



全国煤矿冲击地压防治学术会议

煤岩失稳破坏电荷感应规律再认识 与井下监测实践

汇报人：吕进国 副教授

辽宁工程技术大学

2020/12/04





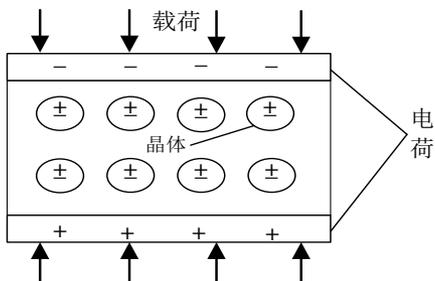
汇报内容

- 一、煤岩电荷感应机理
- 二、感应电荷强度与应力相关性
- 三、煤岩感应电荷时频规律
- 四、井下监测试验

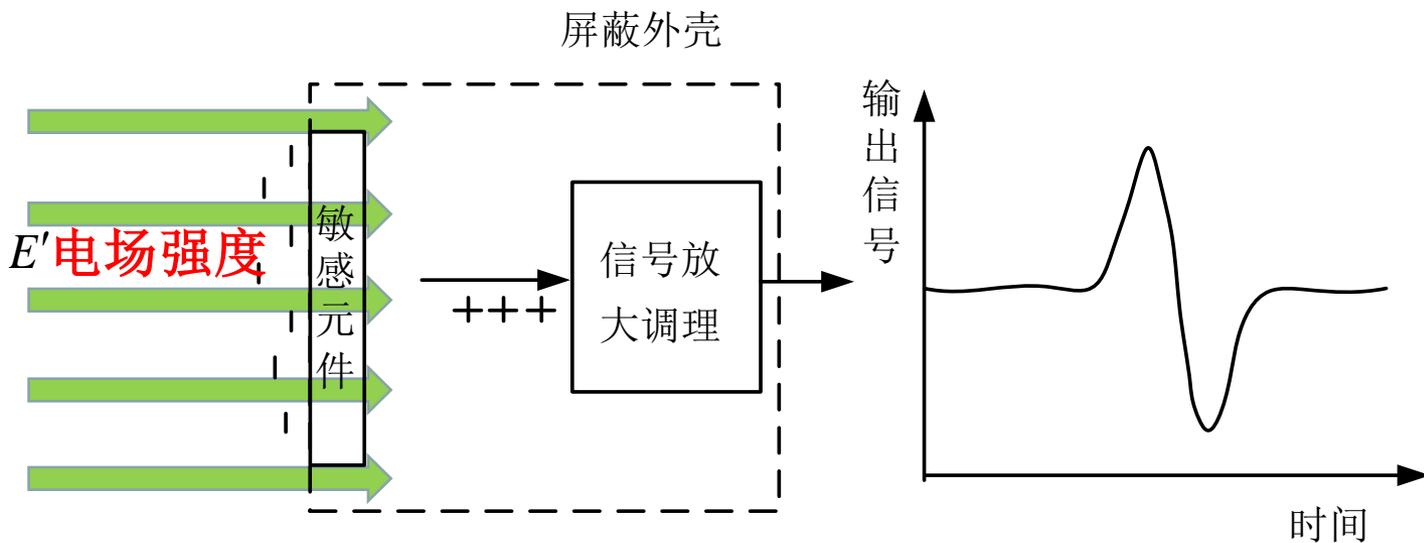
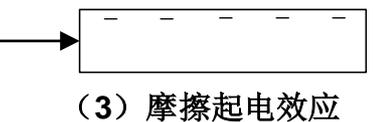
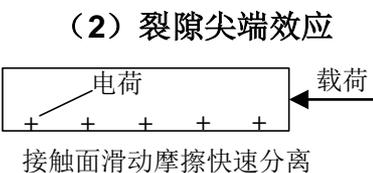
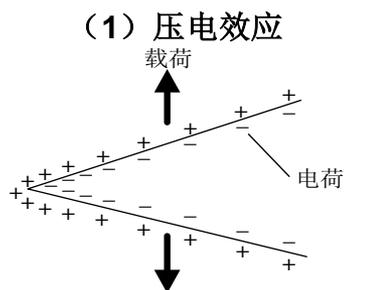


一、煤岩电荷感应机理

通常认为：在煤岩受载过程中，当发生压电效应、裂隙尖端效应与剪切摩擦效应时，将会产生自由电荷，其运动变化会引起煤岩周围电场的变化，与此同时传感器敏感元件周围电场也会相应发生变化，进而导致传感器敏感元件上感应电荷量发生变化。



感应电荷的变化反应了煤岩内部应力状态与变形破坏程度，因此通过监测煤岩感应电荷信号的变化情况，就可以为冲击地压等煤矿动力灾害提供新的预警方法。



感应电荷产生机理与监测原理示意图

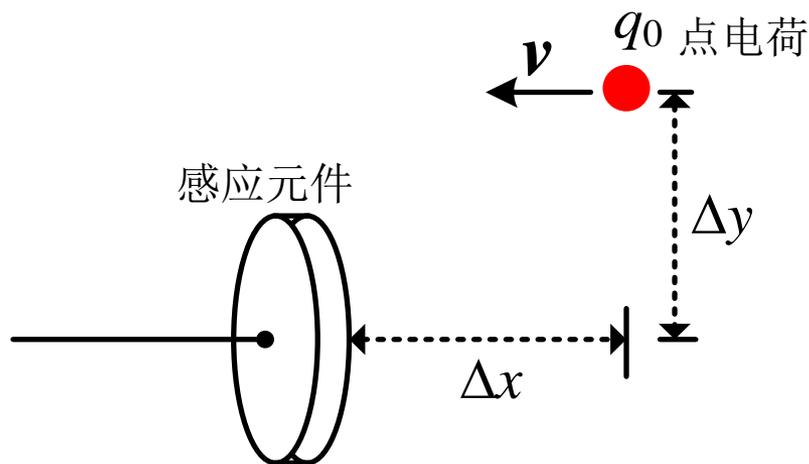
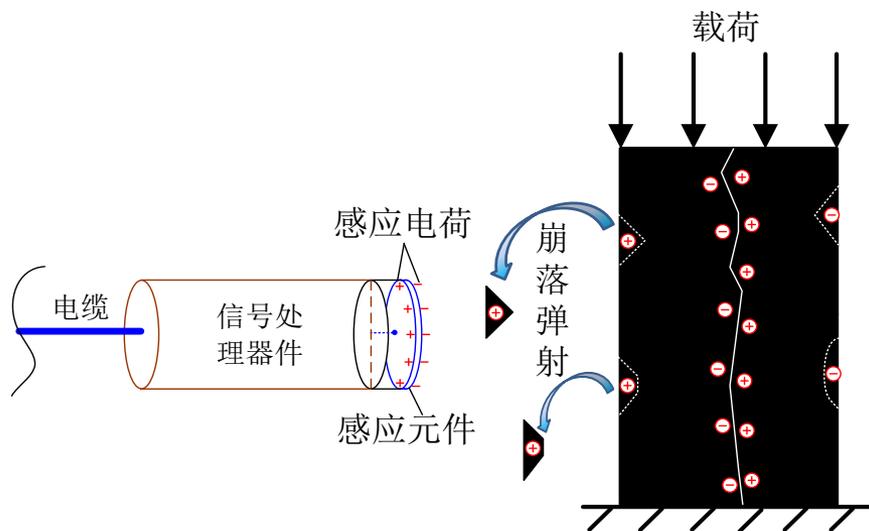
◆ 感应电荷产生的第四种形式

弹射的煤屑和颗粒等带电体，随着不断靠近感应元件，监测到的电荷感应强度不断增大，当弹射的带电体接触到感应元件时，将变成电荷的直接传导，此种情况采集到的电荷量最高。

假设某煤屑或颗粒带电量为 q_0 ，以初始速度 v 靠近感应元件，且与感应元件中心的水平距离为 Δx ，竖向距离为 Δy ，敏感元件面积为 S_1 ，则感应电荷量 q_1 为：

$$q_1 = \frac{q_0 S_1}{4\pi \left[(\Delta x - vt)^2 + \Delta y^2 \right]}$$

煤屑或颗粒的速度越大，感应元件表面的感应电荷量越高，也就是说带电体动能越大，则监测到的感应电荷量越高。





汇报内容

- 一、煤岩电荷感应机理
- 二、感应电荷强度与应力相关性
- 三、煤岩感应电荷时频规律
- 四、井下监测试验



二、煤岩感应电荷强度与应力相关性

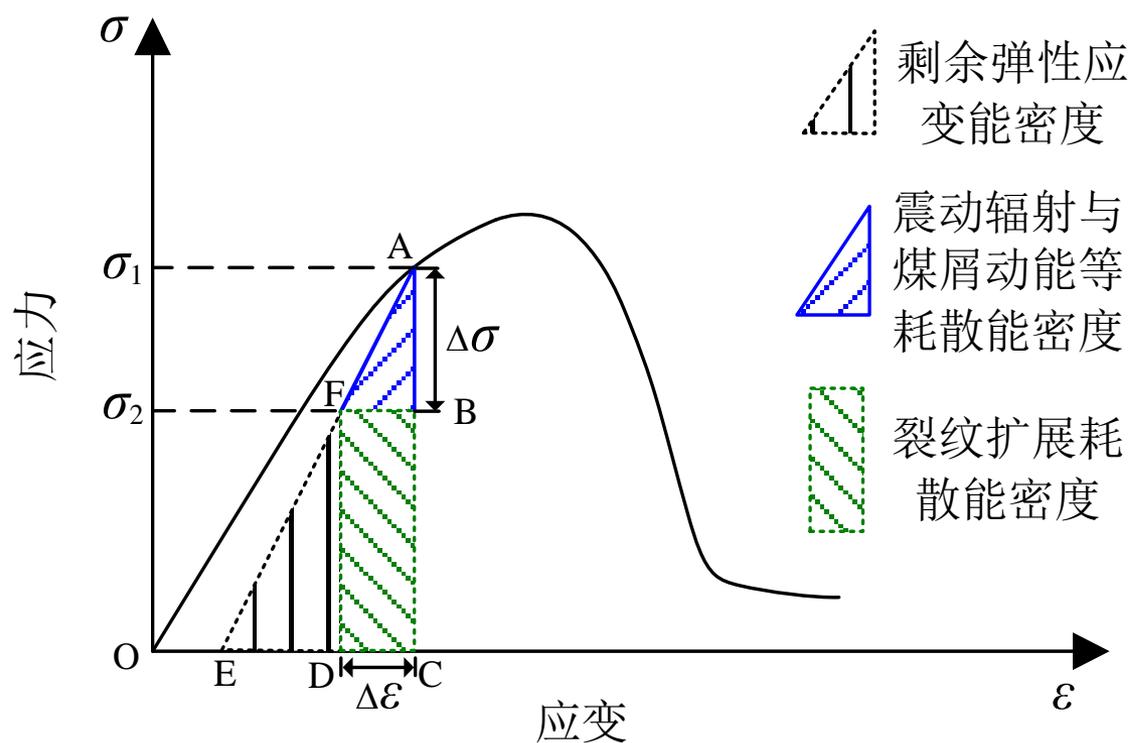
◆ 应力降过程能量转化关系

面积 S_{EFD} 表示存贮的剩余弹性应变能密度；

面积 S_{FAB} 表示震动辐射能与煤屑动能等耗散能密度，记作 U_1 ；

面积 S_{FDCB} 表示裂隙裂纹扩展耗散能密度，记作 U_2 ；

总耗散能密度等于面积 S_{FAB} 与面积 S_{FDCB} 之和，记作 U_0



$$U_0 = U_1 + U_2 = 0.5(\sigma_1 + \sigma_2)\Delta\varepsilon$$

$$U_1 = \frac{1}{2}\Delta\sigma\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma^2}{2E}$$

$$U_2 = \sigma_2\Delta\varepsilon = \frac{(\sigma_1 - \Delta\sigma)\Delta\sigma}{E}$$

σ_1 —应力降起点时的应力

σ_2 —应力降终点时的应力

$\Delta\sigma$ —应力降幅值

$\Delta\varepsilon$ —应变降幅值

E —弹性模量



二、煤岩感应电荷强度与应力相关性

◆煤岩电荷感应强度与应力量化关系

煤岩耗散能与煤岩破坏程度呈正相关，煤岩破坏程度与电场能量呈正相关，因此煤岩耗散能与电场能量呈正相关。

匀强电场能量密度为： $W_e = \frac{1}{2} \varepsilon' E'^2$

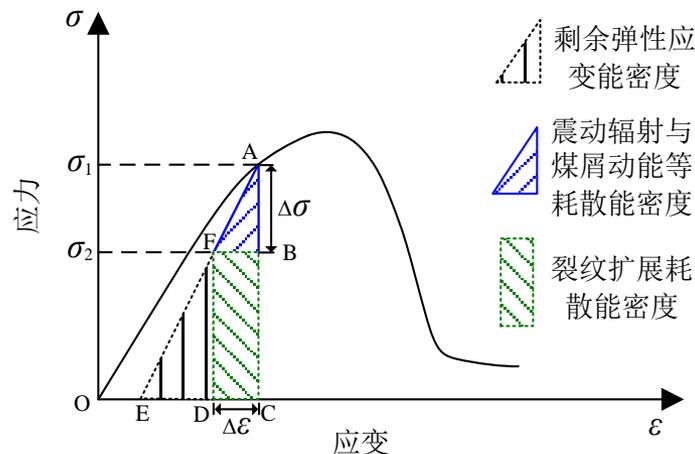
假设煤岩总耗能密度与电场能量密度呈正比关系

$$U_0 = \frac{2\sigma_1 \Delta\sigma - \Delta\sigma^2}{2E} = kW_e = k'E'^2$$

当煤岩快速失稳破坏时，将会产生大幅度的应力降，可将上式简化为：

$$U_0 = \frac{\Delta\sigma^2}{2E} = k'E'^2 \quad \longrightarrow \quad E' = k'' \Delta\sigma$$

ε' --介电常数； E' --电场强度； k, k', k'' --比例常数。



- 煤岩稳定破坏阶段，应力降较小，电荷感应强度主要取决于煤岩应力状态；
- 煤岩非稳定破坏阶段，应力降较大，电荷感应强度主要取决于煤岩应力降。

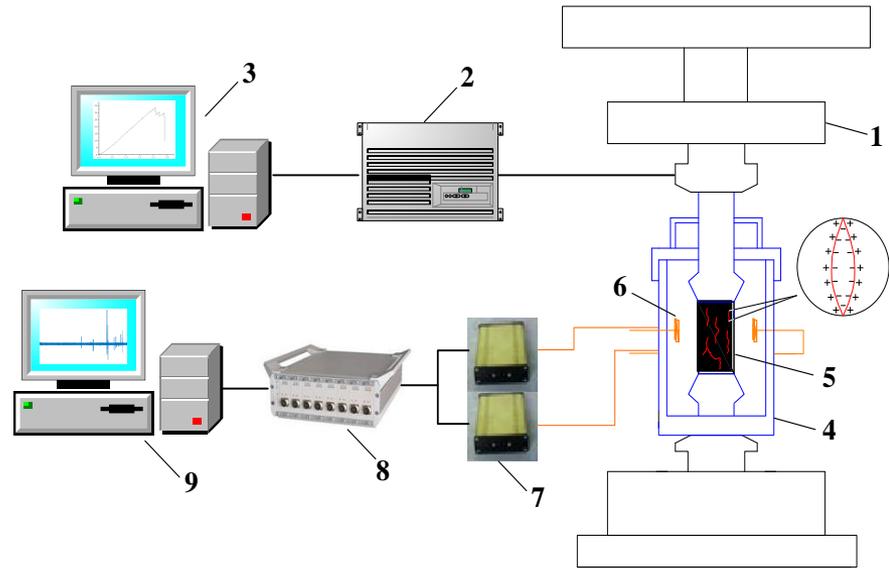


汇报内容

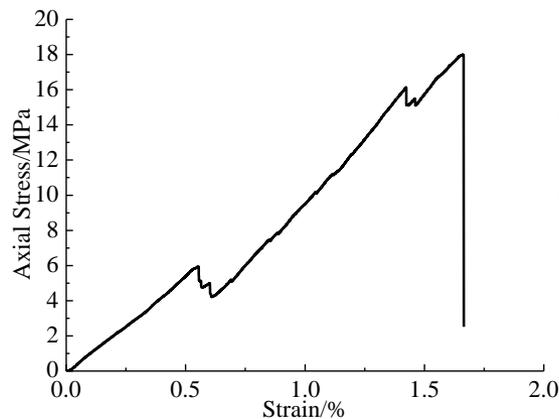
- 一、煤岩电荷感应机理
- 二、感应电荷强度与应力相关性
- 三、煤岩感应电荷时频规律
- 四、井下监测试验

◆煤岩电荷感应实验

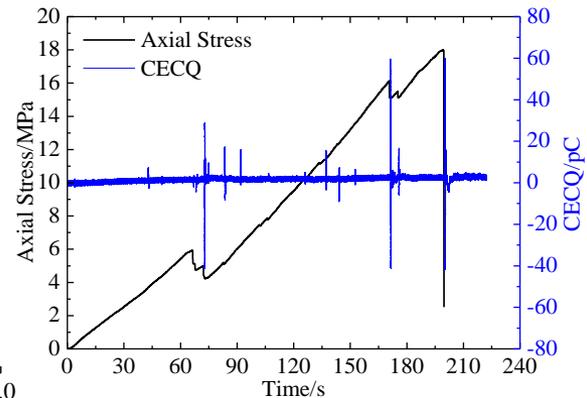
制作标准的实验试件，其尺寸为 $\Phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ ，将试件放入屏蔽缸体，采用位移加载控制，利用MTS岩石力学测试系统对煤体进行单轴压缩破坏实验。利用电荷采集系统监测煤体压缩过程中的电荷感应信号，该系统主要是由电荷感应元件（合金薄片）、屏蔽外界干扰信号的缸体、电荷前置放大器、信号高频采集仪及计算机组成。



1-MTS压机；2-力学参数采集系统；3-压力机操控与数显终端；4-屏蔽缸体；5-煤体试件；6-电荷感应敏感元件；7-电荷放大器；8-电荷采集系统；9-电荷采集控制与显示终端



(a) 应力-应变



(b) 轴向应力-时间-电荷信号

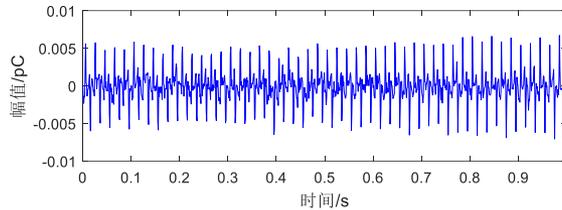


三、煤岩电荷感应时频规律

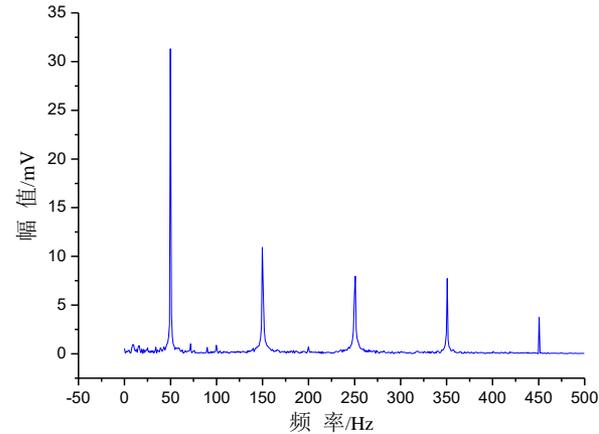
◆煤岩电荷感应信号频率特征

(1) 感应电荷采样频率为1KHz时，实验室环境下干扰信号频率为50Hz、150Hz、250Hz、350Hz与450Hz，一般为50Hz奇数倍。我国配电网的谐波频率为50Hz，一般而言奇次谐波干扰比较严重，因此，干扰信号频域分析与实际相符。

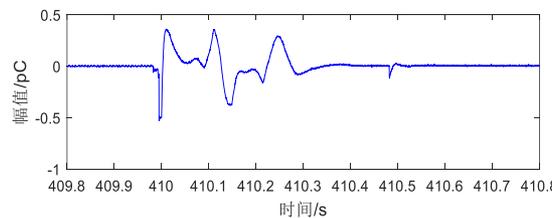
(2) 煤岩破裂的信号主频集中在15Hz~30Hz范围内，也就说感应电荷有效信号基本为低频信号。



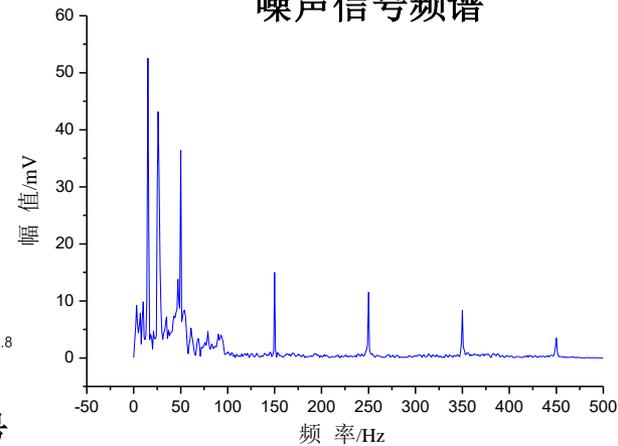
电荷噪声信号



噪声信号频谱



煤岩破坏与噪声混合电荷信号



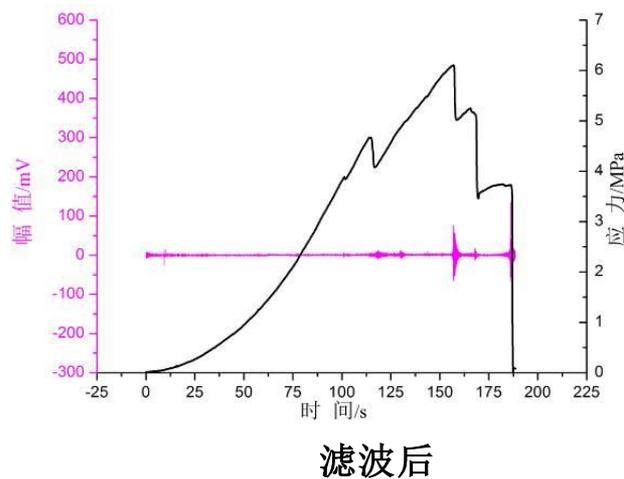
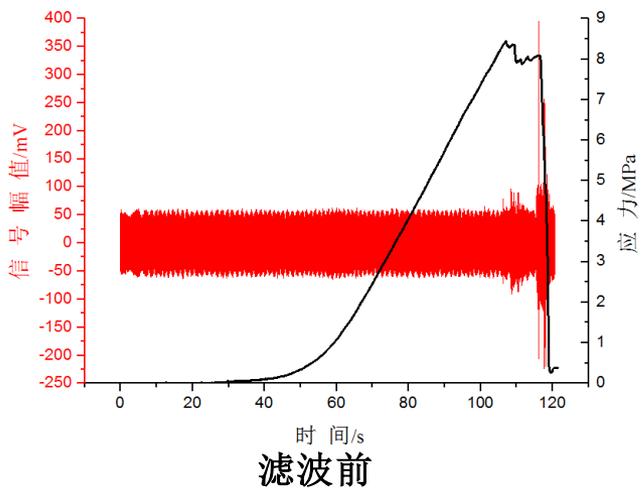
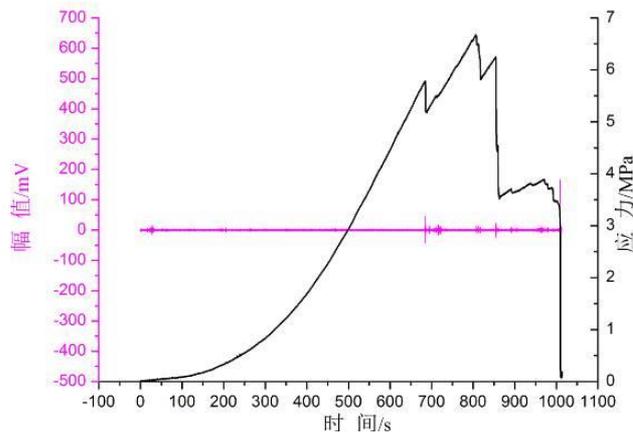
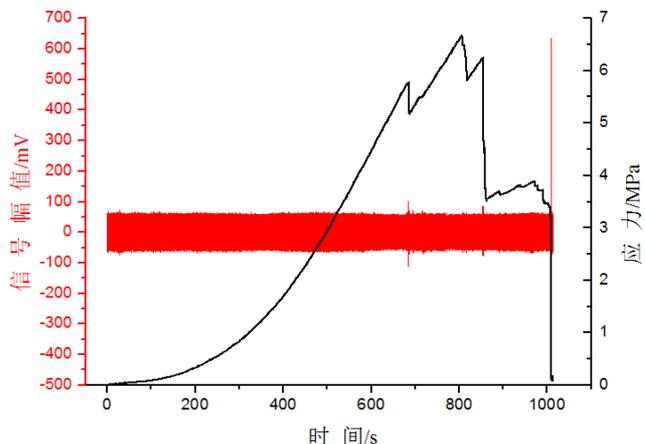
破坏与噪声混合电荷信号频谱



三、煤岩电荷感应时频规律

◆煤岩电荷感应信号滤波

设计低通滤波器，对原始感应电荷信号进行滤波，去掉高频的干扰信号，这里通带截止频率取28Hz，降噪后的感应电荷信号与应力-应变曲线呈现出更高的相关性。



滤波前

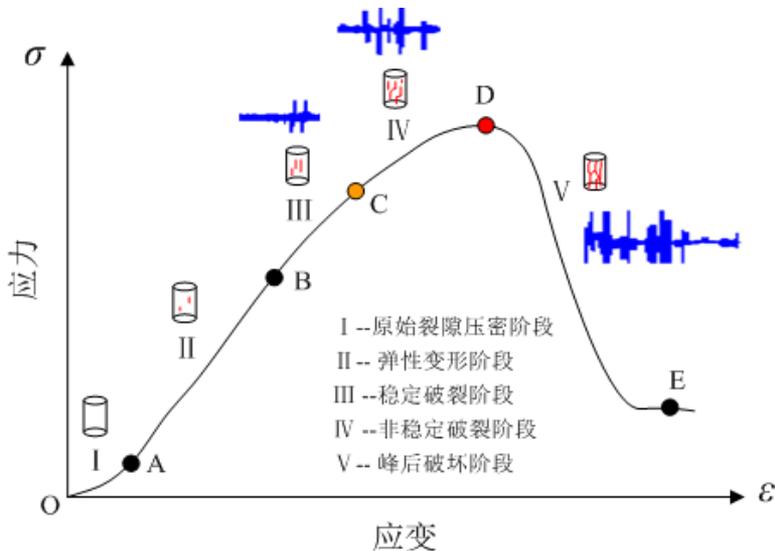
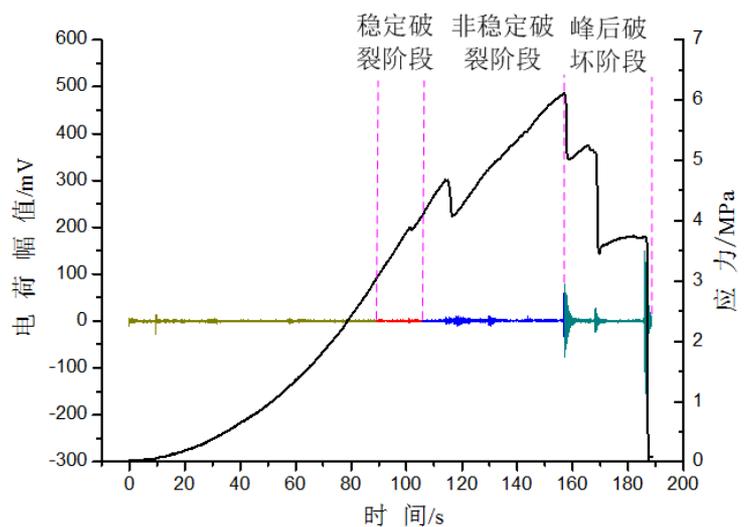
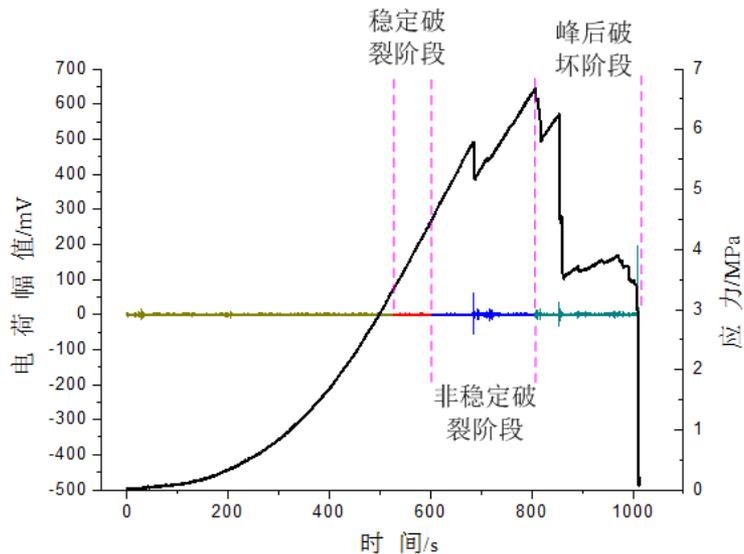
滤波后



三、煤岩电荷感应时频规律

◆煤岩失稳破坏电荷感应时域特征

- **稳定破裂阶段**，应力降不明显，存在低幅值感应电荷信号，波动性不强，但可观测辨识；
- **非稳定破裂阶段**，煤岩试件体积膨胀，裂纹加速扩展，出现较大的应力降，高幅值电荷感应信号连续显现，波动性较强；
- **峰后破裂阶段**，煤岩发生了主破坏，此阶段应力降程度与频数最高，高幅值电荷信号最为密集，平均幅值最大，信号波动最为剧烈。





三、煤岩电荷感应时频规律

◆煤岩失稳破坏电荷评价指标

□ 电荷累积量跃升特性

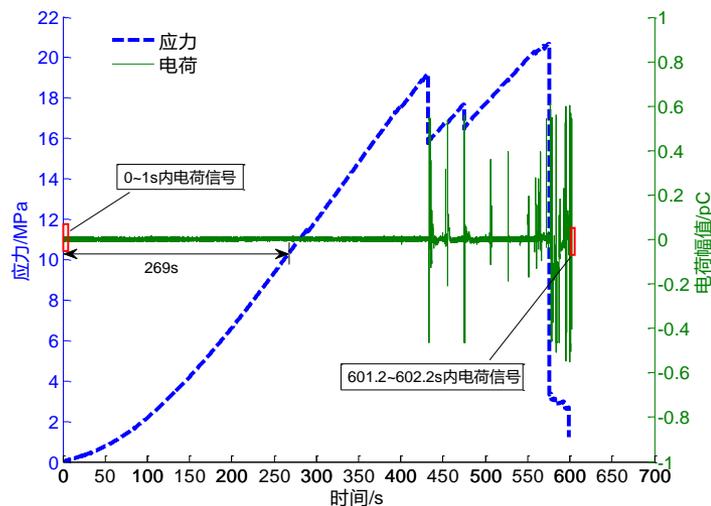
$$\text{累计量 } Q_m = \sum_{i=1}^m |q_i|$$

□ 电荷均值的高幅值特性

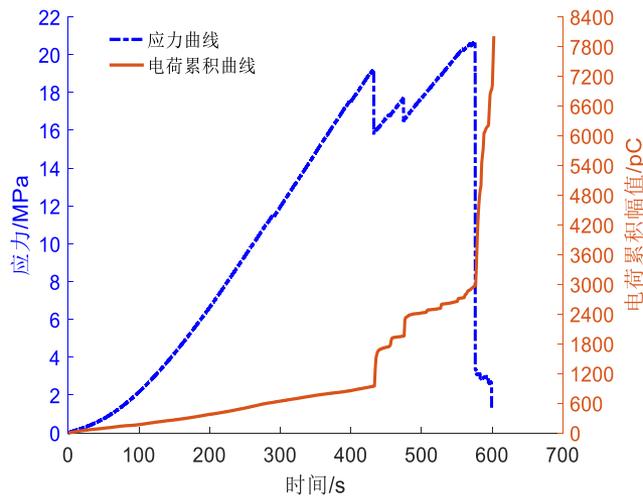
$$\text{滑动平均值 } E_m = \frac{Q_m}{k\Delta t}$$

□ 电荷幅值波动特性

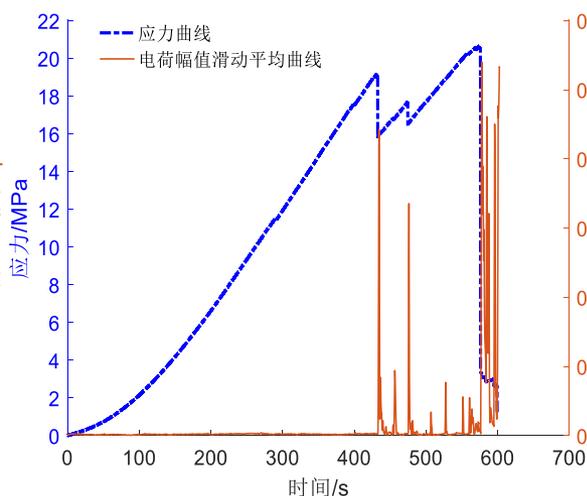
$$\text{滑动变异系数 } CV_m = \frac{\sigma}{\mu}$$



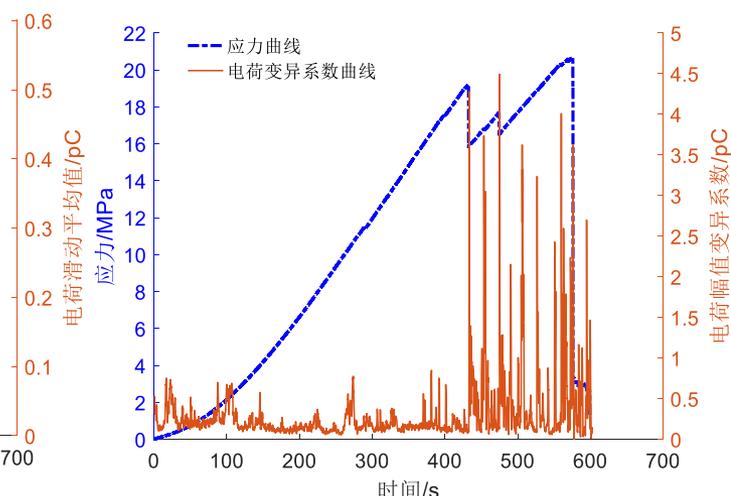
应力与电荷感应时程曲线



电荷累积量



电荷滑动平均值



电荷滑动变异系数



汇报内容

- 一、煤岩电荷感应机理
- 二、感应电荷强度与应力相关性
- 三、煤岩感应电荷时频规律
- 四、井下监测试验



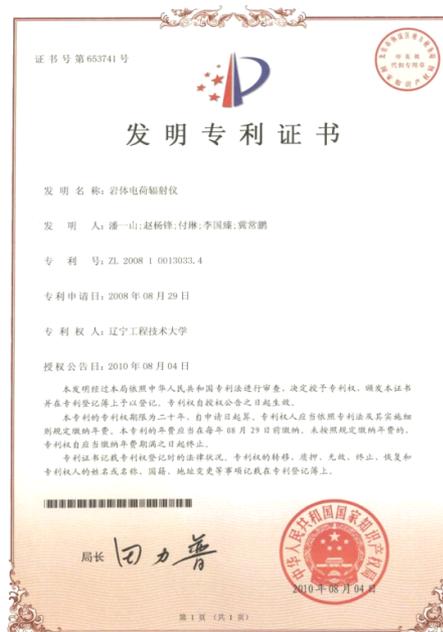
四、井下监测实践

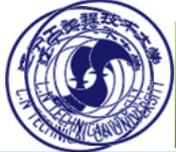
◆YCD5便携式煤岩电荷监测仪

- 7寸高清彩色触摸屏，具有实时显示监测数据曲线、查询历史曲线、数据存储、实时预警等功能；
- 实现1-4通道电荷信号采集，采样精度16位，连续运行8小时以上；
- 量程：±150pC，分辨率：0.1pC，采样频率：30kHz。



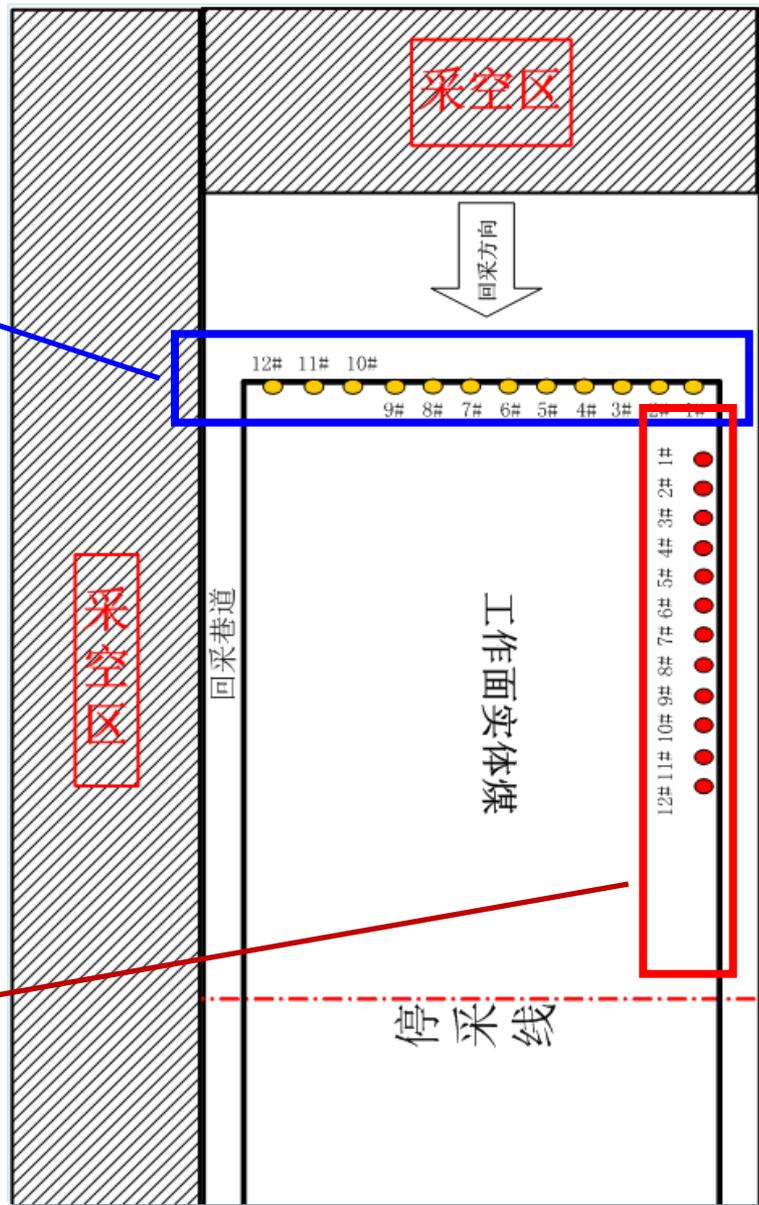
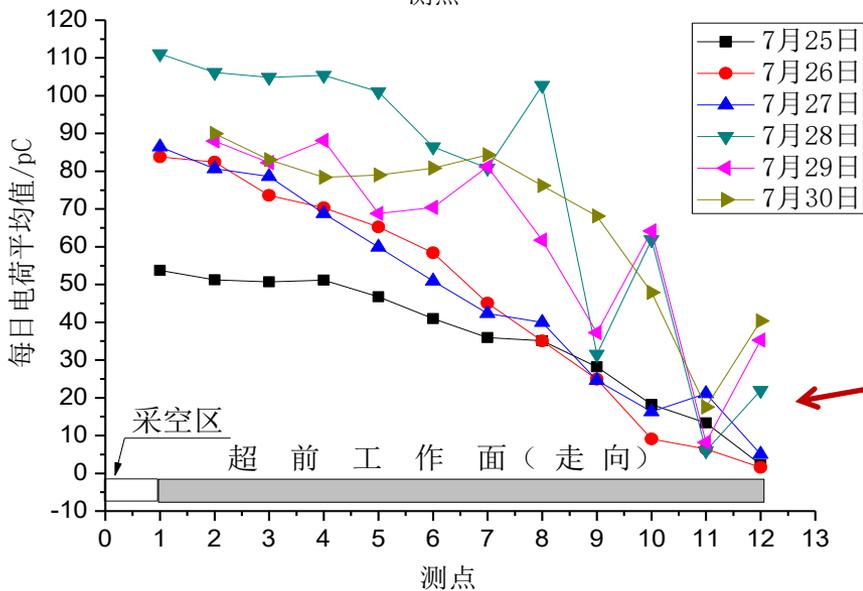
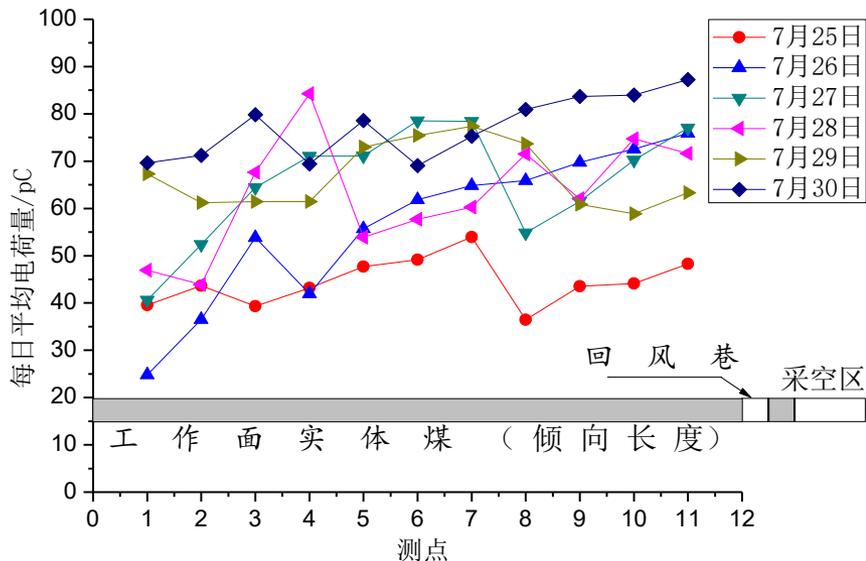
1一通道 2二通道 3三通道 4四通道 5数据传输接口 6充电接口 7电缆 8显示器 9感应电荷探头





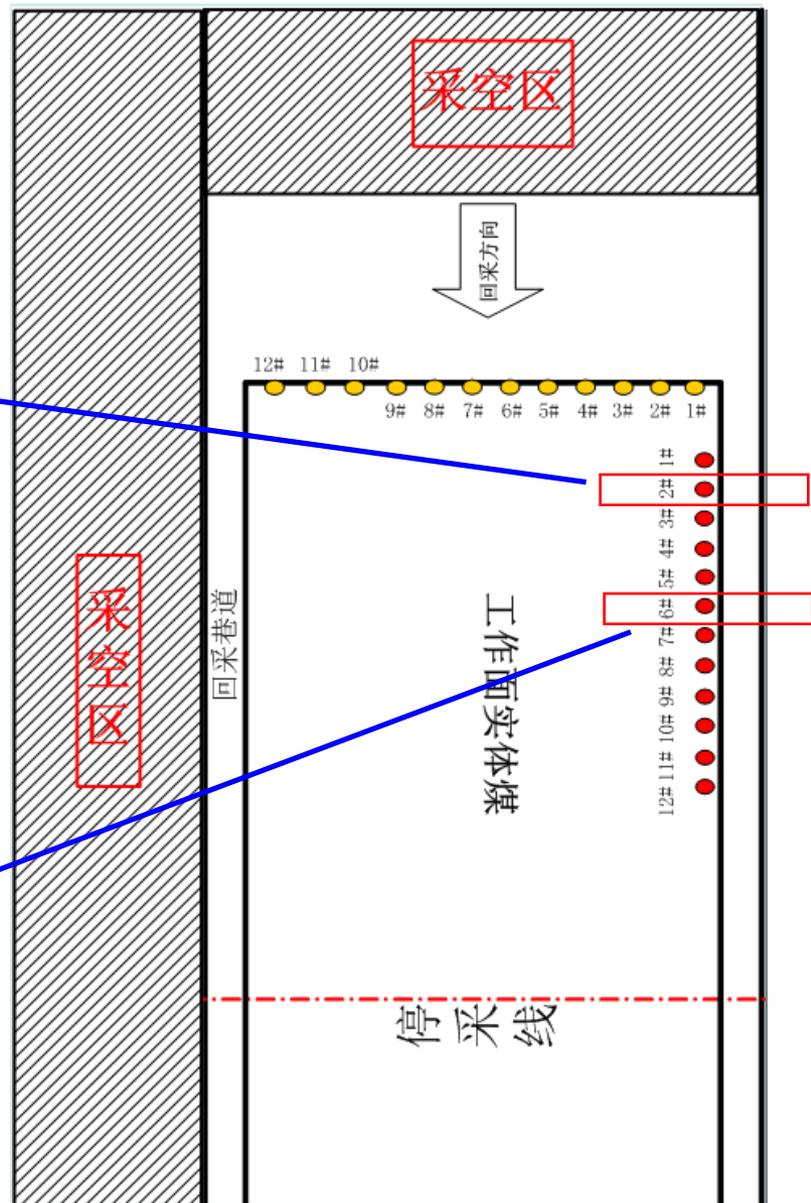
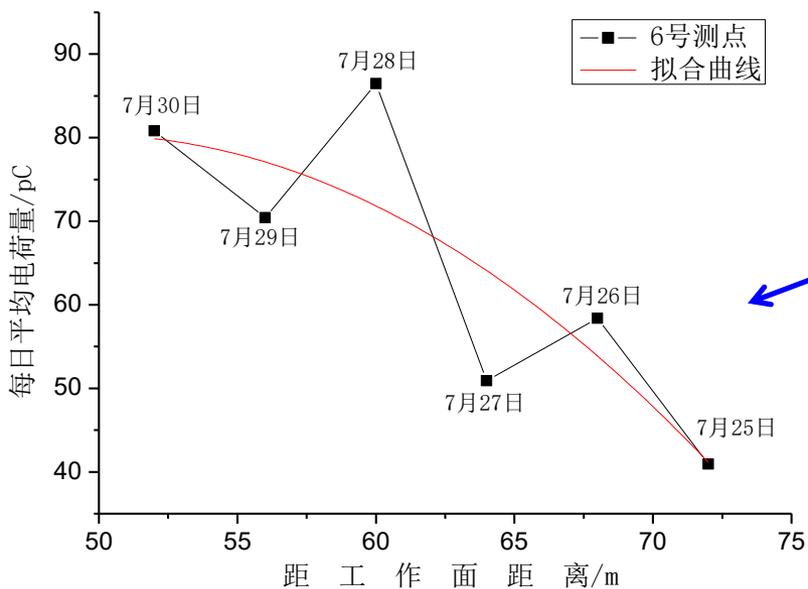
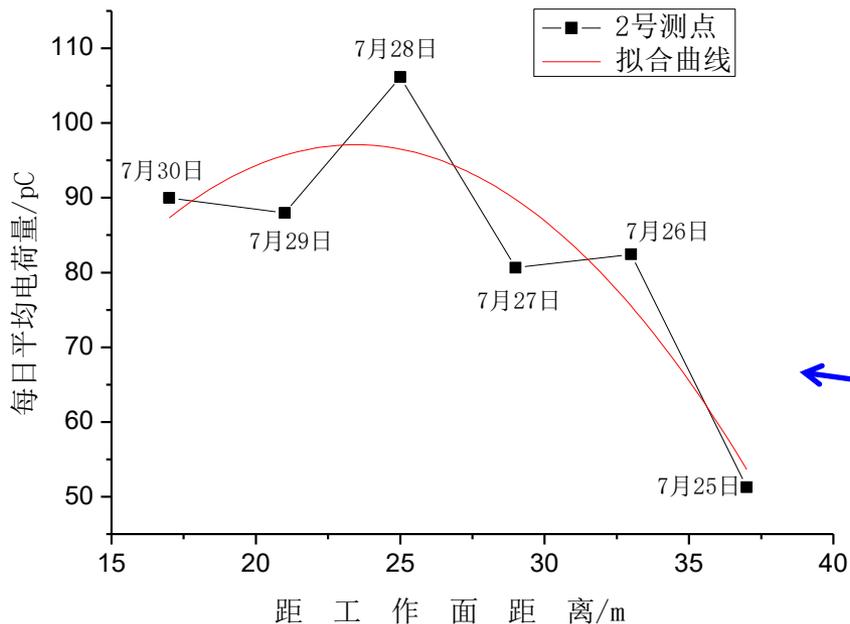
四、井下监测实践

◆ 平顶山十一矿煤岩感应电荷监测





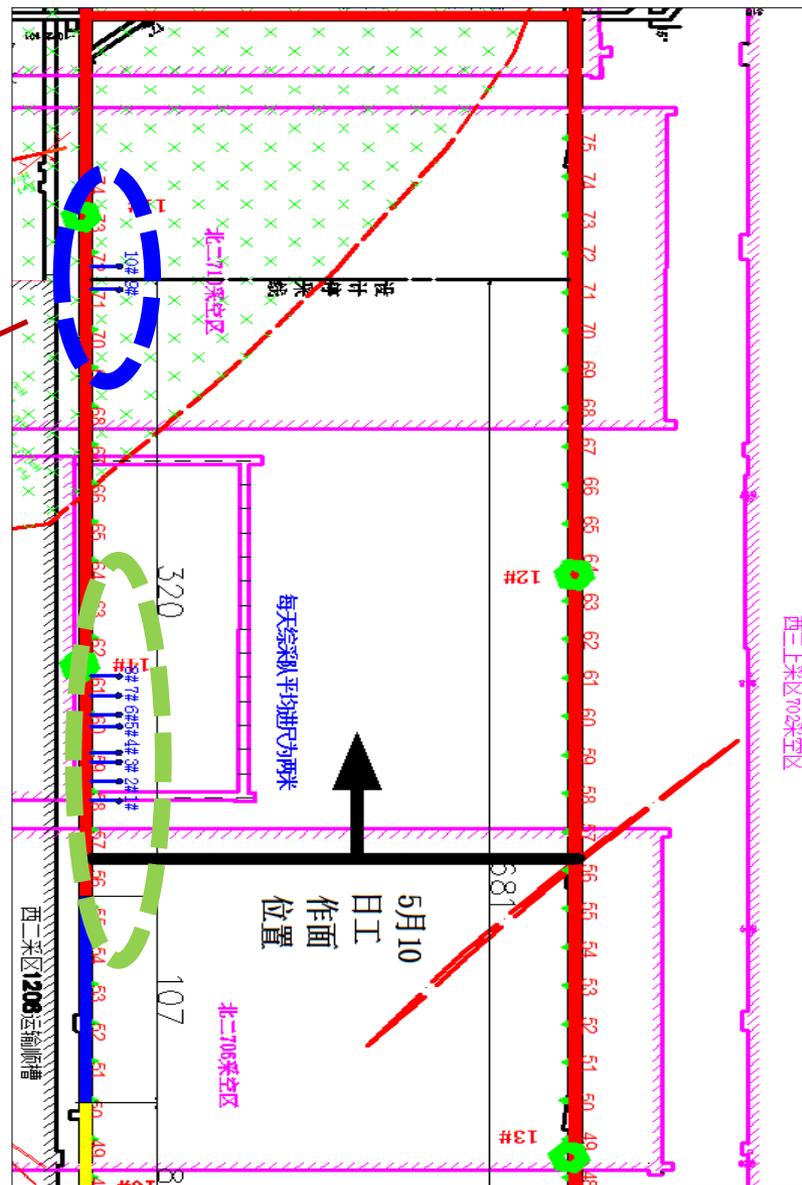
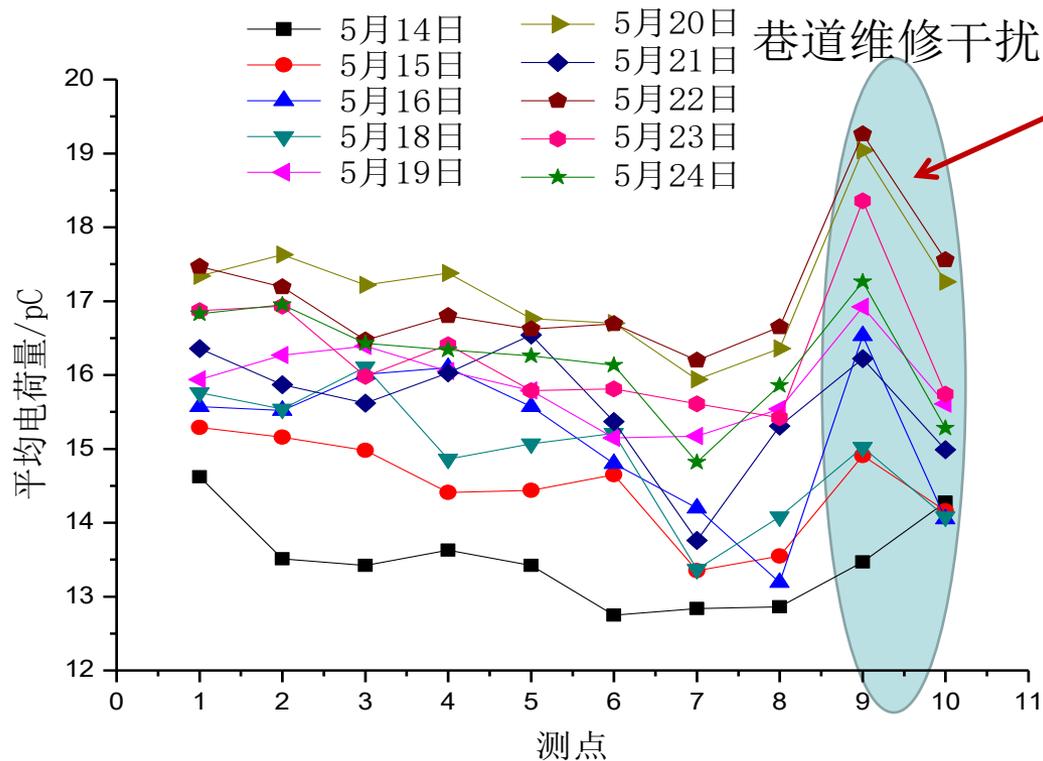
四、井下监测实践





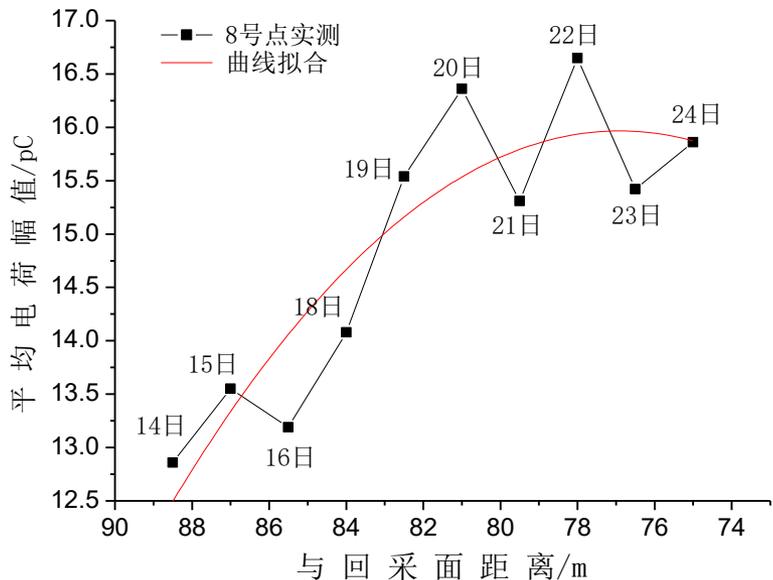
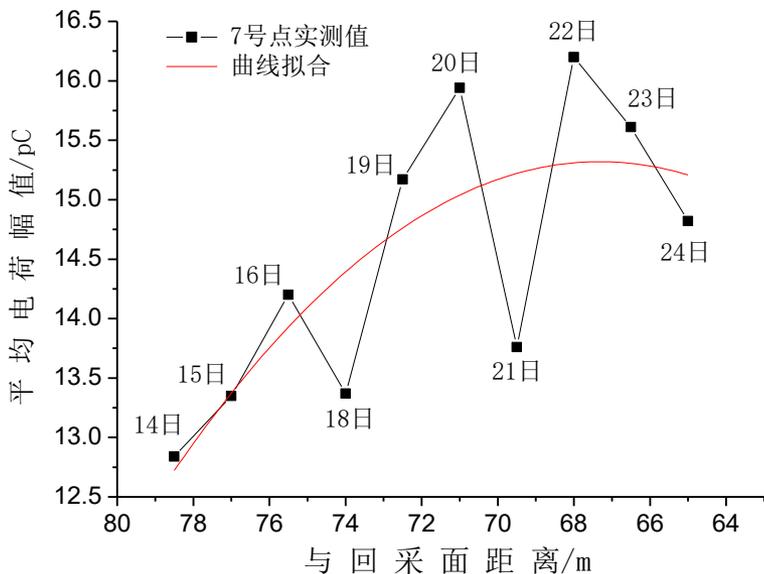
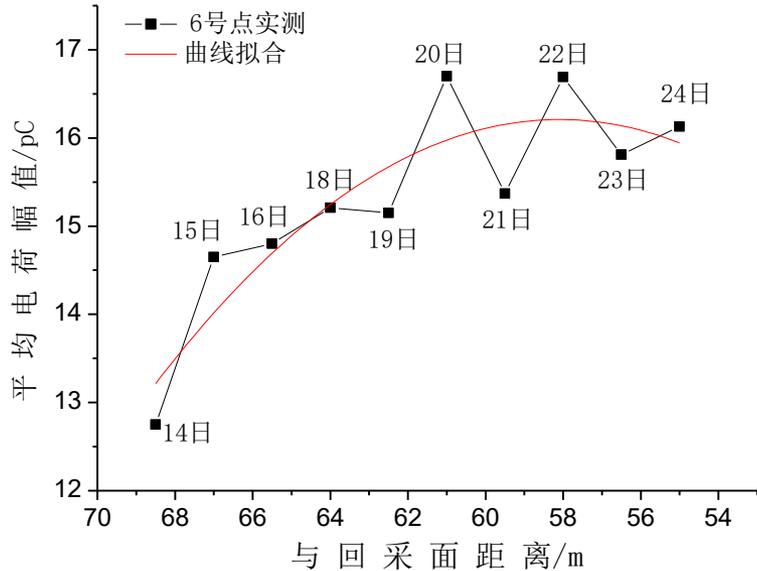
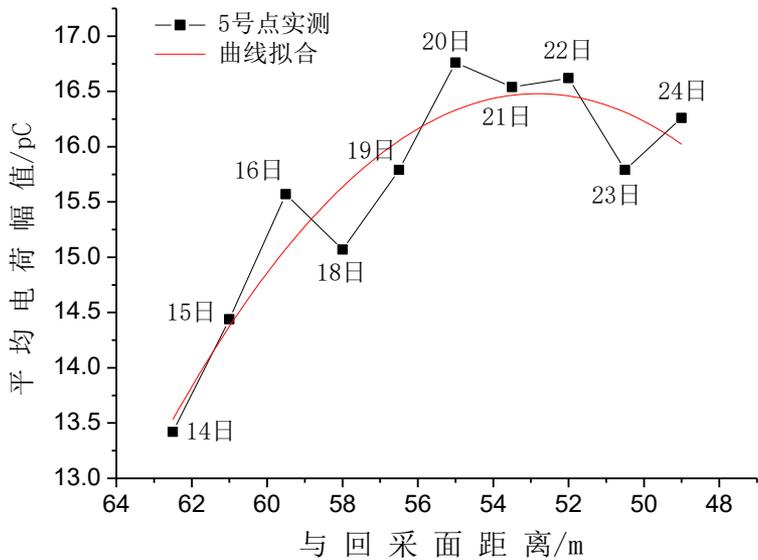
四、井下监测实践

◆ 辽宁红阳三矿煤岩感应电荷监测





四、井下监测实践

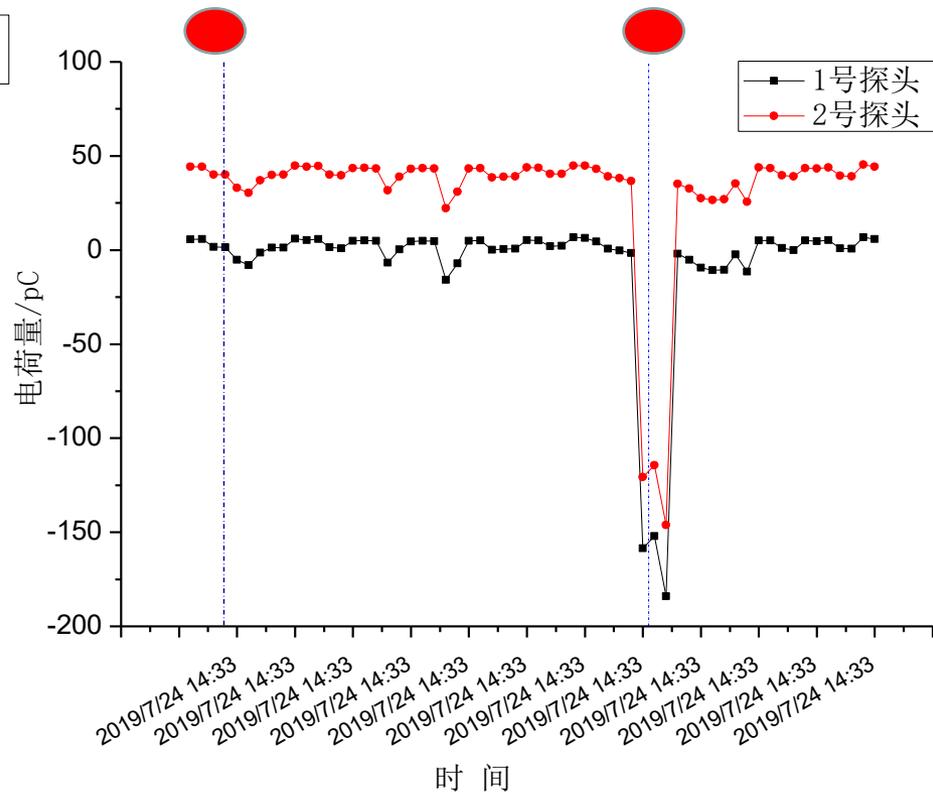
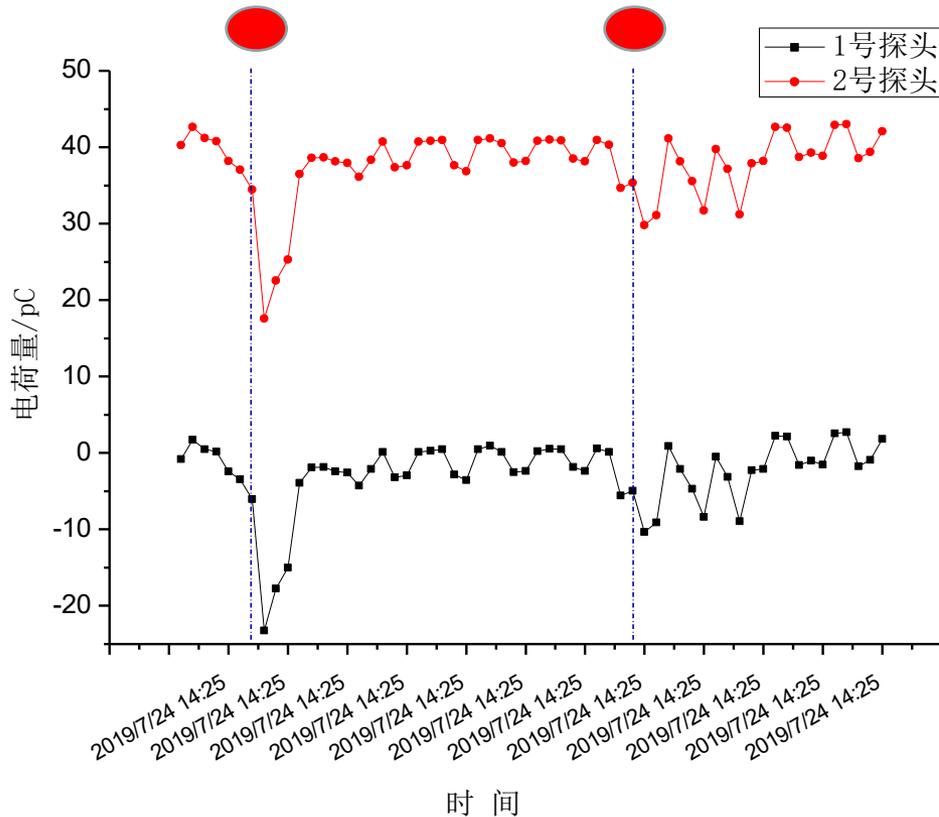




四、井下监测实践

◆抚顺老虎台煤岩感应电荷监测

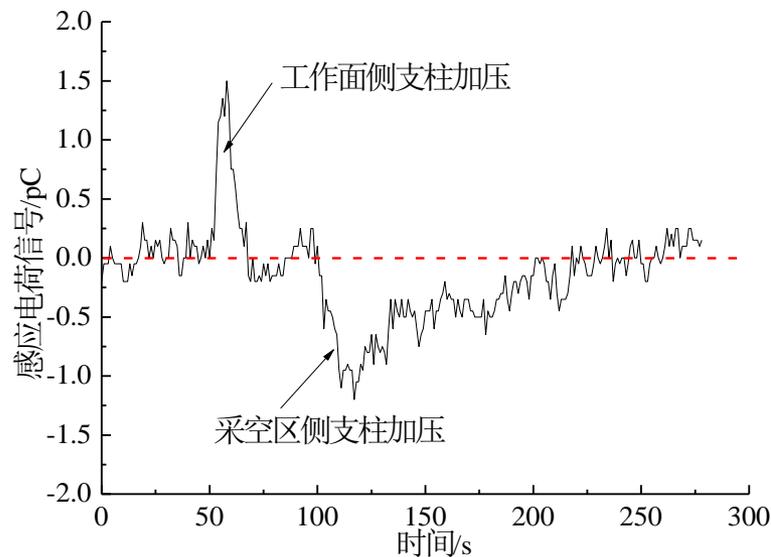
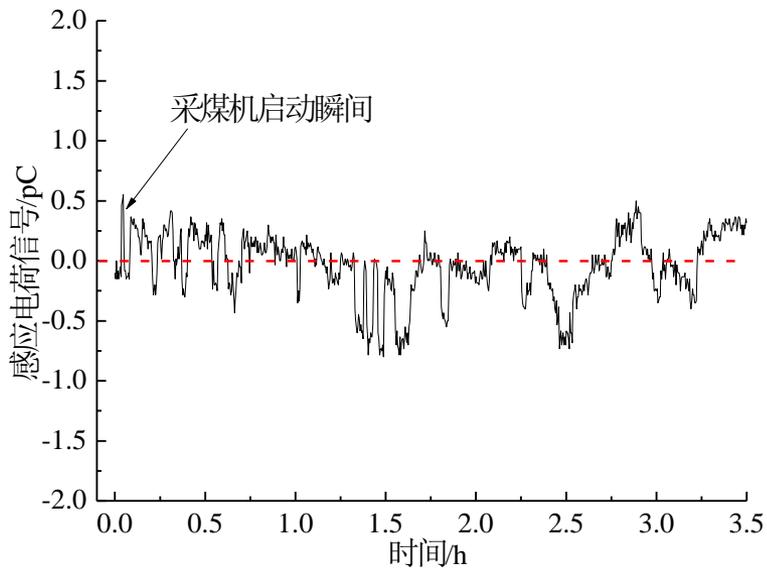
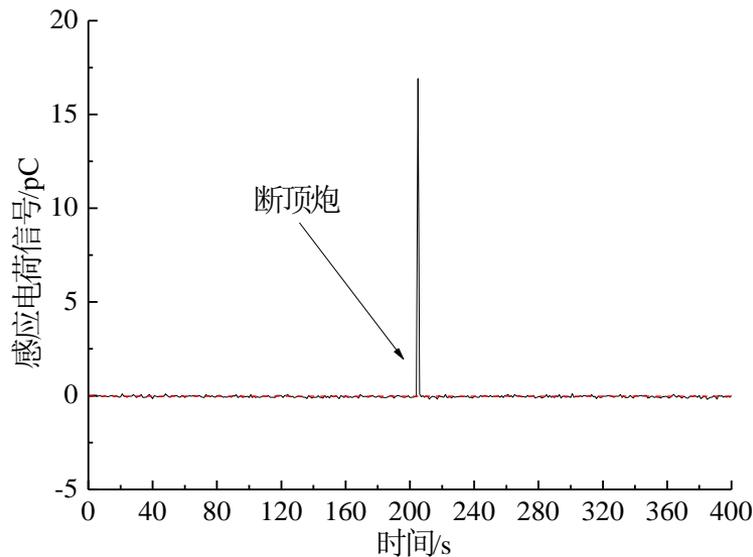
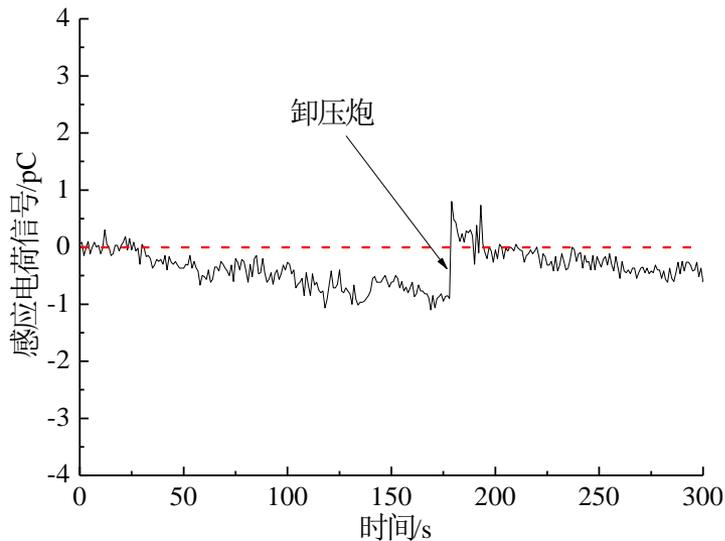
□电荷感应监测对小煤炮事件是有响应的，感应幅值会出现突然变化，也会呈现对少部分小煤炮事件无响应或响应不明显，这主要取决于震动对监测点损伤破坏情况。（注：设计了两种对电荷感应敏感程度不同的探头）

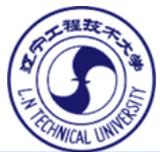




四、井下监测实践

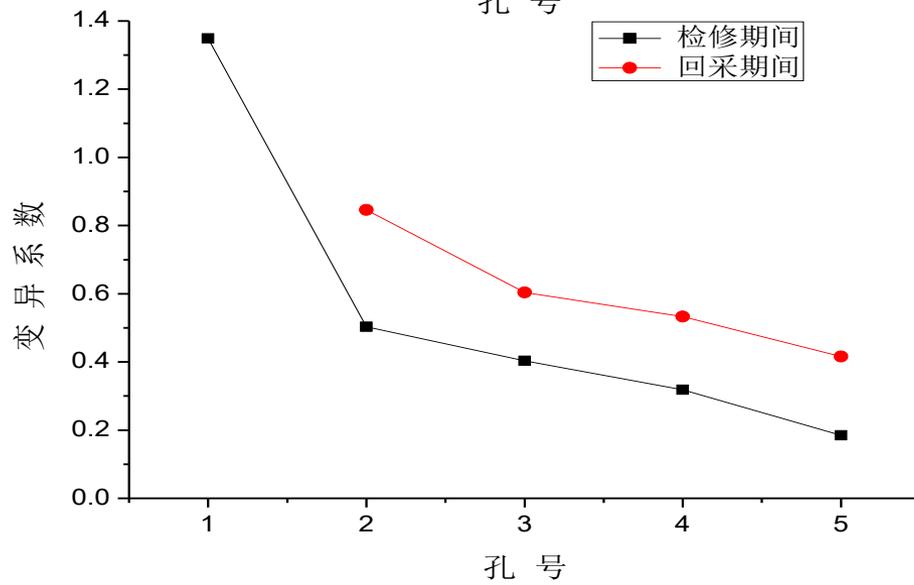
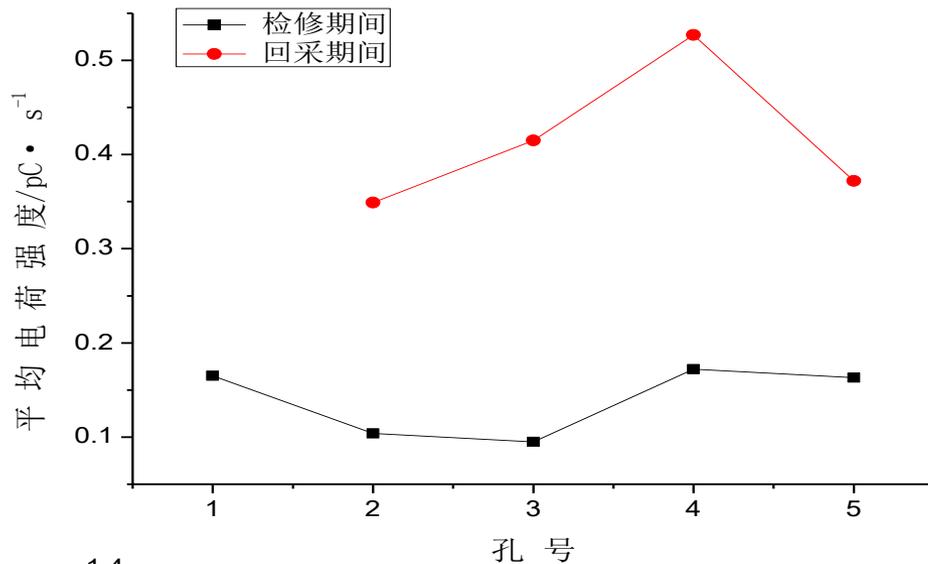
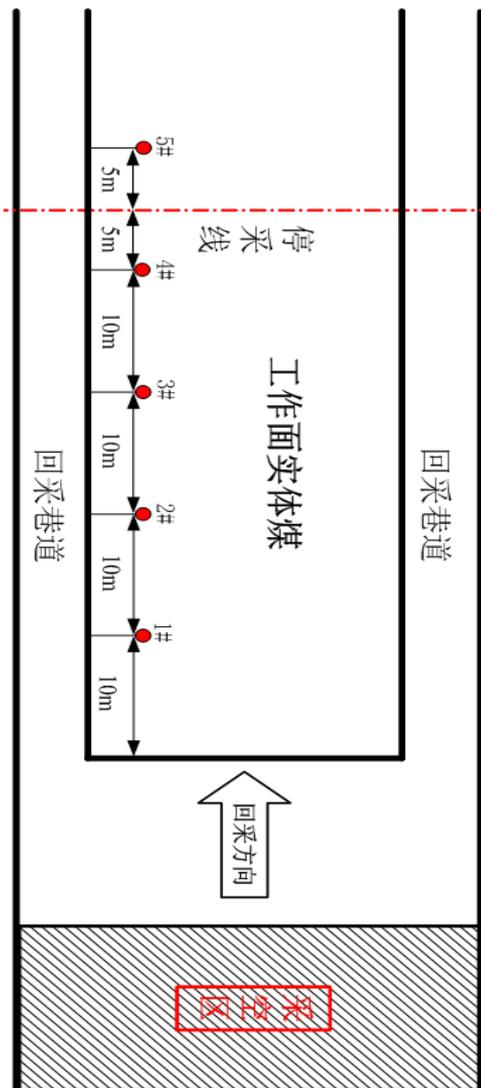
◆双鸭山集贤矿煤岩感应电荷监测





四、井下监测实践

◆ 双鸭山新安矿煤岩感应电荷监测





四、井下监测实践

- 感应电荷监测方法能较好地反映工作面支承压力的变化情况，可监测巷道围岩应力集中与变形破坏程度，能够对巷道围岩稳定进行有效监测与评价；
- 感应电荷监测方法可对煤岩动力事件有良好的响应，能够监测煤炮、采动扰动等动载荷对巷道围岩的影响；
- 感应电荷监测方法能够对深孔爆破、断顶（底）等卸压措施进行有效监测与评价；
- 不仅适用冲击地压等煤矿动力灾害的监测预警，还适用于巷道围岩稳定、采场周期来压等常规矿压显现的监测与预警。
- 感应电荷监测技术不是万能的，会有监测尺度的限制，可联合微震、CT波速反演等技术进行多尺度层次化监测预警，效果更佳。

感谢各位专家学者！

敬请批评指正！