

# 煤矿覆岩矿震关键层及其判别

窦林名、曹晋荣

中国矿业大学

冲击地压防治研究中心

<http://burst.cumt.edu.cn>



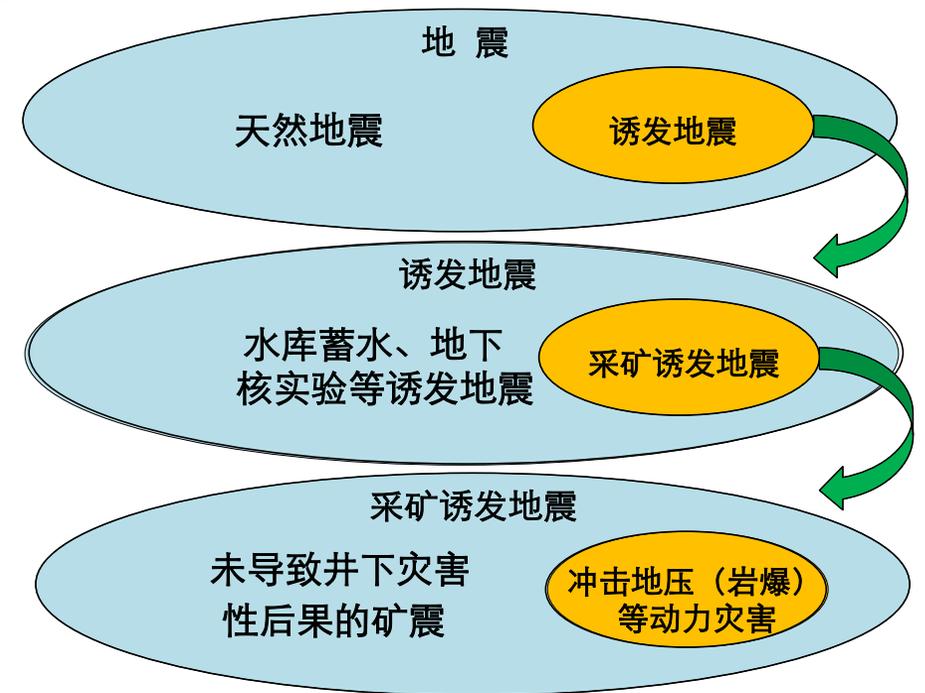
# 报告提纲



- 煤矿矿震现象及发生现状
- 覆岩矿震关键层及其判别
- 矿震关键层破断震动效应

## □ 煤矿矿震现象及特征

- **矿震现象：**矿震也称**矿山地震或采矿诱发地震**，是指由地面、浅层（几百米）和深层（千米以下）的矿山开采所引起的地震活动。
- **矿震特征：**
  - ✓ 矿震普遍存在于矿山开采活动中，是采掘过程中必然出现的**动力现象，无法避免和彻底消除**；
  - ✓ 矿震发生时，**地面震感强烈**，有时会导致地面晃动、地表塌陷等现象；
  - ✓ 矿震发生时，**可能诱发**井下冲击矿压、煤与瓦斯突出、冒顶等**动力灾害**。



**矿震发生全过程机理、扰动效应、精准定位、灾害治理等仍有待研究！**

## □ 煤矿震动、微震、矿震定义

- **震动**：是采掘过程中煤（岩）体能量释放引起质点运动现象的总称，包括微型震动、高能震动和矿震；
- **微震**：是微型震动的简称，指采掘过程中，由煤（岩）体小尺度细观破裂或错动引发的**能量小于 $10^4\text{J}$** 的低能震动事件；
- **高能震动**：指采掘过程中，由煤（岩）体中尺度破裂或错动引发的**能量大于 $10^4\text{J}$** 的高能震动事件；
- **矿震**：指采掘过程中，由煤（岩）体大范围破断或滑移引发的地方性**震级大于1.3**或地面地表有明显震感的震动事件。

## □ 煤矿震动事件的分类

煤矿震动	震动能量/J	煤壁震动速度(mm/s)	波形特征	震源位置	矿压显现情况
微震	$< 10^4$	$< 200$	P、S 波不清晰，持续时间短，主频 <b>大于 10 Hz</b>	采掘工作面煤层及其 50 m 范围内顶底板岩层	<b>大多无感；少数有煤炮声</b> ，采掘工作面有轻微震动，地面无震感
矿震	$> 10^5$	100 ~ 400	P、S 波清晰，持续时间长，主频 <b>小于 10 Hz</b>	工作面采空区上方距煤层 100m 以上的巨厚覆岩中	煤矿井下有震感，地面地表有 <b>明显震感</b> ，地方性震级大于 <b>1.3</b>
高能震动	$> 10^4$	200 ~ 400	P、S 波清晰，持续时间长，主频 <b>小于 10 Hz</b>	采掘工作面附近实体煤及其顶底板岩层、断层附近	井下有 <b>强烈震动与声响</b> ， <b>地面时有震感</b> ，可能诱发冲击地压，造成井巷破坏

## □ 煤矿震动事件危害性分类

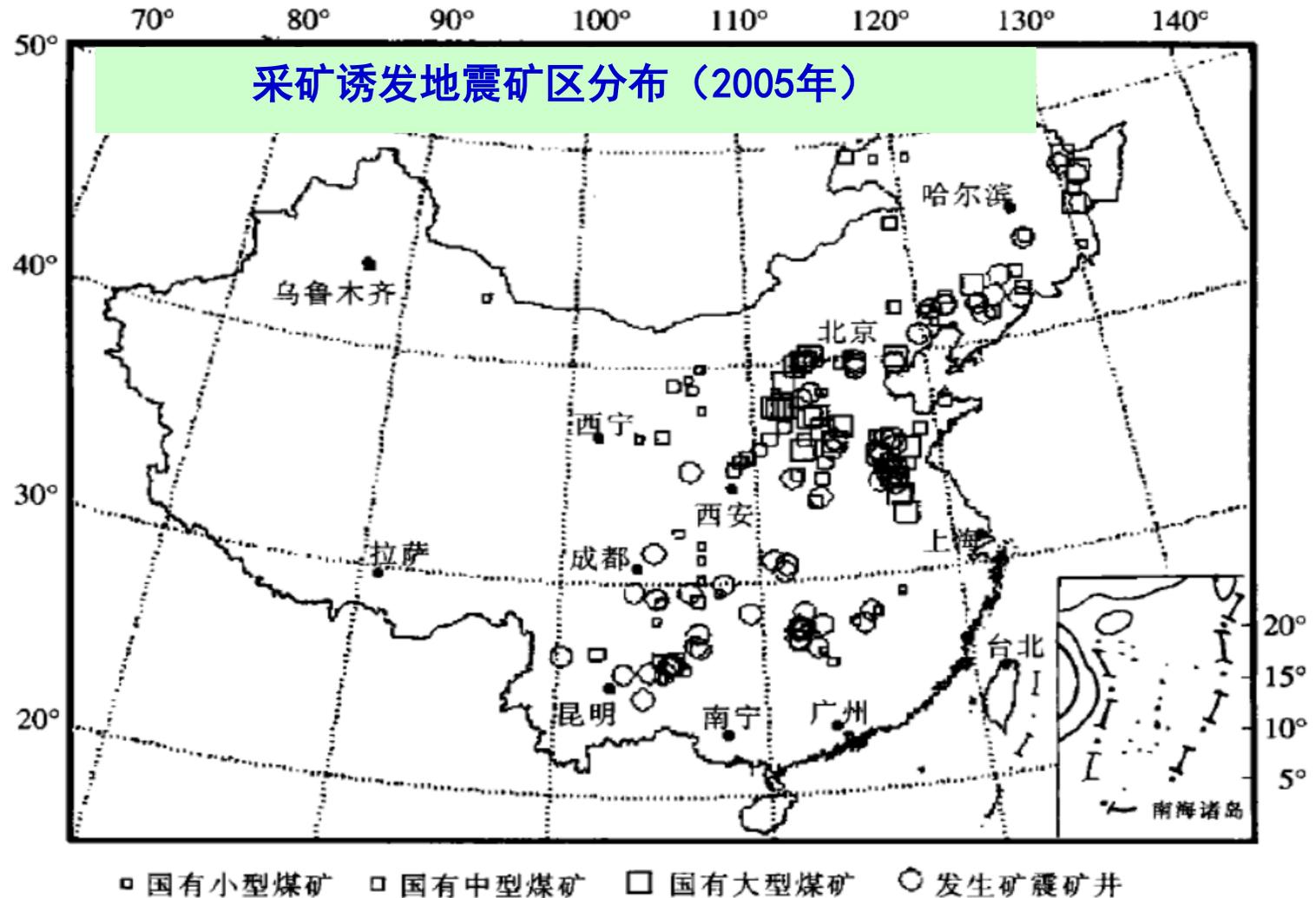
- **无害性震动**：是指对煤矿井下和地面地表均未产生危害的震动事件，包括：**微震**、大多数**高能震动**和大多数**矿震**；
- **危害性震动**：是指对煤矿井下或地面地表可能会造成危害的震动事件，包括：**极少数高能震动**和**极少数矿震**。

## □ 煤矿矿震主要类型

- **覆岩型矿震**：是指由顶板岩层破断或活动诱发的矿震，通常发生在煤层采空区上方的巨厚覆岩中；
- **构造型矿震**：是指发生在断层构造带附近的矿震。

## □ 煤矿矿震发生现状

- 蒙陕地区、彬长矿区、新疆、山东、贵州等地区高能量矿震频发；
- 矿震频发矿区的煤层上伏均赋存有巨厚的坚硬岩层。



# 煤矿矿震现象及其发生现状



## □ 煤矿矿震发生现状

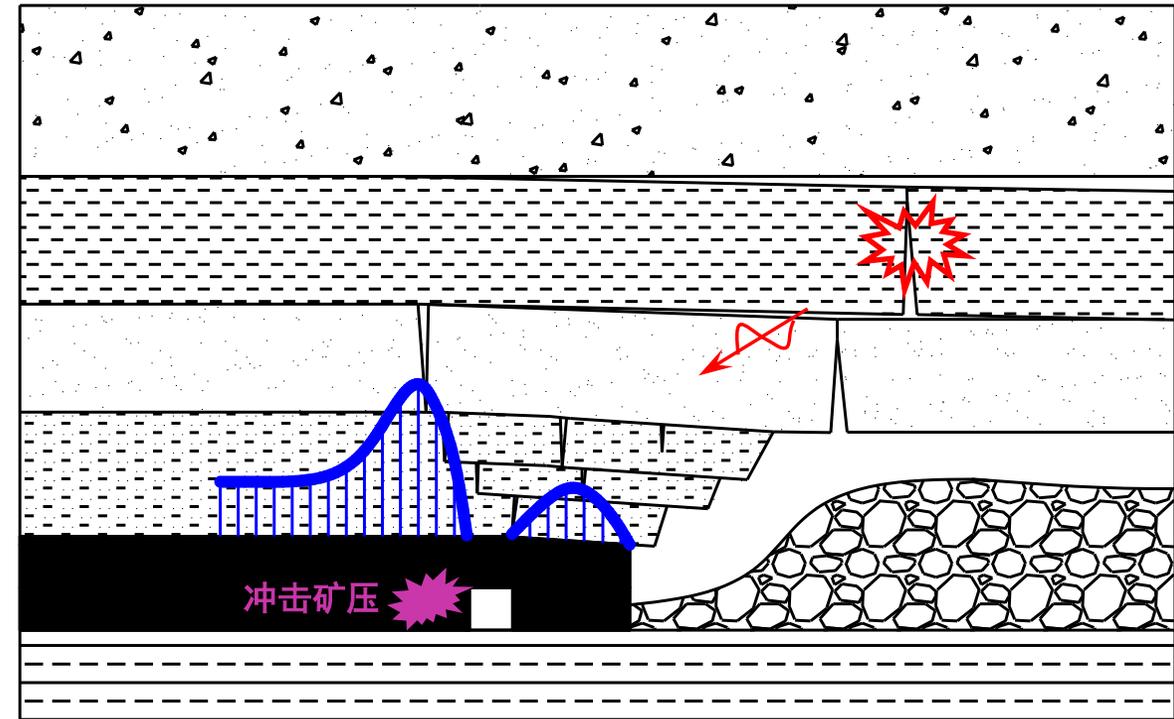
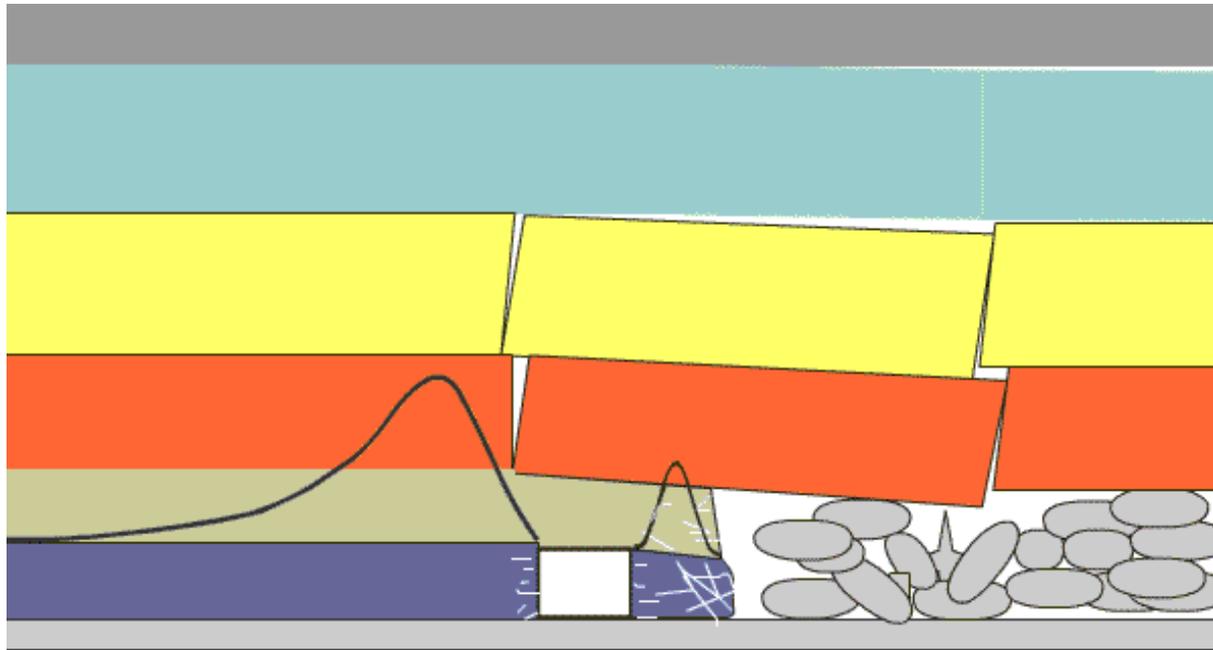
		矿井	时间	震级
灾害型矿震	江苏	徐州三河尖煤矿	2000.04.17	3.0
	辽宁	抚顺老虎台煤矿	2001.01.06	2.7
		抚顺老虎台煤矿	2009.12.11	2.3
	河南	义马千秋矿	2011.11.03	4.0
	吉林	龙家堡煤矿	2019.06.09	2.3
	河北	开滦唐山煤矿	2019.08.02	2.0
	山东	新巨龙龙垵矿井	2022.02.22	2.5
无灾型矿震	山东	东滩煤矿	2017.01.26	2.1
		东滩煤矿	2017.10.14	2.4
		东滩煤矿	2019.01.02	2.4
		东滩煤矿	2020.03.17	2.0
		星村煤矿	2020.12.23	2.4
		腾东煤矿	2021.03.03	1.2

		矿井	时间	震级
无灾型矿震	陕西	金鸡滩煤矿	2020.12.15	2.6
		神木崔家沟煤矿	2021.03.11	3.2
	内蒙	红庆河煤矿	2021.04.02	2.3
		红庆河煤矿	2021.06.11	3.0
		石拉乌素煤矿	2020.03.24	2.9
		石拉乌素煤矿	2021.02.06	2.9
		石拉乌素煤矿	2021.08.20	2.9
		石拉乌素煤矿	2021.08.29	2.8
		石拉乌素煤矿	2021.10.30	2.5
		石拉乌素煤矿	2021.12.20	2.6
石拉乌素煤矿	2022.03.07	2.4		
石拉乌素煤矿	2022.08.06	2.8		

# 煤矿矿震现象及其发生现状



- **覆岩型矿震**是煤矿矿震的主要类型之一。巨厚覆岩破断、运动、结构失稳等均可能诱发强矿震，低位强矿震甚至会诱发冲击矿压灾害。



顶板型冲击矿压

# 报告提纲



- 煤矿矿震现象及发生现状
- 覆岩矿震关键层及其判别
- 矿震关键层破断震动效应

## 覆岩型矿震发生原因

- 大多数高能量矿震均与覆岩中坚硬厚层顶板（均为关键层）有关。如山东东滩煤矿六采区，内蒙鄂尔多斯矿区石拉乌素煤矿、红庆河煤矿，甘肃砚北煤矿等近几年发生的多次高能量矿震。
- 高位关键层的破断运动诱发高能量矿震，而低位关键层的破断运动可能诱发冲击矿压甚至复合动力灾害。

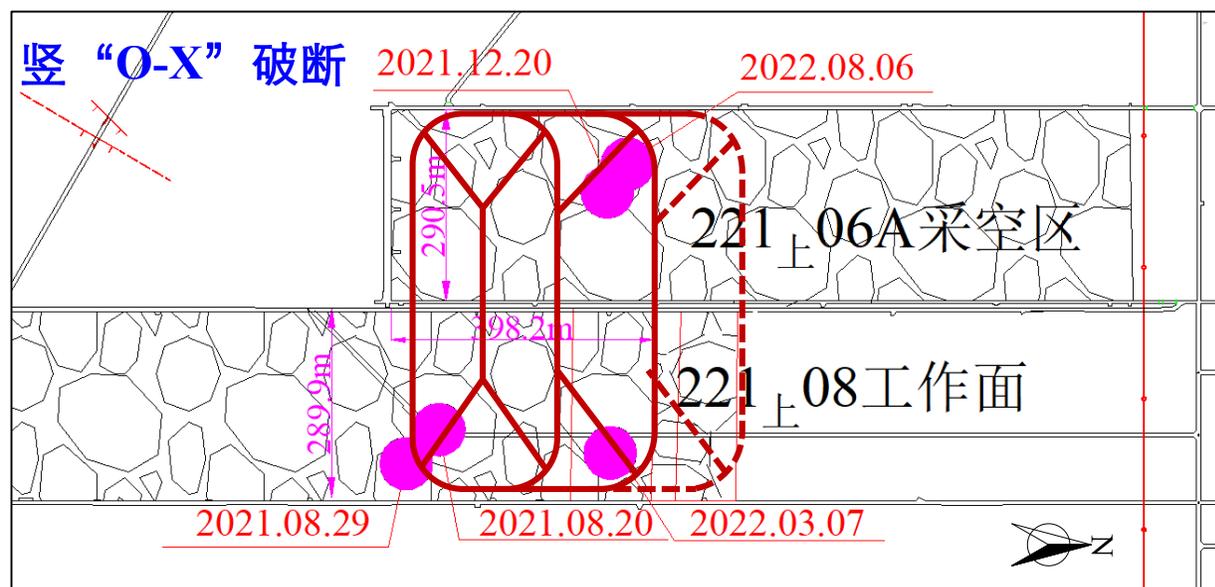
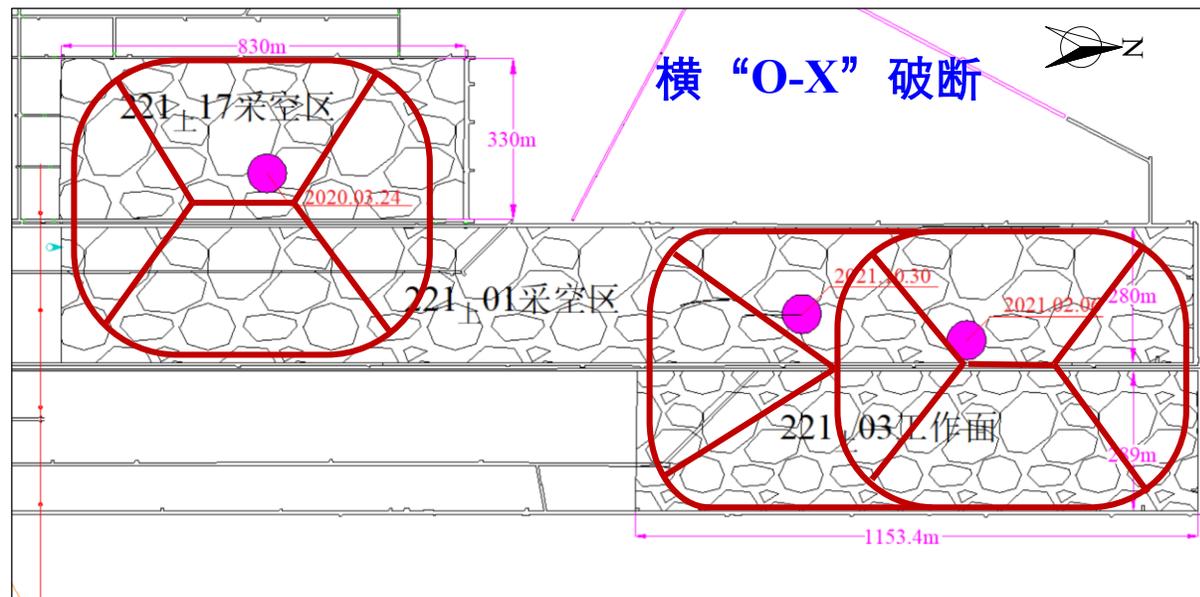
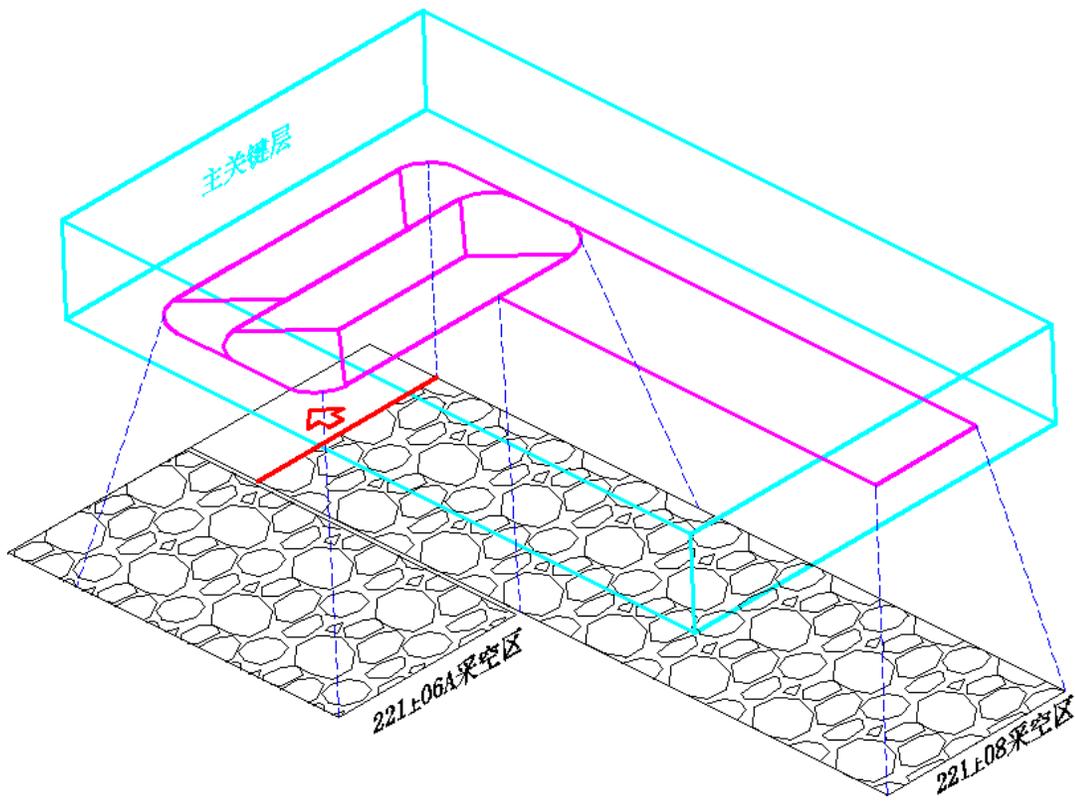
矿井	山东兖州东滩、 鲍店煤矿	山东兖州 济宁二号井	河南义马 跃进、千秋煤矿	山东新汶华 丰煤矿	安徽淮北 海孜、杨柳煤矿
岩性	细砂岩	岩浆岩	砾岩	砾岩	岩浆岩
平均厚/m	200	1155	340	550	120 (70)
距煤层/m	10	425	225	156	170 (120)

# 覆岩矿震关键层及其判别



## 覆岩型矿震发生机制

- 随着采空区尺寸增加，悬顶范围增大，关键层依次发生初次破断、周期性破断，容易诱发大能量矿震。



## □ 矿震关键层的定义

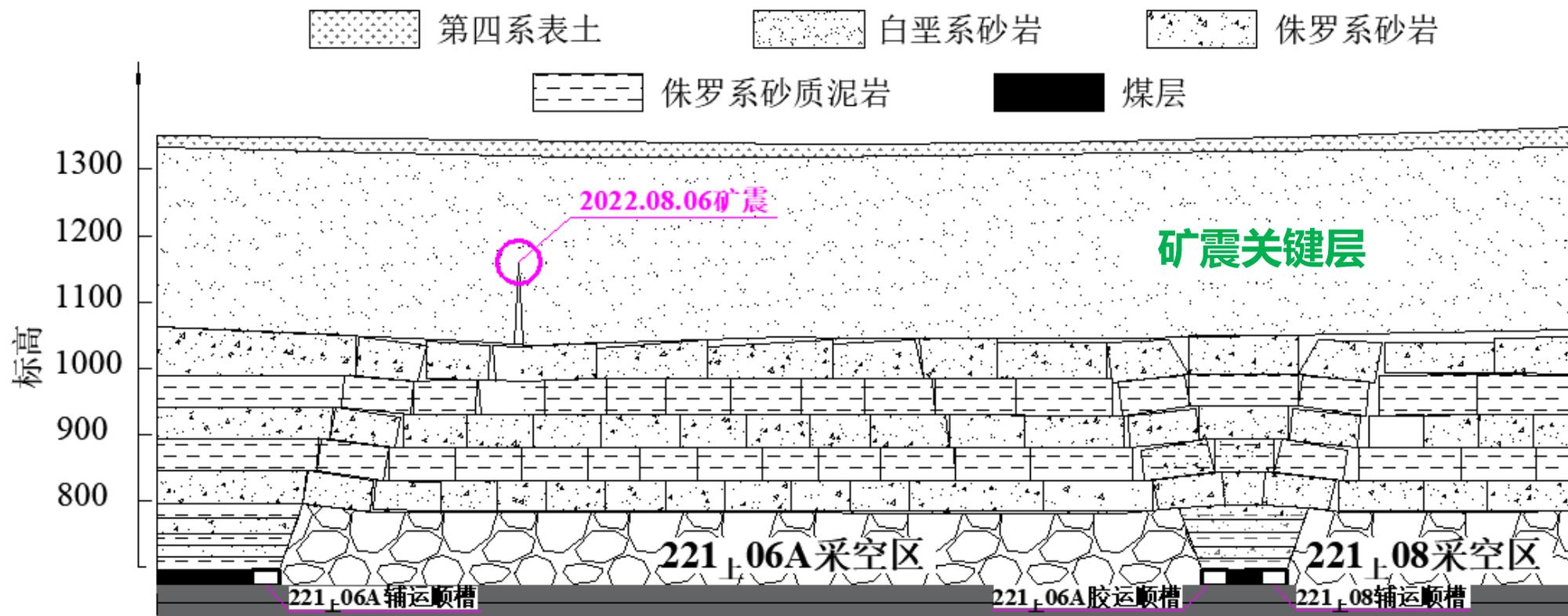
- 矿震关键层：对矿震发生和分布具有控制作用的一层或一组关键岩层（组）；**矿震关键层一定是关键层，而关键层不一定是矿震关键层。**

## □ 覆岩关键层的矿震特征

- 覆岩关键层作为**主要承载层**，在初始地应力和采动应力叠加作用下积累了较高的应力和能量，**破断**后将形成覆岩型矿震；
- 另一方面，关键层破断后形成**铰接结构**，结构在采掘扰动和岩石性质劣化等共同作用下将再次发生**失稳**，产生覆岩型矿震。
- 第三，煤层上覆岩层的破断运动可能是**单层关键层**，也可能是多层岩层组成的**复合关键层**破断运动。

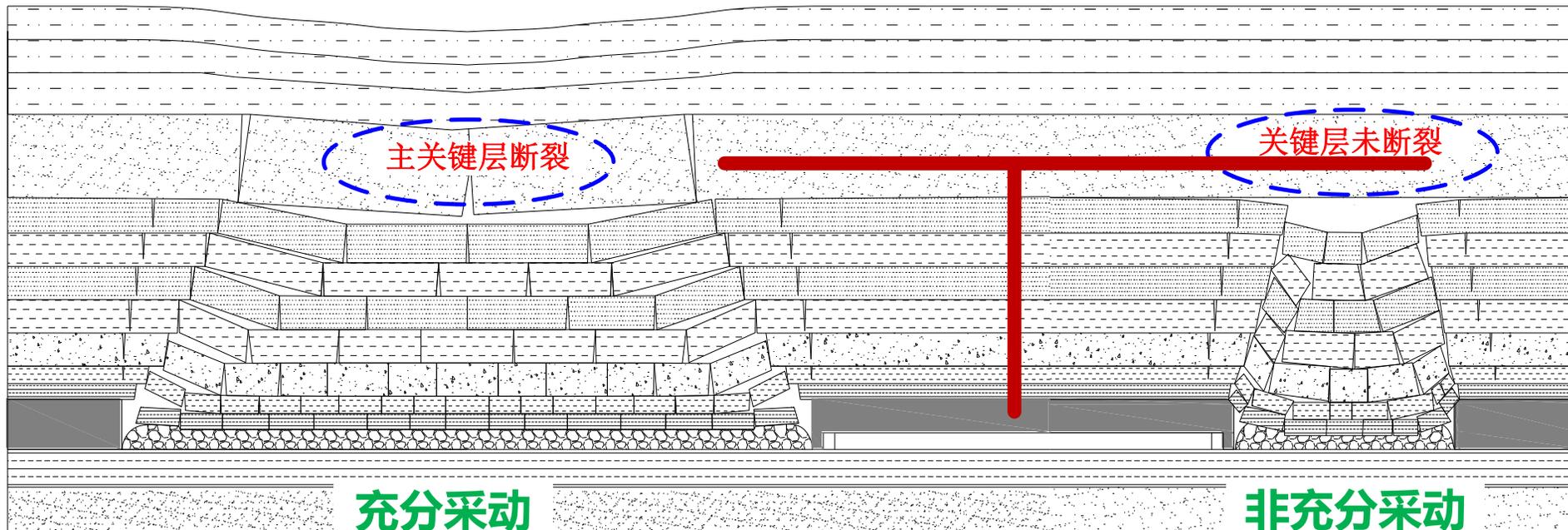
## 矿震关键层的特征

- 矿震关键层是关键层，它的破断和运动对采场覆岩结构和区域地表沉降起重要作用；
- 与其他关键层相比，矿震关键层中积累了更多弹性能，断裂、运动后形成高能矿震。



## 矿震关键层的判别

- 基于关键层理论，结合主关键层位置、采高 $H_m$ 以及是否处于充分采动等条件，可初步对矿震关键层进行判别；
- **充分采动**：矿震关键层应为裂隙区上方的第一层关键岩层（组）；
- **非充分采动**：矿震关键层应为裂隙区内弯曲能指数最大的关键岩层（组）。



## 矿震关键层的判别

裂隙带高度是指采空区上覆岩层中冒落带和裂隙带之和

➤ 裂隙带高度判别方法（按照导水裂隙带）：

(1) 《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》中计算公式：

$$h = \frac{100 \sum M}{1.2 \sum M + 2.0} \pm 8.9 \quad h = 30 \sqrt{\sum M} + 10$$

坚硬岩层

$$h = \frac{100 \sum M}{1.6 \sum M + 3.6} \pm 5.6 \quad h = 20 \sqrt{\sum M} + 10$$

中硬岩层

局限性：受采深和采厚等条件限制。

(2) 许家林教授等人提出了通过覆岩关键层位置预计导水裂隙带高度的方法：以(7-10) M (M 为煤层采厚) 作为临界高度，对导水裂隙带高度进行估算。该方法能适应不同采厚条件下的导水裂隙带高度预计。

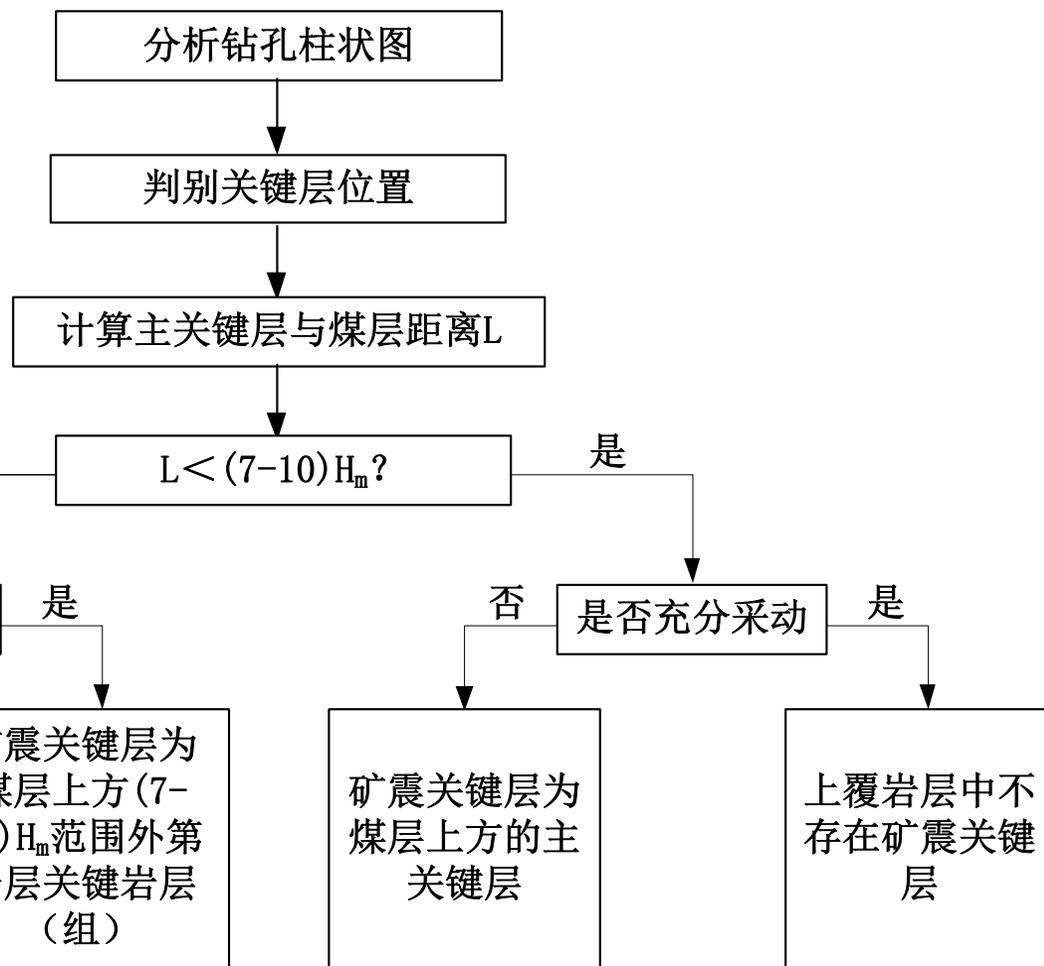
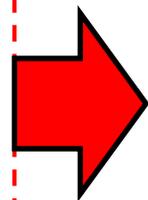
## 矿震关键层的判别

- 根据矿震关键层与煤层之间的距离 $D$ ，可将其分为远场型、中场型和近场型：当 $D$ 大于100m（或10倍采高）时，为远场型；当 $D$ 小于50m（或7倍采高）时，为近场型；当 $D$ 处于50-100m（或7-10倍采高）时，为中场型。

$L$ —主关键层距煤层距离

$(7-10)H_m$ —采动裂隙发育高度

$H_m$ —采高

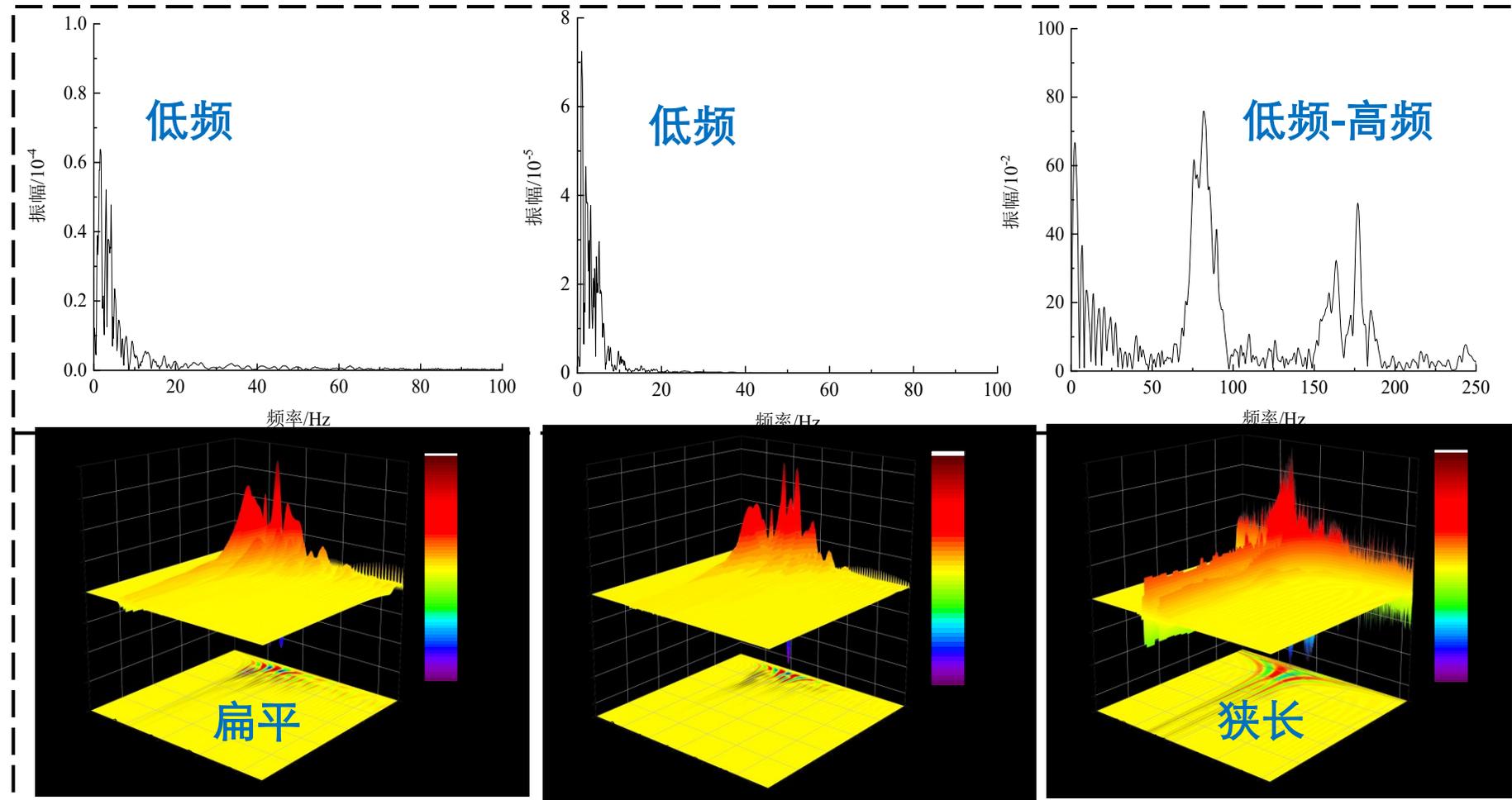


## 矿震关键层的类型

矿震关键层类型	矿震关键层赋存特点	致灾性
远场岩层（组）型	矿震关键层处于高位，与煤层距离一般大于100m（或 $10H_m$ ）；为巨厚较坚硬岩层（组），厚度一般大于40-60m，单轴抗压强度大于40MPa。	诱冲可能性极小；地面震感强烈；发生频次高。
中场岩层（组）型	矿震关键层处于中位，与煤层距离一般小于100m（或 $10H_m$ ）；为厚硬岩层（组），厚度一般大于30m，单轴抗压强度大于50MPa。	诱冲可能性较大；地面震感强烈；发生频次较低。
近场岩层（组）型	矿震关键层处于低位，与煤层距离一般小于50m*或 $7H_m$ ）；为厚硬岩层（组），厚度一般大于15m，单轴抗压强度大于60MPa。	诱冲可能性大；地面震感强烈；发生频次低。

## 矿震关键层的震动特征

### ➤ 频谱特征



远场岩层型矿震

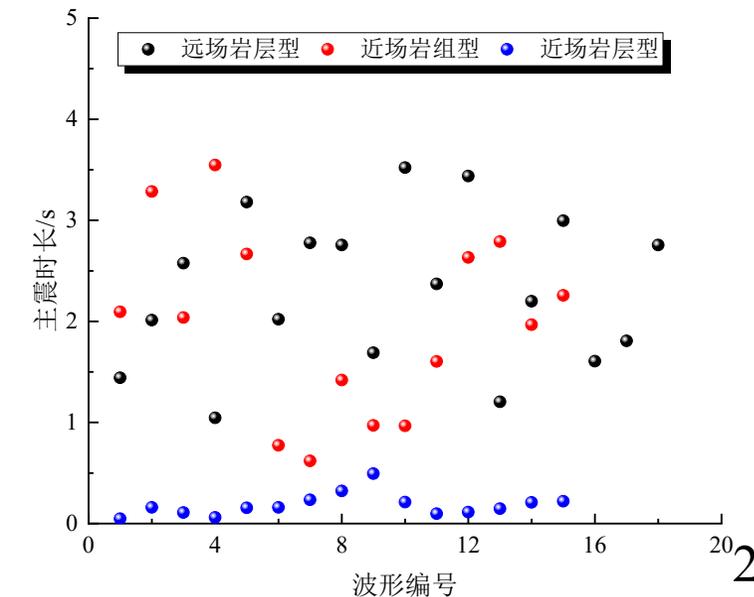
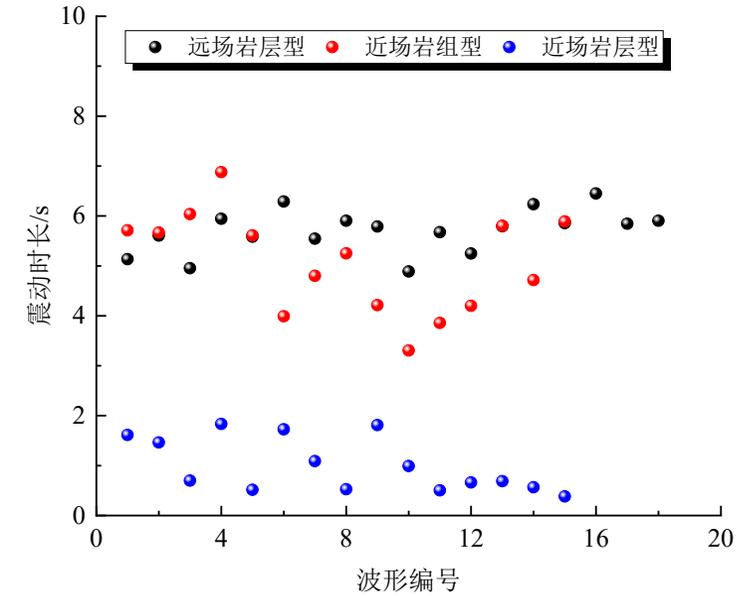
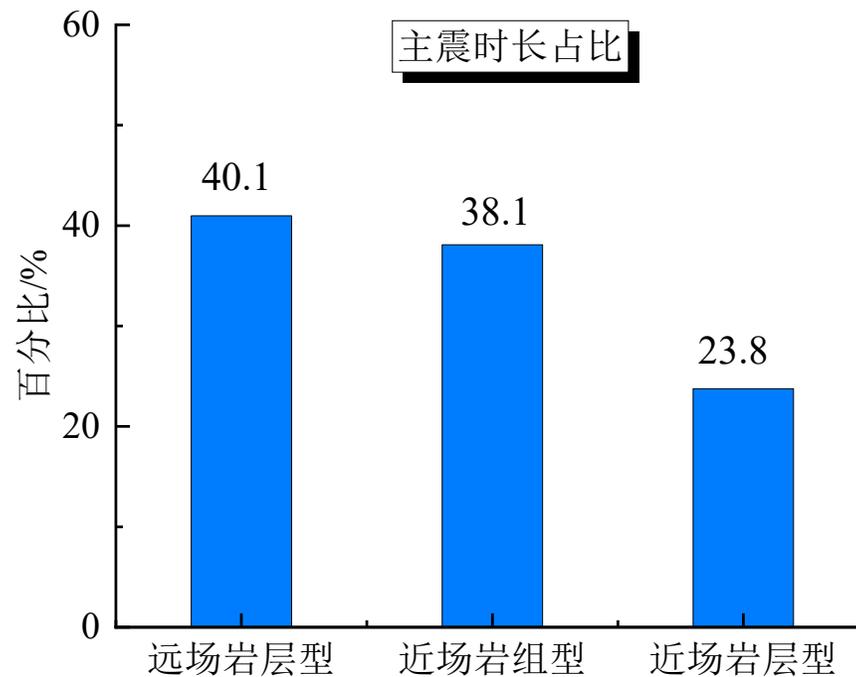
近场岩组型矿震

近场岩层型矿震

## 矿震关键层的震动特征

矿震波形的震动时长、主震时长和主震时长占比

矿震震动时长由大到小依次为：  
远场岩层型、近场岩组型、近场岩层型。  
近场岩层型主震时长占比最小。

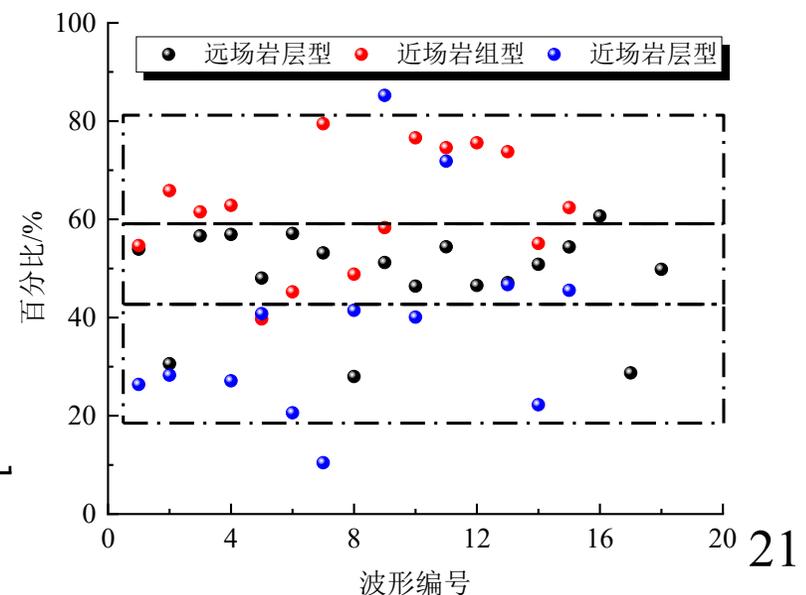
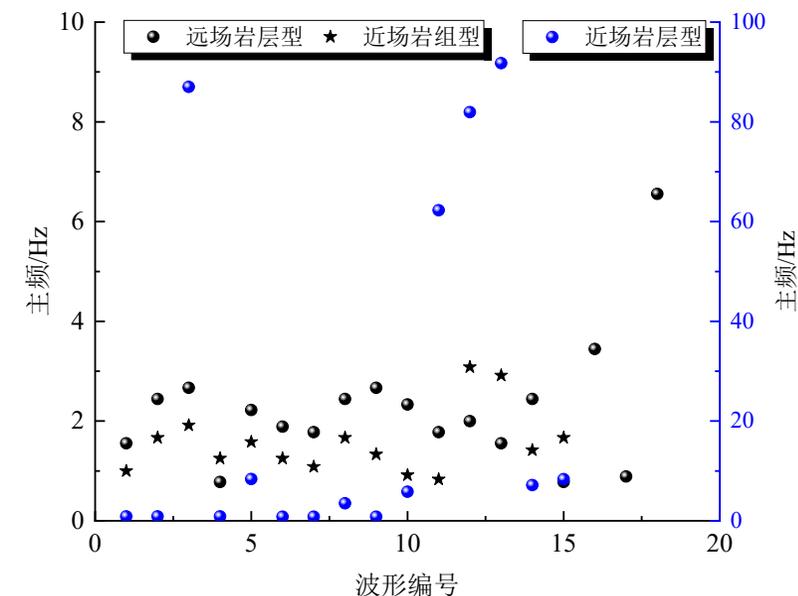
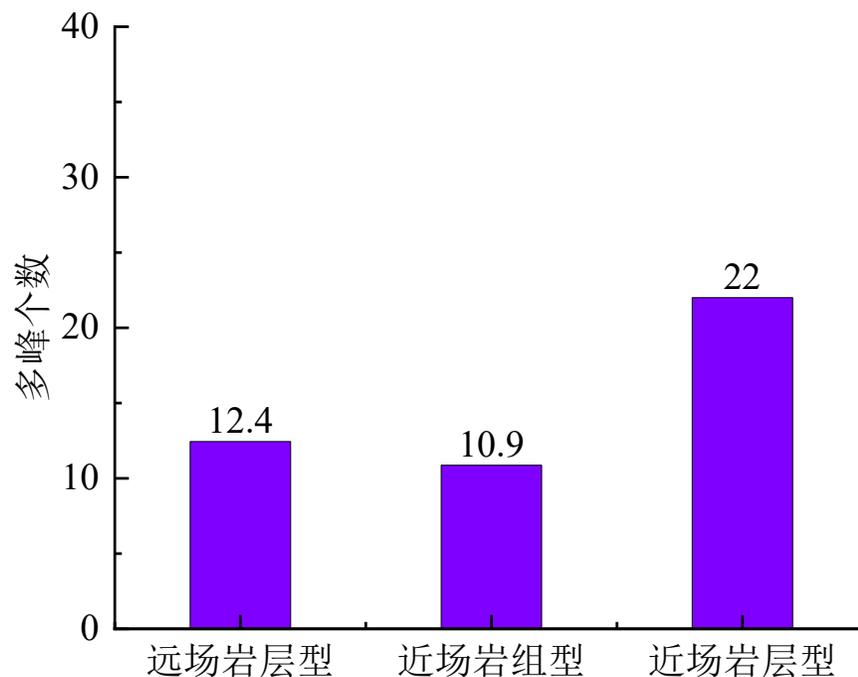


# 覆岩矿震关键层及其判别



## 矿震关键层的震动特征

- 矿震波形的主频、低频段面积占比和多峰个数
- 远场岩层型、近场岩组型矿震频率主要集中在低频段；近场岩层型低频段占比较小；
- 近场岩层型矿震波形多峰个数最大，具有更多频率中心。

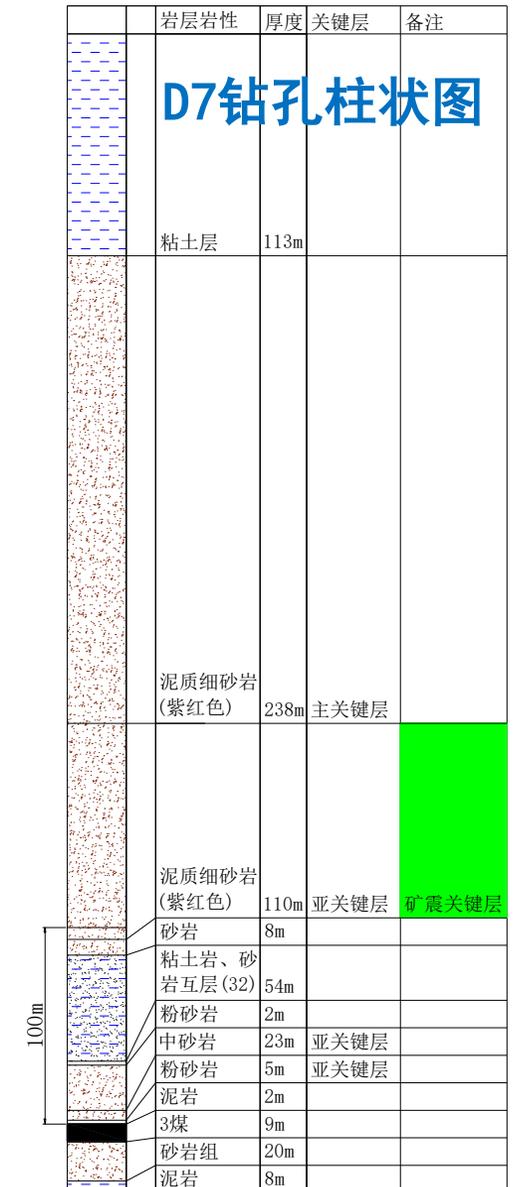
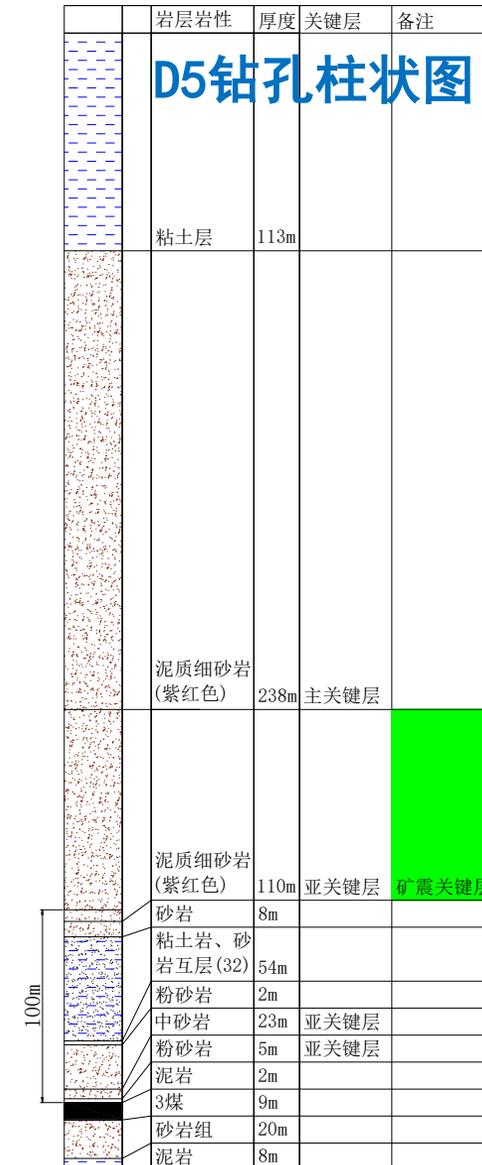


# 覆岩矿震关键层及其判别



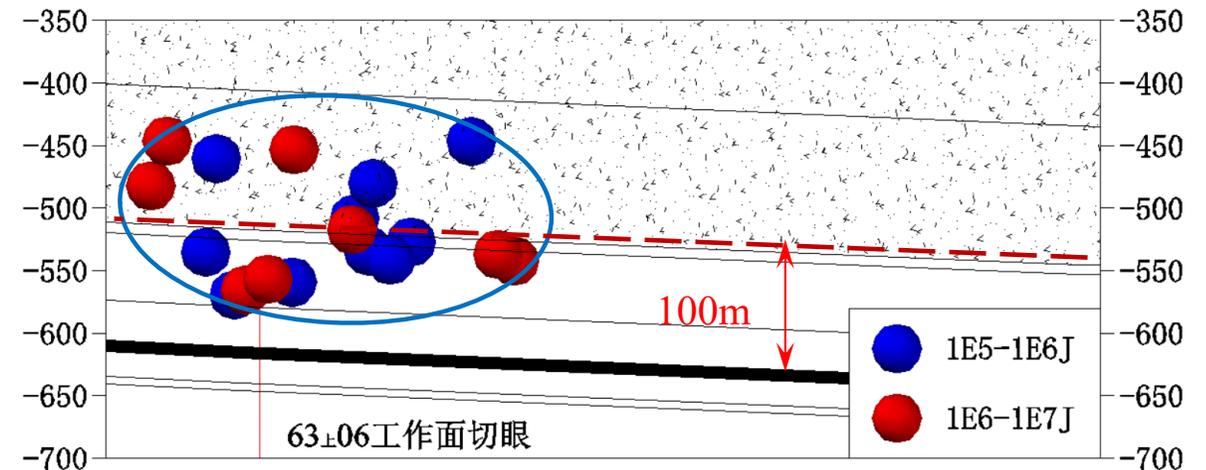
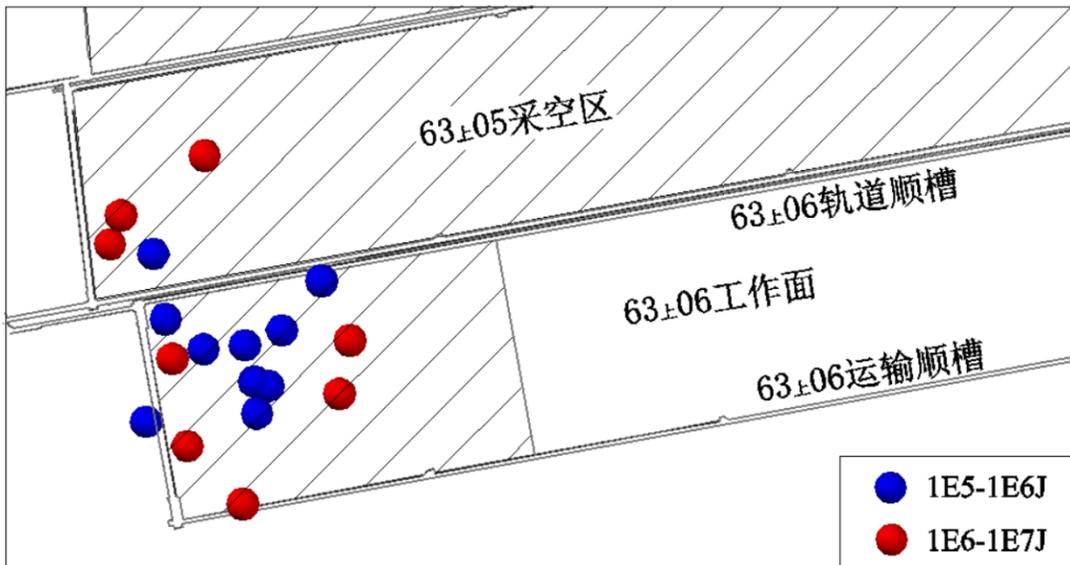
## 东滩煤矿-理论判别

- 东滩矿6306工作面，采高6m，充分采动。
- D4钻孔柱状图：亚关键层1（5m粉砂岩）、亚关键层2（23m中砂岩）、亚关键层3（110m泥质细砂岩）、主关键层（238m泥质细砂岩）。
- D7钻孔柱状图：亚关键层1（6m中砂岩）、亚关键层2（20m粗砂岩）、亚关键层3（92m泥质砂岩组）、主关键层（227m泥质细砂岩）。
- 6306工作面矿震关键层为煤层上方60m范围外的亚关键层（距煤层约100m）。



## 东滩煤矿-现场验证

- 微震监测表明，6306工作面矿震事件均分布于采空区中；矿震与煤层之间最大距离为177m，最小距离为54m，平均距离为106m。
- 6306工作面矿震尤其是高能矿震（能量大于 $1E6J$ ）事件大多位于煤层上覆100m范围外的巨厚岩层中，属于典型的远场巨厚覆岩型矿震，矿震关键层厚度约90-110m。

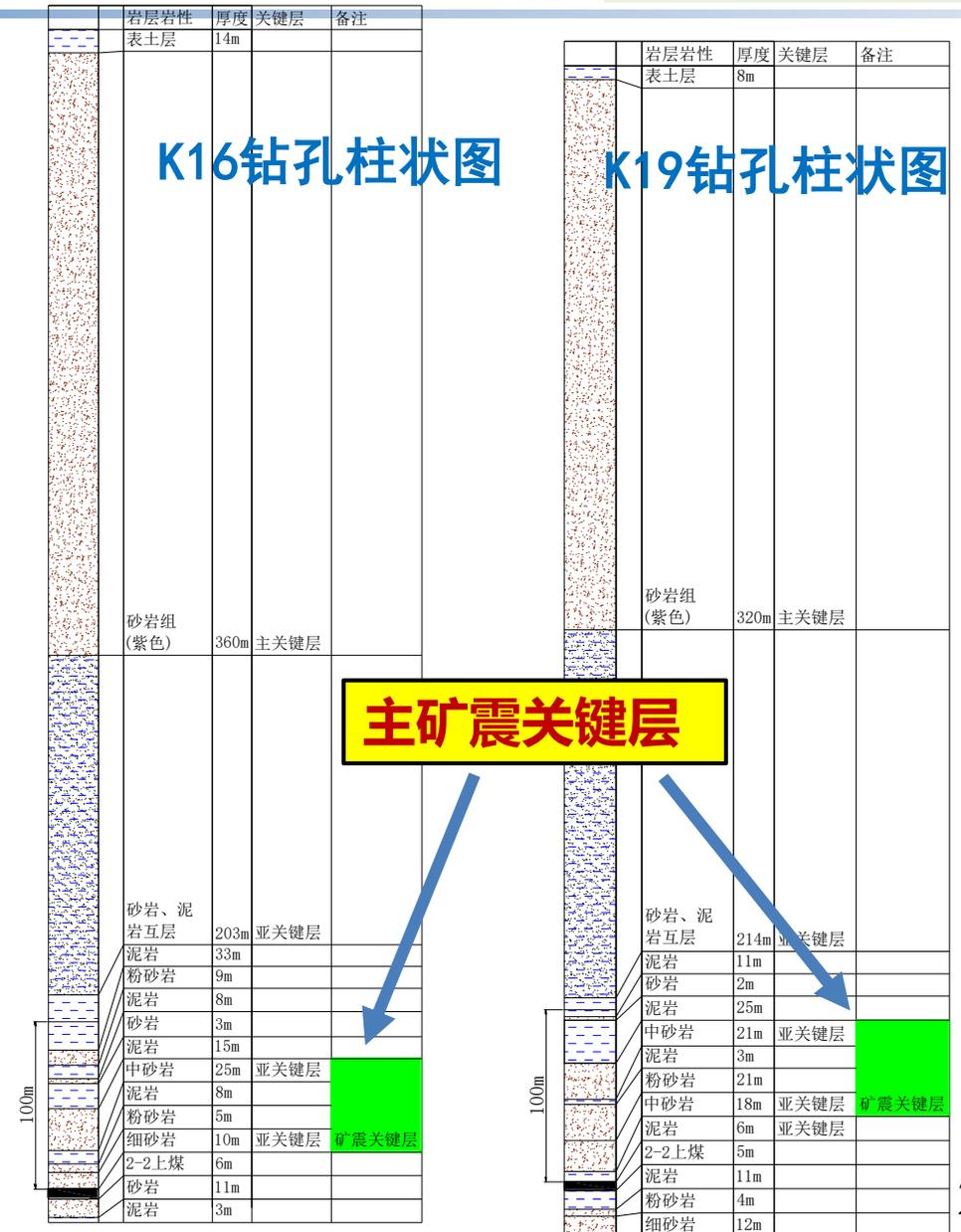


# 覆岩矿震关键层及其判别



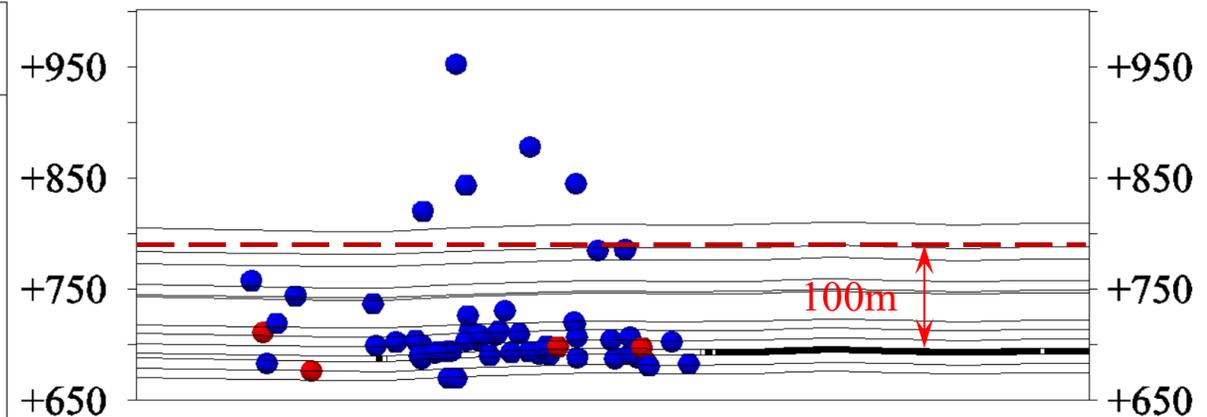
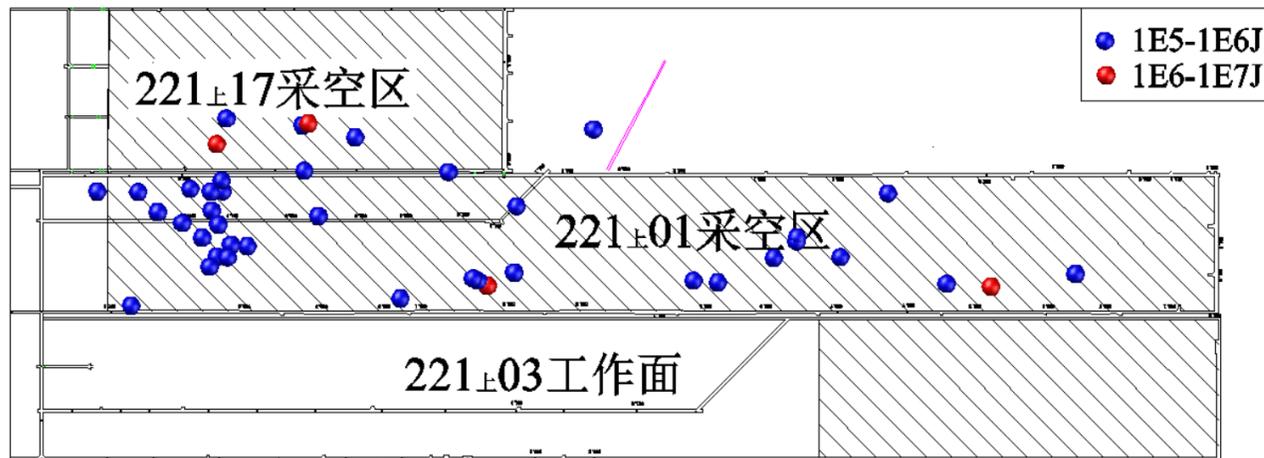
## 石拉乌素煤矿-理论判别

- 221上01工作面，采高5m，非充分采动。
- K16钻孔柱状图：亚关键层1（10m细砂岩）、亚关键层2（25m中砂岩）、亚关键层3（203m砂岩泥岩互层）、主关键层（360m砂岩组）。
- K19钻孔柱状图：亚关键层1（6m泥岩）、亚关键层2（18m中砂岩）、亚关键层3（21m中砂岩）、亚关键层4（214m砂岩泥岩互层）、主关键层（320m砂岩组）。
- 221上01工作面矿震关键层是煤层上方0-50m范围内的亚关键岩组。



## 石拉乌素煤矿-现场验证

- 微震监测表明，221上01工作面回采期间的矿震事件均分布于采空区中，矿震与煤层之间最大距离为73m，最小距离为0m，平均距离为16m。
- 221上01工作面高能矿震（能量大于 $1E6J$ ）事件大多位于煤层上覆70m范围内的厚硬岩组中，属于近场巨厚覆岩型矿震，矿震关键层岩组总厚大于40m。



# 覆岩矿震关键层及其判别



## 石拉乌素煤矿-理论判别

- 221上08工作面长289m，煤层平均厚度9.64m，处于非充分采动。
- 基于关键层理论，煤层上方共有4层关键岩层：亚关键层1（31m细砂岩）、亚关键层2（29m砂岩组）、亚关键层3（31m中砂岩）、主关键层（259m砂岩组）。
- 根据矿震关键层判别流程，221上08工作面矿震关键层为29.23m砂岩组，距煤层135m，岩层弯曲能量指数为 $2.00E9J$ 。

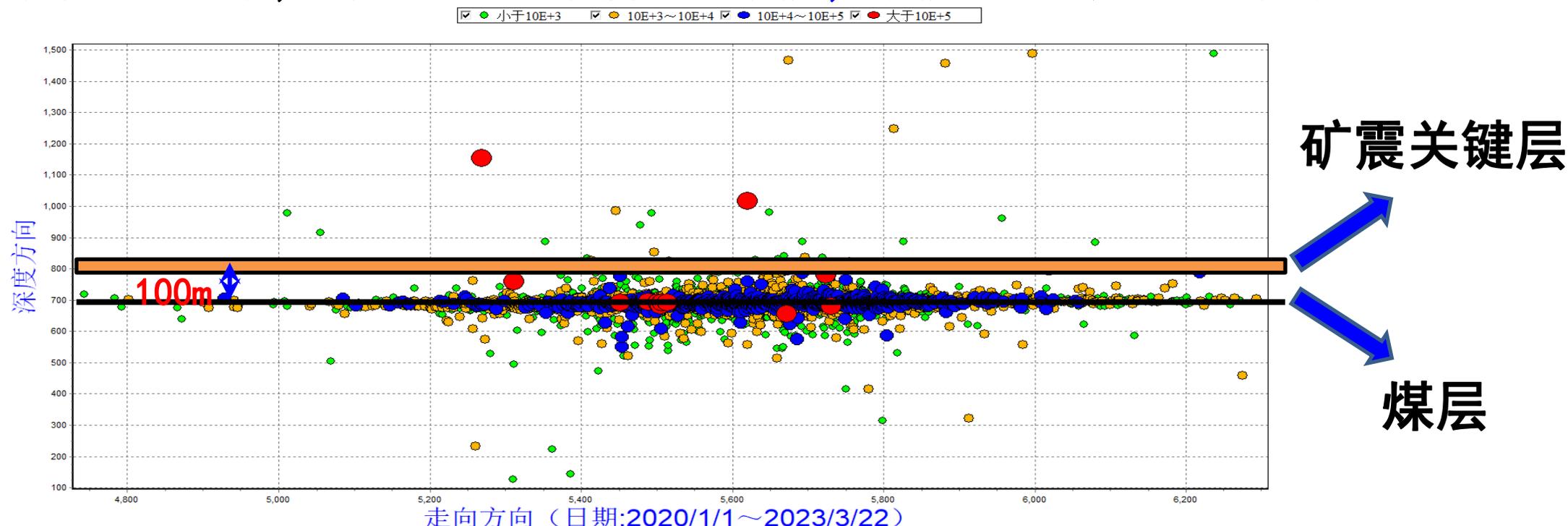
层号	厚度 /m	埋深 /m	岩层岩性	关键层位置	极限跨距/m	岩层图例
30	13.36	13.36	表土			
29	12.38	25.74	细粒砂岩			
28	8	33.74	中粒砂岩			
27	9	42.74	粉砂岩			
26	5.65	48.39	砂质泥岩			
25	259.2	307.59	砂岩组2	主关键层	401.724	
24	6.2	313.79	砂质泥岩			
23	22.1	335.89	中粒砂岩			
22	8.1	343.99	砂质泥岩			
21	10.2	354.19	粉砂岩			
20	30.6	384.79	中粒砂岩	亚关键层	43.029	
19	12.2	396.99	砂质泥岩			
18	19	415.99	细粒砂岩			
17	14.5	430.49	砂质泥岩			
16	5.2	435.69	细粒砂岩			
15	11.2	446.89	砂质泥岩			
14	10	456.89	砂质泥岩			
13	10	466.89	砂质泥岩			
12	10	476.89	砂质泥岩			
11	3.2	480.09	细粒砂岩			
10	11.5	491.59	砂质泥岩			
9	29.23	520.82	砂岩组1	亚关键层	50.352	
8	14.37	536.19	砂质泥岩			
7	10.16	546.35	粉砂岩			
6	6.38	562.73	砂质泥岩			
5	6.0	572.73	砂质泥岩			
4	6.12	598.85	中粒砂岩			
3	12.86	611.71	粉砂岩			
2	12.77	624.48	砂质泥岩			
1	3.05	655.53	细粒砂岩	亚关键层	43.555	
0	9.51	665.04	2-2煤			

矿震关键层

135m

## 石拉乌素煤矿-现场验证

- 微震监测表明，221上08工作面回采期间的矿震事件均分布于采空区中，矿震与煤层之间最大距离为295m，最小距离为0m，平均距离为126m。
- 221上08工作面高能矿震（能量大于 $1E6J$ ）事件大多位于煤层上覆100m范围外的厚硬岩组中，属于远场巨厚覆岩型矿震，矿震关键层岩组总厚约30m。

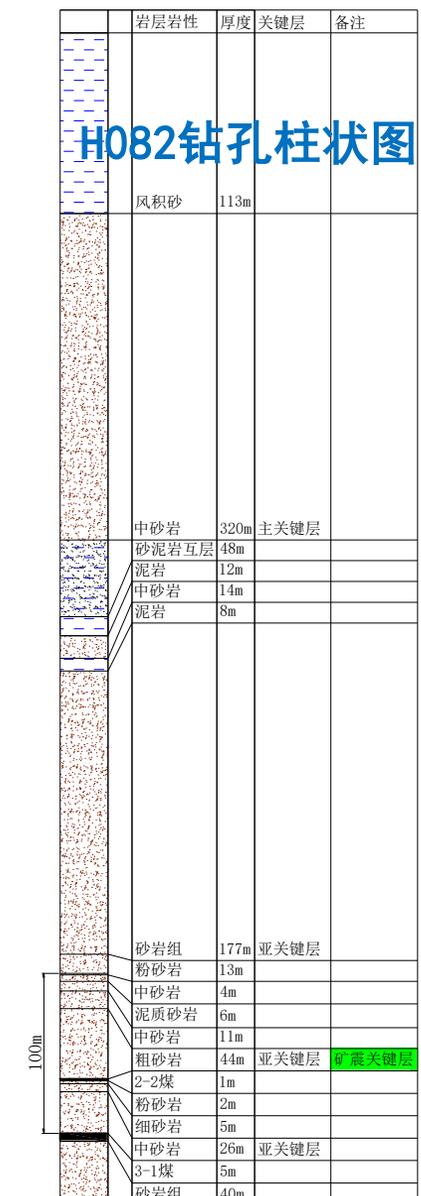
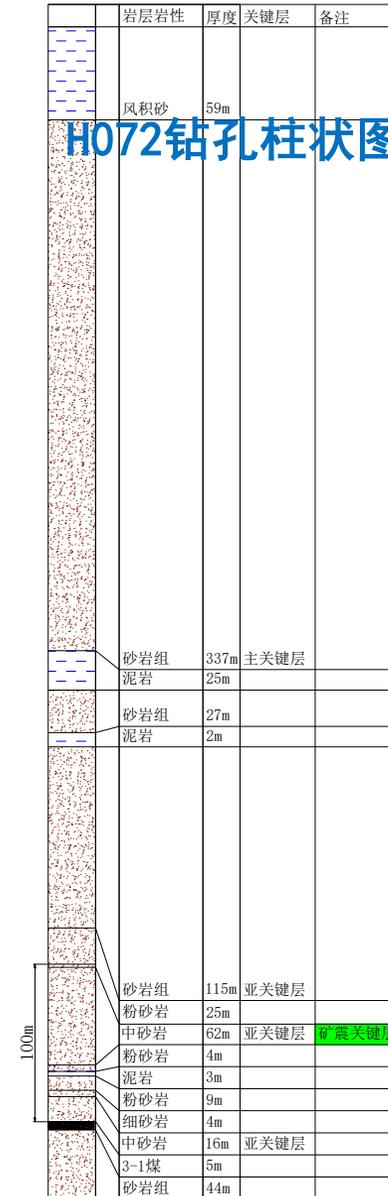


# 覆岩矿震关键层及其判别



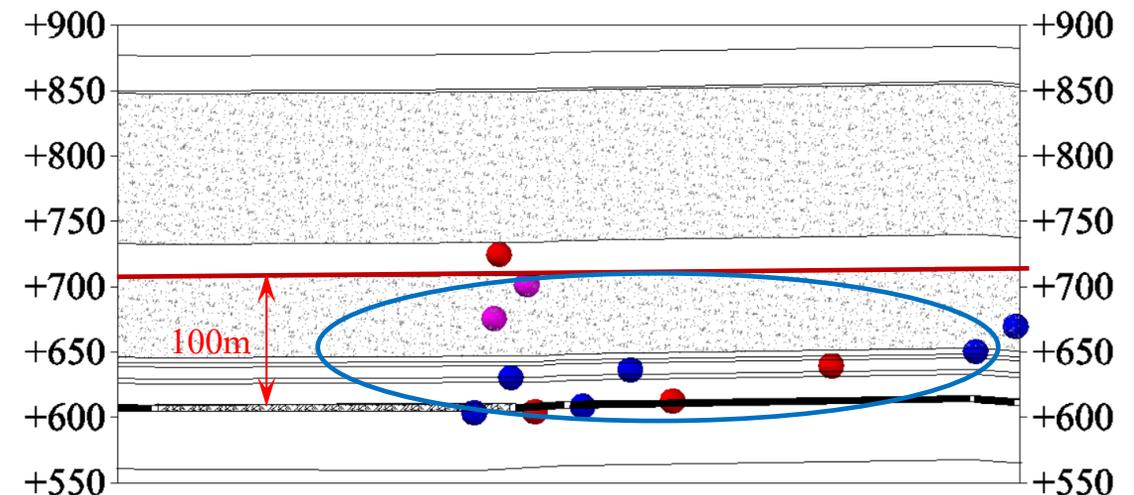
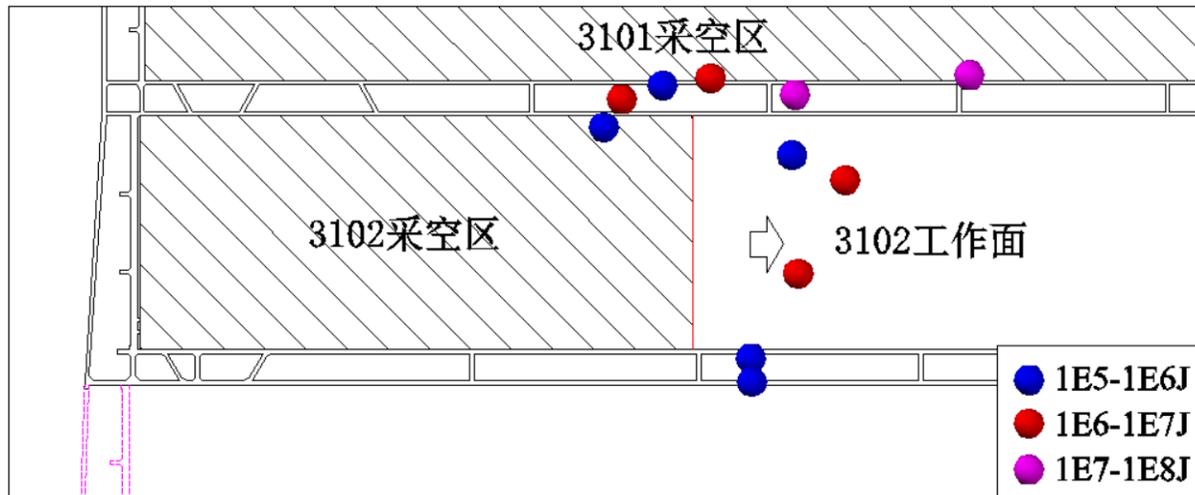
## □ 门克庆煤矿-理论判别

- 3102工作面，采高6m，非充分采动。
- H072钻孔柱状图：亚关键层1（16m中砂岩）、亚关键层2（62m中砂岩）、亚关键层3（115m砂岩组）、主关键层（337m砂岩组）。
- H082钻孔柱状图：亚关键层1（26m中砂岩）、亚关键层2（44m粗砂岩）、亚关键层3（177m砂岩组）、主关键层（320m中砂岩）。
- 3102工作面矿震关键层为煤层上方0-60m范围内的亚关键层（距煤层约34m）。



## □ 门克庆煤矿-现场验证

- 微震监测表明，3102工作面回采期间的矿震事件分布于工作面周围，矿震与煤层之间最大距离为121m，最小距离为0m，平均距离为43m。
- 3102工作面矿震事件大多位于煤层上覆100m范围内的厚硬岩层中，属于**近场巨厚覆岩型矿震**，**矿震关键层厚度约40-60m**。



# 报告提纲



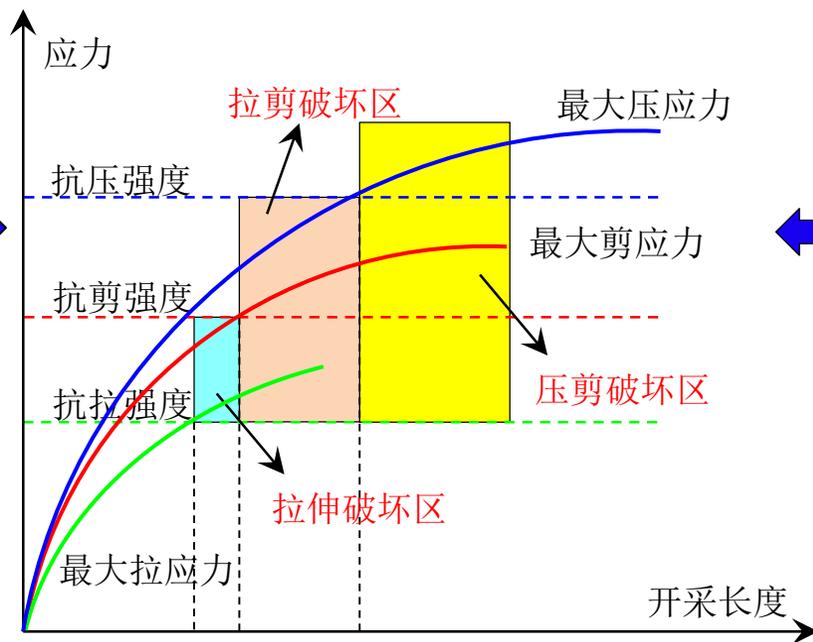
- 煤矿矿震现象及发生现状
- 覆岩矿震关键层及其判别
- 矿震关键层破断震动效应

# 矿震关键层破断震动效应

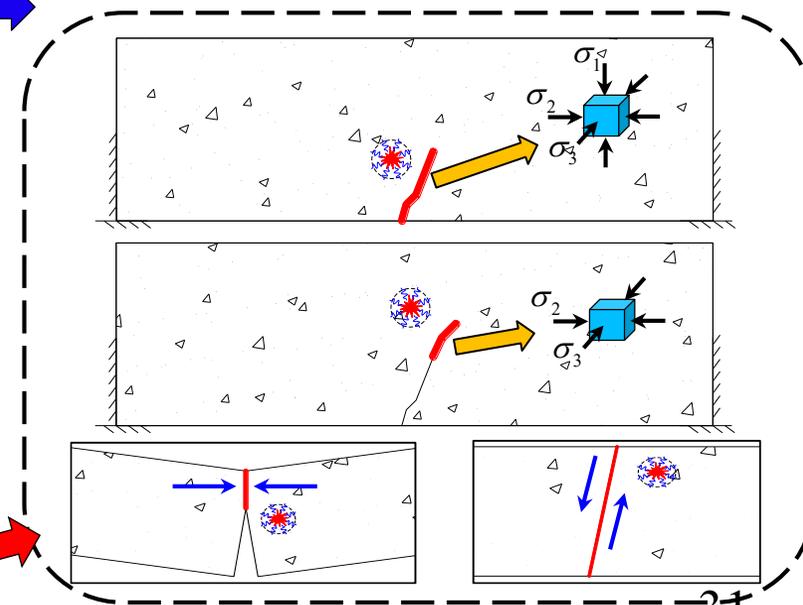
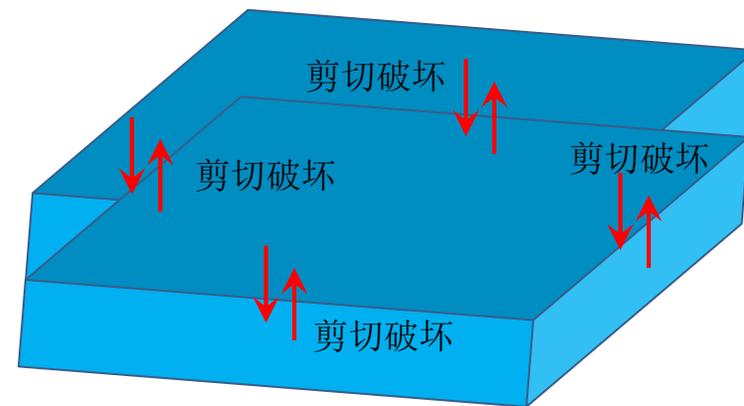
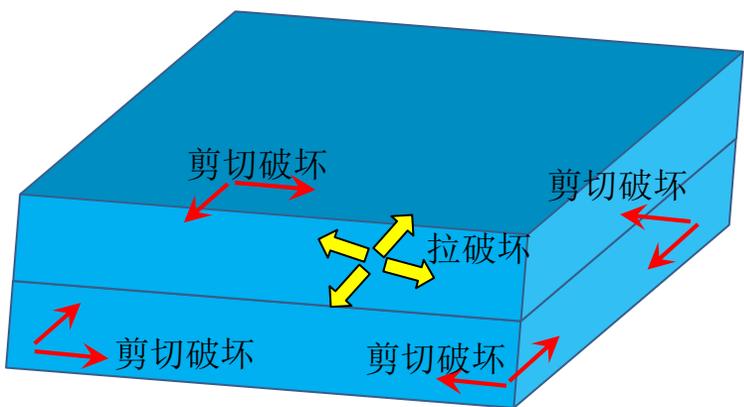
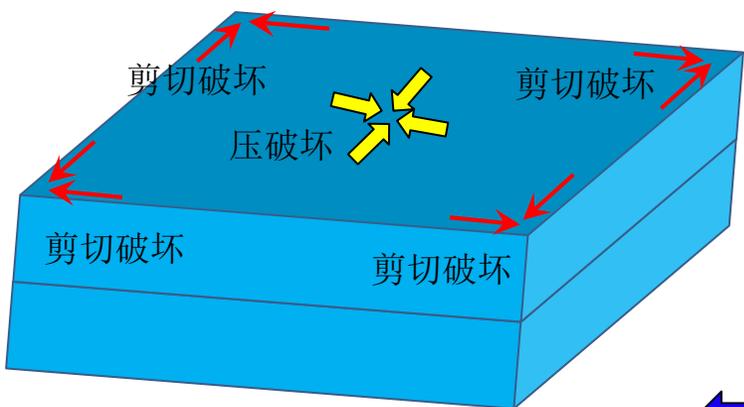


## 矿震关键层强度失效诱发矿震原理

### 巨厚覆岩型矿震发生的应力准则



### 巨厚覆岩破断类型及位置



### 巨厚覆岩型矿震表现形式

## 矿震关键层结构失稳准则

### 岩块挤压破坏导致的回转失稳

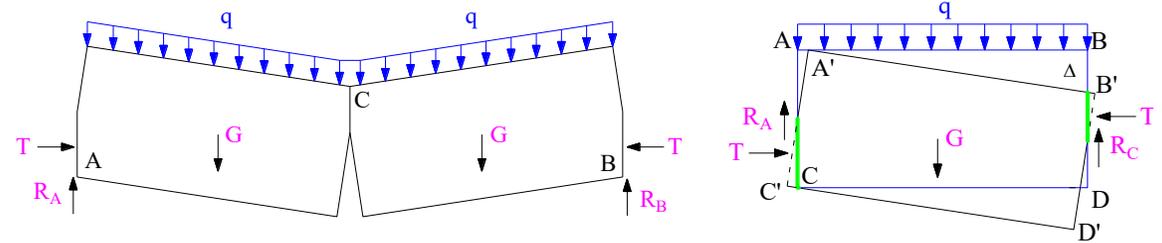
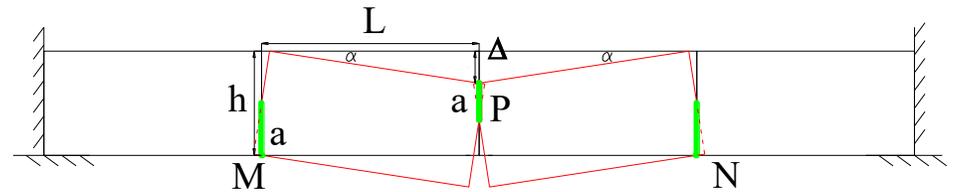
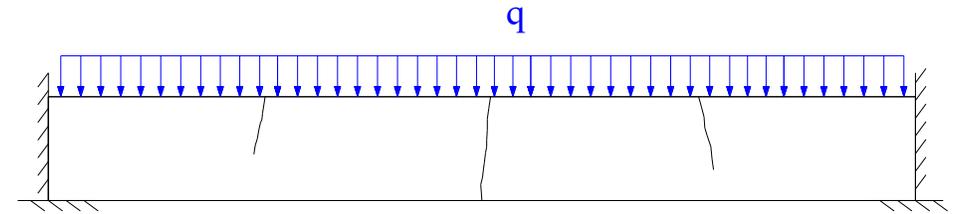
①转动角较小时，铰接结构回转失稳又重新稳定，诱发矿震能量

$$E_{\text{回转}} = \Delta E_{\text{势能}} - E_{\text{破碎}} = \frac{1}{2} \Delta L h a \gamma - E_{\text{破碎}}$$

$$= \frac{1}{2} L h a \gamma \left( h - \frac{h^2}{3k\eta n} - \frac{2\rho g h L^2}{\eta \sigma_c} \right) - E_{\text{破碎}}$$

②转动角较大时，铰接结构回转整体失稳，诱发矿震能量

$$E_{\text{回转}} = \Delta E_{\text{势能}} = L h a \gamma H$$



变形失稳

$$\Delta = l \cdot \sin \alpha = h - \frac{h^2}{3k\eta n} - \frac{2\rho g h L^2}{\eta \sigma_c}$$

## 矿震关键层结构失稳准则

### 岩块剪切滑移导致的滑移失稳

①沿接触面滑移长度较小时，铰接结构滑移失稳后仍形成稳定结构，诱发矿震能量

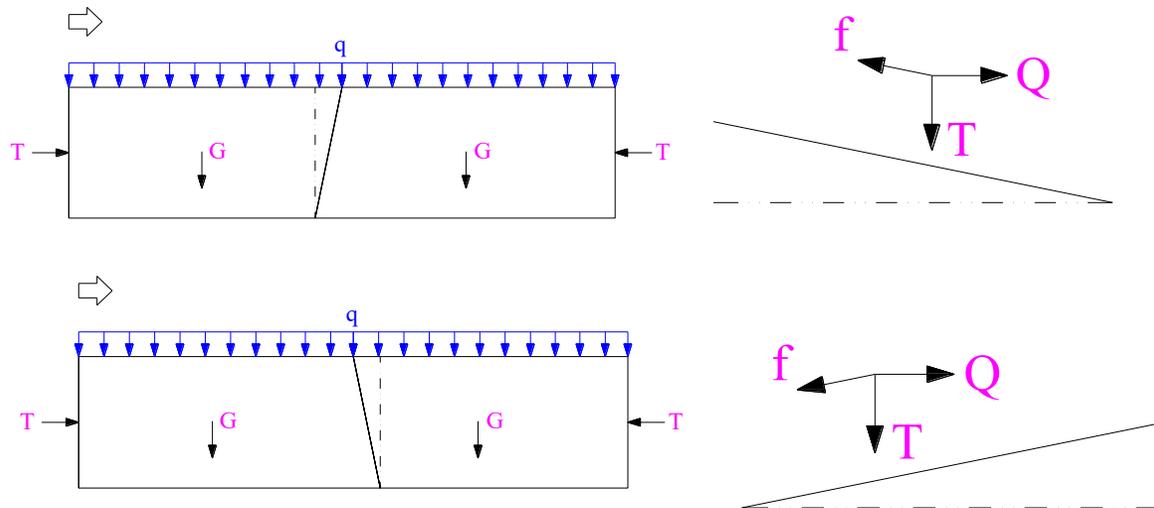
$$l_f \leq \frac{h}{\cos \theta}$$

$$E_{\text{滑移}} = \Delta E_{\text{势能}} - E_{\text{摩擦}} = Lh\gamma \cdot \cos \theta l_f - fl_f$$

②沿接触面滑移长度较大时，铰接结构滑移失稳后发生掉落，掉落高度为 H，诱发矿震能量

$$l_f \geq \frac{h}{\cos \theta}$$

$$E_{\text{滑移}} = \Delta E_{\text{势能}} = Lh\gamma H$$



滑移失稳

$$\frac{Q}{T} \leq \tan(\varphi - \theta)$$

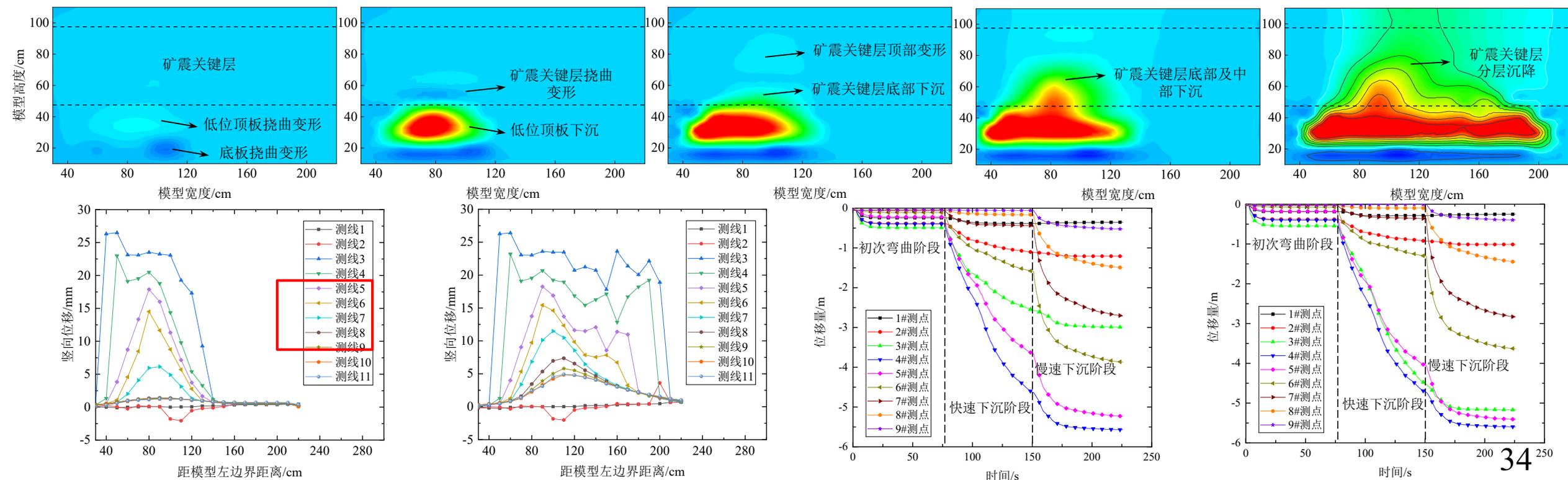
$$\frac{Q}{T} \leq \tan(\varphi + \theta)$$

# 矿震关键层破断震动效应



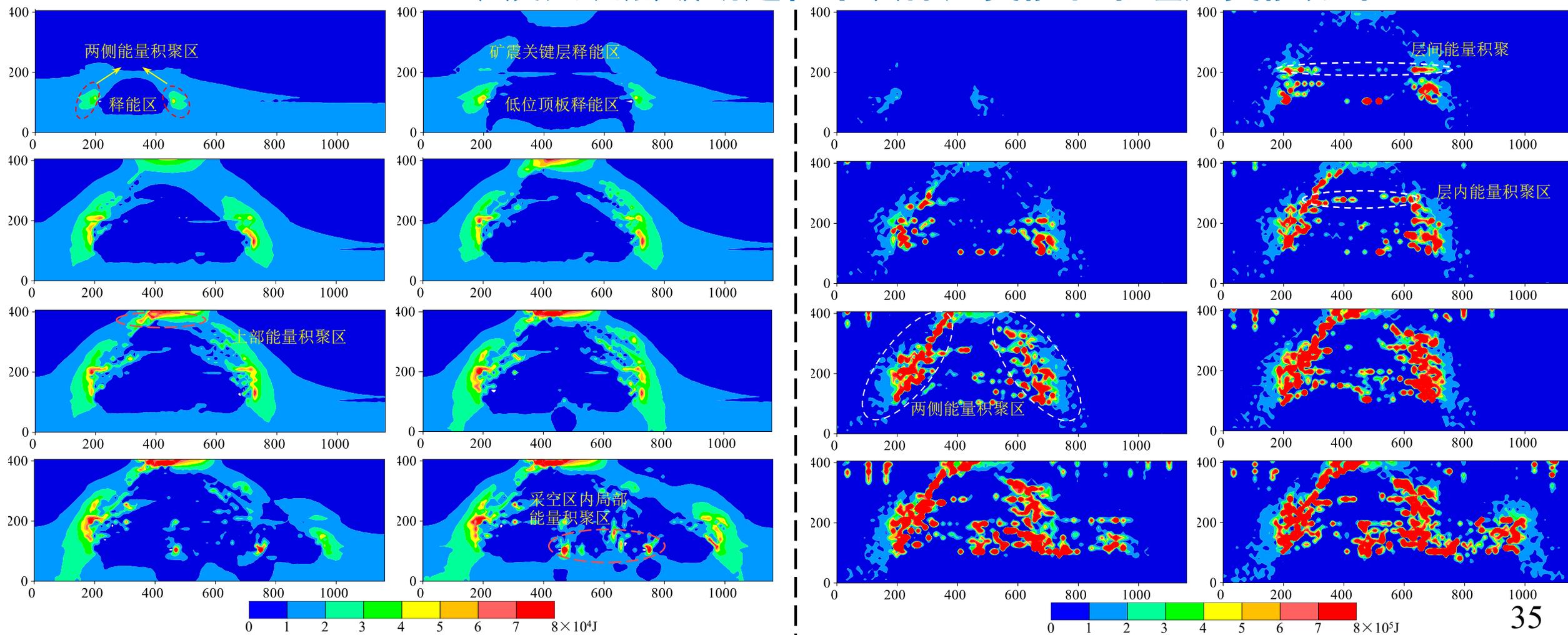
## 矿震关键层的变形-位移特征

矿震关键层弯曲变形和破断存在“分层”现象；随着工作面开采范围增加，矿震关键层依次出现初次弯曲阶段、快速下沉阶段和慢速下沉阶段；铰接结构导致局部区域位移量相对较小。



## 矿震关键层的能量演化

### 矿震关键层破断过程中块体应变能和节理应变能分布

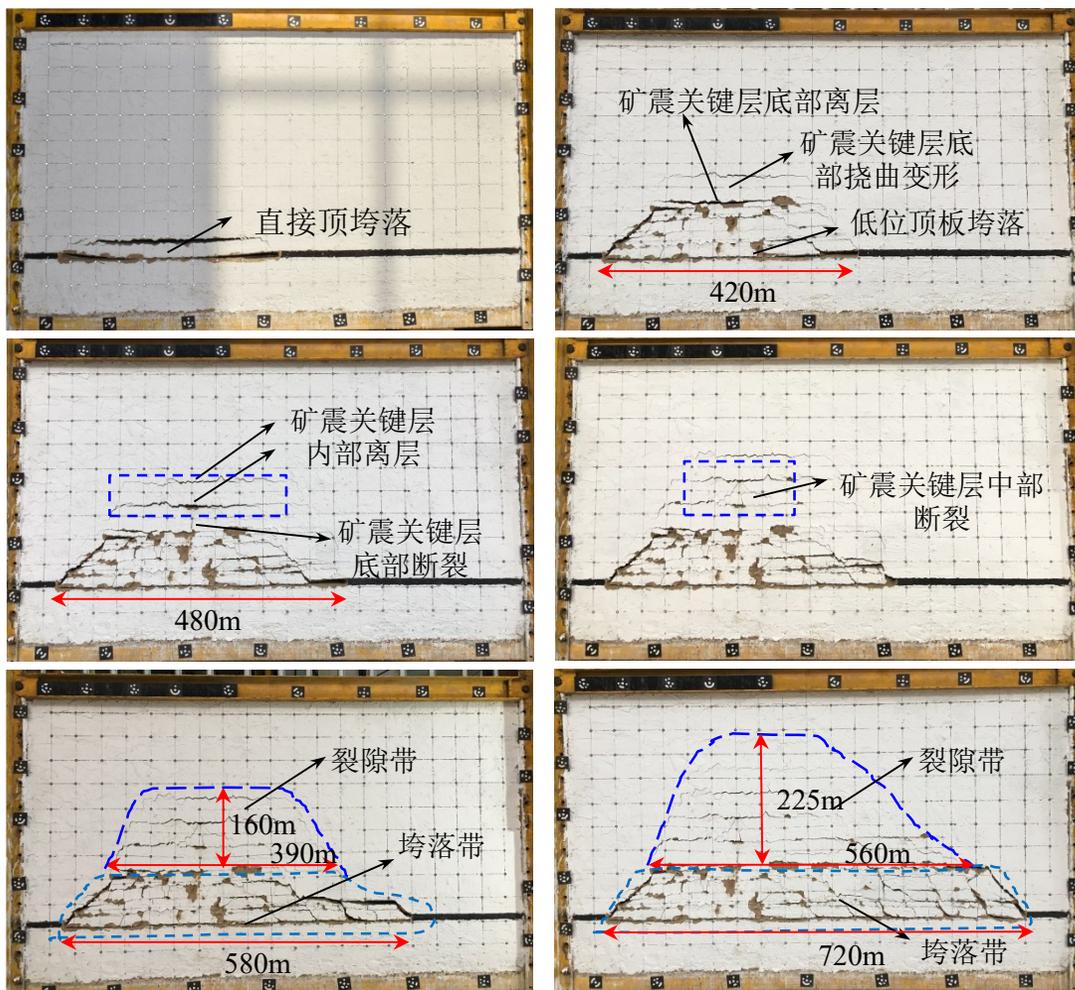




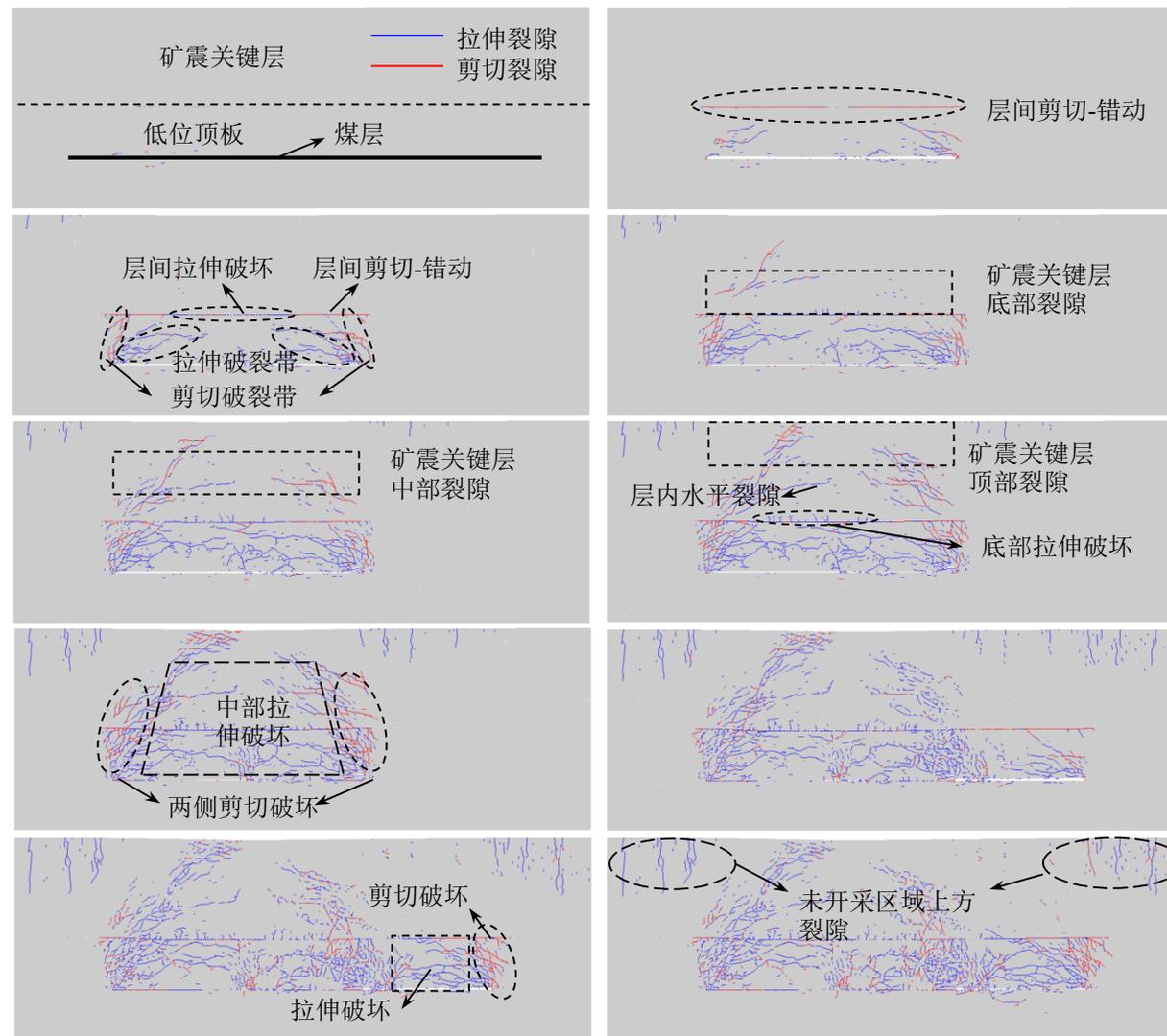
# 矿震关键层破断震动效应



## 矿震关键层的裂隙发育



物理相似模拟



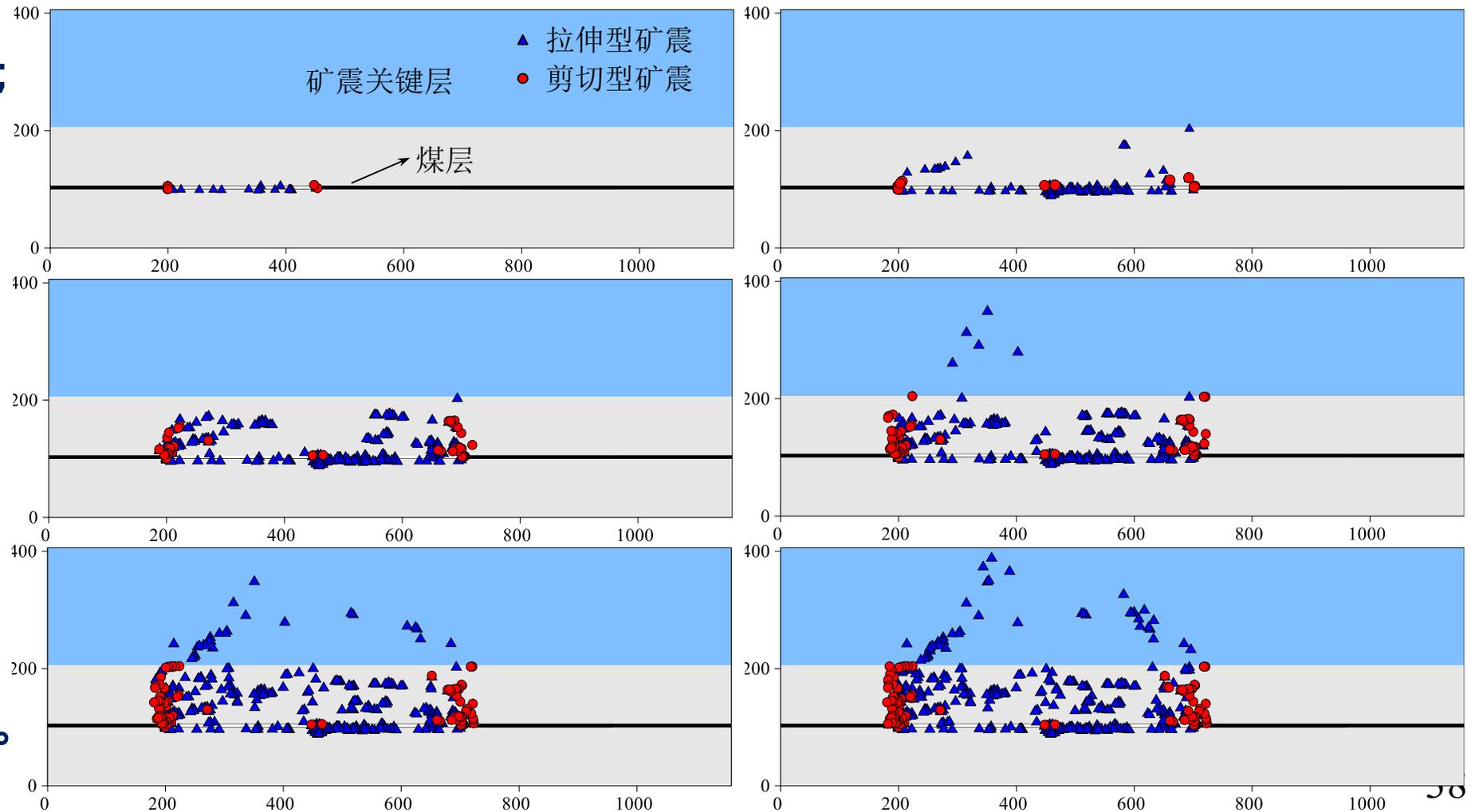
数值模拟

# 矿震关键层破断震动效应



## 矿震关键层破断过程中的矿震演化

- 低位顶板矿震数大于矿震关键层；
- 拉伸型矿震主要分布于采空区上方，剪切型矿震主要分布于采空区两侧；
- 矿震关键层破坏过程中以拉伸型矿震为主，剪切型矿震数量较少。

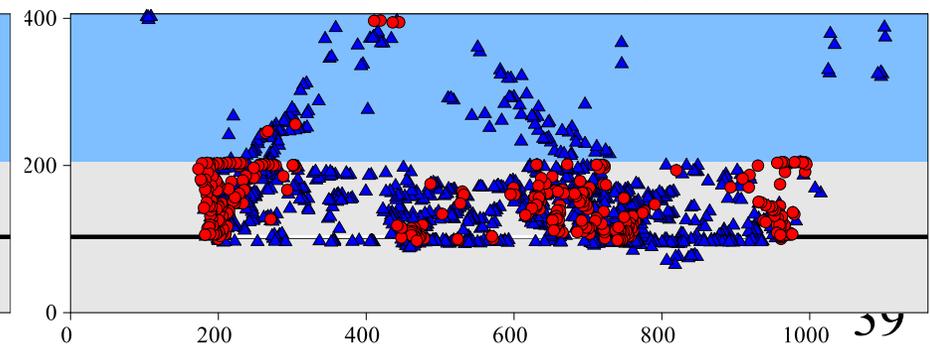
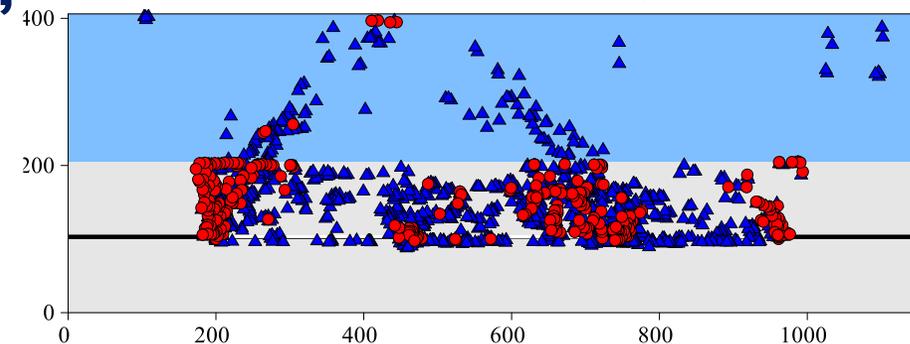
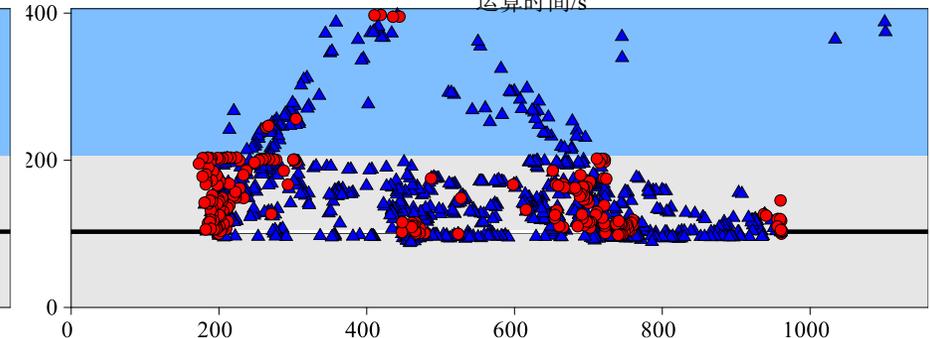
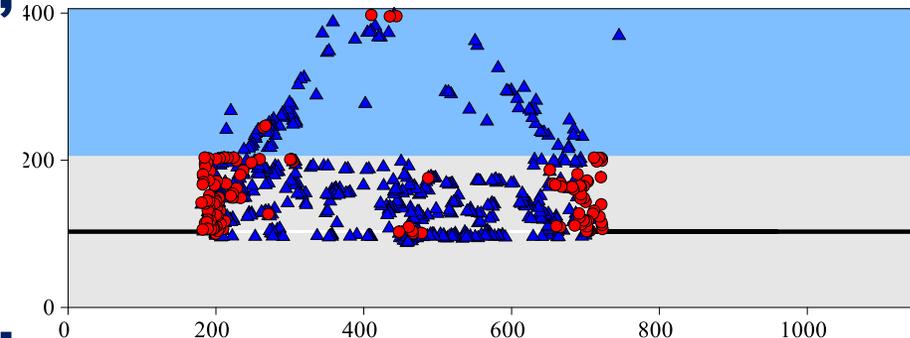
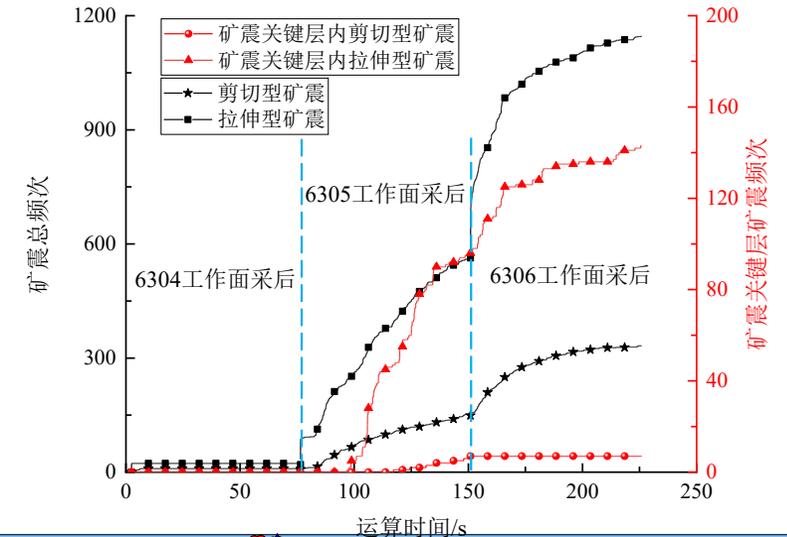


# 矿震关键层破断震动效应



## 矿震关键层破断过程中的矿震演化

- 矿震关键层中的矿震呈倒“V”字形分布，形成岩层自然垮落断裂线。数值模拟验证了岩层破断规律。
- 单面开采时矿震关键层无破断；
- 第二个面开采后，矿震关键层初次破断，矿震频次增加；
- 第三个面开采后，矿震关键层周期破断，矿震频次增量减小。

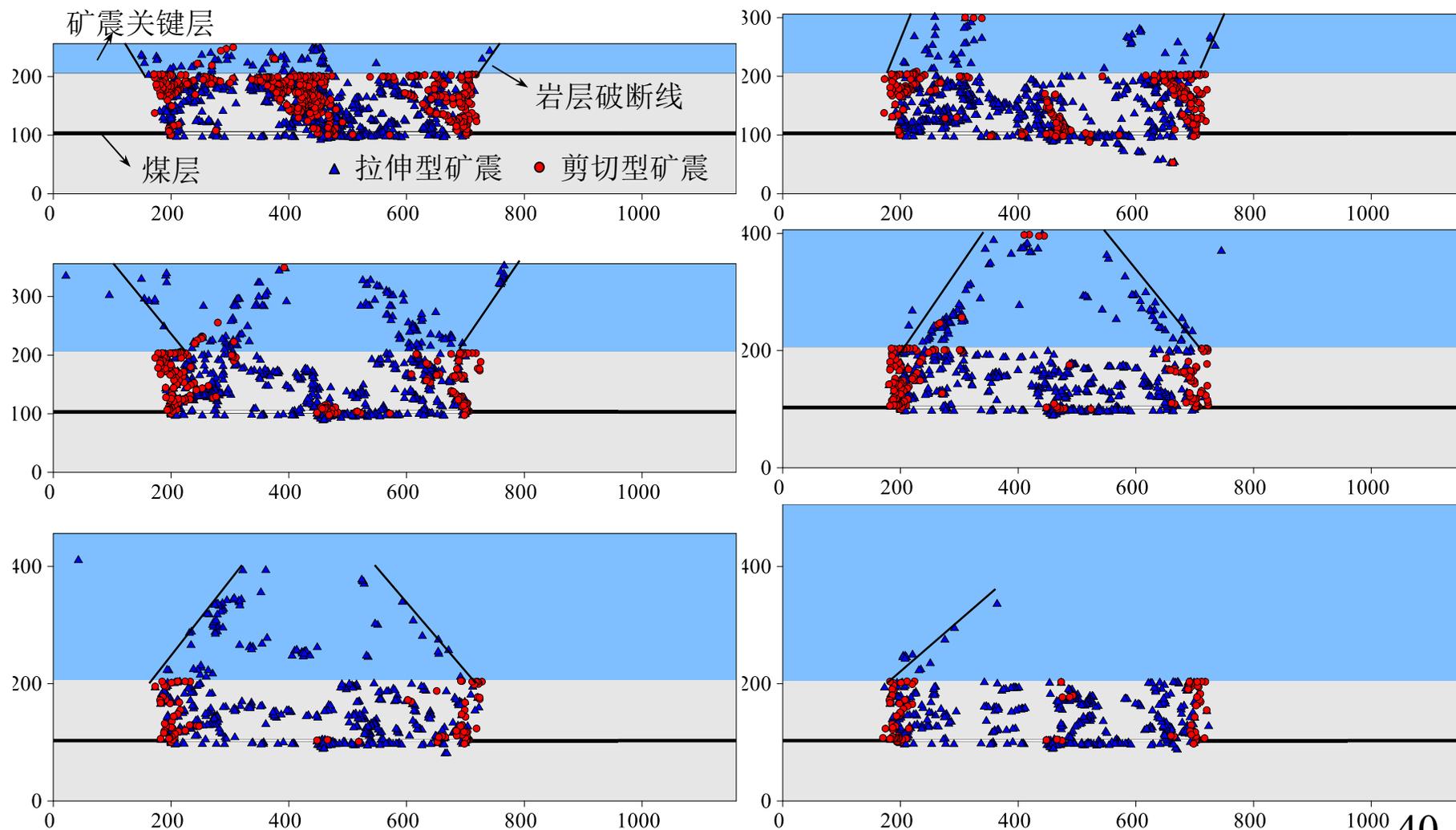


# 矿震关键层破断震动效应



## 关键岩层的厚度——50、100、150、200、250、300m

- 层厚增大后，巨厚覆岩型矿震数量减少，剪切型矿震占比降低。
- 层厚增大后，矿震关键层中上部未完全破断。
- 矿震关键层破断角随层厚增加而减小。

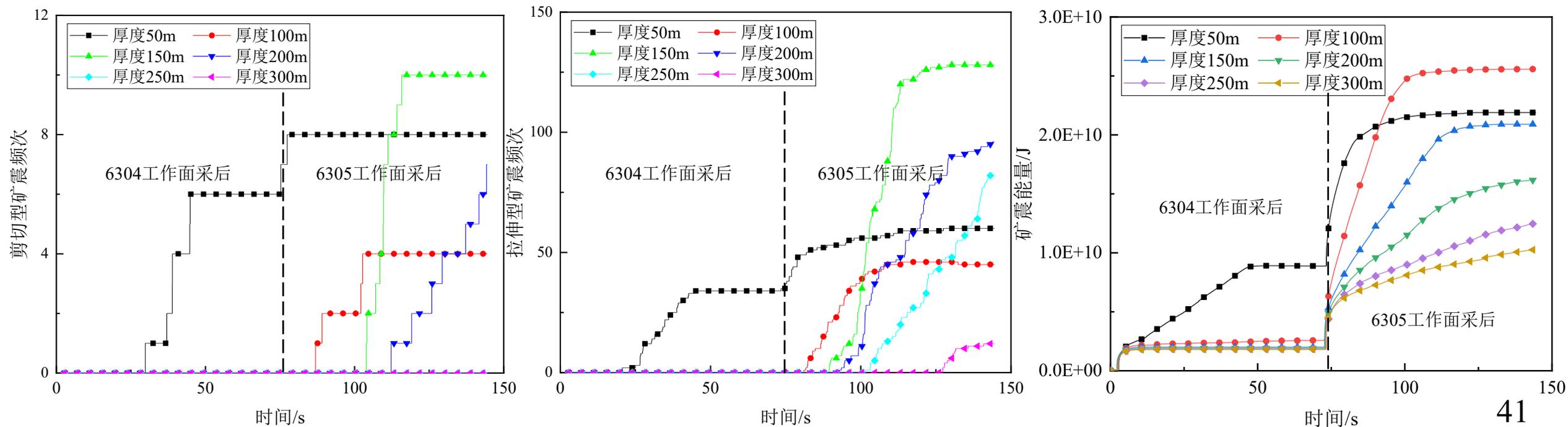


# 矿震关键层破断震动效应



## 关键岩层的厚度——50、100、150、200、250、300m

- 层厚较大时单工作面开采并未诱发矿震关键层产生破断；
- 开采距离相同时，巨厚覆岩型矿震频次与矿震关键层厚度呈负相关；
- 巨厚覆岩型矿震能量峰值、能量增长速率均随矿震关键层厚度增加而逐渐减小。

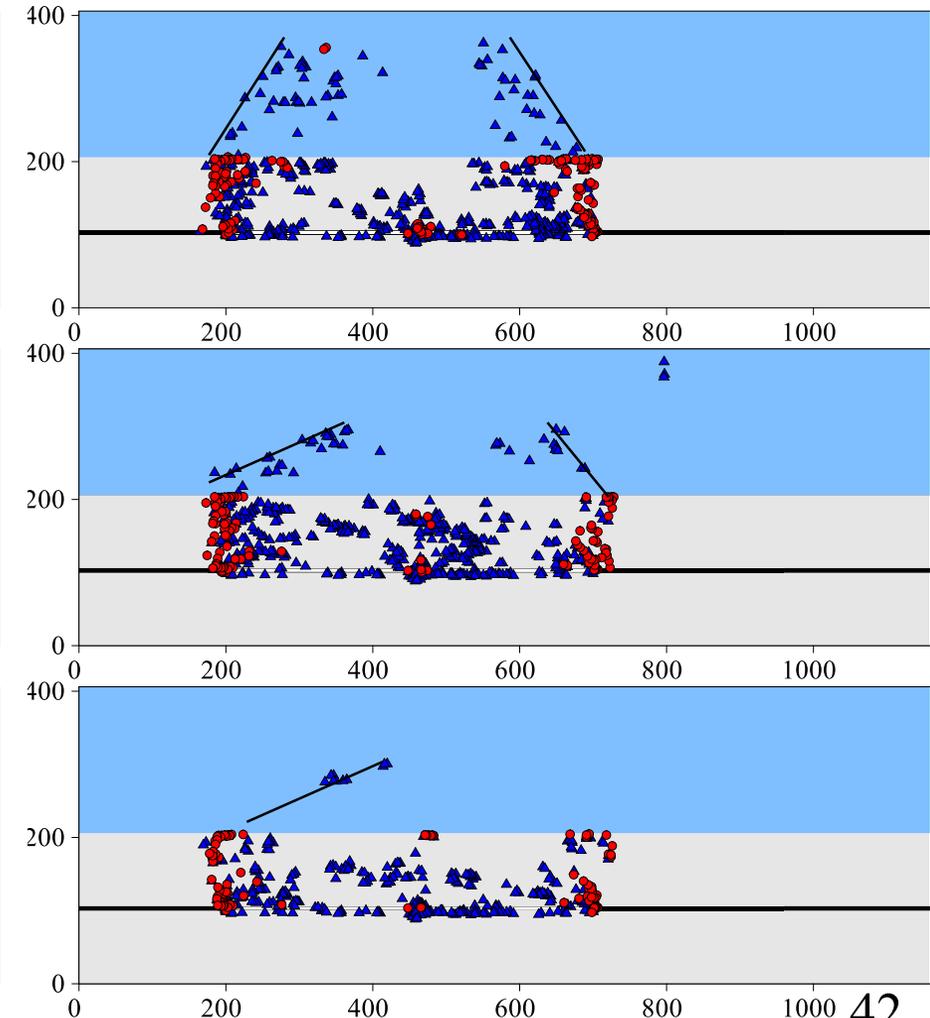
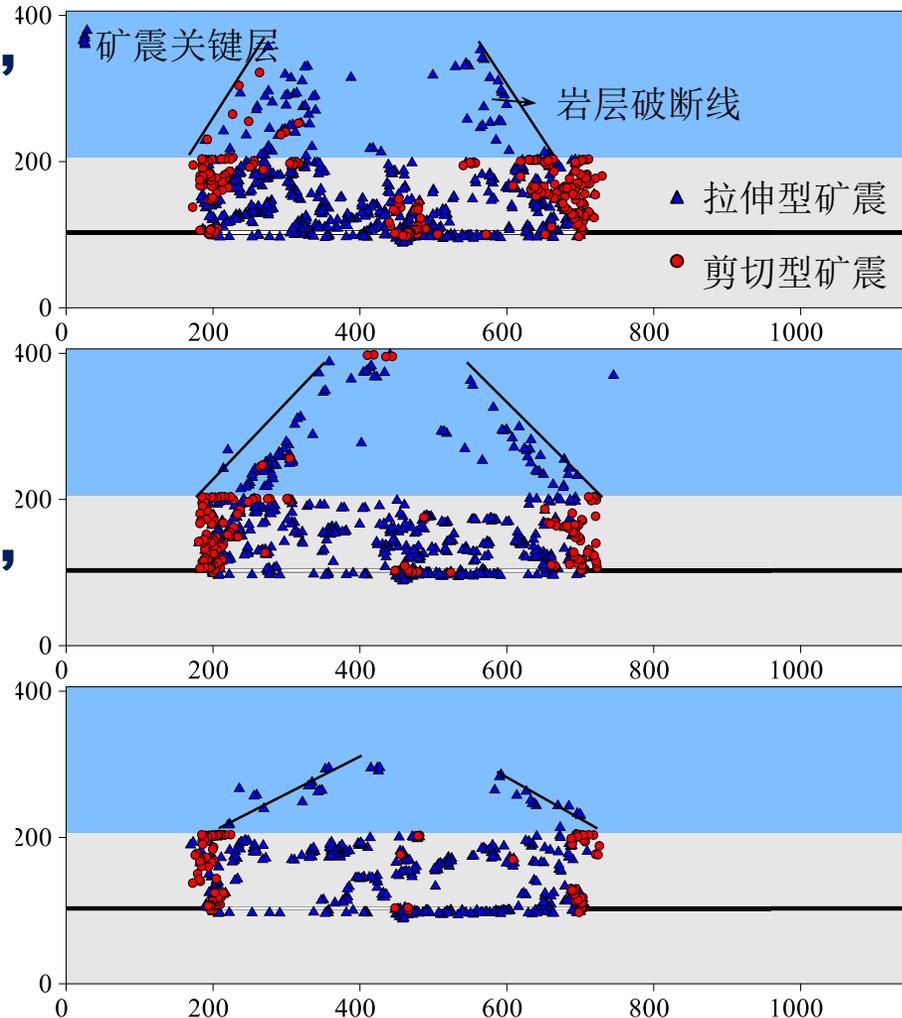


# 矿震关键层破断震动效应



## 关键岩层的强度——30、40、50、60、70、80MPa

- 岩层强度增加后，巨厚覆岩型矿震数量减少。且剪切型矿震占比降低。
- 岩层强度增大后，矿震关键层中上部未完全破断。
- 岩层破断角随强度增大而减小。

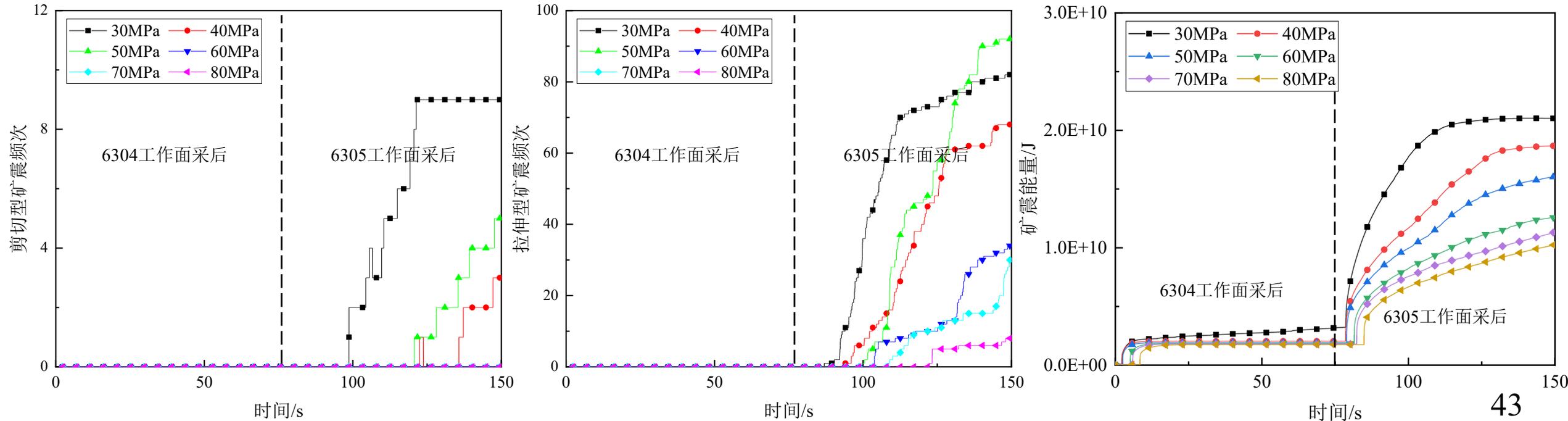


# 矿震关键层破断震动效应



## 关键岩层的强度——30、40、50、60、70、80MPa

- 开采距离相同时，巨厚覆岩型矿震频次与矿震关键层强度呈负相关；
- 矿震关键层强度较低时，矿震初次发生时间较早且矿震频次较高；
- 巨厚覆岩型矿震能量峰值、能量增长速率均随矿震关键层强度增加而逐渐减小。

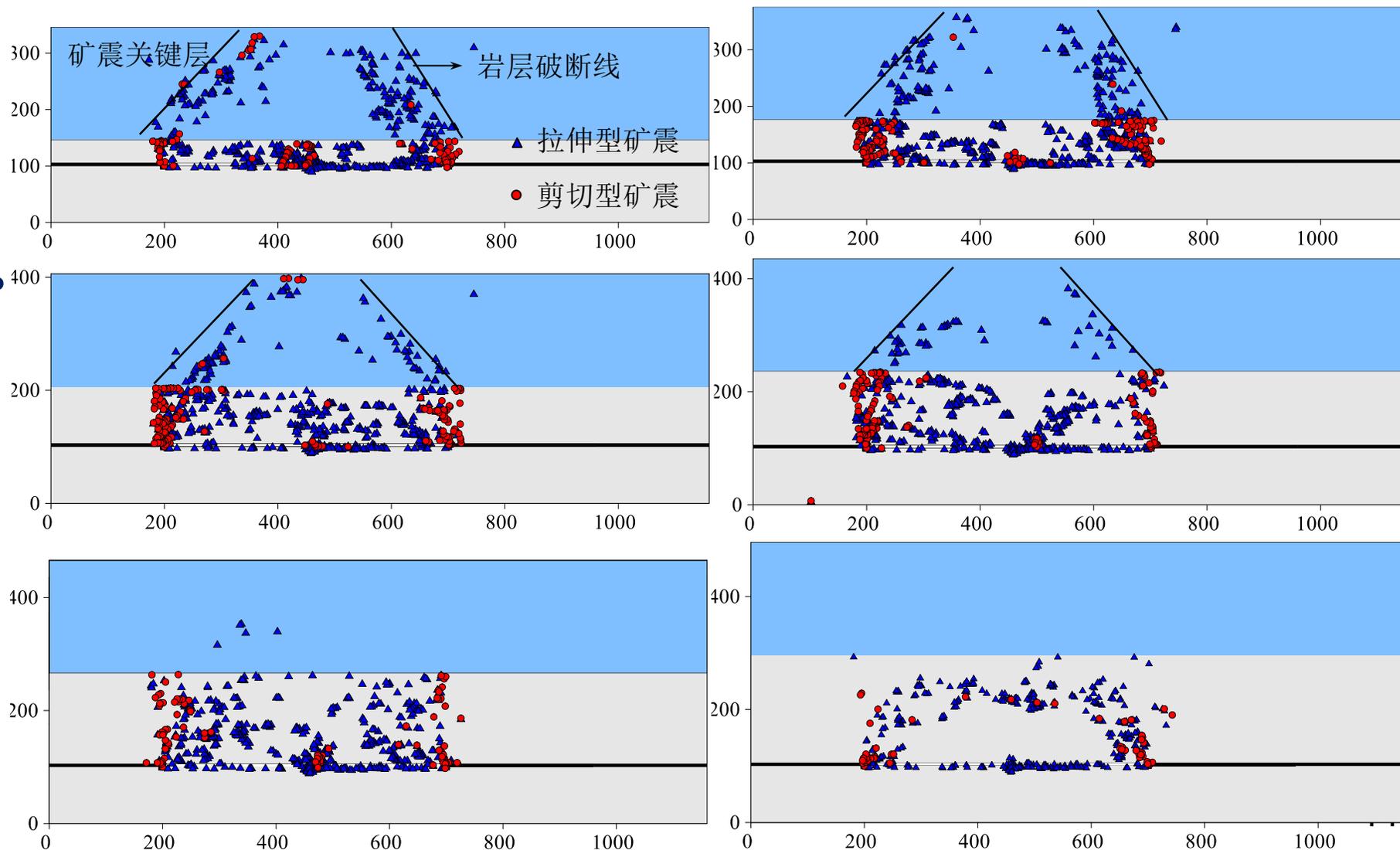


# 矿震关键层破断震动效应



## 关键岩层与煤层距离——40、70、100、130、160、190m

- 距离增大后，巨厚覆岩型矿震数量减少，且剪切型矿震占比降低。
- 距离增大后，矿震关键层未完全破断或完全未破断。
- 距离对矿震关键层破断角影响较小。

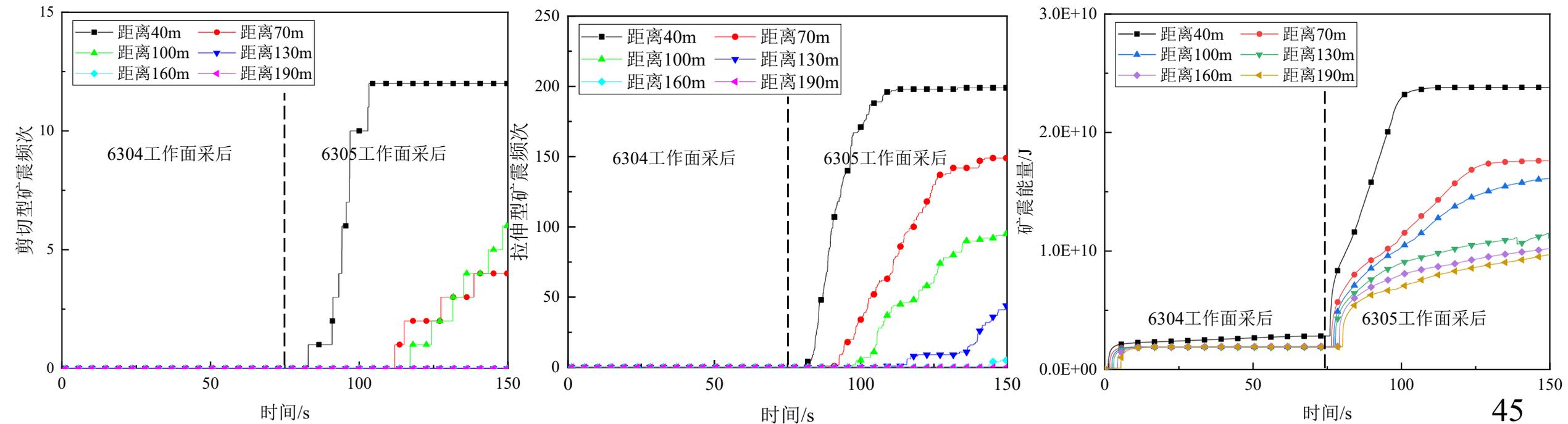


# 矿震关键层破断震动效应



## 关键岩层与煤层距离——40、70、100、130、160、190m

- 开采距离相同时，巨厚覆岩型矿震频次与间距呈负相关；
- 间距较小时矿震关键层易产生破断，矿震初次发生时间较早且矿震频次较高；
- 巨厚覆岩型矿震能量峰值、能量增长速率均随间距增加而逐渐减小。

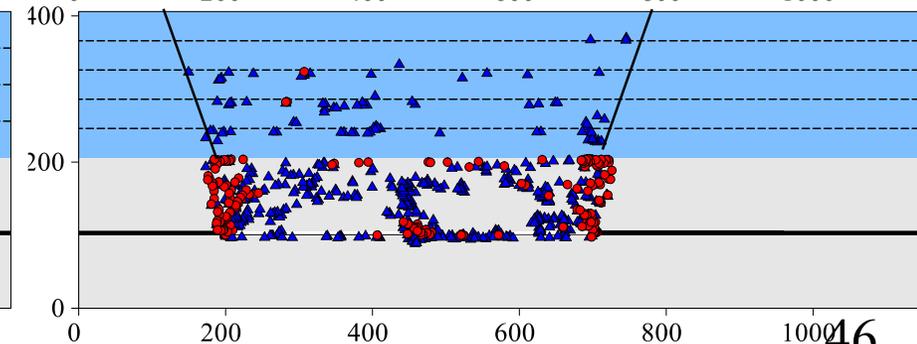
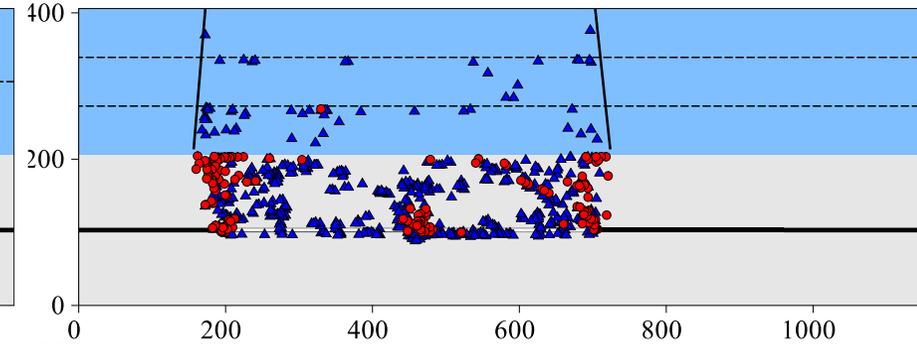
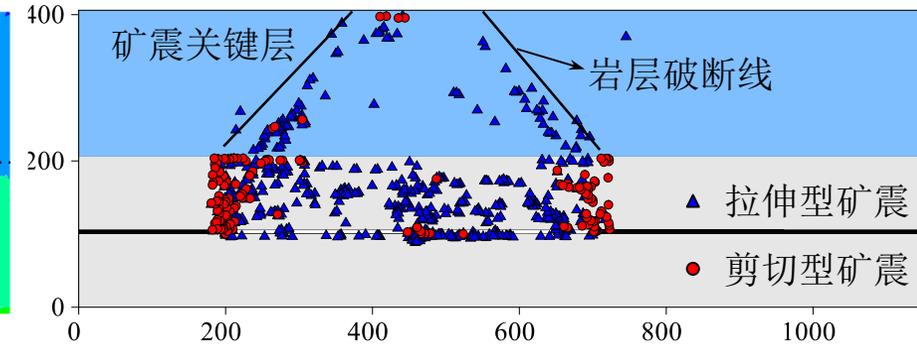
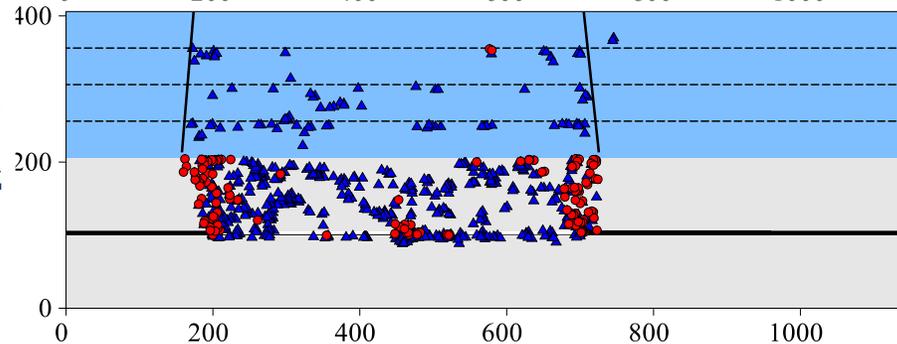
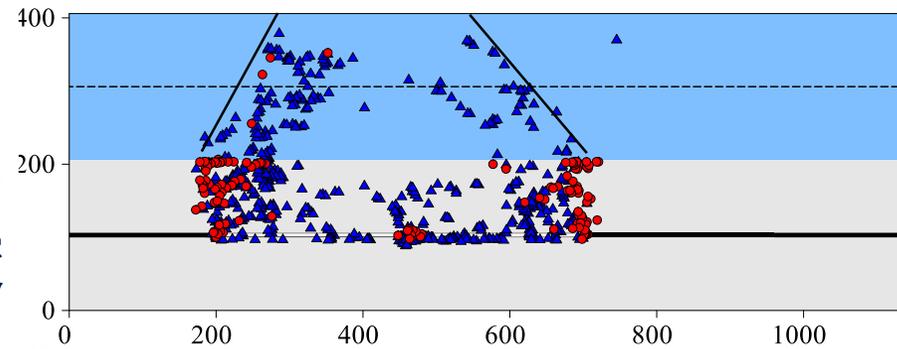
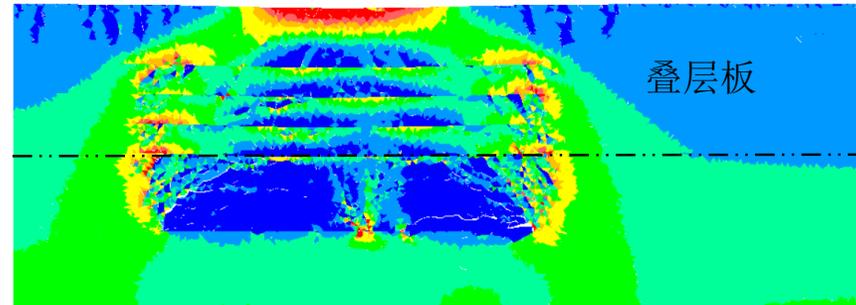


# 矿震关键层破断震动效应



## 关键岩层的分层数——1、2、3、4、5层

- 随分层数增加，矿震依次呈正梯形、矩形和倒梯形分布。
- 分层数较小时，矿震较集中本在岩层破断线附近；分层数较大时，矿震较分散。
- 随矿震关键层分层数增加，岩层破断角逐渐增大。

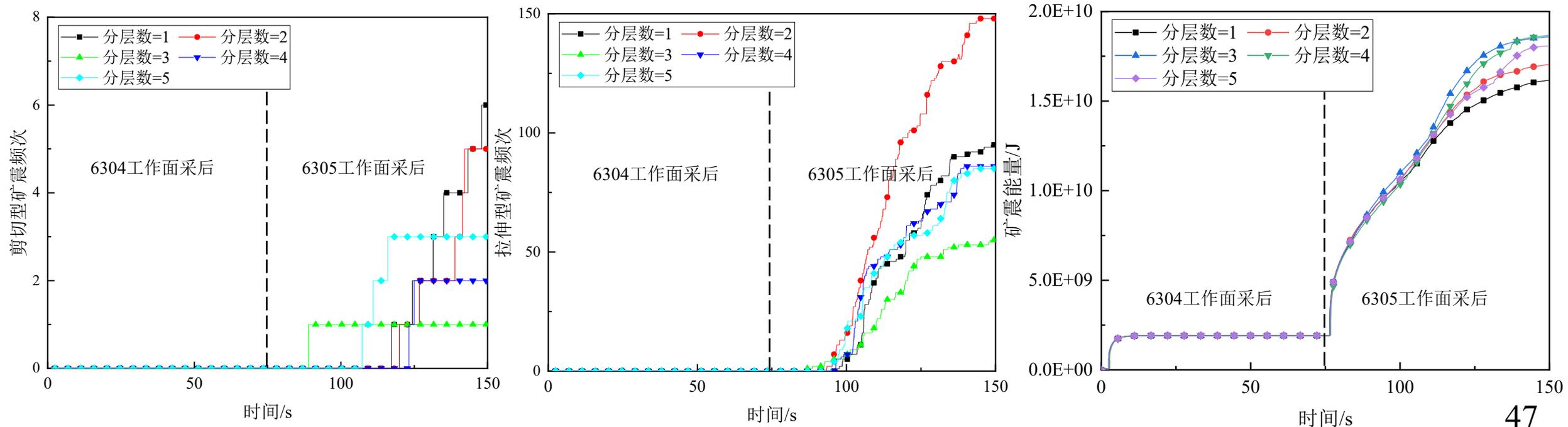


# 矿震关键层破断震动效应



## 关键岩层的分层数——1、2、3、4、5层

- 剪切型矿震频次随分层数增加先减小后增大；拉伸型矿震频次随分层数增加先增大后减小；
- 矿震关键层分层数较多时，岩层破坏范围较大，矿震能量也相对较高。



# 结 束 语

---

**矿震是采掘活动出现的动力现象，需要科学评价、理性认识矿震与矿震灾害。亟待深入研究矿震孕育发生机理、致灾效应与致灾风险判识及防控技术方法，以支撑国家深部资源开发和能源安全战略。**





敬请指正！

谢谢！

Thanks!

