

第一届全国煤矿冲击地压防治学术大会



国家重点研发计划项目, 深部开采复合煤岩动力灾害一体化防控技术,
2017YFC0804208

国家自然科学基金面上项目, 冲击-突出复合灾害孕育过程煤体力学行为演化机制研究, 51774164

煤岩破裂过程声发射-电荷感应信号演化规律及力学机制

丁鑫 肖晓春

辽宁工程技术大学

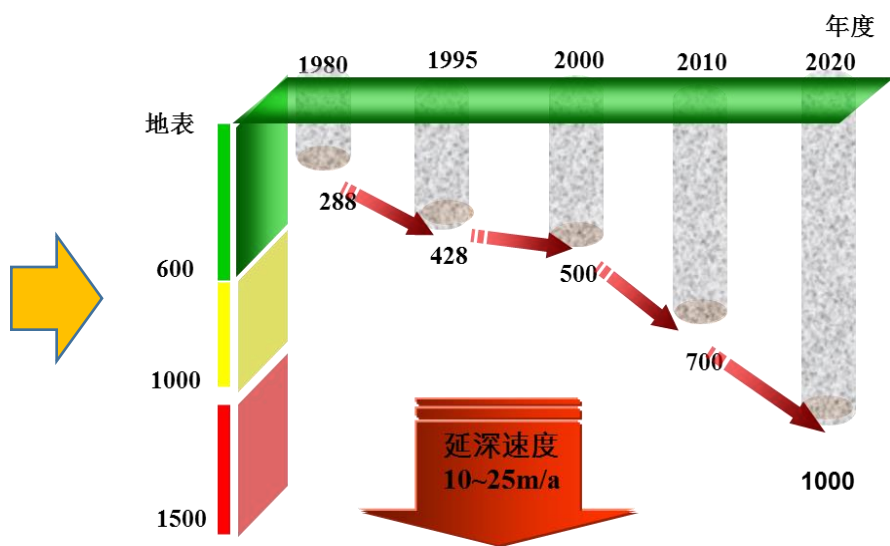
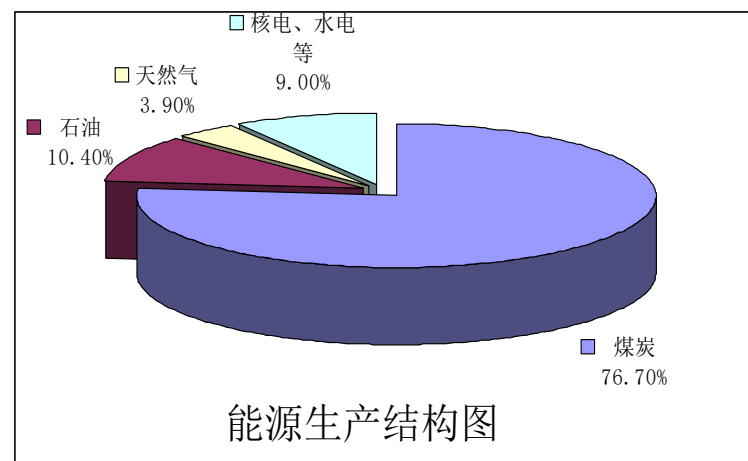
2020年12月6日·固安

- 一、研究背景与意义
- 二、声发射-电荷信号时频域分布规律
- 三、声发射信号演化力学机制分析
- 四、电荷信号演化力学分析
- 五、结论

研究背景与意义

截至2019年底，我国煤炭资源在一次性能源结构中的占比仍在60%以上。

国家制定坚持以煤炭为主体的能源战略。



目前国有重点煤矿以每年10~25m的速度递增

深部 “三高一扰动”

高地应力

高地温

高孔隙压力（瓦斯）

+

“强烈开采扰动”

深部矿井日益严重的**煤岩动力灾害**（冲击地压、煤与瓦斯突出及兼具二者特点的复合灾害）是制约我国煤炭稳定、高效开采的瓶颈性安全问题！

35对千米深井中瓦斯矿井和冲击地压矿井比例

瓦斯赋存	矿井数量/对	百分比/%	冲击地压矿井/对	百分比/%
低瓦斯	16	45.71	13	81.25
高瓦斯	19	54.29	8	42.11
合计	35	100	21	—



预测、预警



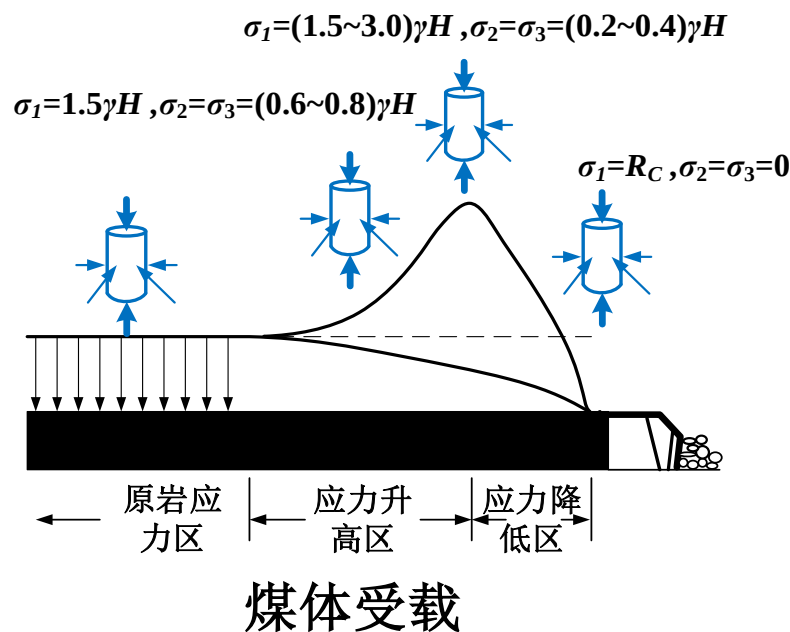
意义重大

防治煤岩动力灾害、
改善深部矿井生产
环境

研究背景与意义



煤岩动力灾害
是以围岩失稳
为表现形式



三轴卸荷



单轴压缩



不同应力路径下的煤体破坏是灾害发生的主体!

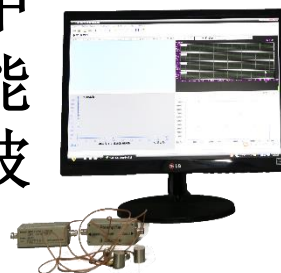
研究背景与意义

煤岩损伤、破坏

声

声发射 (Acoustic Emission), 材料中局域源快速释放能量产生瞬态弹性波的现象。

声发射监测仪



微震监测仪

电

电荷感应现象 (Charge Induction), 基质摩擦、滑移位错等产生的电荷定向移动。



实验用电荷仪

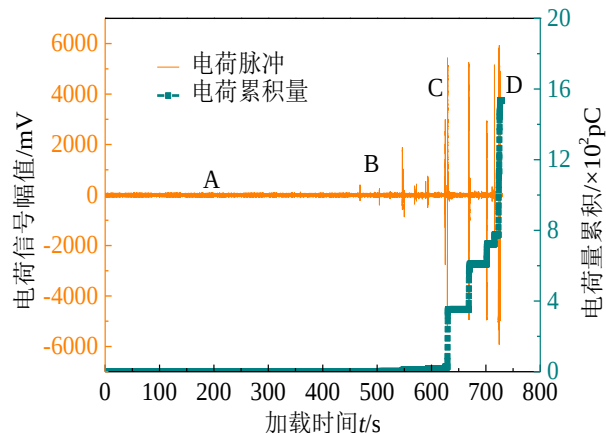
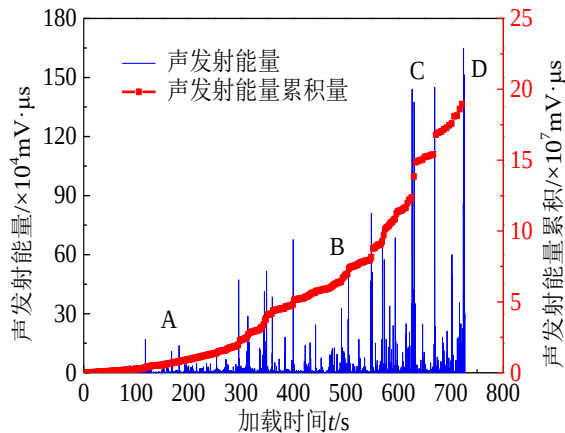
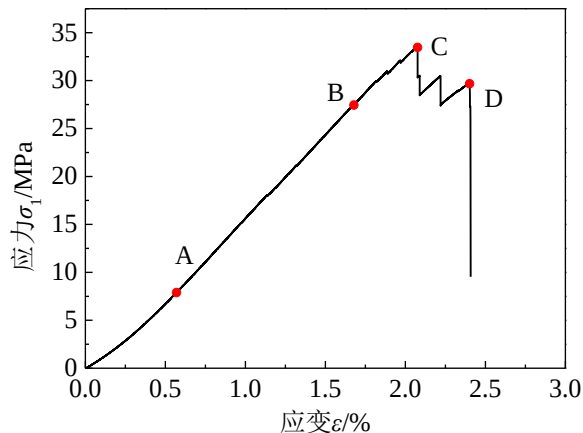
矿用电荷仪



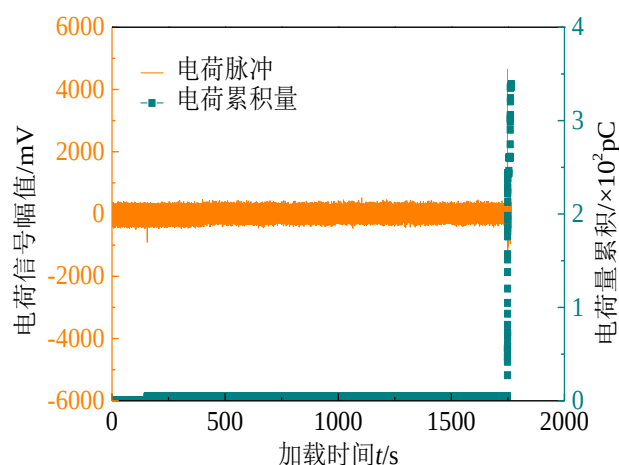
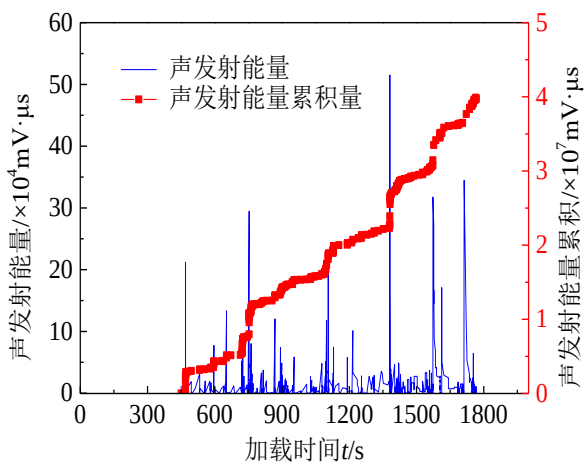
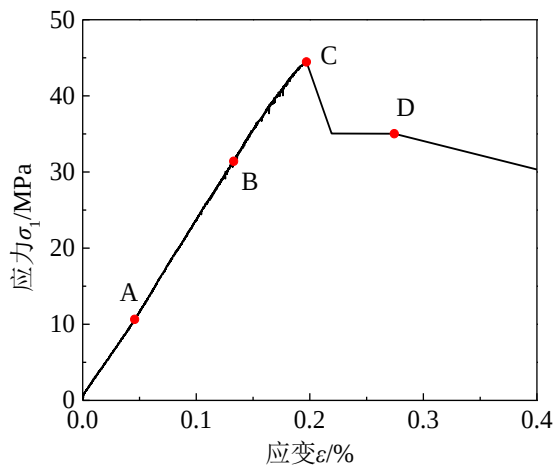
厘清声、电荷信号时频分布及力学演化规律对提高信号甄别效率具有重要意义!

声-电信号时频域分布规律

(1) 信号时域规律



单轴压缩条件下声发射与电荷信号时域规律

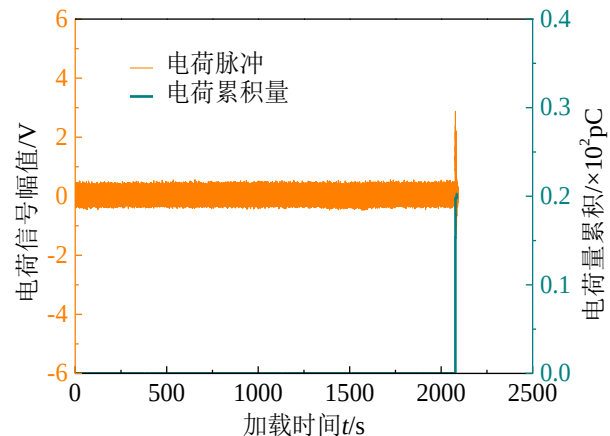
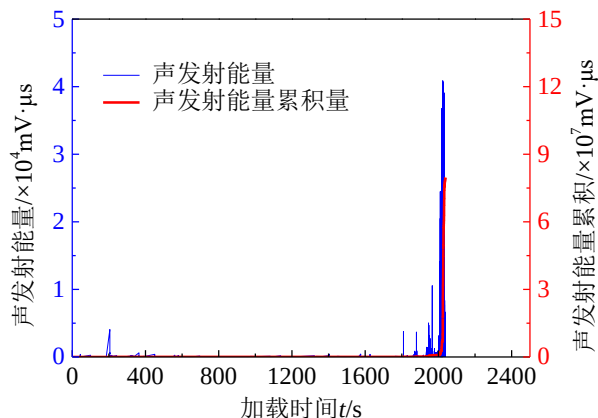
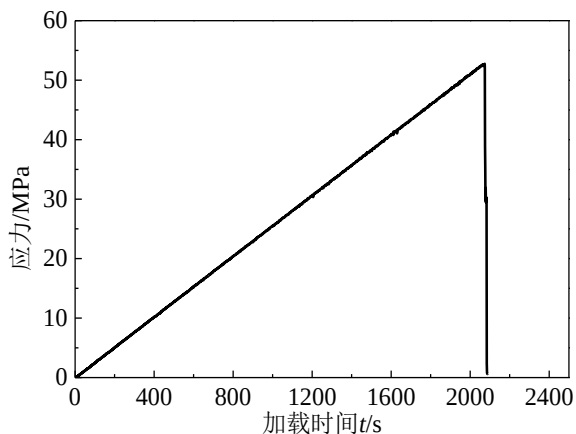


三轴压缩条件下声发射与电荷信号时域规律

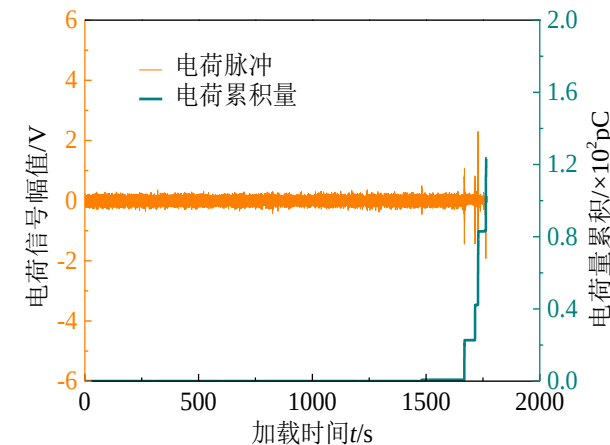
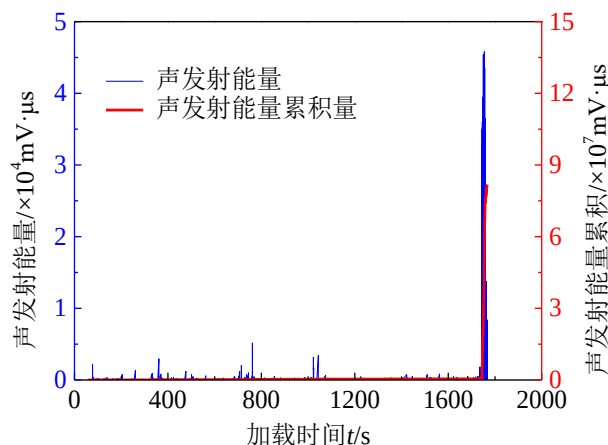
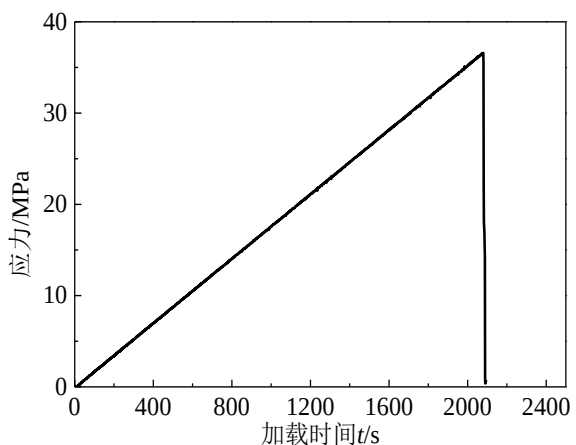
单轴与三轴条件下含瓦斯煤岩破坏过程两种信号的时域波形均具有明显的阶段性，随着煤岩劣化程度加剧信号的幅值与连续度均呈升高趋势

声-电信号时频域分布规律

瓦斯影响



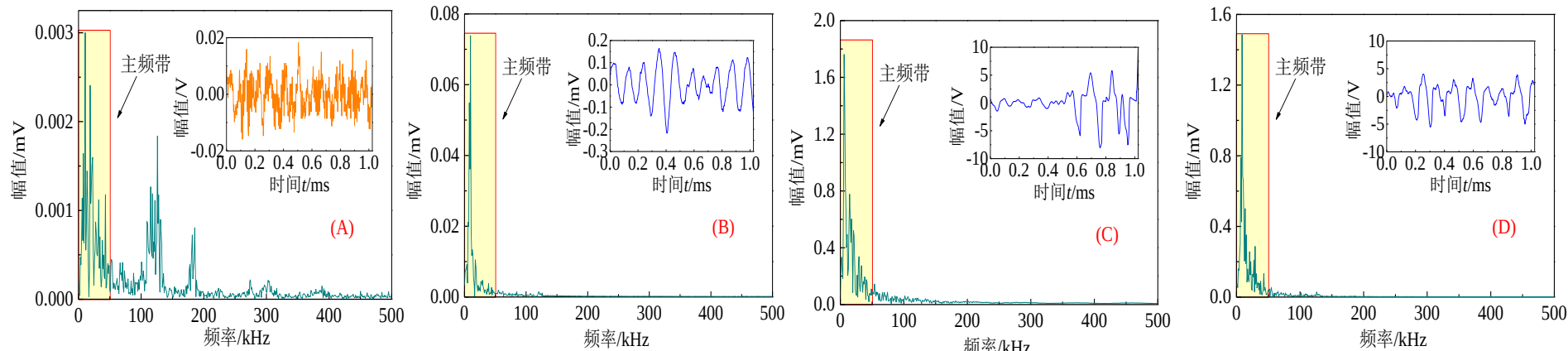
瓦斯压力 $P_g = 0.5 \text{ MPa}$



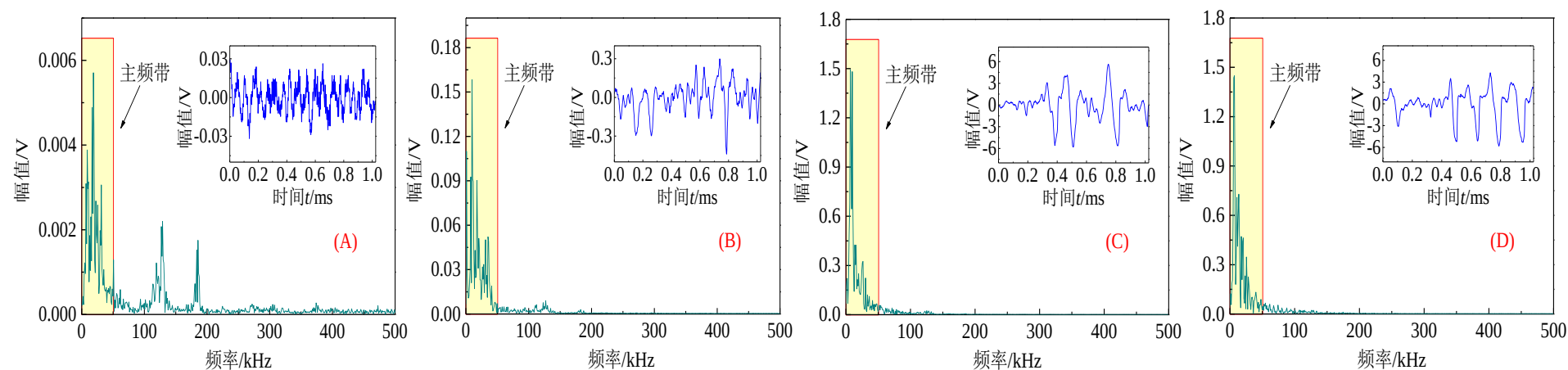
瓦斯压力 $P_g = 2.5 \text{ MPa}$

含瓦斯煤岩受载过程，随其内部瓦斯压力升高，电荷信号波动程度增强而声发射降低；

(2) 信号频域规律



单轴压缩条件下声发射信号频域规律

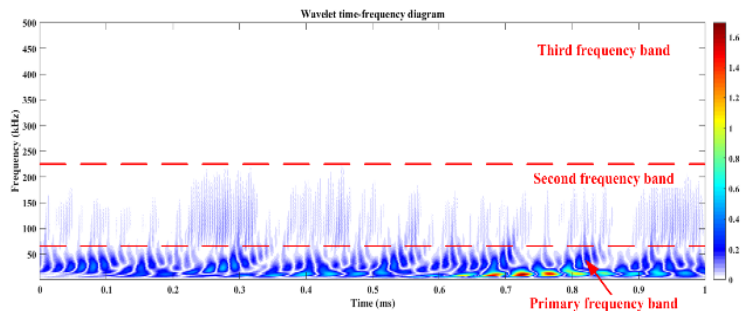


三轴压缩条件下声发射信号频域规律

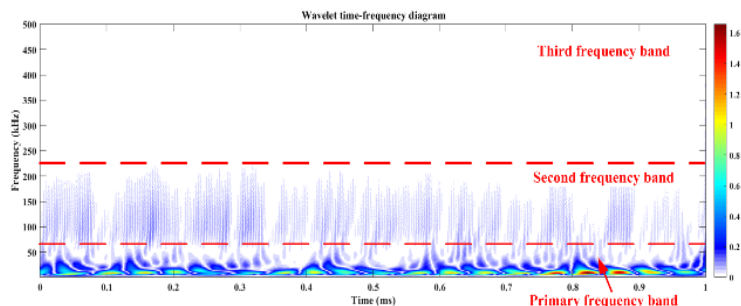
声发射为主频范围0~10kHz的低频信号，且信号幅值随煤岩所受载荷升高而增加

声-电信号时频域分布规律

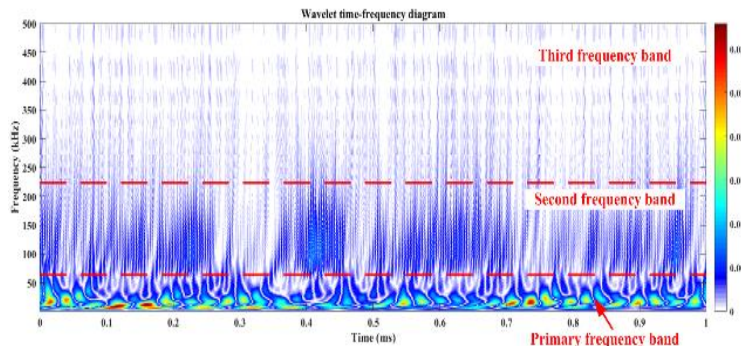
高强度煤岩



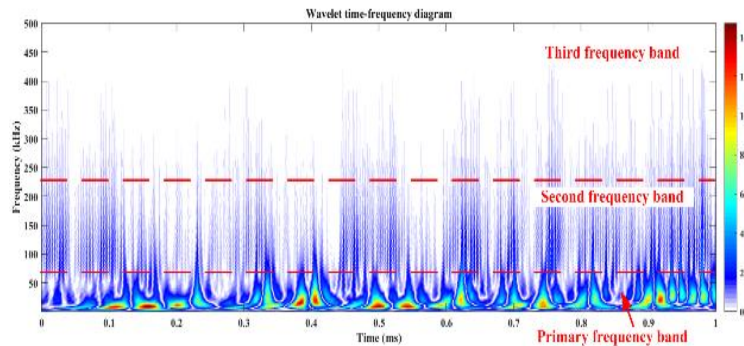
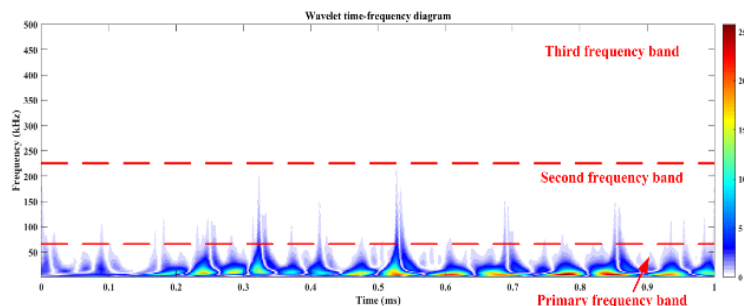
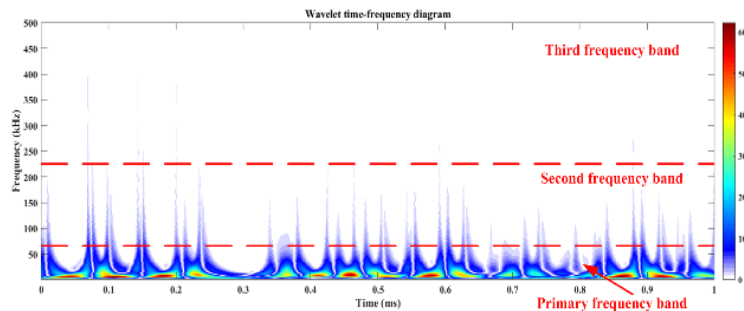
中等强度煤岩



低强度煤岩



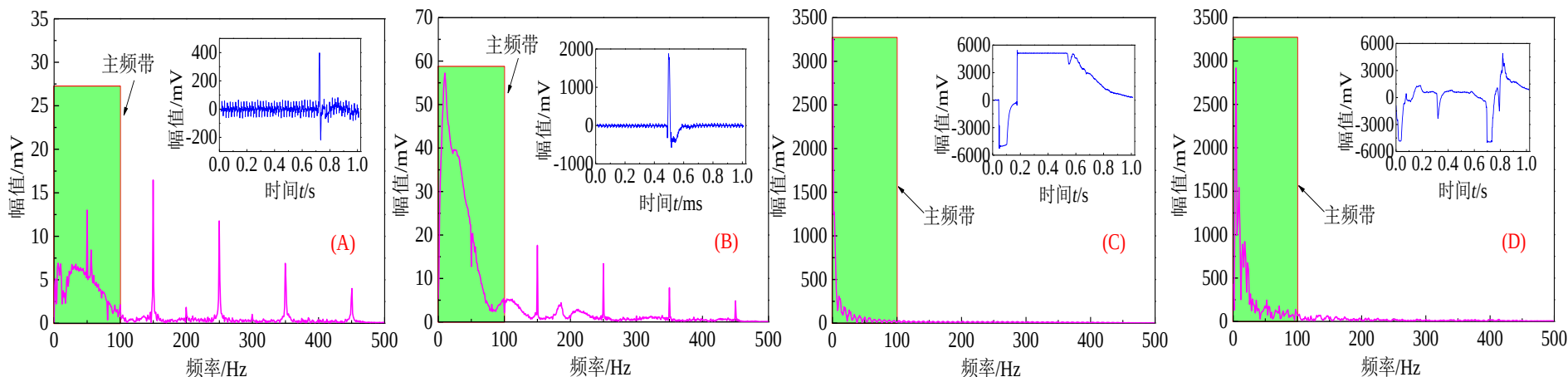
压密阶段



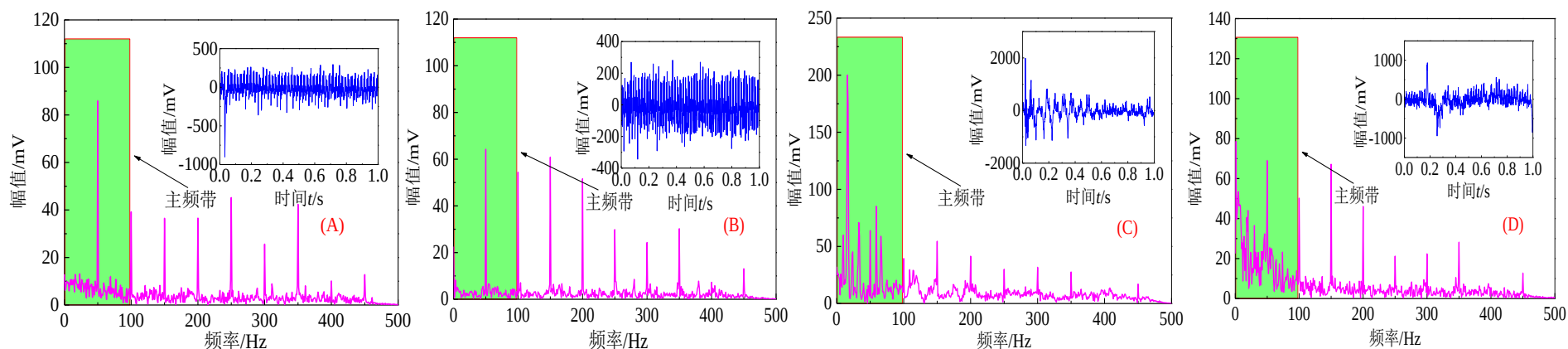
峰值阶段

煤岩强度越低声发射信号频率分布越宽泛，随受载应力提高信号频带分布范围逐渐向主频移动

声-电信号时频域分布规律



单轴压缩条件下声发射与电荷信号时-频域规律



三轴压缩条件下声发射与电荷信号时-频域规律

电荷感应为主频带1~100Hz的甚低频信号，为电荷感应信号与电磁辐射的主要区别，同时信号主频分量幅值同样随所受载荷升高而增加。

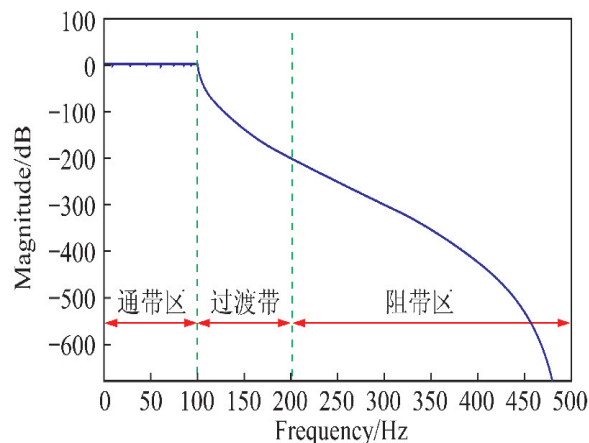
(3) 电荷信号降噪算法设计

通过设定信号的通带衰减系数 r_p 和阻带衰减系数 r_s 控制滤波器对通带和阻带信号的过滤：

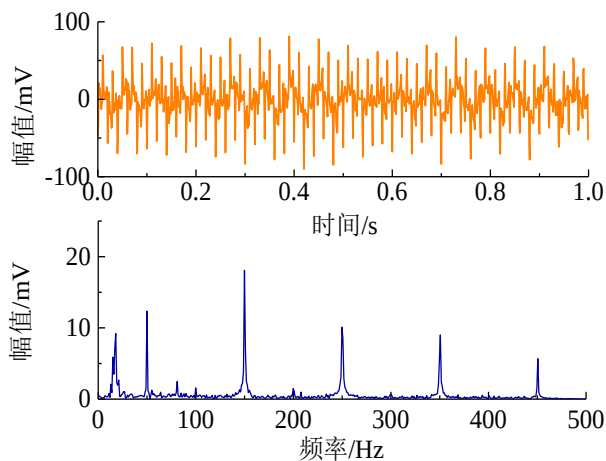
$$r_p = -20 \lg \left| \frac{1 - \delta_1}{1 + \delta_1} \right| \quad r_s = -20 \lg \delta_2$$

选择幅频精度较高的递归型IIR数字低通滤波器，其数学表达采用切比雪夫I型数字滤波模型：

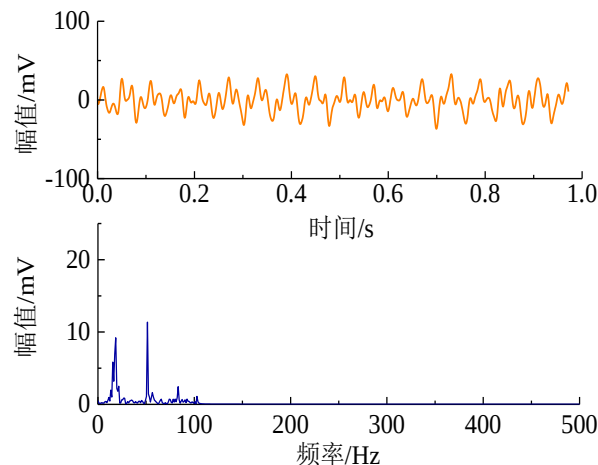
$$|H_a(jf_F)|^2 = \frac{1}{1 + \delta^2 T_N^2 \left(\frac{f_F}{f_{FP}} \right)} \quad T_N(x) = \begin{cases} \cos(N \cos^{-1}(s_f)), & 0 \leq s_f \leq 1 \\ \cosh(\cosh^{-1}(s_f)), & 1 < s_f < \infty \end{cases}$$



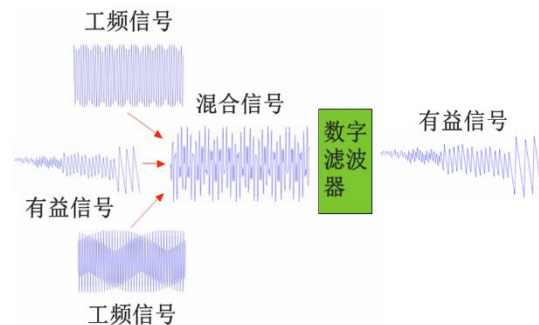
设计滤波器通带曲线



滤波前



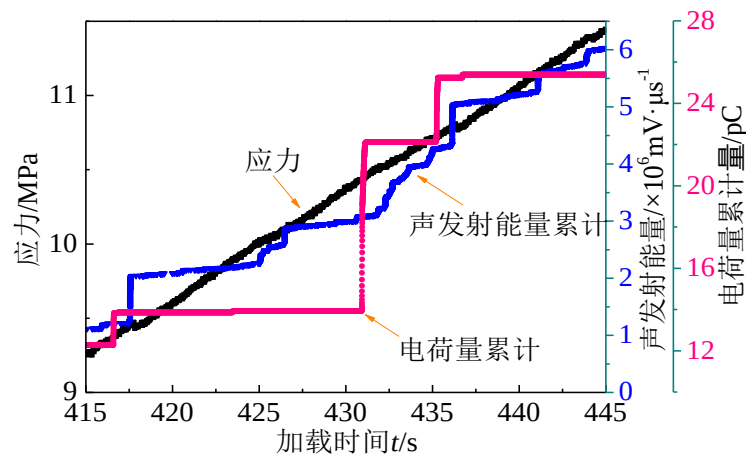
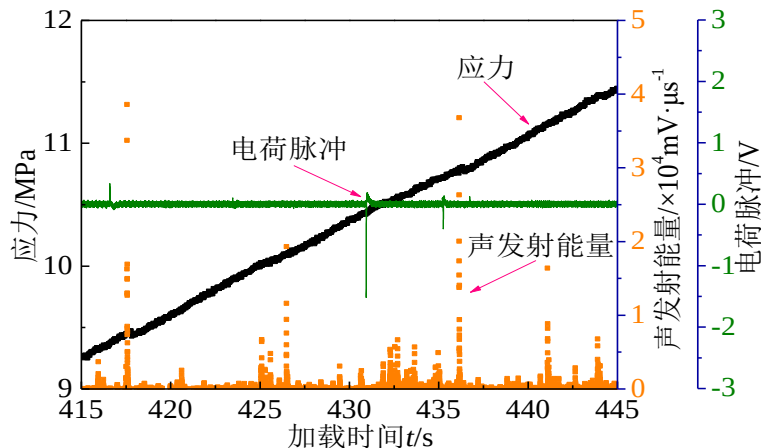
滤波后



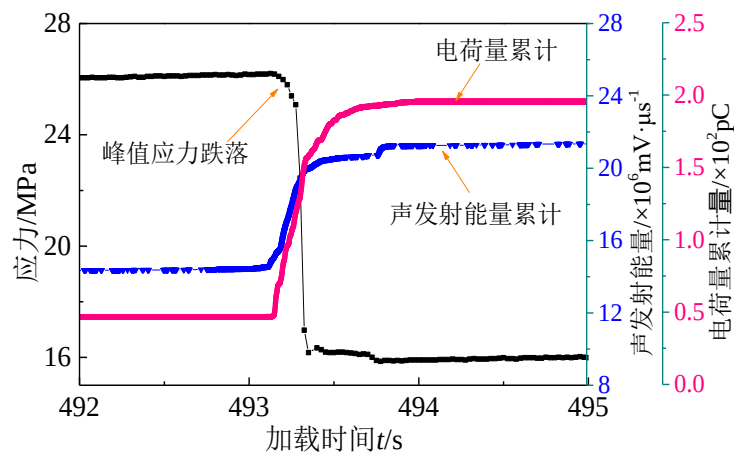
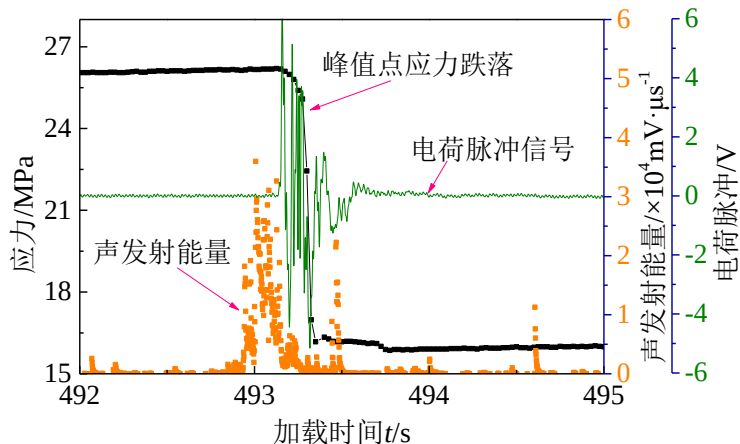
滤波器工作基本原理

(4) 声发射与电荷感应信号的异同性分析

峰前阶段



峰后阶段



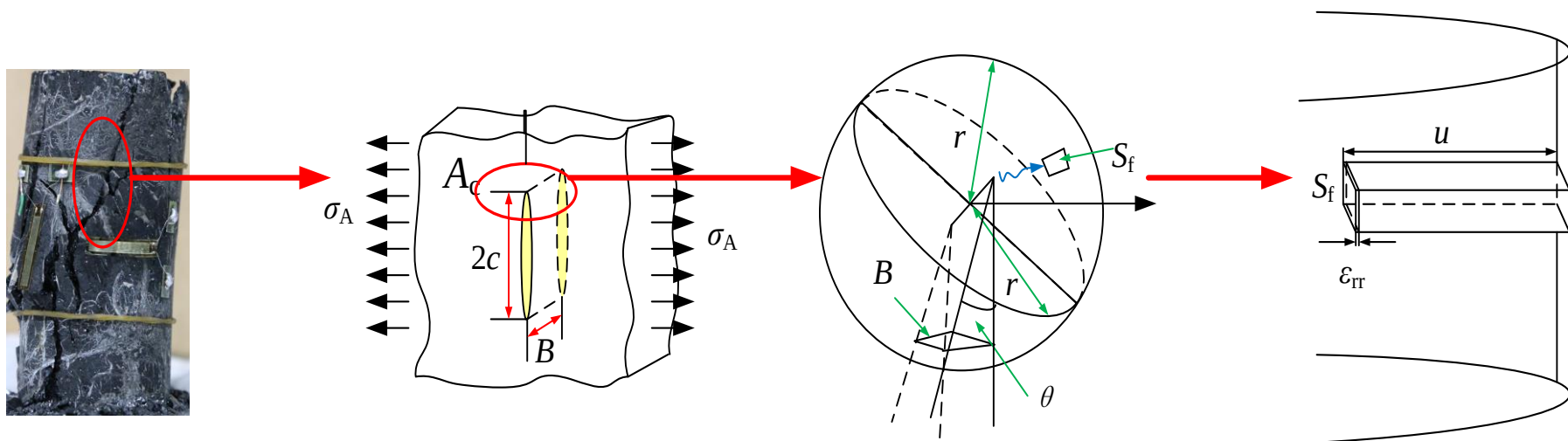
煤岩破裂过程声发射与电荷信号差异性

两信号均与煤岩内部裂纹演化直接关联，声发射与电荷信号具有异步性属非同源信号，声发射伴随裂纹的发育产生，电荷与应力跌落具有明显的同步性，声发射先于电荷信号产生。

声发射主要监测由裂纹尖端扩展所释放的弹性能在煤岩内形成的应力波，释放的能量大小直接影响力波传递特征，进而引起声发射信号变化。

由此所构建的模型将单一裂纹作为研究对象，并对其发育、扩展过程作如下假设：

- (1) 裂纹受载-扩展过程遵循能量守恒定律，同时体系内能保持不变；
- (2) 伴随裂纹扩展产生的弹性能在煤体中主要以纵波形式传递；
- (3) 裂隙至表面部分煤岩视为均质体，不考虑应力波衰减。



应力波传递简图

声发射力学机制分析

根据能量守恒定律煤岩内部单一裂纹系统总能量 U_f 与裂纹周围应变能 U_{fM} 、表面能 U_{fS} 和惯性动能 U_{fK} 间的关系为： $U_f = U_{fM} + U_{fS} + U_{fK}$

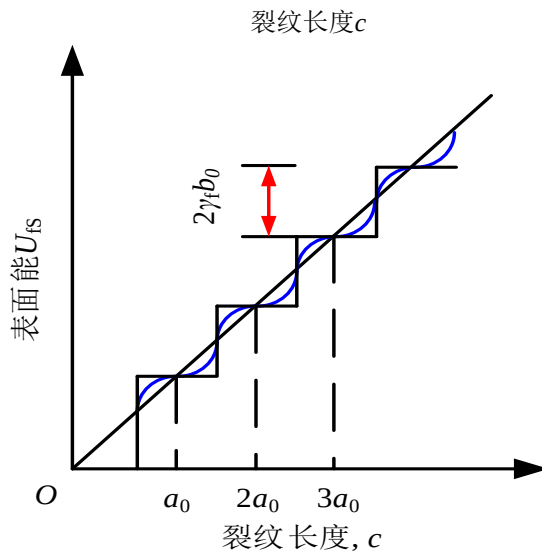
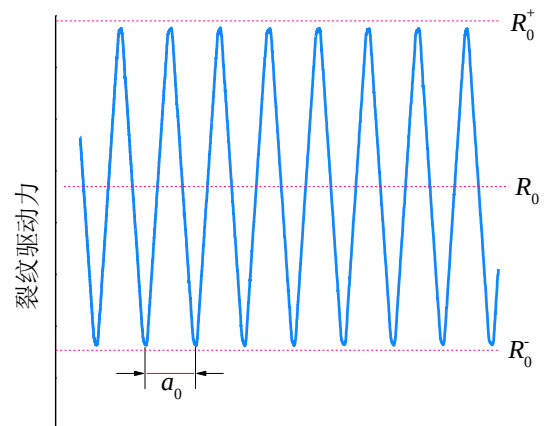
应力再次逐渐升高至应力峰值发生二次扩展前裂纹系统的表面能保持稳定，扩展前后系统能量转化关系为：

$$U_f = \frac{A\sigma_c^2}{2E} = \frac{A\sigma_A^2}{2E} + 4c\gamma_f + U_{fK}(c)$$

则扩展过程惯性能： $U_{fK} = \frac{A(\sigma_c^2 - \sigma_A^2)^2}{2E} - 4c\gamma_f$

含瓦斯时，裂纹断裂韧度发生变化，则裂纹表面能释放率为：

$$U_{fK} = \frac{A(\sigma_c^2 - \sigma_A^2)^2}{2E} - 4c_i \left(\gamma_g - \frac{aRT}{V_m S_s} \ln(1 + bP_g) \right)$$



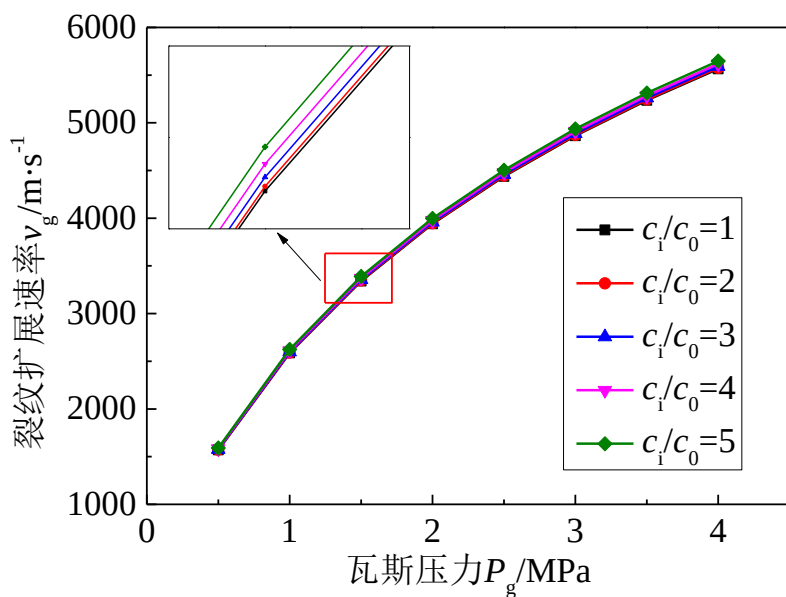
裂纹驱动力，表面能与长度关系

当裂纹单位表面能与裂纹长度固定，伴随裂纹扩展释放的惯性能随裂纹扩展临界应力与跌落后的应力差值正相关变化。在常位移加载方式下，裂纹体系具有轴向应变 ε_A ，将Mott动能方程与裂纹扩展柔度变换方程相结合以速率描述的惯性能：

$$U_{fk} = \frac{k' \rho_c c_i^2 \varepsilon_A^2 v^2}{2 \left[1 + \alpha_c (c_i / c_0)^2 \right]^2}$$



则此时的裂纹扩展速率为：
$$v_g = \frac{\sqrt{2} (A + 2\pi c_i^2)}{c_i \varepsilon_A A \sqrt{k' \rho_c}} \sqrt{\frac{A (\sigma_c^2 - \sigma_A^2)^2}{2E} - 4c_i \left(\gamma_g - \frac{aRT}{V_0 S_s} \ln(1 + bP_g) \right)}$$



瓦斯压力升高，裂纹扩展速率显著增加，而裂纹尺度增加对扩展速率变化影响较小。

煤岩吸附瓦斯后裂纹扩展临界应力逐渐降低，扩展过程释放更多的弹性能，瓦斯对煤岩裂纹扩展的作用表现为具有更高的扩展速率。

声发射力学机制分析

所取的球面半径微小，将裂纹尾部张开面积近似看成矩形，根据几何关系

其面积：
$$S_1 = 2rB \sin \frac{\theta}{2}$$

剩余均匀受载部分面积表述为空间球面面积与尾部张开面积的差值：

$$S_2 = \frac{4}{3} \pi r^2 - 2rB \sin \frac{\theta}{2}$$



面积为S的微元受到的能量分量：

$$U'_{fs} = U_K \frac{S_f}{\frac{4}{3} \pi r^2 - 2rB \sin \frac{\theta}{2}}$$

应力波产生的激振力在一个周期内

做功：
$$U'_{fs} = W_f = \pi A_p P_f \sin \varphi$$

应力波振幅、平均激振力关系：

$$A_p = \varepsilon_r u \quad P_f = S_f E \varepsilon_r$$

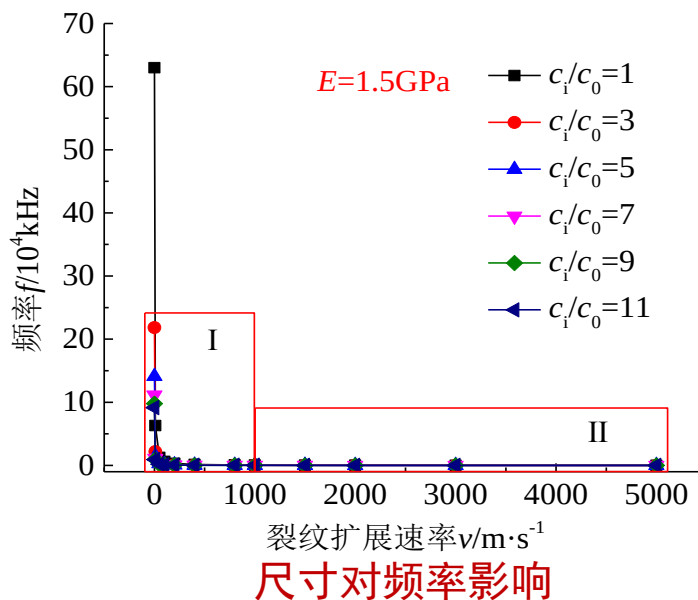
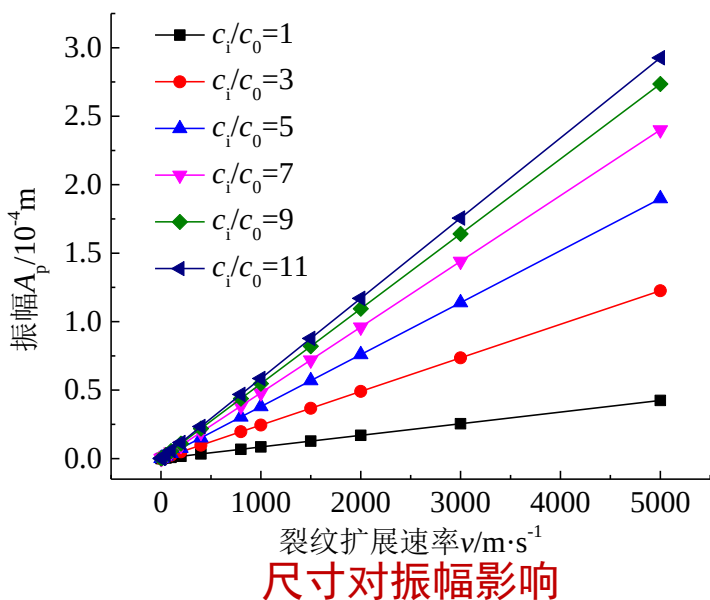
纵波振动幅值：

$$A_p = \frac{c_i \varepsilon_A \nu}{1 + \alpha_c (c_i / c_0)^2} \sqrt{\frac{k' \rho u}{2\pi E \sin \varphi \left(\frac{4}{3} \pi r^2 - 2rB \sin \frac{\theta}{2} \right)}}$$

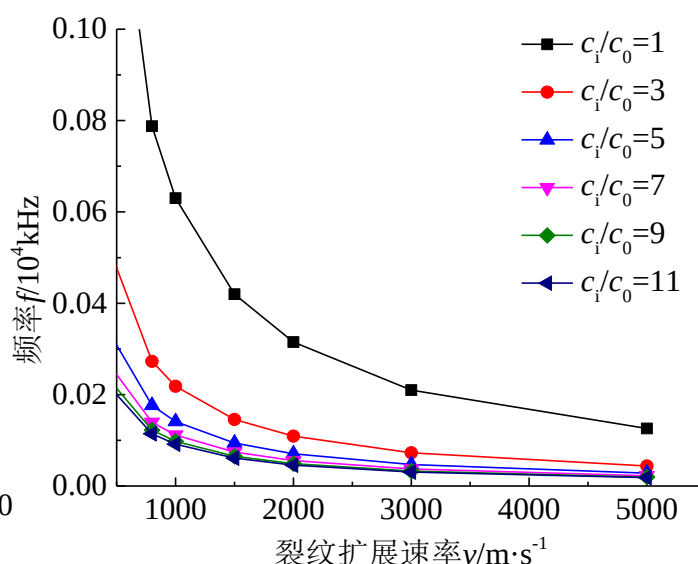
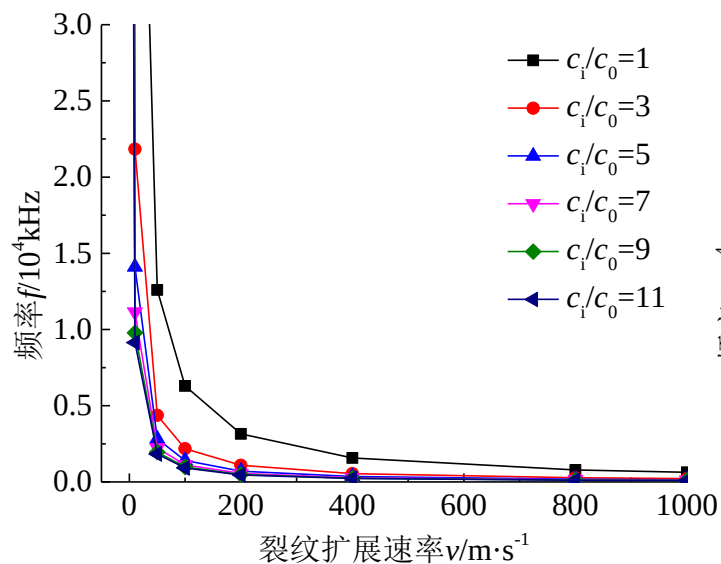
纵波振动频率：

$$f = \frac{E(1-\mu)^{1/2} [1 + \alpha_c (c_i / c_0)^2]}{2\pi c_i \varepsilon_A \nu [\rho(1+\mu)(1-2\mu)]^{1/2}} \sqrt{\frac{2\pi \sin \varphi \left(\frac{4}{3} \pi r^2 - 2rB \sin \frac{\theta}{2} \right)}{k' \rho u}}$$

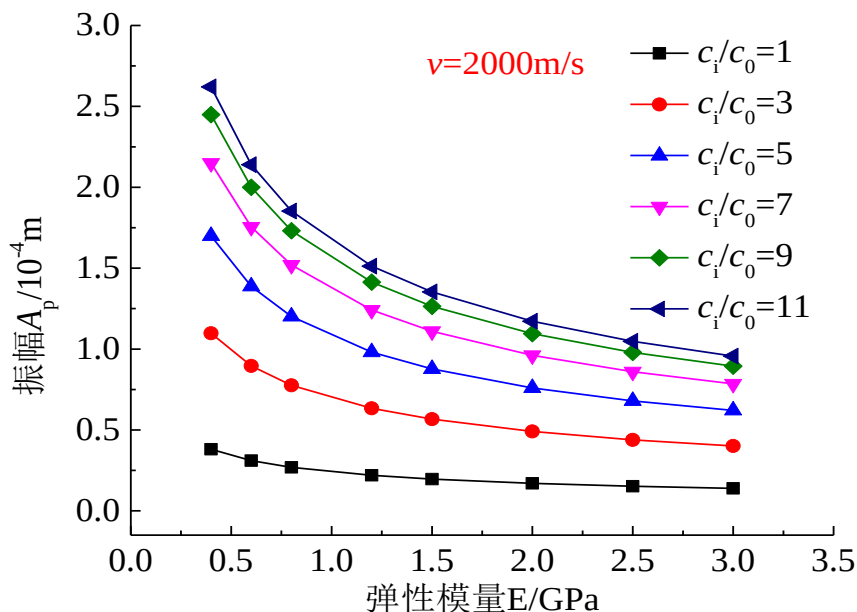
声发射力学机制分析



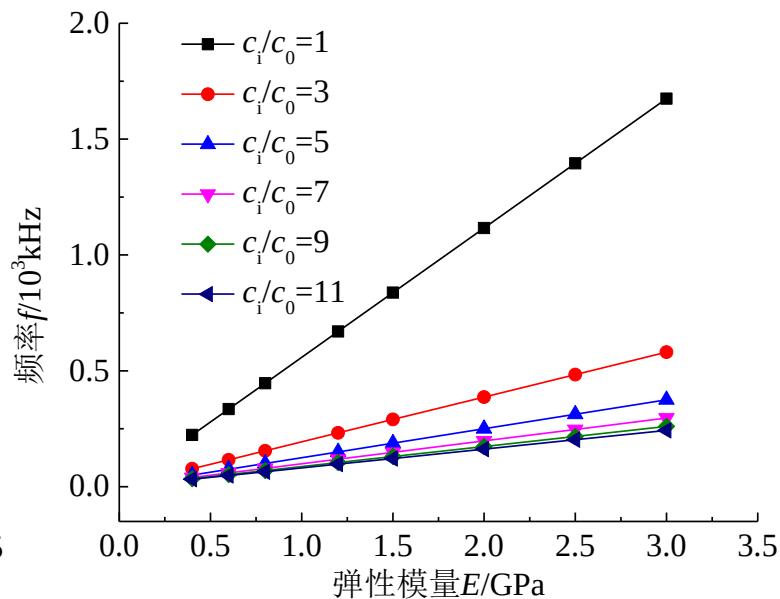
裂纹扩展速率在
0~1 500 m/s范围内
时振幅增长了约4
个数量级，而扩展
速率在1 500~ 5 000
m/s范围内振幅幅
值变化量均在1个
数量级内；在同一
扩展速率下随着裂
纹尺寸逐渐增加，
振幅呈增大趋势但
增长率逐渐减小。



声发射力学机制分析



弹性模量对振幅影响

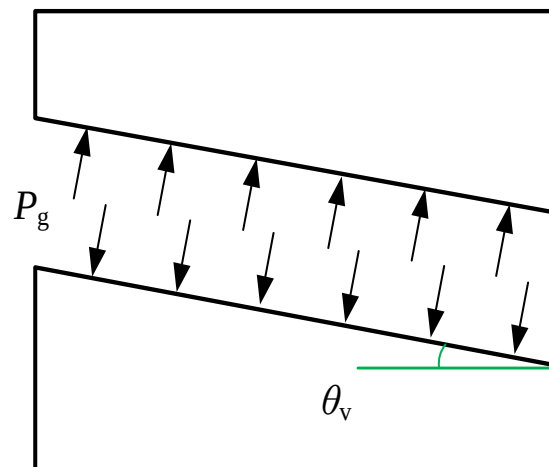
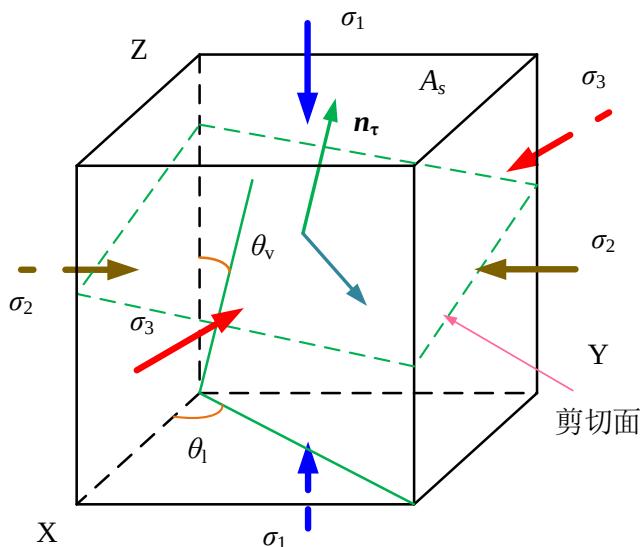


弹性模量对频率影响

在0.4~1.2GPa范围内，振幅降低趋势明显，在1.2~3.2GPa范围内振幅变化趋于平缓。应力波振动频率随弹性模量增加而提高，在相同弹性模量下随裂纹长度增加声波振动频率逐渐降低，降幅随长度增加逐渐减小；围压对声发射幅值具有促进作用，但抑制裂纹发展声发射事件减少，瓦斯对幅值有降低趋势增加了事件数，总体上对主频分布影响不大。

主要从摩擦滑移生电角度对煤岩自电位异常现象产生机制研究，作出如下假设：

- (1) 不考虑裂纹扩展过程的其他生电机理，伴随煤岩破裂产生的自由电荷均源于摩擦滑移；
- (2) 在应力逐级跌落过程为已形成的破裂面间剪切滑移形成滑动摩擦；
- (3) 块体忽略瓦斯引起的块体膨胀变形，其在裂隙间的作用力垂直于作用面，降低摩擦因数。



剪切面受载情况

块体会在各向作用下破裂面沿着最易发生滑动的方向摩擦滑移，发生相对运动的驱动力为下滑力与摩擦力的差值，沿着斜面产生的下滑力 F_s ：

$$F_s = \frac{(\sigma_1 \sin \theta_v - \sigma_2 \sin \theta_l \sin \theta_v - \sigma_3 \cos \theta_l \sin \theta_v) A_s}{\sin \theta_v}$$

引入瓦斯后： $F_s = \frac{(\sigma_1 \sin \theta_v - (\sigma_2 - P_g) \sin \theta_l \sin \theta_v - (\sigma_3 - P_g) \cos \theta_l \sin \theta_v) A_s}{\sin \theta_v}$

以单一裂隙为研究对象，两物体间发生剪切滑移的滑动摩擦力：

$$F_d = \zeta_0 z + \zeta_1 \frac{dz}{dt} + \zeta_2 \frac{dl_d}{dt}$$
$$v_d = \frac{dl_d}{dt} \quad \frac{dz}{dt} = v_d - \frac{|v_d|}{g(v_d)} z$$

同时固体沿斜面产生摩擦滑移的速度：

$$\frac{dl_d}{dt} = v_d = v_i - v_i \cos \left[\sqrt{(K_f / m_f) t} \right] + \frac{F_s - F_d}{\sqrt{(m_f / K_f)}} \sin \left[\sqrt{(K_f / m_f) t} \right]$$

应力跌落瞬间两接触面沿最易运动方向产生的相对位移 l_d 为:

$$l_d = \frac{\left(\sigma_1 \sin \theta_v - (\sigma_2 - P_g) \sin \theta_l \sin \theta_v - (\sigma_3 - P_g) \cos \theta_l \sin \theta_v \right) A_s}{\sin \theta_v} - \zeta_0 z$$

$$l_d = \frac{\left(\sigma_1 \sin \theta_v - (\sigma_2 - P_g) \sin \theta_l \sin \theta_v - (\sigma_3 - P_g) \cos \theta_l \sin \theta_v \right) A_s}{\sin \theta_v} - \zeta_0 z}{\zeta_2} t$$

$$l_d = \frac{2 \left[\left(\sigma_1 \sin \theta_v - (\sigma_2 - P_g) \sin \theta_l \sin \theta_v - (\sigma_3 - P_g) \cos \theta_l \sin \theta_v \right) A_s}{\sin \theta_v} - \zeta_0 z \right]}{\zeta_2 \sqrt{K_f / m_f}} \cdot \arctan \left[\frac{\zeta_2 \sqrt{K_f / m_f} + \tan \left(\frac{\sqrt{K_f / m_f}}{2} t \right)}{\sqrt{1 - \zeta_2^2 K_f / m_f}} \right]$$

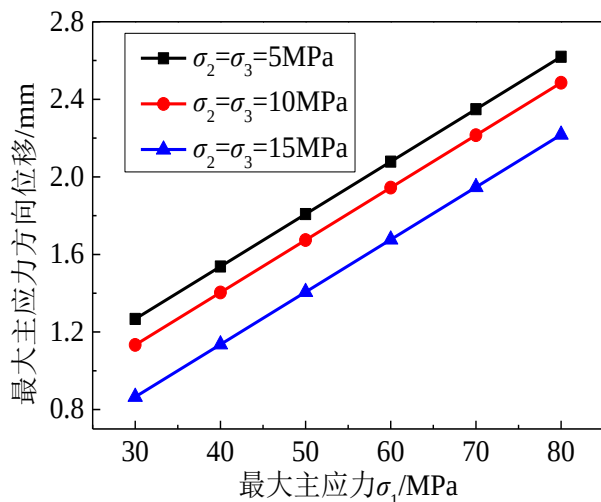
$$l_d = \frac{\zeta_1 z}{\sqrt{m_f / K_f} - \zeta_2 \sin \left(\sqrt{K_f / m_f} t \right)}$$

产生摩擦滑移后引起轴向变形导致最大主应力方向的载荷变化: $\Delta F = \frac{l_d \sin \theta_v}{l} E \cdot A_s$

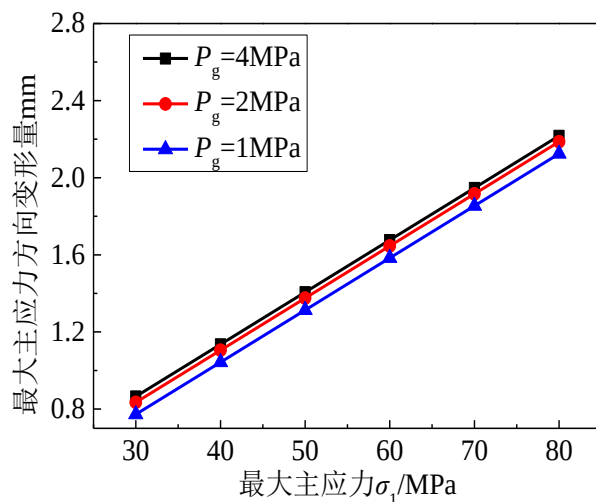
煤体受载压缩内部裂隙剪切滑移过程力-电耦合关系为:

$$n_q = \kappa \Delta F \quad \Rightarrow \quad n_q = \kappa \frac{l_d \sin \theta_v}{l} E \cdot A_s$$

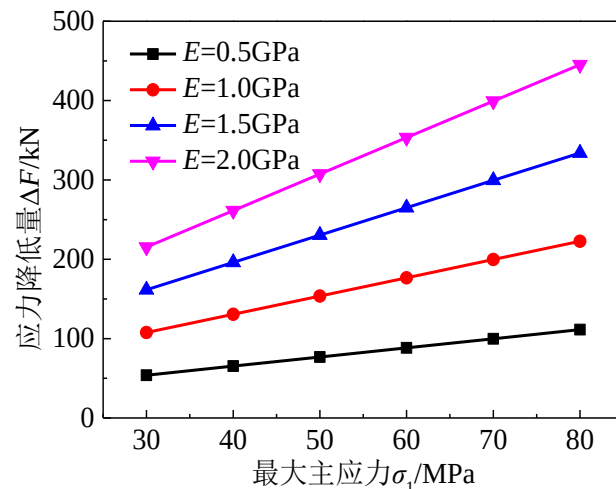
电荷信号力学机制分析



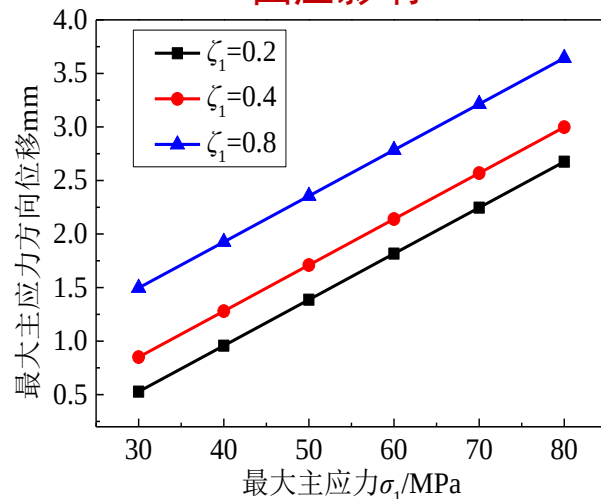
围压影响



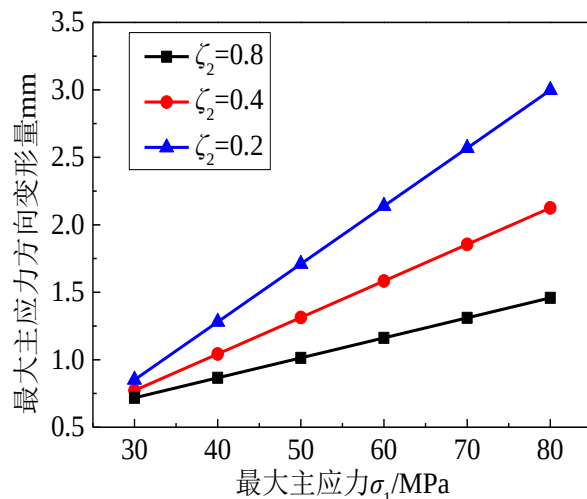
瓦斯压力



弹性模量



状态摩擦系数

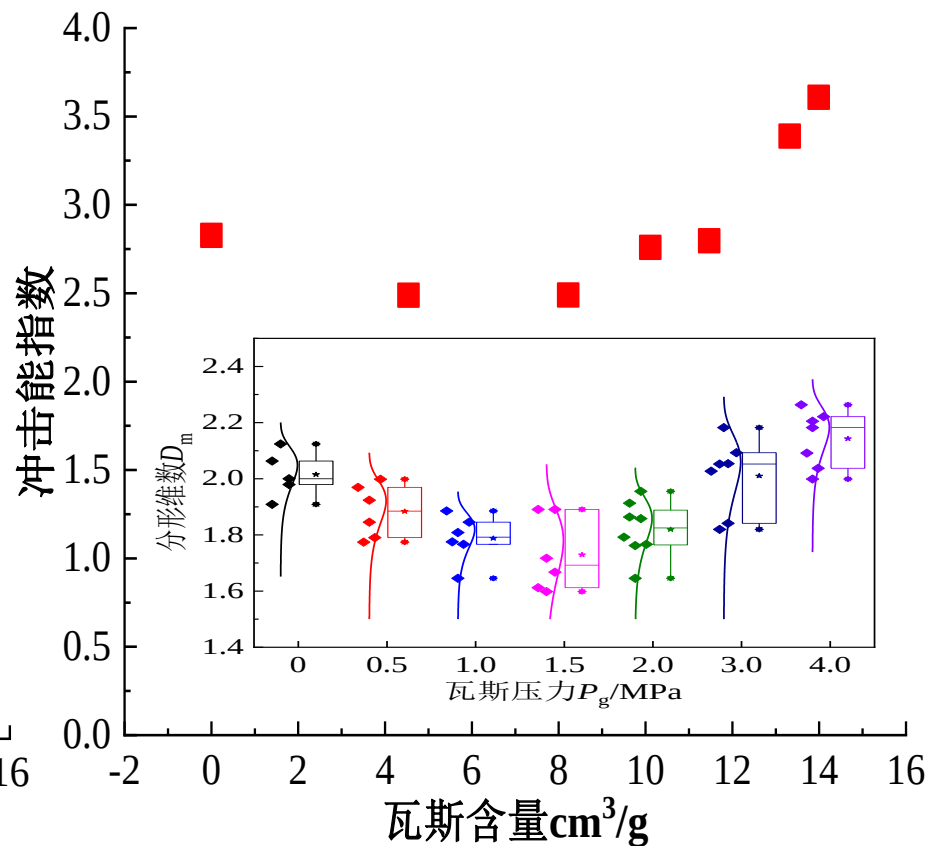
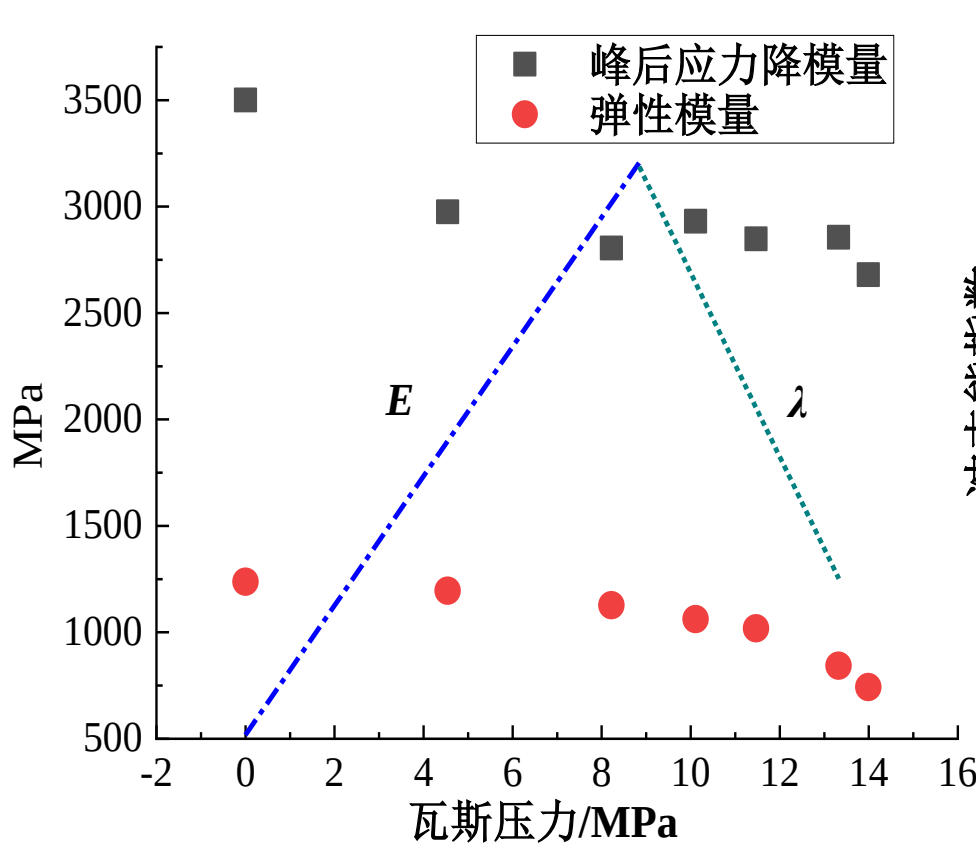


速度摩擦系数

摩擦滑移过程各参量对块体位移的影响

围压、状态摩擦系数、速度摩擦系数对摩擦滑移具有抑制作用
瓦斯对摩擦滑移具有促进作用；
在较高围压下电荷信号较低
而随瓦斯压力升高电荷信号波动增加。

1. 基于所开展的物理实验，获得了煤岩损伤、破坏过程声发射、电荷感应信号的时-频域分布特征及变化规律；
2. 明确了电荷感应信号的频域分布特点，构建了信号降噪、提纯算法；
3. 构建了声发射、电荷感应信号的力学关系，解释了声、电荷信号的时频域分布机制；
4. 所获得的声发射与电荷感应信号时频域演化规律及力学机制，为后续开展现场应用提供了理论和实验基础。



瓦斯对煤岩冲击能指数的影响

弹性能-耗散能-瓦斯膨胀能间的相互关系？

恳请各位专家批评指正！