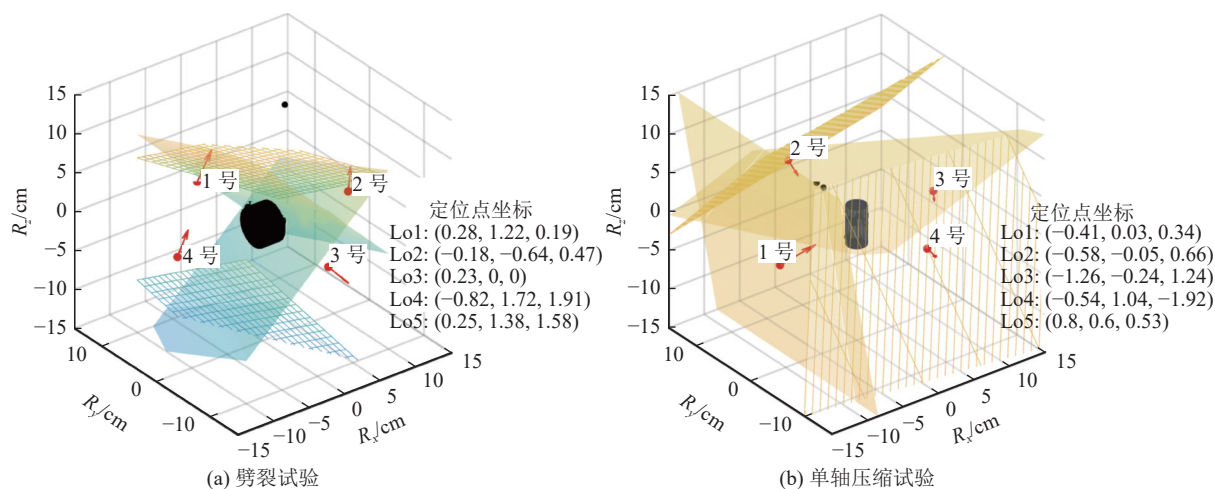


图 26 石灰岩破坏试验电磁定位结果

Fig.26 Results of electromagnetic positioning for limestone failure experiment

表 5 岩石破坏定位试验结果统计
Table 5 Statistics of rock failure location test results

试验类型	岩石类型	有效定位点数量/个	内部定位点数量/个	距试样中心最近距离/cm	外部定位点数量/个	距试样外表面最远距离/cm
劈裂破坏试验	花岗岩	4	3	0.33	1	0.48
	石灰岩	5	5	0.23	0	—
	页岩	5	4	0.22	1	0.51
	砂岩	5	5	0.31	0	—
	玄武岩	4	1	0.43	1	0.14
单轴压缩试验	花岗岩	4	3	0.05	1	0.59
	石灰岩	5	4	0.53	1	0.01
	页岩	4	2	1.15	2	1.30
	砂岩	5	4	0.98	1	1.29
	玄武岩	4	4	0.61	0	—

接触、前兆性强的地球物理监测方法,在岩体结构稳定性及应力状态评估、煤岩动力灾害监测预警等领域得到了广泛应用。

我国学者为煤岩电磁辐射理论及技术的发展做出极大贡献。但当前研究仍存在两大主要瓶颈:①电磁辐射机理未完全揭示,现有模型在微纳米尺度未进行验证,导致煤岩电磁辐射理论研究落后以至于制约技术实践发展;②当前电磁辐射技术只能用于灾害的时序预警,不能实现孕灾区域的定位,无法指导防治措施精准实施,使得该技术的持续发展应用有所局限。

面对上述瓶颈,笔者及团队成员积极寻求突破,将煤岩电磁辐射的实验研究拓展到微纳米尺度,测试得到了不同煤岩微纳米尺度表面电势分布特征,得到了煤岩动态加载过程微结构力-电耦合特征规律,揭示了微表面电势的产生与受载变化机制;研制了适用于煤岩破坏监测的新型三轴电磁天线,利用监测到的三分量信号可对煤岩破坏所致的矢量电磁场进行有效表征,从而揭示了煤岩电磁辐射矢量特性;在此基础上构建了煤岩破坏电磁辐射定位模型与方法,初步将电磁辐射技术从预测“危险是否会发

生?”拓展到预测“危险将在何处发生?”。

未来煤岩电磁辐射技术仍需持续向前发展,希望能实现如下 2 个目标:

1) 依托电磁辐射实现对煤岩损伤破坏全过程动力学行为特别是峰后阶段煤岩体破坏信息的准确感知,将煤岩损伤破坏物理场监测周期由破坏前监测为主发展为破坏前-破坏中-破坏后全过程监测,从而精细化揭示煤岩损伤破坏过程的流变突变规律,为研究岩石力学基础科学问题提供一种新的技术手段。

2) 面向煤矿现场实际,建立复杂应力、噪声环境下的煤岩损伤破坏电磁辐射定位方法,在此基础上,研发煤岩动力灾害电磁辐射非接触定位监测预警技术与装备,最终实现对灾害孕育、发生区域的定位监测预警,实现该技术应用由时序预警向时空定位监测预警的跨越。

参考文献(References):

[1] 彭苏萍. 我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2331-2345.
PENG Suping. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2331-2345.

[2] 赵善坤, 齐庆新, 李云鹏, 等. 煤矿深部开采冲击地压应力控制技术理论与实践[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 626-636.
ZHAO Shankun, QI Qingxin, LI Yunpeng, et al. Theory and practice of rockburst stress control technology in deep coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 626-636.

[3] 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 rockburst in China: establishment and consideration of theory and technology system[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 1-40.

[4] 何学秋, 陈建强, 宋大钊, 等. 典型近直立煤层群冲击地压机理及监测预警研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6): 13-22.
HE Xueqiu, CHEN Jianqiang, SONG Dazhao, et al. Study on mechanism of rock burst and early warning of typical steeply inclined coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 13-22.

[5] 何学秋. 含瓦斯煤岩流变动力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.
HE Xueqiu. Rheological dynamics of gas-bearing coal rocks[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1995.

- [6] 陈峰, 潘一山, 李忠华, 等. 基于钻屑法的冲击地压危险性检测研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(2): 116–119.
CHEN Feng, PAN Yishan, LI Zhonghua, *et al.* Detection and study of rock burst hazard based on drilling cuttings method[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(2): 116–119.
- [7] 尹永明, 姜福兴, 谢广祥, 等. 基于微震和应力动态监测的煤岩破坏与瓦斯涌出关系研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2): 325–330.
YIN Yongming, JIANG Fuxing, XIE Guangxiang, *et al.* Relation between coal-rock failure and methane emission based on microseismic and dynamic stress monitoring[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(2): 325–330.
- [8] 宋大钊, 何学秋, 窦林名, 等. 煤层突出危险微震区域探测技术研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(1): 89–94.
SONG Dazhao, HE Xueqiu, DOU Linming, *et al.* Research on MS regional detection technology for coal and gas outburst hazard[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(1): 89–94.
- [9] 高保彬, 李回贵, 李化敏, 等. 声发射/微震监测煤岩瓦斯复合动力灾害的研究现状[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(2): 689–697.
GAO Baobin, LI Huigui, LI Huamin, *et al.* Current situation of the study on acoustic emission and microseismic monitoring of coupling dynamic catastrophe for gas-filled coal-rock[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(2): 689–697.
- [10] 王恩元, 刘晓斐, 李忠辉, 等. 电磁辐射技术在煤岩动力灾害监测预警中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012, 31(5): 642–645.
WANG Enyuan, LIU Xiaofei, LI Zhonghui, *et al.* Application of electromagnetic radiation technology in monitoring and warning on coal and rock dynamic disasters[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2012, 31(5): 642–645.
- [11] WANG E, HE X, WEI J, *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.
- [12] RABINOVITCH A, FRID V, BAHAT D, *et al.* Fracture area calculation from electromagnetic radiation and its use in chalk failure analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(7): 1149–1154.
- [13] 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 Liang, JIANG Yaodong, HE Xueqiu, *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.
- [14] SHARMA S K, CHAUHAN V S, SINAPIUS M. A review on deformation-induced electromagnetic radiation detection: history and current status of the technique[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(7): 4500–4551.
- [15] STEPANOW A. On the mechanism of plastic deformation[J]. The European PHYSICAL Journal, A. Hadrons and Nuclei, 1933, 81(7): 560–564.
- [16] HADJICONTIS V, MAVROMATOU C, NINOS D. Stress induced polarization currents and electromagnetic emission from rocks and ionic crystals, accompanying their deformation. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2004, 4(5/6): 633–639.
- [17] KOTHARI A, CHAUHAN V S, KUMAR A, *et al.* Effect of Peierls stress and strain-hardening parameters on EMR emission in metals and alloys during progressive plastic deformation[J]. International Journal of Materials Research, 2016, 107(6): 503–517.
- [18] GADE S, ALACA B, SAUSE M. Determination of crack surface orientation in carbon fibre reinforced polymers by measuring electromagnetic emission[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2017, 36(2): 21.
- [19] MALYSHKOV Y P, FURSA T V, GORDEYEV V F, *et al.* Sources and mechanisms of electromagnetic emission in concretes[J]. Izvestia-Vysshie Uchebnye Zavedeniia Stroitel'stvo, 1996: 31–36.
- [20] 王恩元, 何学秋, 窦林名, 等. 煤矿采掘过程中煤岩体电磁辐射特征及应用[J]. 地球物理学报, 2005, 1: 216–221.
WANG Enyuan, HE Xueqiu, DOU Linming, *et al.* Electromagnetic radiation characteristics of coal and rocks during excavation in coal mine and their application[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 1: 216–221.
- [21] Воларович М. П., Пархоменко Э. И. Пьезоэлектрический эффект горных пород[J]. Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1955(2): 215–222.
- [22] NITSAN U. Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks[J]. Geophysics Research letters, 1977(4): 333–336.
- [23] 徐为民, 童莞生, 吴培稚. 岩石破裂过程中电磁辐射的实验研究[J]. 地球物理学报, 1985, 28(2): 181–190.
XU Weimin, TONG Wusheng, WU Peizhi. Experimental study of electromagnetic emission during rock rupture[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1985, 28(2): 181–190.
- [24] 钱书清, 张以勤, 曹惠馨, 等. 岩石破裂时产生电磁脉冲的观测与研究[J]. 地震学报, 1986, 8(3): 301–308.
QIAN Shuqing, ZHANG Yiqin, CAO Huixin, *et al.* Electromagnetic radiation generated by the rock rupture during an underground explosion[J]. Acta Seismologica Sinica, 1986, 8(3): 301–308.
- [25] 孙正江, 王丽华, 高宏. 岩石标本破裂时的电磁辐射和光发射[J]. 地球物理学报, 1986, 29(5): 491–495.
SUN Zhengjiang, WANG Lihua, GAO Hong. Electromagnetic emission and light radiation during fracture of rock samples[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1986, 29(5): 491–495.
- [26] 郭自强, 郭子祺, 钱书清, 等. 岩石破裂中的电声效应[J]. 地球物理学报, 1999, 42(1): 74–83.
GUO Ziqiang, GUO Ziqi, QIAN Shuqing, *et al.* Electroacoustic effect in rock rupture[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(1): 74–83.
- [27] 何学秋, 周广来, 刘贞堂. 含瓦斯煤的能量耗散过程及突出非接触预测[J]. 煤炭科学技术, 1993, 21(12): 18–21.
HE Xueqiu, ZHOU Guanglai, LIU Zhen tang. Energy dissipation process and prominent non-contact prediction of gas-bearing

- coal[J]. *Coal Science and Technology*, 1993, 21(12): 18–21.
- [28] 何学秋, 刘明举. 含瓦斯煤岩破坏电磁动力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.
- HE Xueqiu, LIU Mingju. *Electromagnetic dynamics of gas-bearing coal rock failure*[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1995.
- [29] FRID V, SHABAROV A, PROSKURYAKOV V, *et al.* Formation of electromagnetic radiation in coal stratum[J]. *Journal of Mining Science*, 1992, 28(2): 139–145.
- [30] FRID V. Electromagnetic radiation method for rock and gas outburst forecast[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1997, 38(2): 97–104.
- [31] 何学秋, 王恩元, 聂百胜, 等. 煤岩流变电磁动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- HE Xueqiu, WANG Enyuan, NIE Baisheng, *et al.* *Rheological electromagnetic dynamics of coal rock*[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [32] YIN S, SONG D, HE X, *et al.* Time-frequency evolution law and generation mechanism of electromagnetic radiation in coal friction process[J]. *Engineering Geology*, 2021, 294: 106377.
- [33] O'KEEFE S, THIEL D. A mechanism for the production of electromagnetic radiation during fracture of brittle materials[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1995, 89(1/2): 127–135.
- [34] FRID V, BAHAT D, GOLDBAUM J, *et al.* Experimental and theoretical investigations of electromagnetic radiation induced by rock fracture[J]. *Israel Journal of Earth Sciences*, 2000, 49(1).
- [35] MASTROGIANNIS D, ANTSGINA T N, CHISHKO K A, *et al.* Relationship between electromagnetic and acoustic emissions in deformed piezoelectric media: microcracking signals[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2015, 56: 118–125.
- [36] OGAWA T, OIKE K, MIURA T. Electromagnetic radiations from rocks[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1985, 90(D4): 6245–6249.
- [37] 刘焯洲, 刘 因, 金安忠, 等. 岩石震源电磁辐射性质实验研究[J]. *物探与化探*, 1997(4): 269–276.
- LIU Yuzhou, LIU Yin, JIN Anzhong, *et al.* Experimental study on electromagnetic radiation properties of rock ore source[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 1997(4): 269–276.
- [38] RABINOVITCH A, BAHAT D, FRID V. Similarity and dissimilarity of electromagnetic radiation from carbonate rocks under compression, drilling and blasting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(1): 125–129.
- [39] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂, 等. 受载煤体电磁辐射的频谱特征[J]. *中国矿业大学学报*, 2003(5): 21–24.
- WANG Enyuan, HE Xueqiu, LIU Zhentang, *et al.* Spectral characteristics of electromagnetic radiation of loaded coal[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2003(5): 21–24.
- [40] 钱书清, 郝锦琦, 周建国, 等. 岩石受压破裂的ULF和LF电磁前兆信号[J]. *中国地震*, 2003(2): 7–14.
- QIAN Shuqing, HAO Jinqi, ZHOU Jianguo, *et al.* ULF electric and magnetic anomalies accompanying the cracking of rock sample[J]. *Earthquake Research in China*, 2003(2): 7–14.
- [41] 郝锦琦, 钱书清, 高金田, 等. 岩石破裂过程中的超低频电磁异常[J]. *地震学报*, 2003(1): 102–111.
- HAO Jinqi, QIAN Shuqing, GAO Jintian, *et al.* Precursory electric and magnetic signals at ulf and lf bands during the fracture of rocks under pressure[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2003(1): 102–111.
- [42] NARDI A, CAPUTO M. Monitoring the mechanical stress of rocks through the electromagnetic emission produced by fracturing[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(5): 940–945.
- [43] LACIDOGNA G, CARPINTERI A, MANUELLO A, *et al.* Acoustic and electromagnetic emissions as precursor phenomena in failure processes[J]. *Strain*, 2011, 47: 144–152.
- [44] 聂百胜, 何学秋, 朱柳韦. 煤岩破坏电磁辐射效应及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- NIE Baisheng, HE Xueqiu, ZHU Chenwei. *Electromagnetic radiation effect of coal rock failure and its application*[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [45] BESPAL'KO A, YAVOROVICH L, EREMENKO A, *et al.* Electromagnetic emission of rocks after large-scale blasts[J]. *Journal of Mining Science*, 2018, 54(2): 187–193.
- [46] 娄 全, 何学秋, 宋大钊, 等. 基于全波形的煤样单轴压缩破坏声电时频特征[J]. *工程科学学报*, 2019, 41(7): 874–881.
- LOU Quan, HE Xueqiu, SONG Dazhao, *et al.* Time-frequency characteristics of acoustic-electric signals induced by coal fracture under uniaxial compression based on full-waveform[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2019, 41(7): 874–881.
- [47] LIN P, WEI P, WANG C, *et al.* Effect of rock mechanical properties on electromagnetic radiation mechanism of rock fracturing[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(4): 798–810.
- [48] YAVOROVICH L, BESPAL'KO A, FEDOTOV P, *et al.* Study of interrelation between electromagnetic radiation and rock strength[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2016: 012085.
- [49] WEI M, SONG D, HE X, *et al.* Effect of rock properties on electromagnetic radiation characteristics generated by rock fracture during uniaxial compression[J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2020, 53: 5223–5238.
- [50] 曹惠馨, 钱书清, 吕 智. 岩石破裂过程中超长波段的电、磁信号和声发射的实验研究[J]. *地震学报*, 1994(2): 235–241.
- CAO Huixin, QIAN Shuqing, LYU Zhi. Experimental study on electrical and magnetic signals and acoustic emission in ultralong band during rock rupture[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1994(2): 235–241.
- [51] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂, 等. 煤岩变形破裂的电磁辐射规律及其应用研究[J]. *中国安全科学学报*, 2000, 10(2): 38–42.
- WANG Enyuan, HE Xueqiu, LIU Zhentang, *et al.* Research on electromagnetic radiation law of coal rock deformation and rupture and its application[J]. *China Safety Science Journal*, 2000, 10(2): 38–42.
- [52] FUKUI K, OKUBO S, TERASHIMA T. Electromagnetic radiation from rock during uniaxial compression testing: the effects

- of rock characteristics and test conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2005, 38(5): 411–423.
- [53] SONG D, YOU Q, WANG E, *et al.* Characteristics of EMR emitted by coal and rock with prefabricated cracks under uniaxial compression[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2019, 19(1): 49–60.
- [54] 李忠辉, 王恩元, 何学秋, 等. 含水量对煤岩电磁辐射特征的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2006, 35(3): 362–366.
- LI Zhonghui, WANG Enyuan, HE Xueqiu, *et al.* Effect of water content on electromagnetic radiation characteristics of coal rock[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2006, 35(3): 362–366.
- [55] 刘明举, 何学秋, 许 考. 孔隙气体对断裂电磁辐射的影响及其机理[J]. *煤炭学报*, 2002, 27(5): 483–487.
- LIU Mingju, HE Xueqiu, XU Kao. Influence and mechanism of pore gas on electromagnetic radiation at break[J]. *Journal of China Coal Society*, 2002, 27(5): 483–487.
- [56] 刘焯洲, 刘 因, 王寅生, 等. 岩石破裂时电磁辐射的影响因素和机理[J]. *地震学报*, 1997(4): 83–90.
- LIU Yuzhou, LIU Yin, WANG Yinsheng, *et al.* Influencing factors and mechanism of electromagnetic radiation during rock breakage[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1997(4): 83–90.
- [57] MU H, SONG D, YIN S, *et al.* Time-frequency characteristics and the influence mechanism of the emr from coal with different joint angles[J]. *Shock and Vibration*, 2021: 8340076.
- [58] 王恩元, 孔 彪, 梁俊义, 等. 煤受热升温电磁辐射效应实验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(2): 205–210.
- WANG Enyuan, KONG Biao, LIANG Junyi, *et al.* Experimental study on electromagnetic radiation effect of coal heating up[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(2): 205–210.
- [59] KONG B, WANG E, LI Z, *et al.* Electromagnetic radiation characteristics and mechanical properties of deformed and fractured sandstone after high temperature treatment[J]. *Engineering Geology*, 2016, 209: 82–92.
- [60] LI C, WANG Q, LYU P. Study on electromagnetic radiation and mechanical characteristics of coal during an SHPB test[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2016, 13(3): 391–398.
- [61] KOBAYASHI H, HORIKAWA K, OGAWA K, *et al.* Impact compressive and bending behaviour of rocks accompanied by electromagnetic phenomena[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2014, 372(2023): 20130292.
- [62] 李夕兵, 万国香, 周子龙. 岩石破裂电磁辐射频率与岩石属性参数的关系[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(1): 253–259.
- LI Xibing, WAN Guoxiang, ZHOU Zilong. Relationship between electromagnetic radiation frequency and rock attribute parameters of rock rupture[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(1): 253–259.
- [63] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- LI Xibing. *Fundamentals and applications of rock dynamics*[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [64] KOKTAVY P, PAVELKA J, SIKULA J. Characterization of acoustic and electromagnetic emission sources[J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, 15(5): 973.
- [65] MORI Y, OBATA Y. Electromagnetic emission and AE Kaiser Effect for estimating rock in-situ stress[M]. Nihon University, 2008.
- [66] SONG D, WANG E, SONG X, *et al.* Changes in frequency of electromagnetic radiation from loaded coal rock[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(1): 291–302.
- [67] 肖红飞, 何学秋, 王恩元. 受压煤岩破裂过程电磁辐射与能量转化规律研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(7): 1097–1100.
- XIAO Hongfei, HE Xueqiu, WANG Enyuan. Study on electromagnetic radiation and energy conversion law during rupture of pressurized coal rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(7): 1097–1100.
- [68] 姚精明, 闫永业, 刘茜倩, 等. 基于能量理论的煤岩体破坏电磁辐射规律研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(1): 233–237.
- YAO Jingming, YAN Yongye, LIU Qianqian, *et al.* Study of EME rules during coal or rock mass failure base on energy theory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(1): 233–237.
- [69] SONG D, WANG E, LI Z, *et al.* Energy dissipation of coal and rock during damage and failure process based on EMR[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, 25(5): 787–795.
- [70] HU S, WANG E, LI Z, *et al.* Time-varying multifractal characteristics and formation mechanism of loaded coal electromagnetic radiation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(5): 1821–1838.
- [71] QIU L, SONG D, HE X, *et al.* Multifractal of electromagnetic waveform and spectrum about coal rock samples subjected to uniaxial compression[J]. *Fractals*, 2020, 28(4): 2050061.
- [72] CARPINTERI A, LACIDOGNA G, MANUELLO A, *et al.* Mechanical and electromagnetic emissions related to stress-induced cracks[J]. *Experimental Techniques*, 2012, 36(3): 53–64.
- [73] LOU Q, SONG D, HE X, *et al.* Correlations between acoustic and electromagnetic emissions and stress drop induced by burst-prone coal and rock fracture[J]. *Safety Science*, 2019, 115: 310–319.
- [74] HE X, CHEN W, NIE B, *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.
- [75] TAKEUCHI A, NAGAHAMA H. Electric dipoles perpendicular to a stick-slip plane[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2006, 155(3/4): 208–218.
- [76] GADE S, SAUSE M. Measurement and study of electromagnetic emission generated by tensile fracture of polymers and carbon fibres[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2017, 36(1): 1–13.
- [77] GADE S, ALACA B, SAUSE M. Determination of crack surface orientation in carbon fibre reinforced polymers by measuring electromagnetic emission[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2017, 36(2): 1–7.
- [78] WEI M, SONG D, HE X, *et al.* A three-axis antenna to measure near-field low-frequency electromagnetic radiation generated from rock fracture[J]. *Measurement*, 2021, 173: 108563.

- [79] SRIDHAR S, GIANNAKOPOULOS A, SURESH S, *et al.* Electrical response during indentation of piezoelectric materials: a new method for material characterization[J]. *Journal of applied Physics*, 1999, 85(1): 380–387.
- [80] YOSHIDA S, OGAWA T. Electromagnetic emissions from dry and wet granite associated with acoustic emissions[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2004, 109: B09204.
- [81] 郭志. 实用岩体力学[M]. 北京: 地震出版社, 1996.
- [82] GUO Zhi. Practical rock mechanics [M]. Beijing: Seismological Publishing House, 1996
- [82] FREUND F. Charge generation and propagation in igneous rocks[J]. *Journal of Geodynamics*, 2002, 33(4–5): 543–570.
- [83] YAVOROVICH L, BESPALCO A, FEDOTOV P, *et al.* Electromagnetic radiation generated by acoustic excitation of rock samples[J]. *Acta Geophysica*, 2016, 64(5): 1446–1461.
- [84] TEISSEYRE R, ERNST T. Electromagnetic radiation related to dislocation dynamics in a seismic preparation zone[J]. *Annals of geophysics*, 2002, 45(2): 393–399.
- [85] IVANOV V, EGOROV P, KOLPAKOVA L, *et al.* Crack dynamics and electromagnetic emission by loaded rock masses[J]. *Soviet Mining Science*, 1988, 24(5): 406–412.
- [86] IVANOV V, PIMONOV A. Statistical model of electromagnetic emission from a fracture in a rock[J]. *Soviet Mining Science*, 1991, 26(2): 148–151.
- [87] EGOROV P V, IVANOV V V, KOLPAKOVA L A. Patterns in the electromagnetic pulsed radiation of alkali halide crystals and rocks[J]. *Journal of Mining Science*, 1988, 24(1): 58–61.
- [88] FREUND F, SORNETTE D. Electro-magnetic earthquake bursts and critical rupture of peroxy bond networks in rocks[J]. *Tectonophysics*, 2007, 431(1/4): 33–47.
- [89] TAKEUCHI A, FUTADA Y, OKUBO K, *et al.* Positive electrification on the floor of an underground mine gallery at the arrival of seismic waves and similar electrification on the surface of partially stressed rocks in laboratory[J]. *Terra Nova*, 2010, 22(3): 203–207.
- [90] TAKEUCHI A, NAGAO T. Activation of hole charge carriers and generation of electromotive force in gabbro blocks subjected to nonuniform loading[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2013, 118(3): 915–925.
- [91] 王恩元, 何学秋. 煤岩变形破裂电磁辐射的实验研究[J]. *地球物理学报*, 2000, 43(1): 131–137.
- [92] WANG Enyuan, He Xueqiu Experimental study on electromagnetic radiation from coal and rock deformation and fracture [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000, 43(1): 131–137.
- [92] 王恩元, 何学秋, 李忠辉, 等. 煤岩电磁辐射技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009
- [93] WANG Enyuan, HE Xueqiu, LI Zhonghui, *et al* Electromagnetic radiation technology of coal and rock and its application [M]. Beijing: Science Press, 2009
- [93] KHATIASHVILI N. The electromagnetic effect accompanying the fracturing of alkaline halide crystals and rocks[J]. *Physics of the Solid Earth*, 1984, 20(9): 656–661.
- [94] BRADY B T, ROWELL G A. Laboratory investigation of the electrodynamics of rock fracture[J]. *Nature*, 1986, 321(6069): 488–492.
- [95] TAKEUCHI A, NAGAHAMA H. Interpretation of charging on fracture or frictional slip surface of rocks[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2002, 130(3): 285–291.
- [96] 潘一山, 唐治, 李忠华, 等. 不同加载速率下煤岩单轴压缩电荷感应规律研究[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(3): 1043–1048.
- [97] PAN Yishan, TANG Zhi, LI Zhonghua, *et al.* Study on charge induction law of coal and rock under uniaxial compression at different loading rates [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(3): 1043–1048
- [97] 潘一山, 徐连满, 李国臻, 等. 煤矿深井动力灾害电荷辐射特征及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(8): 1619–1625.
- [98] PAN Yishan, XU Lianman, LI Guozhen, *et al.* Characteristics and Application of Dynamic Disaster Charge Radiation in Deep Coal Mines [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(8): 1619–1625
- [98] 潘一山, 罗浩, 李忠华, 等. 含瓦斯煤岩围压卸荷瓦斯渗流及电荷感应试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(4): 713–719.
- [99] PAN Yishan, LUO Hao, LI Zhonghua, *et al.* Experimental study on gas seepage and charge induction of gas bearing coal and rock under confining pressure unloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(4): 713–719.
- [99] PETRENKO V. On the nature of electrical polarization of materials caused by cracks. Application to ice electromagnetic emission[J]. *Philosophical MAGAZINE B*, 1993, 67(3): 301–315.
- [100] LV X, PAN Y, XIAO X, *et al.* Barrier formation of micro-crack interface and piezoelectric effect in coal and rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 64: 1–5.
- [101] FINKEL V M, GOLOVIN Y I, SEREDA V E, *et al.* Electric effects during fracture of lif crystal in connection with problem of crack control[J]. *Fizika Tverdogo Tela*, 1975, 17(3): 770–776.
- [102] Miroshnichenko M, KUKSENKO V. Study of electromagnetic pulses in initiation of cracks in solid dielectrics[J]. *Sov Phys Solid State*, 1980, 22(5): 895–896.
- [103] CRESS G O, BRADY B T, ROWELL G A. Sources of electromagnetic radiation from fracture of rock samples in the laboratory[J]. *Geophysical Research Letters*, 1987, 14(4): 331–334.
- [104] ENOMOTO Y, HASHIMOTO H. Emission of charged particles from indentation fracture of rocks[J]. *Nature*, 1990, 346(6285): 641–643.
- [105] 郭自强, 尤峻汉, 李高, 等. 破裂岩石的电子发射与原子压缩模型[J]. *地球物理学报*, 1989, 32(2): 173–177.
- [106] GUO Ziqiang, YOU Junhan, LI Gao, *et al.* Electron emission and atomic compression model of fractured rock[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1989, 32(2): 173–177.
- [106] 郭自强, 周大庄, 施行觉, 等. 岩石破裂中的电子发射[J]. *地球物理学报*, 1988, 31(5): 566–571.
- [107] GUO Ziqiang, ZHOU Dazhuang, SHI Xingjue, *et al.* Electron emission in rock fracture [J]*Chinese Journal of Geophysics*, 1988, 31(5): 566–571.
- [107] 郭自强, 刘斌. 岩石破裂电磁辐射的频率特性[J]. *地球物理学报*, 1995(2): 221–226.

- GUO Ziqiang, LIU Bin. Frequency characteristics of electromagnetic radiation from rock fracture [J] Chinese Journal of Geophysics, 1995(2): 221–226.
- [108] 朱元清, 罗祥麟, 郭自强, 等. 岩石破裂时电磁辐射的机理研究[J]. 地球物理学报, 1991, 34(5): 594–601.
- ZHU Yuanqing, LUO Xianglin, GUO Ziqiang, *et al.* Study on the mechanism of electromagnetic radiation during rock fracture [J] Chinese Journal of Geophysics, 1991, 34(5): 594–601.
- [109] FRID V, RABINOVITCH A, BAHAT D. Fracture induced electromagnetic radiation[J]. *Journal of physics D:applied physics*, 2003, 36(13): 1620–1628.
- [110] RABINOVITCH A, FRID V, BAHAT D. Surface oscillations-a possible source of fracture induced electromagnetic radiation[J]. *Tectonophysics*, 2007, 431(1–4): 15–21.
- [111] RABINOVITCH A, FRID V, BAHAT D. Directionality of electromagnetic radiation from fractures[J]. *International Journal of Fracture*, 2017, 204(2): 239–244.
- [112] LIU X, SONG D, HE X, *et al.* Nanopore structure of deep-burial coals explored by AFM[J]. *Fuel*, 2019, 246: 9–17.
- [113] TIAN X, HE X, SONG D, *et al.* AFM characterization of surface mechanical and electrical properties of some common rocks[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 32(2): 435–445.
- [114] 王伟象. 受载煤微表面力电特性及电荷振荡电磁辐射模型研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- Wang Weixiang. Study on the micro-nano electromechanical characteristics of loaded coal and the electromagnetic radiation model of charge oscillation [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [115] LIU H, LI Z, HE X, *et al.* Dynamic and static electrical characteristics of micro-surface of rocks by coupled use of Atomic Force Microscope and micro-loading device[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 148: 104977.
- [116] CARPINTERI A, BORLA O. Fracto-emissions as seismic precursors[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 177: 239–250.
- [117] 钱书清, 张以勤, 曹惠馨, 等. 岩石破裂时产生的电磁脉冲的观测与研究[J]. 地震学报, 1986, 8(3): 301–308
- QIAN Shuqing, ZHANG Yiqin, CAO Huixin, *et al.* Observation and study of electromagnetic pulse generated during rock fracture [J] *Acta Seismology Sinica*, 1986, 8(3): 301–308
- [118] FRID V. Rockburst hazard forecast by electromagnetic radiation excited by rock fracture[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1997, 30(4): 229–236.
- [119] 王恩元, 何学秋, 窦林名, 等. 煤矿采掘过程中煤岩体电磁辐射特征及应用[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 216–216.
- WANG Enyuan, HE Xueqiu, DOU Linming, *et al.* Electromagnetic radiation characteristics of coal and rocks during excavation in coal mine and their application [J] *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(1): 216–216
- [120] HE X, NIE B, CHEN W, *et al.* Research progress on electromagnetic radiation in gas-containing coal and rock fracture and its applications. *Safety Science*[J], 2012, 50(4), 728–735.
- [121] WANG E, JIA H, SONG D, *et al.* Use of ultra-low-frequency electromagnetic emission to monitor stress and failure in coal mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining*, 2014, 70: 16–25.
- [122] QIU L, WANG E, SONG D, *et al.* Measurement of the stress field of a tunnel through its rock EMR[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2017, 14(4): 949–959.
- [123] DAS S, MALLIK J, DHANKHAR S, *et al.* Application of Fracture Induced Electromagnetic Radiation(FEMR) technique to detect landslide-prone slip planes[J]. *Natural Hazards*, 2020, 101: 505–535.
- [124] VOSTRETISOV A G, KRIVETSKII A V, BIZYAEV A A, *et al.* EMR recording equipment for underground mines[J]. *Journal of Mining Science*, 2008, 44(2): 218–224.
- [125] GREILING R O, OBERMEYER H. Natural electromagnetic radiation(EMR) and its application in structural geology and neotectonics[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2010, 75(1): 278–288.
- [126] DAS S, MALLIK J, BANDYOPADHYAY K, *et al.* Evaluation of maximum horizontal near-surface stress(SHmax) azimuth and its distribution along Narmada-SON Lineament, India by geogenic Electromagnetic Radiation(EMR) technique[J]. *Journal of Geodynamics*, 2020, 133: 101672.
- [127] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂, 等. 煤岩动力灾害电磁辐射监测仪及其应用[J]. 煤炭学报, 2003, 28(4): 366–369.
- WANG Enyuan, HE Xueqiu, LIU Zhentang, *et al.* Electromagnetic radiation detector of coal or rock dynamic disasters and its application [J] *Journal of China Coal Industry*, 2003, 28(4): 366–369.
- [128] 王恩元, 李忠辉, 李德行, 等. 电磁辐射监测技术装备在煤与瓦斯突出监测预警中的应用[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 46–51.
- WANG Enyuan, LI Zhonghui, LI Dexing, *et al.* Application of Electromagnetic Radiation Monitoring Equipment in Monitoring and Warning of Coal and Gas Outburst[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(10): 46–51.
- [129] SONG D, WANG E, HE X, *et al.* Use of electromagnetic radiation from fractures for mining-induced stress field assessment[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2018, 15(4): 1093–1103.
- [130] 何学秋, 聂百胜, 王恩元, 等. 矿井煤岩动力灾害电磁辐射预警技术[J]. 煤炭学报, 2007, 33(1): 56–59.
- HE Xueqiu, NIE Baisheng, WANG Enyuan, *et al.* Electromagnetic radiation early warning technology for mine coal and rock dynamic disaster [J]. *Journal of China Coal Industry*, 2007, 33(1): 56–59
- [131] 窦林名, 王云海, 何学秋, 等. 煤样变形破坏峰值前后电磁辐射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(5): 908–914.
- DOU Linming, WANG Yunhai, HE Xueqiu, *et al.* Study on characteristics of electromagnetic radiation before and after peak deformation and failure of coal samples [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007(5): 908–914.
- [132] 邹喜正, 窦林名, 徐方军. 分维在电磁辐射技术预测冲击矿压中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2002(4): 452–455.

- ZOU Xizheng, DOU Linming, XU Fangjun. Study and practice of fractal dimension in prediction of rock burst by technology of electromagnetic emission(eme) [J]. *Journal of Liaoning University of Engineering and Technology*, 2002(4): 452–455.
- [133] 刘贞堂, 赵恩来, 王恩元, 等. 不同尺度电磁辐射时间序列的混沌特征初步分析[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(2): 224–227.
- LIU Zhentang, ZHAO Enlai, WANG Enyuan, et al. Chaotic characteristics of electromagnetic radiation of coal or rock time series under different scales [J]. *Journal of China Coal Industry*, 2009, 34(2): 224–227.
- [134] 蒋金泉, 李洪. 基于混沌时序预测方法的冲击地压预测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(5): 889–895.
- JIANG Jinquan, LI Hong. Study on Rockburst Forecast with Forecast method based on chaotic time series [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 889–895.
- [135] 刘晓斐. 冲击地压电磁辐射前兆信息的时间序列数据挖掘及群体识别体系研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
- LIU Xiaofei. Study on time series data mining and group recognition system of electromagnetic precursor information of rock burst [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.
- [136] 陈世海. 冲击地压电磁辐射前兆信息识别技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- CHEN Shihai. Study on the Omen Information Identification of Rock Burst Based on the Electromagnetic Radiation Monitoring [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [137] 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.
- [138] 王恩元, 刘晓斐, 何学秋, 等. 煤岩动力灾害声电协同监测技术及预警应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(5): 942–948.
- WANG Enyuan, LIU Xiaofei, HE Xueqiu, et al. Acoustic emission and electromagnetic radiation synchronized monitoring technology and early-warning application for coal and rock dynamic disaster [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(5): 942–948.
- [139] 贺虎, 孙昊, 王茜. 冲击矿压危险的电磁-震动耦合评价[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 364–370.
- HE Hu, SUN Hao, WANG Qian. Electromagnetic emission-microseismicity coupling evaluation method for rockburst[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 364–370.
- [140] 何学秋, 窦林名, 牟宗龙, 等. 煤岩冲击动力灾害连续监测预警理论与技术[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8): 1485–1491.
- HE Xueqiu, DOU Linming, MU Zonglong, et al. Continuous monitoring and warning theory and technology of rock burst dynamodisaster of coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1485–1491.
- [141] 何生全, 何学秋, 宋大钊, 等. 冲击地压多参量集成预警模型及智能辨识云平台[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(5): 850–862.
- HE Shengquan, HE Xueqiu, SONG Dazhao, et al. Multi-parameter integrated early warning model and an intelligent identification cloud platform of rockburst[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(5): 850–862.
- [142] 狄洋阳. 基于深度学习的冲击地压震声电综合预警研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- DI Yangyang. Research on early warning of rock burst microseismic, acoustic emission and electromagnetic radiation signals based on deep learning[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [143] 宋大钊, 何学秋, 邱黎明, 等. 区域和局部突出危险性动态实时监测预警技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(5): 110–119.
- SONG Dazhao, HE Xueqiu, QIU Liming, et al. Study on real time monitoring and early warning technology of regional and Local outburst danger[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(5): 110–119.
- [144] REUTHER C, MOSER E. Orientation and nature of active crustal stresses determined by electromagnetic measurements in the Patagonian segment of the South America Plate[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(3): 585–599.
- [145] KRUMBHOLZ M, BOCK M, BURCHARDT S, et al. A critical discussion of the electromagnetic radiation(EMR) method to determine stress orientations within the crust[J]. *Solid Earth*, 2012, 3(2): 401–414.
- [146] 张地平. 地下电磁定位测距方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- ZHANG Diping. Research on location method of underground electromagnetic positioning [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2018.
- [147] 张军. 钻孔瞬变电磁响应规律与水体定位研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- ZHANG Jun. Study on transient electromagnetic response characteristics of borehole and water body positioning [D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [148] WEI M, SONG D, HE X, et al. Generation mechanism of fracture-induced electromagnetic radiation and directionality characterization in the near field[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 273: 108684.
- [149] 宋大钊, 何学秋, 韦梦茜, 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 Dazhao, HE Xueqiu, WEI Menghan, et al. Study on electromagnetic radiation location technology for coal and rock failure[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(10): 3654–3667.