

文章编号: 1001-4888(2023)01-0119-12

含水煤岩变形破坏过程电荷感应 和微震信号特征试验研究^{*}

刘玉春^{1,3}, 潘一山^{1,4}, 赵扬锋^{1,2}, 李兵¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 辽宁省矿山沉陷灾害防治重点实验室, 辽宁阜新 123000;
3. 辽宁工程技术大学 理学院, 辽宁阜新 123000; 4. 辽宁大学 灾害岩体力学研究所, 辽宁沈阳 110036)

摘要: 为了监测煤层注水减弱煤层的冲击倾向性和底板突水增加矿井冲击危险性的效果, 利用电荷感应和微震同步监测系统, 对平顶山矿井的原煤和砂岩开展单轴压缩下不同含水率煤岩的电荷感应和微震监测试验, 获得了不同含水率原煤和砂岩变形破裂过程的电荷感应和微震信号特征。试验结果表明: 随着含水率的增大, 煤岩峰值应力减小, 冲击倾向性减弱, 经过浸泡饱和后煤样的峰值应力和砂岩的峰值应力分别降低了 21.8% 和 31.1%; 随着含水率的增大, 煤岩变形破裂过程中产生的电荷感应和微震信号事件数都减小, 信号强度也降低, 电荷感应与微震信号均方值幅值减小, 而砂岩变形破裂过程中产生的电荷感应和微震信号事件数却增多, 信号强度也增强; 煤岩变形破裂过程产生的电荷感应信号受水的影响比微震信号受水的影响大。煤层注水后有效降低了矿井的冲击危险性, 煤层变形破裂过程产生的电荷感应和微震信号变弱; 矿井底板突水时提高了矿井冲击危险性, 从而底板变形破裂过程产生的电荷感应和微震信号增强。

关键词: 岩石力学; 含水煤岩; 电荷感应; 微震; 信号特征

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-007

0 引言

水在煤岩体中的存在, 在不同程度上改变了煤岩体物理力学特性及其变形破坏的特征, 当这些改变发生在矿井开采以及防护的薄弱位置时可能导致一些灾害的发生, 如煤柱失稳破坏、矿井底板突水会提高矿井冲击危险性等; 水也可降低灾害的发生, 如煤层注水可以降低煤层的冲击倾向性, 是冲击地压解危方法之一。煤岩动力灾害发生时可通过监测煤岩体变形破裂过程产生的物理信息, 如微震、电荷感应、声发射等对煤岩动力灾害进行监测预警, 因此研究水对煤岩体变形破坏的影响以及含水煤岩体变形破裂过程产生的电荷感应和微震信号变化规律有很重要的意义。

煤岩变形破裂过程会产生电荷感应和微震信号, 众多学者对此做了大量的研究工作。赵扬锋等^[1,2]采用非接触方式、高放大倍数、响应快速的电荷传感器来监测砂岩和煤变形破裂过程产生的电荷信号; 潘一山等^[3,4]在北京长沟峪煤矿、平顶山矿区进行现场测试, 得出了工作面开挖过程中煤体应力与煤壁表面感应电荷的时-空变化规律; 罗浩等^[5]研究了含水煤体失稳破坏过程中的电荷感应规律, 以探寻应用电荷感应法监测煤矿突水灾害的可行性; 郑文红等^[6,7]研究了矿井底板突水过程电荷感应规

^{*} 收稿日期: 2022-01-07; 修回日期: 2022-04-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51274114, 51974150); 辽宁省自然科学基金面上项目(2022-MS-401)

通信作者: 赵扬锋(1979—), 男, 教授, 博士。主要从事矿山灾害力学的研究工作。Email: zhyf_20010284@sina.com

律,获得了导水通道距离采掘空间不同深度下电荷特征和含水率对砂岩变形破裂过程电荷感应信号的影响规律;王岗等^[8]开展了不同含水率煤样变形破裂过程电荷规律的研究,并对现场煤层注水过程进行了电荷感应现场监测;许晓阳等^[9]对混凝土材料和原煤单轴全程压缩加载破坏的微震信号规律及频谱特征进行了对比分析;王晓南等^[10]研究了煤岩组合体变形破裂过程声发射和微震变化规律;李成武等^[11]通过自行搭建的大型振动微震监测试验装置,探究了不同激励加速度和频率条件下整体煤岩试件的振动破坏特性;朱权洁等^[12]利用大型煤与瓦斯突出模拟试验系统和高灵敏微震监测系统,获得了从突出孕育到突出发生完成全过程的微震动响应事件规律;刘玉春等^[13]利用自行设计的微震全波形综合监测试验系统,探究了干燥煤岩和含水煤岩变形破裂过程微震信号变化规律;来兴平等^[14]开展了不同含水状态煤岩样的单轴压缩试验,主要对不同含水状态下煤岩样的力学特性、能量释放规律、破坏模式以及关键部位孕灾声发射信号进行了拾取;唐巨鹏等^[15]研究了基于声发射能量分析的周期注水应力改造下煤系页岩裂缝扩展规律。在对煤岩变形破裂电荷感应和微震联合监测研究中,赵扬锋等^[16,17]建立单轴压缩条件下多参量测试系统,研究了完整花岗岩和含断层带花岗岩在不同加载速率下变形破裂过程中电荷感应、微震和声发射信号多参量的变化规律;赵扬锋等^[18]研究了三点弯曲脆性岩石试样的微震和电荷感应信号变化规律;赵扬锋等^[19,20]研究了不同类型岩石和不同组合比例煤岩的电荷感应和微震信号规律;赵扬锋等^[21]研究了单轴压缩条件下完整砂岩和不同倾角裂隙砂岩的破坏特征及电荷感应信号和微震信号规律;赵扬锋等^[22]对断层黏滑失稳过程微震与电荷信号时频特征进行了研究。

综上所述,众多学者目前对含水煤岩变形破坏过程中电荷感应和微震信号同时监测的研究还没有涉及,因此本文对不同含水率煤岩进行电荷感应和微震联合监测单轴压缩试验,并对监测获得的电荷感应和微震信号特征进行分析,所得成果对煤层注水减弱煤层冲击倾向性效果的监测和煤层底板突水增加矿井的冲击危险性的监测都具有实际意义。



图1 试样

Fig.1 Sample

1 含水煤岩破坏过程电荷感应和微震试验

1.1 试样制备

本文试验所用试样均取自平顶山煤矿十一矿己四采区工作面的原煤和底板砂岩,通过切割机制作成尺寸为圆柱直径 50mm、高 100mm 的标准试样(见图 1),将试样两端端面的平行度控制在 $\pm 0.1\text{mm}$,试样处于自然干燥状态。选取表面无明显缺陷的 A 组煤样、B 组砂岩试样各 6 个,分别选用 4 个试件清水浸泡 24h 与 48h,其中 A3、A4 和 B3、B4 为自然状态下试样,A9、A10 和 B9、B10 为清水浸泡 24h 试样,A11、A12 和 B11、B12 为清水浸泡 48h 后饱和试样,用电子称测量其重量并计算各组试样含水率,分成 3 组不同含水率煤岩试样。

1.2 试验系统

试验系统由试验加载系统、电磁屏蔽系统、多通道电荷感应与微震信号数据采集系统 3 个部分组成,试验系统装置实物图如图 2 所示。

试验加载系统采用 MTS 系列液压万能试验机,试验采用位移加载方式,加载速率为 0.01mm/s 。电磁屏蔽系统采用网格小于 0.5mm 的致密铜丝网和多功能圆柱形屏蔽缸筒,先将电荷传感器探头、试验试件、压机压头等置于多功能圆柱形屏蔽缸筒内进行屏蔽处理,再用致密铜网包裹多功能圆柱形屏蔽缸筒,系统各部分之间用同轴屏蔽电缆线的屏蔽层进行直接接地处理。电荷感应与微震信号数据采集系统采用自行研制的多通道数据采集器,试验时采样频率设为每通道 12.5kHz 。试验时该试验系统可同步采集电荷感应和微震信号,其中电荷感应与微震信号各 3 通道。微震传感器选择 1 个 PS-10B(垂向)与 2 个 PSH-10B(水平向)速度传感器组装成三分向传感器(标记为微震传感器 1、2 和 3,分别与数据采集器 5、6 和 7 通道相连),该传感器对于频率在 10Hz 至 1.4kHz 的振动信号能够平坦响应。微震传感器的前端放大器增益为 32 倍,经过标定,微震传感器灵敏度为 $22.7 \pm 5\% \text{V}/(\text{m/s})$,可测的振动速度范围为 $\pm 6.883 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 。自主研制的电荷传感器的灵敏度为 $A_{\text{CQ}} = 1 \times 10^{11} \text{V/C}$,因此电荷感应可

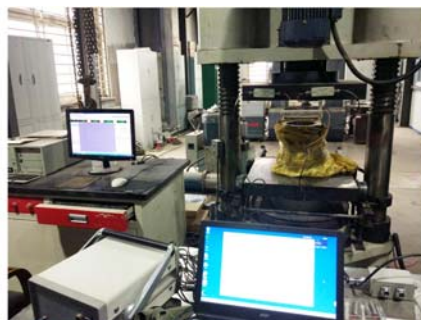
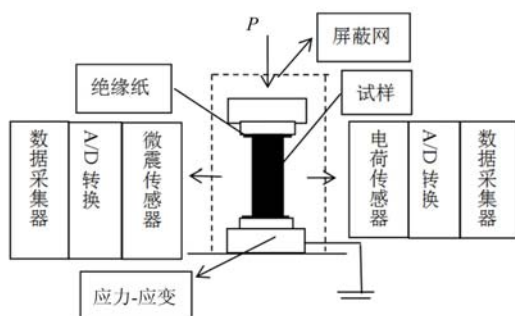


图 2 试验系统装置示意图和实物图

Fig. 2 Schematic diagram and physical diagram of test system device

测范围为 $\pm 5 \times 10^{-11} \text{C}$, 试验时把 3 个电荷感应探头(标记为探头 1、2 和 3, 分别与数据采集器 1、2 和 3 通道相连)布置于试件相邻的 3 个侧面中部, 使探针正对于试样表面, 传感器探头距试样表面距离为 5mm。试验开始前对加载系统和数据采集系统进行网络对时, 控制时间误差小于 10ms。

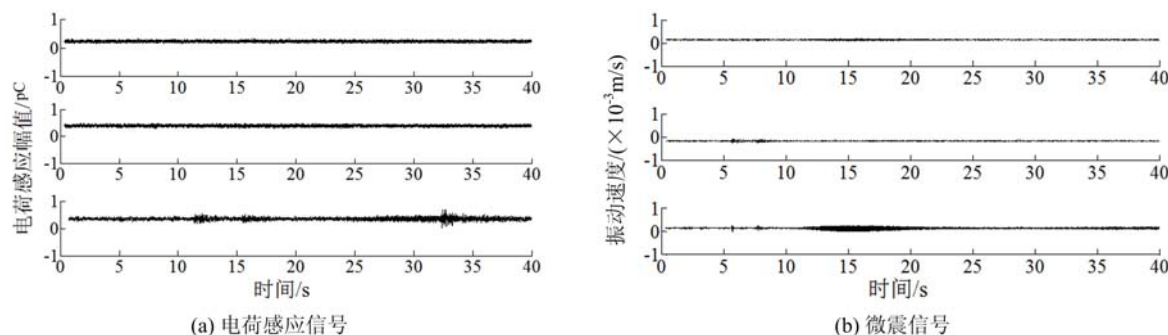


图 3 背景信号

Fig. 3 Background signal

为保证试验数据监测的准确性与可行性, 在试验前采集实验室环境下的电荷感应和微震信号等背景信号。图 3 所示为在试验机开机后加载前电荷传感器和微震传感器连续收集 40s 的信号, 电荷传感器接收到的系统噪声信号最大幅值为 0.41pC, 占总量程的 0.82%, 微震传感器接收到的系统噪声信号最大幅值为 $0.2 \times 10^{-3} \text{m/s}$, 占数据采集总量程的 2.90%, 其间电荷信号和微震信号稳定, 幅值较小, 但微震信号受到噪声的影响比电荷感应信号大, 表明试验可行。

1.3 试验方案

- (1) 将不同类型的标准试样进行分组排序, 测量每个试件的尺寸, 并作相应记录。
- (2) 按图 2 所示连接各仪器, 调节多通道采集系统, 检测电荷感应与微震信号仪器等是否处于正常的工作状态。
- (3) 调整功能圆柱形屏蔽缸筒, 将试样置于缸筒内中心位置, 用绝缘纸隔绝试样与压力机底座和压头, 调节压头与试件的距离, 用钢网包裹。
- (4) 调节试验加载系统, 设置加载速率, 调节电荷感应与微震信号采集系统, 设置采样频率, 同时启动各采集系统, 保证各数据同步采集。
- (5) MTS 压力机启动时会干扰电荷感应与微震信号的采集, 因此试验开始时, 先启动 MTS 压力机, 再启动电荷感应与微震采集系统, 直至试样破坏; 试验结束时, 应先关闭数据采集系统, 再停止 MTS 压力机, 重复以上步骤, 完成全部试验。

2 试验结果分析

2.1 不同含水率煤岩单轴压缩力学特性

表 1 为不同含水率煤岩试样试验参数, 图 4 为不同含水率砂岩和煤样的应力-应变曲线。图 4 (a)、

(b)、(c)为 B4、B9、B12 砂岩单轴压缩下的应力-应变图,图 4(d)、(e)、(f)为 A3、A9、A11 煤样单轴压缩下的应力-应变图。

由表 1 和图 4(a)可知,含水率为 3.1%的天然砂岩试件峰值应力最高,为 27.3MPa,峰值应力前变形几乎是线弹性的,峰后应力-应变曲线较陡,应变脆性特征明显,当试件应力达到强度极限时,试件发生中间整体劈裂破坏,砂岩试样整体失去承载能力突然失稳破坏。由表 1 和图 4(b)可知,浸水 24h 砂岩含水率为 4.2%,砂岩试件的峰值应力降低到 20.3MPa,峰后应力-应变曲线有较小的起伏,且经历时间较长,塑性特征有所显现,试件发生局部劈裂破坏。

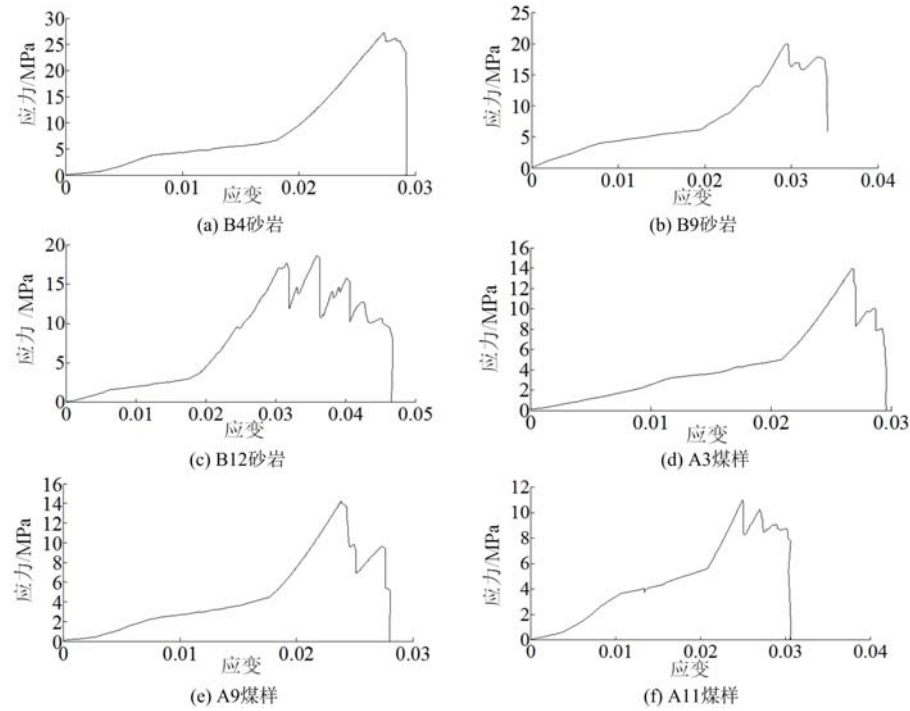


图 4 不同含水率砂岩和煤样的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of different moisture content coal and sandstone samples

表 1 不同含水率煤岩试样试验参数

Tab. 1 Test parameters of different moisture content coal and rock samples

试样编号	直径/mm	高/mm	含水率/%	峰值应力/MPa
A3	50.1	102.5	4.5	14.2
A4	50.2	102.3	4.9	13.2
A9	50.2	100.8	6.8	13.9
A10	50.1	101.7	7.4	12.5
A11	50.2	104.3	8.6	11.1
A12	50.1	103.9	7.8	12.3
B3	50.1	98.6	3.3	25.2
B4	50.1	104.7	3.1	27.3
B9	50.2	101.1	4.2	20.3
B10	50.2	103.8	3.8	23.5
B11	50.1	101.6	4.4	20.4
B12	50.2	100.2	4.9	18.8

由表1和图4(c)可知,浸水48h后砂岩试件饱和,含水率达到4.9%,砂岩含水率最高,砂岩内部矿物颗粒间的黏接力降低,摩擦系数降低,峰值应力最低为18.8MPa,峰后出现应力降次数最多,有明显的应变软化阶段且持续时间最长,砂岩试样经历了多次渐进破坏过程,试件发生张拉劈裂破坏。

水会在不同程度上改变煤岩的物理力学特征及其变形破坏特征,不同含水率试样在一定程度上会表现出不同力学特征。图5为不同含水率煤样与砂岩试件的破坏实物图。由图4和表1以及各试件变形破坏后的状态图5可知,砂岩与煤样试件在峰值应力前应力与应变呈线性趋势,但分为两个阶段,初始阶段应力-应变曲线斜率较小,而在应变接近0.02时应力-应变曲线斜率显著增加;砂岩与煤样试件随着含水率的增大,试件的峰值应力减小,最大应变增大,试件的峰后软化阶段逐渐明显,峰后应力降次数增多;试件由突然失稳破坏向多次渐进破坏转变,煤样由块状劈裂破坏向多裂纹贯穿劈裂破坏转变,砂岩试件由整体劈裂破坏向局部劈裂破坏转变。

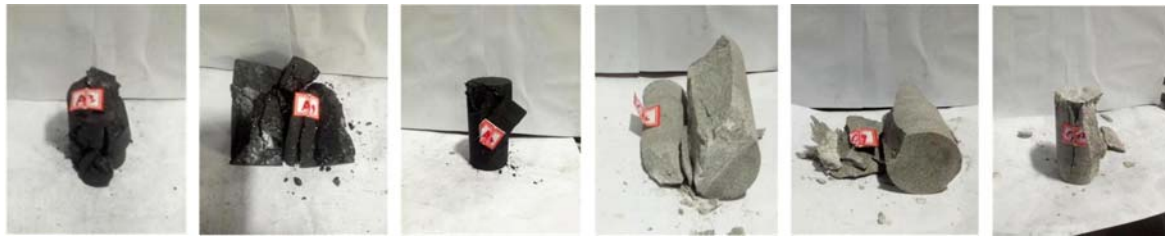


图5 不同含水率煤样与砂岩试件的破坏实物图

Fig. 5 Physical damage maps of different moisture content coal and sandstone specimens

2.2 不同含水率煤岩电荷感应与微震信号特征

图6为砂岩B4变形破坏过程中的电荷感应和微震信号。图6(b)为砂岩B4时间-电荷感应曲线,图中上中下曲线分别为通道1、2和3接收到的电荷感应信号;图6(c)为砂岩B4时间-微震信号曲线,图中上中下曲线分别为通道5、6和7接收到的微震信号,后文图7、图8与图6类似,不再赘述。由图6可知,天然砂岩试件在弹性阶段有微弱电荷感应信号产生,在强化损伤阶段有较大电荷与微震信号,原因是砂岩内部微裂隙发育程度较弱,弹性阶段内部存储能量使微裂隙有较小扩展,产生微弱的电荷感应与微震信号;进入强化阶段,能量累积增大,微裂隙产生、扩展,有较大的电荷感应信号与微震信号出现,在失稳破坏阶段不同裂纹开始汇合、贯通,电荷与微震信号事件数明显增多、幅值也显著增大。在548s($100\%\sigma_c$ (σ_c 为抗压强度))时有小幅值的应力跌落,幅值为1.5MPa,电荷传感器所对的3个侧面都有较大幅值的电荷感应信号产生,而在有破裂的侧面有幅值为50pC的电荷感应信号产生,同时有较大幅值的微震信号产生;在试件失稳破坏阶段,3侧面都有幅值为50pC的电荷感应信号和 6×10^{-3} m/s的微震信号产生。在失稳破坏时,裂纹快速扩展,能量瞬间释放,损伤急剧变化,承载结构面快速失稳破坏,电荷感应和微震信号幅值同时达到最大值。电荷与微震信号的产生与应力降有较好的相关性。

图7为浸水24h砂岩B9变形破坏过程电荷感应和微震信号。由图7(a)、(b)可知,浸水24h的砂岩试件与天然砂岩试件在峰前阶段有相似的规律。在进入峰后破坏阶段,岩样在强度极限处应力下降3.5MPa,在2号通道处有较大的电荷信号幅值产生,幅值达50pC,而在1号、3号通道处信号幅值微小;岩体进入残余强度阶段,在311s时有1.5MPa的应力降,此时在1号、2号通道有较小幅值的电荷感应信号产生,幅值为11.2pC;在失稳破坏时,3号通道电荷感应幅值最大,达到50pC,1号通道电荷感应幅值最小,仅为12.5pC,2号通道电荷感应幅值为32.3pC。3通道电荷感应幅值大小不等是因为2号、3号通道的电荷传感器探头更接近砂岩的破坏区域,而1号通道的电荷传感器探头则远离砂岩的破坏区域,显然岩石的破裂对电荷感应信号的影响较大。由图7(a)、(c)可知,微震信号在前期与电荷感应信号有相似特征,在296.2s(应力最大值处)与311s处有应力降,3个通道都有微震信号产生,但信号幅值比天然含水率试件产生的微震信号小,而在失稳破坏时3个通道都有较强的微震信号产生。

图8为饱和砂岩B12变形破坏过程电荷感应和微震信号。由图可知,饱水砂岩试件在压密、弹性阶段有微弱电荷感应和微震信号产生,在81.5s($52\%\sigma_c$)处有应力降0.5MPa,电荷传感器3号通道有微弱电荷信号产生,微震传感器5号、6号通道有微弱微震信号产生。在岩样进入失稳破坏阶段,应变软

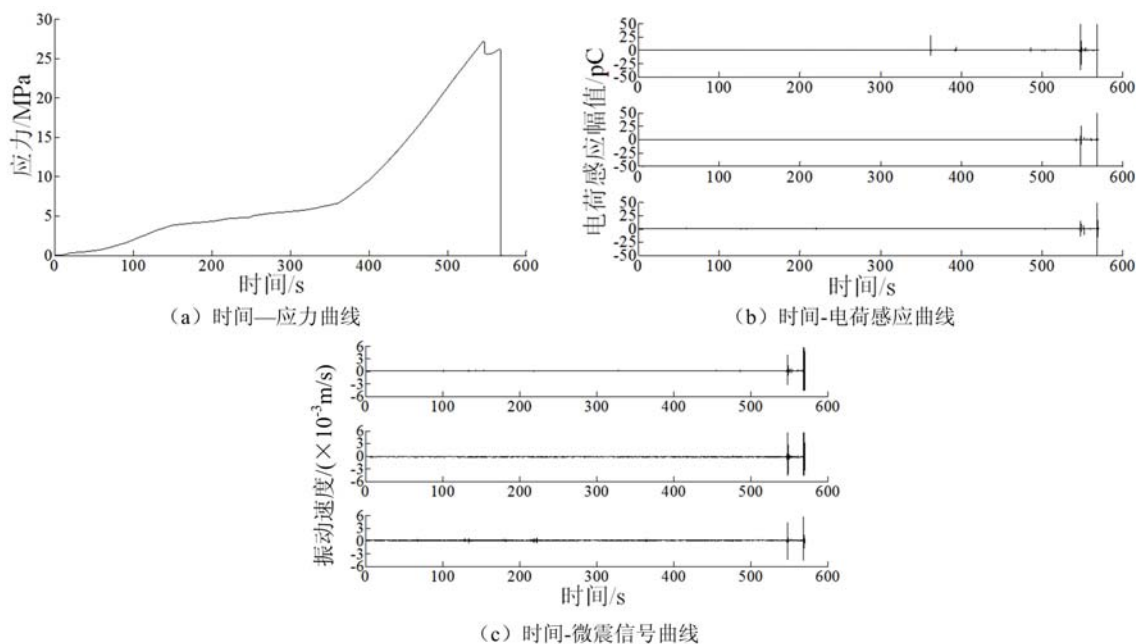


图 6 砂岩 B4 变形破坏过程电荷感应和微震信号

Fig. 6 Charge induction and microseismic signals of the deformation and failure process of sandstone B4

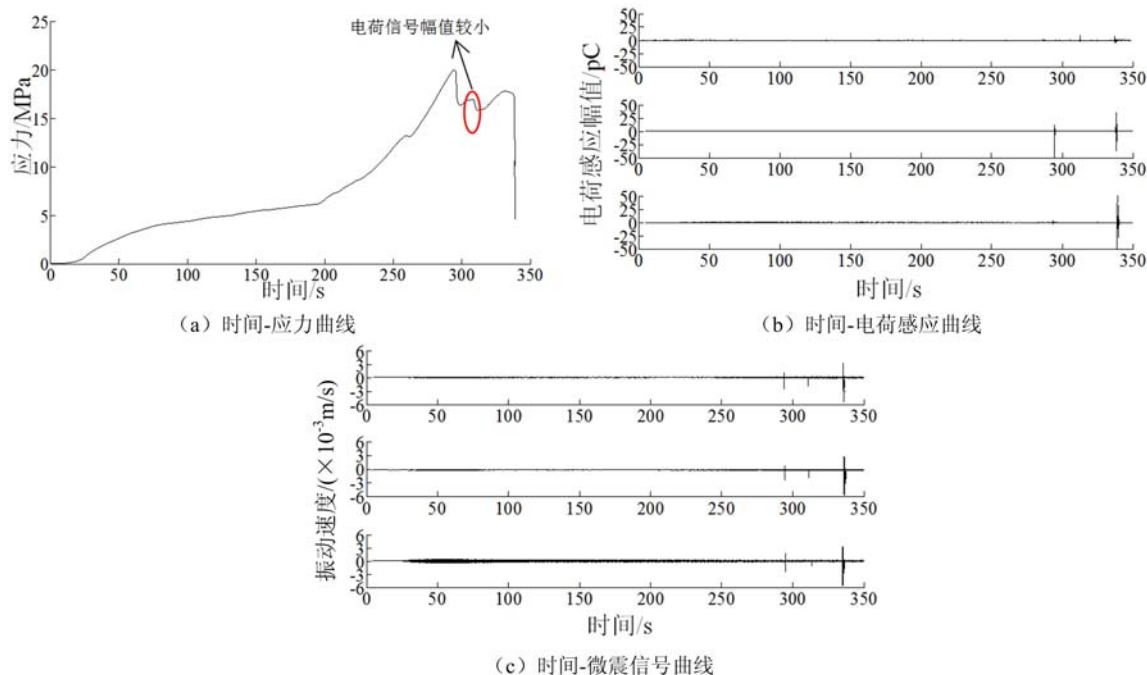


图 7 浸水 24h 砂岩 B9 变形破坏过程电荷感应和微震信号

Fig. 7 Charge induction and microseismic signals of the deformation and failure process of sandstone B9 soaked in water for 24h

化明显,承载结构面先局部破坏后整体失稳,在有较小的应力降时,例如 110.8s(74% σ_c)处应力降为 1.2 MPa,没有电荷感应和微震信号产生,在 142s(68% σ_c)、150.1s(57% σ_c)处应力降分别为 2.5MPa、0.7MPa,没有电荷感应和微震信号产生;而在有 3 次较大的应力降(应力降都超过了 5MPa)和试件失稳时,电荷感应和微震信号同步产生,且信号幅值都较高,这说明应力降对信号的产生有较大影响。

图 9 为天然煤样 A3 变形破坏过程电荷感应和微震信号,图 10 为浸水 24h 煤样 A9 变形破坏过程电荷感应和微震信号,图 11 为饱和煤样 A11 变形破坏过程电荷感应和微震信号,图 9~11 中(b)为时间-电荷感应曲线,图中上中下曲线分别为通道 1、2 和 3 接收到的电荷感应信号,图 9~11 中(c)为时间-

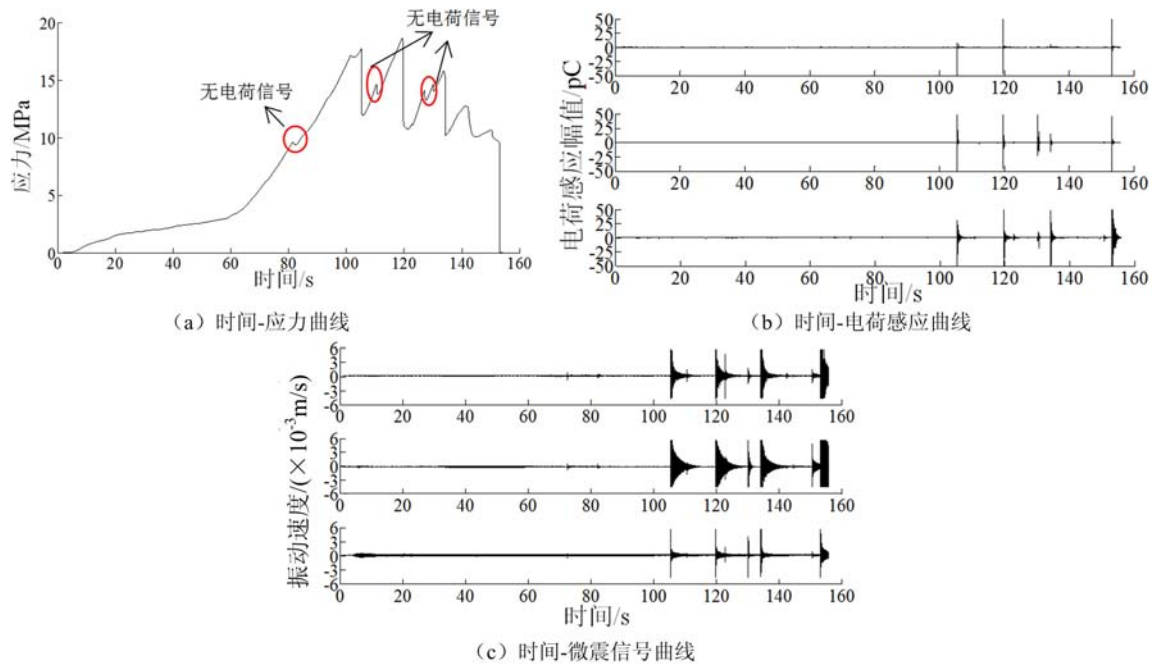


图 8 饱和砂岩 B12 变形破坏过程电荷感应和微震信号

Fig. 8 Charge induction and microseismic signals of the deformation and failure process of saturated sandstone B12
微震信号曲线,图中上中下曲线分别为通道 5、6 和 7 接收到的微震信号。

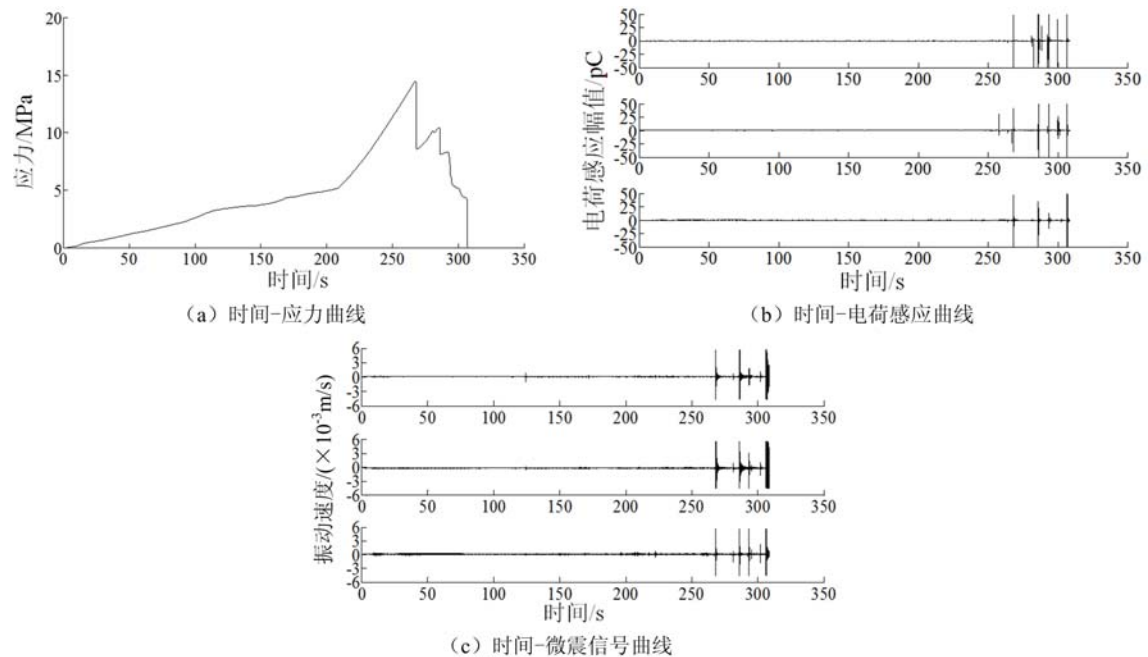


图 9 天然煤样 A3 变形破坏过程电荷感应和微震信号

Fig. 9 Charge induction and microseismic signals of the deformation and failure process of raw coal A3

由图 9~11 可知,天然煤样在变形破裂过程中有较小的应力降时,产生的电荷感应和微震信号幅值都较大,而随着含水率的增大,浸水 24h 煤样和饱和煤样在变形破裂过程中只有较大的应力降时产生的电荷感应和微震信号幅值较大,在较小的应力降时产生的电荷感应和微震信号幅值都较小,这是由于水对煤样的软化作用,降低了煤样的冲击倾向性,减少了变形破裂过程中产生的电荷感应和微震信号事件数,同时也降低了变形破裂过程产生的电荷感应和微震信号幅值。

由煤样与砂岩试样变形破裂过程的电荷感应和微震信号对比可知,煤样与砂岩在峰前阶段有相似的规律,电荷感应与微震信号事件数较少,且信号的幅值很小;试件达到峰值应力后产生应力降时电荷

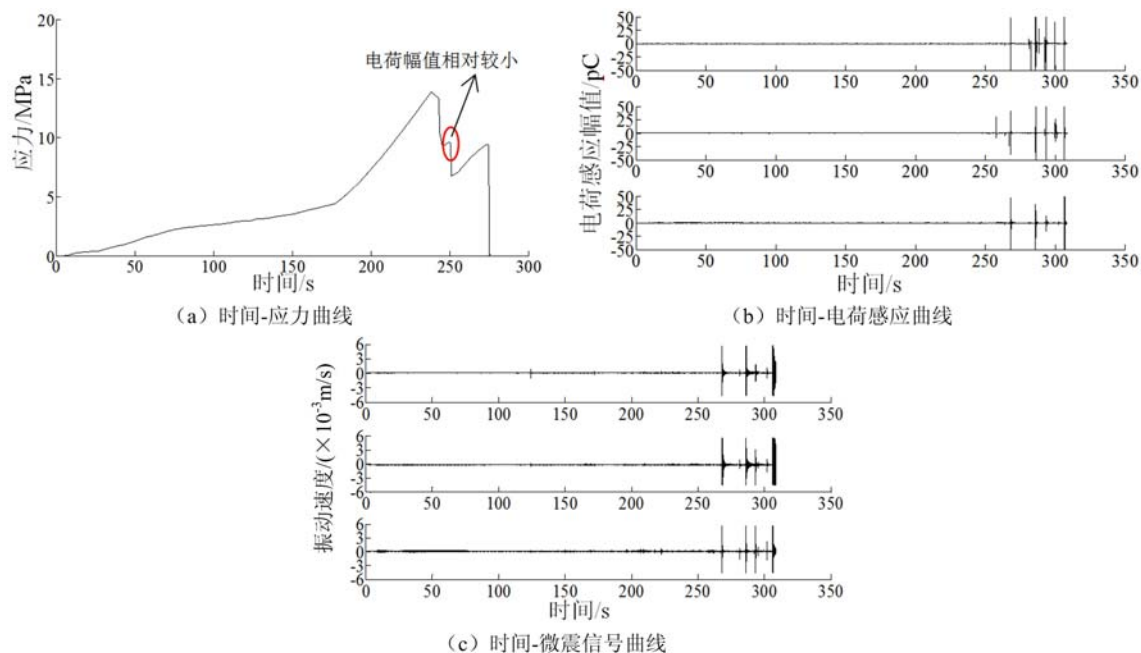


图 10 浸水 24h 煤样 A9 变形破坏过程电荷感应和微震信号

Fig. 10 Charge induction and microseismic signals of the deformation and failure process of coal A9 soaked in water for 24h

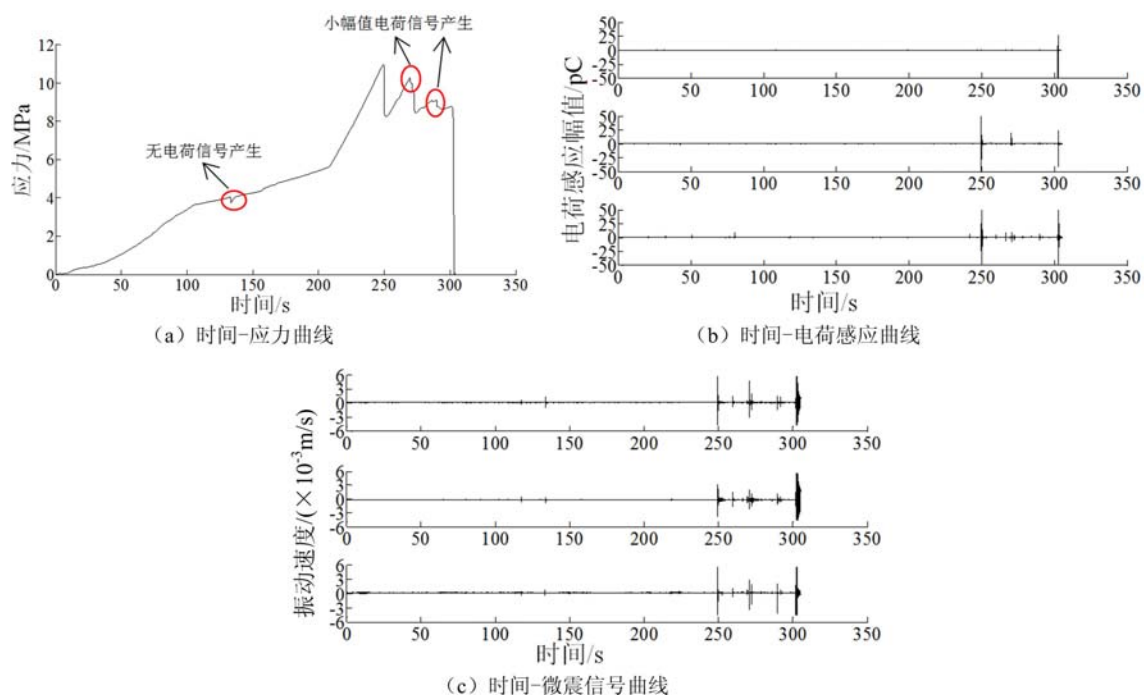


图 11 饱和煤样 A11 变形破坏过程电荷感应和微震信号

Fig. 11 Charge induction and microseismic signals of the deformation and failure process of saturated coal samples A11 感应和微震信号同时出现,且信号的幅值也较大;在峰后阶段煤样的电荷感应与微震信号事件数多于砂岩试件,其原因是煤样破裂程度更大,裂隙面的摩擦的概率更大。

含水率对煤样变形破裂过程电荷与微震信号的影响和砂岩不同,随着含水率的增大,煤样变形破裂过程中产生的电荷感应和微震信号事件数都减小,信号强度也降低,而砂岩变形破裂过程中产生的电荷感应和微震信号事件数却增多,信号强度也增强。该结论与文[7]和文[13]相同,文[7]认为含水率越高,砂岩越易在较低的应力下产生大量的电荷感应信号,文[13]认为饱和和含水煤与自然干燥煤相比,变

形破裂过程产生的微震信号事件数少、微震信号强度低。水减弱煤样内部颗粒之间的摩擦作用,减小分子之间的黏合力,促进了微孔裂隙的增长与发育,水对感应电荷的传递有一定影响,同时水能够降低裂隙面摩擦错动释放的弹性能,削弱微震信号。同样,水在不同程度上改变了砂岩的物理力学特征及其变形破坏特征;由于砂岩比煤的孔隙小,分布也更为均匀,含水率的增加使砂岩的孔隙率增大,砂岩内部的裂隙增多,增强了颗粒之间的摩擦作用,促进了微裂纹的发展;摩擦和微裂纹的发展是电荷感应信号产生的原因,微裂纹发展释放的弹性能是微震信号产生的原因,因此含水率增加砂岩变形破裂过程中产生的电荷感应和微震信号事件数增多。

煤层注水后有效降低了矿井的冲击危险性,由于水的影响,煤层变形破裂过程产生的电荷感应和微震信号变弱;底板突水时增加了矿井的冲击危险性,由于水的影响,底板变形破裂过程产生的电荷感应和微震信号增强。因此当对矿井开采过程进行电荷感应和微震信号监测时,若电荷感应和微震信号都增大说明矿井的冲击危险性增强。

2.3 不同含水率煤样微震和电荷感应信号能量分析

实际监测得到的信号为不平稳随机信号,均方值可以表示随机信号的强度,反映了信号离开均值的平均波动情况。本文均方值 φ_x 表示为

$$\varphi_x = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n^2$$

式中: x 为信号, N 为计算周期。

图 12 为不同含水率煤样微震与电荷信号均方值图。利用不同含水率煤样微震 6 号通道与电荷 2 号通道数据做均方值分析,由图 12(a)可知天然煤样最大微震信号均方值为 2.4×10^{-5} ,最大电荷感应信号均方值为 892;由图 12(b)可知浸水 24h 煤样最大微震信号均方值为 2.3×10^{-5} ,最大电荷感应信号均方值为 825;由图 12(c)可知饱和煤样最大微震信号均方值为 2.1×10^{-5} ,最大电荷感应信号均方值为 537。与饱和煤样有较高能量的电荷感应和微震信号事件数相比,天然煤样的信号事件数显然更多,能量也更大。

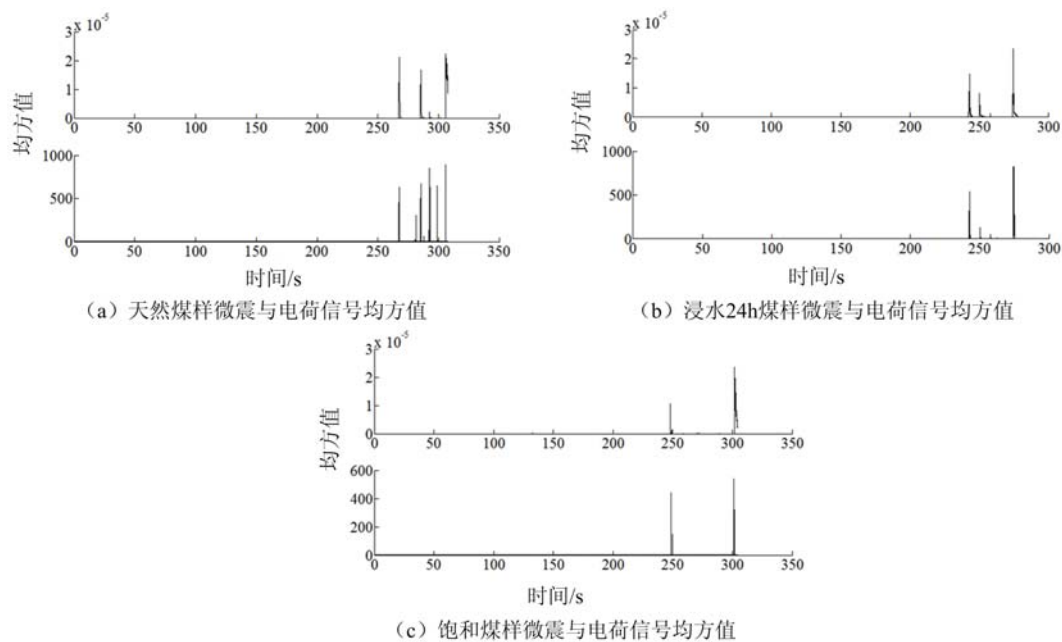


图 12 不同含水率煤样微震与电荷信号均方值

Fig. 12 The microseismic and charge signal mean square value of different water contents coal samples

3 结 论

(1) 煤岩随着含水率的增大,峰值应力减小,应变增大,试件的峰后软化阶段逐渐明显,试件由突然失稳破坏向多次渐进破坏转变。经过浸泡饱和后,煤样和砂岩的含水率相比,煤样的含水率增加的更大,煤样的峰值应力比砂岩的峰值应力降低得少,分别降低了 21.8%和 31.1%,在含水率上水对煤样的影响比砂岩更大,在试样强度上水对煤样的影响比砂岩小。

(2) 不同含水率煤岩变形破裂过程都能产生电荷感应和微震信号,水对煤岩变形破裂过程电荷与微震信号的影响和砂岩不同;随着含水率的增大,煤岩变形破裂过程中产生的电荷感应和微震信号事件数都减小,信号强度都降低,电荷感应与微震信号均方值幅值减小;随着含水率的增大,砂岩变形破裂过程中产生的电荷感应和微震信号事件数却增多,信号强度也增强。煤岩变形破裂过程产生的电荷感应信号受水的影响大于微震信号。

参考文献:

- [1] 赵扬锋,潘一山,李国臻,等. 岩石变形破裂过程中电荷感应信号的检测[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(3): 252—256 (ZHAO Yangfeng, PAN Yishan, LI Guozhen, et al. Measuring of the charge-induced signal of rock during the deformation and fracture process[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(3):252—256 (in Chinese))
- [2] 赵扬锋,潘一山,刘玉春,等. 单轴压缩条件下煤样电荷感应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 306—312 (ZHAO Yangfeng, PAN Yishan, LIU yuchun, et al. Experimental study of charge induction of coal samples under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2):306—312 (in Chinese))
- [3] 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 predicting rock burst and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2):3988—3993 (in Chinese))
- [4] 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—34 (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—34 (in Chinese))
- [5] 罗浩,潘一山,李忠华,等. 含水煤体失稳破坏电荷感应规律试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 37(2):36—41 (LUO Hao, PAN Yishan, LI Zhonghua, et al. Experimental study on charge induction law during instability[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(1):36—41 (in Chinese))
- [6] 郑文红,陈广阳,罗浩,等. 矿井底板突水过程电荷感应规律试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(10): 105—110 (ZHENG Wenhong, CHEN Guangyang, LUO Hao, et al. Experimental study on charge induction law of water inrush in mine floor[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(10):105—110 (in Chinese))
- [7] 郑文红,施天威,潘一山,等. 含水率对岩石电荷感应信号影响规律研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(3):659—668 (ZHENG Wenhong, SHI Tianwei, PAN Yishan, et al. Effects of water content on the charge induced signal of rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(3):659—668 (in Chinese))
- [8] 王岗,潘一山,肖晓春. 电荷感应法检测煤层注水防冲效果研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2):311—319 (WANG Gang, PAN Yishan, XIAO Xiaochun. Detection of effects of rock burst prevention by water injection into coal seam using charge induction method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2):311—319 (in Chinese))
- [9] 许晓阳,王恩元,许福乐,等. 煤岩单轴压缩条件下微震频谱特征研究[J]. 应用声学, 2010, 29(2):148—153 (XU Xiaoyang, WANG Enyuan, XU Fule, et al. Micro-seismic frequency spectrum of coal rock under uniaxial compression[J]. Applied Acoustics, 2010, 29(2):148—153 (in Chinese))
- [10] 王晓南,陆菜平,薛俊华,等. 煤岩组合体冲击破坏的声发射及微震效应规律试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9):2569—2575 (WANG Xiaonan, LU Caiping, XUE Junhua, et al. Experimental research on rules of acoustic emission and micro seismic effects of burst failure of compound coal-rock samples [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9):2569—2575 (in Chinese))

- [11] 李成武, 孙晓元, 高天宝, 等. 煤岩体振动破坏试验及微震信号特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8):1834—1844 (LI Chengwu, SUN Xiaoyuan, GAO Tianbao, et al. Coal and rock vibration failure and the characteristics of micro-seismic signals[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8):1834—1844 (in Chinese))
- [12] 朱权洁, 李青松, 李绍泉, 等. 煤与瓦斯突出试验的微震动态响应与特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2):3813—3821 (ZHU Quanjie, LI Qingsong, LI Shaoquan, et al. Microseismic dynamic response and characteristic analysis of coal and gas outburst experiment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2):3813—3821 (in Chinese))
- [13] 刘玉春, 赵扬锋, 张超, 等. 含水煤岩单轴压缩微震信号特征试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(2):51—55 (LIU Yuchun, ZHAO Yangfeng, ZHANG Chao, et al. Experimental research on microseismic signal characteristics of moisture-containing coal and rock in uniaxial compression[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(2):51—55 (in Chinese))
- [14] 来兴平, 张帅, 崔峰, 等. 含水承载煤岩损伤演化过程能量释放规律及关键孕灾声发射信号拾取[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3):433—444 (LAI Xingping, ZHANG Shuai, CUI Feng, et al. Energy release law during the damage evolution of water-bearing coal and rock and pick-up of AE signals of key pregnancy disasters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3):433—444 (in Chinese))
- [15] 唐巨鹏, 齐桐, 代树红, 等. 基于声发射能量分析的周期注水应力改造下煤系页岩裂缝扩展规律试验研究[J]. 实验力学, 2020, 35(4):639—649 (TANG Jupeng, QI Tong, DAI Shuhong, et al. Experimental study on crack propagation of coal shale under stress transformation of cyclic water injection based on acoustic emission energy [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(4):639—649 (in Chinese))
- [16] 赵扬锋, 刘力强, 潘一山, 等. 岩石变形破裂微震、电荷感应、自电位和声发射实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1):107—123 (ZHAO Yangfeng, LIU Liqiang, PAN Yishan, et al. Experiment study on microseismic, charge induction, self-potential and acoustic emission during fracture process of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1):107—123 (in Chinese))
- [17] 赵扬锋, 刘力强, 潘一山. 单轴压缩下含断层带花岗岩声发射、微震和电荷感应试验[J]. 地震地质, 2017, 39(5):964—980 (ZHAO Yangfeng, LIU Liqiang, PAN Yishan. Experiment study on acoustic emission, microseism and charge induction during fracture process of granite with fault zone under uniaxial compression[J]. Seismology and Geology, 2017, 39(5):964—980 (in Chinese))
- [18] 赵扬锋, 刘力强, 张寅. 三点弯曲脆性岩石试样的微震和电荷感应信号变化规律[J]. 实验力学, 2018, 33(6):929—937 (ZHAO Yangfeng, LIU Liqiang, ZHANG Yin. On the variation of microseismic and charge-induction signals of brittle rock specimens in three-point bending experiment [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(6):929—937 (in Chinese))
- [19] 赵扬锋, 李兵, 张超, 等. 不同组合比例煤岩的电荷感应与微震规律试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(1):107—112 (ZHAO Yangfeng, LI Bing, ZHANG Chao, et al. Experimental study on charge induction and microseismic laws of coal and rock with different combination ratios[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(1):107—112 (in Chinese))
- [20] 赵扬锋, 程传杰, 刘玉春, 等. 不同类型岩石加载破坏的微震和电荷感应信号特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5):199—203 (ZHAO Yangfeng, CHENG Chuanjie, LIU Yuchun, et al. Study on microseismic and charge induction signal characteristics of different types of rock loading failure [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019, 30(5):199—203 (in Chinese))
- [21] 赵扬锋, 荆刚, 程传杰, 等. 含裂隙砂岩破裂特征及微震和电荷感应信号规律试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(23):211—219 (ZHAO Yangfeng, JING Gang, CHENG Chuanjie, et al. Tests for fracture characteristics of fractured sandstone and micro-seismic and charge induced signal laws[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(23):211—219 (in Chinese))
- [22] 赵扬锋, 荆刚, 樊艺, 等. 断层黏滑失稳过程微震与电荷信号时频特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7):1385—1395 (ZHAO Yangfeng, JING Gang, FAN Yi, et al. Experimental study on the microseism and charge signal time-frequency characteristics in the process of fault stick-slip instability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(7):1385—1395 (in Chinese))

Charge induction and microseismic signal characteristics of the deformation and fracture process of moisture-containing coal and rock

LIU Yuchun^{1,3}, PAN Yishan^{1,4}, ZHAO Yangfeng^{1,2}, LI Bing¹

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 2. Liaoning Key Laboratory of Mine Subsidence Disaster Prevention and Control, Fuxin 123000, Liaoning, China; 3. College of Science, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 4. Institute of Disaster Rock Mechanics, Liaoning University, Shenyang 110036, Liaoning, China)

Abstract: In order to monitor the effect of coal seam water injection on weakening coal seam burst tendency and the increase of mine impact risk by floor water inrush, the charge induction and microseismic synchronous comprehensive monitoring system is built. The uniaxial compression tests of the different moisture-containing coal and rock were conducted, the coal and rock samples were from the coal and sandstone of the Pingdingshan coal mine. The charge induction and microseismic signal characteristics of the deformation and fracture process of the different moisture-containing coal and rock were studied. The experimental results show that, with the increase of coal and rock moisture content, the peak stress of coal and rock decreases and burst tendency increases. After soaking and saturation of coal and rock, the water content of the coal sample increases more than that of sandstone. The peak stress of the coal sample decreases less than that of sandstone, by 21.8% and 31.1% respectively. Charge induction and microseismic signals are generated in the deformation and fracture process of the different moisture content coal and rock. With the increase of the coal moisture content, the event number and signal mean square amplitude of charge induction and microseismic signals in the deformation and fracture process of coal decrease, and the signal strength also decreases. With the increase of the sandstone moisture content, the event number of charge induction and microseismic signals in the deformation and fracture process increases, and the signal strength also increases. The influence of water on the charge induced signal produced in the deformation and fracture process of coal and rock is greater than that of the microseismic signal. After the coal seam is injected with water, the burst risk of the mine is effectively reduced, and the charge induction and microseismic signal generated in the process of coal seam deformation and fracture become weak. The floor water-inrush risk increases the burst risk of the mine, and the charge induction and microseismic signals generated in the deformation and fracture process of the floor are enhanced.

Keywords: rock mechanics; moisture-containing coal and rock; charge induction; microseismic; signal characteristics