

# 受载煤体微电流效应及煤岩动力灾害预警应用展望

王恩元<sup>1,2</sup>, 李德行<sup>1,2</sup>, 刘晓斐<sup>1,2</sup>, 王冬明<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学 煤矿灾害防控全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:** 利用建立的受载煤体微电流测试系统, 开展不同加载条件下煤样微电流测试试验, 研究揭示煤体受载变形微电流效应, 分析煤体受载变形过程微电流响应特征, 研究微电流与煤体力学行为间的定量关系, 提出微电流法预测煤岩动力灾害的原理, 结合现场实践结果, 对微电流技术的应用前景进行展望。结果表明, 煤体受载变形能够产生微电流, 微电流变化与应力变化具有较好的一致性, 微电流与煤体力学行为(应力、应变、应变率等)紧密相关, 在压密阶段和塑性变形阶段, 微电流随应变率增加而增加, 在弹性变形阶段随应力和应变线性增加; 煤体在扰动载荷下能够产生随应力周期性变化的微电流, 即脉动直流电, 其变化与应力变化一致。微电流对煤体破坏具有较好的前兆响应, 微电流在加速增加过程(塑性变形阶段)中的异常波动可作为煤体渐进性破坏的前兆特征, 微电流在衰减过程中的脉冲式波动可作为煤体蠕变破坏的前兆特征。煤体受载微电流效应及现场应力梯度的存在, 是矿井微电流测试的重要基础; 微电流与煤体力学行为间的紧密相关性, 是利用微电流技术观测煤岩体应力的重要前提; 微电流对煤体破坏具有明显的前兆响应, 是利用微电流技术预测预报煤岩动力灾害的重要保障。微电流技术具有响应灵敏度高、前兆信息明显和抗干扰能力强的优点, 在煤岩体应力观测及煤岩动力灾害预警中具有很好的应用前景。未来需进一步开展受载煤岩微电流基础理论及应用技术方面的研究, 为发展煤岩动力灾害精准时空监测预警的微电流法提供支撑。

**关键词:** 受载煤体; 微电流; 力学行为; 前兆响应; 监测预警

**中图分类号:** TU45; TD76 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)02-0695-12

## Weak current phenomenon in stressed coal and its prospective applications in early warning for coal and rock dynamic disasters

WANG Enyuan<sup>1,2</sup>, LI Dexing<sup>1,2</sup>, LIU Xiaofei<sup>1,2</sup>, WANG Dongming<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In this study, some loading experiments were conducted on coal specimens using the established weak current testing system to investigate the effects of weak currents in coals. The response characteristics of weak currents during the coal deformation process were analyzed, and a quantitative relationship between weak currents and the mechanical behaviors of coal was established. The principles for predicting coal and rock dynamic disasters based on the weak current method were proposed. Furthermore, drawing upon the results obtained from on-site practical applications, a forward-looking

收稿日期: 2023-12-13 修回日期: 2024-03-04 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ST23.1688

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52227901, 51934007, 52204257)

作者简介: 王恩元 (1968—), 男, 内蒙古卓资人, 教授, 博士生导师。E-mail: weytop@cumt.edu.cn

通讯作者: 李德行 (1991—), 男, 江苏徐州人, 博士后。E-mail: ldx3180@cumt.edu.cn

引用格式: 王恩元, 李德行, 刘晓斐, 等. 受载煤体微电流效应及煤岩动力灾害预警应用展望[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 695-706.

WANG Enyuan, LI Dexing, LIU Xiaofei, et al. Weak current phenomenon in stressed coal and its prospective applications in early warning for coal and rock dynamic disasters[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 695-706.



移动阅读

assessment of the potential applications of this methodology is presented. The results indicate that the deformation of loaded coal generates weak currents. The fluctuations in these weak currents exhibit a notable alignment with variations in stress, with the magnitude closely tied to the coal mechanical characteristics like stress, strain, and strain rate. Notably, in the compaction and plastic deformation stages, the weak current rises in tandem with the strain rate, while in the elastic deformation stage, the weak current exhibits a linear increase in correlation with stress and strain. Under perturbation loading, the coal produces some periodic weak currents, referred to as the pulsating direct current (PDC). And the variations in the PDC align with stress changes. Furthermore, the weak current demonstrates a reliable precursor response to coal damage, with some unusual fluctuations observed during the accelerated increase process (plastic deformation stage) serving as the precursor indicators for the progressive failure of coal. Conversely, the pulse-like fluctuations observed during the attenuation process can be regarded as the precursor features for the coal's creep failure. The phenomenon of weak currents in stressed coal serves as a pivotal foundation for conducting weak current measurements in mines. The intimate correlation between weak currents and the mechanical behaviors of coal underscores a crucial prerequisite for employing the weak current technology in monitoring stress within coal and rock formations. Furthermore, the discernible precursor response of weak currents to coal damage provides a vital assurance for predicting coal and rock dynamic disasters through the utilization of weak current technology. The weak current technology possesses some advantages such as high responsiveness, clear precursor signals, and robust anti-interference capabilities. These attributes make it highly promising for some applications in the stress monitoring within coal/rock mass and the early warning for coal and rock dynamic disasters. In the future, some further researches on the fundamental theory and applied technology of weak current in stressed coal and rock are needed to provide a support for the development of precise spatiotemporal monitoring and early warning of coal rock dynamic disasters using the weak current methods.

**Key words:** stressed coal; weak current; mechanical behavior; precursor response; monitoring and early warning

煤炭在未来很长一段时期内仍将是我国的主体能源,在能源体系中继续发挥稳定器和压舱石作用<sup>[1-2]</sup>。煤炭开采过程中会发生冲击地压、煤与瓦斯突出等煤岩动力灾害,且随着我国煤炭资源开采进入深部,高地应力和强烈开采扰动的复杂力学环境使得动力灾害日趋严重且复杂<sup>[3-6]</sup>,我国煤岩动力灾害防治形势依然严峻。

国内外学者对煤岩动力灾害的发生机理、监测预警方法和防治技术进行了大量研究,提出了微震/声发射法<sup>[7-10]</sup>、电磁辐射法<sup>[11-13]</sup>、表面电位法<sup>[14-16]</sup>和感应电荷法<sup>[17-18]</sup>等监测预警方法,在煤岩动力灾害预防方面发挥了重要作用。然而,现有的监测预警方法在时间上识别动力灾害危险状态、空间上识别动力灾害危险区域及其发展趋势方面仍存在一定不足。因此,继续研究煤岩动力灾害监测预警方法与技术,探索灾害演化过程中的物理信号,有助于通过监测的多信息融合来实现煤岩动力灾害的综合精准预警<sup>[19]</sup>。

WARWICK 等<sup>[20]</sup>在研究岩石断裂电磁辐射现象的试验中测试到了裂纹起裂时的微电流。后来 VALIANATOS、STAVRAKAS、TRIANIS 等<sup>[21-24]</sup>通过实验室研究发现,岩石在应力作用下能够产生微电流,称之为“应力激发电流”。STAVRAKAS 等<sup>[22]</sup>对受载大理岩微电流响应特征进行研究,结果表明,当试样

所受应力超过 0.6 倍峰值应力时,微电流开始增加明显,于约 0.8 倍峰值应力时达到峰值,并于试样破裂时出现突降/激增,且微电流峰值与加载速率呈正比。TRIANIS 等<sup>[24]</sup>对大理岩受载变形破坏过程中微电流响应规律做进一步研究,分析认为微电流的产生主要源于岩石弹性模量的变化而非加载速率的变化。KYRIAZOPOULOS 等<sup>[25]</sup>对混凝土梁开展的三点弯曲试验结果表明,微电流与试样的应变率成正比,且破裂出现时会伴随微电流的突增。美国 NASA 的 FREUND 等<sup>[26-28]</sup>在火成岩(花岗岩、斜长岩、辉长岩等)受载变形微电流效应方面开展了较为系统的试验研究,结果表明,即使在较小的应力水平下微电流依然可以快速增加至峰值,且在相同加载条件下,硅酸盐颗粒含量较高的岩石微电流也较大。LI 等<sup>[29]</sup>研究岩石连续加载和分级加载过程微电流响应规律,得到微电流与力学行为之间的定量关系,确定了基于微电流响应的受载岩石破坏前兆特征。LI 等<sup>[30]</sup>认为顶板岩石断裂产生的微电流可能是采空区瓦斯爆炸的致灾机制,并利用微电流响应对力电效应的点火特性进行了研究。前期对微电流的研究主要集中在岩石、混凝土等脆性材料,为确定煤体受载过程能否产生微电流,LI 等<sup>[31-32]</sup>测试了煤样单轴压缩下的表面微电流,发现煤样破坏过程能够产生微电流信号,并对结果进行了

初步分析。为进一步完善受载煤体微电流理论体系,李德行等<sup>[33-36]</sup>对受载煤体微电流效应进行较为系统地研究,结果表明,微电流可以较好地反映煤体受力和变形情况,能够对煤体损伤演化过程进行表征。为探索微电流技术在煤矿等地下工程中应用的可行性,李德行等<sup>[36-37]</sup>利用自主研制的矿用微电流监测仪对深部矿井中煤岩体的微电流进行了测试,验证微电流法在煤岩体应力观测和动力灾害监测预警中的可行性。目前,对微电流技术的研究仍处于起步阶段,仍需更加系统地开展煤体微电流效应的基础理论研究,为煤岩动力灾害监测预警微电流技术的发展与应用提供支撑。

笔者利用建立的受载煤体微电流测试系统,开展煤体受载变形破坏微电流测试试验,系统分析煤体受载变形过程微电流响应特征,研究微电流与煤体力学行为间的定量关系,确定基于微电流响应的煤体破坏前兆特征,提出微电流法预测煤岩动力灾害的原理,结合现场实践结果,对微电流技术在煤岩动力灾害监测预警中的应用前景进行展望。

## 1 试验设备及方案

### 1.1 试验系统及设备

试验系统由加载系统、微电流采集系统及电磁屏蔽系统组成(图1)。静载加载系统主要由 SANS YAW4306 微机控制电液伺服压力试验机、加载控制系统及配套 Power Test V3.3 控制程序组成,其中该控制程序既能控制加载过程,又能够采集并记录应力、应变等力学参数,该系统最大施加载荷可达 3 000 kN,数据采集频率可达 20 Hz。微电流采集系统由 Keithley 6517B 型静电计、计算机、三同轴电缆及电极组成,该静电计微电流测量范围为 1 fA~20 mA,最小分辨率为 1 fA,读数率可达 425 次/s;三同轴屏蔽线缆能够对环境中的电信号进行屏蔽,防止采集到的电信号在传输过程中受到干扰;利用基于 LabVIEW 自主开发的软件对静电计控制,并进行数据的传输与储存。电磁屏蔽系统主要为 GP6 电磁屏蔽室,屏蔽效果在 85 dB 以上,试验在屏蔽室内开展,可有效避免外界电磁干扰。

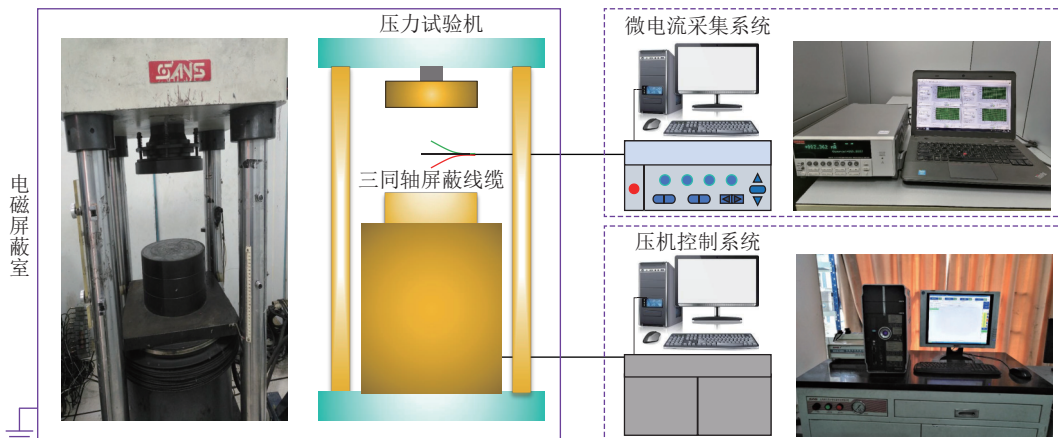


图1 受载煤体微电流测试系统示意

Fig.1 Schematic diagram of weak current testing system for loaded coal

### 1.2 试样制备

在煤层回采过程中,工作面前方煤体按应力分布可划为3个区域:应力松弛区、应力集中区和原始应力区<sup>[38]</sup>,因此,应力集中和应力梯度是动力灾害孕育过程中最鲜明的特征之一。为更好地反映矿井煤岩体受力状态下的微电流响应,本试验采取局部(集中)加载方式,即对煤样的某一部分施加载荷,同步测试流经试样受载部分与非受载部分之间的微电流。煤样取自陕西省张明沟煤矿,通过标准试样( $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ )单轴压缩试验对与本研究主题密切相关的力学参数进行测定(表1)。为实现局部加载,将煤样制备为尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 的长方体试

样,对试样表面进行研磨,将不平行度和不垂直度均控制在 $\pm 0.05\text{ mm}$ 以内,避免煤样在加载过程中因偏压造成应力集中而影响试验结果。

表1 煤样力学参数

Table 1 Mechanical parameters of coal utilized in the testing

密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
1 250	19	2.13

### 1.3 试验步骤及方案

如图2所示,为实现局部加载,将煤样一端放置在2个直径为80 mm、厚度为50 mm的不锈钢垫块之间,通过5 mm厚的聚四氟乙烯板使得不锈钢垫



块与压机绝缘。分别将尺寸为  $30\text{ mm} \times 20\text{ mm}$  和  $100\text{ mm} \times 80\text{ mm}$  的 2 个铜片电极通过导电银漆粘贴在上部不锈钢垫块和煤样非受载部分的末端侧面,然后用绝缘胶带将 2 个铜片电极固定,防止脱落。通过三同轴鳄鱼夹电缆将静电计与测试电极连接。调节上、下 2 个不锈钢垫块使得 2 者在轴向上重合,从而防止煤样发生偏移和剪切破坏。由于试样较长,受载部分较小,为防止试样悬空而发生折断,在其非受载端下方放置不锈钢垫块和绝缘垫片。

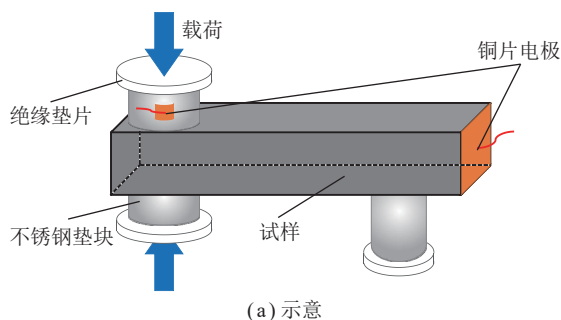


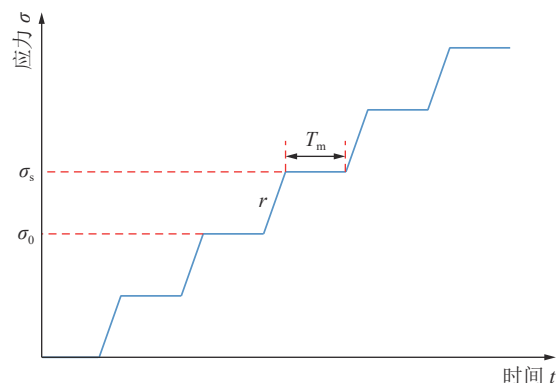
图2 局部加载方式及电极布置

Fig.2 Sketch of loading and electrode arrangement

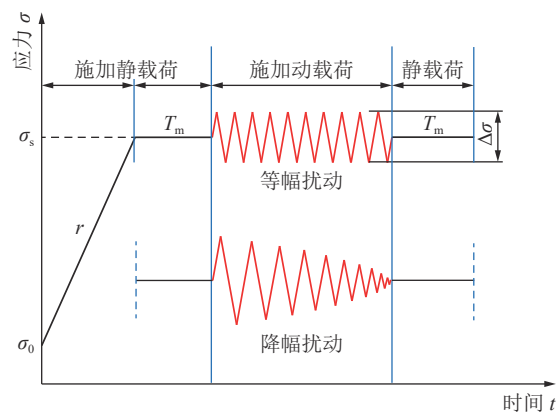
为更好地模拟煤矿中由于回采工序引起的应力变化及由于开挖爆破、机械钻凿、地震等引起的动载荷等场景<sup>[39-40]</sup>,本试验中采取分级加载及“预静载+扰动载荷”的加载路径,加载路径如图3所示。应力增加过程采用力控方式以固定速率  $r$  将应力由较低值  $\sigma_0$  增加至较高值  $\sigma_s$ ,应力保持时长为  $T_m$ 。分级加载仅需重复以上步骤,如图3(a)所示;“预静载+扰动载荷”则通过力控方式在力保持阶段施加幅值为  $\Delta\sigma$  的周期性变化应力,分为等幅扰动和降幅扰动,如图3(b)所示。

## 2 结果分析

图4为煤样 CPS03、CFS03 分级加载过程应力和微电流随时间变化曲线。2 组试验结果整体相似,即煤体受载变形能够产生微电流,其与应力具有很好的对应性,应力增加过程均伴随着微电流的增加,在应



(a) 分级加载



(b) 预静载+扰动载荷

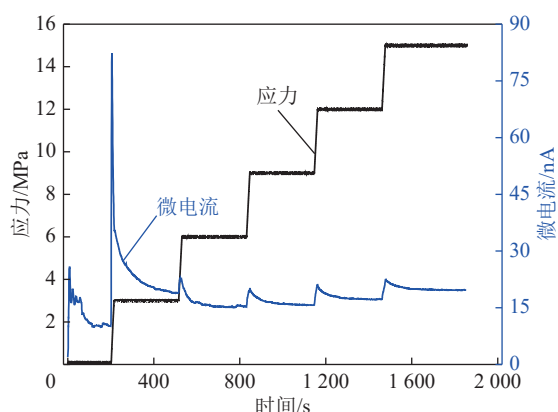
图3 试验加载路径示意

Fig.3 Diagram of loading paths in experiments

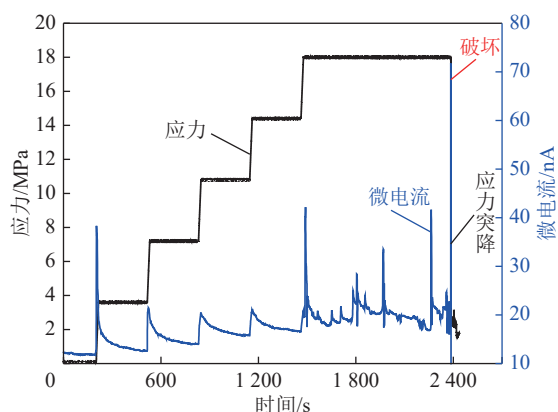
力保持阶段,微电流则逐渐衰减。不同的是,煤样 CPS03 在试验开始时 (0 s) 出现突增然后逐渐衰减,这是由于该试样试验开始前,未将试样上方的垫块与压机紧密贴合,导致加载的瞬间突然受力,出现了微电流的突增,然后逐渐衰减至背景值。为避免再次出现该现象,在煤样 CFS03 试验开始前,先通过位移控对压机进行调节,使其与试样上方垫块紧密贴合,然后通过力控降低应力,待微电流稳定后再开始加载试验。此外,最后应力保持阶段微电流的响应特征不同,是由于 2 者所受应力大小不同,其所处的变形阶段不同,且煤样 CFS03 最终发生了失稳破坏 (表现为应力的大幅突降),伴随微电流的异常变化和突增,该特征在后文中进行详细分析和论述。

### 2.1 微电流基本响应规律

由图4(a)可以看出,在应力初次增加时微电流增加明显,而在应力由 3、6、9、12 MPa 增加时,微电流缓慢增加,且幅度相对初次较小。煤岩材料受载变形破坏前一般经历压密阶段、弹性变形和塑性变形 3 个变形阶段<sup>[41]</sup>,各变形阶段煤体的力学行为不尽相同,因此有必要分别从压密阶段、弹性变形阶段和损伤阶段对微电流响应特征及其与煤体力学行为之间的关系进行分析。



(a) 煤样 CPS03



(b) 煤样 CFS03

图4 煤样 CPS03、CFS03 分级加载过程应力和微电流随时间变化

Fig.4 Time-dependent variation of stress and current for specimens CPS03 and CFS03 under stepped loadings

### 2.1.1 压密阶段

图5为煤样 CPS03 分级加载过程中的应力-应变曲线,在应力小于 5.2 MPa 时,应力-应变曲线呈上凹形,在应力大于 5.2 MPa 后,应力-应变曲线呈线性变化,且各分级加载阶段应力-应变曲线基本平行,说明当应力在 0~5.2 MPa 时煤样处于压密阶段,5.2~15.0 MPa 时煤样处于弹性变形阶段。图6为煤样 CPS03 第1级加载应力、应变和微电流随时间变化,由前述分析可知此时煤样完全处于压密阶段。在 201 s 时开始施加应力时,应变和微电流均随之增加,但微电流并非随着应力的增加而持续增大,于约 203 s 时便达到峰值,随后呈逐渐减小趋势。图6显示时间-应力曲线在 201~203 s 内呈上凹形,说明尽管对压机设定的线型加载速率为 0.2 MPa/s,但应力的施加并非一蹴而就,而是在短时间内由 0 逐渐增加至设定值,随后应力以恒定速率线性增加。时间-应变曲线在 201~203 s 内呈上凹形,说明应变率  $\varepsilon^*(d\varepsilon/dt)$  逐渐增大;在应力线性增加时 (203~216 s),时间-应变曲线呈上凸形,表明应变率逐渐减小。结合微电流先增

后减的变化趋势可以推测,微电流大小与应变率呈正相关,下面进行量化分析。

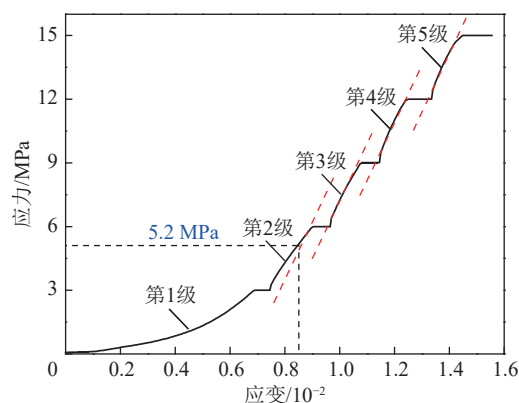


图5 煤样 CPS03 分级加载过程应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curve of sample CPS03 during loading

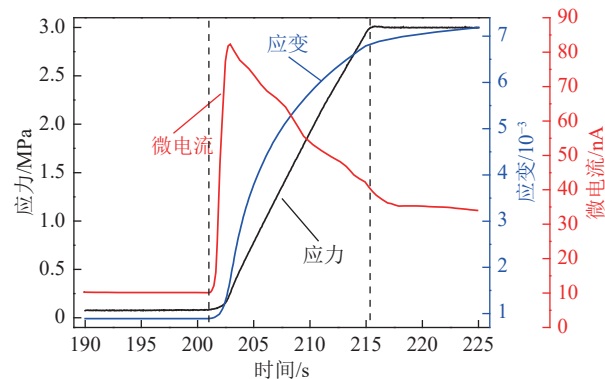


图6 煤样 CPS03 压密阶段应力、应变和微电流随时间变化

Fig.6 Time-dependent variation of stress, strain, and current for specimen CPS03 during the compaction stage

图7(a)为煤样 CPS03 初次加载阶段应变随时间变化,  $G$  点记为拐点。在拐点之前  $d\varepsilon^*/dt = d^2\varepsilon/dt^2$  为正值,处于加速压密阶段;在拐点之后  $d\varepsilon^*/dt = d^2\varepsilon/dt^2$  为负值,处于减速压密阶段。为研究应变率与微电流之间的定量关系,对应变进行曲线拟合,求出应变随时间的变化函数,即  $\varepsilon(t)$ ,然后利用如下公式计算实时应变率  $\varepsilon^*(t)$ :

$$\varepsilon^*(t) = d\varepsilon(t)/dt = \varepsilon'(t) \quad (1)$$

以拐点  $G$  为界限对时间-应变散点进行分段拟合,拟合结果见表2,拟合优度  $R^2$  均近似为 1。根据式(2)对  $\varepsilon(t)$  求得应变率函数  $\varepsilon^*(t)$ ,见表2。根据应变率函数  $\varepsilon^*(t)$  计算任意时刻的应变率,散点分布如图7(b)所示,应变率呈现先快速增大后逐渐减小的趋势。对比图6可以发现,微电流与应变率变化趋势近似,为进一步确定二者之间的定量关系,绘制微电流  $I$  随应变率变化散点图(图8)。拟合结果表明,微电流随应变率以指数函数形式增加,但增加速率逐渐减小,

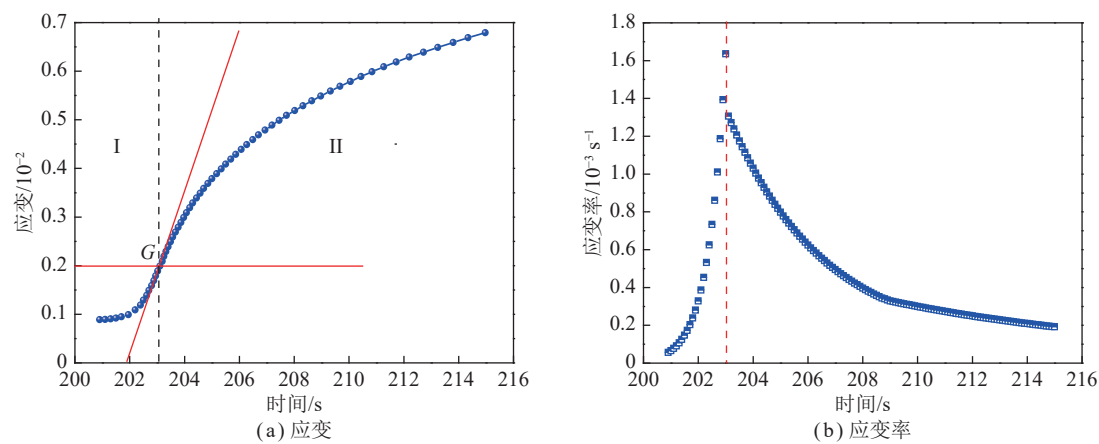


图 7 煤样 CPS03 压密阶段应变参数随时间变化

Fig.7 Time-dependent variation of strain parameters for specimen CPS03 during the compaction stage

表 2 煤样 CPS03 压密阶段时间-应变分段拟合函数及其导函数

Table 2 Segmented fitting functions for time-strain curves and its derivatives during the compaction stage of specimen CPS03

阶段	时间段/s	时间-应变拟合函数	应变率函数
加速压密阶段	201~203	$\varepsilon(t) = 1.96 \times 10^{-5} \exp((t - 200.68)/0.58) + 8.45 \times 10^{-4} (R^2=0.998)$	$\dot{\varepsilon}^*(t) = 3.38 \times 10^{-5} \exp((t - 200.68)/0.58)$
减速压密阶段	203~209	$\varepsilon(t) = -1.80 \times 10^{23} \exp(-t/3.44) + 6.16 \times 10^{-3} (R^2=0.998)$	$\dot{\varepsilon}^*(t) = 5.23 \times 10^{22} \exp(-t/3.44)$
	209~215	$\varepsilon(t) = -1.24 \times 10^7 \exp(-t/9.40) + 8.24 \times 10^{-3} (R^2=1.000)$	$\dot{\varepsilon}^*(t) = 1.32 \times 10^6 \exp(-t/9.40)$

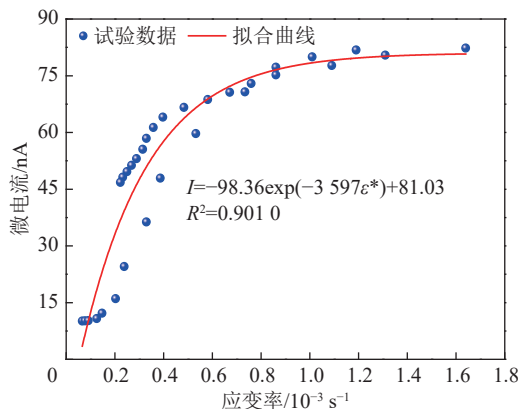


图 8 压密阶段微电流与应变率变化关系

Fig.8 Relationship between weak current and strain rate variation during the compaction stage

说明在其他条件相同下,微电流不会随应变率增加而无限增大。

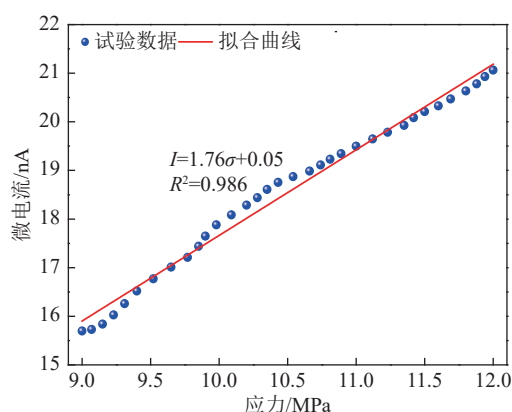
2.1.2 弹性变形阶段

由前述分析可知,煤样 CPS03 在 5.2~15.0 MPa 应力范围时处于弹性变形阶段,笔者以第 4、5 分级过程为例分析煤体弹性变形阶段微电流与力学行为之间关系。由于弹性阶段弹性模量  $E=d\sigma/d\varepsilon$  近似为恒定值,本试验中以恒定速率(即应力变化率  $d\sigma/dt$ )对煤样进行加载,因此该过程中应变率  $d\varepsilon/dt$  可认为保持不变,由此可以推断,加载过程微电流的增加与应力变化率及应变率均无关,而与持续增加的应力或应变有关。由于弹性阶段应力与应变成正比,因此只需分

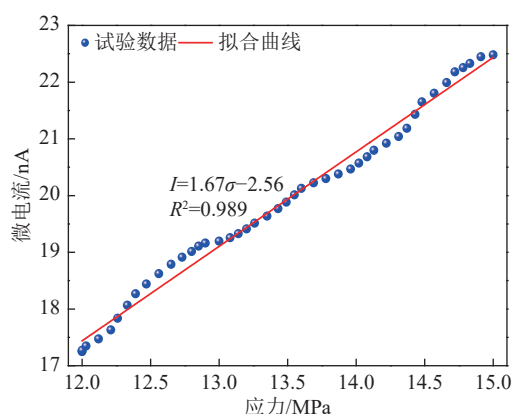
析微电流与应力、应变二者其一之间的定量关系即可,此处以应力为研究对象分析弹性变形阶段微电流与力学行为之间的关系。将第 4、5 分级过程应力增加时微电流随应力的变化曲线绘制如图 9 所示,可见,无论在何种应力区间,微电流均随应力的增加呈现出增加的趋势,且曲线拟合结果表明,微电流随应力增加线性增加。

2.1.3 塑性变形阶段

图 10 为煤样 CPS06 应力由 18.0 MPa 增加至煤样破坏过程中的应力、应变和微电流变化曲线,可以看出,在 3 288 s(应力为 19.5 MPa)之前,应变和微电流均随时间呈线性增加,且曲线极为光滑,不存在波动。随着应力的继续增加,应变曲线开始由直线型转变为上凹型,应变开始加速上升,即应变率逐渐增加,此时煤样进入塑性变形阶段。观察应力曲线还可以发现,应力不再像之前如此光滑,而是存在间断性的突降,这是由于微裂纹的贯通所致。在进入塑性变形阶段后,微电流不再以线性的方式稳定增加,而是呈波动式加速增加的趋势。由于该阶段加载速率为恒定值,即应力变化率恒定,而应变和微电流均呈现非线性变化,因此,需探究微电流与应变、应变率之间的关系。首先通过对该时段应变进行曲线拟合得出应变率函数,然后根据应变率函数计算出任意时刻的应变率,根据计算结果绘制塑性变形阶段微电流随应变率变化散点图(图 11)。曲线拟合结果表明微电流随



(a) 第4分级



(b) 第5分级

图9 煤样 CPS03 弹性变形过程微电流随应力变化

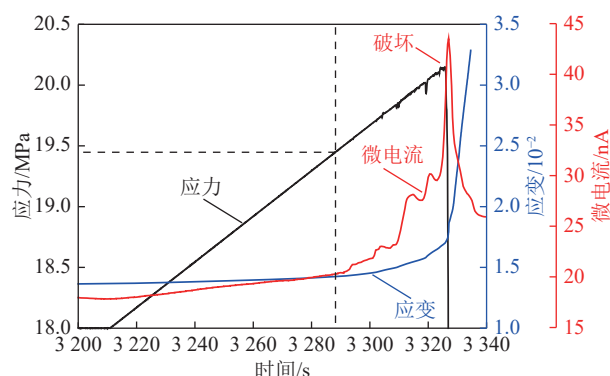
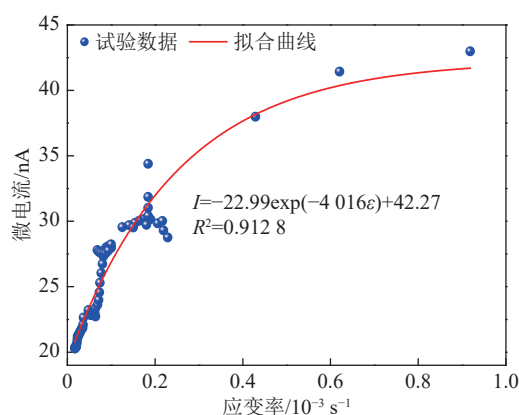
Fig.9 Weak current variation with stress in the elastic deformation stage for specimen CPS03

应变率增加呈负指数型增加,与压密阶段规律相似。该结果说明,煤体临近破坏时应变率的增加是导致微电流激增的主要原因。

综上所述可知,相对于弹性变形阶段,压密阶段相同应力增量下的应变率更大,因此,当应力加载到 3 MPa 时,所产生的微电流信号强度大于应力增加至 6、9、12、15 MPa 时所产生的微电流强度(图 4)。然而,压密阶段初始时微电流强度小于煤样临近破坏时的微电流强度(图 4(b)),这是由于临近破坏时煤样处于塑性变形阶段,应变率加速增加,大于压密阶段初始时的应变率,是煤样破坏时出现微电流突增的主要原因。

## 2.2 动静载叠加微电流响应特征

图 12 为煤样 CPS08 不同扰动应力条件下应力及微电流随时间变化曲线,受载煤样在扰动应力下能够激发出随应力周期性变化大小的微电流,即脉动直流电(PDC)。脉动直流电的变化与扰动应力变化一致,即微电流随应力增加而线性增加,随应力降低而线性减小。当扰动应力达到最大值时,微电流达到极大值,当扰动应力达到最小值时,微电流则达到极小值。

图10 煤样 CPS06 破坏过程应力、应变和微电流时域变化<sup>[36]</sup>Fig.10 Time-dependent variation of stress, strain and current during the failure process of specimen CPS06<sup>[36]</sup>图11 煤样 CPS06 塑性变形阶段微电流随应变率变化<sup>[36]</sup>Fig.11 Current variation with strain rate during the plastic deformation stage for specimen CPS06<sup>[36]</sup>

## 2.3 基于微电流响应的煤体破坏前兆特征

由前述分析可知,微电流的加速增加意味着煤体变形进入塑性变形阶段。此外,由图 10 可以看出,在临近破坏时,微电流在加速增加过程中出现了连续的异常波动,表明微电流变化对煤样破裂具有明显的前兆响应,即微电流在加速增加过程(塑性变形阶段)中的异常波动可作为煤体连续加载下破坏的前兆特征。

由图 4(b)可以看出,在前 4 级应力保持过程中,微电流均呈逐渐衰减的趋势,且曲线极为光滑。而在第 5 级应力保持(18.0 MPa)时,煤体变形已进入塑性变形阶段,尽管微电流整体表现出缓慢衰减的趋势,但脉冲式波动异常明显,如图 13 所示,且异常微电流的幅值呈增加趋势,并于煤体发生蠕变破裂时出现激增,达到最大值。可见,微电流对煤体蠕变破坏也具有前兆响应,即微电流在衰减过程中的脉冲式波动可作为煤体蠕变破坏的前兆信息。

## 3 微电流技术及应用展望

### 3.1 微电流法预测煤岩动力灾害原理

实验室试验结果表明,煤样在受载变形过程中会



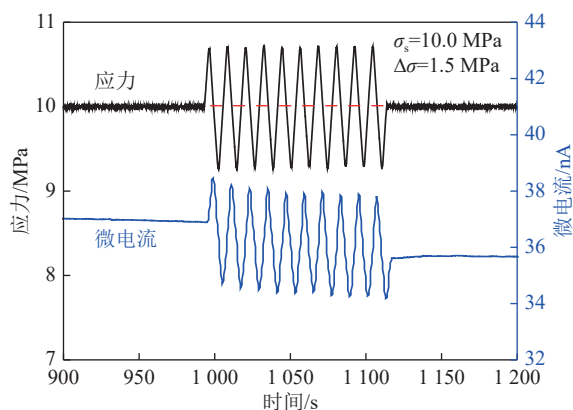


图 12 脉动直流电及扰动应力随时间变化

Fig.12 Time-dependent variation of PDC and disturbance stress

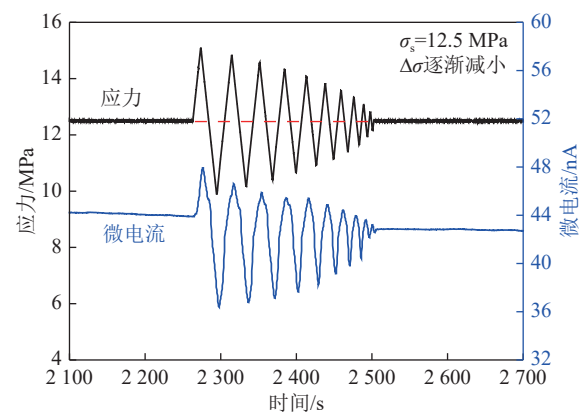


图 12 脉动直流电及扰动应力随时间变化

Fig.12 Time-dependent variation of PDC and disturbance stress

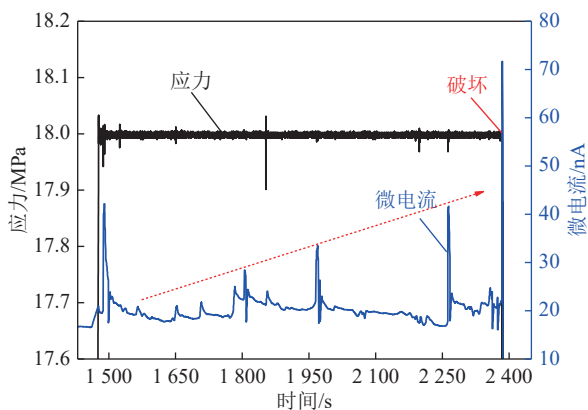


图 13 煤样 CFS03 蠕变破坏过程应力与微电流随时间变化

Fig.13 Changes in stress and current over time during the creep failure process of specimen CFS03

激发出微电流,且在煤体内部沿着应力梯度流动。在煤层开采过程中,根据应力分布情况可将工作面前方煤体分为3个区域:应力松弛区、应力集中区和原始应力区(图14),相对于应力松弛区和原始应力区,应力集中区发生煤岩动力灾害的危险性更高。因此,煤体受载微电流效应及现场应力梯度的存在,是矿井微电流测试的重要基础。

另一方面,微电流变化与应力变化具有较好的一致性,微电流与煤体力学行为(应力、应变、应变率

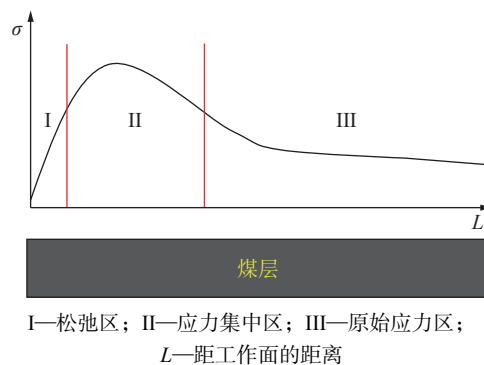


图 14 工作面前方煤体应力分布

Fig.14 Stress distribution of coal in front of the working face

等)紧密相关,在压密阶段和塑性变形阶段,微电流随应变率增加而增加,在弹性变形阶段随应力和应变线性增加,因此,微电流变化能够较好地反映煤体应力和应变变化情况及煤体所处的变形阶段。此外,根据冲击地压相关机理<sup>[42-43]</sup>,采动煤岩体内部集中静载荷的积聚是冲击启动的内因,采动煤岩体远场处由于开挖爆破、机械钻凿、地震等引起的动载荷是冲击启动的外因。试验结果表明,煤体在扰动载荷下能够产生大小随应力周期性变化的微电流,即脉动直流电,其变化与应力变化高度一致。因此,微电流与煤体力学行为的紧密相关性,是利用微电流技术观测煤岩体应力的重要前提。

煤岩体失稳破坏的前兆信息是煤岩动力灾害预警最重要的指标之一,及时可靠的前兆是有效预警的重要保证<sup>[1]</sup>。实验室试验结果表明,微电流对煤体破坏具有较好的前兆响应,微电流在加速增加过程(塑性变形阶段)中的异常波动可作为煤体连续加载下破坏的前兆特征,微电流在衰减过程中的脉冲式波动可作为煤体蠕变破坏的前兆特征。煤层回采过程,由于开采工艺的原因,煤岩体会受到周期来压;此外,当在煤柱附近进行采掘活动时,作用在煤柱上的采动应力逐渐增大,在应力重分布且趋于稳定后,煤柱将遭受静载荷的长期影响并产生蠕变变形。随着开采活动的不断进行,煤岩体会受到静载荷和扰动载荷的叠加作用,超过其强度时会发生失稳破坏。该破坏可能发生在应力持续增加过程,也有可能发生在蠕变过程,而微电流的变化能够对该2种破坏方式进行前兆响应。因此,微电流对煤体破坏具有明显的前兆响应,是利用微电流技术预测预报煤岩动力灾害的重要保障。

本试验中所用煤样尺寸为100 mm×100 mm×500 mm,体积为 $5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ,激发出的微电流数量级为数十纳安。而在煤矿现场,工作面前方应力集中区域体积可达 $10^4 \text{ m}^3$ ,煤体激发的微电流可达数十毫安,



即使有 90% 的损耗, 可监测的微电流大小仍有数毫安。在将煤体变形的现场应用方面, 可以从煤层巷帮往内部打平行钻孔, 在内部布置电极, 并在工作面附近或巷帮等应力极小处布置电极, 将应力集中区域与煤层表面连接成回路, 监测煤层回采过程中的微电流变化情况, 从而反应工作面前方的应力集中及变化情况。

### 3.2 微电流法应用实践与探索

由于缺乏矿用微电流监测装备, 前期对于煤岩微电流效应的研究仍停留在实验室试验和理论研究阶段, 限制了微电流法在煤矿等地下工程的应用。为探索微电流技术在地下工程中应用的可行性, 笔者团队自主研制了便携式矿用微电流监测仪 (图 15)<sup>[37]</sup>, 该仪器内部采用电磁隔离方案以避免外部电信号的干扰, 具备自动量程 (0~15 mA) 功能, 即档位会根据所测微电流自动切换, 采样频率为 1~50 Hz。测试通道采用 RS485 通讯, 可实现微电流信号的远程传输。此外, 该监测仪内置供电电源, 续航能力强, 可实现 120 h 的连续监测。



图 15 矿用微电流监测仪<sup>[37]</sup>

Fig.15 Weak current measurement device used in coal mines<sup>[37]</sup>

基于该微电流监测仪, 笔者建立了矿井煤岩微电流测试系统, 在冲击地压煤矿回采工作面开展现场试验, 测试点设在工作面前方煤体中, 试验方案详见文献<sup>[37]</sup>。图 16 为 2021-04-24—27 期间 3303 工作面推进期间某测点 (孔深 10 m) 处微电流时域变化曲线, 结果表明, 煤矿现场能够监测到明显的微电流信号, 且微电流随煤层回采呈现出阶段式逐渐增加的趋势, 与实验室结果 (图 4) 基本一致。

为详细分析微电流响应与生产进度之间的关系, 根据生产工序对微电流变化进行阶段性划分, 各工作日微电流变化如图 17 所示, 可以看出, 在工作面生产期间, 微电流整体呈现出阶梯式上升的趋势, 即在煤层回采期间, 微电流呈逐渐增加的趋势, 停采期间, 微电流处于平稳波动状态。

图 18 为 2021-04-28—29 期间工作面推进过程该测点微电流的时域变化, 可以看出, 微电流出现多次脉冲式突增, 随后逐渐趋于平稳。结合现场微震监测结果分析可以看出, 几乎所有的矿震均发生在微电流激增阶段, 即矿震发生前均伴随有微电流的加速增加。如图 18(a) 所示, 2-1 号矿震发生的时间为 4 月

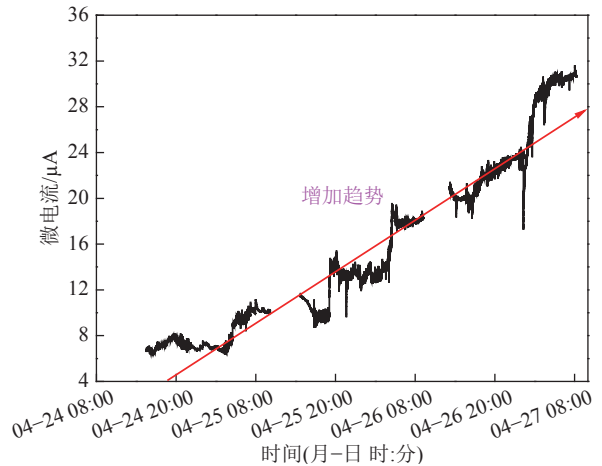


图 16 工作面前方煤体某测点微电流连续测试结果<sup>[37]</sup>

Fig.16 Continuous weak current testing results at a measurement point in the coal ahead of the working face<sup>[37]</sup>

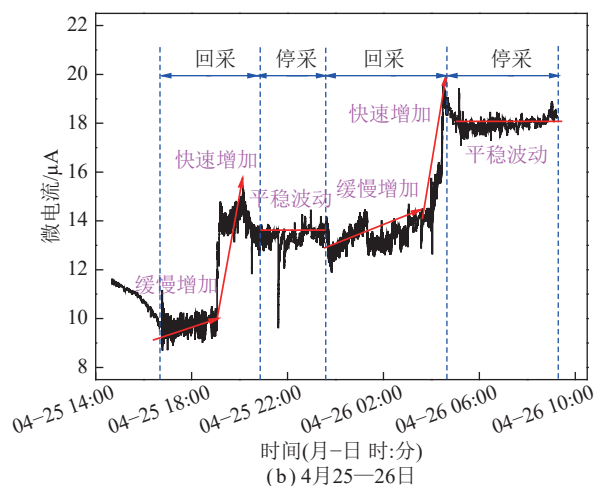
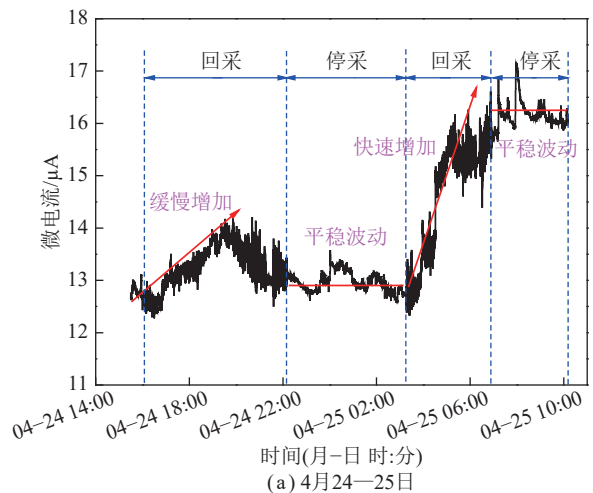


图 17 回采、停采期间微电流变化曲线<sup>[37]</sup>

Fig.17 Current variation during mining and stopping periods<sup>[37]</sup>

28 日 22:52:58, 而微电流开始出现加速增加的时刻为 22:51:52, 微电流提前 66 s 响应。如图 18(b) 所示, 微电流开始加速增加的时刻为 4 月 29 日 01:11:36, 而 3-1 号矿震发生在 01:22:22, 微电流提前响应时间约

为 11 min; 3-2 号矿震发生前 3 min 微电流开始出现特征响应。以上分析表明, 微电流的加速增加可作为矿震事件, 即煤体破坏的前兆信息, 与实验室所得规律一致。

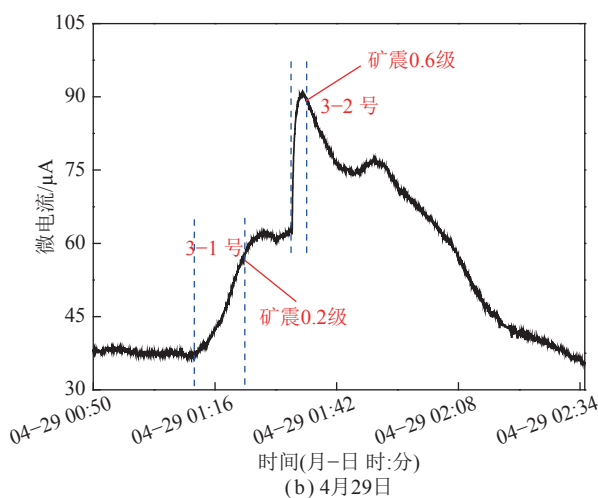
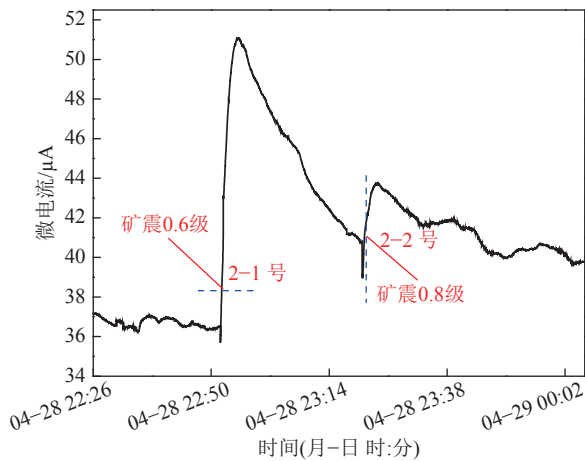


图 18 微电流异常及矿震信息<sup>[37]</sup>

Fig.18 Weak current anomalies and seismic information<sup>[37]</sup>

### 3.3 微电流法应用前景展望

实验室和煤矿现场试验结果均表明, 煤体受载变形过程能够产生微电流信号。微电流技术表现出了响应灵敏度高、前兆信息明显和抗干扰能力强的优点。灵敏度高是指对应力、应变和应变率等力学行为的变化响应灵敏, 体现微电流技术的灵敏性; 前兆信息明显是指微电流对煤体失稳破坏、矿震等具有较好的前兆响应, 体现微电流技术的时效性; 抗干扰能力强是指在复杂的井工环境中, 微电流技术能够有效抵抗用电设备及施工过程中产生的电磁辐射及环境噪声等干扰, 体现微电流技术的适用性。微电流技术的抗干扰能力一方面是由该技术本身的特性决定, 因为微电流监测的原理是应力集中与应力松弛区域间的煤体等效于一个电池, 与微电流仪和导线之间形成闭合回路, 环境中的电信号难以参与其中; 另一方面是从硬

件方面采取电磁屏蔽措施, 即微电流监测仪内置模块采用了隔离方案以避免电磁干扰, 且外电路导线采用高性能屏蔽线缆, 进一步加强周围用电设备对结果的影响。基于上述优势, 微电流技术在煤岩应力观测及动力灾害预警中具有很好的应用前景。

另一方面, 煤岩动力灾害孕育过程围岩应力、变形及损伤的分布演化存在时空效应, 但由于目前煤岩微电流监测技术处于初始阶段, 无论是实验室或是矿井现场研究, 微电流采集设备均为单通道模式, 使得微电流测试仍处于“点”或者“线”的空间维度, 利用该技术尚不能实现煤岩动力灾害危险性的区域性预测及时空维度上的精准预警。因此, 下一步研究应开展多通道微电流采集系统的研制, 进而研究揭示煤岩体变形破坏过程微电流时空演化规律, 确定基于微电流时空响应的煤岩动力灾变前兆信息。该研究工作不仅有助于进一步完善受载煤岩微电流理论体系, 还能够为发展煤岩动力灾害精准时空监测预警的微电流法提供技术基础。

除矿山领域外, 微电流技术还能够对隧道、桥梁和房建等岩土工程的岩体应力观测、结构稳定性评价及灾害预警提供参考。另外, 由于滑坡、泥石流和地震等地质灾害与矿山动力灾害在孕育和演化过程存在很多相似之处, 因此微电流技术对自然地质灾害的预测预报也具有一定的借鉴意义。

## 4 结 论

(1) 煤样在受载变形过程中会激发出微电流, 微电流变化与应力变化具有较好的一致性, 微电流与煤体力学行为紧密相关, 在压密阶段和塑性变形阶段, 微电流随应变率增加而增加, 在弹性变形阶段随应力和应变线性增加。煤体在扰动载荷下能够产生随应力周期性变化的微电流, 即脉动直流电, 其变化与应力变化一致。

(2) 微电流对煤体破坏具有较好的前兆响应, 微电流在加速增加过程(塑性变形阶段)中的异常波动可作为煤体渐进性破坏的前兆特征, 微电流在衰减过程中的脉冲式波动可作为煤体蠕变破坏的前兆特征。

(3) 煤体受载微电流效应及现场应力梯度的存在, 是矿井微电流测试的重要基础; 微电流与煤体力学行为间的紧密相关性, 是利用微电流技术观测煤岩体应力的重要前提; 微电流对煤体破坏具有明显的前兆响应, 是利用微电流技术预测预报煤岩动力灾害的重要保障。微电流技术具有响应灵敏度高、前兆信息明显和抗干扰能力强等优点, 在煤岩应力观测及动力灾害预警中具有很好的应用前景。

(4) 现有的微电流技术尚不能满足煤岩动力灾害危险性区域性预测及时空维度上精准预警的要求。下一步工作应聚焦多通道微电流采集系统的研制, 研究揭示煤岩体变形破坏过程微电流时空演化规律, 确定基于微电流时空响应的煤岩动力灾变前兆信息。该研究工作不仅有助于进一步完善受载煤岩微电流理论体系, 还能够为发展煤岩动力灾害精准时空监测预警的微电流法提供技术基础。

## 参考文献(References):

- [1] 袁亮, 王恩元, 马衍坤, 等. 我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1825–1845.  
YUAN Liang, WANG Enyuan, MA Yankun, et al. Research progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1825–1845.
- [2] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197–2211.  
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197–2211.
- [3] 谢和平, 张茹, 张泽天, 等. 深地科学与深地工程技术探索与思考[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 3959–3978.  
XIE Heping, ZHANG Ru, ZHANG Zetian, et al. Reflections and explorations on deep earth science and deep earth engineering technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 3959–3978.
- [4] 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.
- [5] 潘一山, 宋义敏, 刘军. 我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2081–2095.  
PAN Yishan, SONG Yimin, LIU Jun. Pattern, change and new situation of coal mine rockburst prevention and control in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(9): 2081–2095.
- [6] 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.
- [7] 姜福兴, 王存文, 杨淑华, 等. 冲击地压及煤与瓦斯突出和透水的微震监测技术[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(1): 26–28, 100.  
JIANG Fuxing, WANG Cunwen, YANG Shuhua, et al. Microseismic monitoring and measuring technology for pumping pressure, coal and gas outburst and water inrush[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(1): 26–28, 100.
- [8] CAI M, MORIOKA H, KAISER PK, et al. Back-analysis of rock mass strength parameters using AE monitoring data[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(4): 538–549.
- [9] XIE H P, LIU J F, JU Y, et al. Fractal property of spatial distribution of acoustic emissions during the failure process of bedded rock salt[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48: 1344–1351.
- [10] 纪洪广, 穆楠楠, 张月征. 冲击地压事件 AE 与压力耦合前兆特征分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(S1): 1–5.  
JI Hongguang, MU Nannan, ZHANG Yuezheng. Analysis on precursory characteristics of coupled acoustic emission and pressure for rock burst events[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1): 1–5.
- [11] 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 Society, 2003, 28(4): 366–369.
- [12] 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, 32(1): 56–59.  
HE Xueqiu, NIE Baisheng, WANG Enyuan, et al. Electromagnetic emission forecasting technology of coal or rock dynamic disasters in mine[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 56–59.
- [13] 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 on 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.
- [14] 李忠辉, 王恩元, 宋晓艳, 等. 煤样破坏应变局部化与表面电位分布规律研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 2043–2047.  
LI Zhonghui, WANG Enyuan, SONG Xiaoyan, et al. Study on strain localization and surface potential distribution law of coal samples fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 2043–2047.
- [15] 宋晓艳, 李忠辉, 王恩元. 岩石受载破坏裂纹扩展带电特性[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1941–1945.  
SONG Xiaoyan, LI Zhonghui, WANG Enyuan. Charging characteristics of the crack propagation of rock under load[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 1941–1945.
- [16] 钮月, 王恩元, 高峰, 等. 深部矿井掘进工作面煤体突出危险电位反演精细判识[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(5): 988–996.  
NIU Yue, WANG Enyuan, GAO Feng, et al. Fine identification of coal and gas outbursts based on electric potential inversion method ahead of driving face of deep mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(5): 988–996.
- [17] 潘一山, 赵扬锋, 李国臻. 冲击地压预测的电荷感应技术及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3988–3993.  
PAN Yishan, ZHAO Yangfeng, LI Guozhen. Charge-induced technique of rockburst prediction and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2): 3988–3993.
- [18] 潘一山, 罗浩, 赵扬锋. 电荷感应监测技术在矿山动力灾害中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 29–33, 78.  
PAN Yishan, LUO Hao, ZHAO Yangfeng. Application of charge induction monitoring technology of mine dynamic disasters[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 29–33, 78.
- [19] 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 consid-



- eration of theory and technology system[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(9): 1–40.
- [20] WARWICK J W, STOKER C, MEYER T R. Radio emission associated with rock fracture: possible application to the Great Chilean Earth-quake of May 22, 1960[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87: 2851–2859.
- [21] VALLIANATOS F, TZANIS A. Electric current generation associated with the deformation rate of a solid: preseismic and coseismic signals[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, 23(9–10): 933–939.
- [22] STAVRAKAS I, ANASTASIADIS C, TRIANTIS D, et al. Piezo stimulated currents in marble samples: precursory and concurrent-with-failure signals[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, 3: 243–247.
- [23] STAVRAKAS I, TRIANTIS D, AGIOUTANTIS Z, et al. Pressure stimulated currents in rocks and their correlation with mechanical properties[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2004, 4: 563–567.
- [24] TRIANTIS D, STAVRAKAS I, ANASTASIADIS C, et al. An analysis of pressure stimulated currents (PSC), in marble samples under mechanical stress[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006, 31: 234–239.
- [25] KYRIAZOPOULOS A, ANASTASIADIS C, TRIANTIS D, et al. Non-destructive evaluation of cement-based materials from pressure-stimulated electrical emission—Preliminary results[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25: 1980–1990.
- [26] FREUND FT, TAKEUCHI A, LAU BW. Electric currents streaming out of stressed igneous rocks—A step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006, 31: 389–396.
- [27] FREUND FT. Pre-earthquake signals: underlying physical processes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41: 383–400.
- [28] SALTAS V, FITILIS I, VALLIANATOS F. A combined complex electrical impedance and acoustic emission study in limestone samples under uniaxial loading[J]. *Tectonophysics*, 2014, 637: 198–206.
- [29] LI DX, WANG EY, LI ZH, et al. Experimental investigations of pressure stimulated currents from stressed sandstone used as precursors to rock fracture[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 145: 104841.
- [30] LI M, WANG HT, WANG DM, et al. Experimental study on characteristics of surface potential and current induced by stress on coal mine sandstone roof[J]. *Engineering Geology*, 2020, 266: 105468.
- [31] LI ZH, WANG EY, HE M. Laboratory studies of electric current generated during fracture of coal and rock in rock burst coal mine[J]. *Journal of Mining*, 2015: 235636.
- [32] 何森, 李忠辉, 刘杰, 等. 单轴压缩下煤体表面电流试验研究[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(6): 966–969.
- HE Miao, LI Zhonghui, LIU Jie, et al. Experimental study on surface current of coal under uniaxial compression[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(6): 966–969.
- [33] 李德行. 受载煤体损伤过程微电流效应及其机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- LI Dexing. Study on the weak current effect and its mechanism of stressed coal during damage [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [34] LI D X, WANG E Y, JU Y Q, et al. Laboratory investigations of a new method using pressure stimulated currents to monitor concentrated stress variations in coal[J]. *Natural Resources Research*, 2021, 30: 707–724.
- [35] LI D X, WANG E Y, YUE J H, et al. Characteristics of pressure stimulated current and damage evolution of granite under progressive uniaxial loading[J]. *Sustainability*, 2023, 15: 14526.
- [36] LI D X, WANG E Y, FENG X J, et al. Weak current induced by coal deformation and fracture and its response to mine seismicity in a deep underground coal mine[J]. *Engineering Geology*, 2023, 315: 107018.
- [37] 李德行, 王恩元, 岳建华, 等. 煤岩动力灾害预测的微电流技术及其应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(4): 764–774.
- LI Dexing, WANG Enyuan, YUE Jianhua, et al. A weak current technique for coal and rock dynamic disaster prediction and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(4): 764–774.
- [38] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 109–112.
- [39] 潘俊锋, 齐庆新, 刘少虹, 等. 我国煤炭深部开采冲击地压特征、类型及分源防控技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 111–121.
- PAN Junfeng, QI Qingxin, LIU Shaohong, et al. Characteristics, types and prevention and control technology of rock burst in deep coal mining in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 111–121.
- [40] 王俊光, 梁冰, 杨鹏锦. 动静载荷作用下片麻岩蠕变实验及非线性扰动蠕变模型[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(1): 192–198.
- WANG Junguang, LIANG Bing, YANG Pengjin. Creep experiment and nonlinear disturbance creep model of gneiss under dynamic and static loads[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 192–198.
- [41] 张晓平, 王思敬, 韩庚友, 等. 岩石单轴压缩条件下裂纹扩展试验研究——以片状岩石为例[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(9): 1772–1781.
- ZHANG Xiaoping, WANG Sijing, HAN Gengyou, et al. Crack propagation study of rock based on uniaxial compressive test—A case study of schistose rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(9): 1772–1781.
- [42] 潘俊锋, 宁宇, 毛德兵, 等. 煤矿开采冲击地压启动理论[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(3): 586–596.
- PAN Junfeng, NING Yu, MAO Debing, et al. Theory of rockburst start-up during coal mining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(3): 586–596.
- [43] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(7): 1469–1476.
- DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(7): 1469–1476.