



第一届全国煤矿冲击地压防治学术大会 河北 固安

矿山震动特征与冲击效应探讨

曹安业 教授



中国矿业大学 江苏省矿山地震监测工程实验室

“中矿大-安理工”冲击地压防治工程研究中心

2020年12月6日

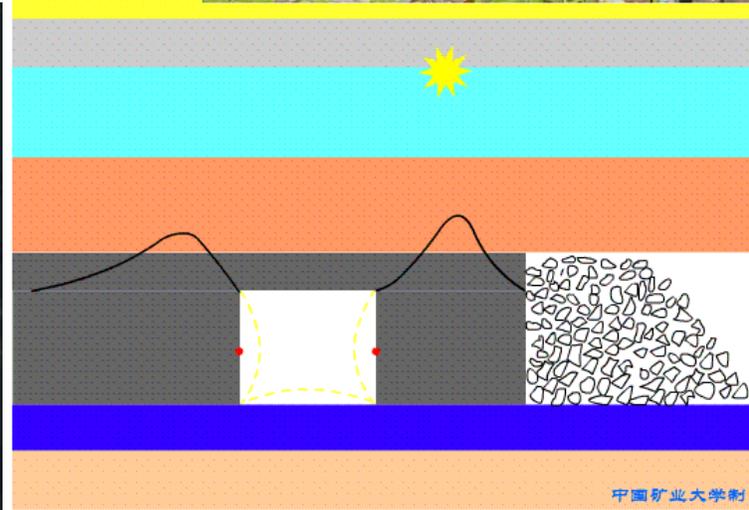


汇报提纲

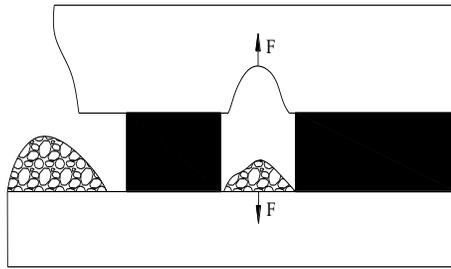
- **一 矿山震动现象**
- **二 矿震孕育机制与类型判识**
- **三 矿震矿震力学参量特征**
- **四 矿震的冲击扰动效应**

一 矿山震动现象

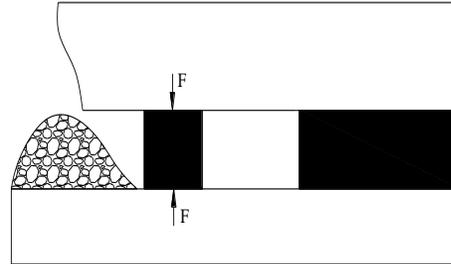
- ☑ 矿震普遍存在于矿山开采活动中，是采掘活动必然出现的动力现象，**无法消除**。
- ☑ 冲击地压的发生会伴生矿震现象，造成**矿震成为敏感话题**。当出现**有感矿震**时，易出现**社会恐慌**。
- ☑ **不是所有矿震都具有危险性**，需正确理性认识矿震现象。



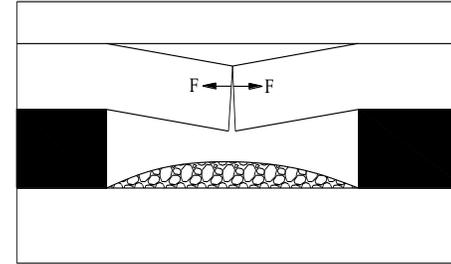
■ 矿震分类



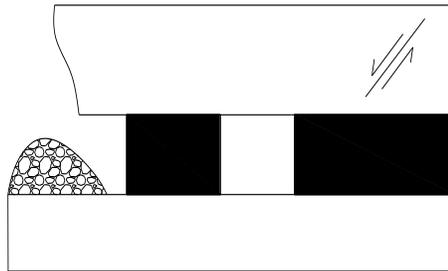
巷道顶板冒落



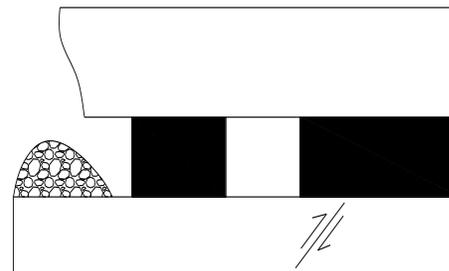
煤柱破坏



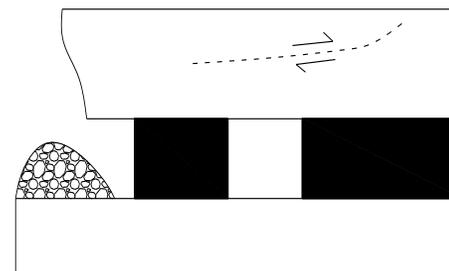
顶板张性断裂



顶板正断层滑移



底板逆断层滑移



近水平俯冲断层滑移

Gibowicz SJ, Kijko A. An introduction to mining seismology. San Diego: Academic Press, 1994.

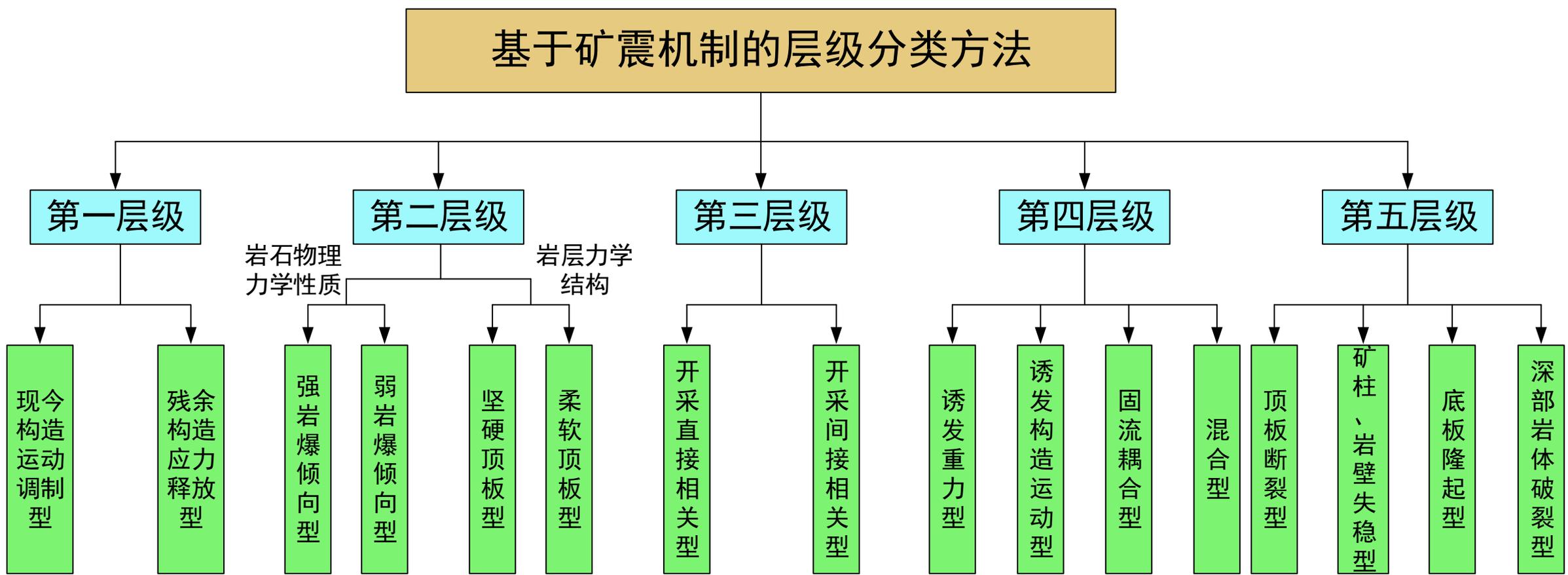
曹安业. 采动煤岩冲击破裂的震动效应及其应用研究, 2009.

■ 矿震分类

类型名称	能量主要来源	主要释放部位
煤体重力冲击型	上覆顶板	煤体
煤体构造冲击型	构造	煤体
煤岩混体冲击型	重力方式构造	煤体与顶板
厚顶板冲击型	构造	厚顶板
采空区老顶冲击型	大面积采空区和构造	砸层冒落
断层顶底板冲击型	断层	顶底板

张少泉，张兆平，杨懋源，等. 矿山冲击的地震学研究与应用，中国地震，1993.

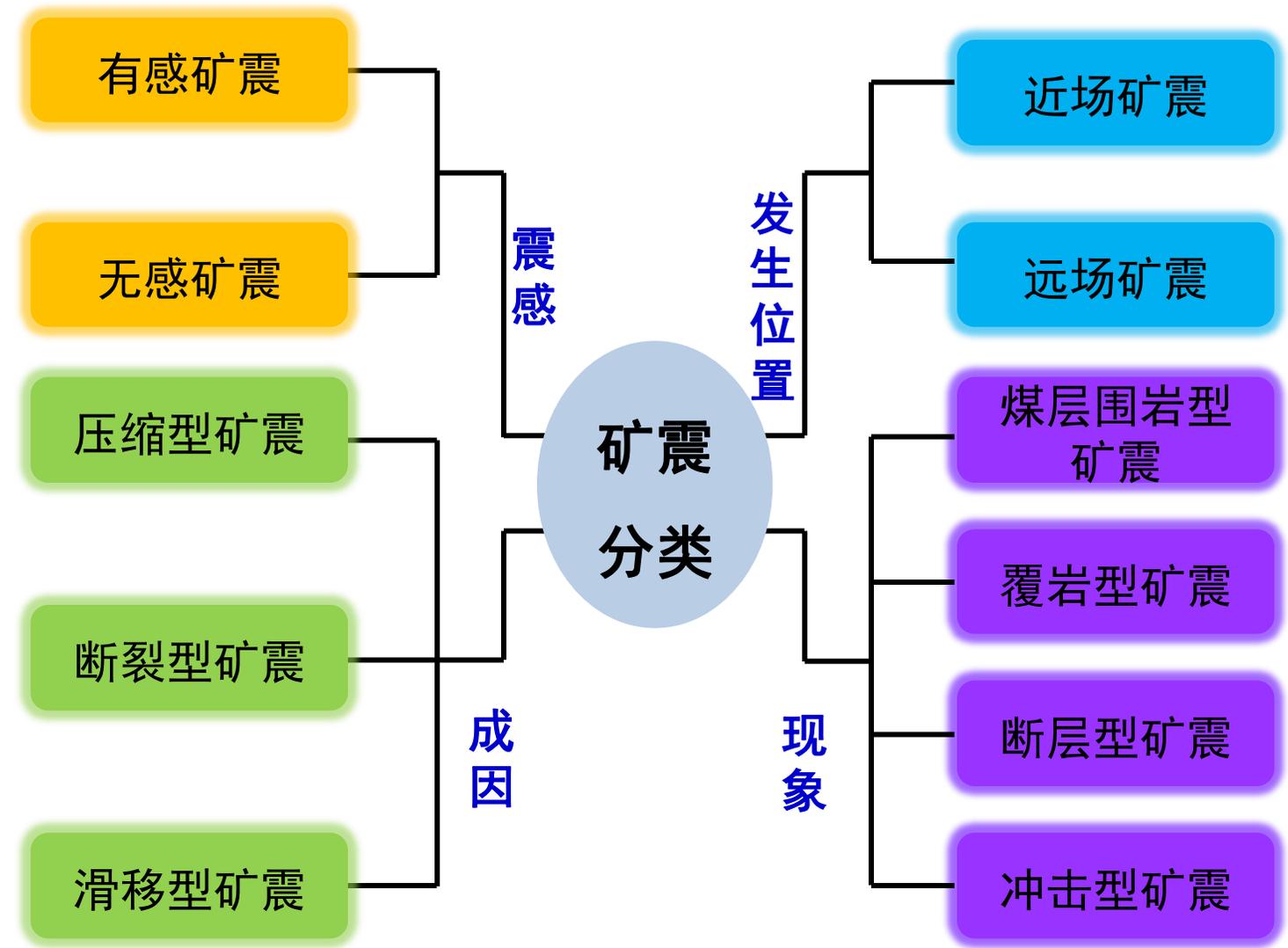
■ 矿震分类



李铁, 蔡美峰, 蔡明. 采矿诱发地震分类的探讨, 岩石力学与工程学报, 2006.

一 矿山震动现象

■ 矿震分类



— 矿山震动现象

✓ 煤炭资源地位重要，但冲击地压灾害增多

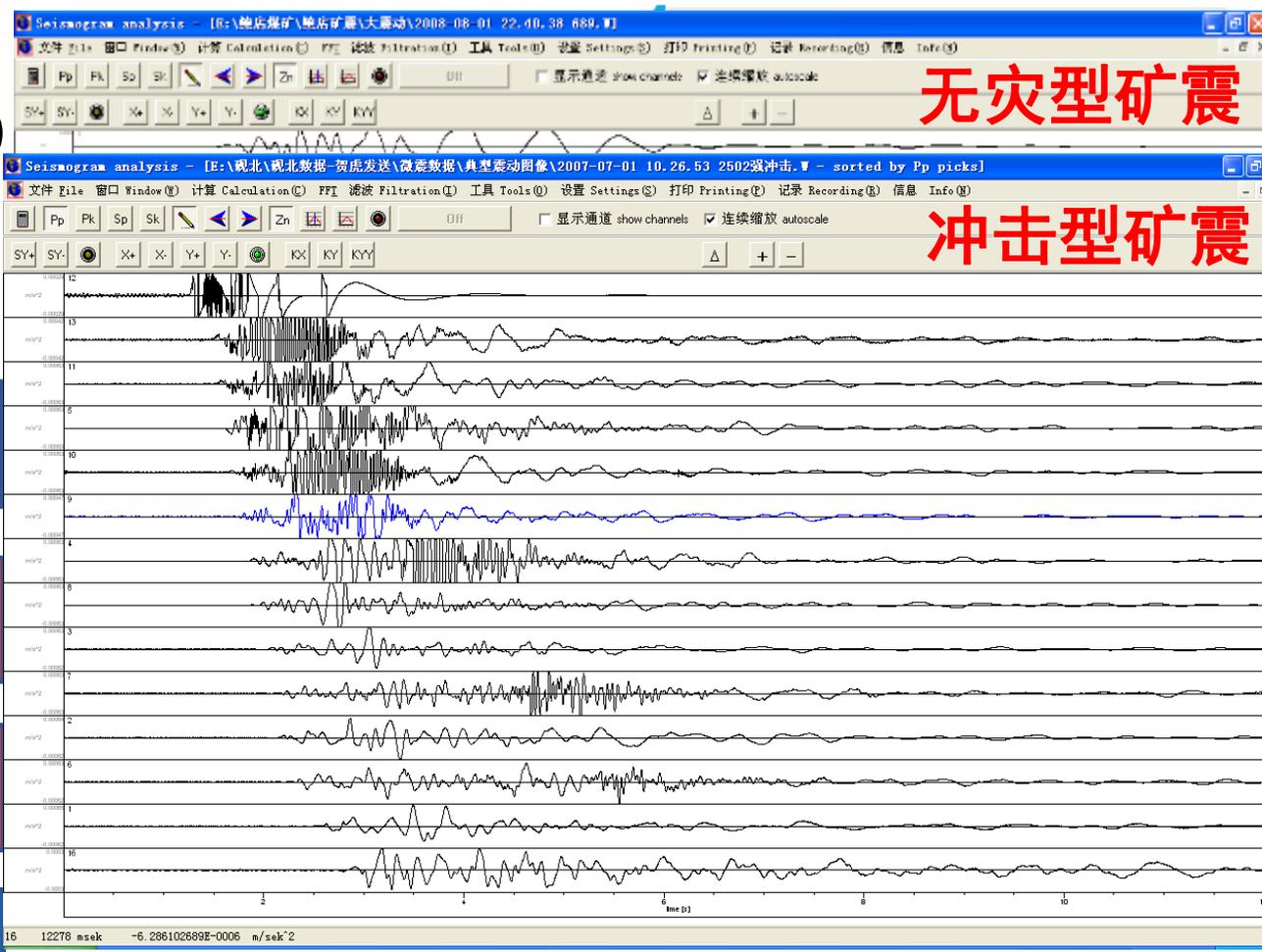
- 形势严峻：200+对冲击矿井
- 冲击原理：动静载叠加原理（动载+静载）
- 动载：矿山震动——矿震
- 矿震监测：微震监测技术

✓ 矿震信息研究具有必要性与可行性

□ 煤矿矿震如何分类与识别

□ 煤矿矿震信息深入挖掘与力学解释

□ 煤矿矿震的冲击扰动效应预测





汇报提纲

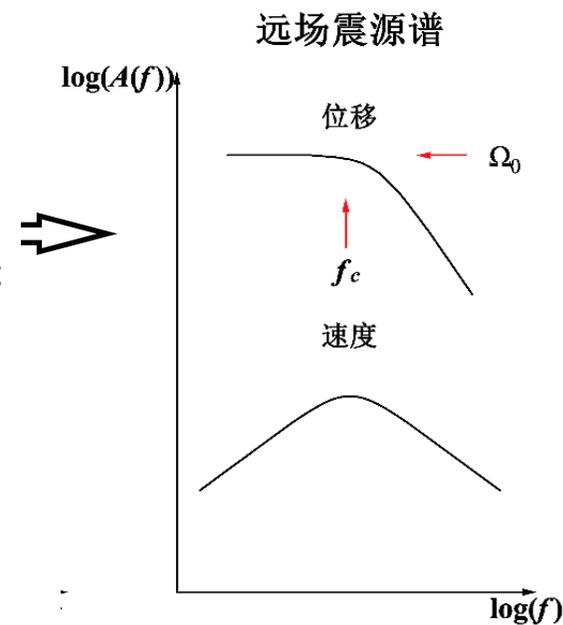
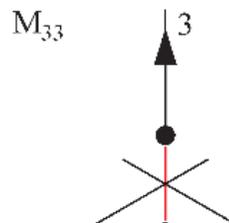
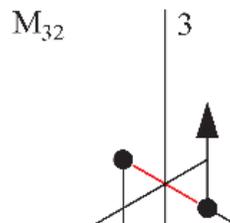
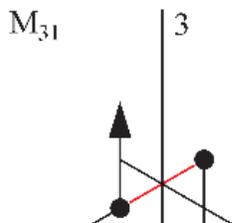
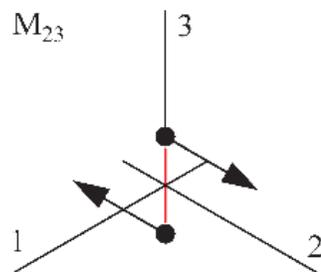
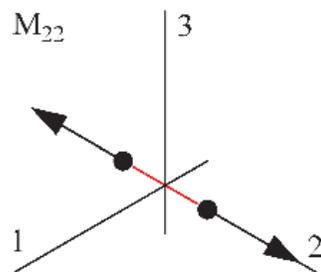
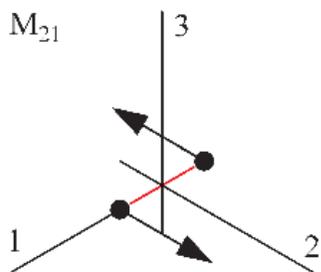
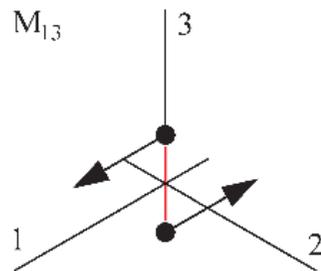
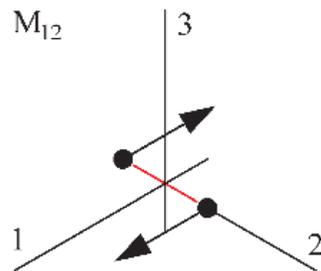
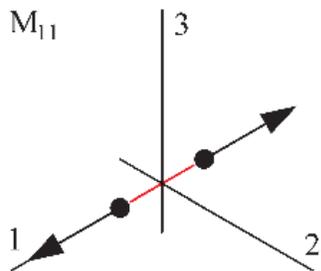
- 一 矿山震动现象
- 二 矿震孕育机制与类型判识
- 三 矿震矿震力学参量特征
- 四 矿震的冲击扰动效应

二 矿震孕育机制反演与类型判识

➤ 震源机制求解的矩张量基本理论

矿震震动波场可表示为震源矩张量与格林函数的时间褶积。

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \\ M_{31} & M_{32} \end{bmatrix}$$



二 矿震孕育机制反演与类型判识

矿震震动波场可表示为震源矩张量与格林函数的时间褶积。

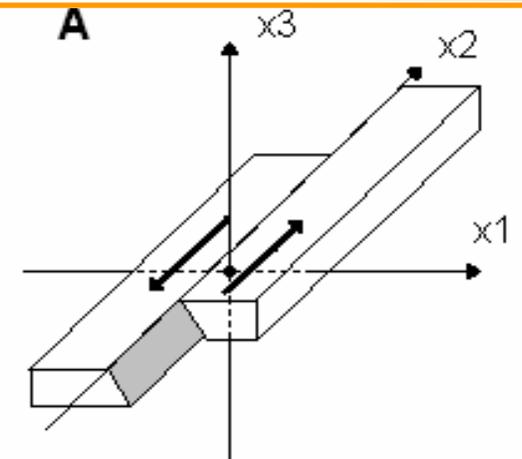
$$u_k(x, t) = M_{ij} [G_{ki,j} * s(t)] = M_{ij} * G_{ki,j}$$

$$u_k = \left(\frac{15\gamma_k\gamma_i\gamma_j - 3\gamma_k\delta_{ij} - 3\gamma_i\delta_{kj} - 3\gamma_j\delta_{ki}}{4\pi\rho} \right) \frac{1}{r^4} \int_{r/\alpha}^{r/\beta} \tau M_{ij}(t - \tau) d\tau$$

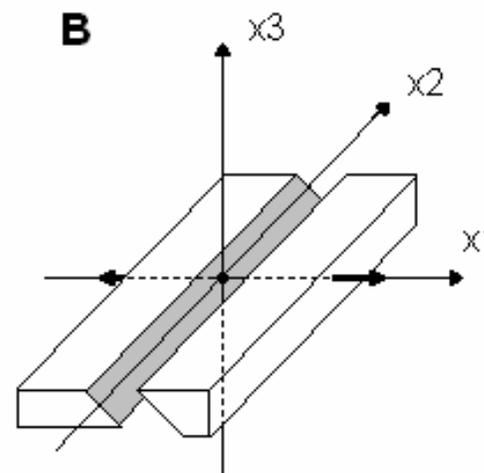
$$+ \left(\frac{6\gamma_k\gamma_i\gamma_j - \gamma_k\partial_{ij} - \gamma_i\partial_{kj} - \gamma_j\partial_{ki}}{4\pi\rho v_p^2} \right) \frac{1}{r^2} M_{ij} \left(t - \frac{r}{v_p} \right)$$

$$- \left(\frac{6\gamma_k\gamma_i\gamma_j - \gamma_k\partial_{ij} - \gamma_i\partial_{kj} - 2\gamma_j\partial_{ki}}{4\pi\rho v_s^2} \right) \frac{1}{r^2} M_{ij} \left(t - \frac{r}{v_s} \right)$$

$$+ \frac{\gamma_k\gamma_i\gamma_j}{4\pi\rho v_p^2 r} \dot{M}_{ij} \left(t - \frac{r}{v_p} \right) - \left(\frac{\gamma_k\gamma_i - \partial_{ki}}{4\pi\rho v_s^2 r} \right) \gamma_j \dot{M}_{ij} \left(t - \frac{r}{v_s} \right)$$



Shear: $m_{21} \neq 0$
 $m_{11}=m_{13}=m_{22}=m_{23}=m_{33}=0$



Tensile: $m_{11} \neq 0$
 $m_{12}=m_{13}=m_{22}=m_{23}=m_{33}=0$

二 矿震孕育机制反演与类型判识

$$\mathbf{u} = \mathbf{GM}$$



$$\begin{bmatrix} u_1^P \\ u_1^{SV} \\ u_1^{SH} \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n^P \\ u_n^{SV} \\ u_n^{SH} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_P^1 \gamma_1^1 \gamma_1^1 & 2k_P^1 \gamma_1^1 \gamma_2^1 & 2k_P^1 \gamma_1^1 \gamma_3^1 & k_P^1 \gamma_1^1 \gamma_2^1 & 2k_P^1 \gamma_2^1 \gamma_3^1 & k_P^1 \gamma_3^1 \gamma_3^1 \\ k_S^1 \theta_1^1 \gamma_1^1 & k_S^1 (\theta_1^1 \gamma_2^1 + \theta_2^1 \gamma_1^1) & k_S^1 (\theta_1^1 \gamma_3^1 + \theta_3^1 \gamma_1^1) & k_S^1 \theta_2^1 \gamma_2^1 & k_S^1 (\theta_2^1 \gamma_3^1 + \theta_3^1 \gamma_2^1) & k_S^1 \theta_3^1 \gamma_3^1 \\ k_S^1 \phi_1^1 \gamma_1^1 & k_S^1 (\phi_1^1 \gamma_2^1 + \phi_2^1 \gamma_1^1) & k_S^1 (\phi_1^1 \gamma_3^1 + \phi_3^1 \gamma_1^1) & k_S^1 \phi_2^1 \gamma_2^1 & k_S^1 (\phi_2^1 \gamma_3^1 + \phi_3^1 \gamma_2^1) & k_S^1 \phi_3^1 \gamma_3^1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ k_P^n \gamma_1^n \gamma_1^n & 2k_P^n \gamma_1^n \gamma_2^n & 2k_P^n \gamma_1^n \gamma_3^n & k_P^n \gamma_1^n \gamma_2^n & 2k_P^n \gamma_2^n \gamma_3^n & k_P^n \gamma_3^n \gamma_3^n \\ k_S^n \theta_1^n \gamma_1^n & k_S^n (\theta_1^n \gamma_2^n + \theta_2^n \gamma_1^n) & k_S^n (\theta_1^n \gamma_3^n + \theta_3^n \gamma_1^n) & k_S^n \theta_2^n \gamma_2^n & k_S^n (\theta_2^n \gamma_3^n + \theta_3^n \gamma_2^n) & k_S^n \theta_3^n \gamma_3^n \\ k_S^n \phi_1^n \gamma_1^n & k_S^n (\phi_1^n \gamma_2^n + \phi_2^n \gamma_1^n) & k_S^n (\phi_1^n \gamma_3^n + \phi_3^n \gamma_1^n) & k_S^n \phi_2^n \gamma_2^n & k_S^n (\phi_2^n \gamma_3^n + \phi_3^n \gamma_2^n) & k_S^n \phi_3^n \gamma_3^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{12} \\ M_{13} \\ M_{22} \\ M_{23} \\ M_{33} \end{bmatrix}$$

$$k_P^i = \frac{1}{4\pi\rho r_i v_p^3}$$

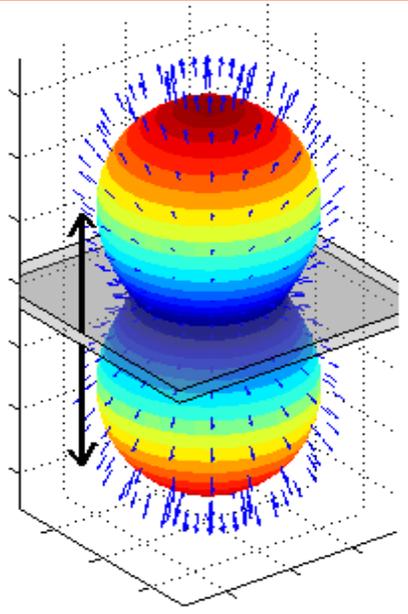
$$k_S^i = \frac{1}{4\pi\rho r_i v_s^3}$$

绝对矩张量反演

$$\mathbf{M} = \left[\mathbf{G}^T \mathbf{C}_D^{-1} \mathbf{G} \right]^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{C}_D^{-1} \mathbf{u}_{obs}$$

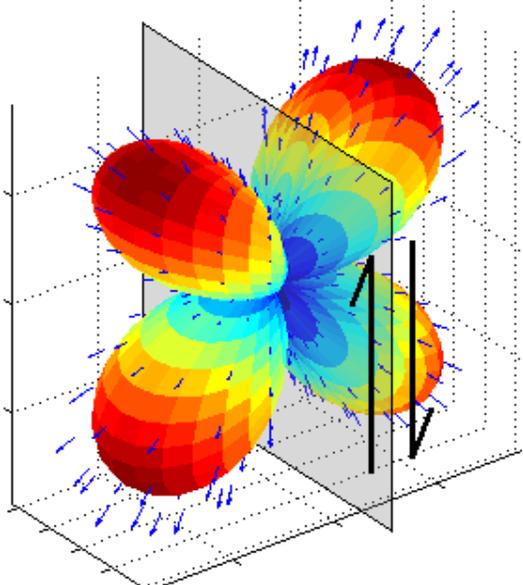
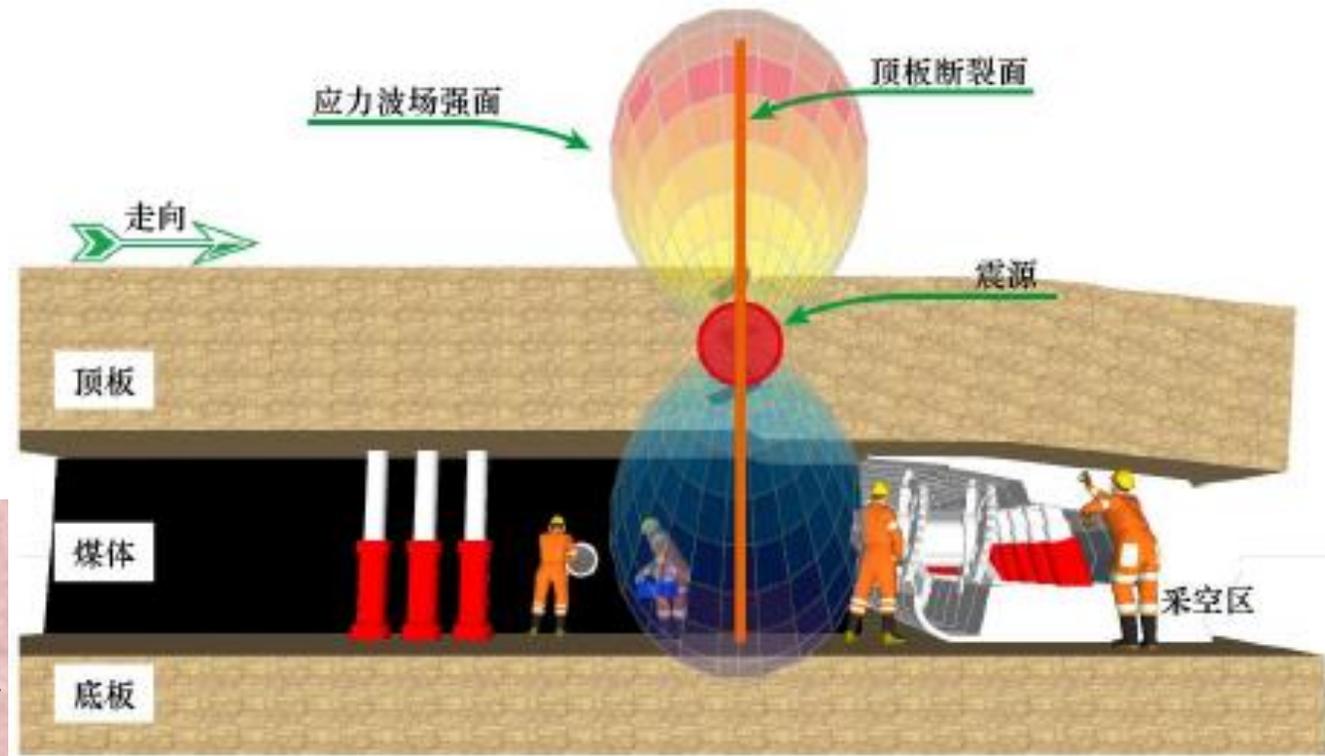
目前，采矿与岩土工程多基于各向同性与匀速的格林函数模型。

二 矿震孕育机制反演与类型判识



$$\left. \begin{aligned} u^P &= \frac{1}{4\pi\rho v_p^3 r} \cos^2 \theta M_{33} \\ u^{SV} &= -\frac{1}{4\pi\rho v_s^3 r} \sin \theta \cos \theta M_{33} \\ u^{SH} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

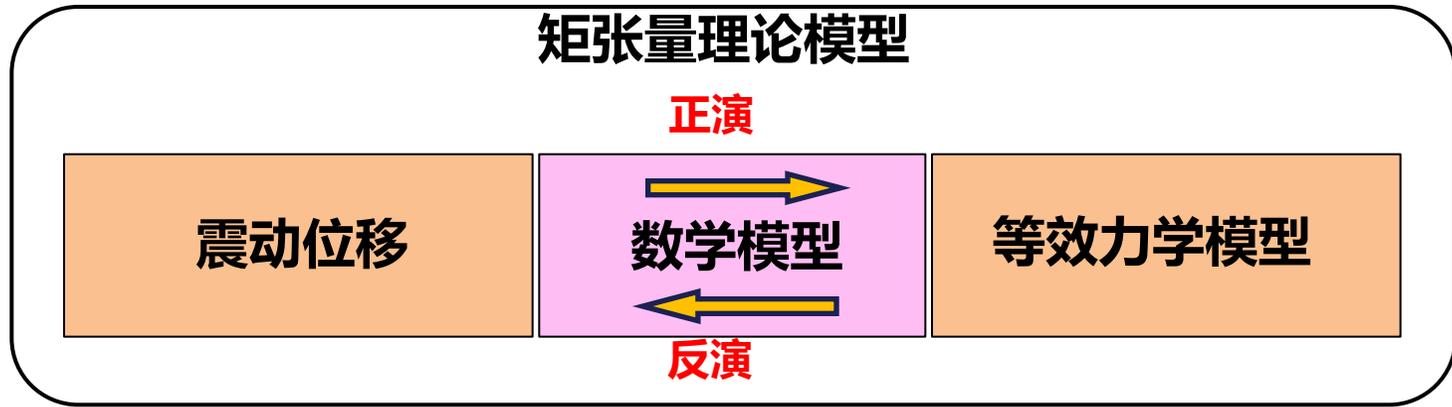
顶板冒落



$$\left. \begin{aligned} u^P &= \frac{1}{4\pi\rho v_p^3 r} (\cos^2 \theta - \frac{1}{2} \sin^2 \theta \sin 2\varphi) M_{33} \\ u^{SV} &= -\frac{1}{8\pi\rho v_s^3 r} \sin 2\theta (1 + \sin^2 \varphi) M_{33} \\ u^{SH} &= -\frac{1}{8\pi\rho v_s^3 r} \sin \theta \sin 2\varphi M_{33} \end{aligned} \right\}$$

断层滑移

二 矿震孕育机制反演与类型判识



↓
↓
↓

低频位移 (确定) 格林函数 (待定) 力偶模型 (确定)

绝对矩张量反演法 相对矩张量反演法 混合矩张量反演法

煤矿工程环境:

- ①采掘活动中煤岩体**应力环境复杂**
- ②煤岩层的**非均质性**

微震监测现状:

- ①微震台站**数量有限**
(16探头为主)
- ②**单分量探头**

➤ 相对矩张量反演条件分析

震源数与射线数条件:

最少震源、射线数: **总射线**不小于**4倍震源数**且**震源数大于台站数**

推荐震源、射线数: **震源数**不小于**13**且**单一台站射线数**不小于 $(1 + \sqrt{1 + 48m})/2$

常规**绝对矩张量法**的最少射线数: **任意震源形成的远场射线总数**不小于**6**

远场条件:

基于矿震位移场的近、中、远场项位移关系, 反演的远场条件即为:

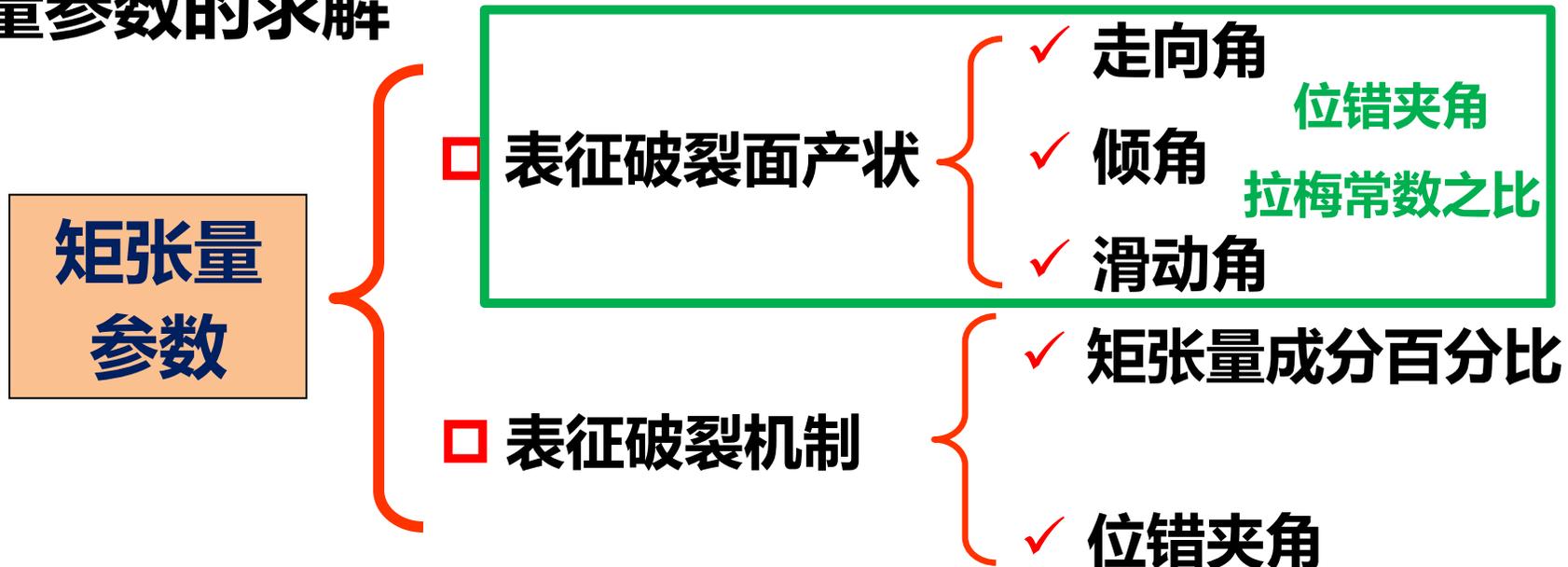
震源与台站的远场条件为距离 r 不小于**500m**

线性问题求解:

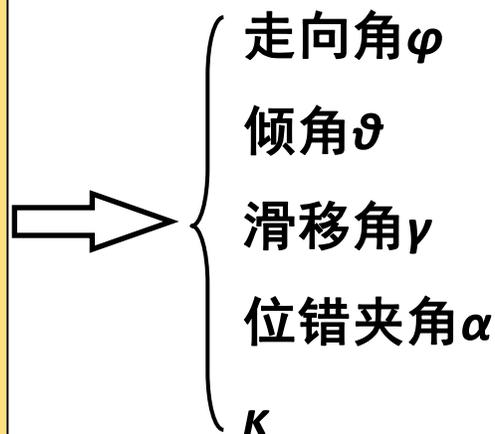
采用**奇异值分解**求解该线性问题。

➤ 矩张量参数的求解

粒子群算法求解



$$\begin{aligned}
 \bar{M}_{11} &= -\kappa \cos \alpha (\sin 2\phi \sin \theta \cos \gamma + \sin^2 \phi \sin 2\theta \sin \gamma) & + \sin \alpha (1 + 2\kappa \sin^2 \phi \sin^2 \theta) \\
 \bar{M}_{12} &= +\kappa \cos \alpha (\cos 2\phi \sin \theta \cos \gamma + 0.5 \sin 2\phi \sin 2\theta \sin \gamma) - \kappa \sin \alpha \sin 2\phi \sin^2 \theta \\
 \bar{M}_{13} &= -\kappa \cos \alpha (\cos \phi \cos \theta \cos \gamma + \sin \phi \cos 2\theta \sin \gamma) & + \kappa \sin \alpha \sin \phi \sin 2\theta \\
 \bar{M}_{22} &= +\kappa \cos \alpha (\sin 2\phi \sin \theta \cos \gamma - \cos^2 \phi \sin 2\theta \sin \gamma) & + \sin \alpha (1 + 2\kappa \cos^2 \phi \sin^2 \theta) \\
 \bar{M}_{23} &= -\kappa \cos \alpha (\sin \phi \cos \theta \cos \gamma - \cos \phi \cos 2\theta \sin \gamma) & - \kappa \sin \alpha \cos \phi \sin 2\theta \\
 \bar{M}_{33} &= +\kappa \cos \alpha \sin 2\theta \sin \gamma & + \sin \alpha (1 + 2\kappa \cos^2 \theta)
 \end{aligned}$$



➤ 矿震破裂机制判识的基本参数

① **矩张量成分百分比** 表征受力状态

——不同矩张量成分在矩张量中的占比

各向同性

拉张

剪切

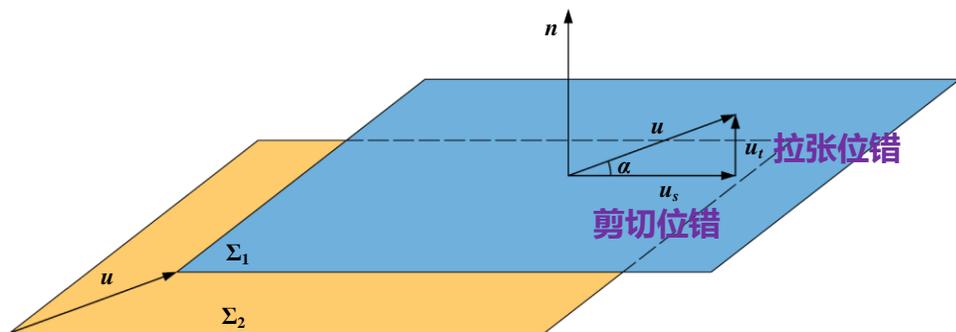
$$ISO\% = \text{tr}(\mathbf{M}) / 3 |M_3| \times 100\%$$

$$CLVD\% = 2\varepsilon(100\% - ISO\%)$$

$$DC\% = 100\% - ISO\% - CLVD\%$$

② **位错夹角** 表征运动状态

——剪切位错方向与拉张位错方向



$$\alpha = \arcsin\left(\frac{M_1 + M_3 - 2M_2}{M_3 - M_1}\right)$$

目前研究成果多以**矩张量成分百分比**作为判识震源破裂模式，以**位错夹角**作为判据的**相对较少**，主要讨论以位错夹角作为判据的破裂机制判识方法。

➤ 震源矩张量分解与破裂类型判识

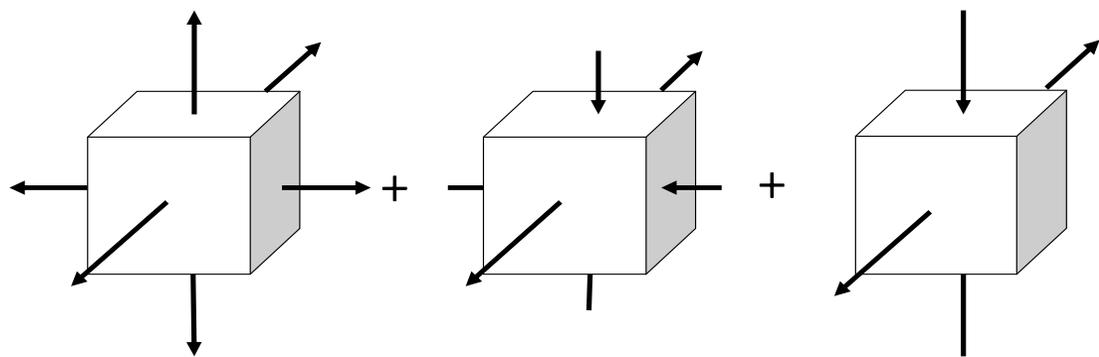
$$\begin{aligned}
 \mathbf{M} &= P\mathbf{I} - M_1' \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} + (M_3' + 2M_1') \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= P\mathbf{I} - M_1' (2\mathbf{a}_3\mathbf{a}_3 - \mathbf{a}_2\mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_1\mathbf{a}_1) + (M_3' + 2M_1') (\mathbf{a}_3\mathbf{a}_3 - \mathbf{a}_2\mathbf{a}_2) \\
 &= P\mathbf{I} + M_3' F (2\mathbf{a}_3\mathbf{a}_3 - \mathbf{a}_2\mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_1\mathbf{a}_1) + M_3' (1 - 2F) (\mathbf{a}_3\mathbf{a}_3 - \mathbf{a}_2\mathbf{a}_2)
 \end{aligned}$$

矩张量
成分占比

$$\text{ISO}\% = \frac{\text{tr}(\mathbf{M})}{3|M_3|} \times 100\%$$

$$\text{CLVD}\% = 2\varepsilon(100\% - \text{ISO}\%)$$

$$\text{DC}\% = 100\% - \text{ISO}\% - \text{CLVD}\%$$



Isotropic

CLVD

DC

破裂类型

剪切破裂 —— $\text{DC}\% \geq 60\%$

拉张破裂 —— $\text{DC}\% \leq 40\%$

混合破裂 —— $40\% \leq \text{DC}\% \leq 60\%$

➤ 矿震破裂机制的矩张量成分占比判识方法

剪切成分占比与 $\cos\alpha$ 关系表明:

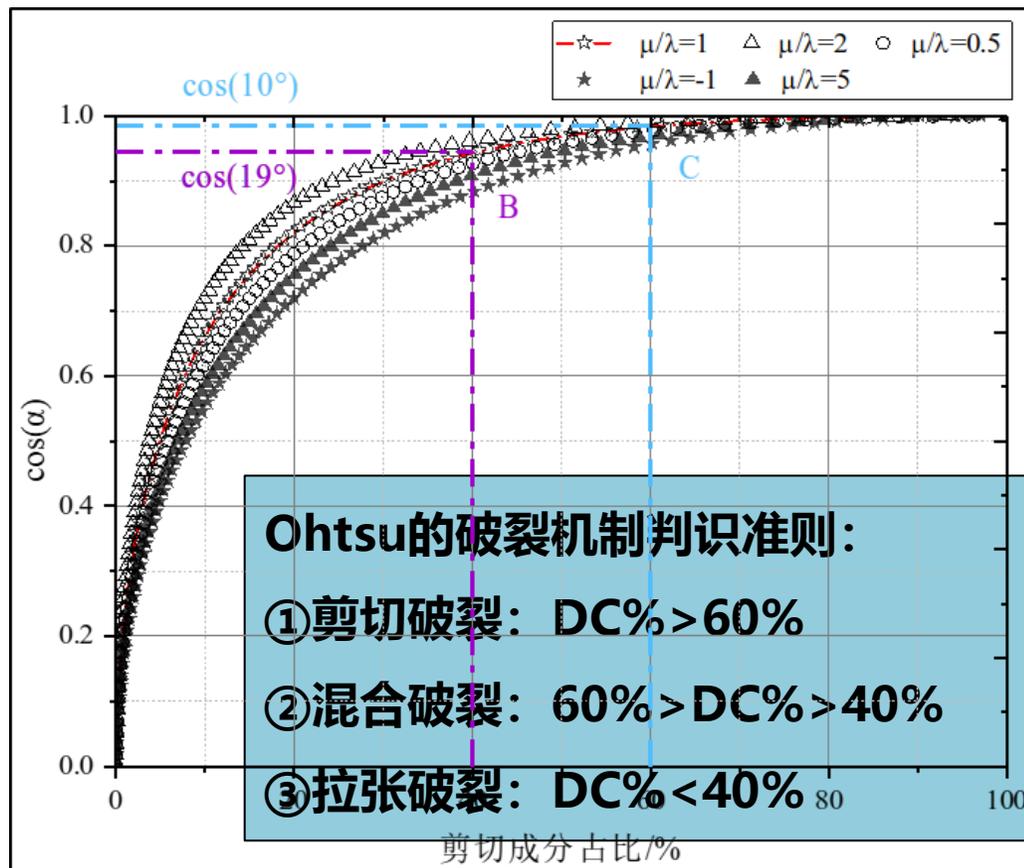
- ① 正相关关系;
- ② 非线性关系;
- ③ 与拉梅常数之比有关。



两种判识标准局部直接等价

B点: 60%剪切占比对应剪切位移占主导 ($\cot\alpha=5.7$)

A点: 40%剪切占比仍对应剪切位移占主导 ($\cot\alpha=2.9$)



剪切成分占比 VS $\cos\alpha$

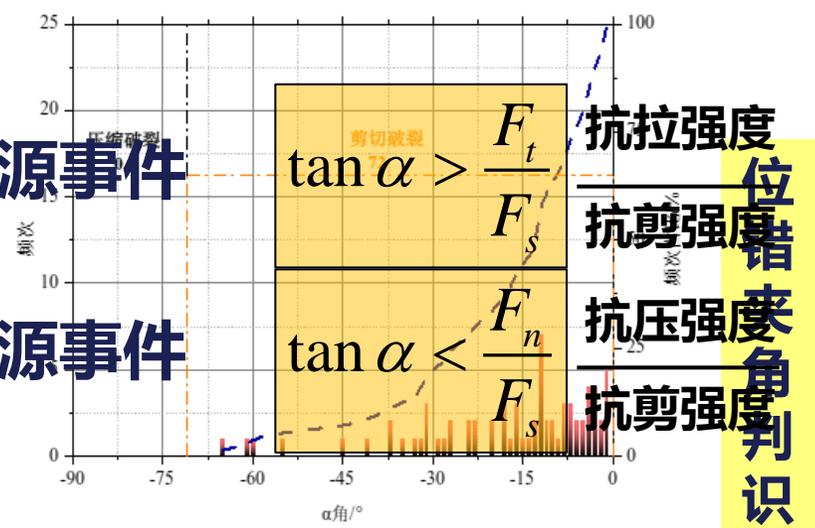
二 矿震孕育机制反演与类型判识

矿震破裂机制的位错夹角判识方法

准则:

华亭煤矿应用结果

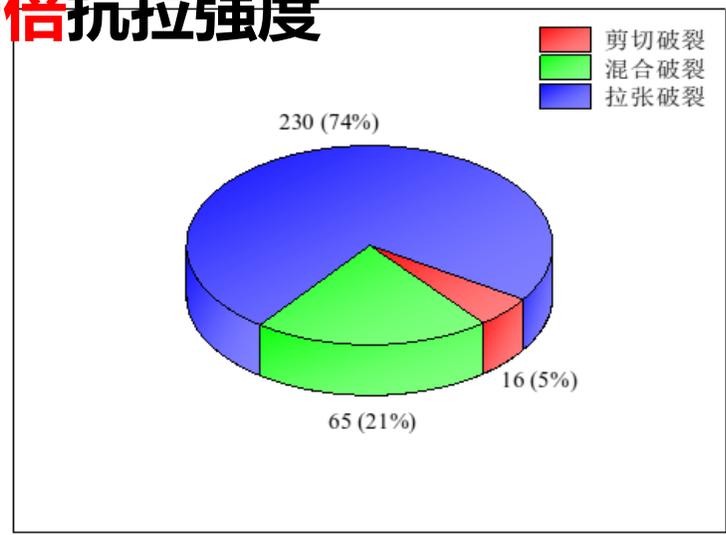
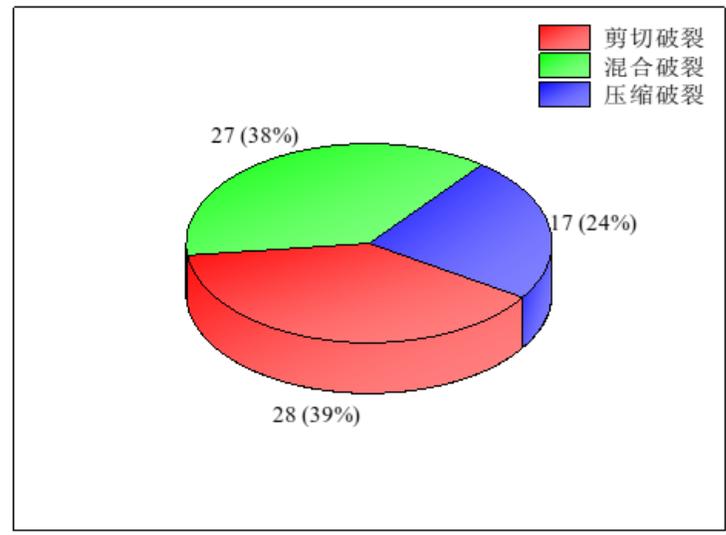
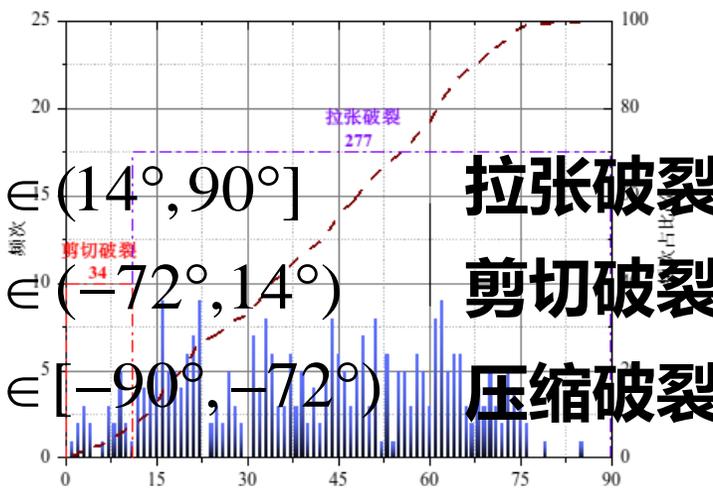
缩源事件 扩源事件



强度关系: 抗压强度 ≈ 3倍抗剪强度 ≈ 10倍抗拉强度

判据:

扩源事件 {
 $\alpha \in (14^\circ, 90^\circ)$ 拉张破裂
 $\alpha \in (-72^\circ, 14^\circ)$ 剪切破裂
 $\alpha \in [-90^\circ, -72^\circ)$ 压缩破裂



剪切成分占比判识结果



汇报提纲

- 一 矿山震动现象
- 二 矿震孕育机制与类型判识
- 三 矿震矿震力学参量特征
- 四 矿震的冲击扰动效应

➤ 煤矿矿震震源力学参量分类

ρ 介质密度
 R 震源台站距离
 Ω_0 低频位移幅值

震源力学参量

F 辐射因子
 f_c 拐角频率
 E_s 辐射能量

□ 表征**破裂强度**

✓ 地震矩

$$M_0 = \frac{4\pi\rho c^3 R\Omega_0}{F}$$

✓ 辐射能量

□ 表征**扰动规模**

✓ 震源半径

$$r_c = \frac{2.43c}{2\pi f_c}$$

✓ 视体积

$$v_a = \frac{M_0^2}{2\mu E_s}$$

□ 表征**破裂面处**

应力调整

✓ 应力降

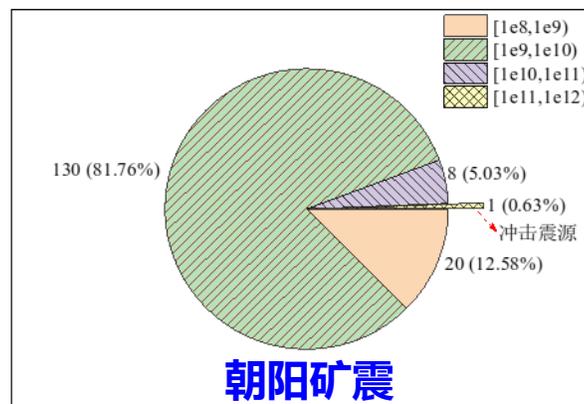
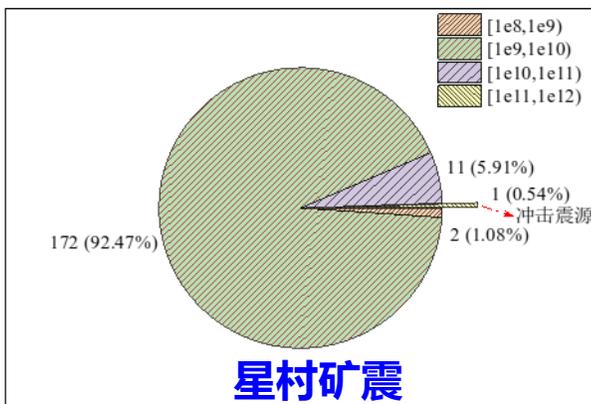
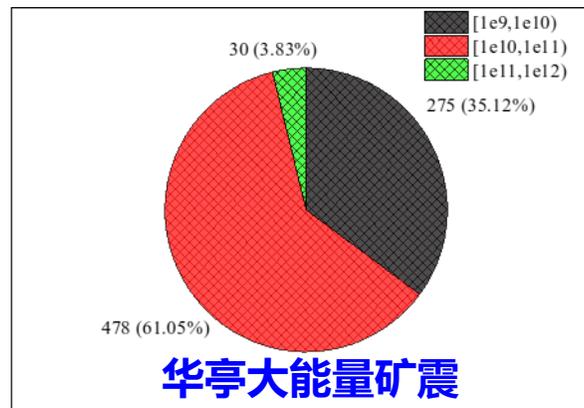
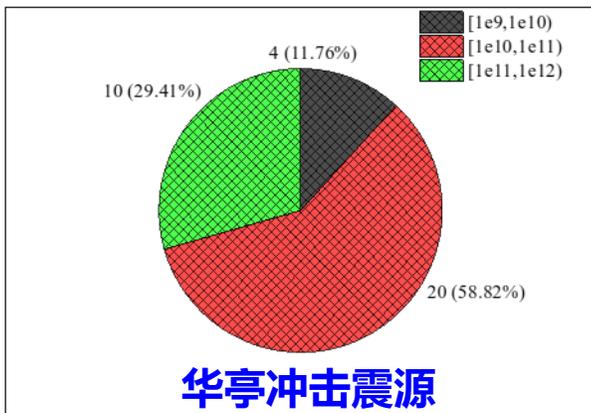
$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r_c^3}$$

✓ 视应力

$$\sigma_{app} = \mu \frac{E_s}{M_0}$$

➤ 煤矿矿震关键震源力学参量分布特征

□ 表征**破裂强度**的震源力学参量分布特征



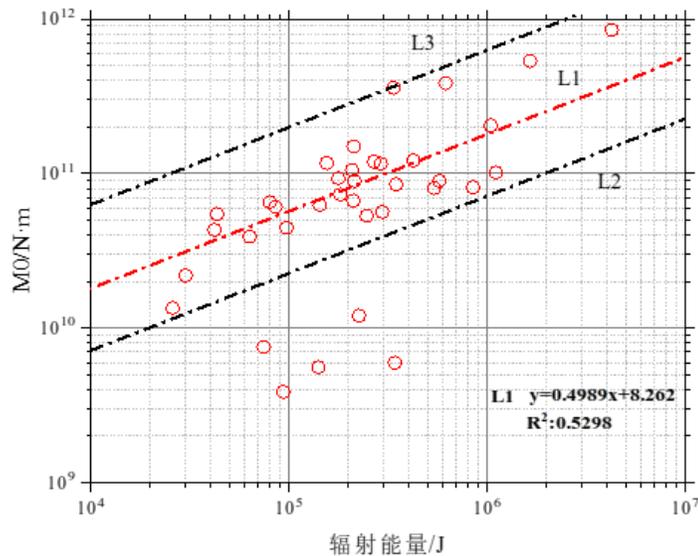
结果表明:

- ①地震矩主要介于 $10^9 \sim 10^{11}$ N·m;
- ②冲击型矿震往往具有更高的地震矩。

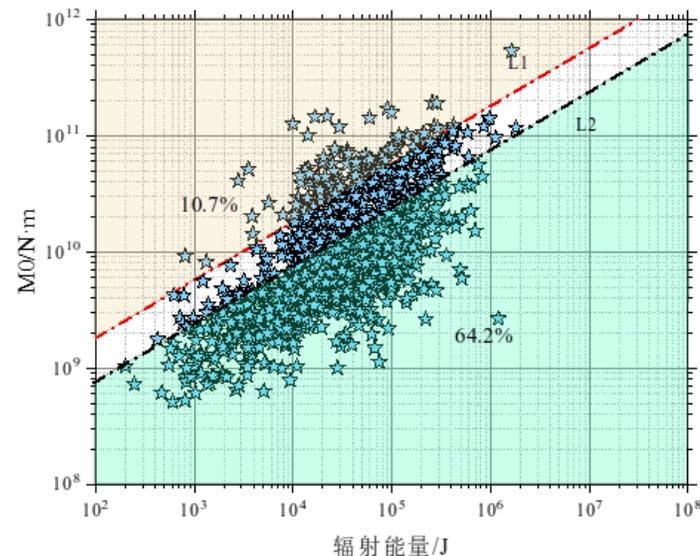
➤ 煤矿矿震关键震源力学参量分布特征

□ 表征**破裂强度**的震源力学参量相关关系

辐射能量 VS 地震矩



冲击型矿震

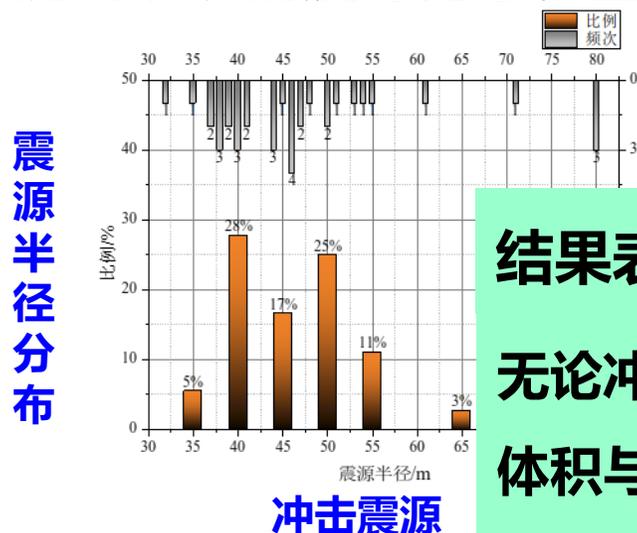


无灾型矿震

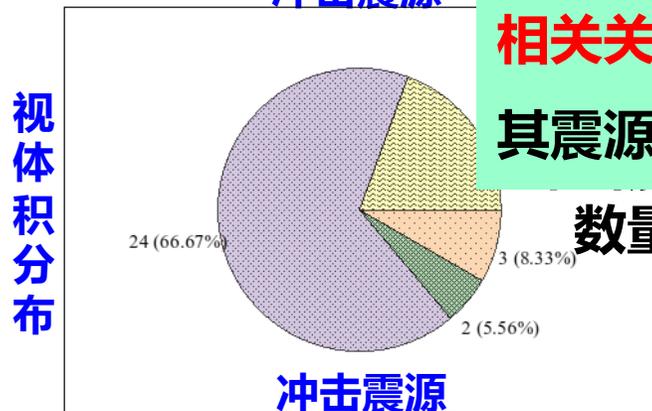
- ① **正相关的对数线性**关系；
- ② 震源强度关系是诱发冲击显现的**必要**而非充分条件；
- ③ 可从能量与地震矩两个角度判识震源的相对危险性。

➤ 煤矿矿震关键震源力学参量分布特征

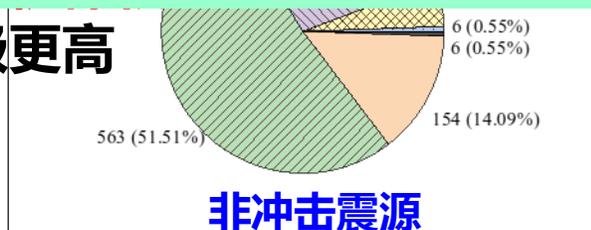
□ 表征**扰动规模**的震源力学参量分布特征



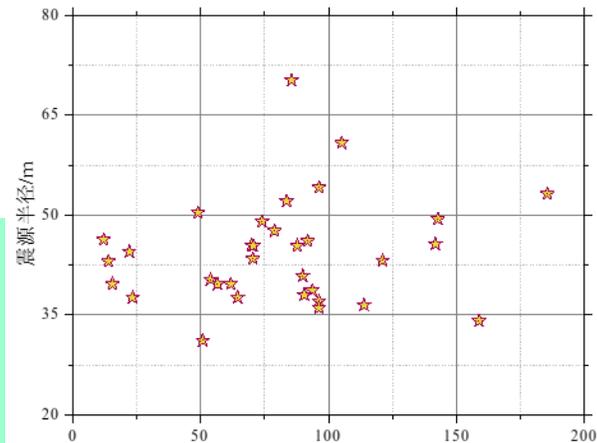
结果表明：
 无论冲击震源还是非冲击震源，视体积与震源半径之间**不存在明显的相关关系**，即对于同一水平视体积，其震源半径具有极为分散的范围



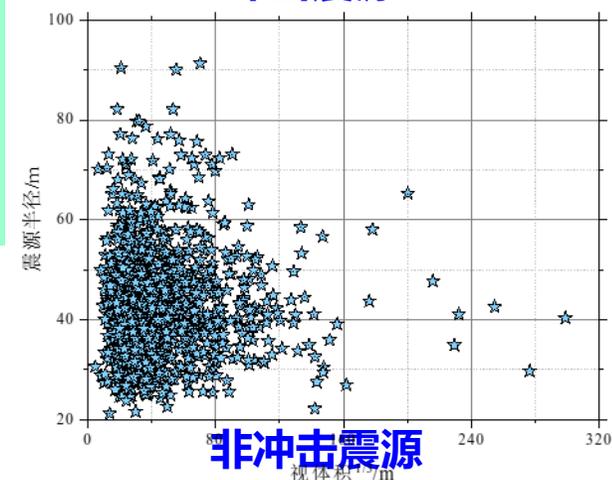
数量级更高



视体积^{1/3}VS震源半径



冲击震源



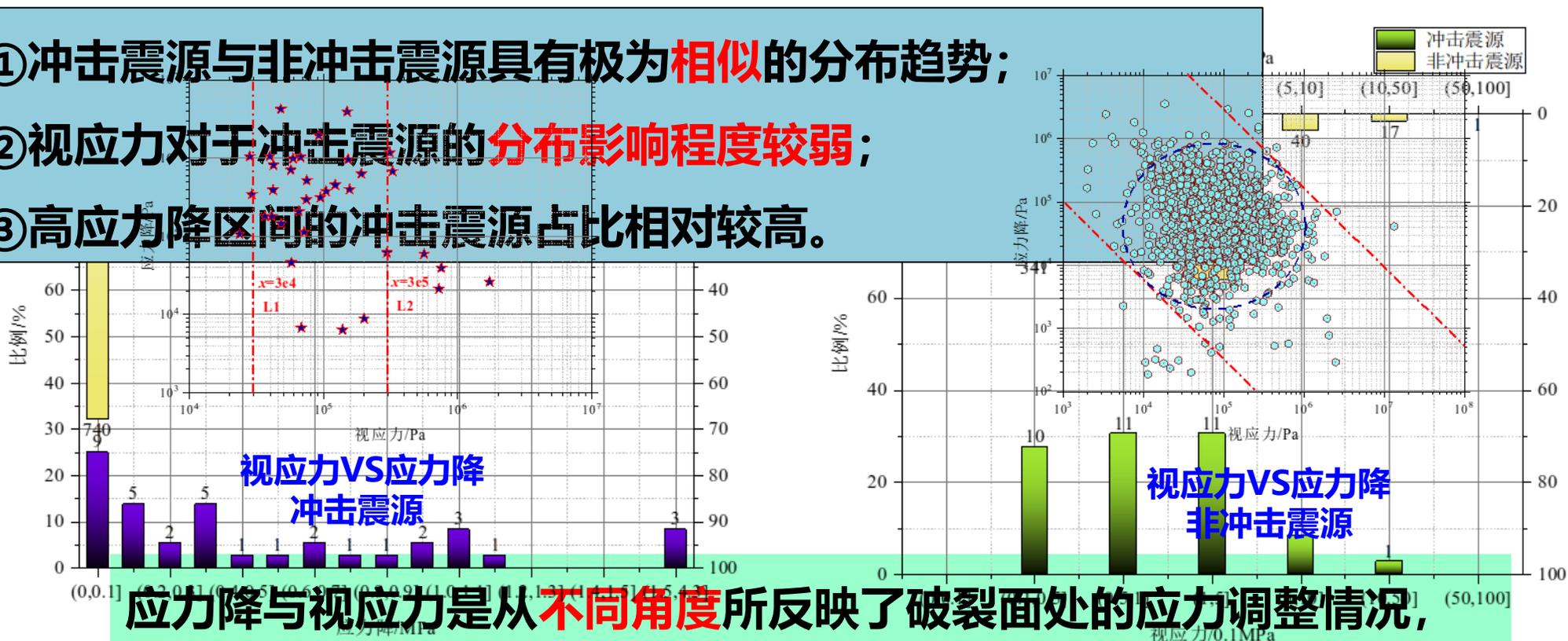
非冲击震源

三 矿震震源力学参量特征

➤ 煤矿矿震关键震源力学参量分布特征

□ 表征破裂面处**应力调整**的震源力学参量分布特征

- ① 冲击震源与非冲击震源具有极为**相似**的分布趋势；
- ② 视应力对于**冲击震源**的**分布影响程度较弱**；
- ③ 高应力降区间的**冲击震源占比**相对较高。

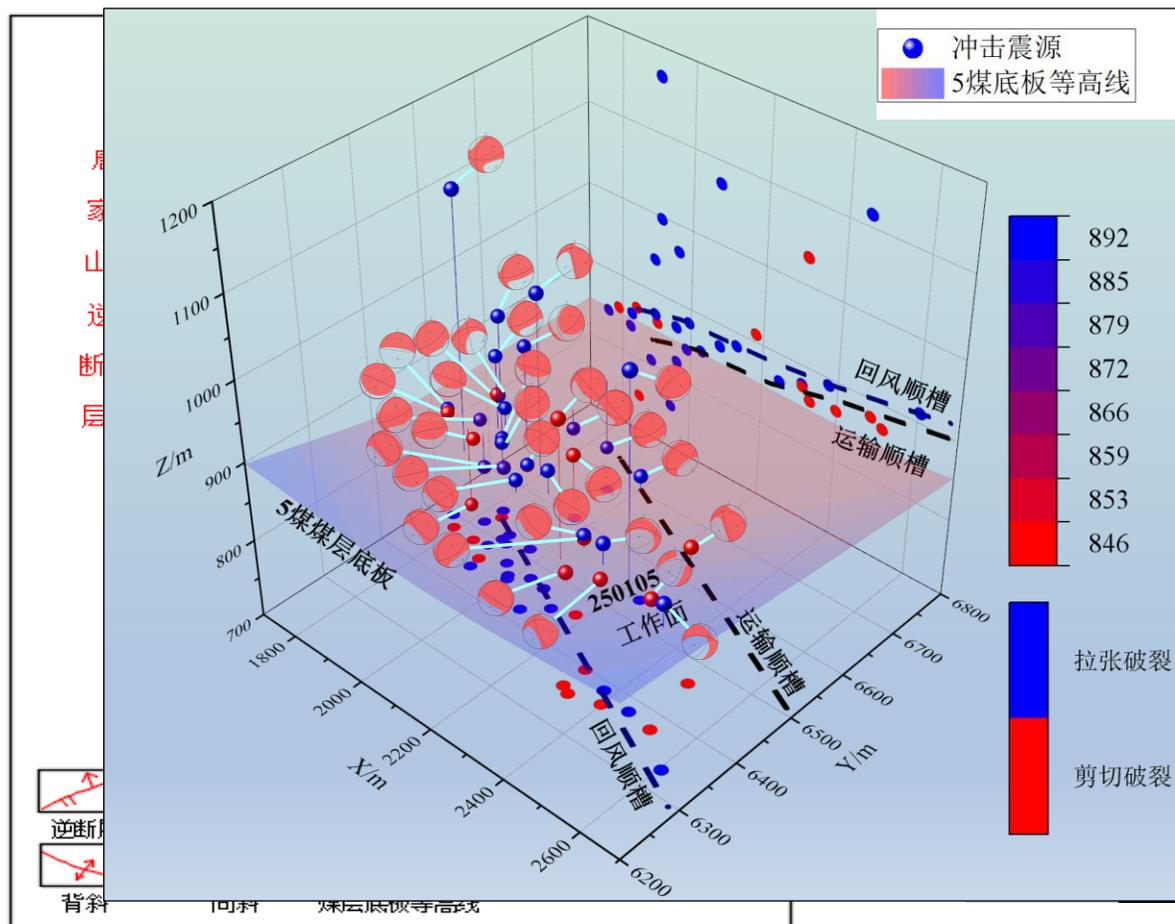


应力降与视应力是从**不同角度**所反映了破裂面处的应力调整情况，
 两者在表征震源破裂处的应力调整是**相互独立**的。

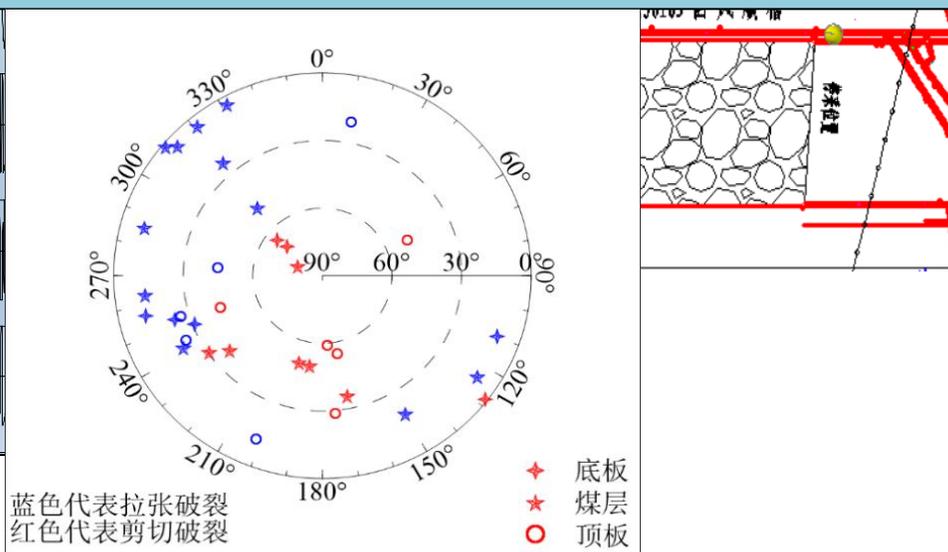
应力降分布情况

视应力分布情况

褶皱构造区矿震震源机制与力学参量响应规律

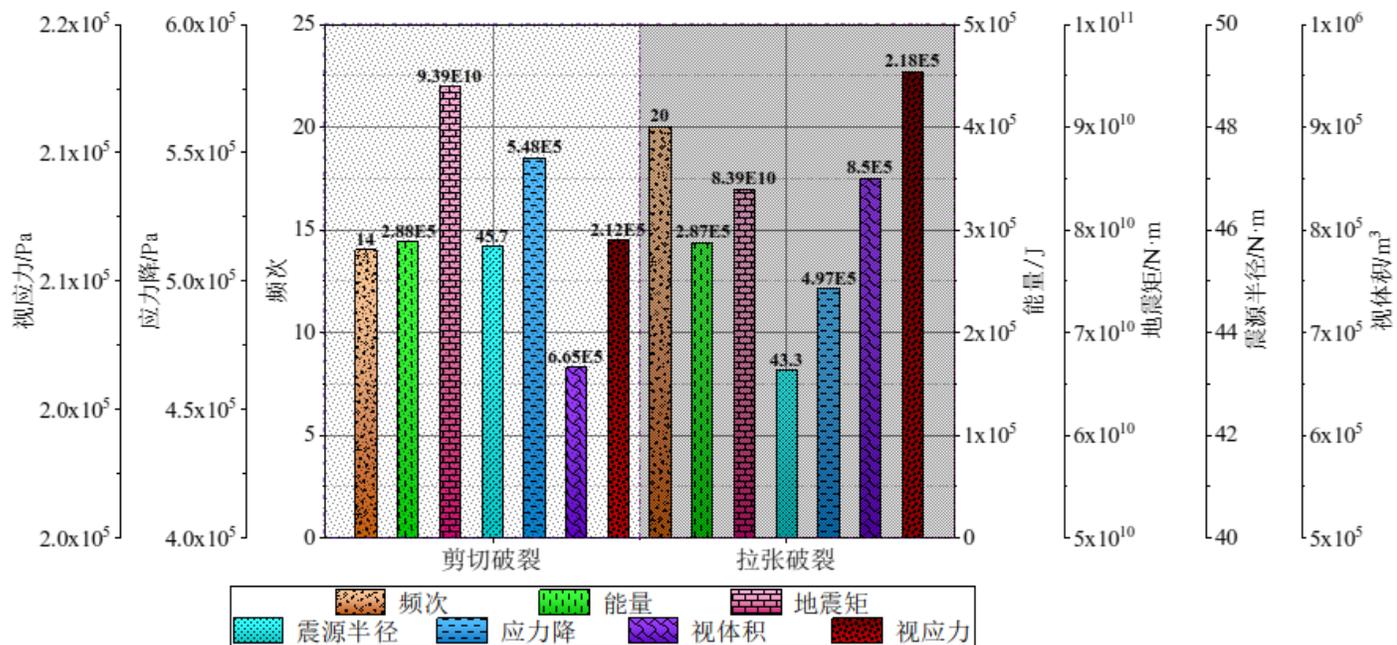


- ① 破裂形式以拉张破裂占主导;
- ② 顶板冲击震源多为拉张破裂;
- ③ 煤层及低位顶底板的冲击震源破裂机制及诱因相对复杂。



冲击震源破裂机制判识结果

褶皱构造区矿震震源机制与力学参量响应规律

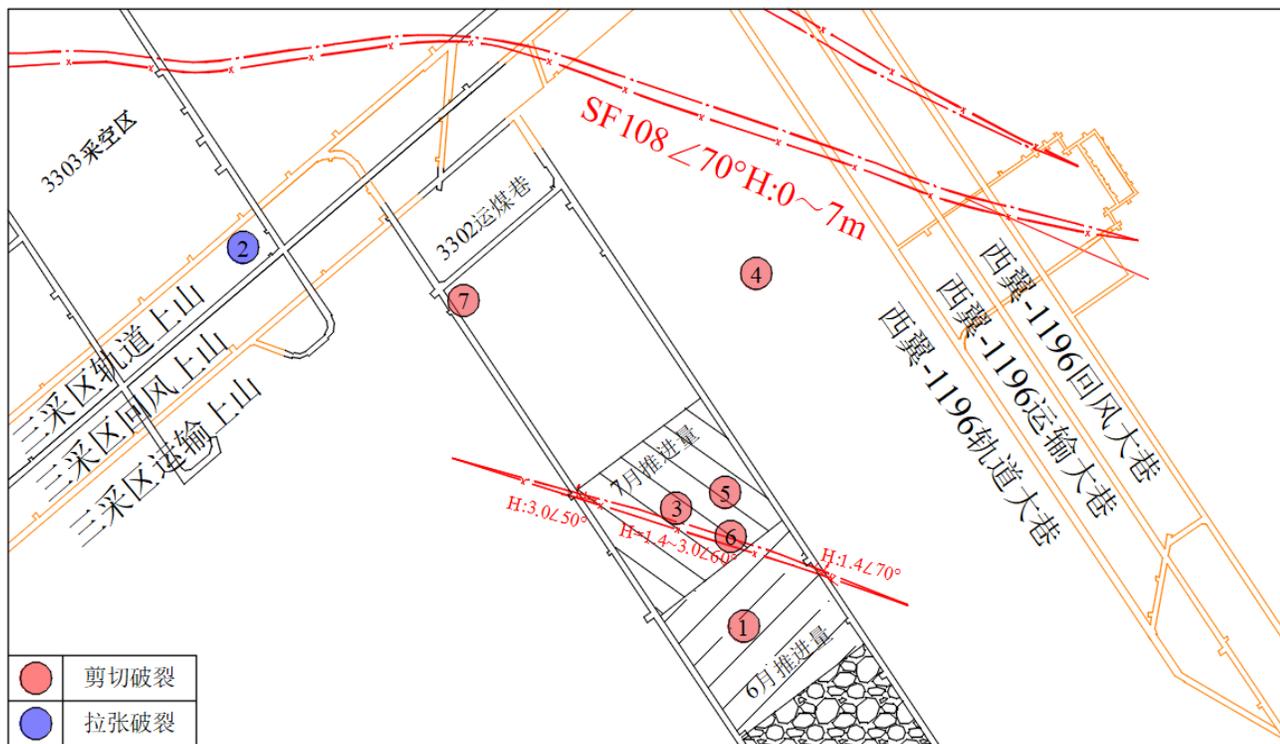


- ① 平均震源强度相差不大;
- ② 平均视体积 → 明显差距;
- ③ 平均应力降与视应力上差距较小。

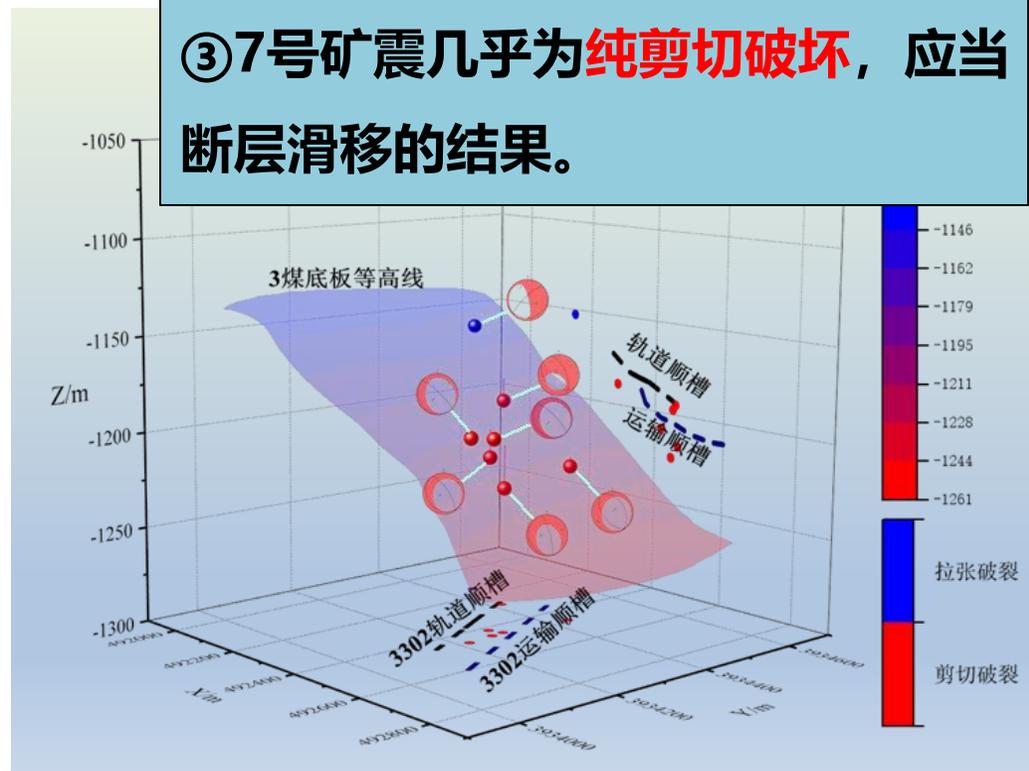
不同破裂机制震源的震源力学参量对比结果

□ 深埋断层构造区矿震震源机制与力学参量响应规律

- ① 破裂形式以**剪切破裂**占主导;
- ② 3、5、6号矿震受断层滑移影响的**剪切破裂**;
- ③ 7号矿震几乎为**纯剪切破坏**, 应当断层滑移的结果。

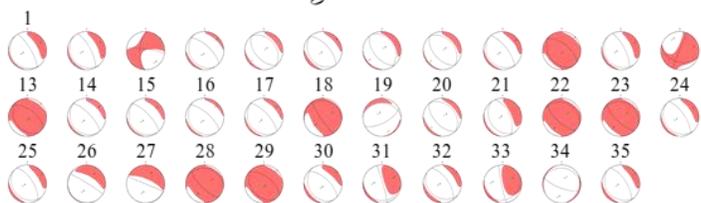
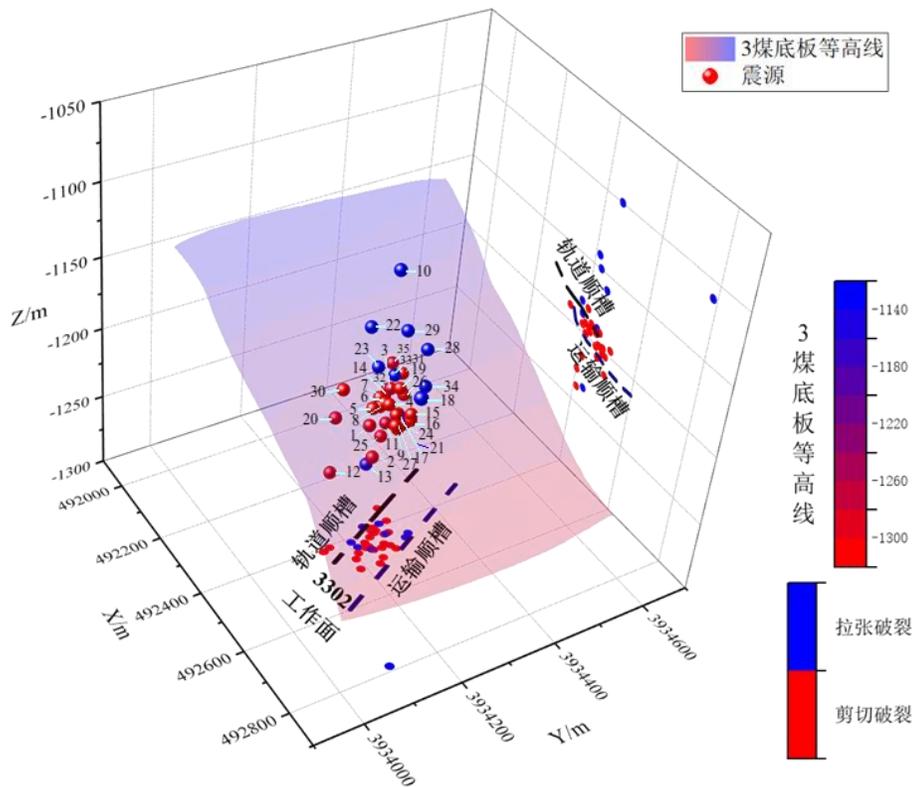


星村煤矿3302工作面布置图



冲击震源与强危险性矿震
破裂类型判识结果

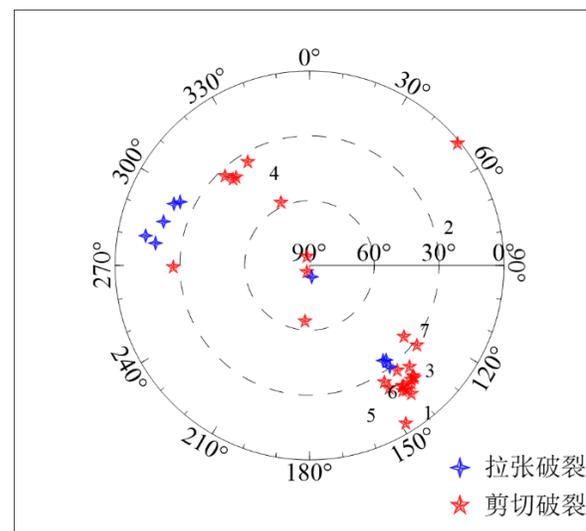
□ 深埋断层构造区矿震震源机制与力学参量响应规律



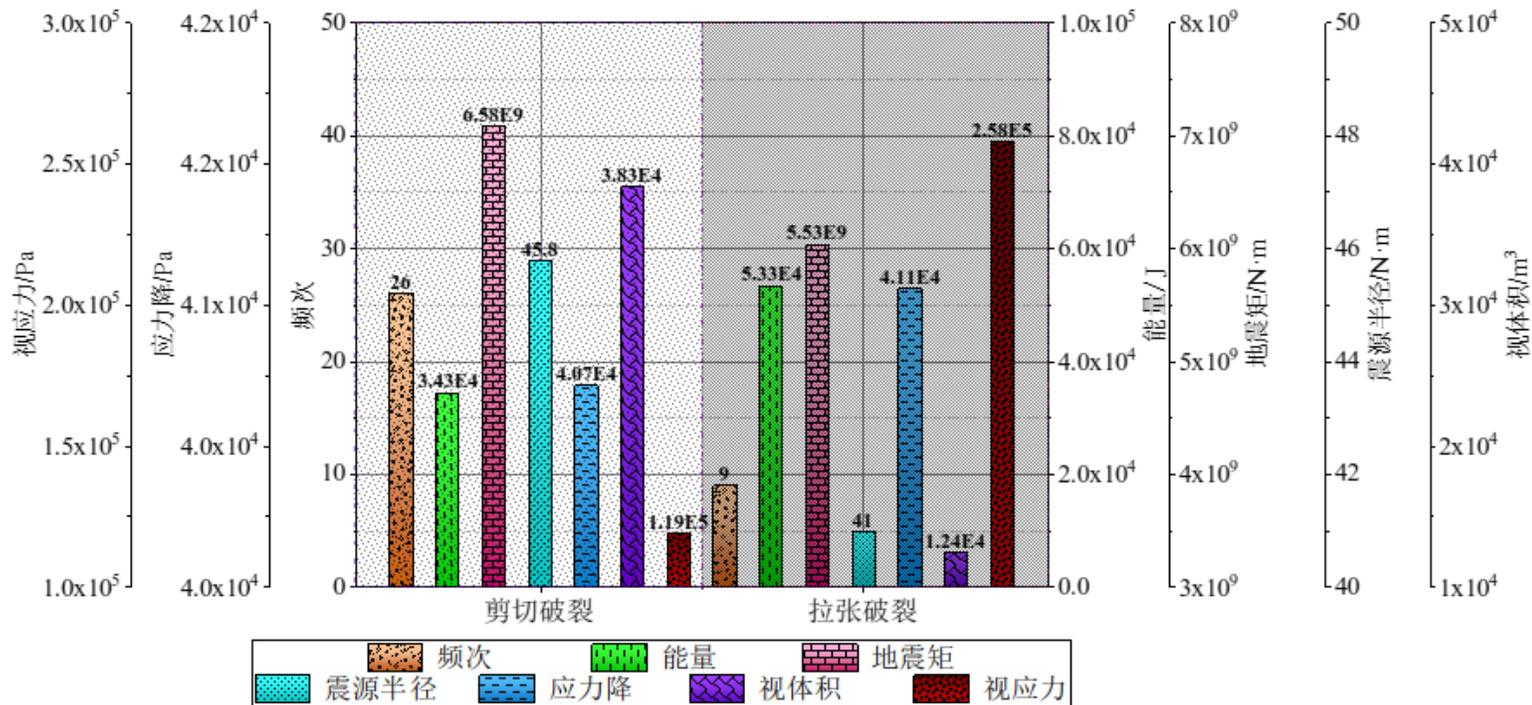
中等危险性矿震的破裂机制辨识结果

中等危险性矿震的破裂机制辨识结果：

- ① 破裂形式仍以**剪切破裂**占主导；
- ② **顶板矿震**全部为**拉张震源**；
- ③ **煤层附近矿震**基本以**剪切破裂**为主。

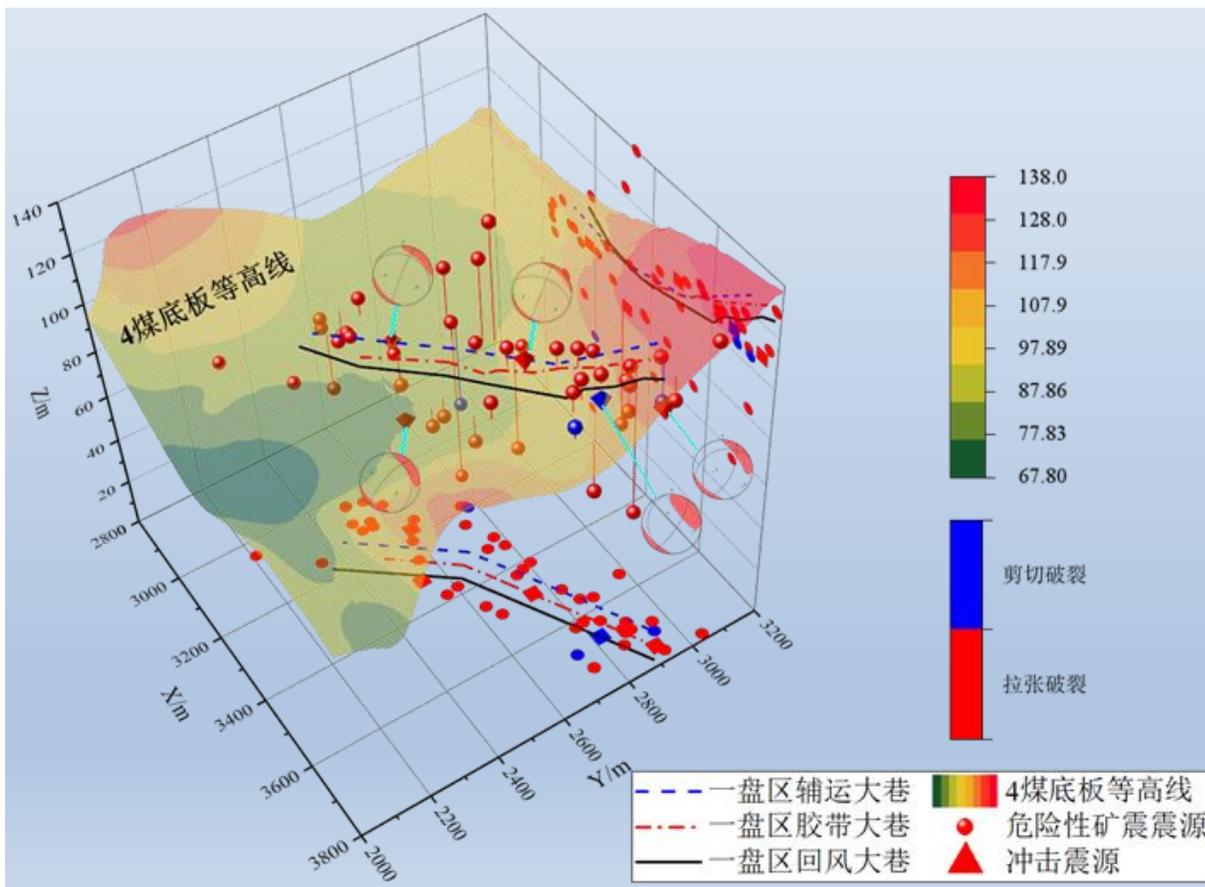


□ 深埋断层构造区矿震震源机制与力学参量响应规律

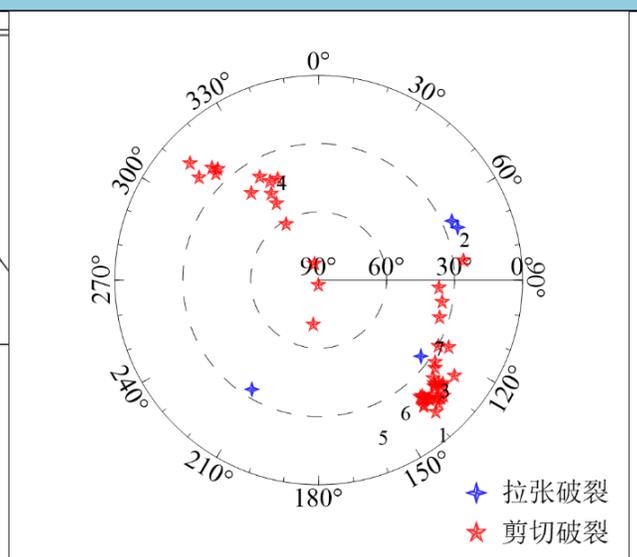
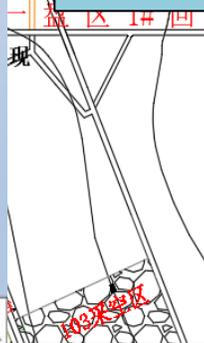


- ① 拉张破裂平均辐射能量↑
剪切破裂平均地震矩↑；
- ② 剪切破裂平均视体积≈3倍
拉张破裂；
- ③ 拉张破裂平均视应力↑。

□ 高应力巷道区矿震震源机制与力学参量响应规律

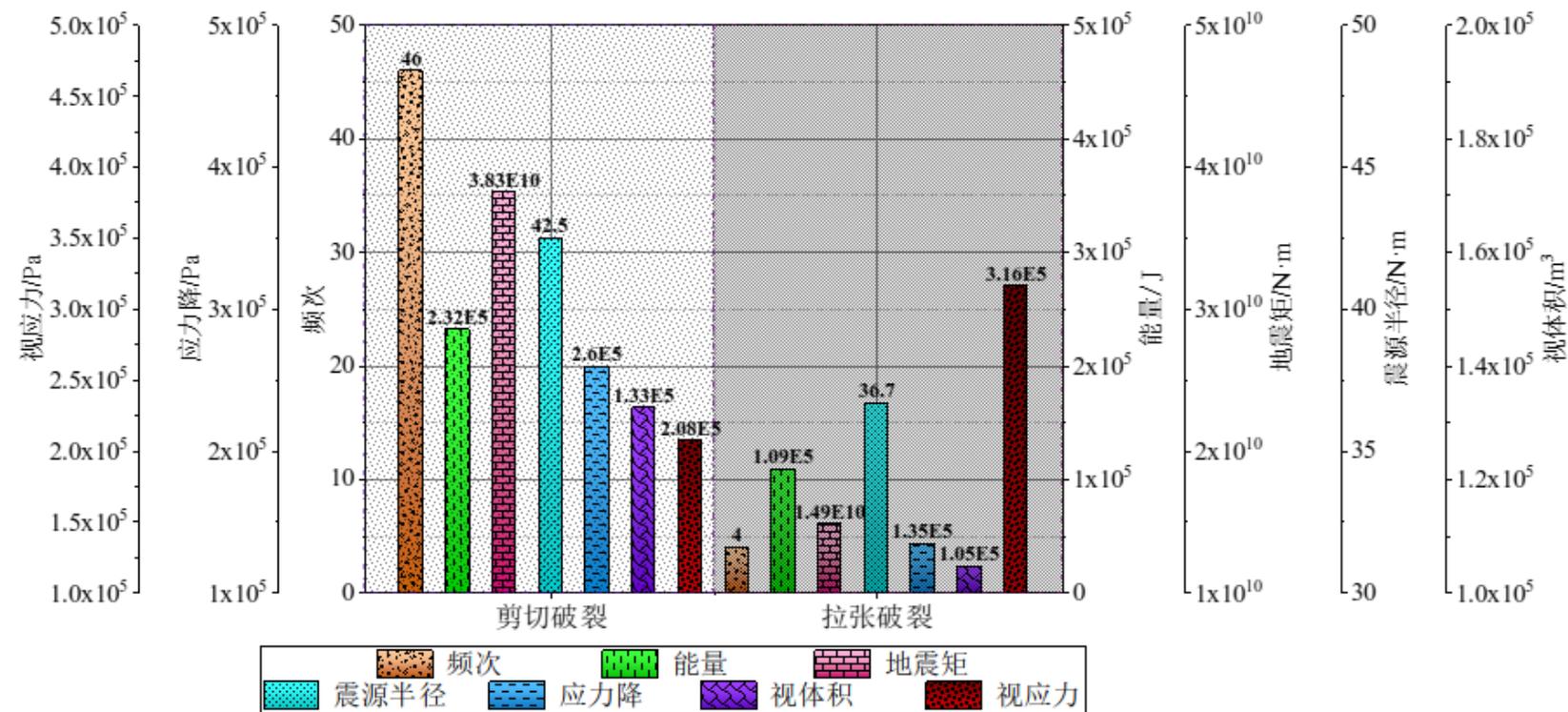


- ① 破裂形式以**剪切破裂**占主导;
- ② 5次动力显现事主要是由于**高应力巷道区内煤体破裂**诱发的;
- ③ 绝大多数矿震为**受压剪切破坏**。



**冲击震源与强危险性矿震
破裂机制辨识结果**

高应力巷道区矿震震源机制与力学参量响应规律



不同破裂机制震源的震源力学参量对比结果

- ① 剪切破裂震源在除了视应力之外的所有平均震源力学参量均明显高于拉张破裂震源。
- ② 拉张破裂震源的平均视应力约为剪切破裂震源的1.5倍，表明其破裂效率更高。



汇报提纲

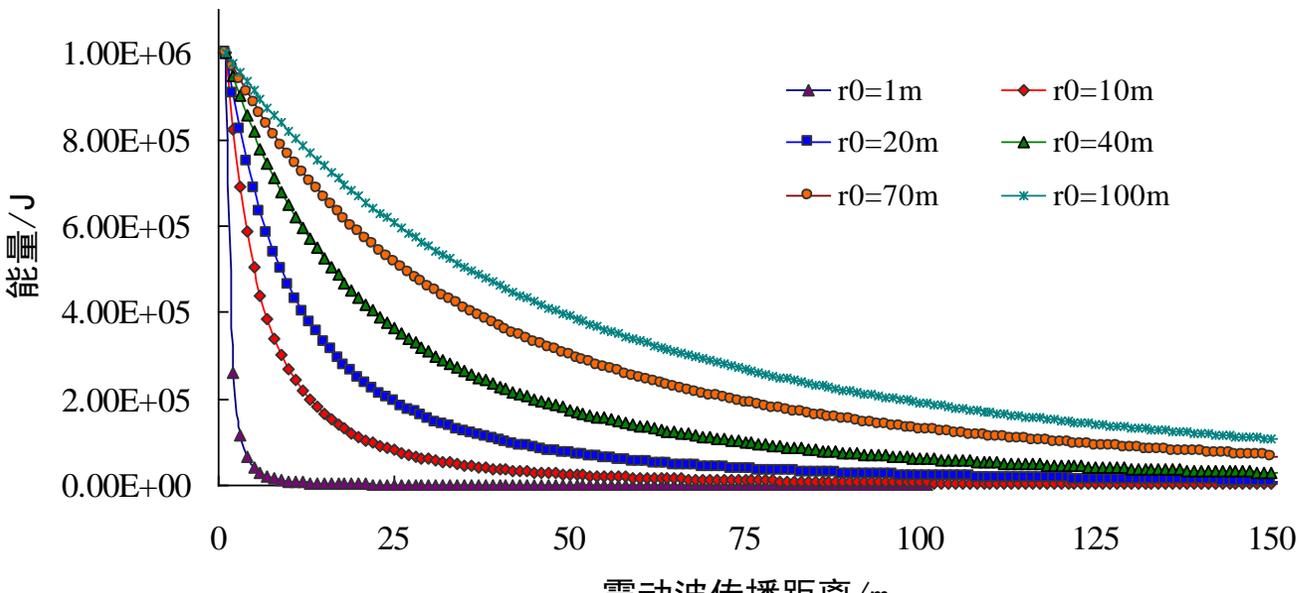
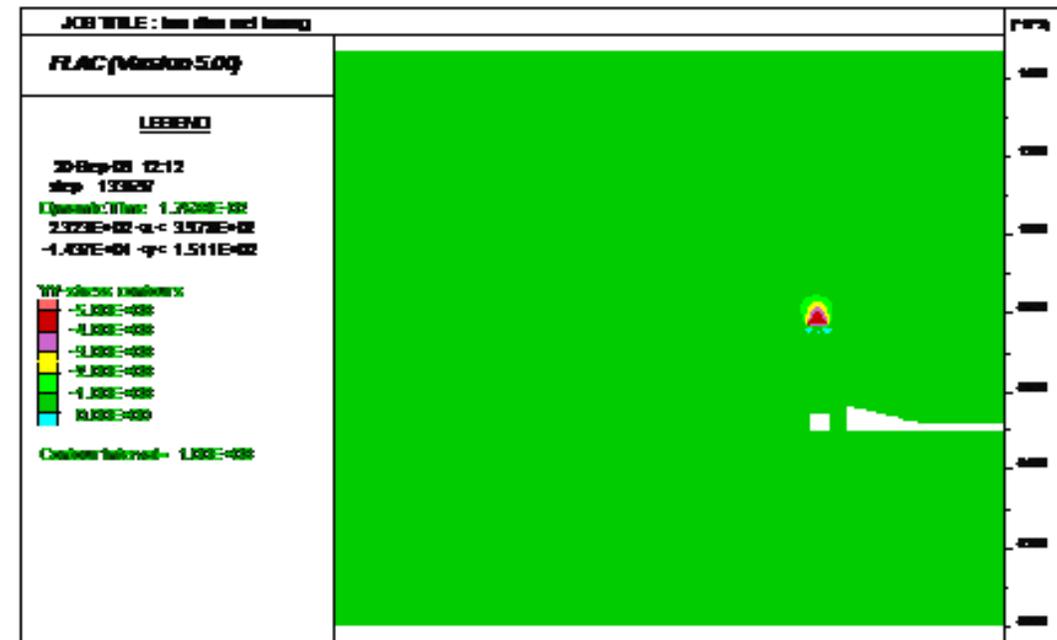
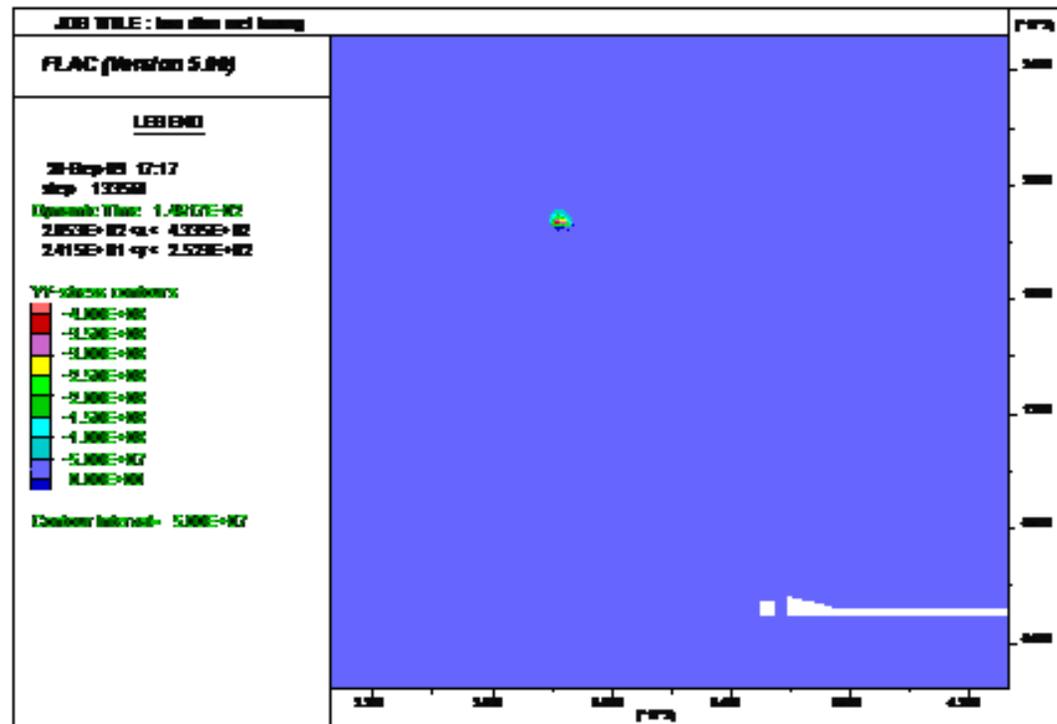
- 一 矿山震动现象
- 二 矿震孕育机制与类型判识
- 三 矿震矿震力学参量特征
- 四 矿震的冲击扰动效应



四 矿震的冲击扰动效应

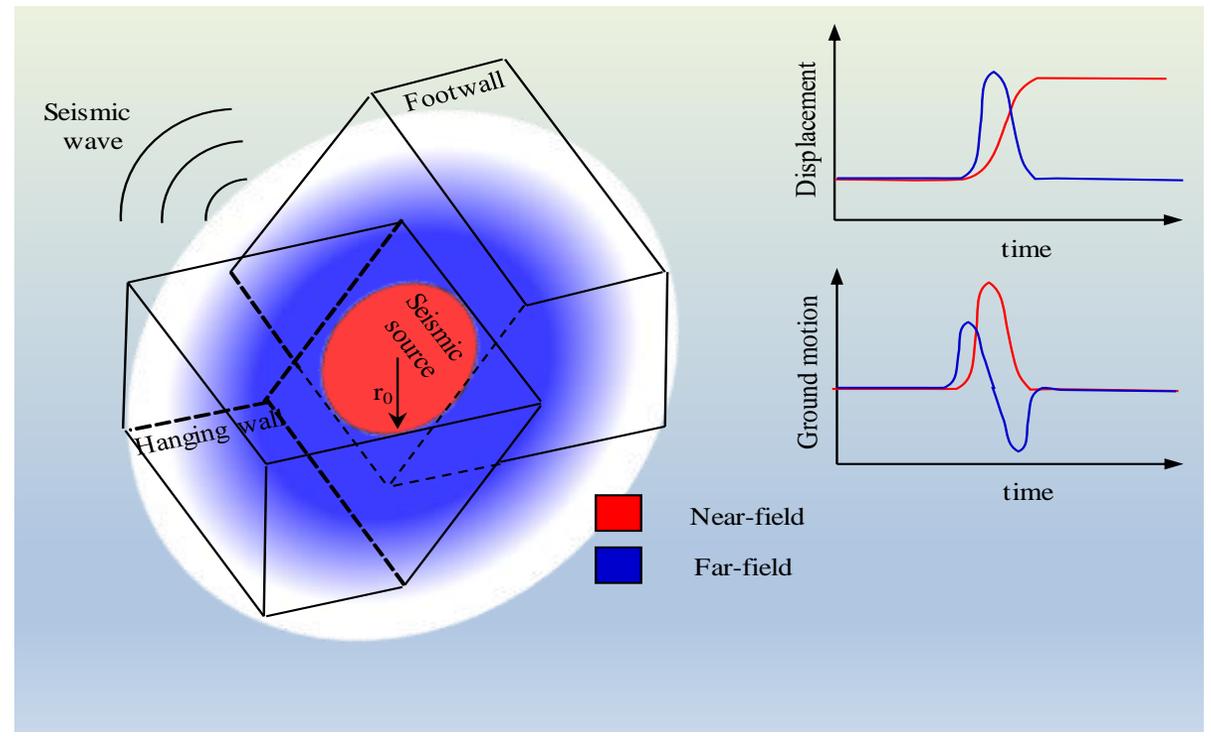
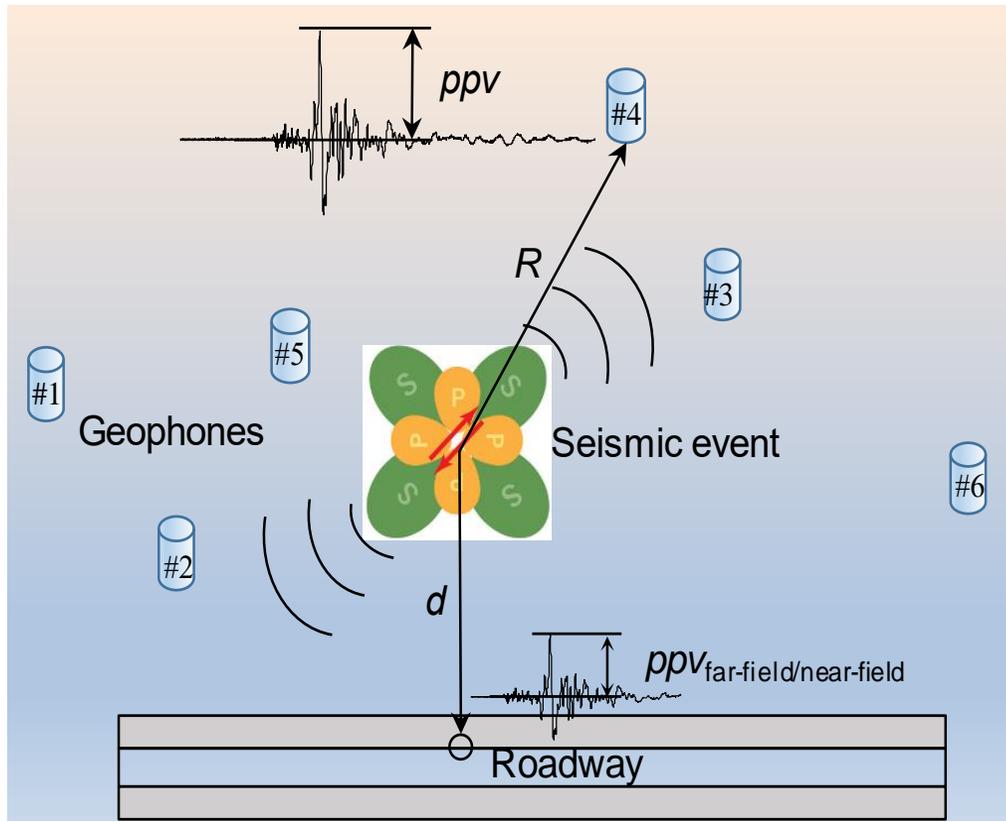
基于矿震PPV的巷道围岩稳定性判别

- 矿震的冲击扰动效应，受破裂机制、震源力学参量（能量或地震矩、视应力、震源半径）、震巷距、介质属性等影响。
- 根据矿震震源半径与震巷距的位置关系，矿震分为远场矿震与近场矿震。



四 矿震的冲击扰动效应——基于PPV的巷道稳定性判别

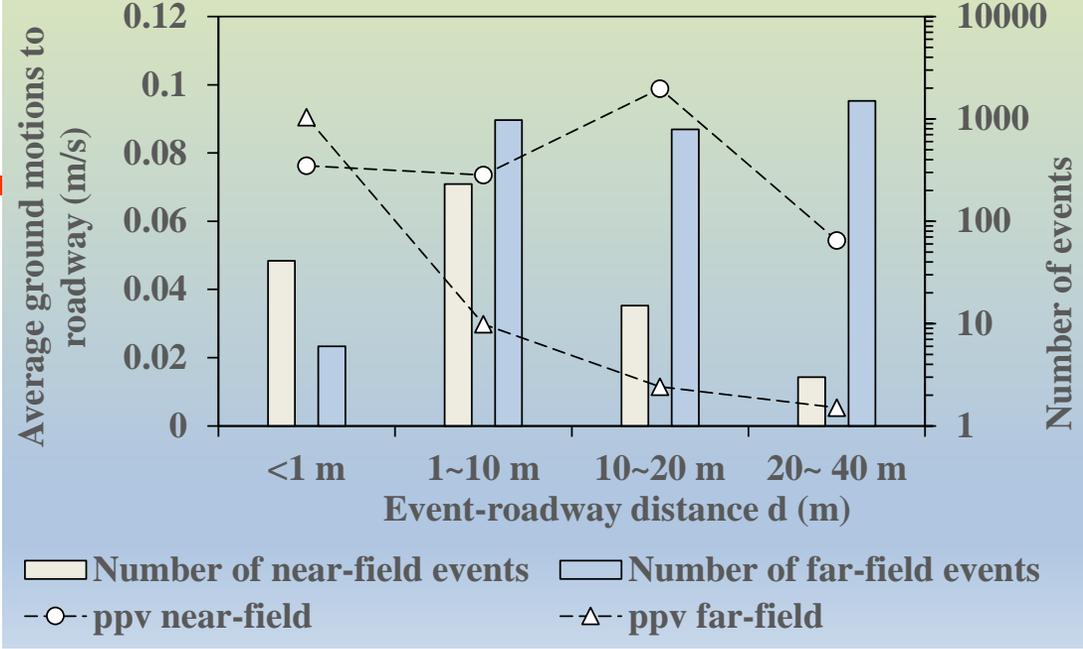
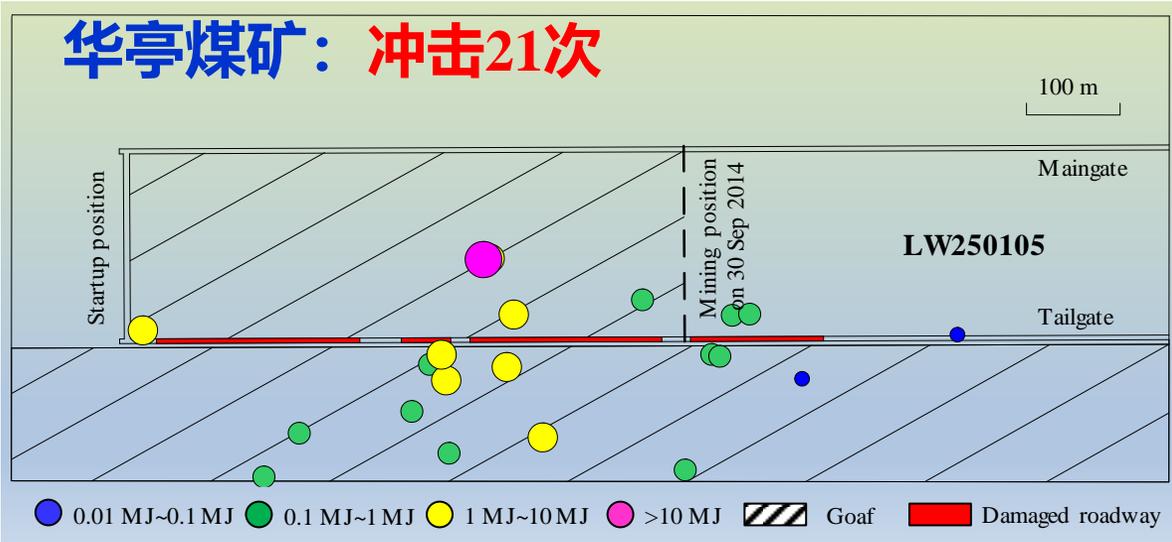
- ✓ **近场矿震**：震源半径 > 震巷距； **远场矿震**：震巷距 >> 震源半径
- ✓ **近场矿震**易引起巷道永久变形甚至冲击， **远场矿震**引起围岩非永久变形或应力调整。
- ✓ 可通过**PPV**分析评判**近、远场矿震**对巷道稳定性的影响规律。
- ✓ **近场矿震**：
$$ppv_{near-field} = 1.28(C_s / G)\rho Rppa$$
- ✓ **远场矿震**：
$$ppv_{far-field} = \frac{ppvR}{d}$$





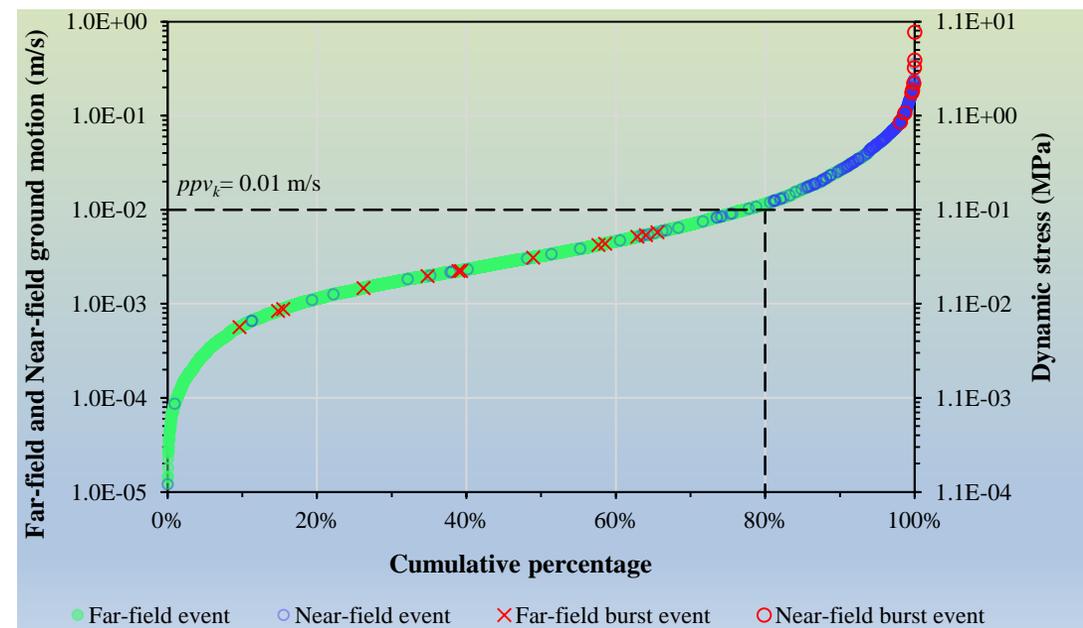
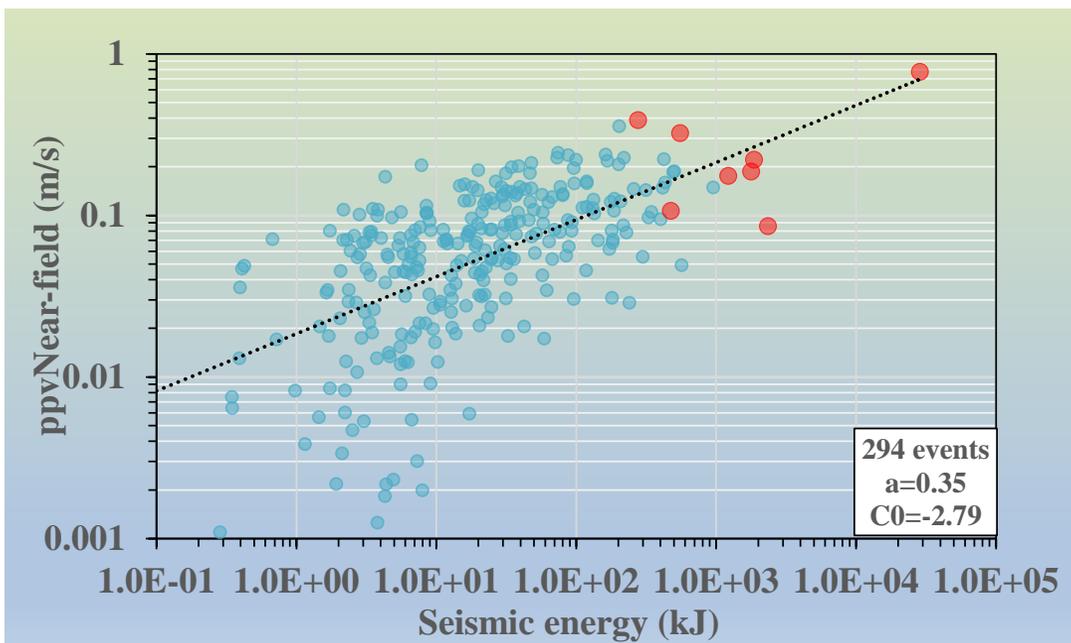
四 矿震的冲击扰动效应

华亭煤矿：冲击21次



☑ PPV等量动载荷

$$\Delta\sigma^d = nC_S\rho \cdot ppv$$



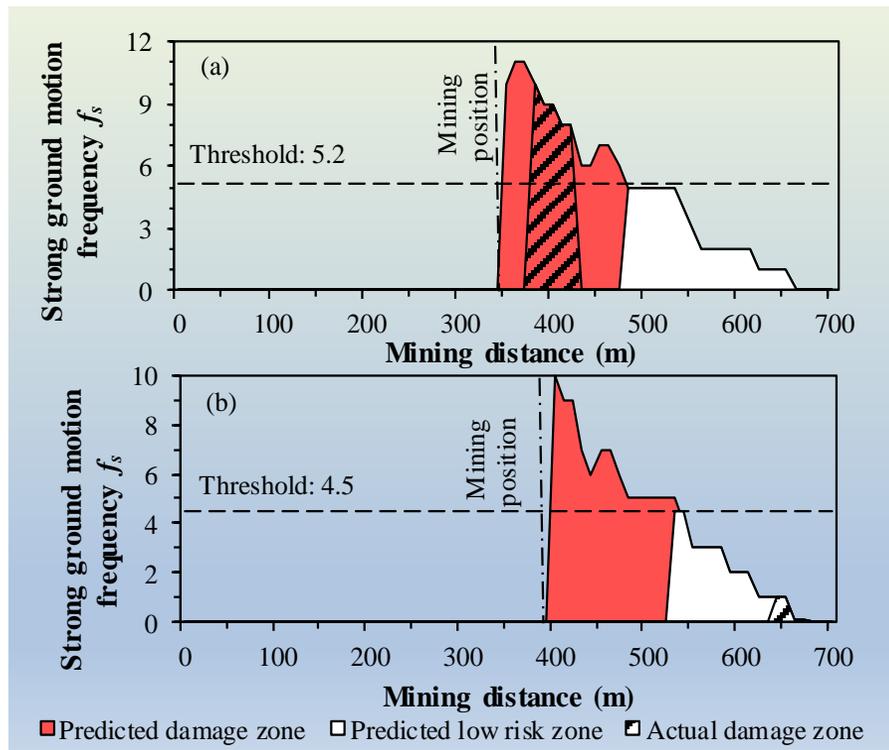
- ☑ 累计矿震扰动会导致最大应力增加与最小应力减低，巷道破坏程度与累计强矿震PPV频次密切相关。
- ☑ 可利用**历史与未来微震数据**进行基于PPV的巷道稳定性的动态评判。
- ☑ 利用参数：累计PPV、累计强矿震PPV频次与最高PPV，等。
- ☑ 利用历史冲击破坏记录回溯分析，分析巷道PPV参数与冲击破坏区域的耦合性。

$$f_{(i)} = \sum_{j=p}^q y(j)$$

$$y(j) = \begin{cases} 1 & (ppv_j \geq ppv_k) \\ 0 & (ppv_j < ppv_k) \end{cases}$$

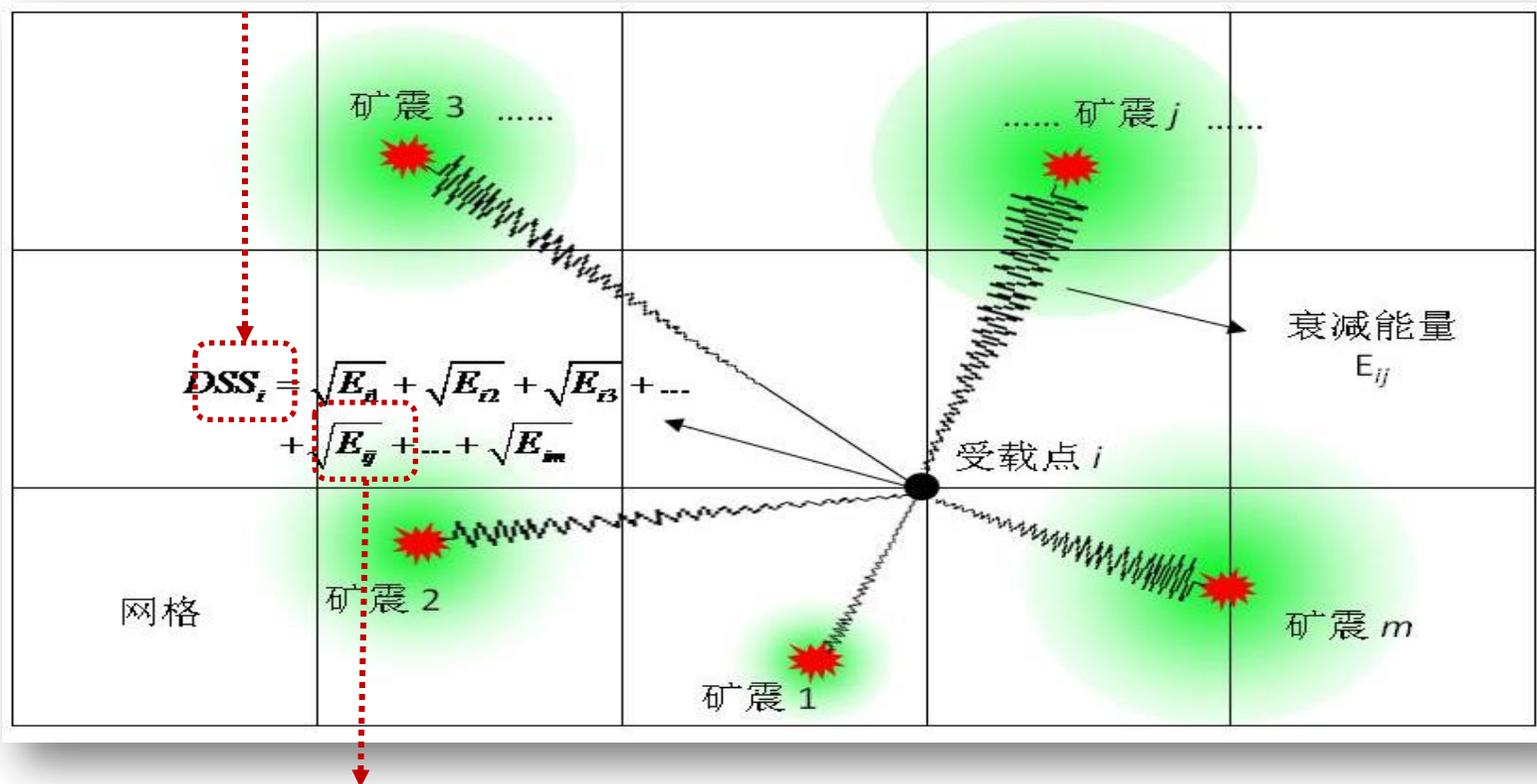


$$f_{threshold} = \frac{\sum_{i=1}^m f_i}{m}$$



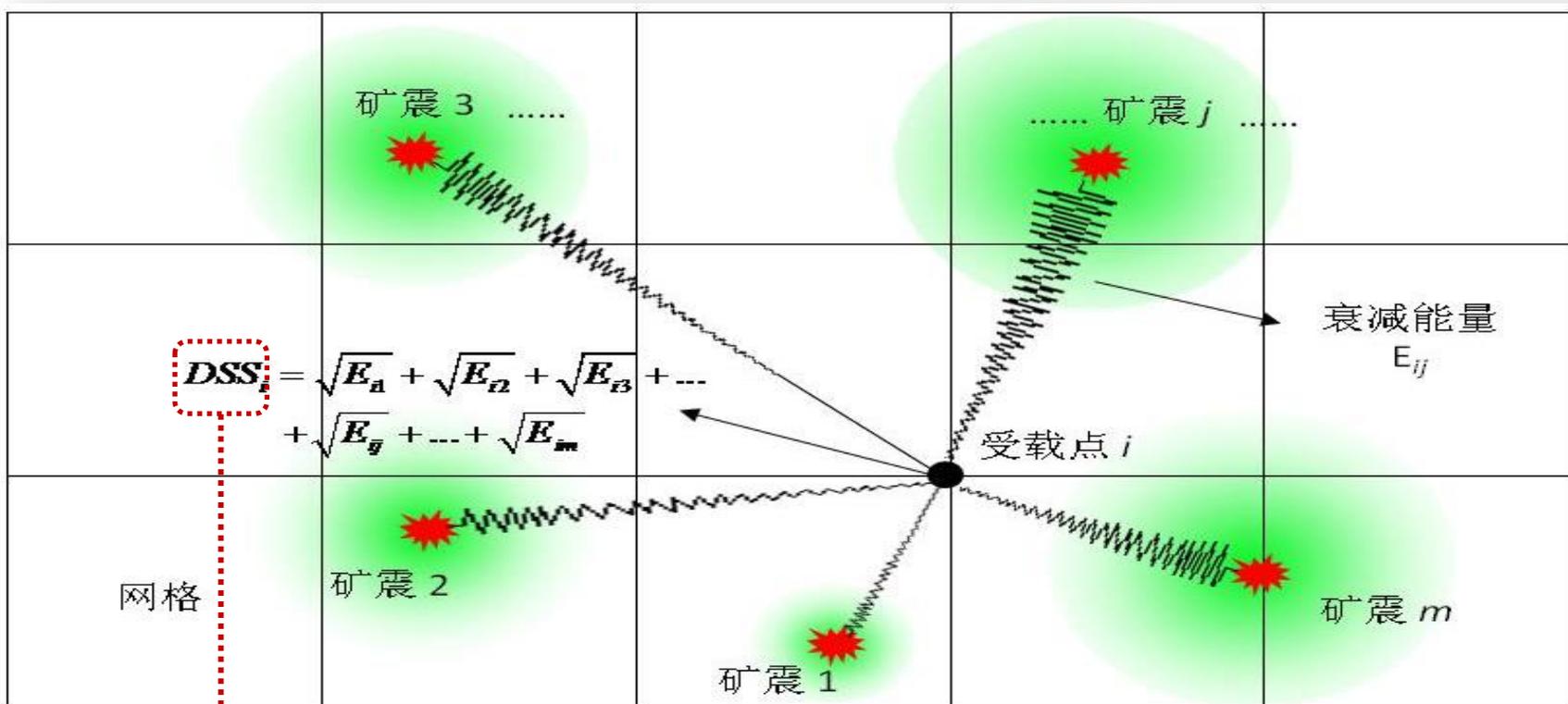
- ◆ 冲击地压已成为煤矿普遍的安全问题。
- ◆ 煤岩体中静载荷与矿震形成的动载叠加之和大于诱发煤岩体冲击的临界载荷，就会诱发冲击灾害。
- ◆ 静载+动载 \rightarrow 诱发冲击 $\sigma_j + \sigma_d \geq \sigma_{b\min}$
 - σ_j —静载荷
 - σ_d —动载荷
 - $\sigma_{b\min}$ —冲击临界荷载
- ◆ 基于微震监测，提出定期反演空间应力场（视为“静载”）的“震动波CT”预警方法，提出短临反演震动波场（视为“动载”）的“震动效应”预警指标。以此，提出冲击地压动静载叠加的“应力场-震动波场”综合预警方法。

- ◆ 震动效应指标 DSS_i : 目标区域受不同矿震能量的叠加扰动影响, 评价矿震动载对采掘空间煤岩体的冲击扰动效应。



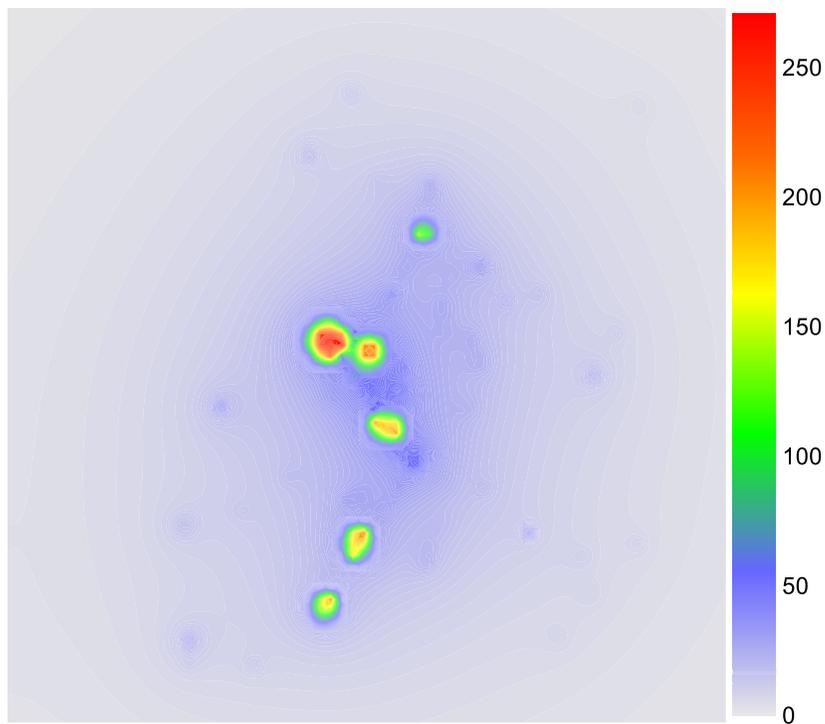
$$\begin{cases} E_{ij} = E_{jP} + E_{jS} & (r_{ij} \leq r_0) \\ E_{ij} = E_{ijP} + E_{ijS} = E_{jP}(r_{ij} - r_0)^{-2} e^{-\frac{2\pi f}{v_P Q_P}(r_{ij} - r_0)} + E_{jS}(r_{ij} - r_0)^{-2} e^{-\frac{2\pi f}{v_S Q_S}(r_{ij} - r_0)} & (r_{ij} > r_0) \end{cases}$$

- ◆ 震动效应归一化指标 $DDEI_i$: DSS_i 指标的归一化处理, 可在较短时间内 (若干小时或一天) 反演矿震动载的冲击扰动效应。

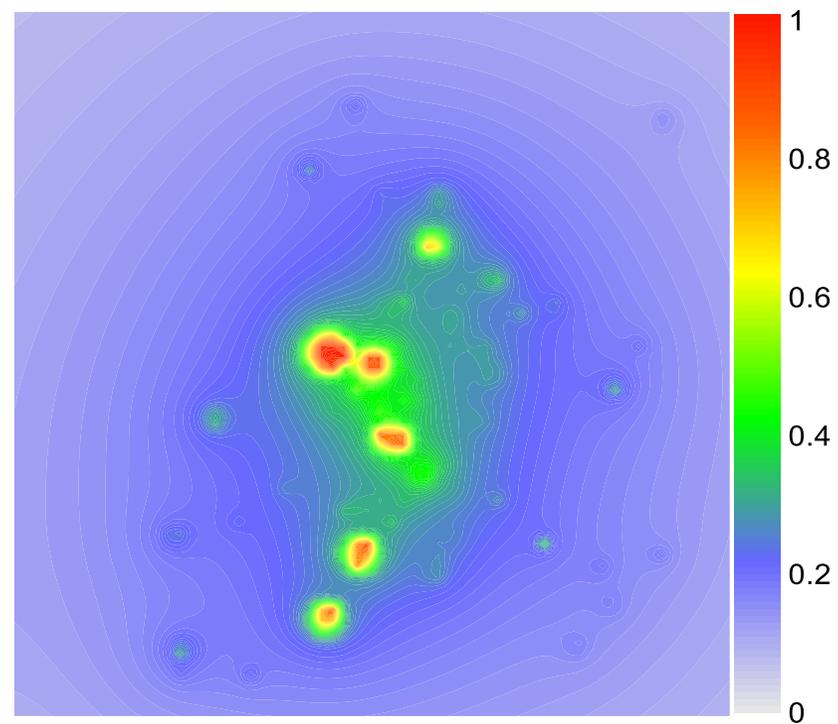


$$DDEI_i = \sqrt{\frac{DSS_i}{DSS_{\max}}}$$

DSS_{\max} 为研究区域 DSS_i 最大值



(a) 震动效应指标 DDS



(b) 归一化指标 $DDEI$

同一时间段内矿震活动的 DDS 和 $DDEI$ 指标分布

■ “应力场” 的 震动波CT反演

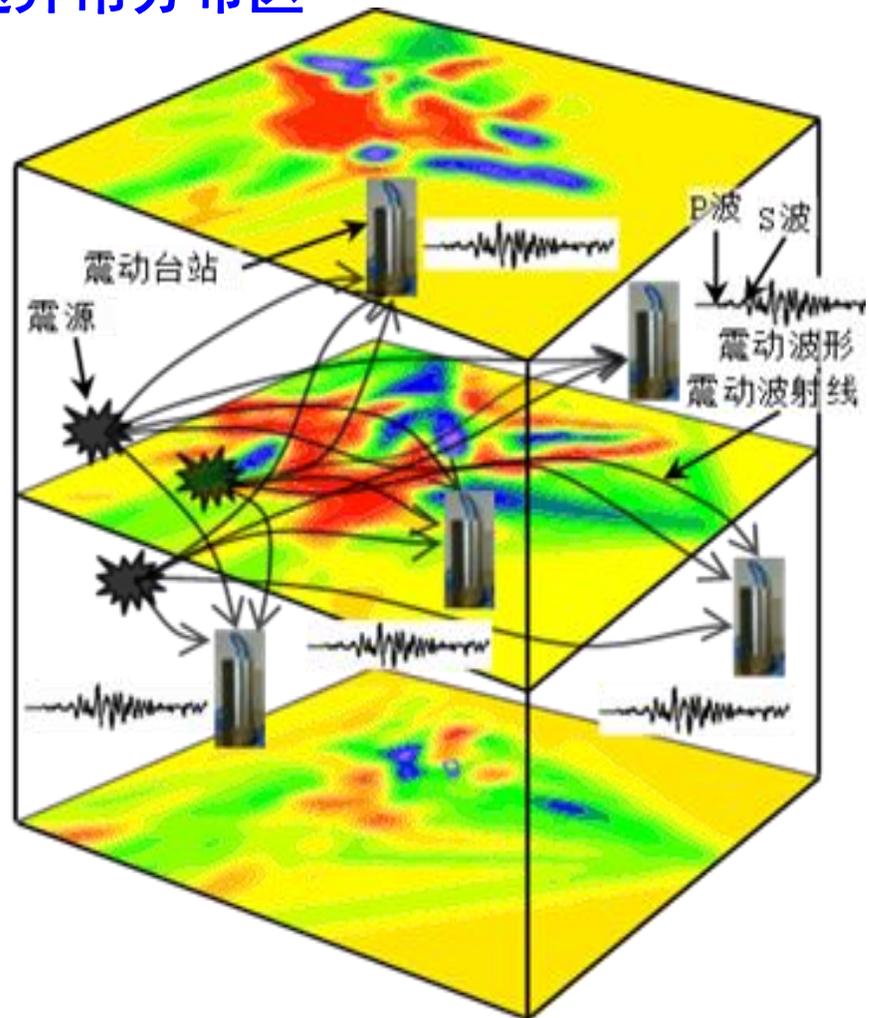
◆ 通过震动波CT探测，定期（十天至半月）反演波速异常分布区

$$T_i = \int_{L_i} \frac{ds}{V(x, y)} = \int_{L_i} S(x, y) ds \quad \rightarrow \quad T_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} S_j$$

$$\begin{cases} T_1 = a_{11}S_1 + a_{12}S_2 + a_{13}S_3 + \dots + a_{1j}S_j \\ T_2 = a_{21}S_1 + a_{22}S_2 + a_{23}S_3 + \dots + a_{2j}S_j \\ \dots\dots \\ T_i = a_{i1}S_1 + a_{i2}S_2 + a_{i3}S_3 + \dots + a_{ij}S_j \end{cases} \quad \rightarrow \quad AS = T$$

➤ $VG = v_p \cdot Grad$

➤ $A_n = \frac{V_p - V_p^a}{V_p^a}$



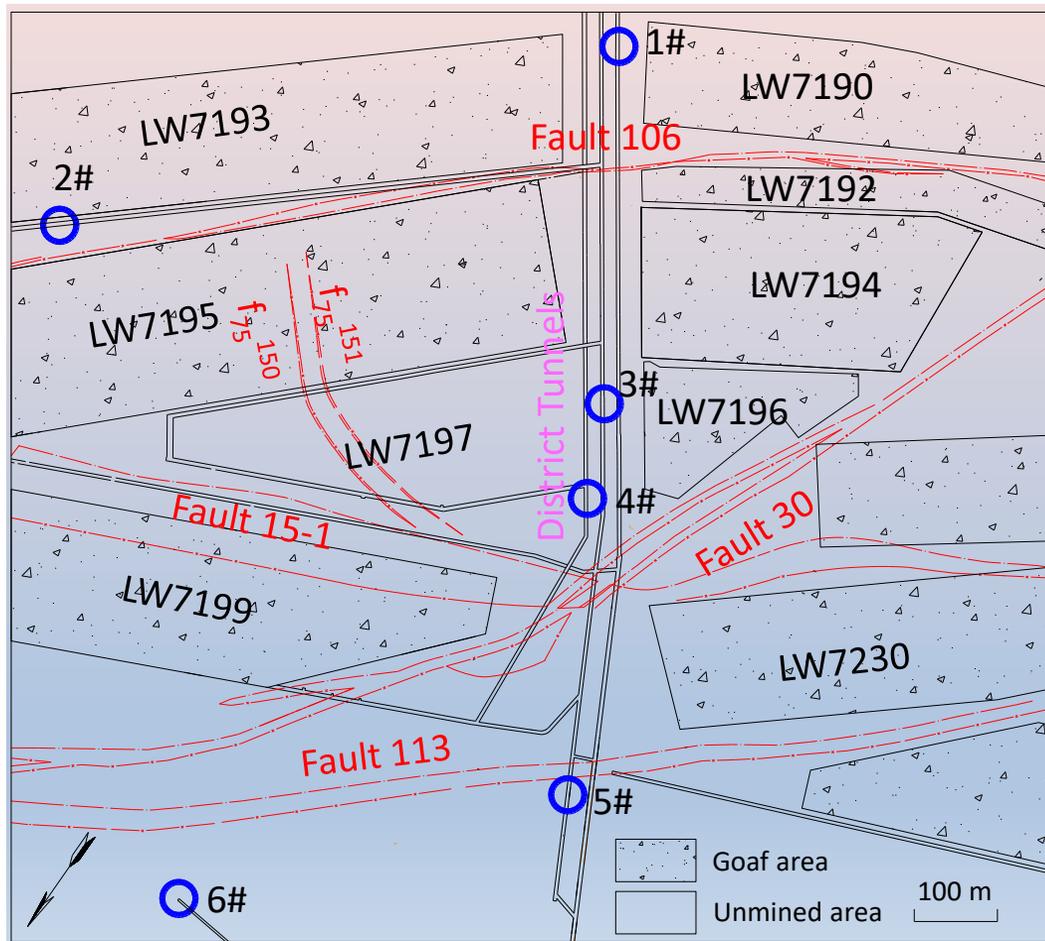
■ 动静载叠加的综合预警指标

$$I_{PD} = \underbrace{w_1 \frac{V - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}}}_{\substack{\text{应力场} \\ 0.5}} + \underbrace{w_2 \frac{DDEI - DDEI_{\min}}{DDEI_{\max} - DDEI_{\min}}}_{\substack{\text{震动波场} \\ 0.5}}$$

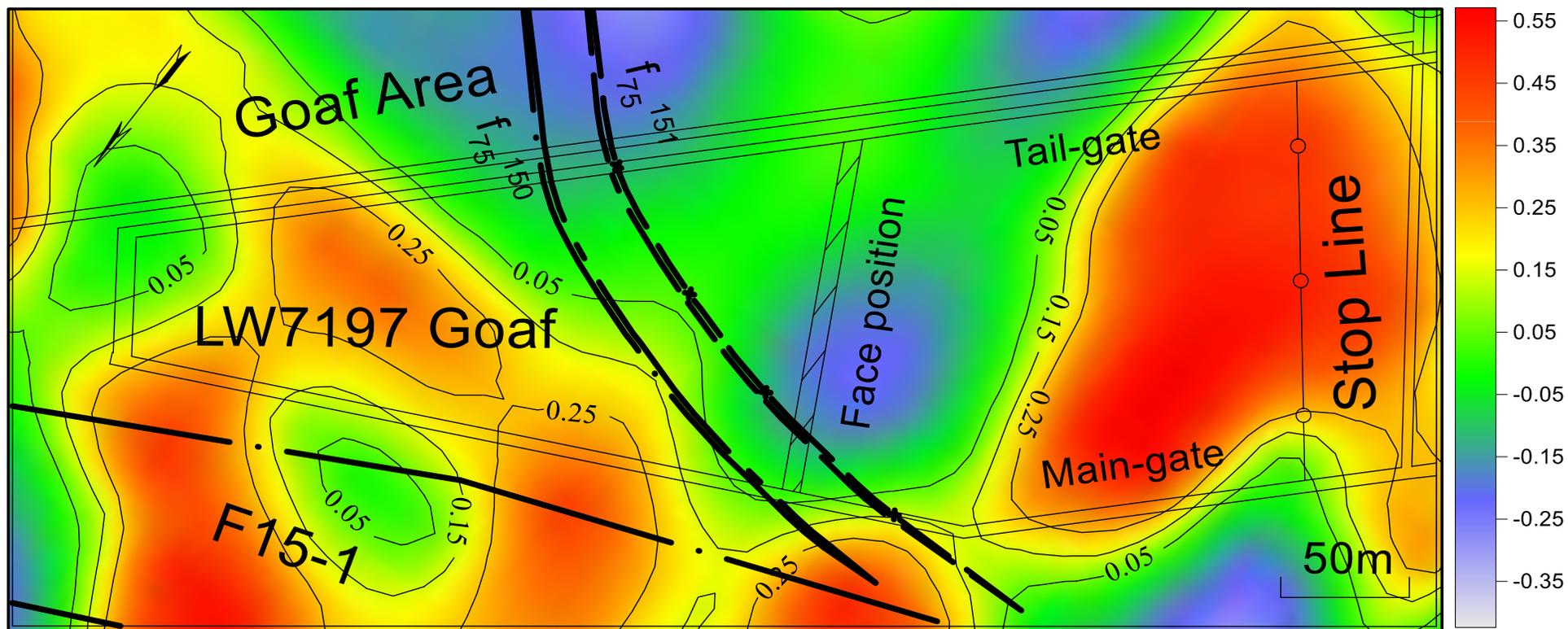
某矿冲击地压的 I_{PD} 评价分级表

冲击地压危险等级	I_{PD}
无冲击	< 0.15
弱冲击	0.15- 0.25
中等冲击	0.25 - 0.35
强冲击	> 0.35

◆ 某矿现场应用：LW7197工作面开采

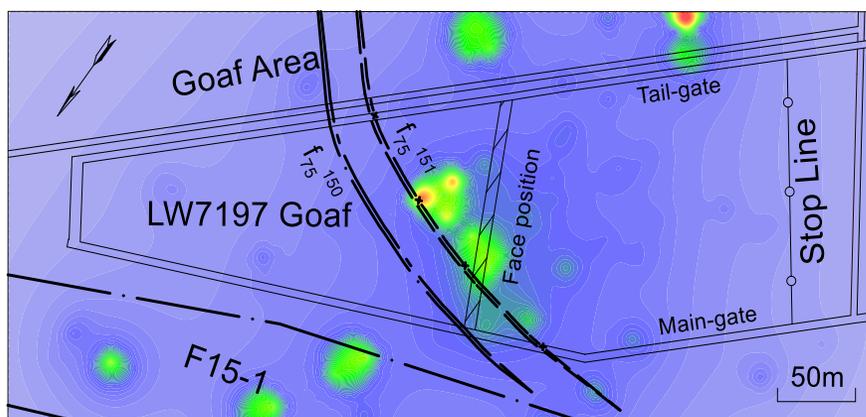


◆ 应力场探测的波速异常反演

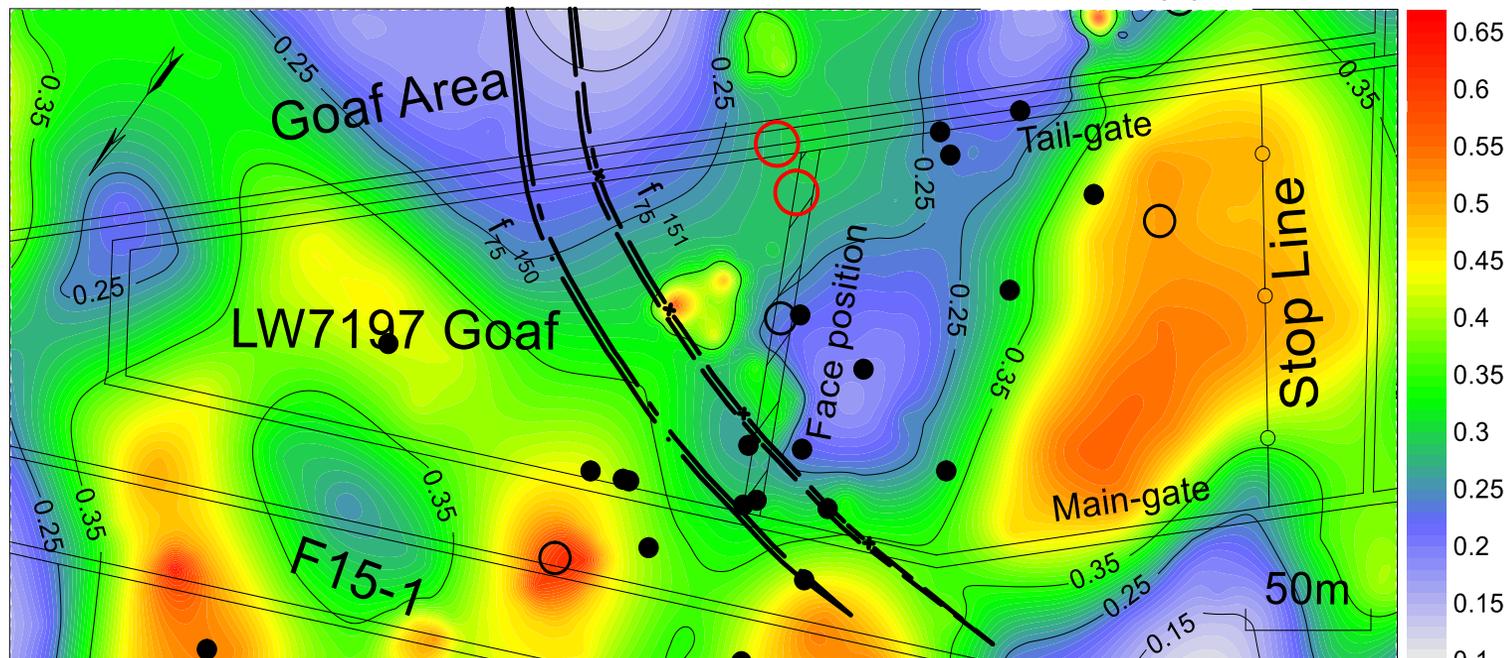


LW7197工作面 波速异常系数 A_n 分布图(09.11-09.17)

◆ 波速异常与震动效应指标叠加的综合预警云图



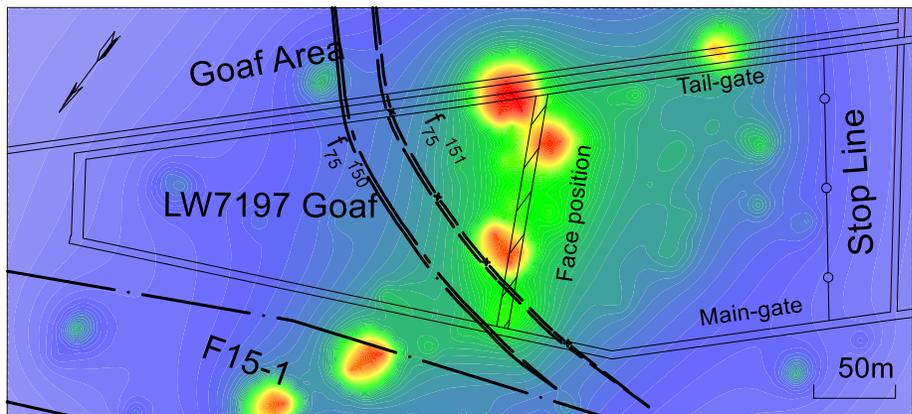
DDEI分布图(09.23)



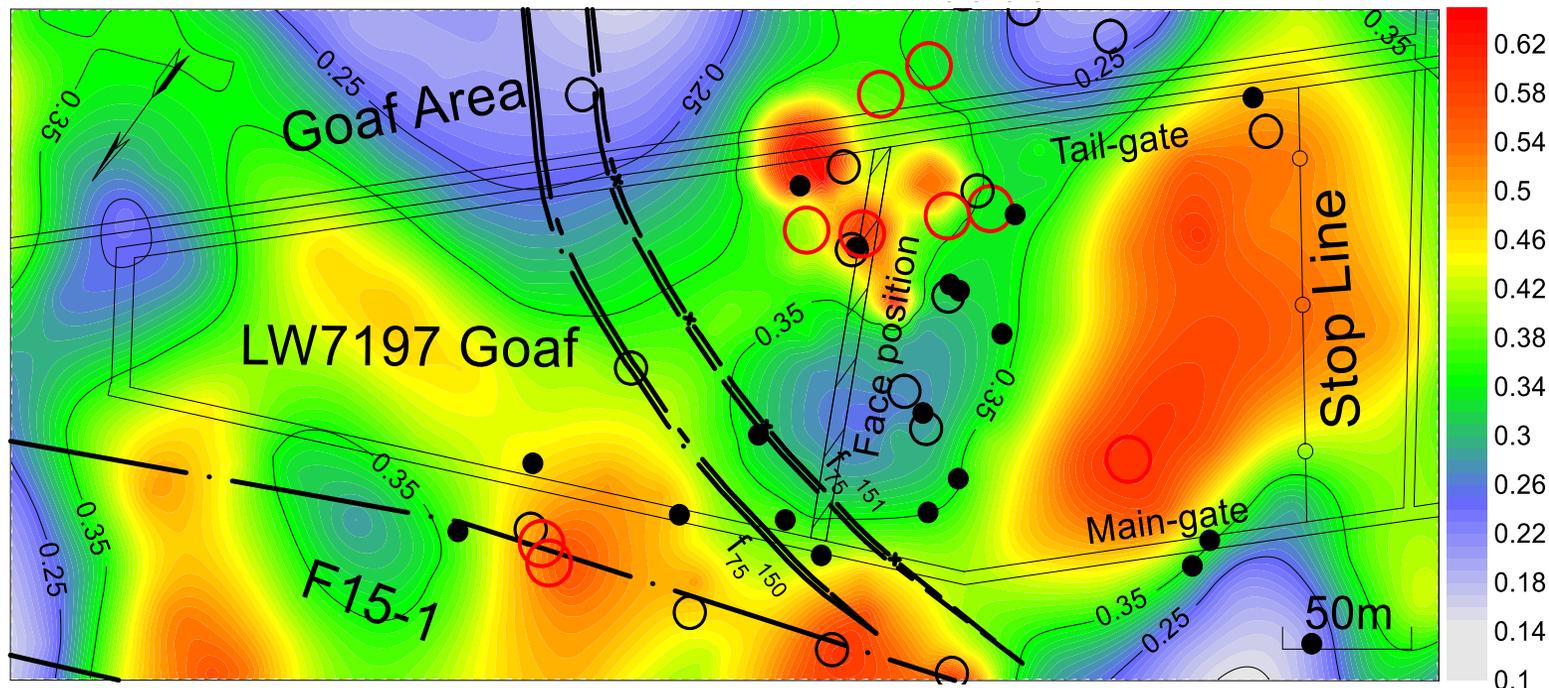
LW7197工作面 I_{PD} 分布图(09.23)

◆ 震动波速、震动效应指标计算的网格划分应统一。

◆ 波速异常与震动效应指标叠加的综合预警云图

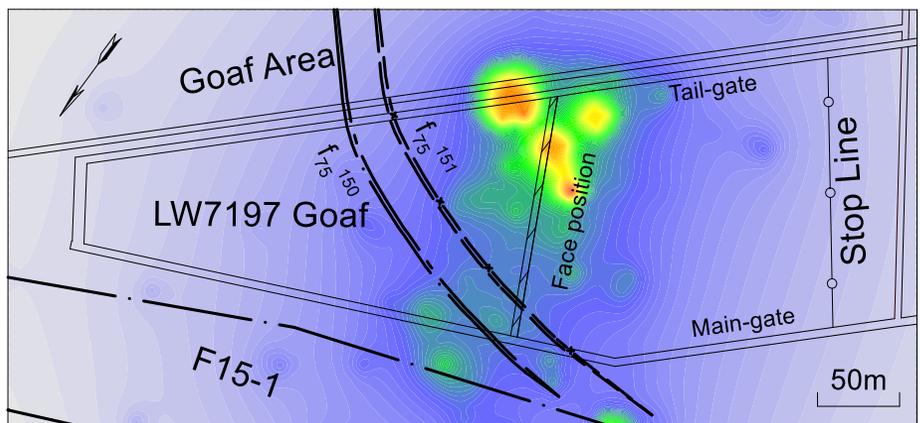


DDEI分布图(09.24)

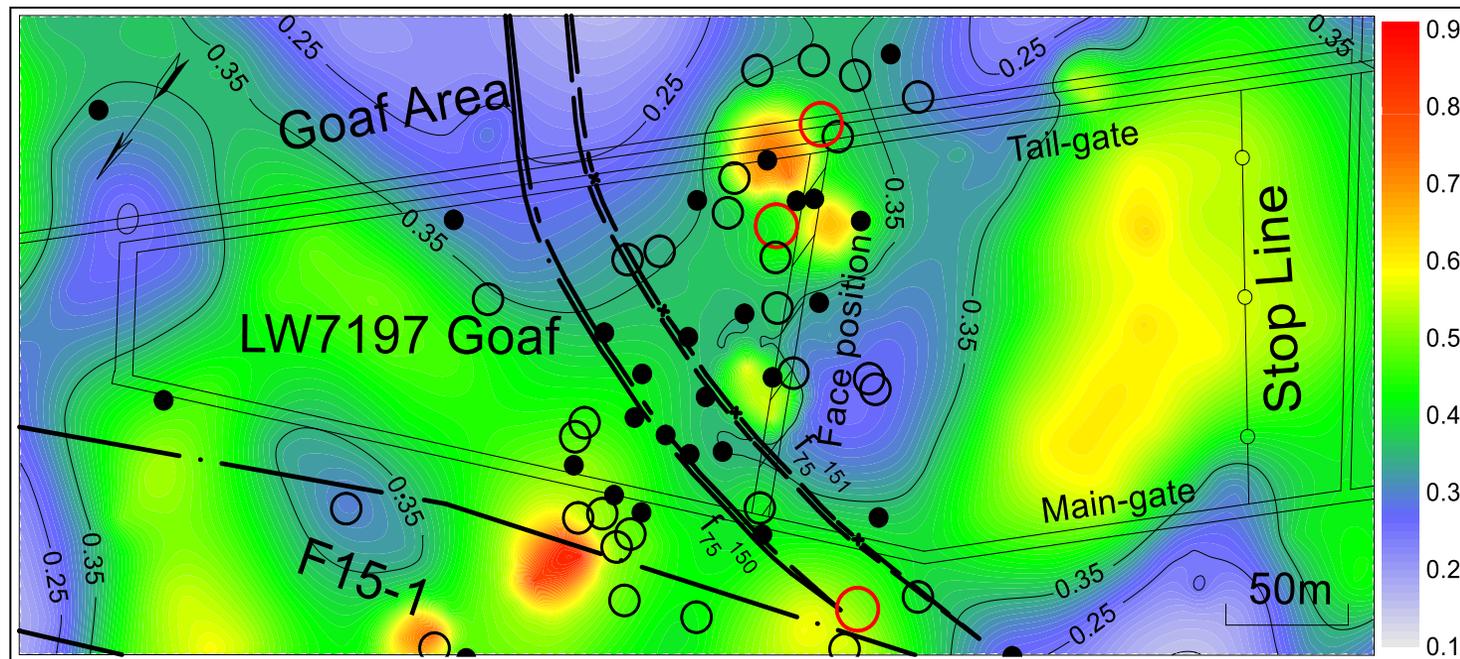


LW7197工作面 I_{PD} 分布图(09.24)

◆ 波速异常与震动效应指标叠加的综合预警云图



DDEI分布图(09.25)



LW7197工作面 I_{PD} 分布图(09.25)

◆ 后续强矿震（红圈）大多分布在动静载叠加云图的高冲击危险区，预警效能提高。



谢谢，
敬请指正！

