



第六届全国煤矿冲击地压防治学术大会

# 厚层覆岩“三元”结构失稳 诱发矿震及其调控

窦林名

冲击矿压防治研究中心

WeChat: 中矿冲击矿压研究

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

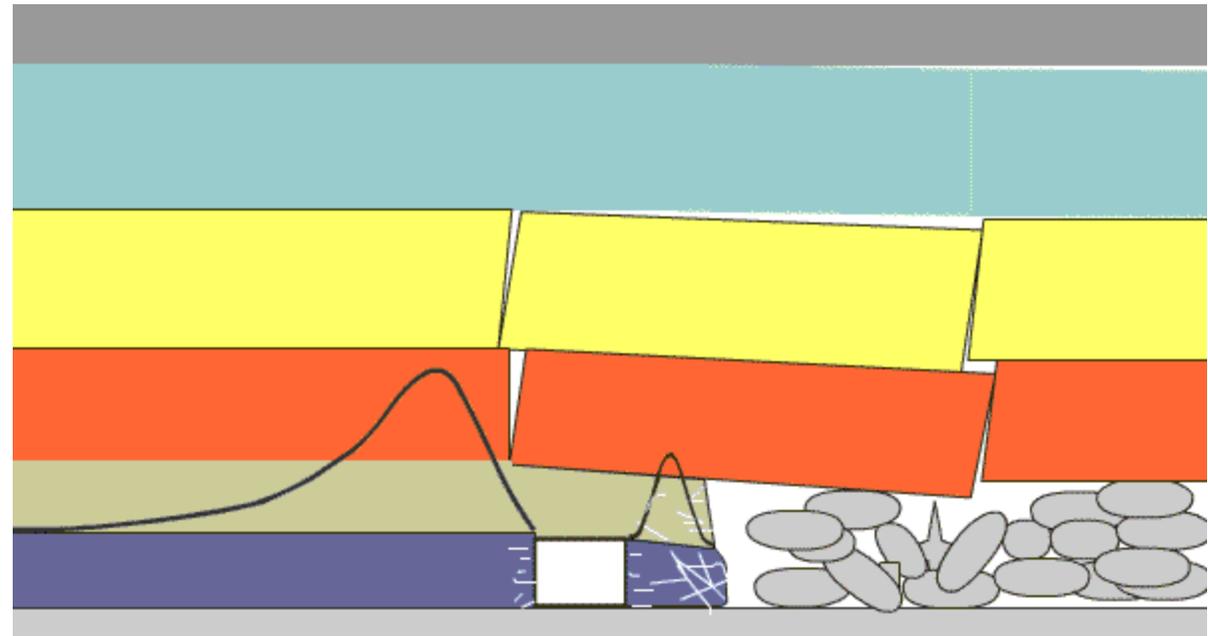
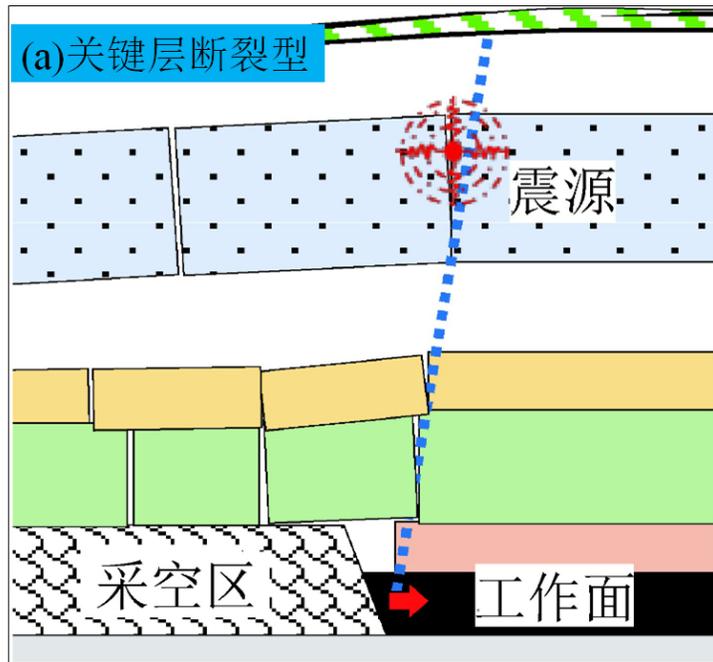


# 汇报提纲

- 厚层覆岩矿震动载显现特征
- 覆岩三元结构失稳诱震机理
- 厚层覆岩结构调控释能对策

## □ 厚层覆岩破裂产生的动载

- 厚层坚硬覆岩破裂或结构失稳产生的矿震能量大、动载强、震级高，受到广泛关注。
- 矿震能级越高引起冲击的概率越大。

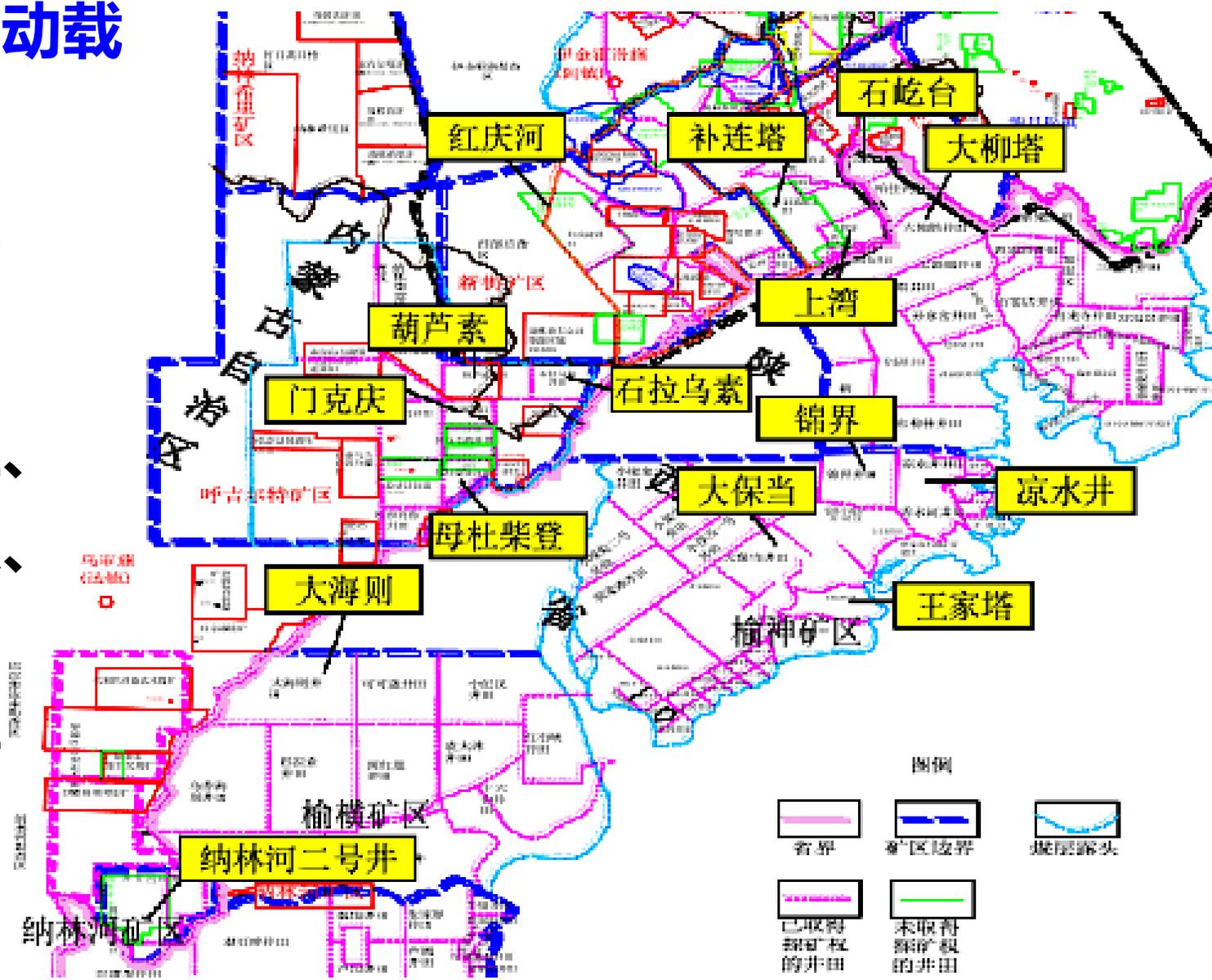


# 厚层覆岩矿震动载显现特征



## 厚层覆岩破裂产生的动载

- 煤矿冲击地压是动力灾害，其监测预警与防治是世界难题；
- 彬长矿区、蒙陕地区、新疆等地区高能矿震、冲击地压频发；
- 这些矿区的煤层均具有坚硬顶板。



# 厚层覆岩矿震动载显现特征



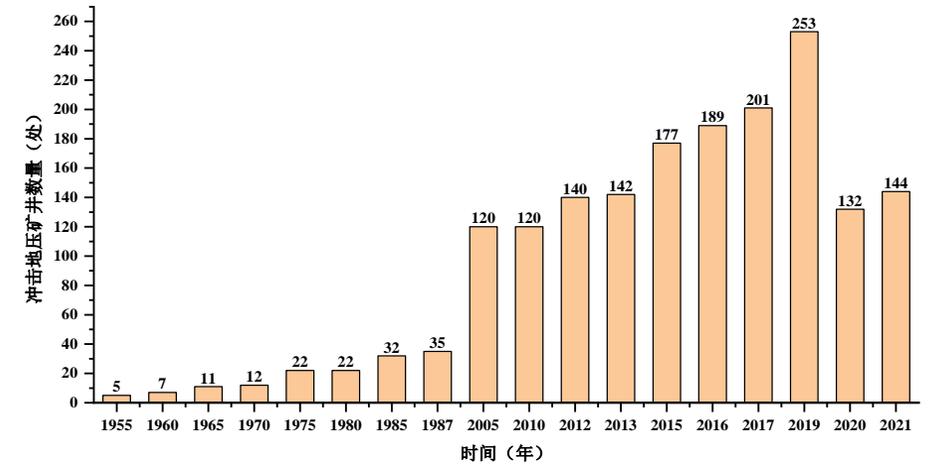
- ▶ 高能矿震、冲击均与覆岩中坚硬厚层顶板（一般均为关键层）有关。
- ▶ 如山东的东滩煤矿的六采区、内蒙鄂尔多斯矿区的石拉乌素煤矿、红庆河煤矿、甘肃的砚北煤矿等近几年发生的多次高能量矿震。
- ▶ 高位关键层的破断运动诱发高能量矿震，而低位关键层的破断运动可能诱发冲击与复合动力灾害。

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)

# 厚层覆岩矿震动载显现特征



- 2021-10-11, 彬长胡家河煤矿矿震冲击主控因素：**厚煤层、厚硬顶板、褶皱、断层等**；
- 2020-05-24~2021-02-24, 彬长孟村煤矿矿震主控因素：**厚煤层、厚硬顶板、断层与褶皱等**；
- 2019-06-09, 吉林省龙家堡煤矿冲击地压, 主控因素：**厚煤层、厚硬顶板、断层等**；
- 2018-10-20, 山东龙郛煤矿冲击地压, 主控因素：**厚煤层、煤层分叉、断层、顶板水等**；
- 2014年07月份以来, 高家堡煤矿一盘区煤层大巷多次冲击显现, 主控因素：**厚煤层、弓型非均厚关键层、巨厚承压含水层, 褶皱等**；
- 2011-11-03, 义马千秋煤矿冲击地压, 主控因素：**巨厚砾岩层、逆冲大断层等**；
- 2010-07-30, 徐州张双楼煤矿冲击地压, 主控因素：**断层、坚硬砂岩带等**。



# 厚层覆岩矿震动载显现特征



## 鄂尔多斯矿区覆岩赋存特征

### 低位 关键层

**关键层特点：**低位（距离煤层 $\leq 50\text{m}$ ）、厚度薄（单层厚度 $\leq 20\text{m}$ ）、层数多；

**实际显现特点：**无矿震、微震事件能级 $\leq 1\text{E}+05\text{J}$ 、临空巷道动力显现为主；

### 中位 关键层

**关键层特点：**中位（距离煤层 $40\text{-}100\text{m}$ ）、单层厚度大（单层厚度 $\leq 60\text{m}$ ）；

**实际显现特点：**有矿震记录、 $\leq 1\text{E}+06\text{J}$ 微震较为频繁、临空巷道冲击事故、动力显现并存；

### 高位厚 关键层

**关键层特点：**高位（距离煤层距离 $\geq 200\text{m}$ ）、单层厚度大（单层厚度 $\leq 200\text{m}$ ）；

**实际显现特点：**矿震频发、井下动力显现相对较弱。

柱状	累深 (m)	层厚 (m)	岩石名称
	60	4.0	粉砂岩
	56	8.8	细砂岩
	47.2	0.2	砂质泥岩
	47	0.5	细砂岩
	46.5	0.4	煤
	46.1	0.7	细砂岩
	45.4	2.2	粉砂岩
	43.2	1.4	细砂岩
	41.8	0.3	粉砂岩
	41.5	4.5	细砂岩
	37	0.1	泥岩
	36.9	2.4	粉砂岩
	34.5	2.2	细砂岩
	32.3	1.9	粉砂岩
	30.4	1.2	细砂岩
	29.2	5.8	粉砂岩
	23.4	0.2	灰质泥岩
	23.2	1.2	细砂岩
	22	0.3	粉砂岩
	21.7	1.2	粉砂岩
	20.5	1.3	粉砂岩
	19.2	0.7	细砂岩
	18.5	1.3	中砂岩
	17.2	0.9	砂质泥岩
	16.3	1.0	细砂岩
	15.3	1.4	砂质泥岩
	13.9	1.8	中砂岩
	12.1	4.4	砂质泥岩
	7.7	0.8	中砂岩
	6.9	4.9	粉砂岩
	2.0	0.8	粉砂岩
	1.2	1.2	煤
		4.0	煤

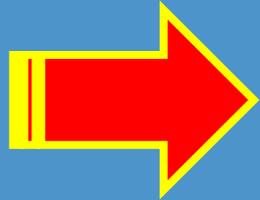
## □ 彬长矿区概况

- ▶ 彬长矿区侏罗-白垩纪覆岩差异性大，顶板覆岩较为坚硬。
- ▶ 煤层顶板赋存巨厚承压含水砂岩层，平均厚度达**200-300m**
- ▶ 是冲击矿压灾害多发区域，多个矿井出现高能矿震、冲击显现



# 汇报提纲

- 厚层覆岩矿震动载显现特征
- 覆岩三元结构失稳诱震机理**
- 厚层覆岩结构调控释能对策**



## 煤矿震动、微震与矿震

## □ 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	大多无感；少数有 <b>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> ，地面时有 <b>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。

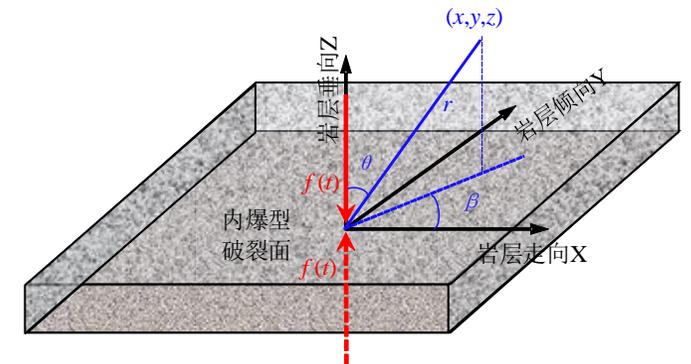
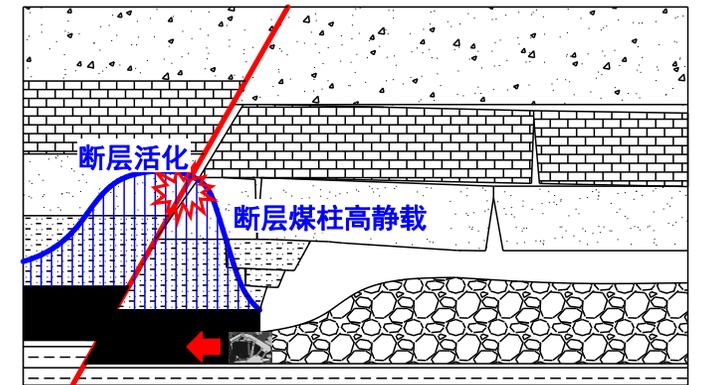
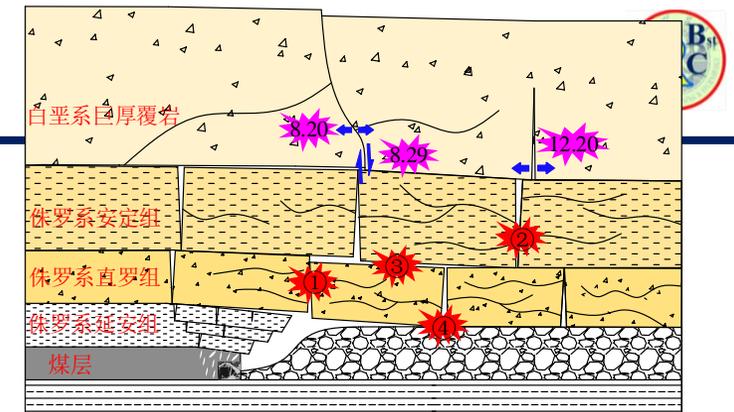
## □ 煤矿矿震主要类型

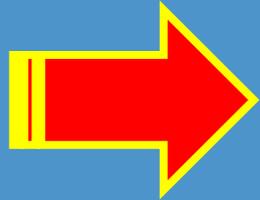
- **覆岩型矿震**：是指由顶板岩层破断或活动诱发的矿震，通常发生在煤层采空区上方的巨厚覆岩中；
- **构造型矿震**：是指发生在断层构造带附近的矿震。

# 煤矿震动与矿震及其分类

## 矿震的“三种”类型

- **顶板破裂型**：覆岩关键层发生初次破断、周期性破断、顶板滑移失稳，均容易诱发大能量矿震。
- **断层滑移型**：断层、破裂面等错动滑移易产生剪切破裂，断层构造活化、断层煤柱高应力集中等情况，容易诱发强矿震。
- **煤体内爆型**：煤岩体应力集中程度较大，在周围应力夹持的作用下，产生内爆破裂。

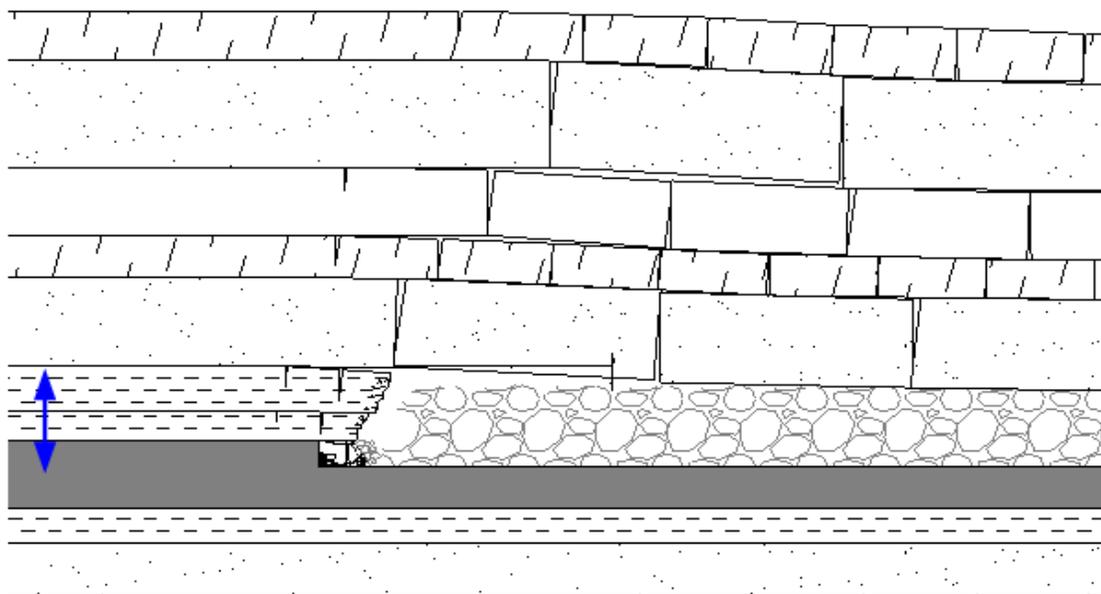




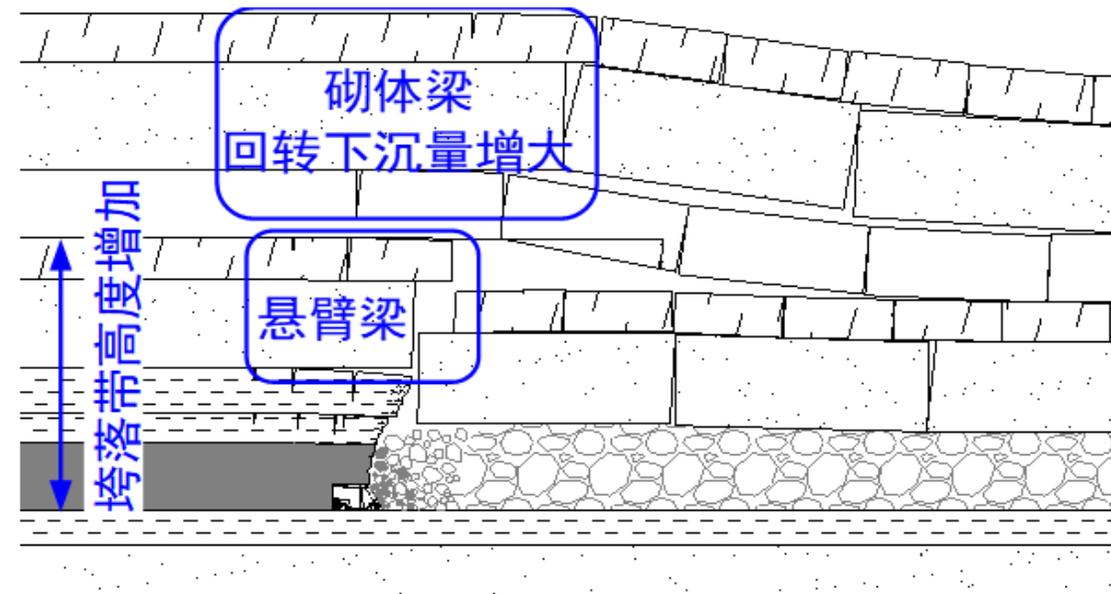
## 覆岩“三元”结构演化规律

## 覆岩的“三元”结构演化

- 煤层开采后，老顶及低位关键层往往以**悬臂梁形式破断**，并垮落于采空区，使垮落带分为上部规则的坚硬岩层断裂岩块和下部杂乱无章的直接顶破碎岩石；
- **中位关键层**因回转下沉量逐渐减小而呈现出与分层开采相似的**砌体梁式破断运动**；
- **高位关键层**下沉破断，因跨度大，形成**拱式大结构**。



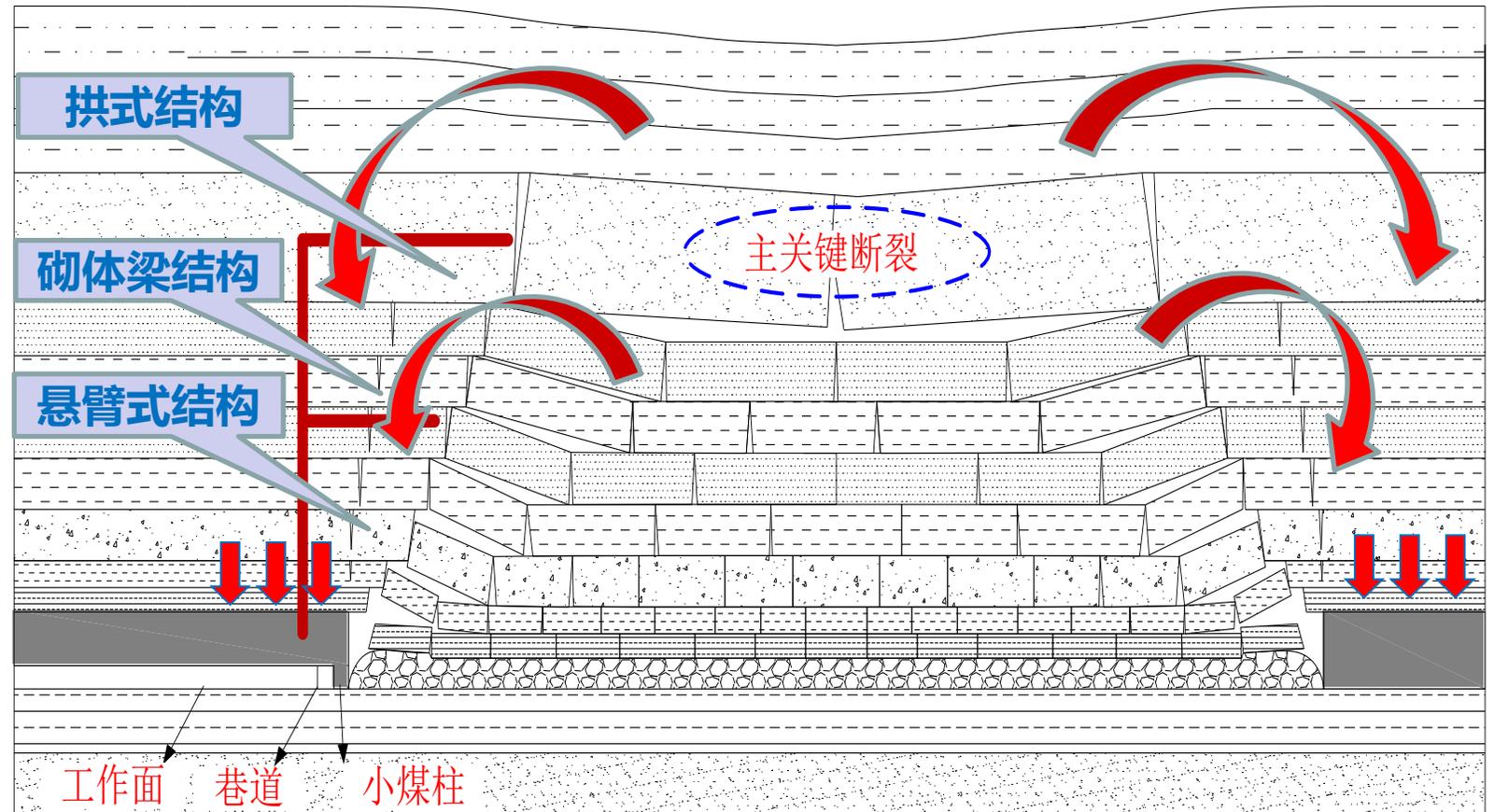
(a) 分层开采（小采高）



(b) 综放开采（大采高）

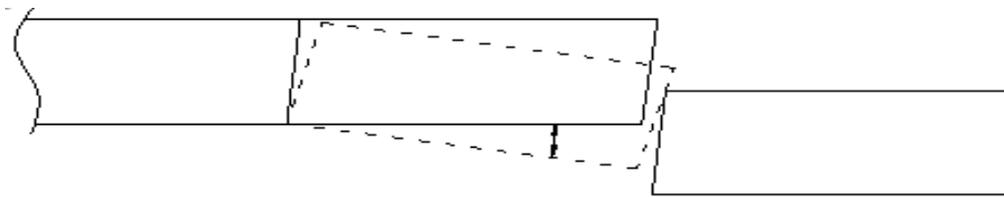
## 覆岩的“三元”结构演化

- 高位覆岩关键层破断下沉，形成“拱式”大结构；
- 采空区上方中位覆岩亚关键层破断回转形成“砌体梁式”小结构；
- 低位亚关键层破断，形成“悬臂式”结构。

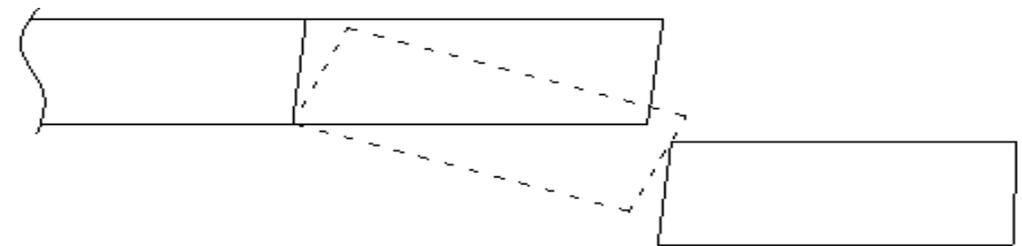


## □ 煤层开采覆岩运动规律

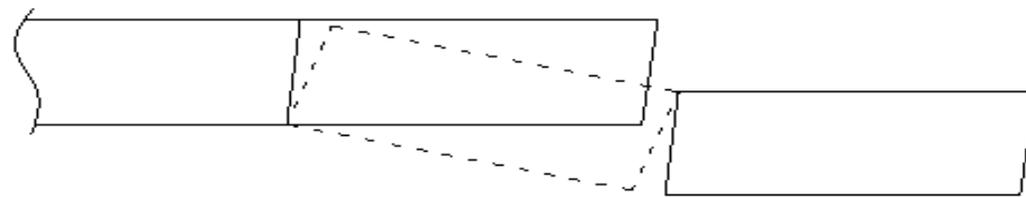
- 煤层开采，**垮落带内关键层距离煤层较近**，其破断运动对煤体的冲击加载作用更为显著；
- 垮落带内关键层破断后可能直接垮落于采空区，也可能在一定条件下形成短暂稳定的铰接结构。



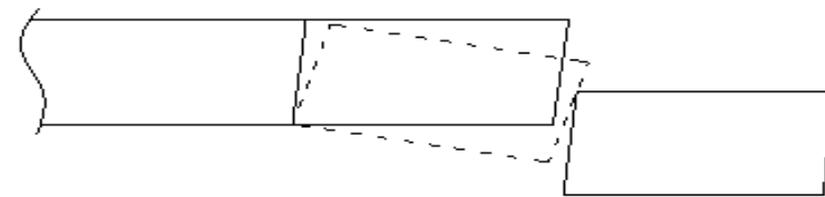
(a) 铰接结构



(b) 岩石碎胀系数小



(c) 待断与破断岩块距离远

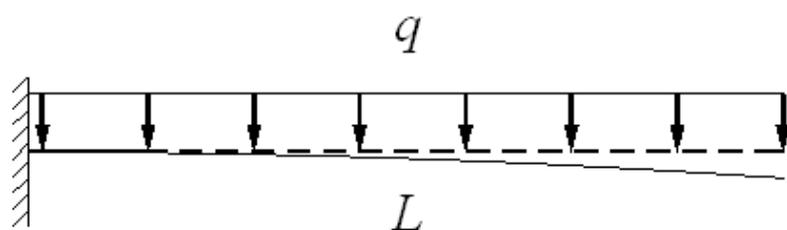


(d) 岩块破断长度小

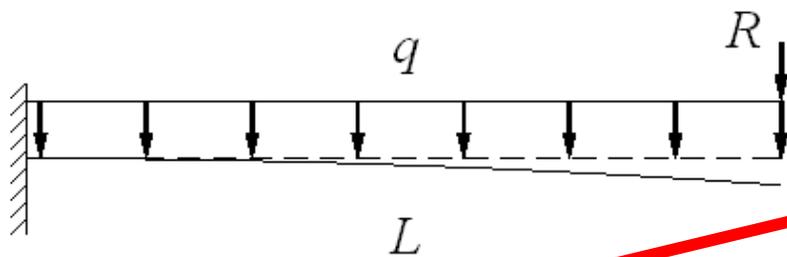
## 垮落带内关键层破断岩块运动形式

## □ 煤层开采关键层破断特征

➤ 煤层开采条件下，由下而上关键层破断方式可分为4种，其中对采场和巷道围岩造成显著影响的为中低位关键层破断方式为a1, a2, b1。

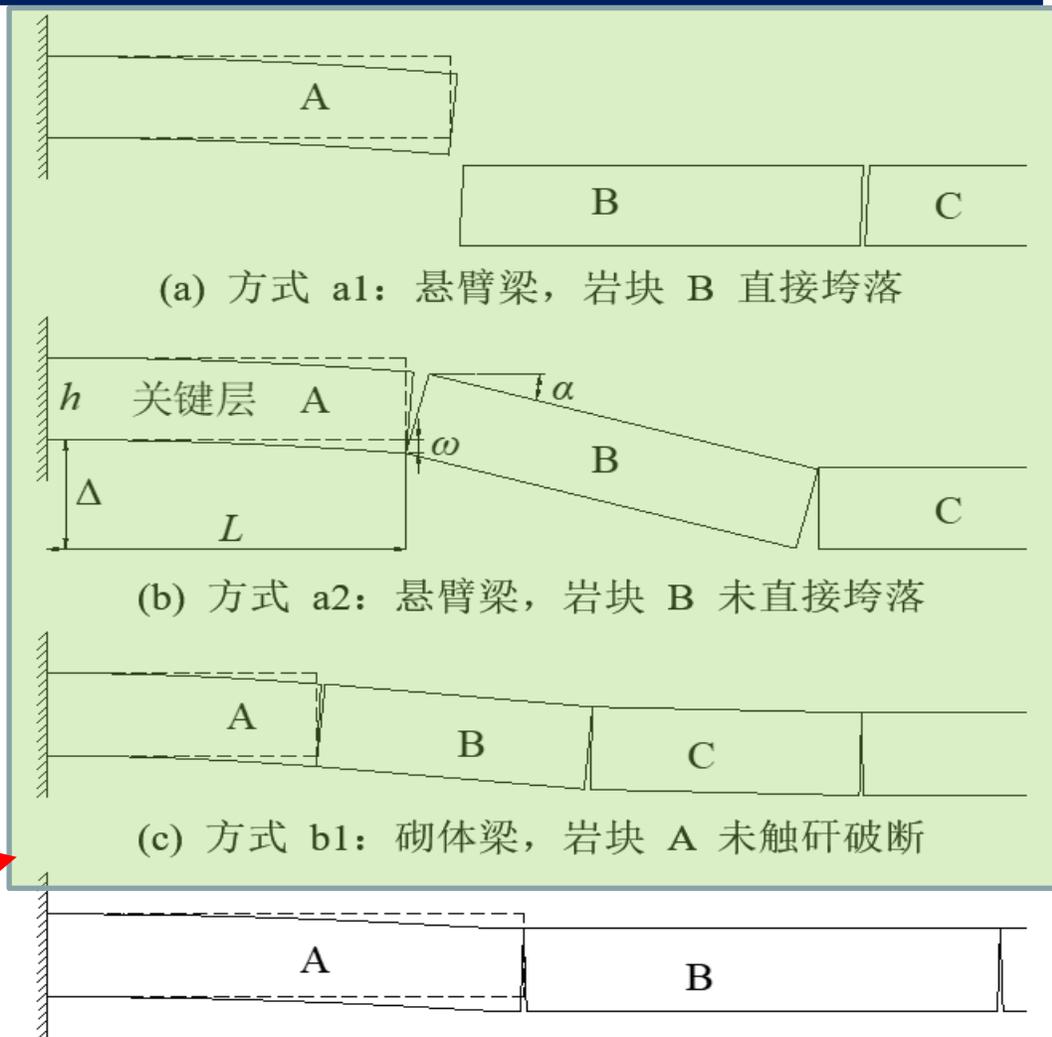


(a) 对应方式 a1



(b) 对应方式 a2 和 b1

关键层破断力学模型



(a) 方式 a1: 悬臂梁, 岩块 B 直接垮落

(b) 方式 a2: 悬臂梁, 岩块 B 未直接垮落

(c) 方式 b1: 砌体梁, 岩块 A 未触研破断

(d) 方式 b2: 砌体梁, 岩块 A 触研后破断

关键层破断形成结构一般形式

## □ 煤层开采关键层破断特征

- 煤层开采后，关键层以不同形式破断的破断步距和能量释放如下：
- 同等条件下关键层以方式 **a1/a2/b1** 破断时的**破断步距和释放能量之比**
- **1 / 0.707 / (0.632~0.577) 和 1 / 0.913 / (0.860~0.813)。**

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{pa1} = h\sqrt{R_t / 3q}, \\ L_{pa2} = h\sqrt{R_t / 6q}, \\ L_{pb1} = h\sqrt{\frac{2h - \Delta}{(3h - 2\Delta)} \frac{R_t}{6q}}, \end{array} \right.$$

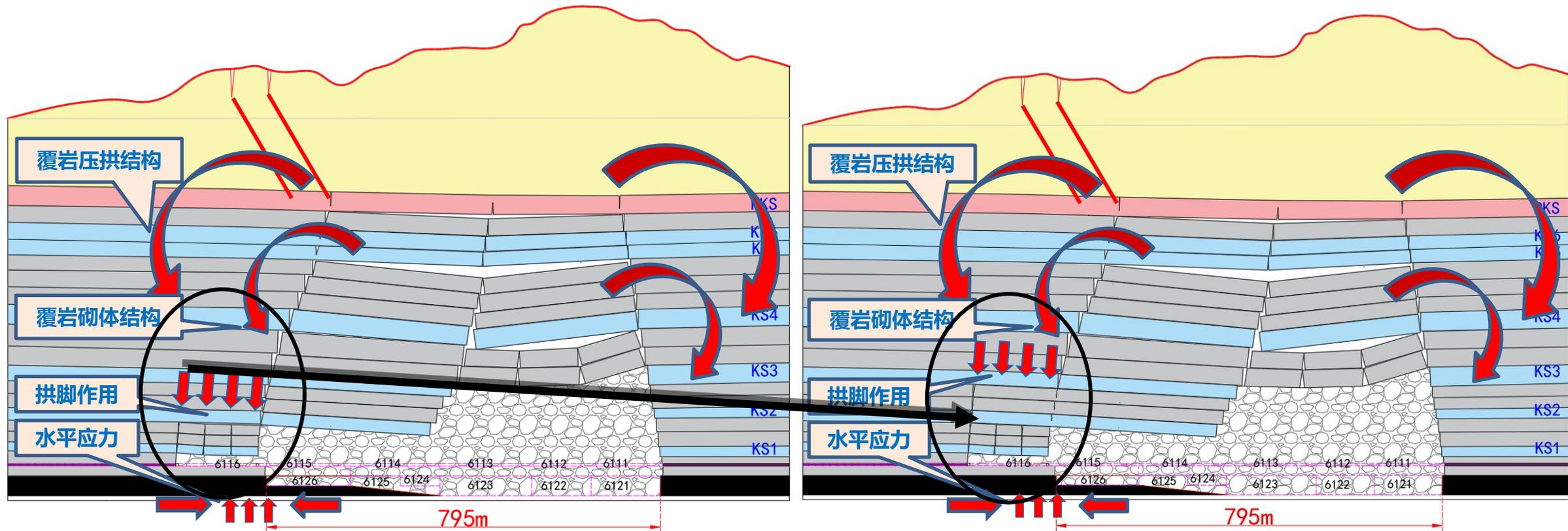
$$\left\{ \begin{array}{l} U_{a1} = \frac{q^2 L^5}{20EI}, \\ U_{a2} = \frac{31q^2 L^5}{120EI}, \\ U_{b1} = \frac{q^2 L^5}{20EI} + \frac{RqL^4}{4EI} + \frac{R^2 L^3}{3EI}, \end{array} \right.$$

# 覆岩“三元”结构演化规律



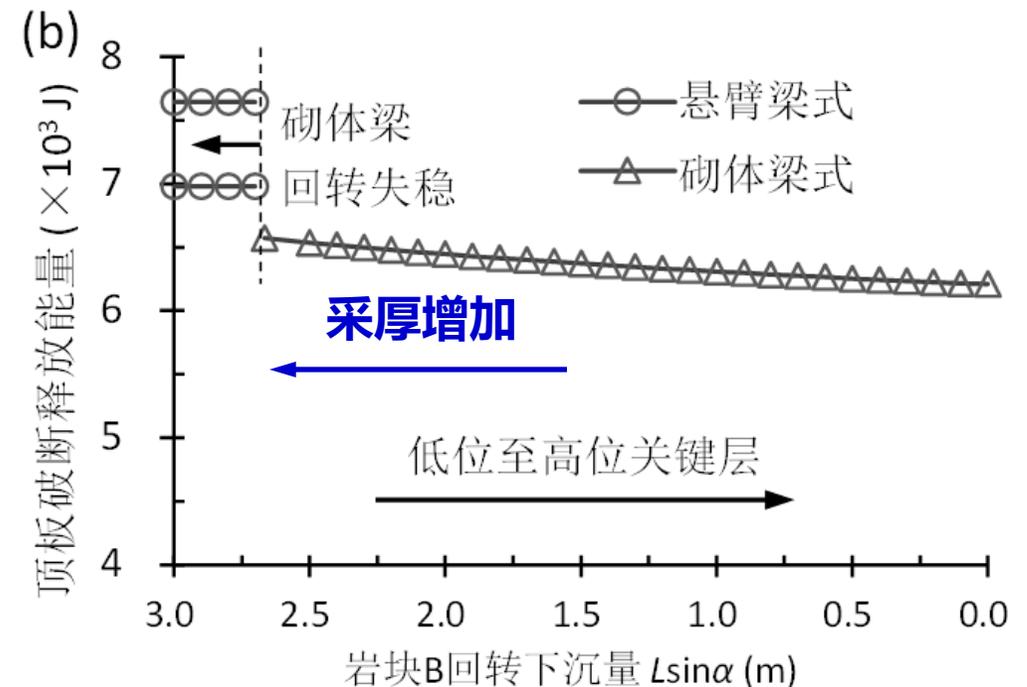
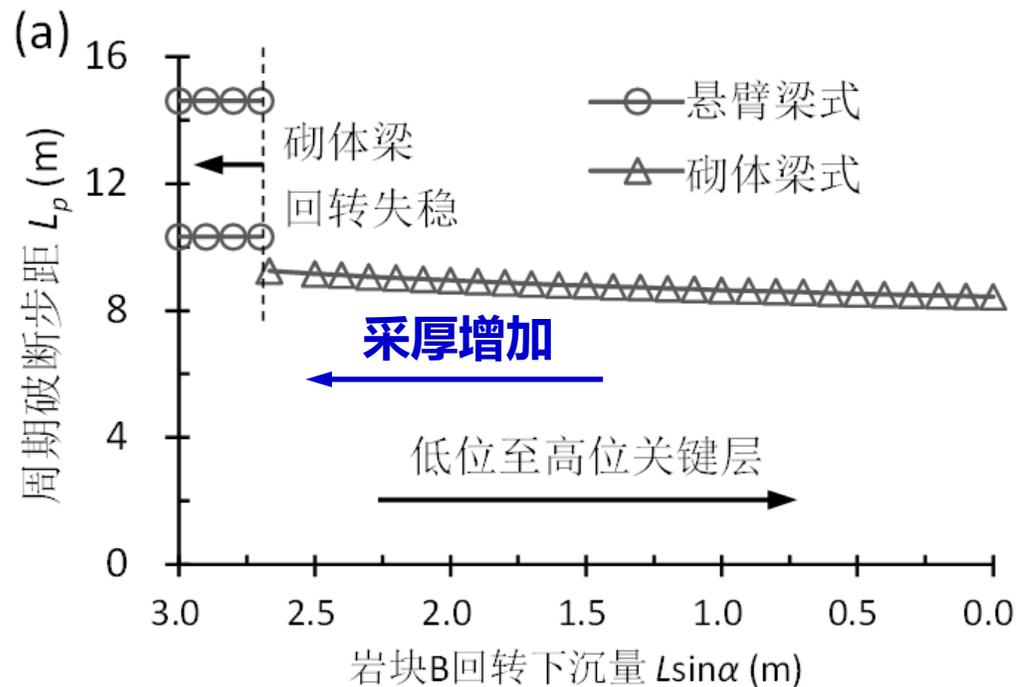
## □ 煤层开采关键层破断特征

- 随采厚增大，中位关键层逐渐由砌体梁转变为悬臂梁；
- 中位关键层的破断运动，从上到下整体压下，破坏下位岩层。

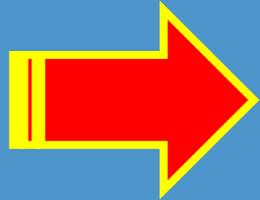


## □ 煤层开采关键层破断特征

- 随采厚增大，中位关键层逐渐由砌体梁转变为悬臂梁，其破断步距和释放能量先缓慢增大再陡然台阶升高，表明覆岩破断动载扰动随采厚增大先缓慢增大再陡然台阶升高。



同等条件下中低位关键层的破断步距和能量释放特征



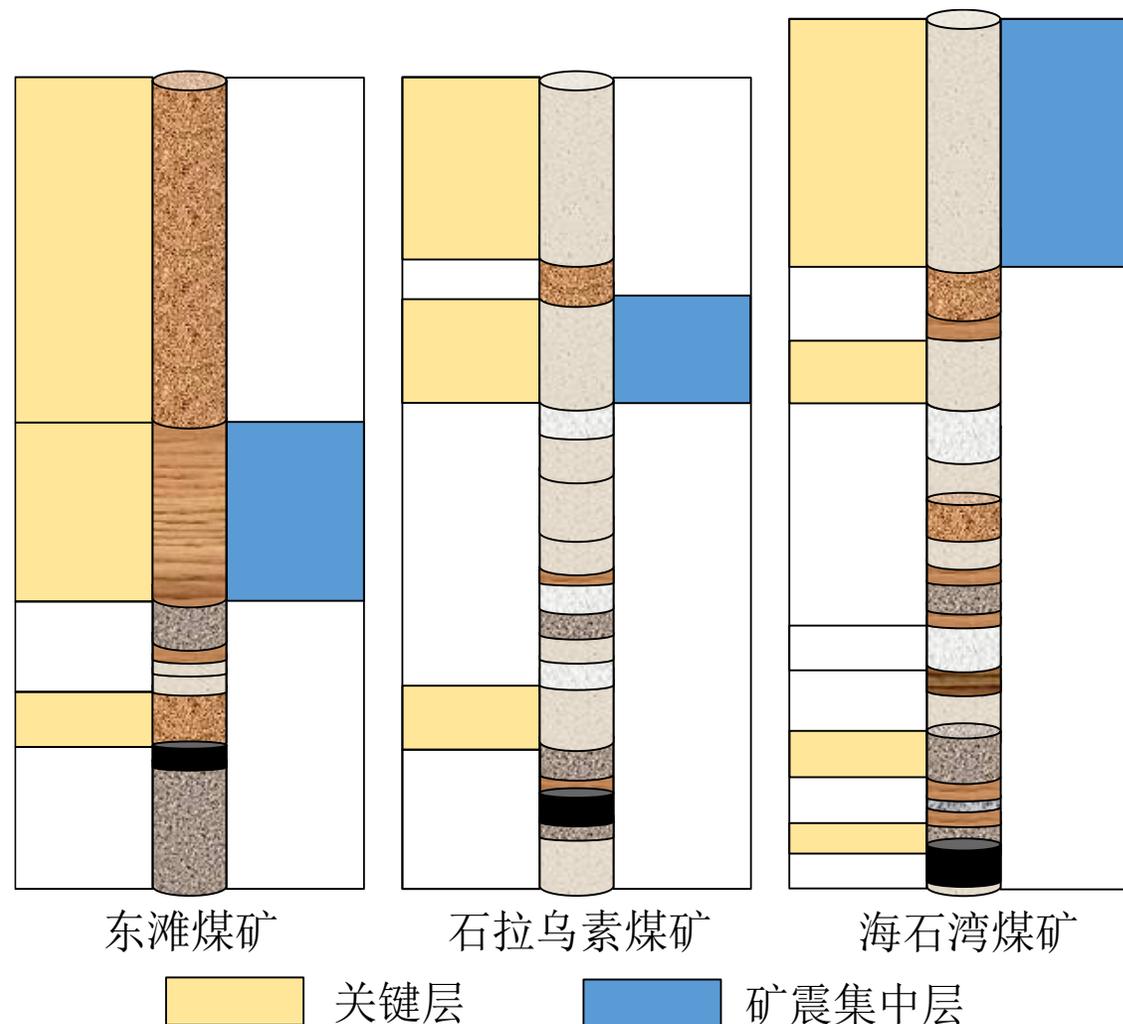
## 覆岩矿震关键层及其特征

## □ 关键层

➤ 对全部或局部岩体活动起决定作用的岩层称为**关键层**。关键层破断和运移是覆岩型矿震发生的主要原因。

## □ 覆岩矿震关键层

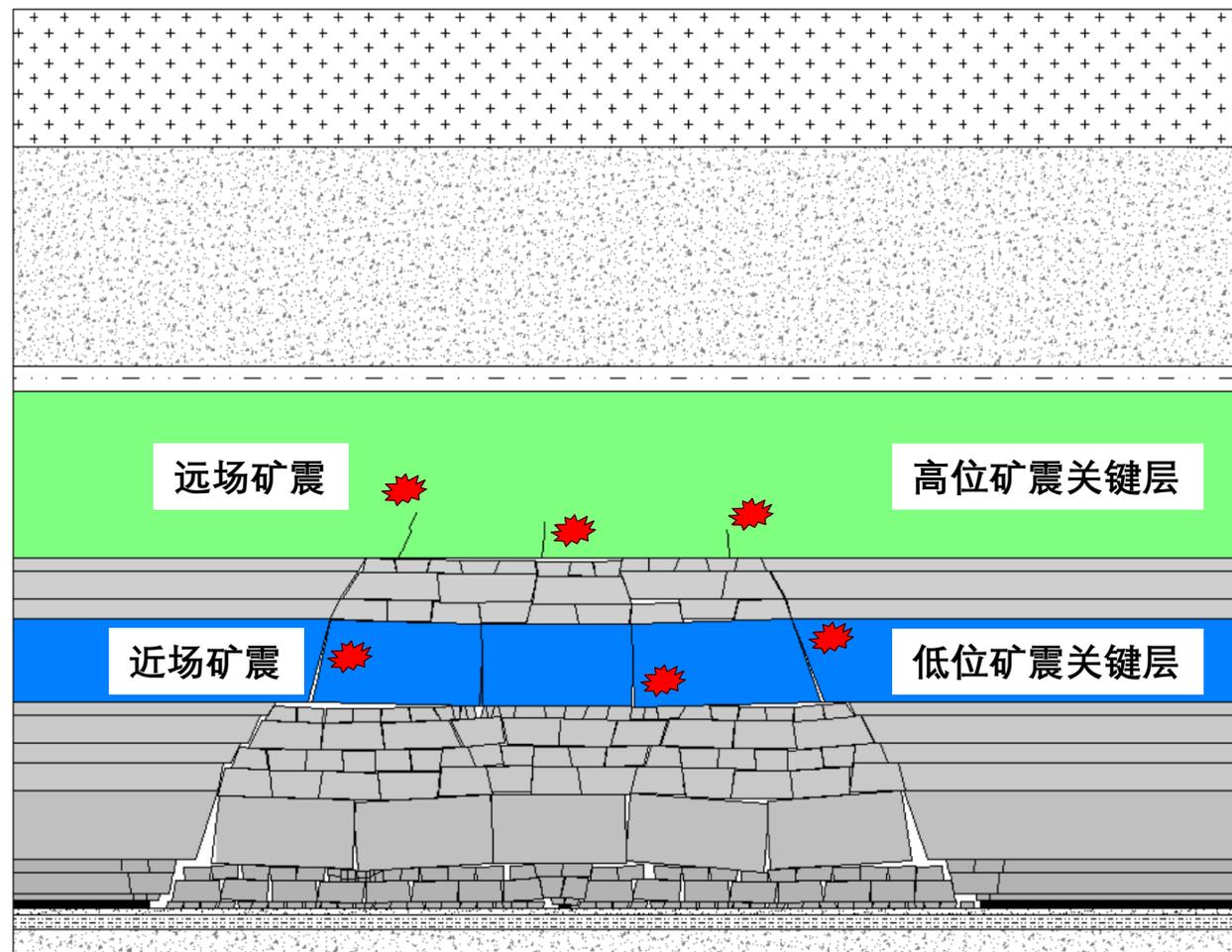
➤ 覆岩矿震关键层：把顶板中一层或数层对覆岩型矿震的发生和分布具有控制作用的关键岩层(组)称为覆岩矿震关键层。



## 矿震关键层与关键层之间的联系与区别

### 联系

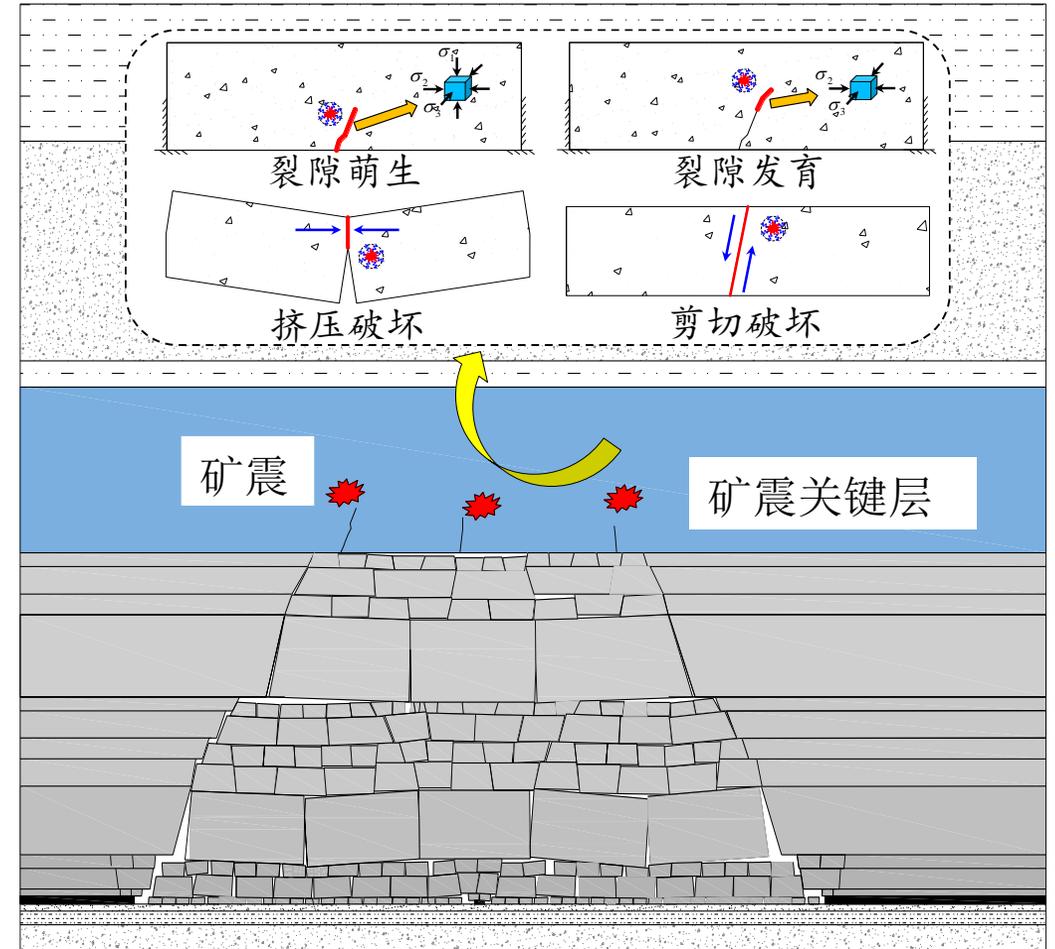
- 矿震关键层与关键层均为顶板中厚度、强度相对较大的岩层。
- 矿震关键层与关键层的破断和运动均对岩层结构和地表沉降起重要作用。
- 与关键层类似，当覆岩中存在多个厚硬岩层时，矿震关键层可分为主矿震关键层和亚矿震关键层。



## 矿震关键层与关键层之间的联系与区别

### 区别

- 关键层理论主要指导开采过程中的岩层控制，而矿震关键层理论则更关注矿震和冲击地压等采矿动力灾害。
- 矿震关键层一定是关键层，而关键层不一定是矿震关键层。
- 主关键层并不一定是主要的矿震关键层，某些情况下，亚关键层反而是主要的矿震关键层。



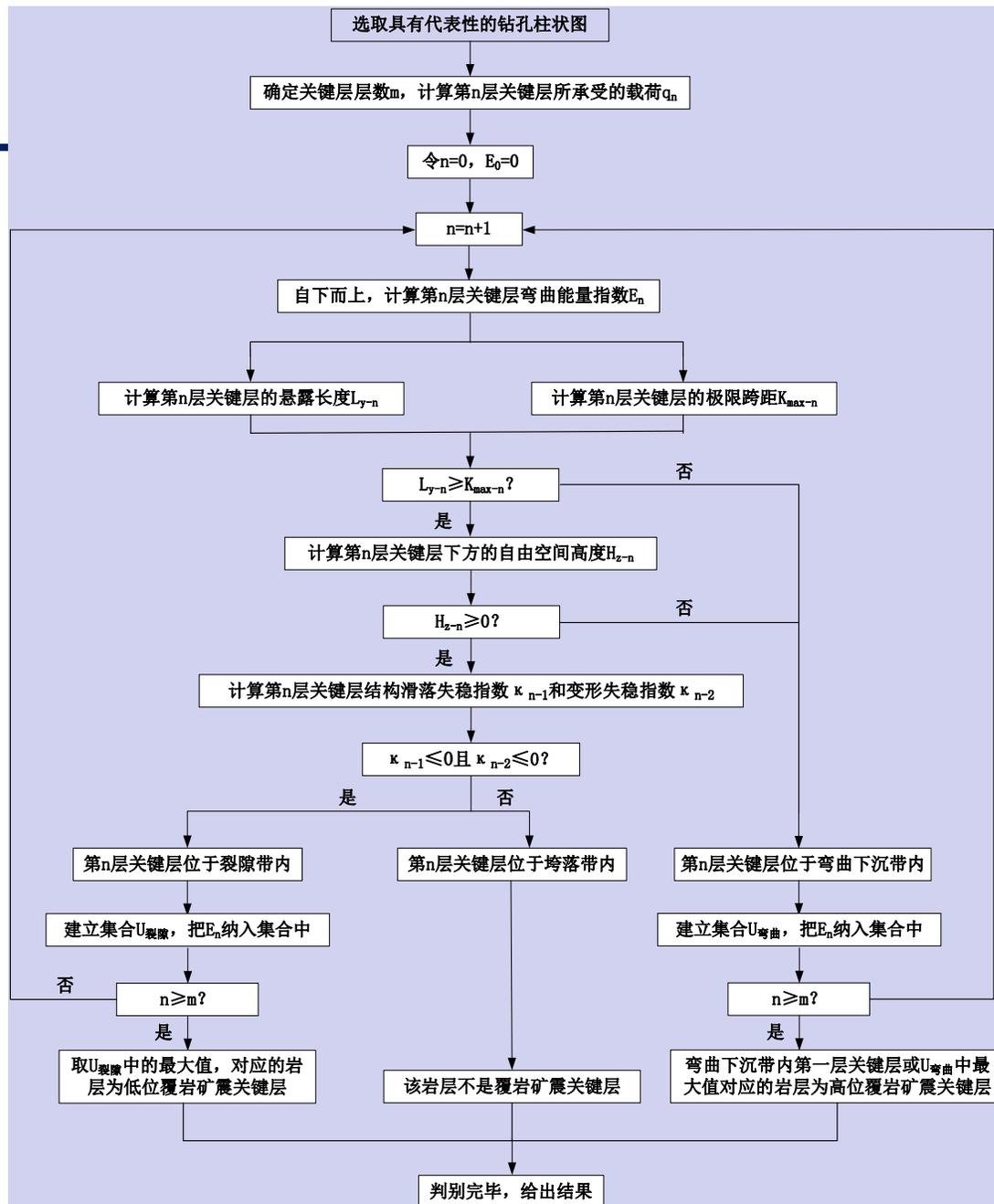
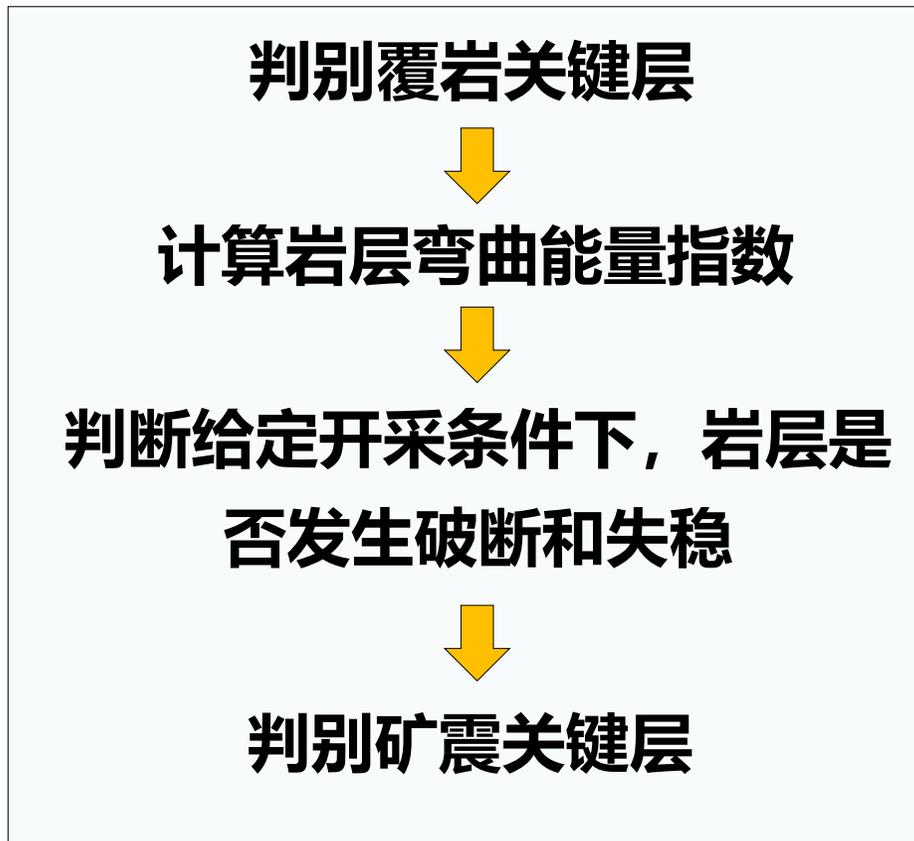
## □ 矿震关键层特征

- (1) **几何特征**: 在所有顶板岩层中, 矿震关键层厚度相对较大。
- (2) **岩性特征**: 在所有顶板岩层中, 矿震关键层岩性相对坚硬, 弹性模量和强度较高。
- (3) **承载特征**: 除自重应力外, 矿震关键层还受水平应力和上覆一定范围内岩层下沉及变形引起的载荷作用。
- (4) **蓄能特征**: 与其他岩层相比, 矿震关键层具有良好的储存弹性应变能的能力, 破断前积累了更多弹性应变能。
- (5) **破断特征**: 矿震关键层一般具有脆性或不连续接触面等, 单次破断或滑移范围较广。
- (6) **动态特征**: 矿震关键层层位可能随采空区面积增加发生动态演化。

# 覆岩矿震关键层及其判别

## 矿震关键层的判别

### 矿震关键层判别流程



## 矿震关键层的类型

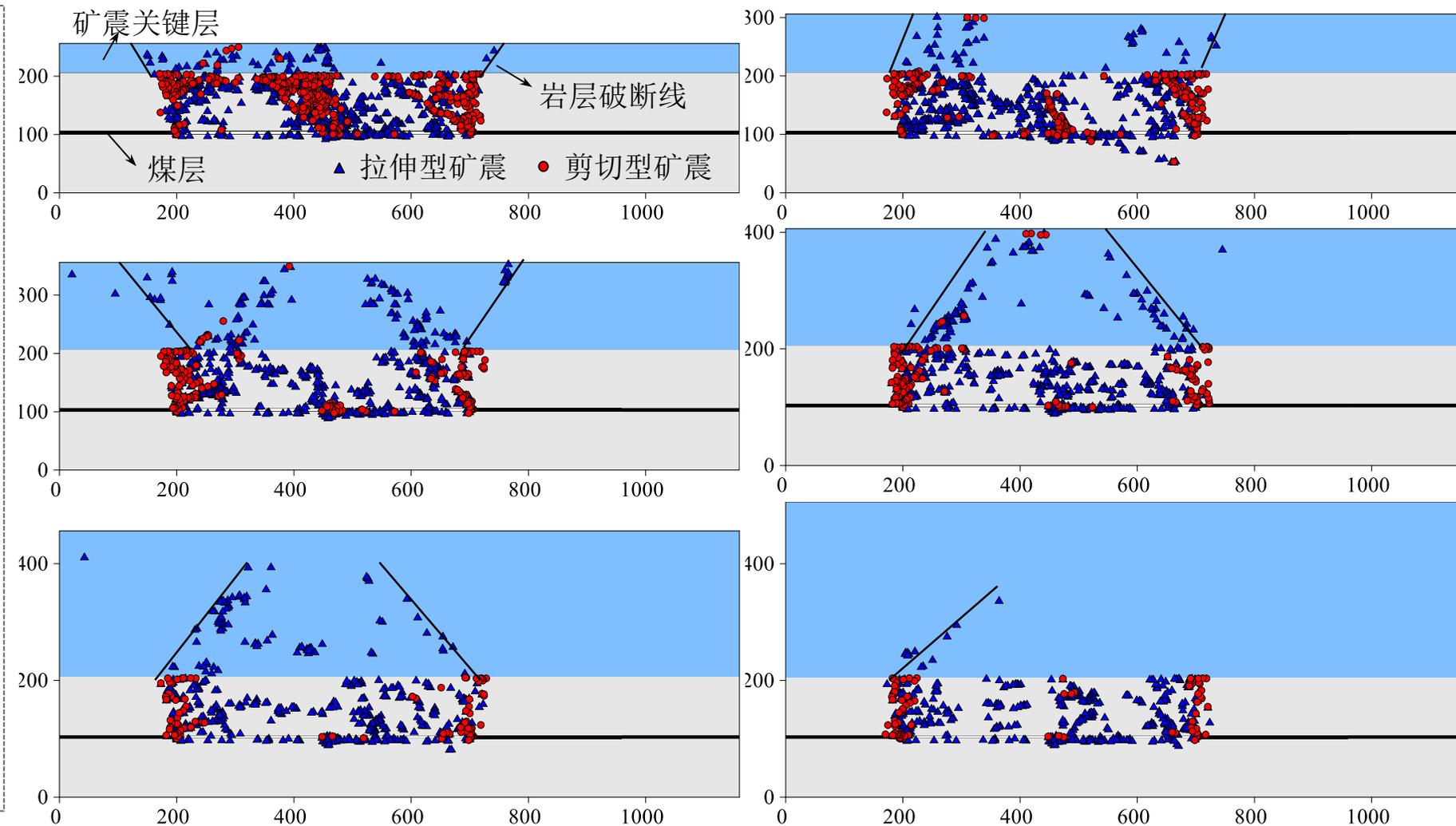
矿震关键层类型	矿震关键层赋存特点	致灾性
远场岩层（组）型	矿震关键层处于高位，与煤层距离一般大于100m（或 $10H_m$ ）；为巨厚较坚硬岩层（组），厚度一般大于40-60m，单轴抗压强度大于40MPa。	诱冲可能性极小；地面震感强烈；发生频次高。
中场岩层（组）型	矿震关键层处于中位，与煤层距离一般小于100m（或 $10H_m$ ）；为厚硬岩层（组），厚度一般大于30m，单轴抗压强度大于50MPa。	诱冲可能性较大；地面震感强烈；发生频次较低。
近场岩层（组）型	矿震关键层处于低位，与煤层距离一般小于50m*或 $7H_m$ ）；为厚硬岩层（组），厚度一般大于15m，单轴抗压强度大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

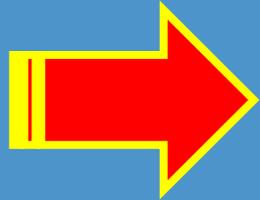
# 覆岩矿震关键层及其特征



## 矿震关键层的震动特征

- 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。
- 层厚增大后，巨厚覆岩型矿震数量减少，能量增加，剪切型矿震占比降低。





## 断层对覆岩结构运动的控制

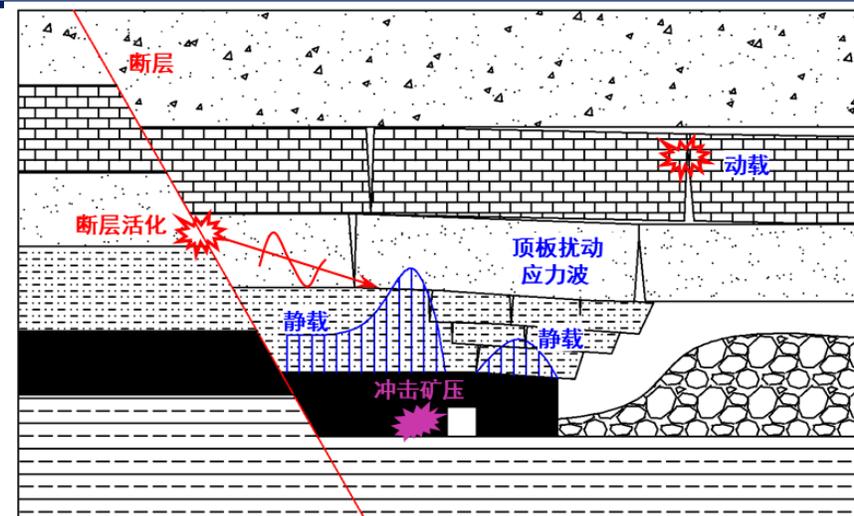
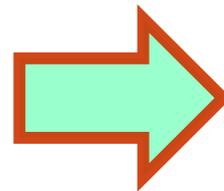
# 断层对覆岩结构运动的控制



## 断层冲击类型

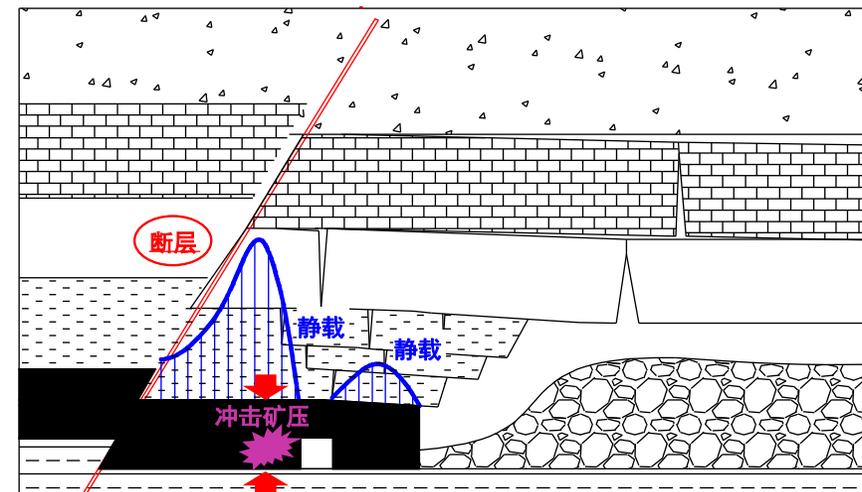
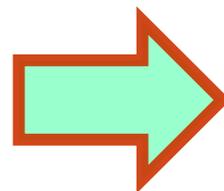
### 断层滑动活化型

— 强冲击动载 + 静载



### 断层煤柱失稳型

— 高静载 + 动载扰动

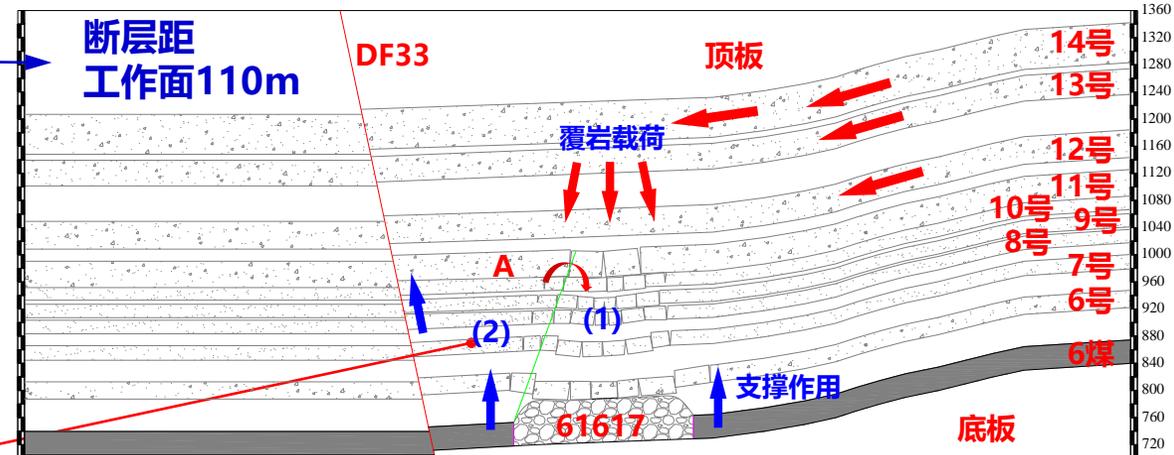
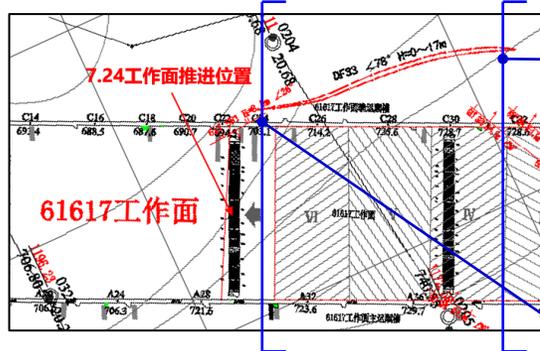


# 断层对覆岩结构运动的控制

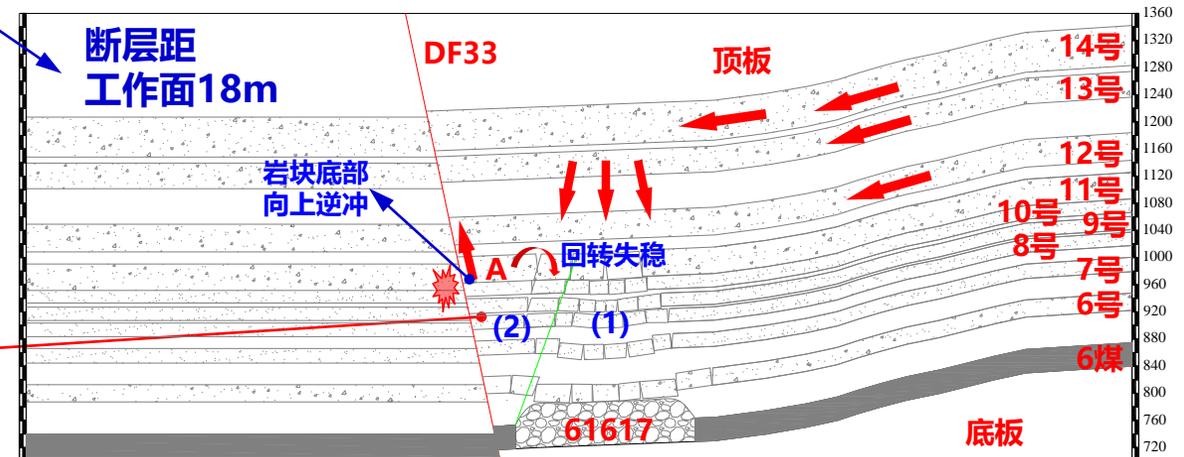


## 断层对覆岩破断运动的影响

DF33: 落差0~17m, 倾角78°, 长度390m。



大煤柱具有足够承载能力, 煤柱上覆岩层较稳定, 不易向采空区回转失稳。



小煤柱破坏, 上覆岩层易回转失稳, 断层面处的关键块A底部沿断层面向上逆冲, 产生逆冲性强矿震。

工作面倾斜方向断层DF33对关键层破断运动的影响示意图

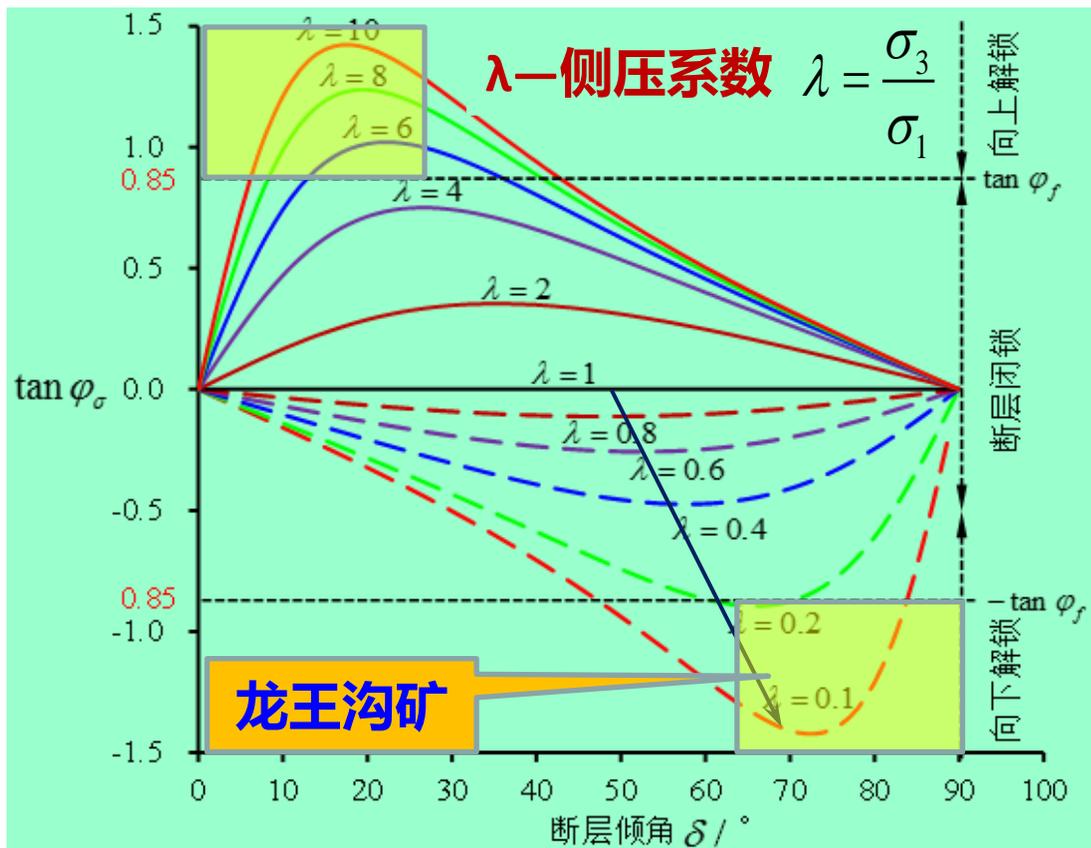
# 断层对覆岩结构运动的控制



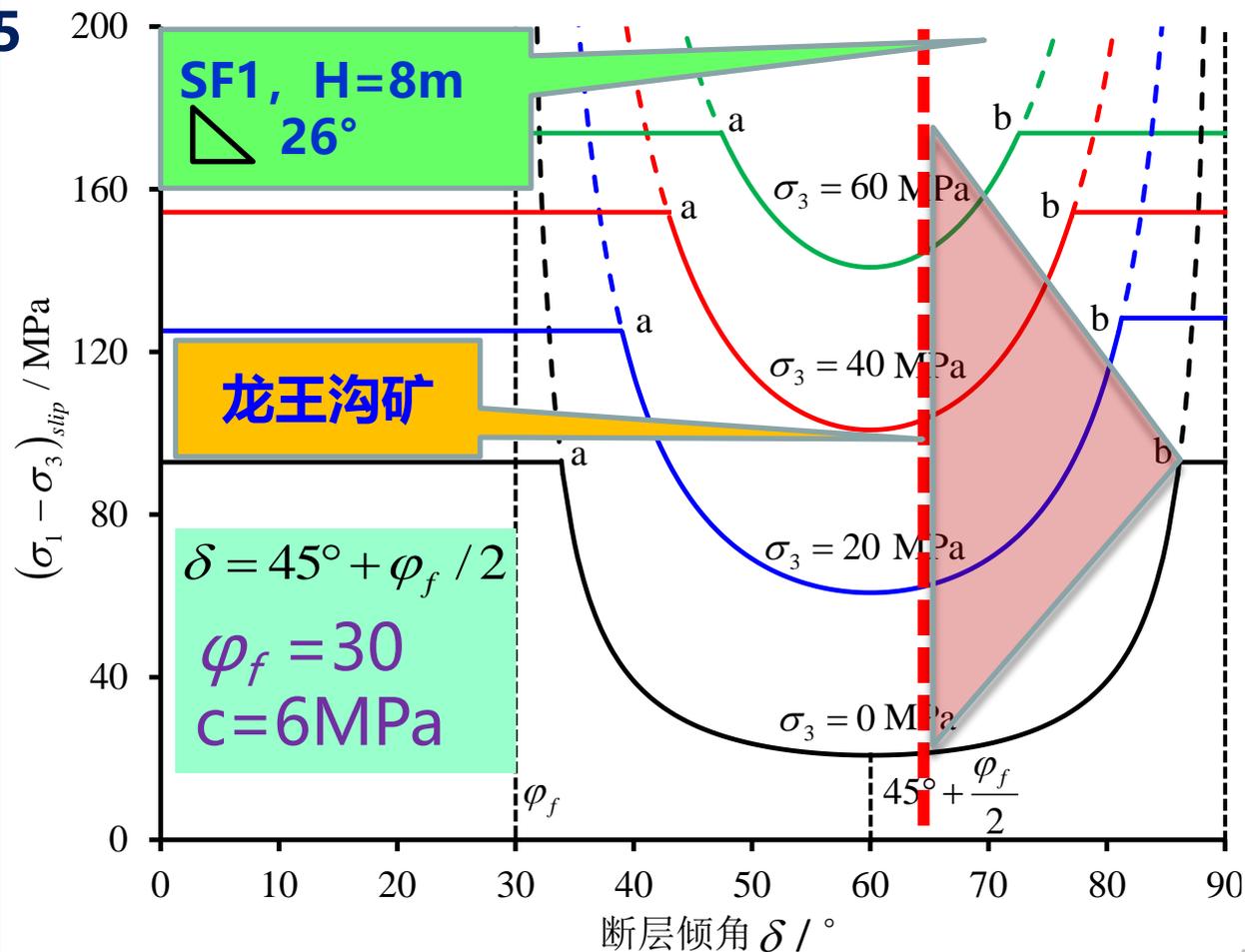
## 断层活化滑移的判别准则:

➤ 静载作用下断层整体处于闭锁。

侧压系数  $\lambda=0.8 \sim 1.5$ ; 摩擦系数  $\tan\varphi_f=0.85$



$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{slip} = \frac{2(c + \sigma_3 \tan \varphi_f)}{(1 - \tan \varphi_f \cot \delta) \sin 2\delta}$$



# 汇报提纲

- 厚层覆岩矿震动载显现特征
- 覆岩三元结构失稳诱震机理
- 厚层覆岩结构调控释能对策**

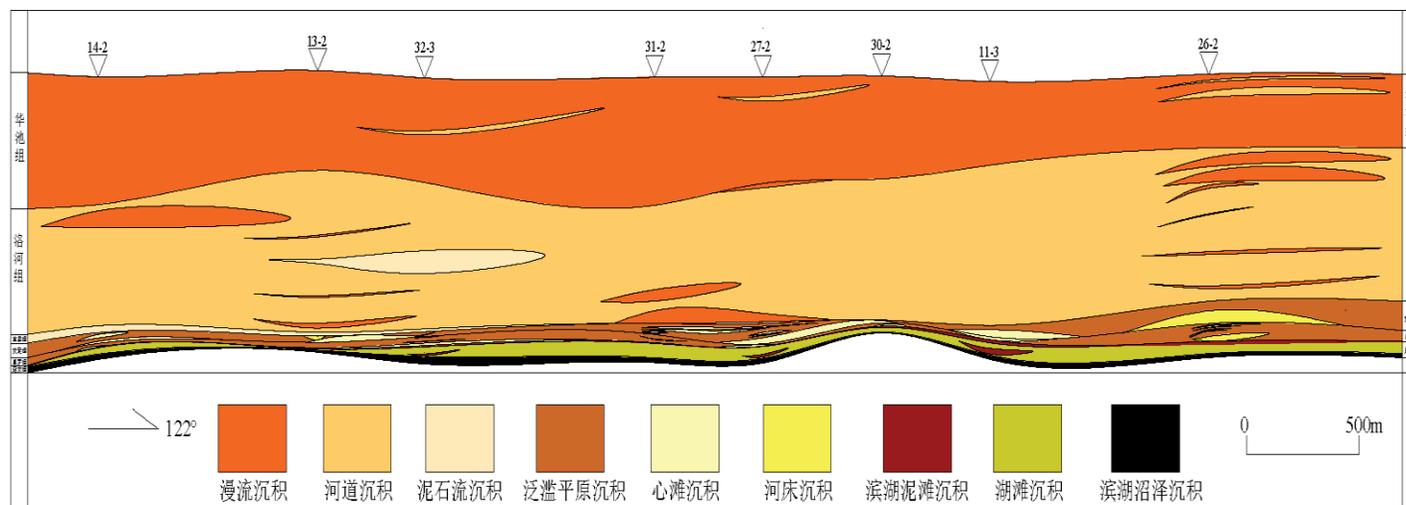
## 覆岩结构调控原理



## □ 煤岩层沉积微相的确定

- 地层沉积形成的煤岩的冲击倾向性不同；煤岩体性质变化，冲击显现频发区域煤层及顶板物理属性及力学性质差异大；
- 煤层厚度变化，煤厚变薄区矿震频次与能级呈上升趋势；
- 主关键层厚度及变化梯度，造成地应力的集中与变化。煤岩应力随顶板厚度增加而增大。

- 沉积环境和煤岩岩层的赋存特征是影响矿井地质动力灾害发生的重要因素。

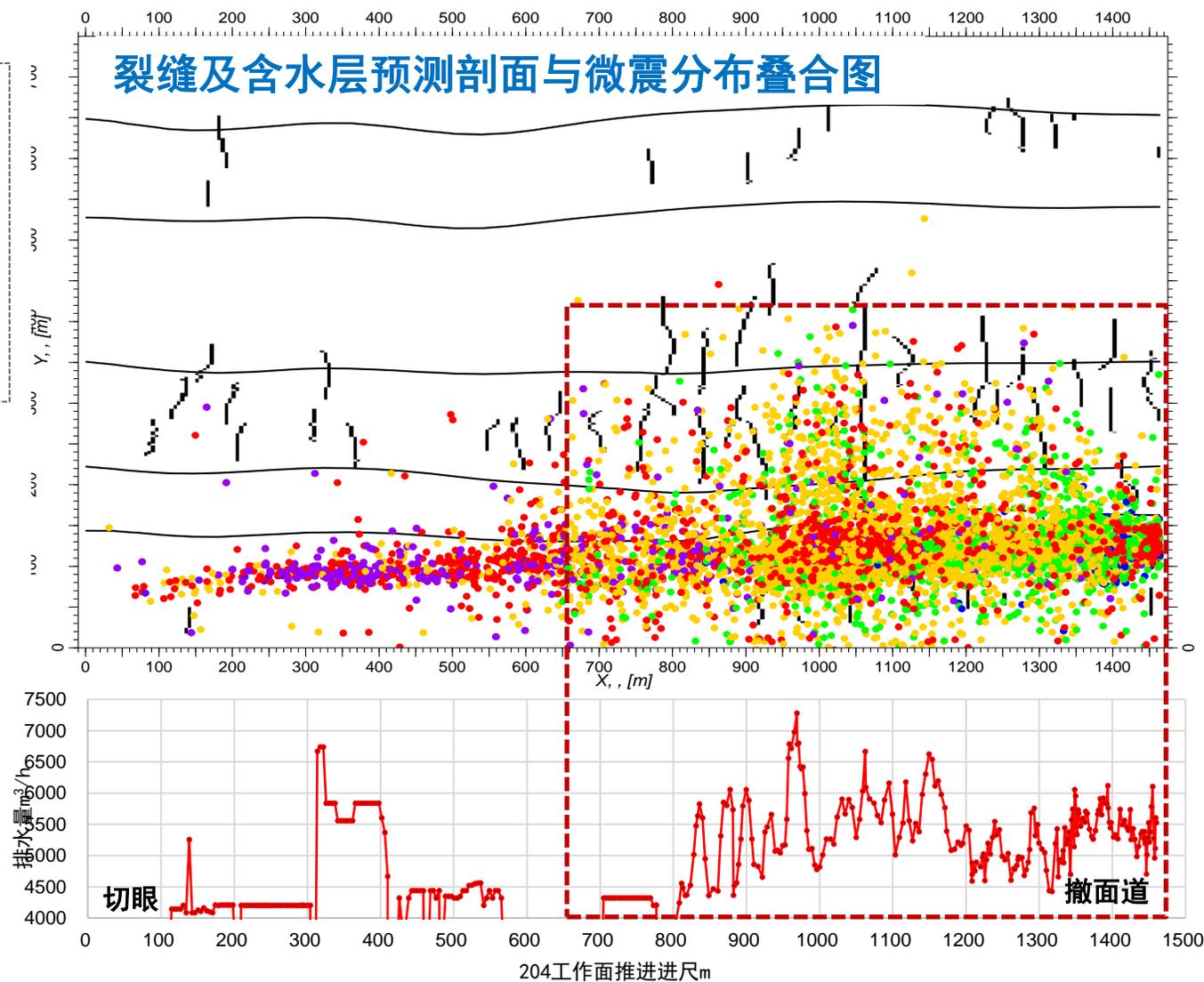
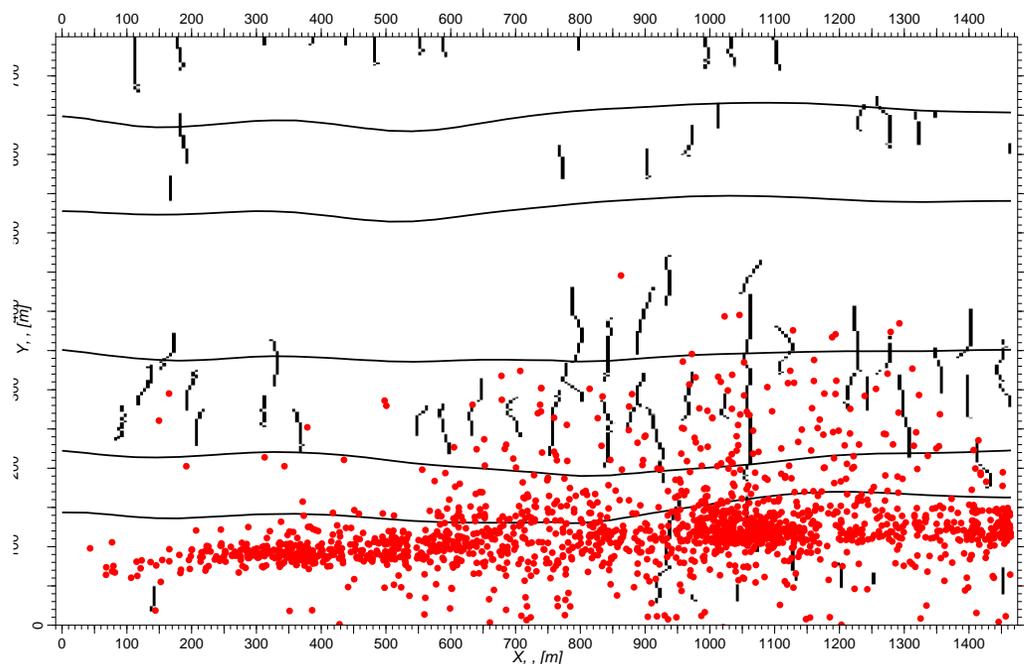


# 覆岩竖向断裂裂缝探测



## 地层竖向断裂裂缝分析探测

- 裂缝发育带是导致涌水量剧烈变化和微震频繁发生的重要因素
- 利用裂缝预测成果，可判别微震震源的最高高度，预测动压显现

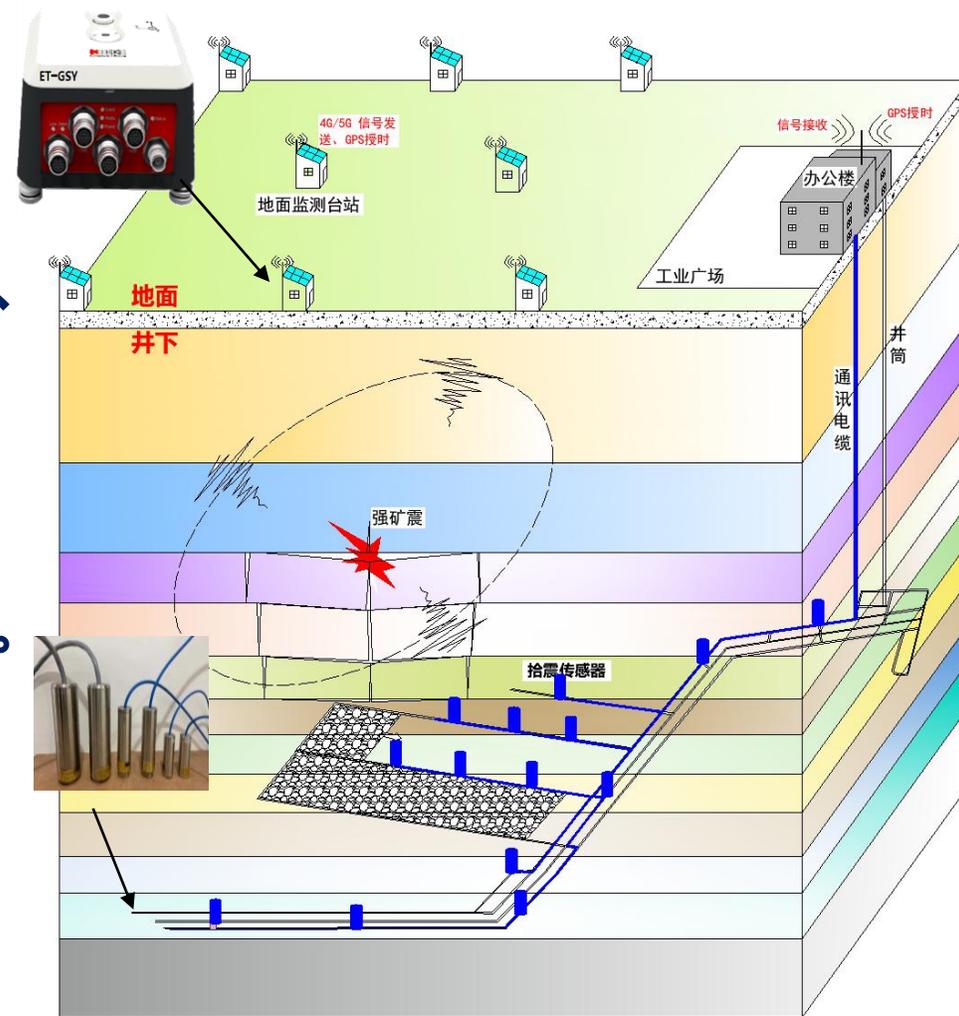
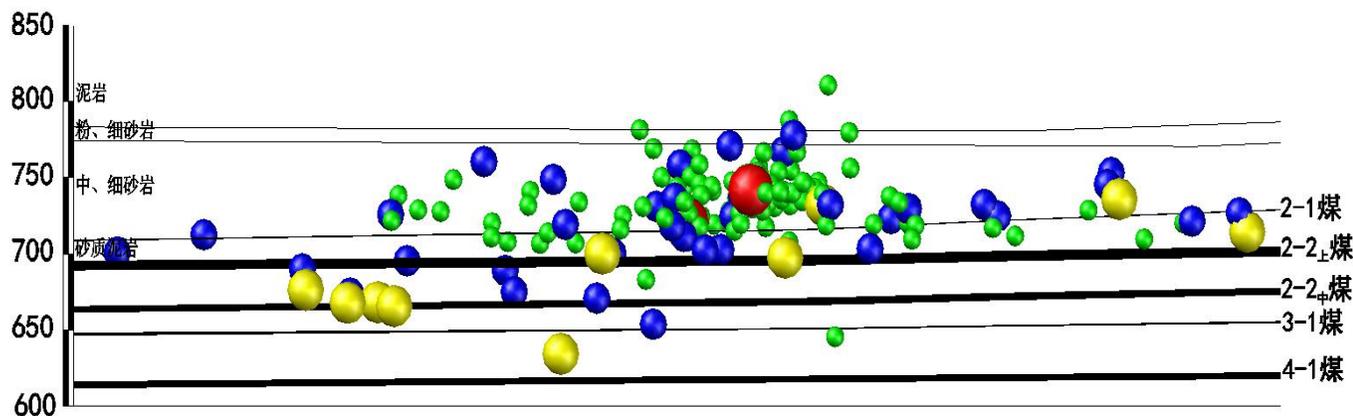


# 覆岩矿震关键层观测确定



## 井地一体融合高精度微震监测系统

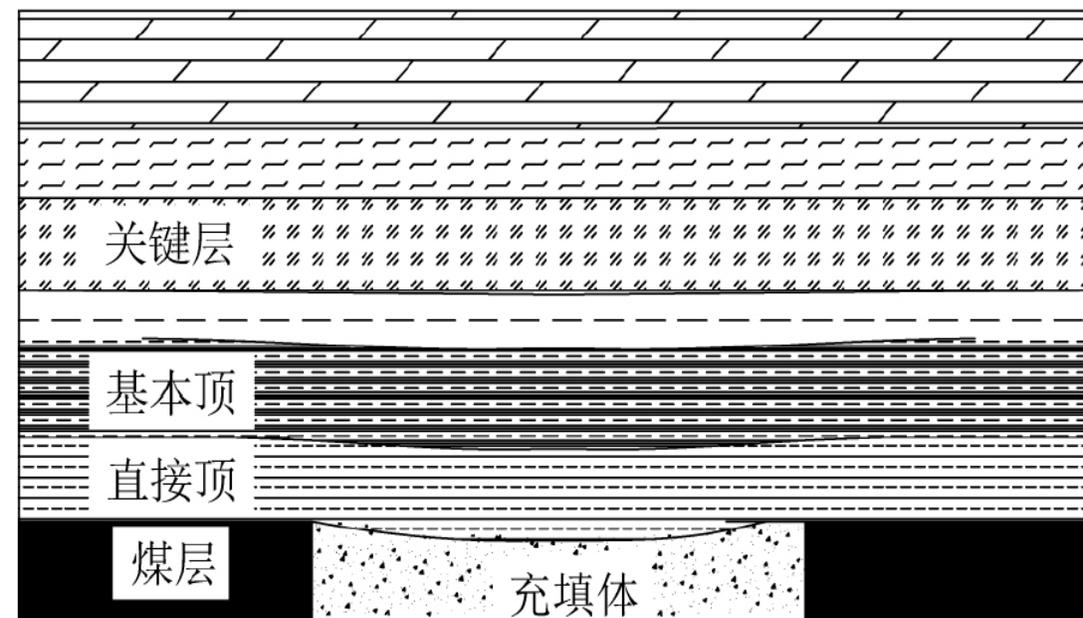
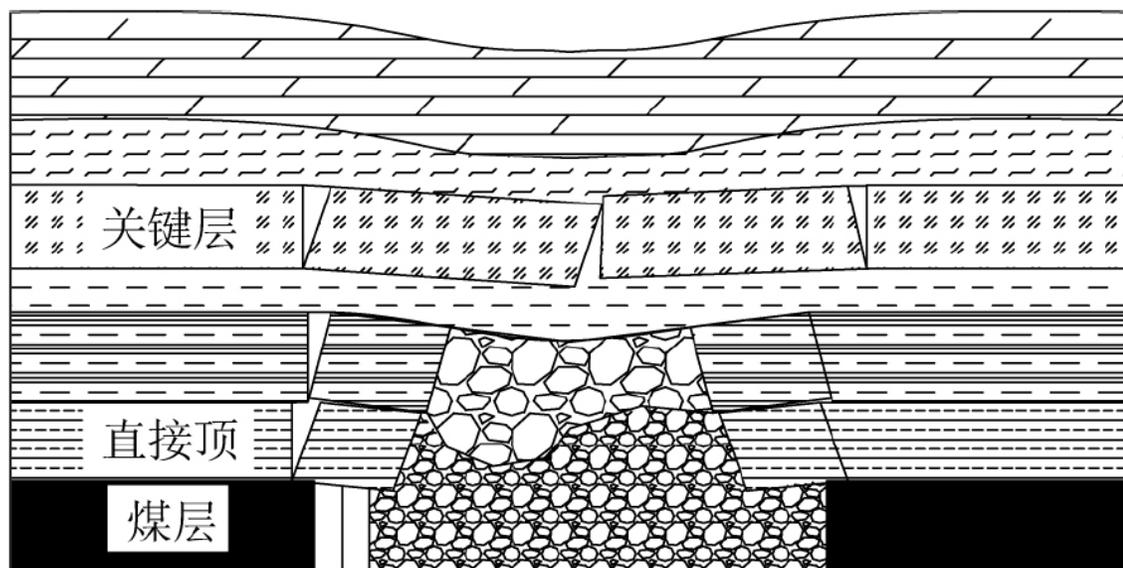
- 井上监测单元：大量程三分量震动信号拾震传感器（ET-GSY）、视频监控、太阳能供电系统、4G/5G工业路由器、远端VPN路由器；
- 井下监测单元：小、中、大量程拾震传感器、信号采集站、记录仪、分析计算机、UPS电源。



井地一体融合高精度微震监测系统示意图

## 采空区充填开采控制岩层运动

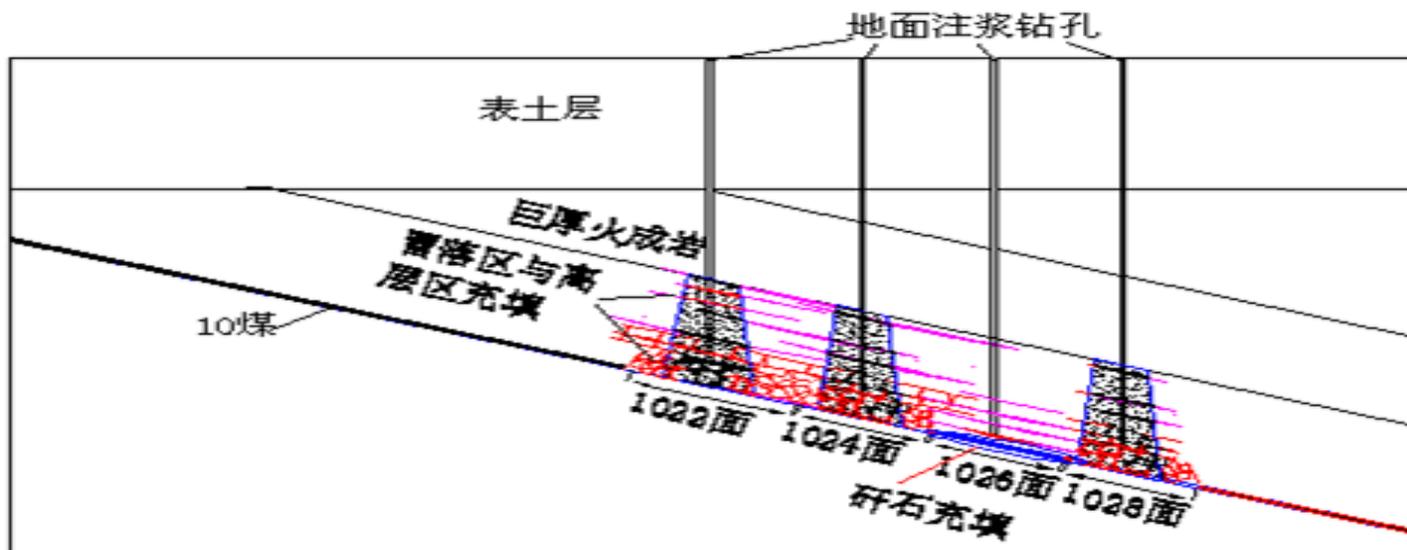
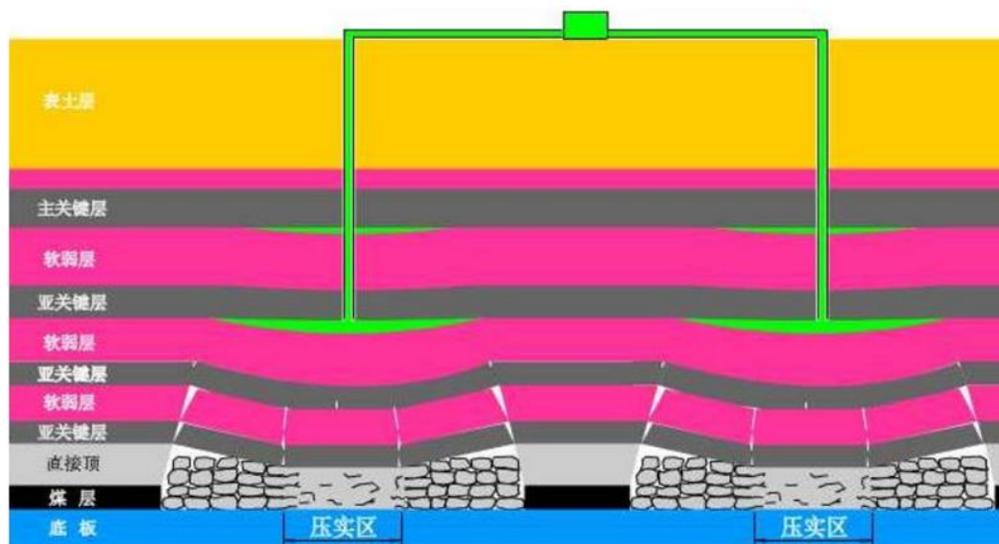
- 采用充填开采处理采空区，可有效控制顶板的下沉，使离层空间将止于**关键层下方**，控制高位关键层破断，防止关键层破断诱发**大能量矿震**。



井下采空区矸石充填

## 覆岩离层注浆控制岩层运动

- 通过浆液注入目标离层区间，使离层空间将止于关键层下方，有效控制矿震关键层的破断，降低关键层破断诱发大能量矿震的可能
- 需准确把握注浆时间、孔位、孔深等；且覆岩离层是动态过程，参数设计直接影响矿震控制效果



✓ 窦林名, 许家林等. 离层注浆控制冲击矿压危险机理探讨. 中国矿业大学学报, 2004, 33 (2) : 145- 149

## □ 定向水力致裂调控岩层结构

### ➤ 定向长钻孔水力压裂技术：

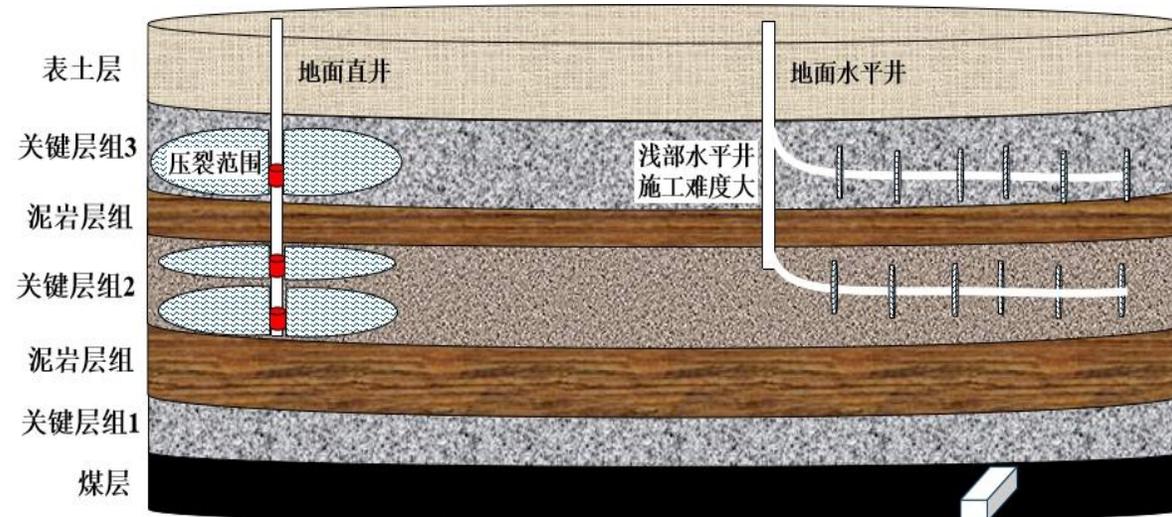
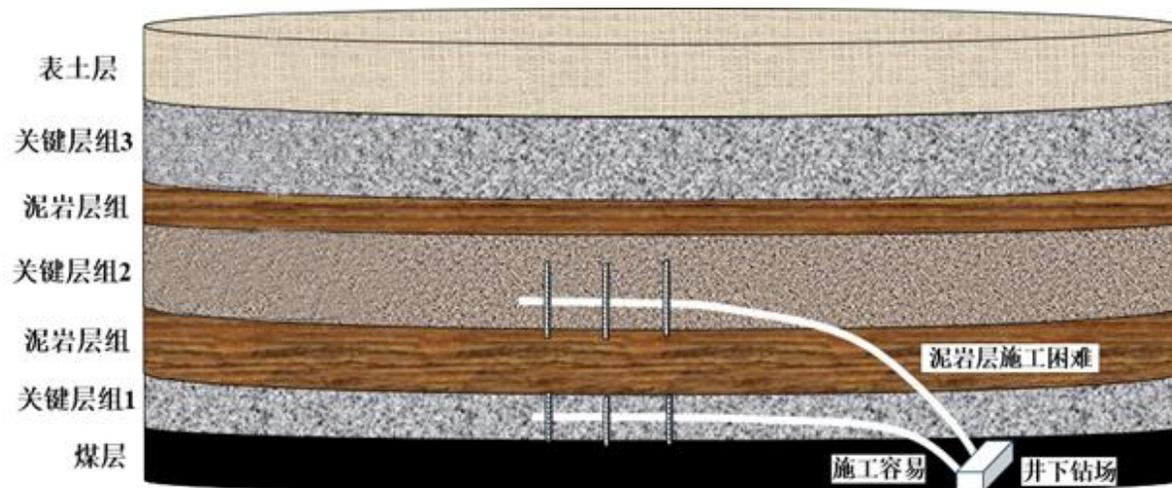
从井下施工水平压裂孔致裂低、高位关键层，防控原理与参数设计需进一步研究；

### ➤ 地面直井水力压裂技术：

沿地面垂直钻井，钻井分段压裂；压裂层位与致裂参数需进一步研究；

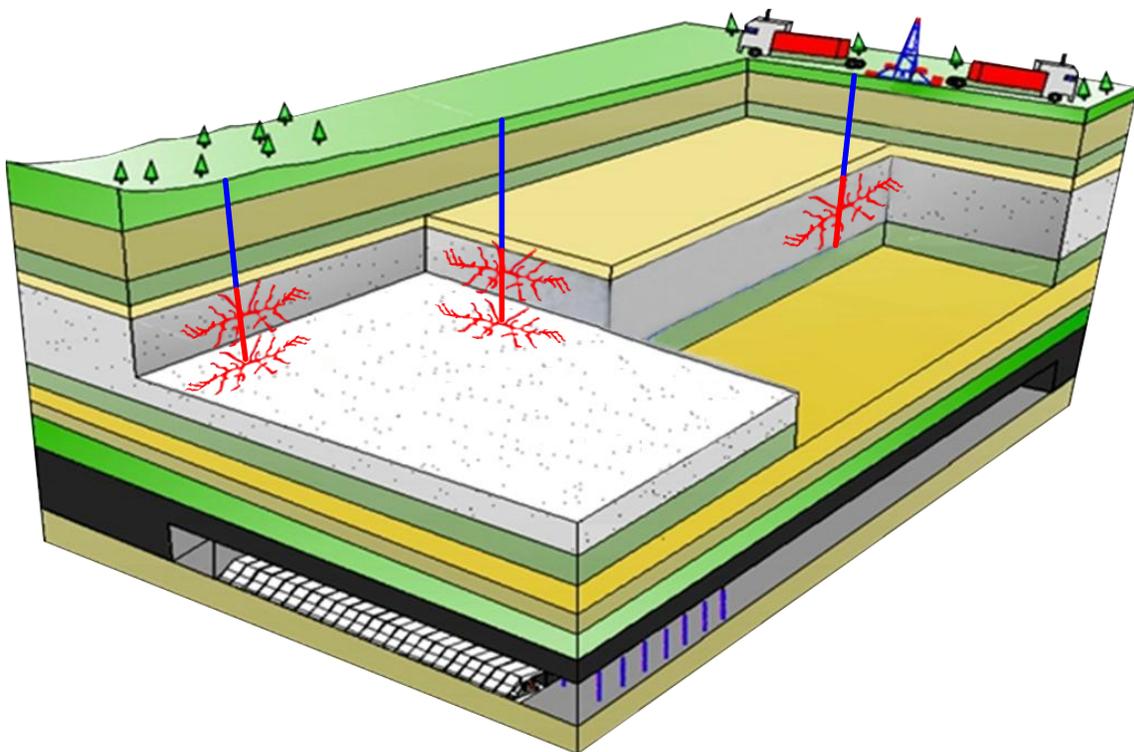
### ➤ 地面水平井压裂技术：

垂直或倾斜钻达目标岩层后，井筒转向与目标层平行继续施工；需同时施工多个水平井，技术难度大。

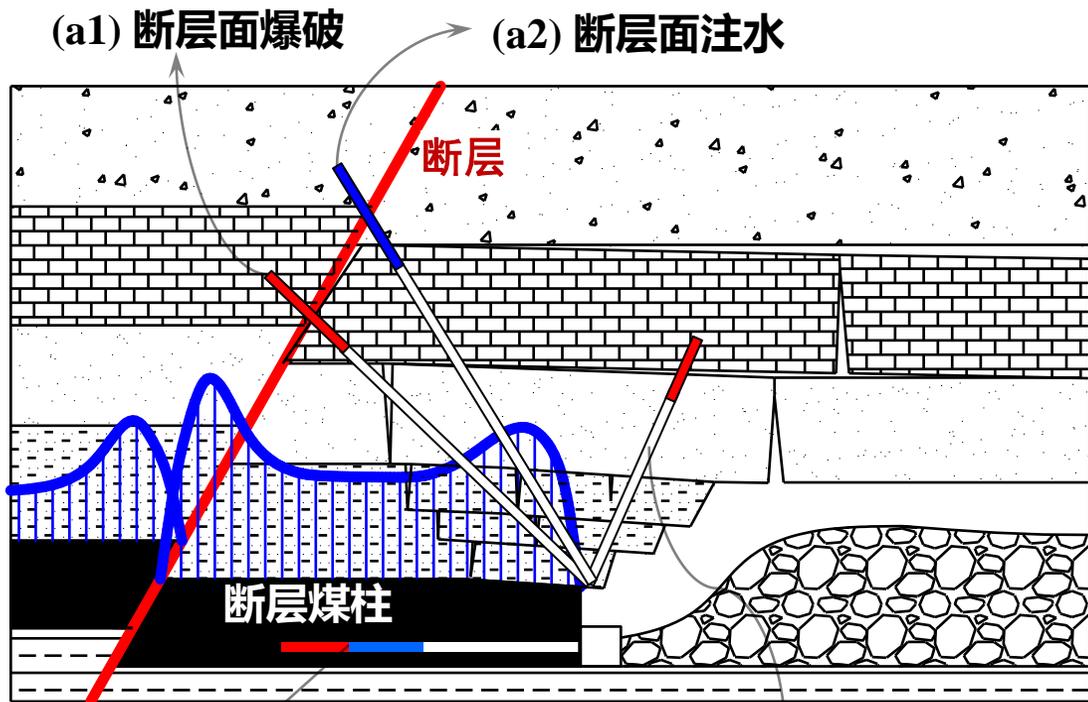


## □ 地面深孔爆破调控覆岩运动

- 在工作面前方或采空区从地面施工垂直爆破孔，致裂诱发矿震的高位关键岩层；
- 爆破层位、爆破参数及爆破效果等，需进一步研究防控原理及效果评价。



## 提前释放断层积聚能量



(b) 断层煤柱卸压

(c) 改变顶板结构, 降低其与断层的相互作用

(b1) 煤体大直径钻孔卸压

(c1) 顶板爆破

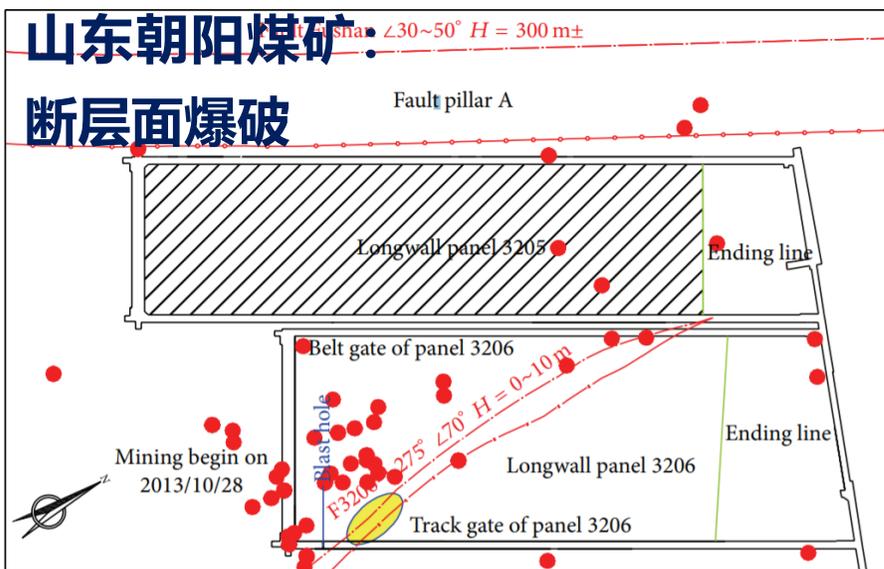
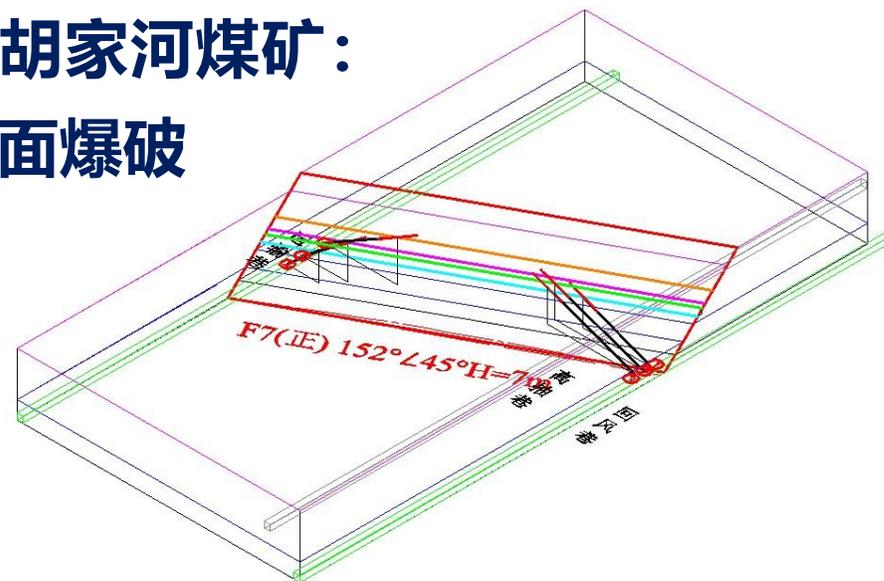
(b2) 煤体深孔爆破

(c2) 水力致裂

(b3) 煤层注水

(b4) 煤层水力割缝

## 陕西胡家河煤矿: 断层面爆破



# 谢谢!

# 欢迎批评指正!

