



中国矿业大学

China University of Mining and Technology



厚硬顶板条件下煤柱冲击及其控制

Pillar Coal-Burst Mechanism under Hard Thick Roof
Condition and Its Prevention

报告：窦林名 教授

Ph D. Dou Lin-ming Prof.

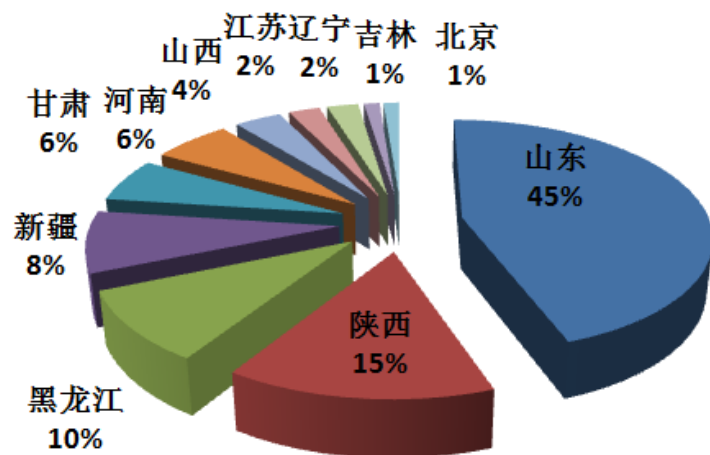
单位：中国矿业大学

China University of Mining and Technology

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

WeChat: 中矿冲击地压研究

- 冲击矿压是井巷或工作面周围煤（岩）体，由于弹性变形能的瞬时释放而产生的突然、剧烈破坏的动力现象。常伴有煤岩体抛出、巨响及气浪等现象。是造成人员伤亡和采掘空间严重破坏的煤矿动力灾害。
- 据统计，目前我国已有**329**个冲击地压矿井，正在开采的**253**个，分布于**26**个省、市及自治区。



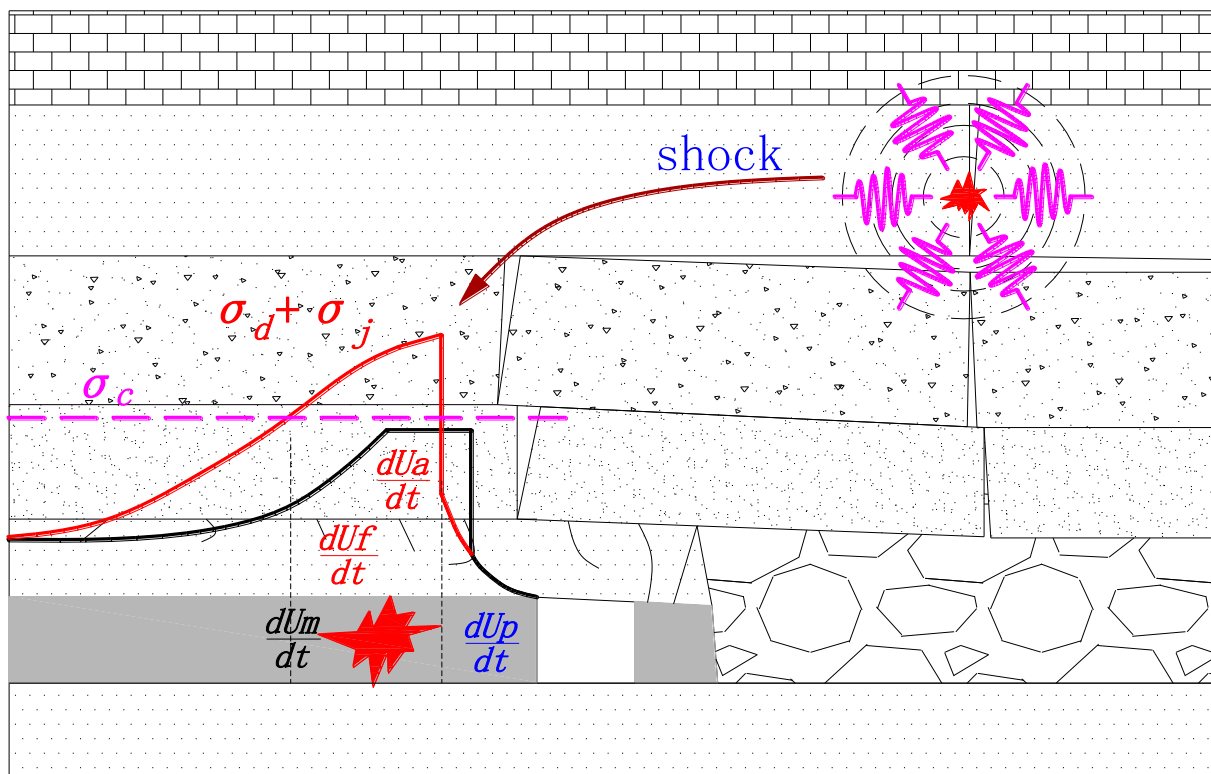
□ 动静载叠加诱发冲击机理

能量理论

$$\frac{dU_m}{dt} + \frac{dU_f}{dt} + \frac{dU_a}{dt} > \frac{dU_p}{dt}$$

应力条件

$$\sigma_j + \sigma_d \geq \sigma_{b \min}$$



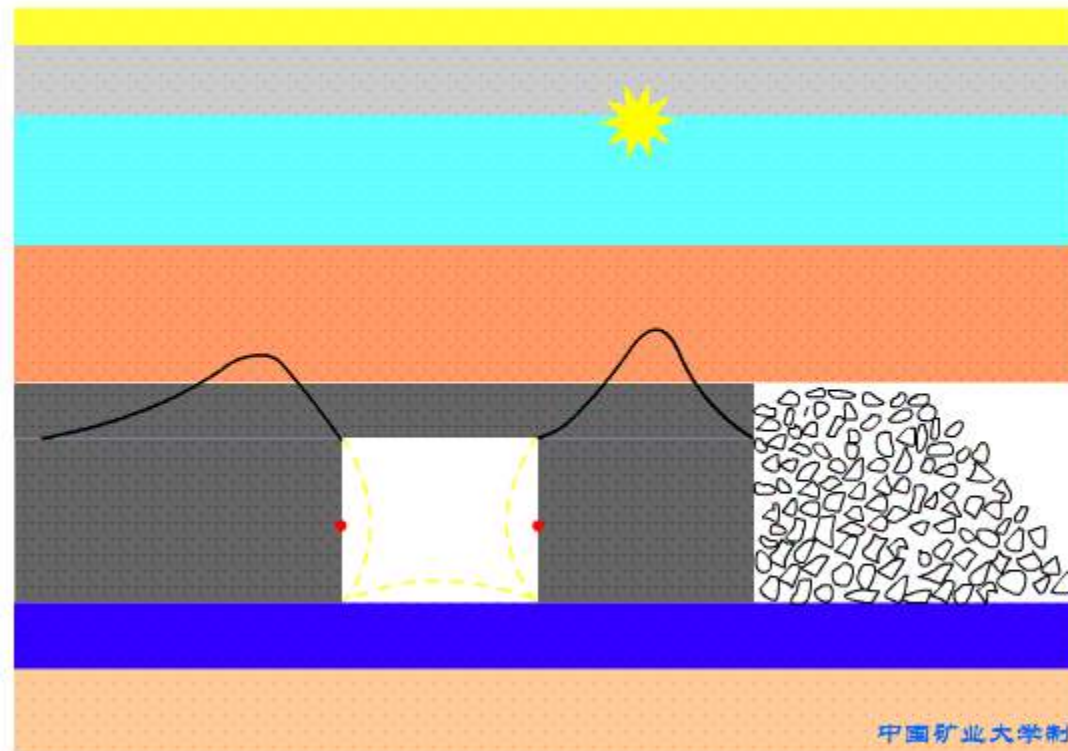
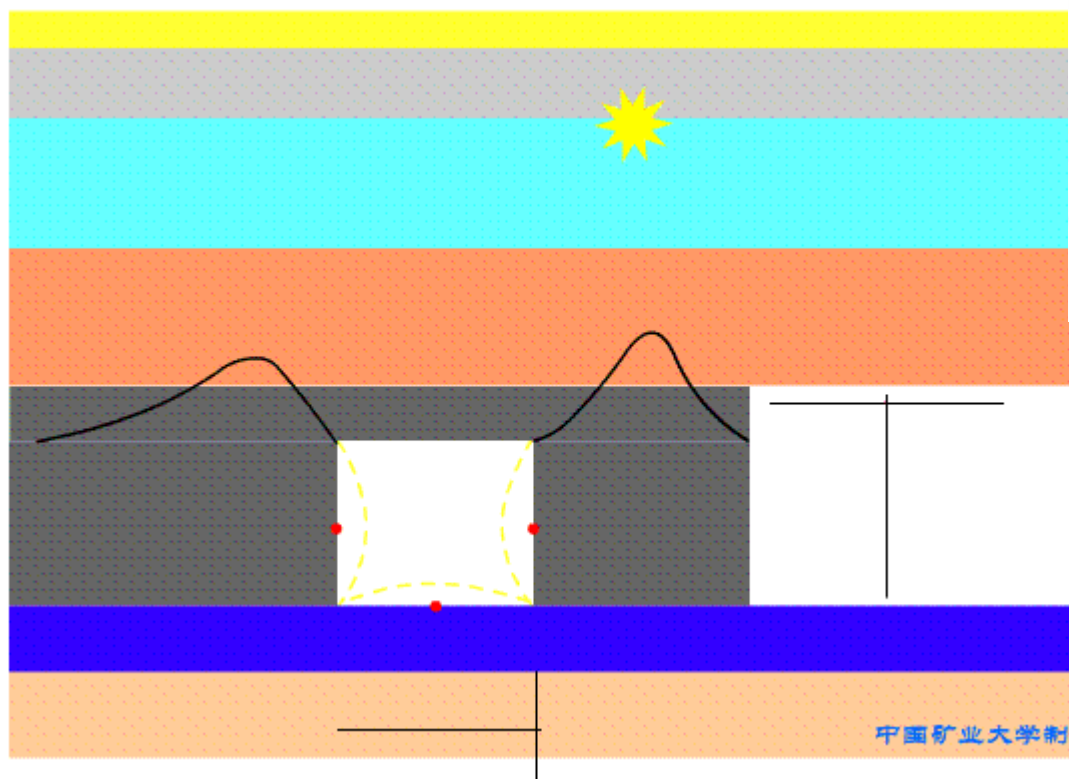
- σ_j - 静应力
- σ_d - 冲击应力波
- $\sigma_{b \min}$ - 临界应力

- U_m - 煤体弹性能量
- U_f - 顶底板弹性能量
- U_a - 顶板加速度能量
- U_p - 冲击消耗能量

□ 冲击、矿震演化过程

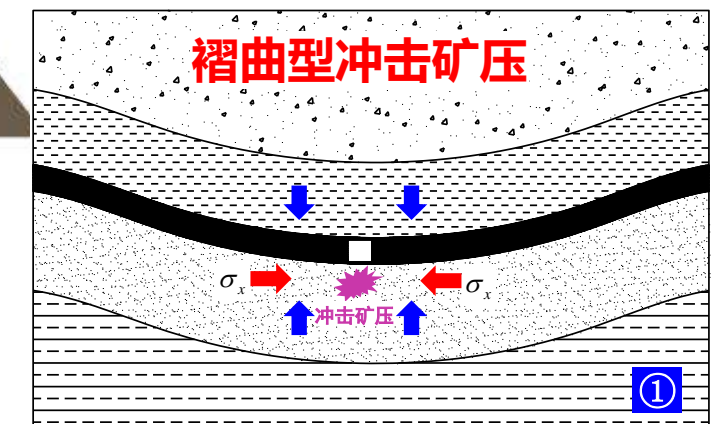
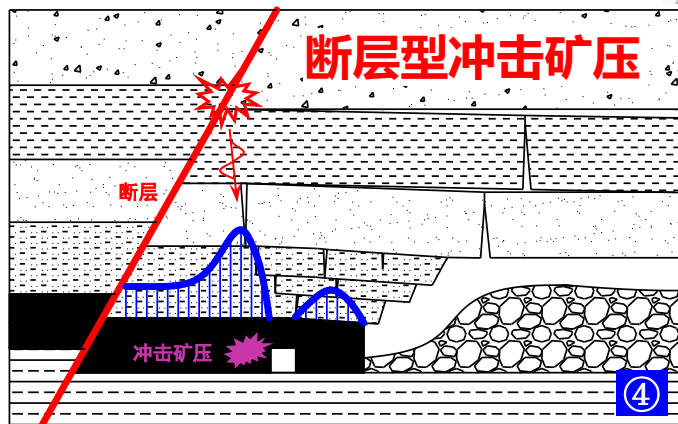
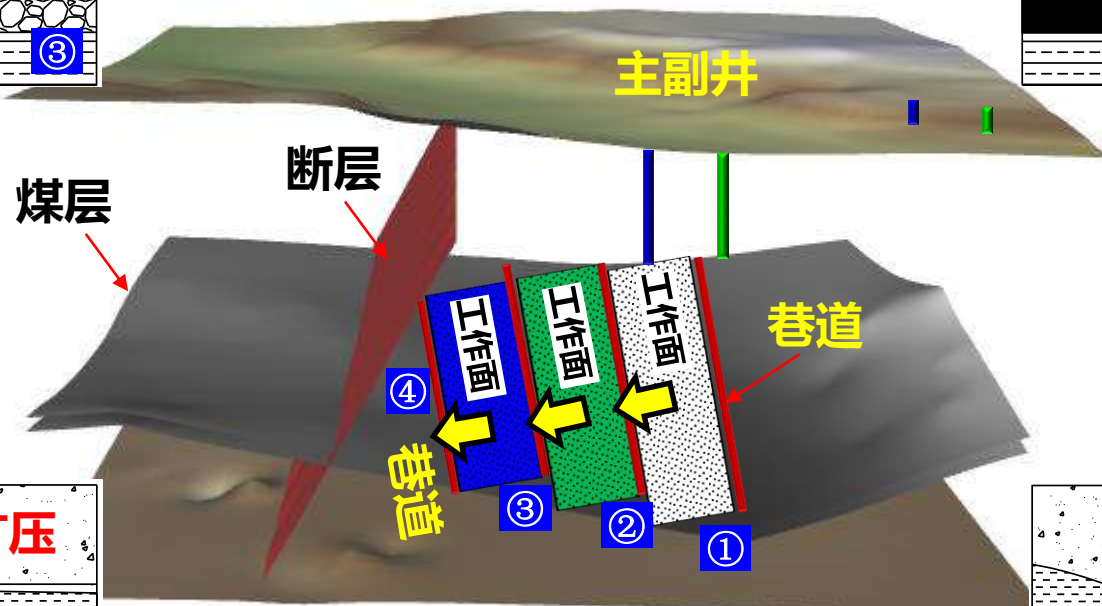
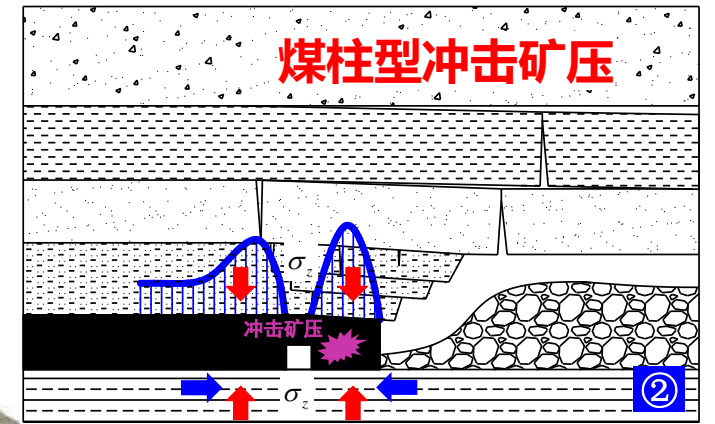
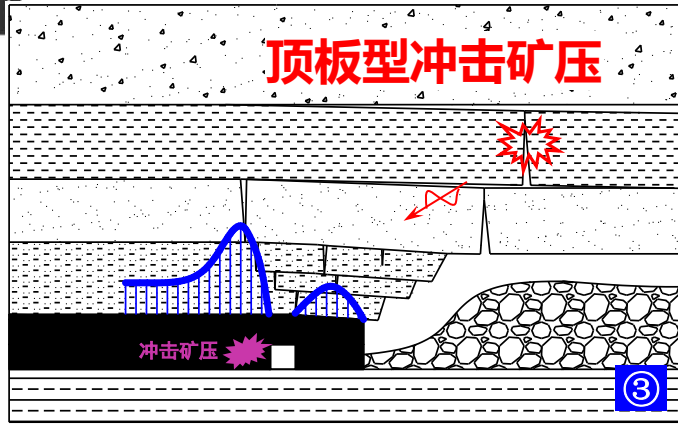
➤ 静载+动载 $\sigma_j + \sigma_d \geq \sigma_{b \min}$

➔ 诱发冲击





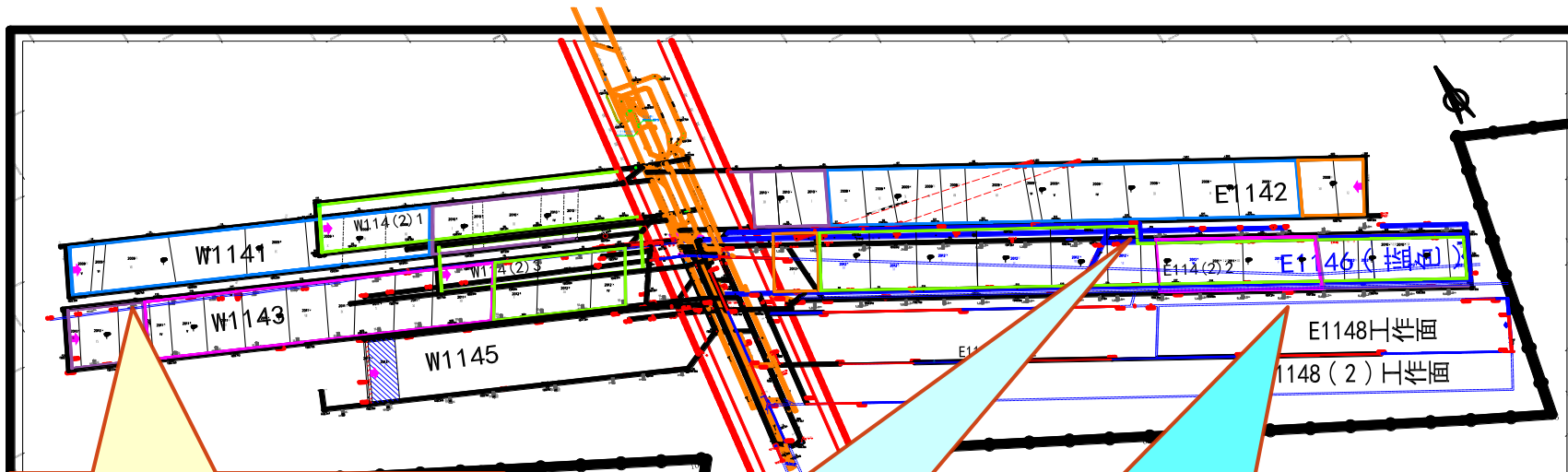
冲击矿压类型 Classification of Coalburst



- ☐ 坚硬顶板下煤柱冲击实例
- ☐ 覆岩空间结构及失稳机理
- ☐ 煤柱受载特征及其冲击原理
- ☐ 冲击危险的控制原理与技术

1、坚硬顶板下煤柱冲击实例

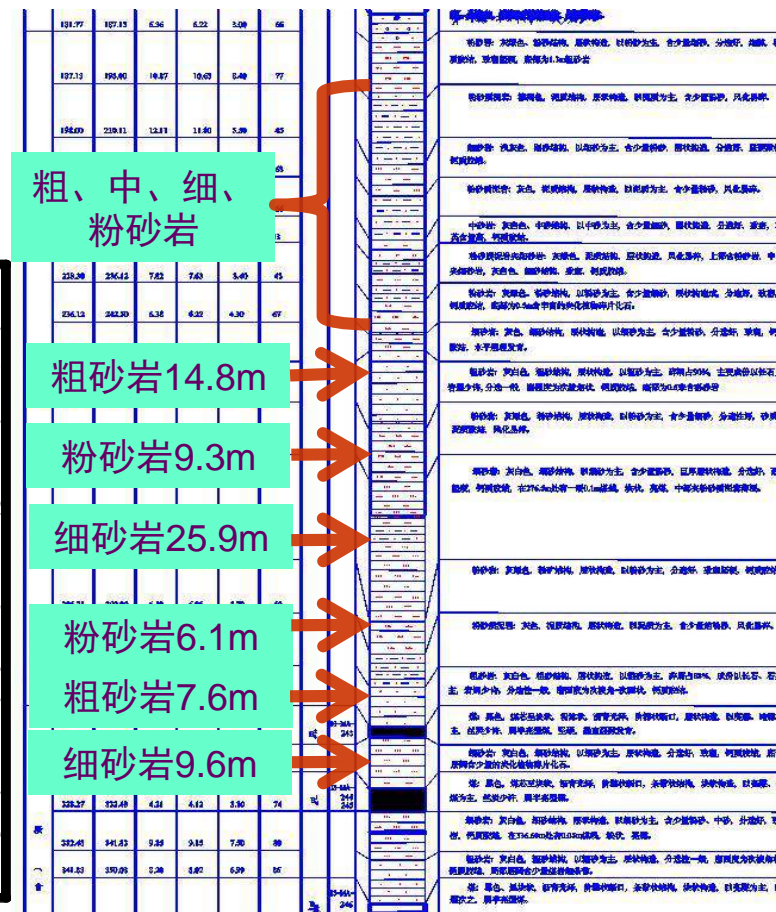
- 新疆宽沟煤矿，W1143工作面上部及端头巷道冲击
- W1143面回采B4-1煤，煤厚3m，埋深317m、面长162m，倾角10-16°
- 与W1141面间的煤柱宽 30m。



20101008, W1443面端头冲击
20110313, 面内冲击;
20110413, 面内冲击, 5E6J

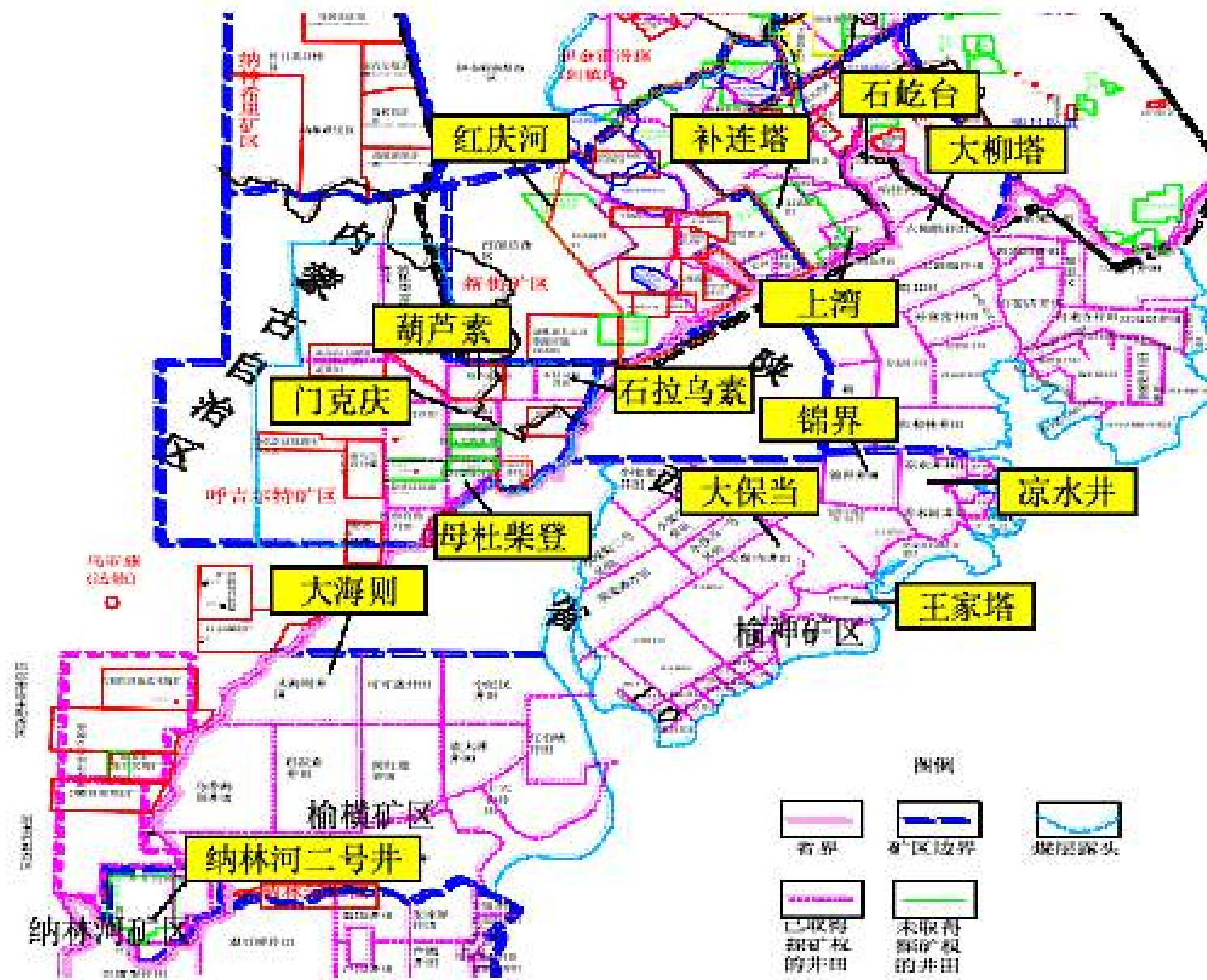
20110704, E1146机巷掘进头
震动, 巷道破坏
20110706, 机巷掘进, 破坏

20130109, E11468面机巷掘进头
震动, 巷道损坏;
20110112/0116, 机巷掘进破坏



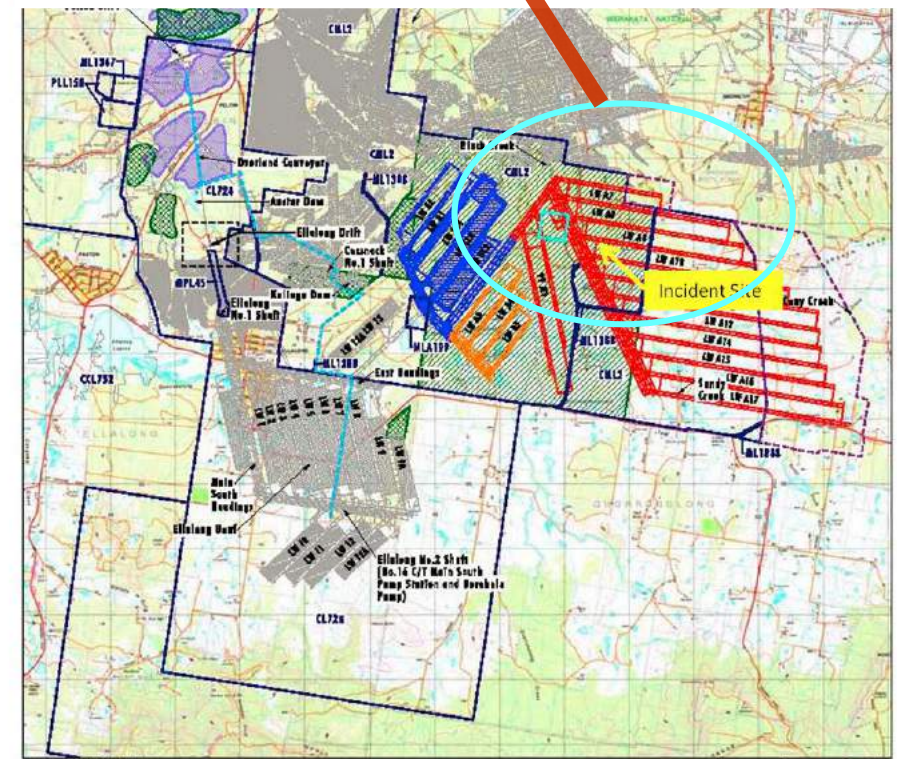
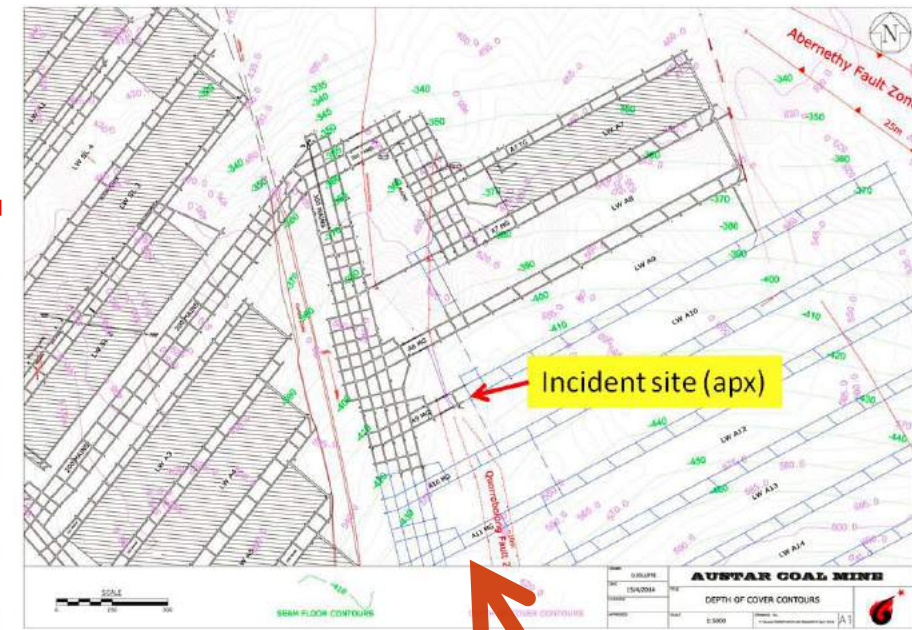
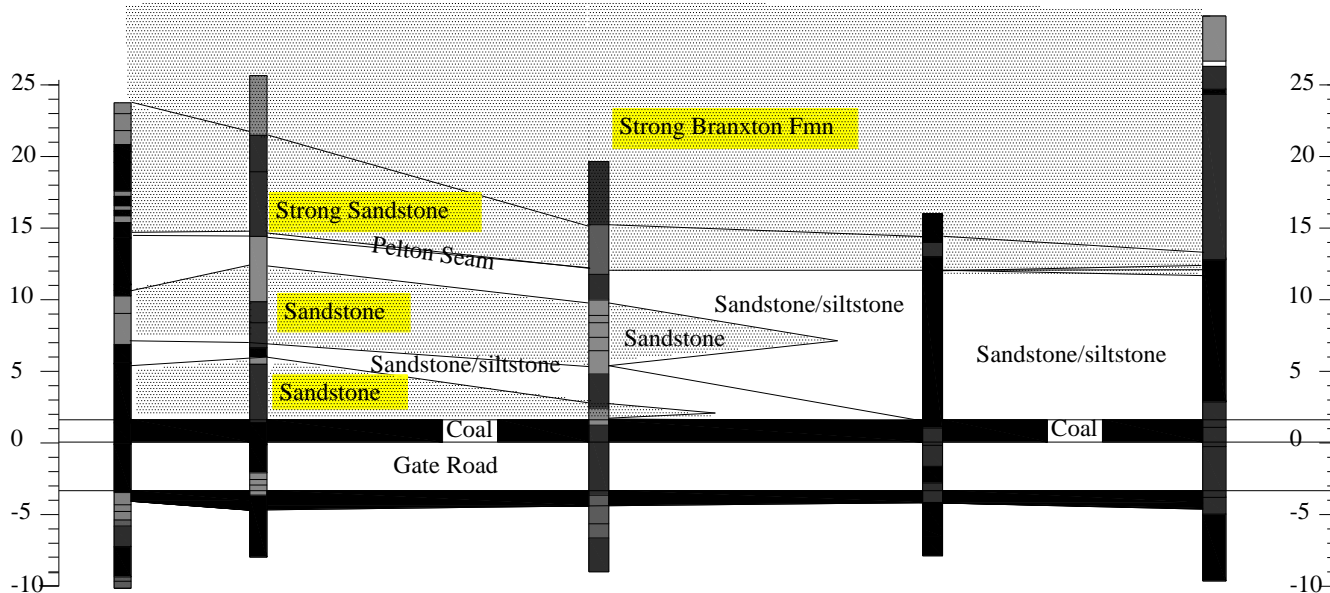
1、坚硬顶板下煤柱冲击实例

- 蒙陕地区、彬长矿区、新疆等地区冲击地压灾害频发；
- 这些矿区的煤层均具有**坚硬顶板**。
- 红庆河煤矿、门克庆煤矿、纳林河煤矿、石拉乌素煤矿、母杜柴担煤矿等



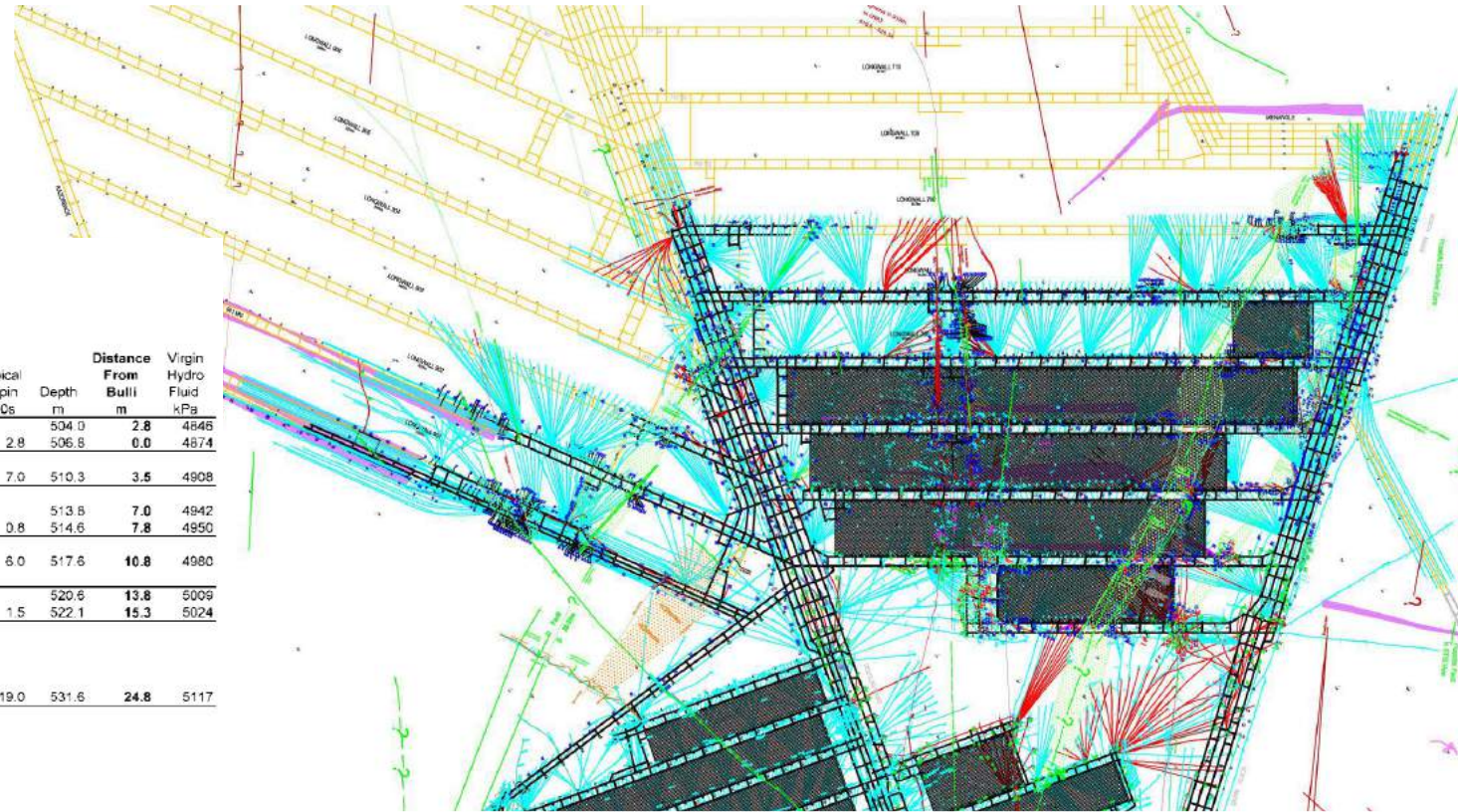
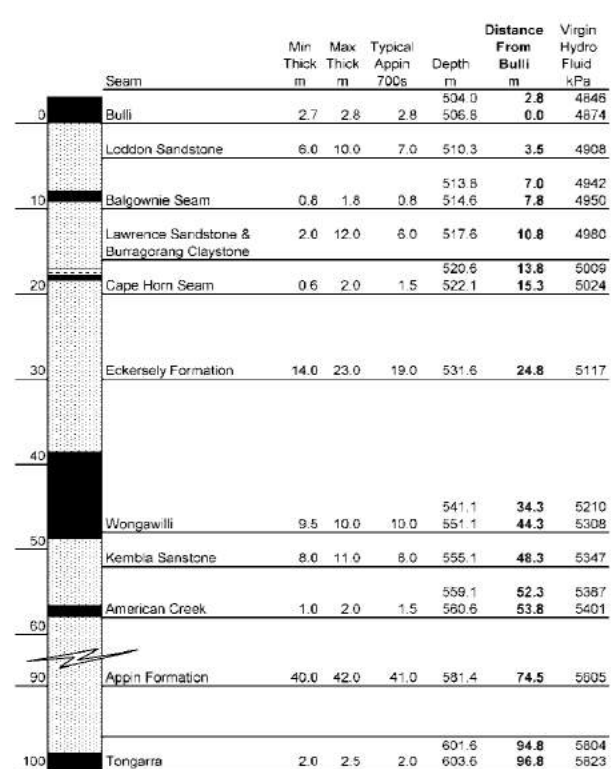
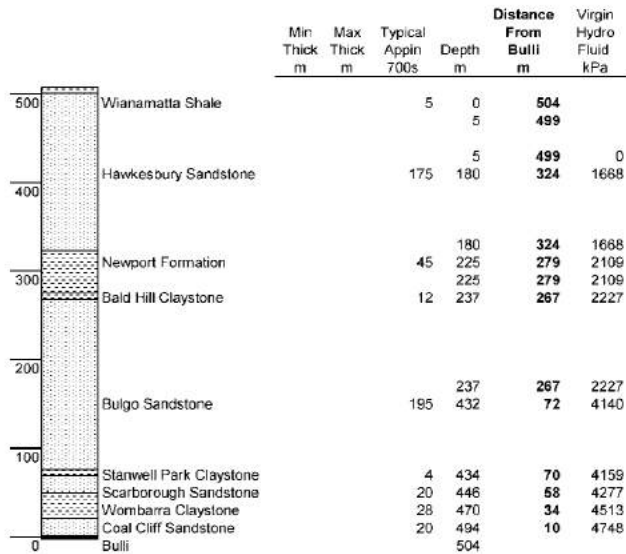
Geomechanics at Austar Mine

- ❑ Austar Mine
- ❑ Mining depths between 480m and 560m
- ❑ Seam thickness ranges from 4m to 7m
- ❑ Longwall cutting height ~ 2.9m
- ❑ Several massive sandstone units within 20m of seam – variable thickness



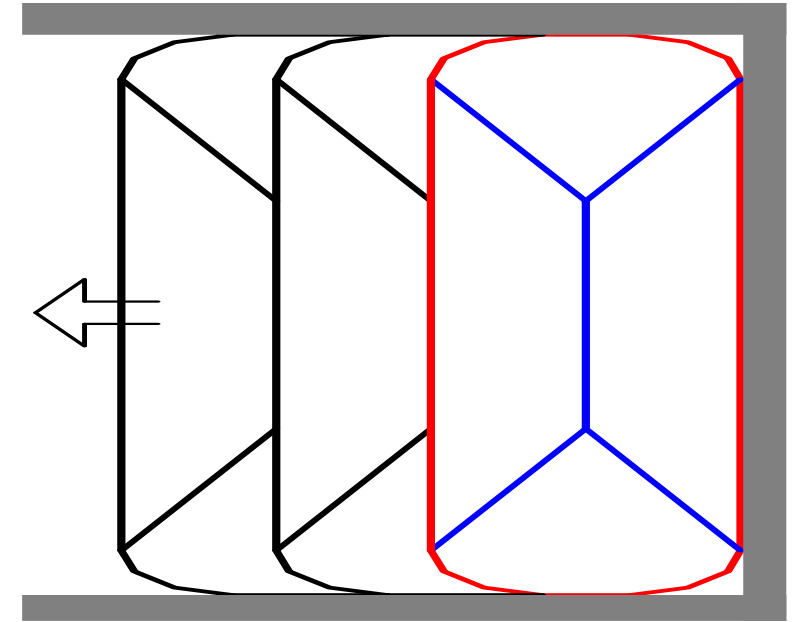
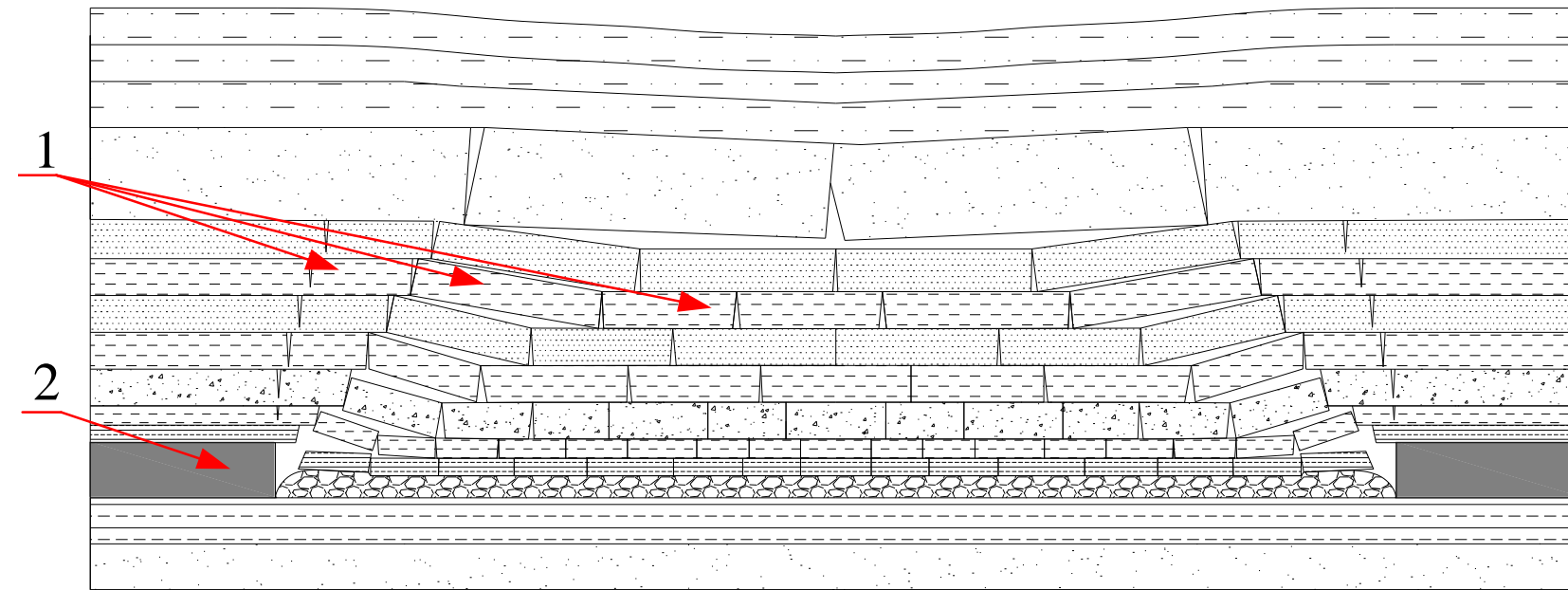
□ Appin Mine

Gas Reservoir



- ☐ 坚硬顶板下煤柱冲击实例
- ☐ 覆岩空间结构及失稳机理
- ☐ 煤柱受载特征及其冲击原理
- ☐ 冲击危险的控制原理与技术

覆岩层面的 O-X 结构——垂直方向的 F 型结构



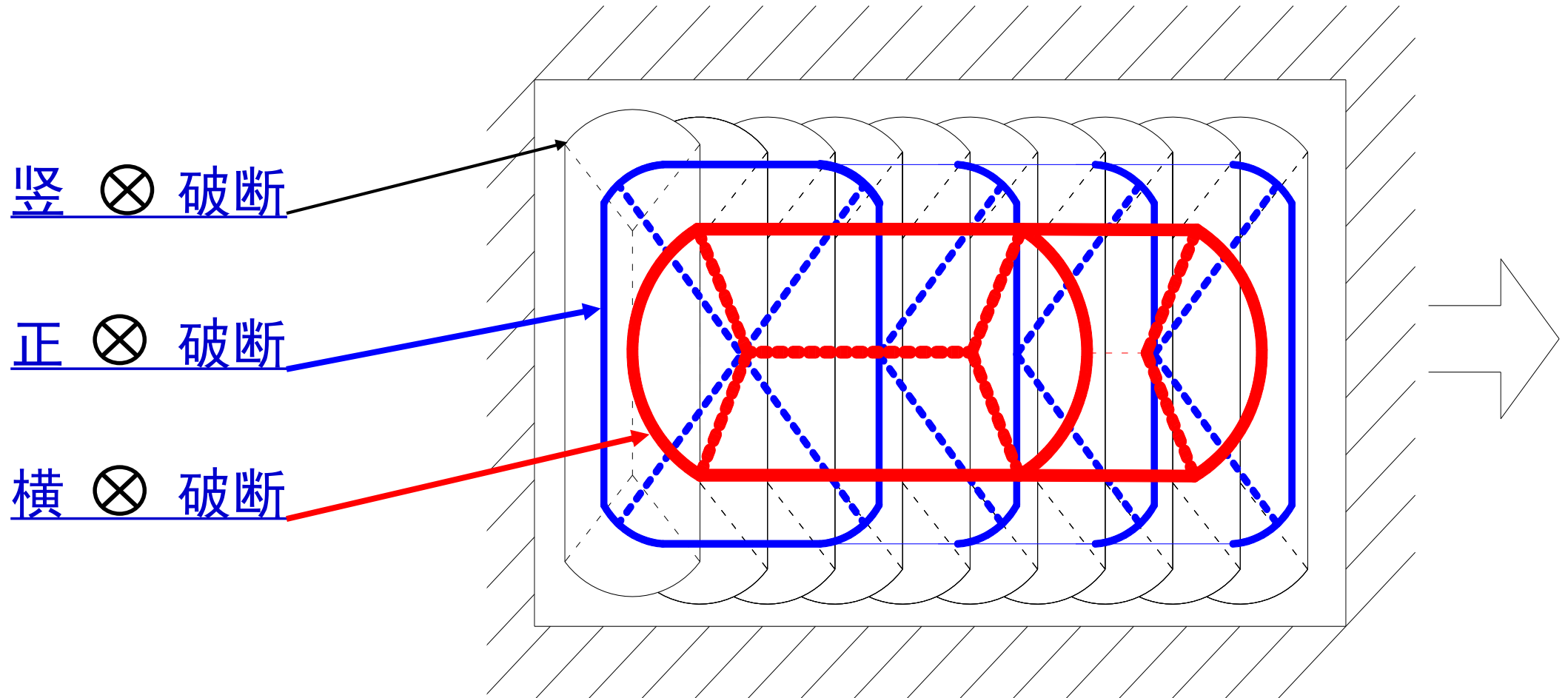
(a)沿走向剖面的“砌体梁”结构

(b)沿层面的“O-X”结构平面图

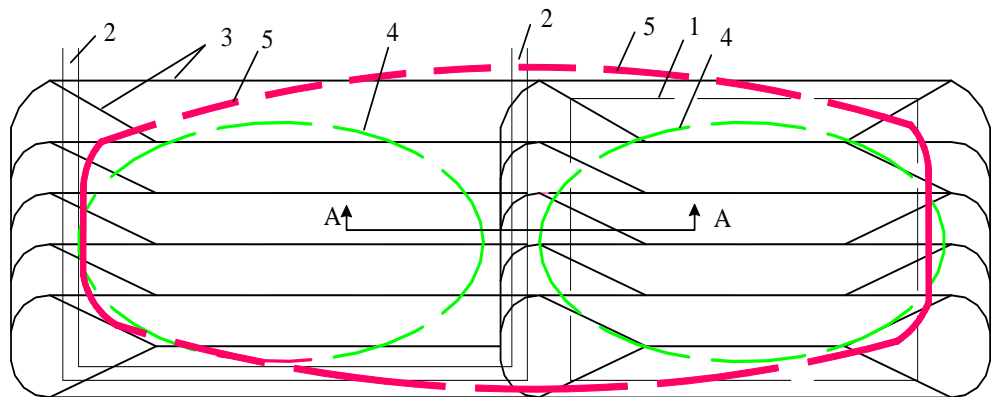
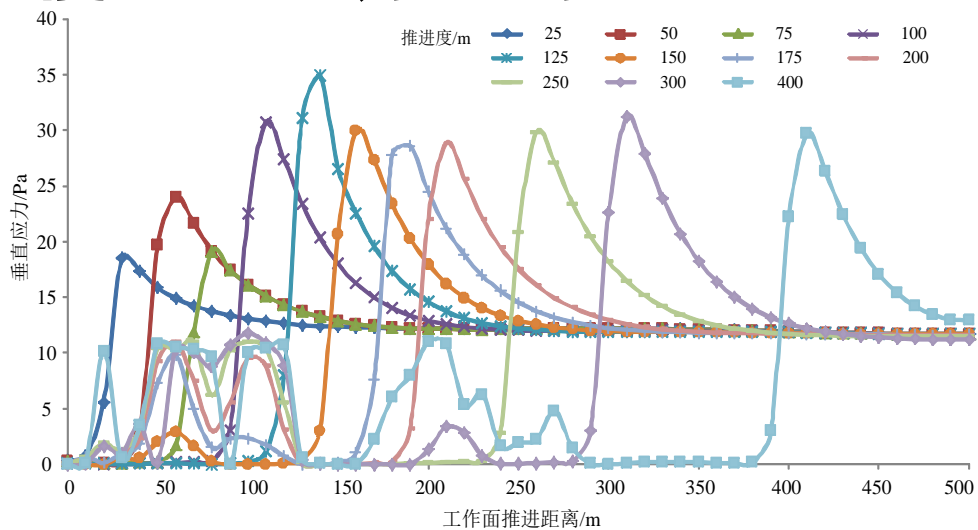
1.“砌体梁”结构；2.实体煤；3.“O-X”破断线

2、覆岩空间结构失稳机理

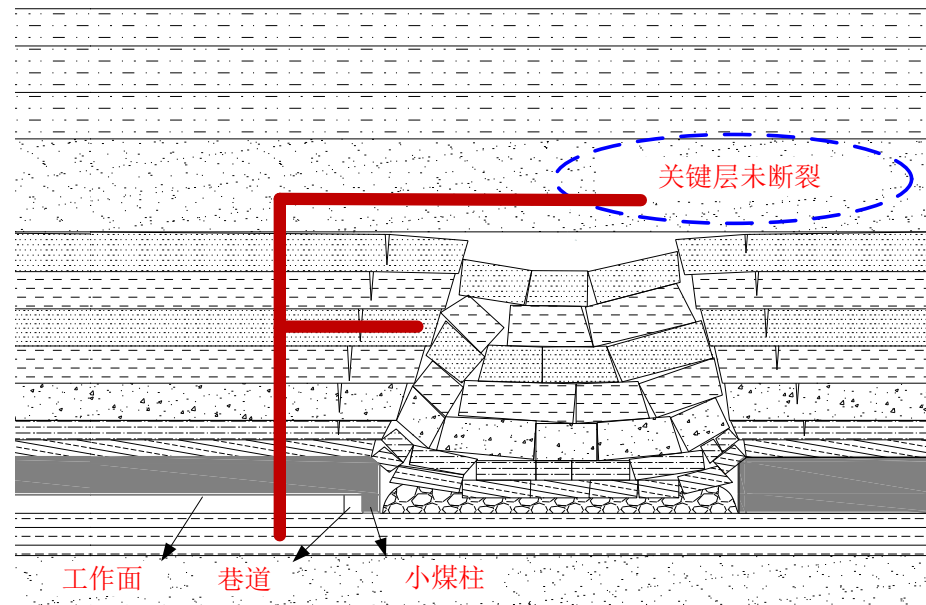
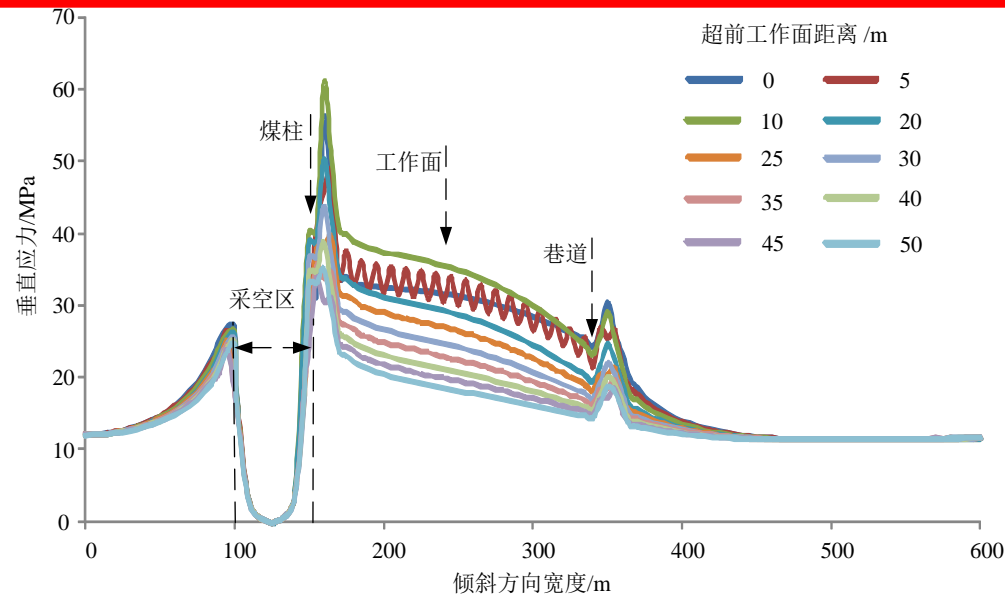
□ 覆岩层面的 0-X 结构



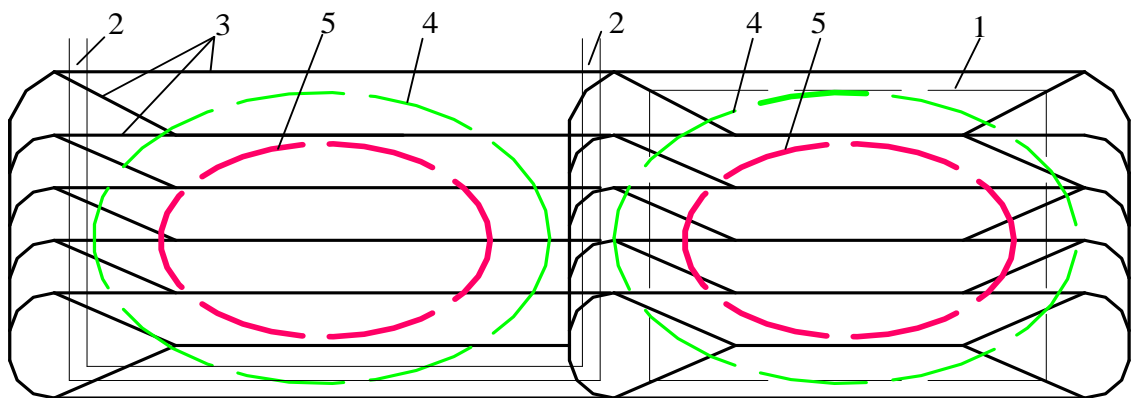
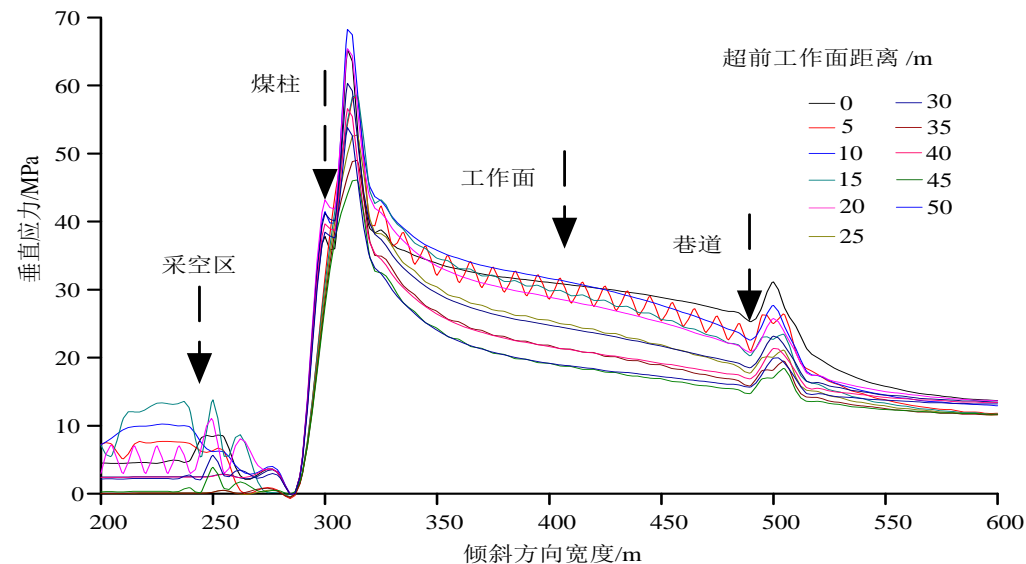
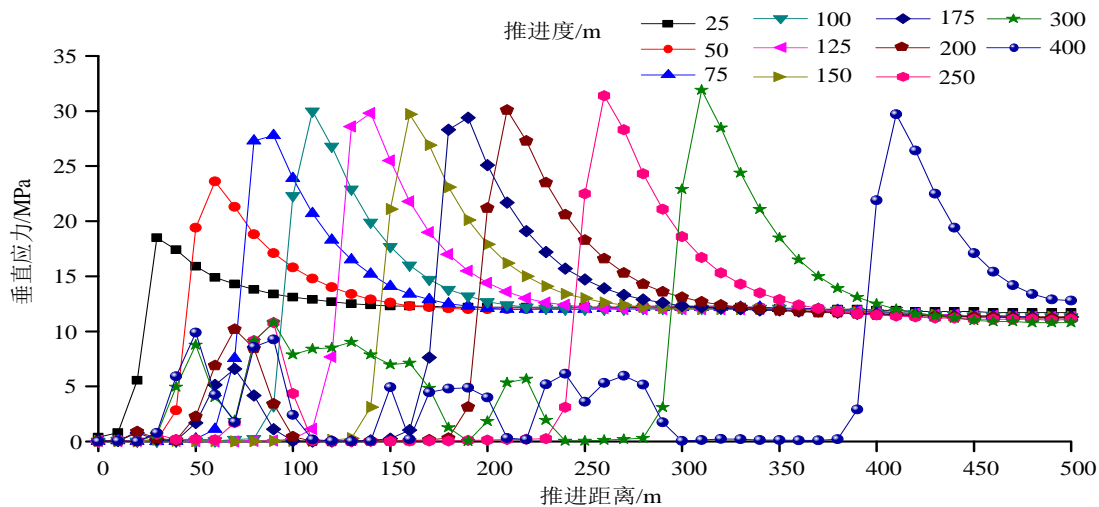
覆岩垂直方向的 F 型结构



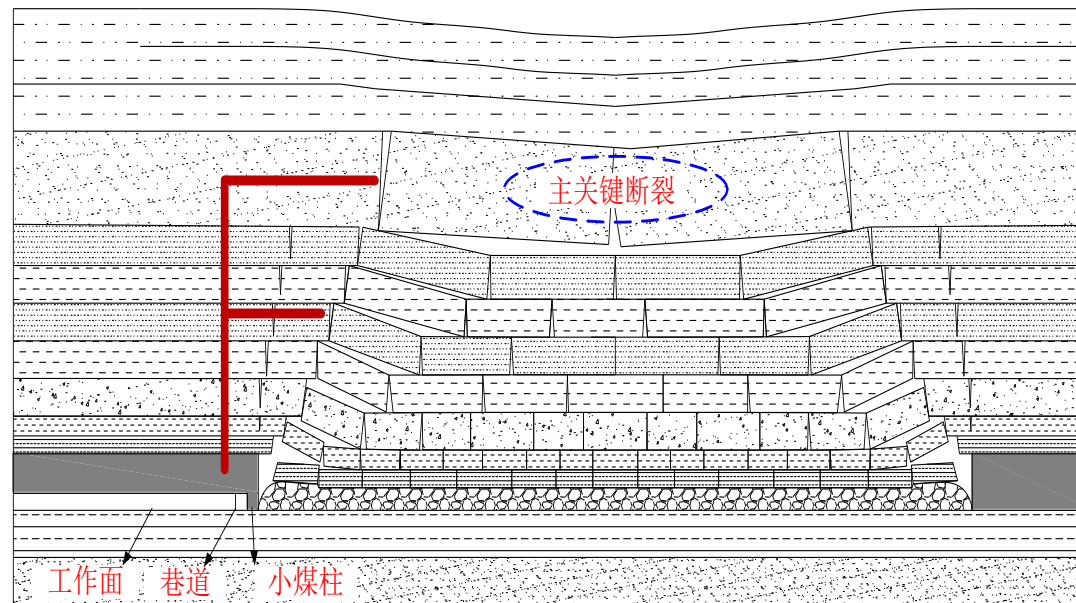
1-上区段采空区 2-下区段工作面平巷
 3、4-亚关键层断裂 5-主关键层断裂线



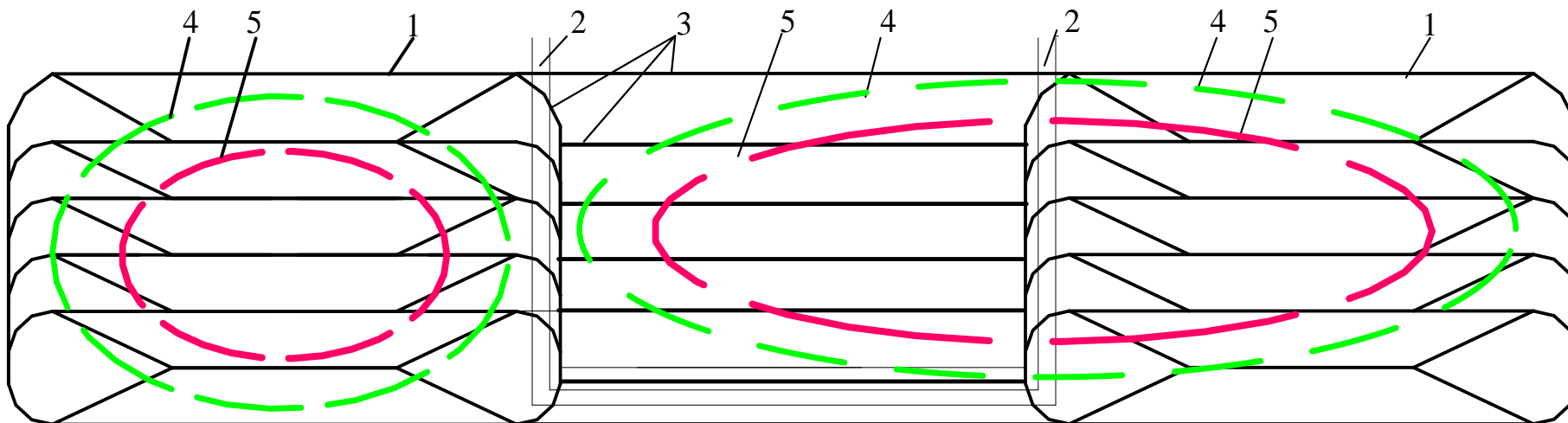
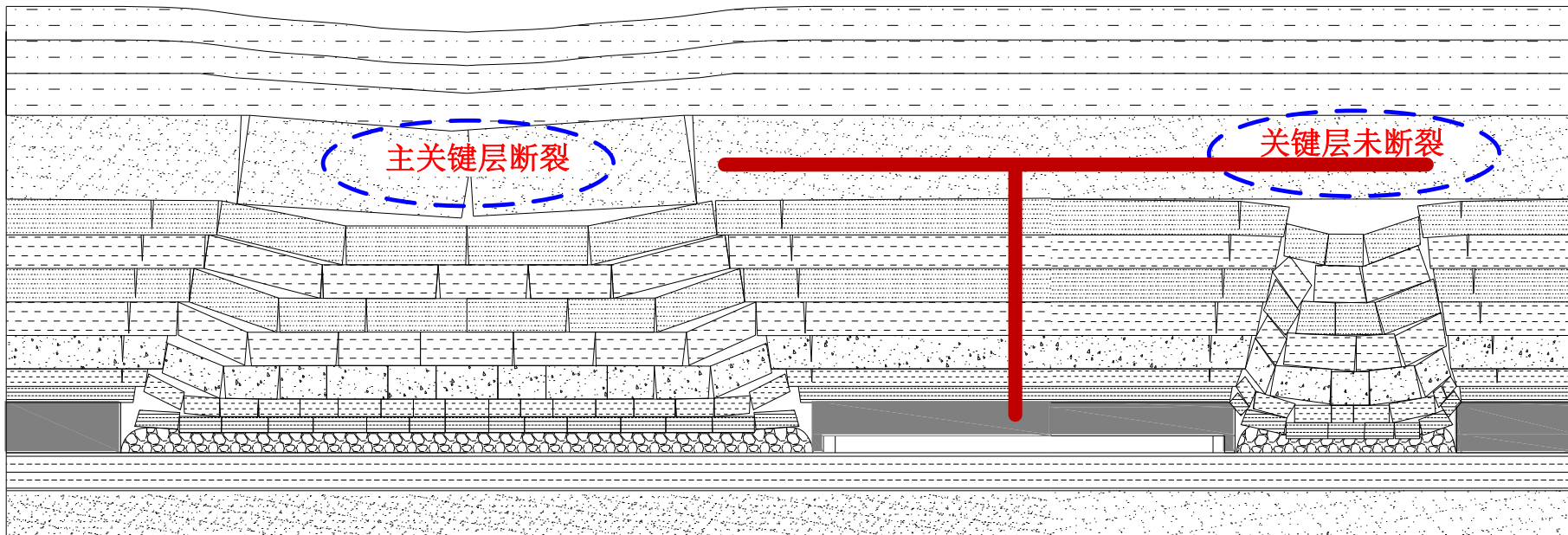
覆岩垂直方向的 F 型结构



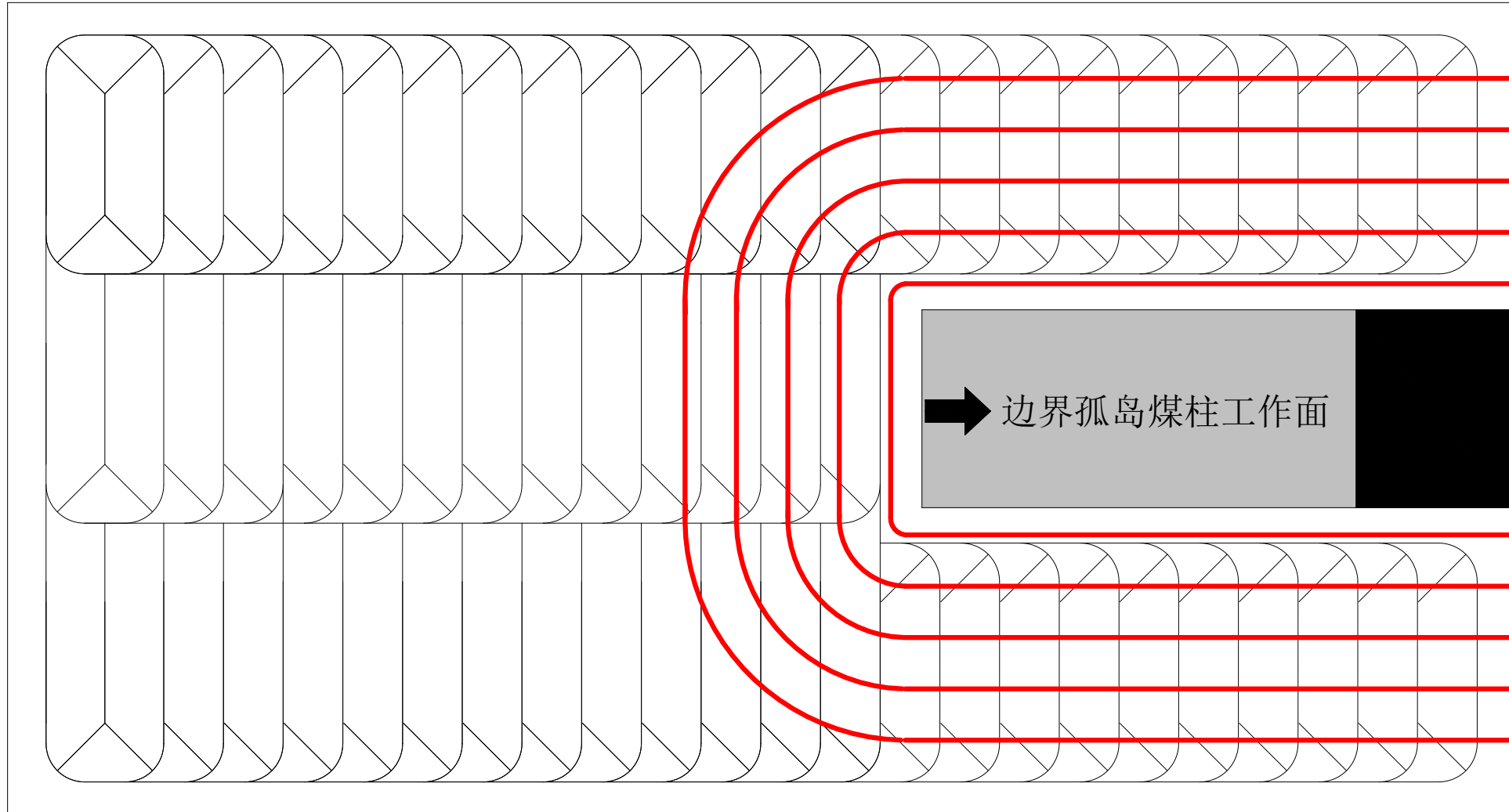
1-上区段采空区 2-下区段工作面平巷
 3、4-亚关键层断裂 5-主关键层断裂线



2、覆岩空间结构失稳机理

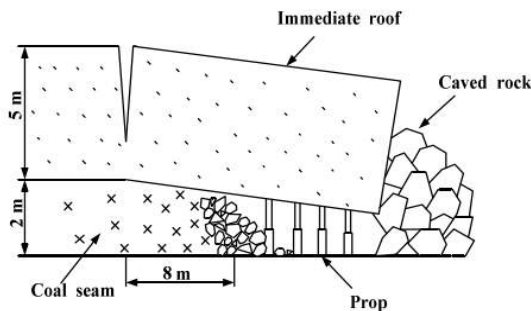
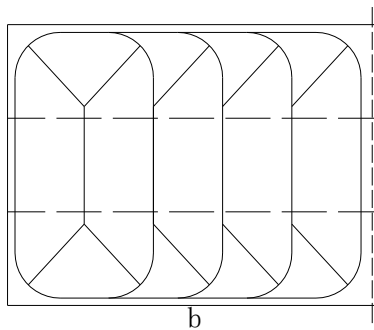
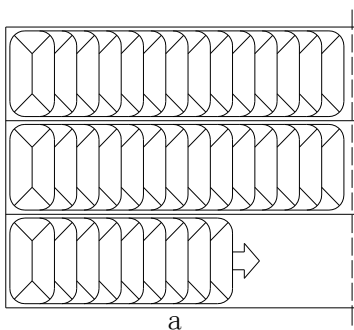


◆ 临空区覆岩反弧形板

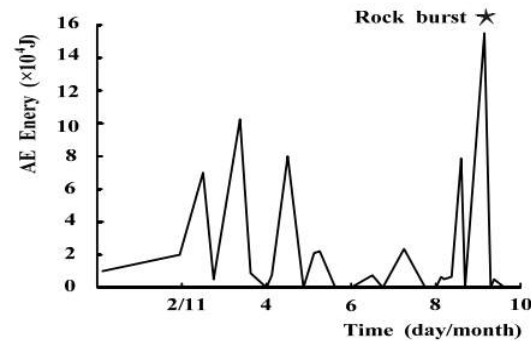


2、覆岩空间结构失稳机理

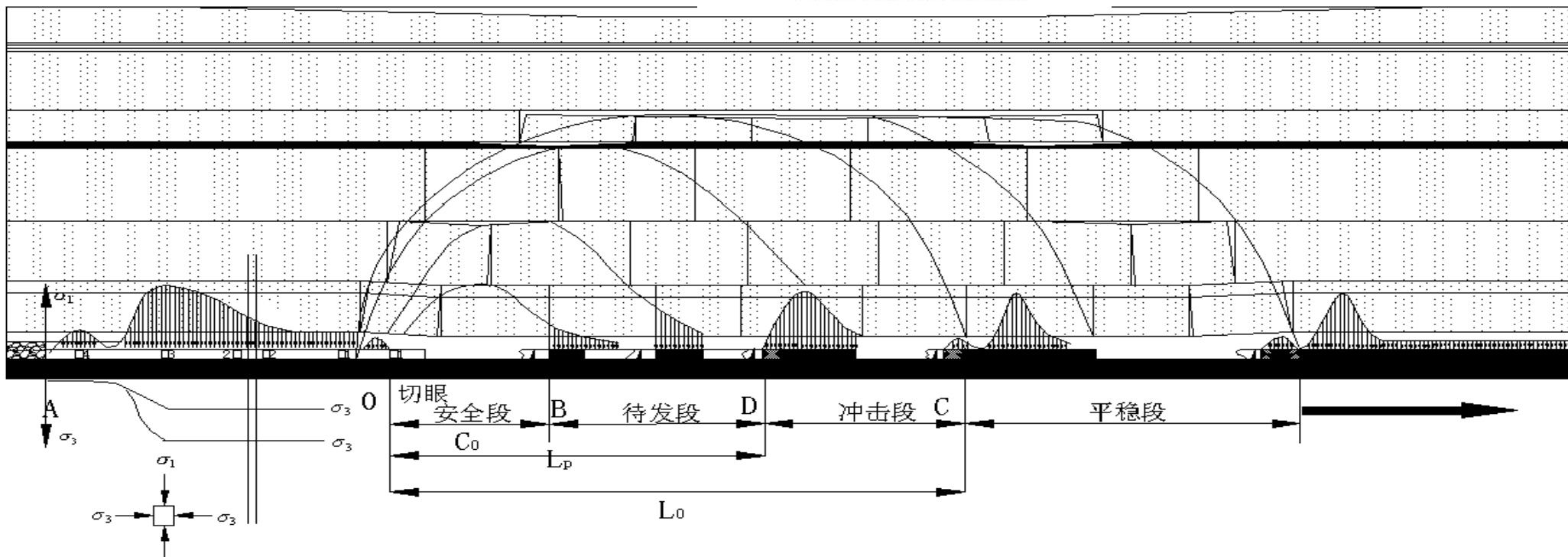
◆ 坚硬顶板的周期及见方破坏效应



a. Roof fracture and rock burst



b. AE pattern



2、覆岩空间结构失稳机理

□ 覆岩空间结构矿压特征

□ “F” 覆岩空间结构矿压特征

➤ 工作面“O-X”结构失稳

“F”结构失稳—采空区震动、临空巷道破坏

➤ 长臂“F” 矿压、矿震强于短臂“F”

□ “T” 覆岩空间结构矿压特征

➤ 对称短臂“T” —与短臂“F” 类似

➤ 对称长臂“T”结构失稳—支承压压力高，震动频繁，高能量震动

➤ 非对称“T” —一侧类似短臂“T”， 一侧类似长臂“T”

2、覆岩空间结构失稳机理

覆岩 F 型结构的失稳—S-R稳定理论

低位亚关键层失稳

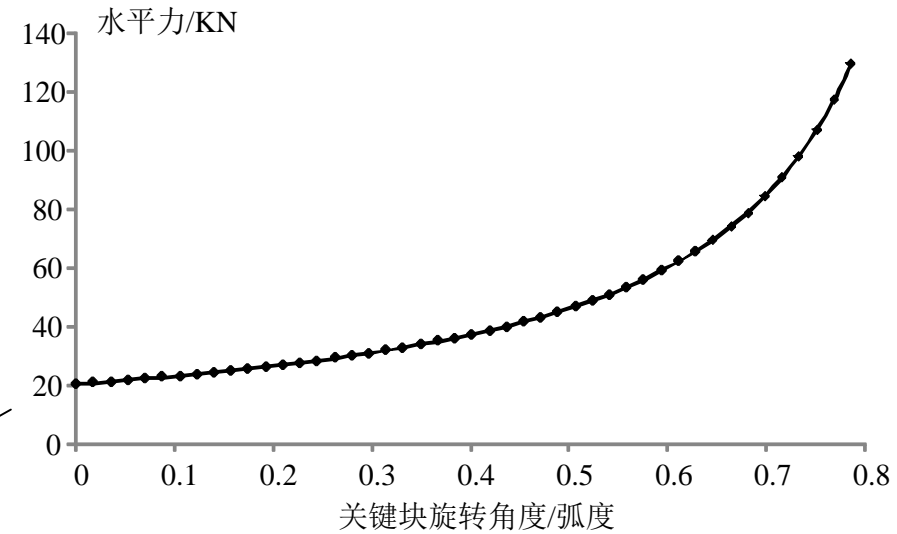
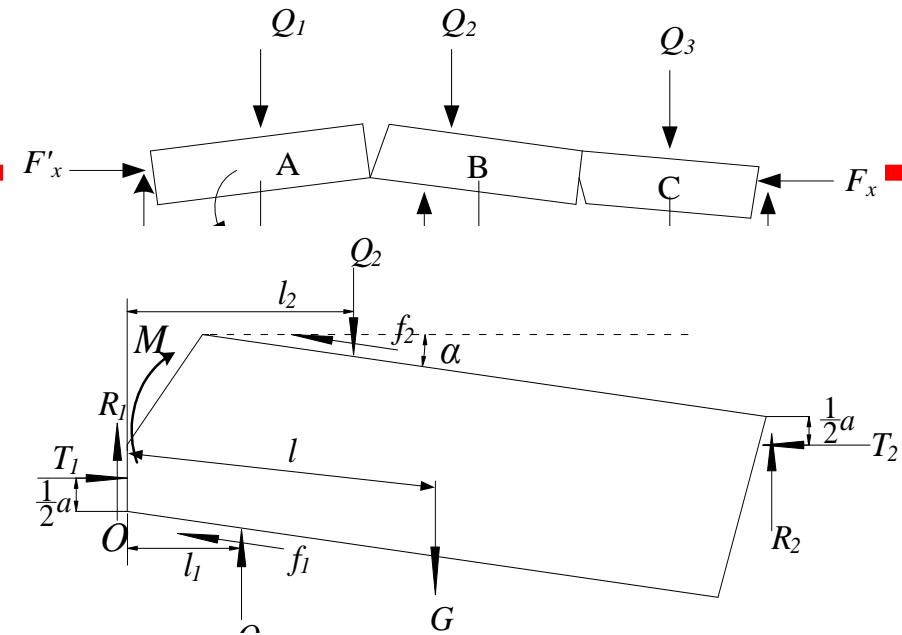
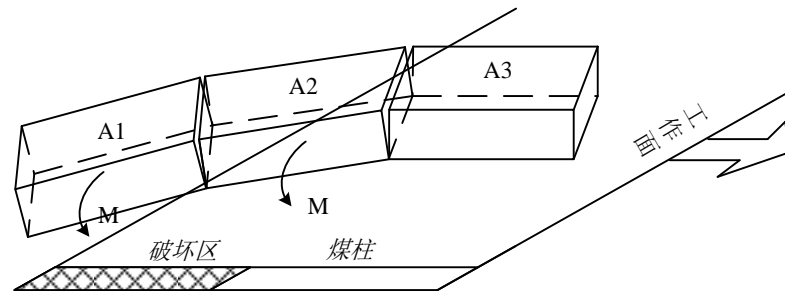
$$T_1 \cdot \tan \varphi \geq R_1$$

$$T_1 \leq a \eta \sigma_c$$

- ◆ 相邻工作面采动顶板运动，旋转力矩加大；
- ◆ 在超前支承压力作用下，导致 Q_2 上升、 Q_1 下降， α 变大；
- ◆ 低位亚关键层“F”结构主要发生旋转失稳。

高位亚关键层失稳

- ◆ 煤柱破坏
- ◆ 低位亚关键层垮落
- ◆ A岩块剪切破坏

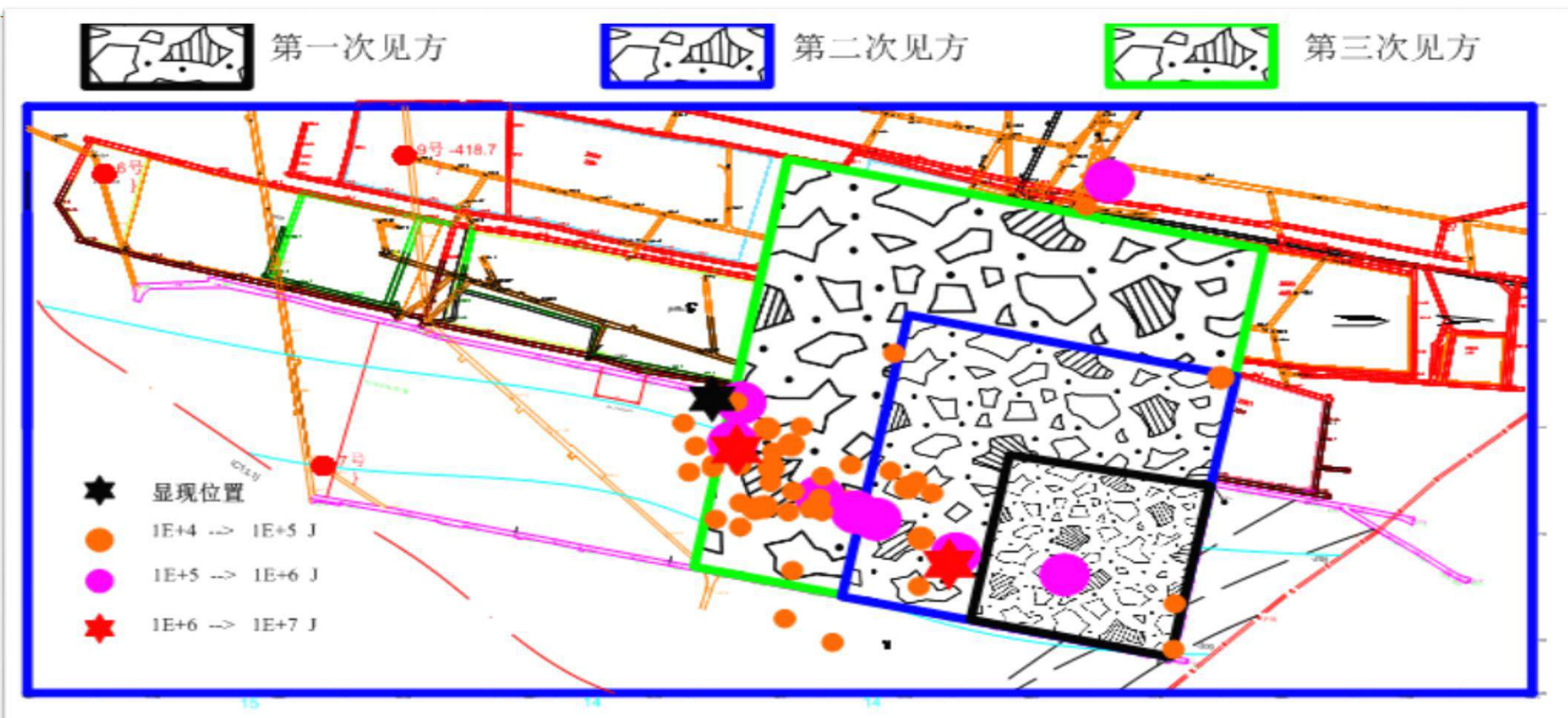


□ 空间结构失稳对煤体作用

影响因素	作用方式
作用力	$T = \frac{P_1 + Q_1}{i - \frac{1}{2} \sin \theta_1} \quad Q_A = \frac{4i - 3 \sin \theta_1}{4i - 2 \sin \theta_1} (P_1 + Q_1) \quad \sigma_j + \sigma_d$
能量	$U = \iiint_V U_1 dV = \iiint_V \sum_{i=1}^n \left(U_{vi} + \frac{1}{2} \rho_i \left(\frac{du_i}{dt} \right)^2 + \rho_i g u_i \right) dV$
震动冲击	$\bar{\sigma}(0) - \bar{\sigma} \left(\frac{2\delta}{C} \right) = \sigma'_i \quad E_b = \frac{1}{2} \rho v_f^2 = \frac{1}{2\rho} \left(\frac{2\bar{\sigma}_m - \sigma'_i}{C} \right)^2 \quad \omega = \frac{\sqrt{\frac{63}{2} \left(a^4 + b^4 + \frac{4}{7} a^2 b^2 \right)}}{a^2 b^2} \sqrt{\frac{D}{m}}$

2、覆岩空间结构失稳机理

- 随着采空区范围加大，上覆岩层空间结构运动形成见方效应；
- 三次见方区域均具有密集的高能量矿震出现（已采375m）；
- 一方：2次E5以上；二方：4次E5以上；三方：3次E5以上

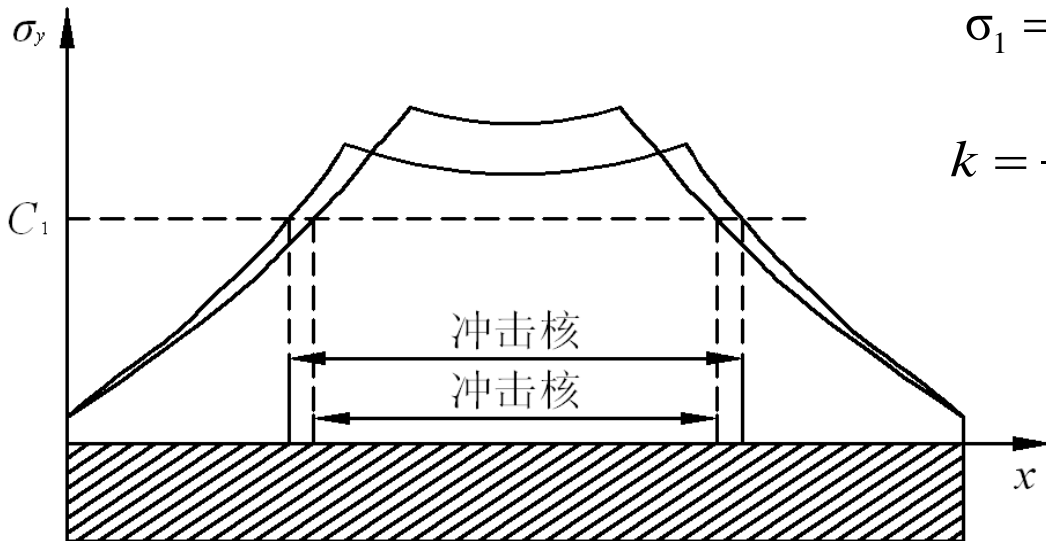
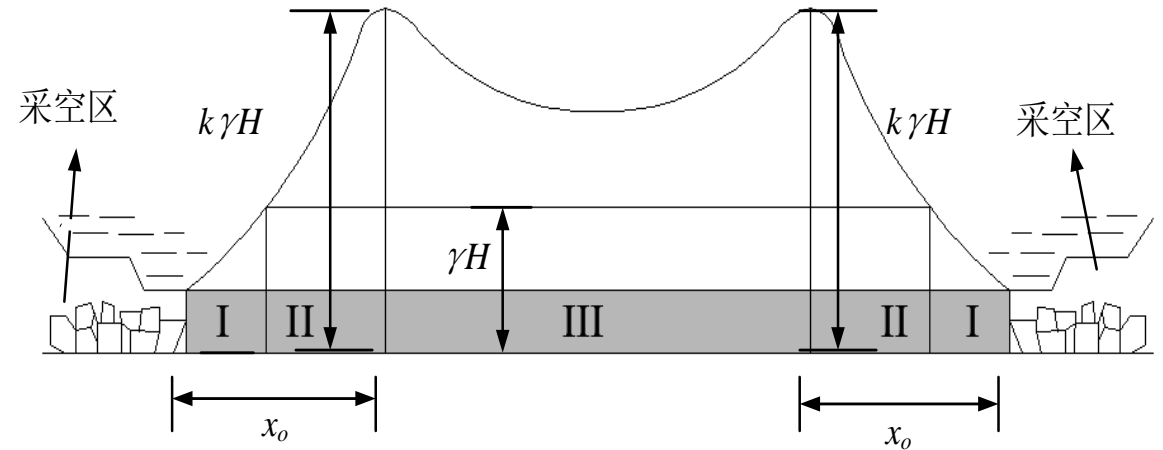


- ☐ 坚硬顶板下煤柱冲击实例
- ☐ 覆岩空间结构及失稳机理
- ☐ 煤柱受载特征及其冲击原理
- ☐ 冲击危险的控制原理与技术

3、煤柱受载特征及其冲击原理

□ 煤柱的冲击核及其作用

- 煤柱冲击核，煤柱内应力超过冲击临界应力
- 窄煤柱中煤体被“压酥”，无冲击核

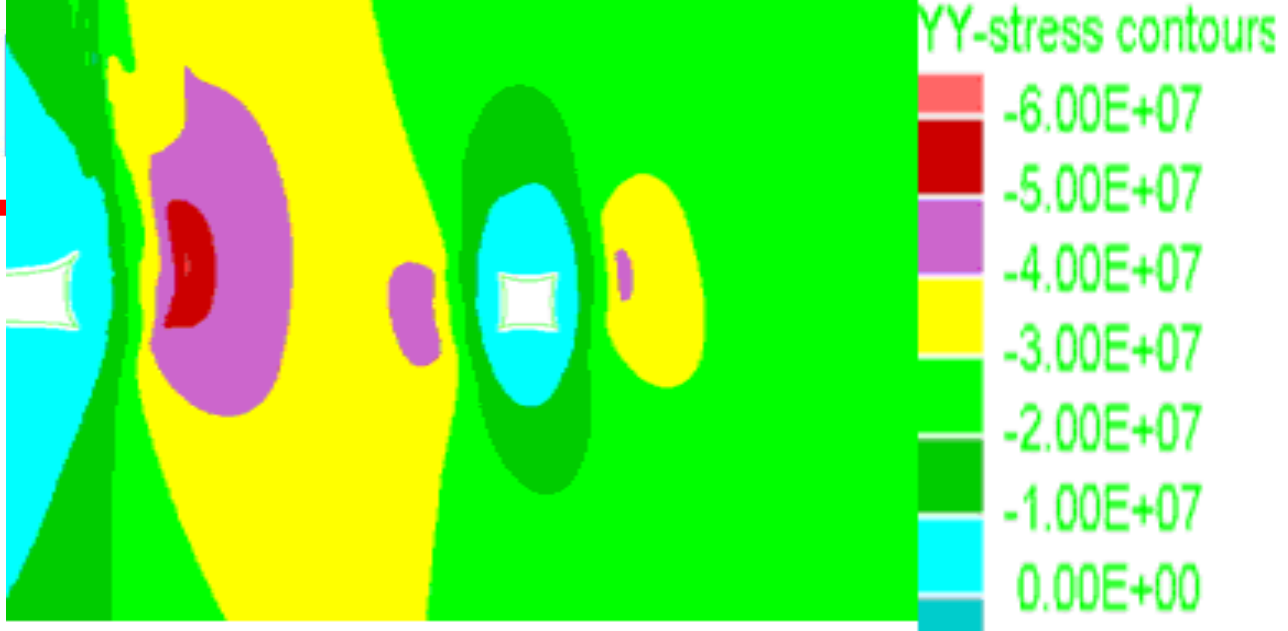


$$\sigma_1 = \frac{p}{B} = \frac{[(B+L)H - L^2 \text{ctg} \delta / 4] \gamma}{B}$$

$$x_0 = \frac{M}{2\xi f} \ln \frac{k\gamma H + C \cot \varphi}{\xi C \cot \varphi}$$

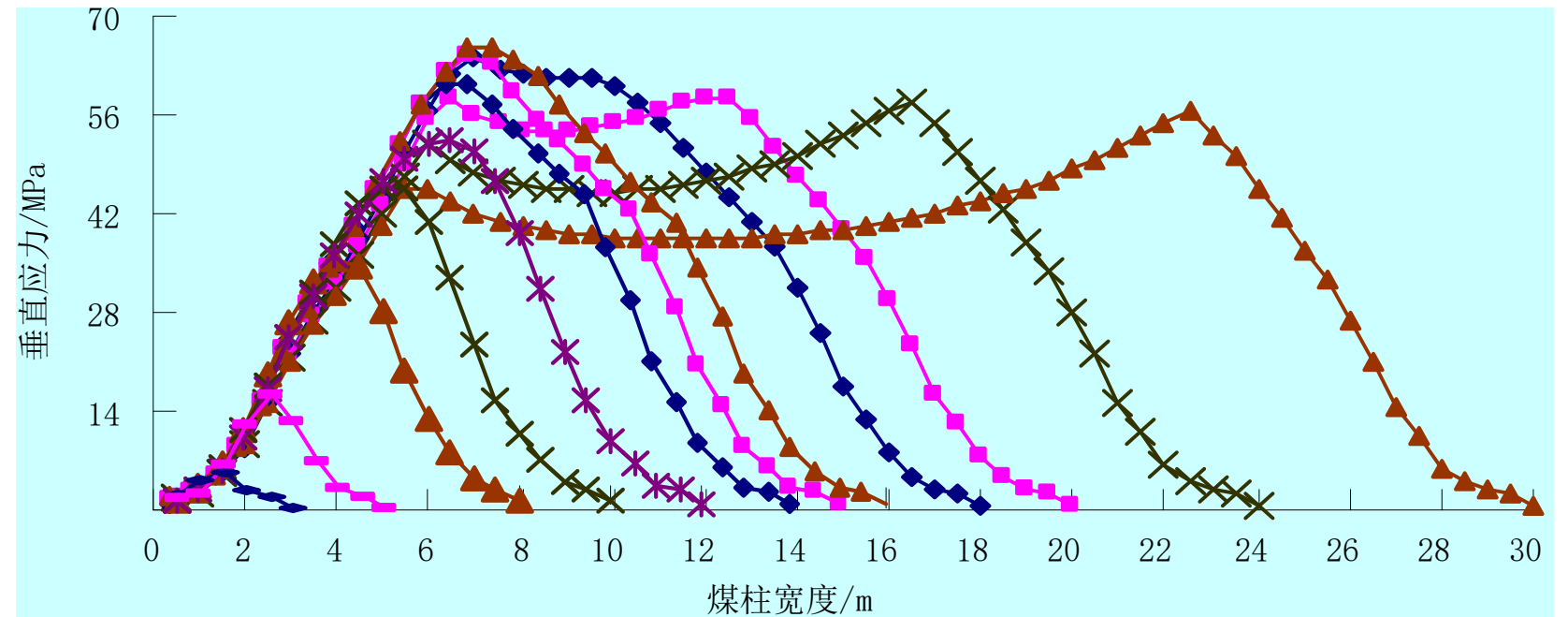
$$k = -0.841 + 0.445M + 0.013L + 0.084D + 3.275 \times 10^3 H - 0.02\alpha$$

- ✓ M-采高5m, H-埋深400m, L-采空区悬顶长度100m, 内摩擦角25°, C-内聚力2MPa, D为2, 煤层倾角为7°。
- ✓ k为4, x₀为10.79m。悬顶是主因



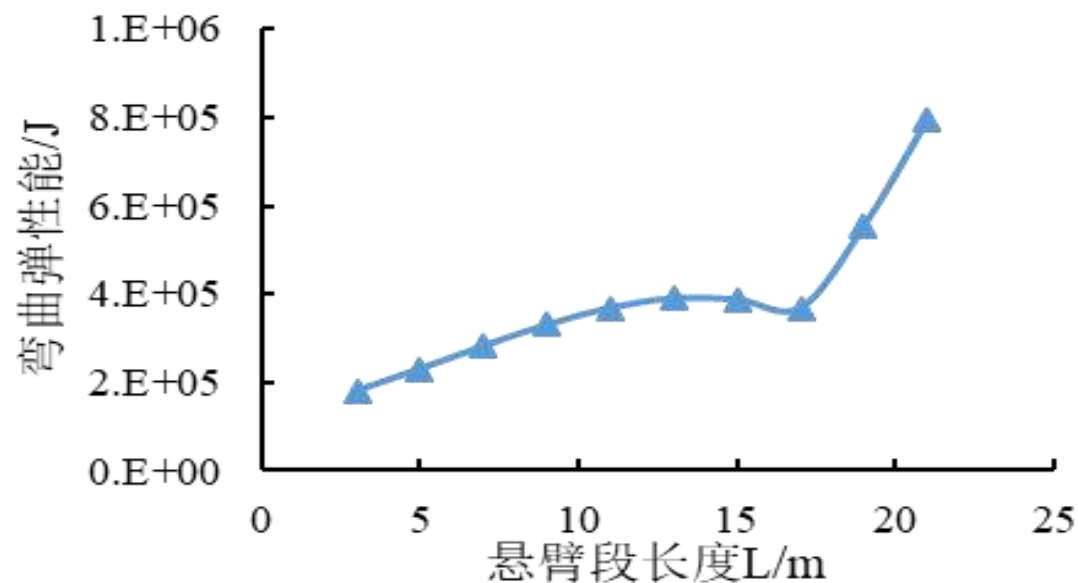
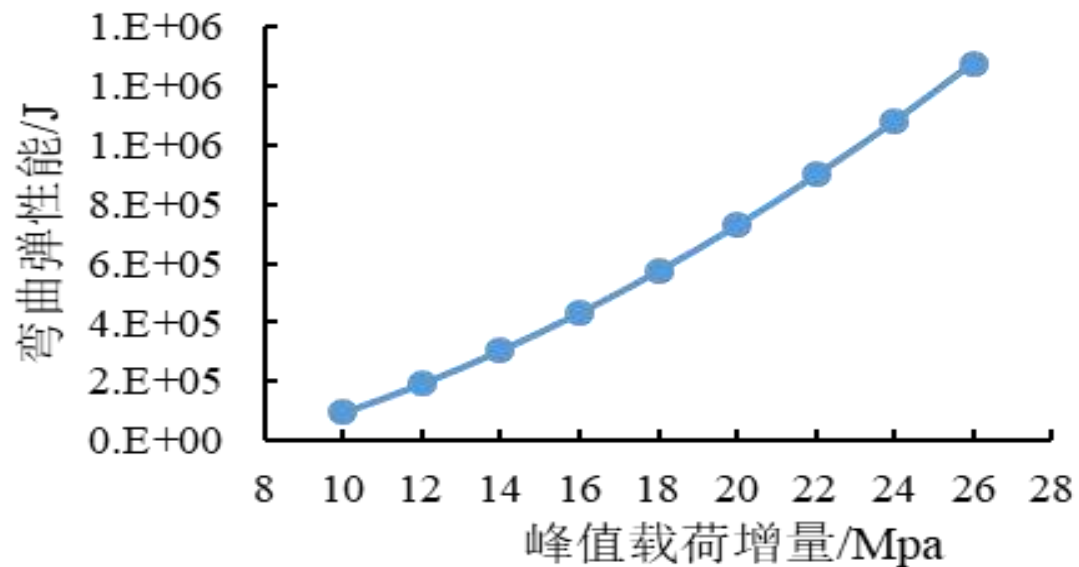
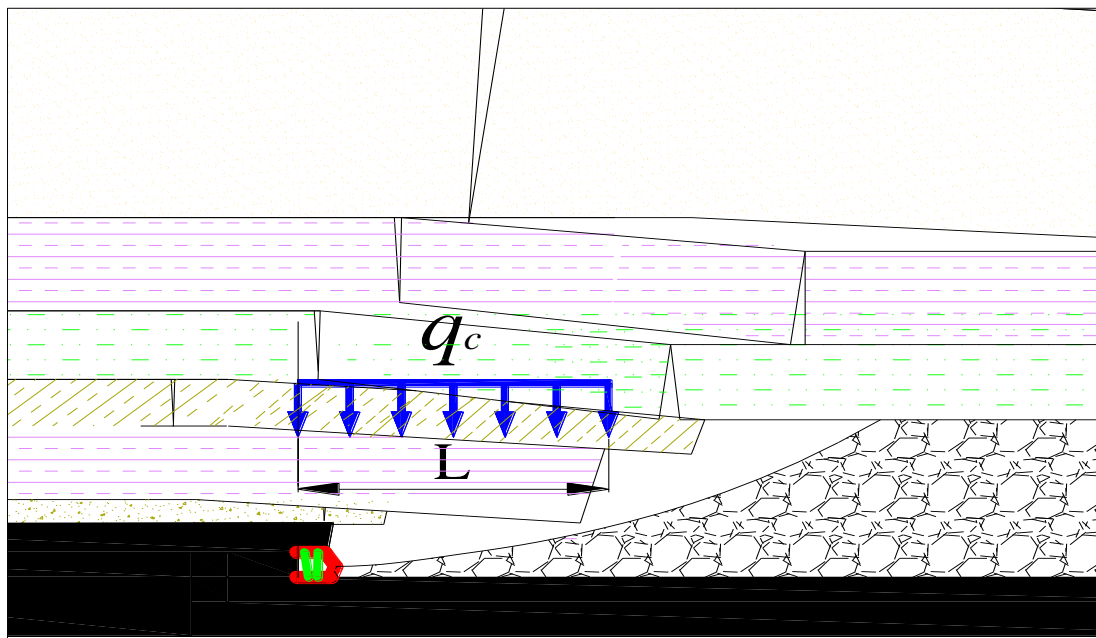
垂直
应力
随煤
柱宽
度变
化

煤柱宽度30米



顶板弯曲弹性能与悬顶长度的关系

$$U_w = \frac{1}{2} M \theta$$



□ 覆岩“O-X”破坏形成矿震

➤ 顶板中弯曲弹性能

$$U_W = \frac{q^2 L^5}{576EJ}$$

➤ 例如： $L=150\text{m}$ ， $q=5 \times 10^5 \text{ N/m}^3$ ， $EJ=4 \times 10^{11} \text{ Nm}^2$

➤ 顶板一次“见方” $U_W=7 \times 10^7 \text{ J}$ 。

➤ 两个工作面二次“见方” $U_W=2.5 \times 10^9 \text{ J}$ 。

➤ 三次“见方”时 $U_W=1.8 \times 10^{10} \text{ J}$ 。

➤ 这样巨大的能量很容易诱发冲击矿压灾害。

3、煤柱受载特征及其冲击机理

➤ “F”结构的作用

➤ “F”结构弯曲弹性能

$$U_W = \frac{q^2 L^5}{8EJ}$$

✓ 小煤柱侧高应力集中

✓ 采空区覆岩与开采工作面覆岩一起协同运动，高动载

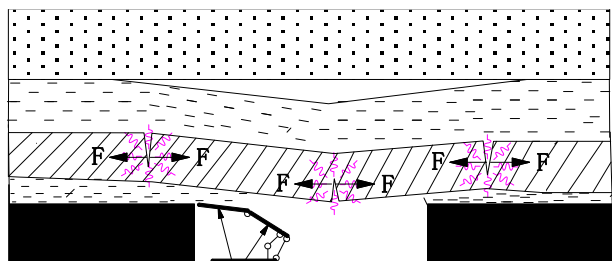
➤ “T”结构的作用

✓ 两侧巷道高应力集中

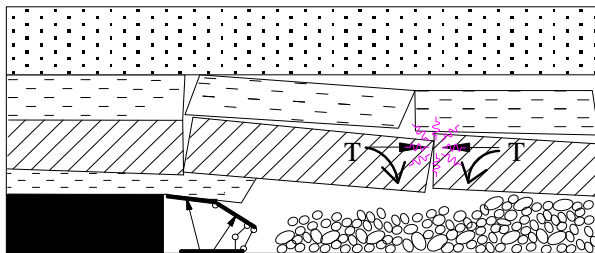
✓ 两侧“F”结构失稳，震动频繁，高动载

✓ 大范围岩层运动，造成冲击矿压

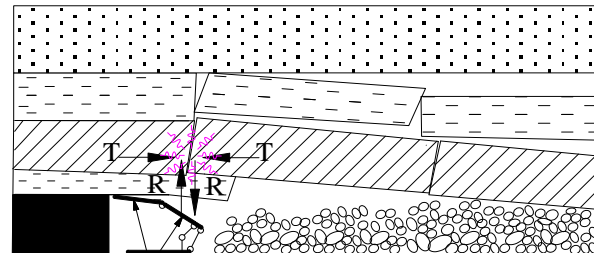
□ 空间结构失稳震动过程



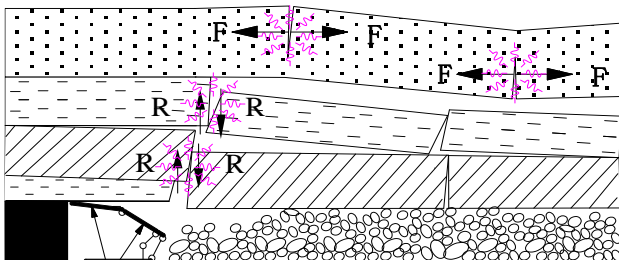
a



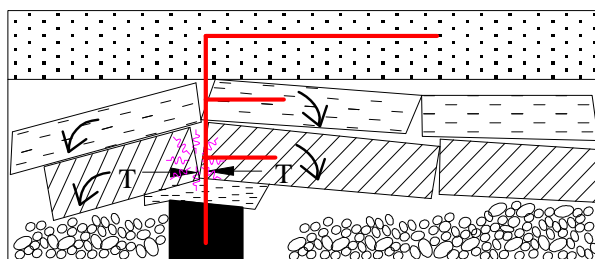
b



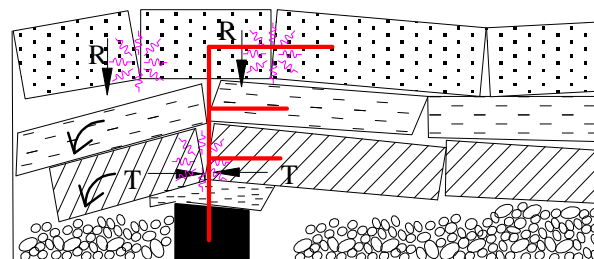
c



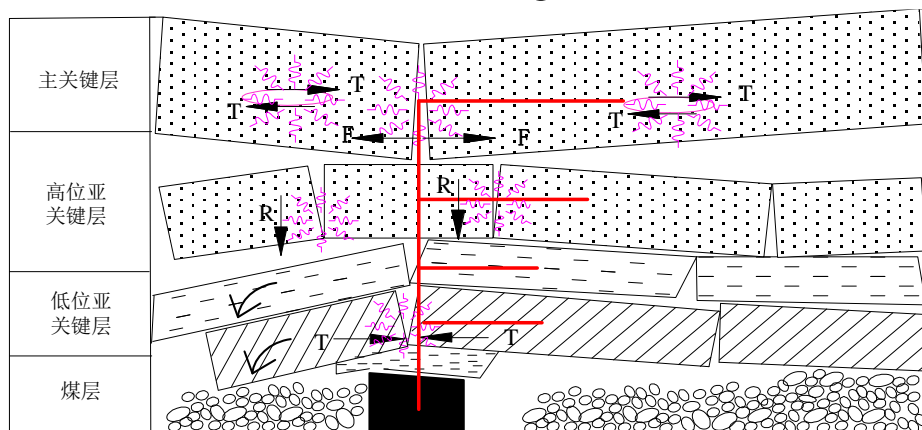
d



e



f

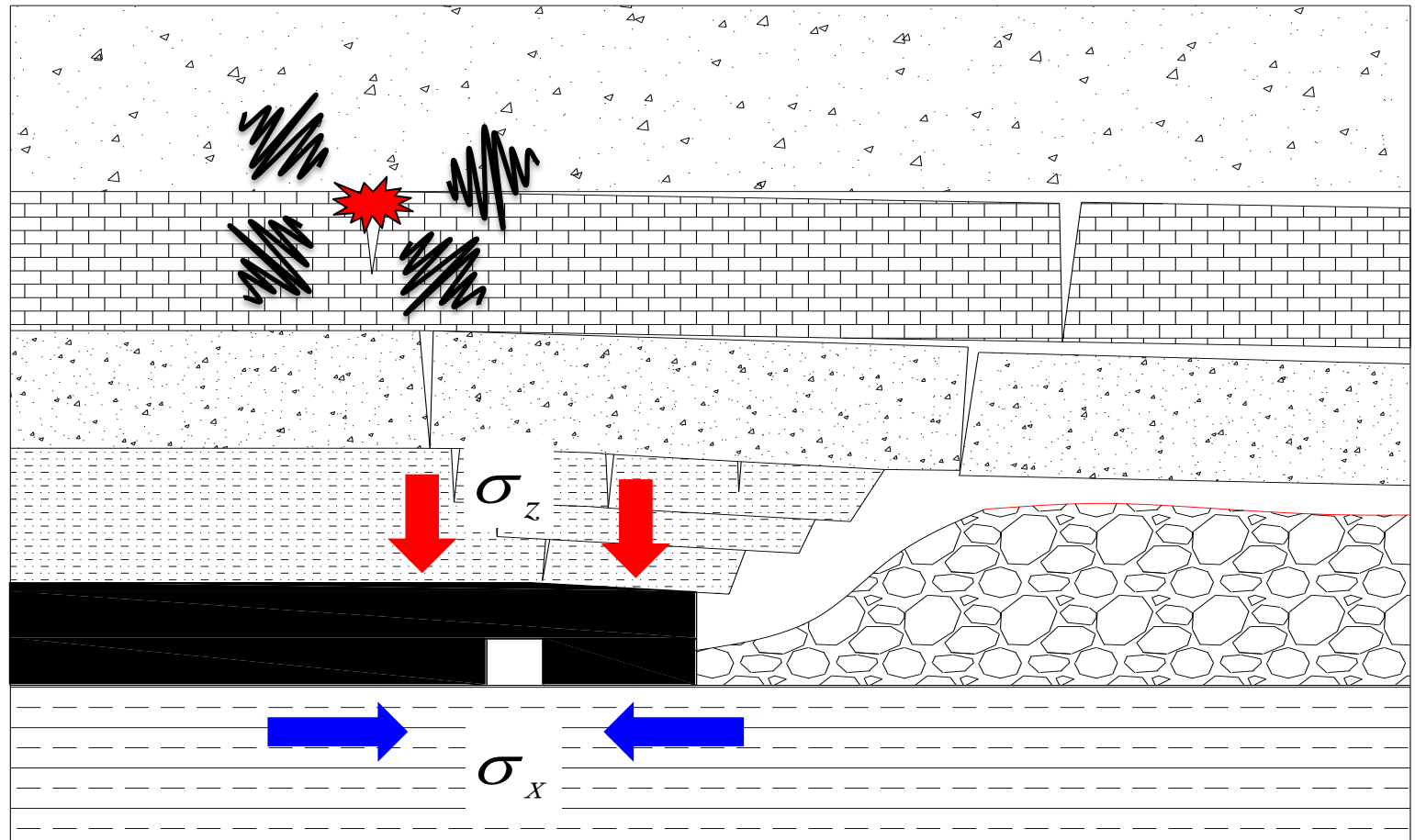


g

3、煤柱受载特征及其冲击原理

➤ 煤柱冲击——垂直应力+顶板震动应力波扰动

- 以煤柱破坏为主体，加底板的瞬间鼓起；即以集中应力为主体，附加震动应力波的扰动诱发；
- 帮部煤体内，垂直应力为主；底板内，水平应力，附加帮部的垂直应力在底板内转化的水平应力。



3、煤柱受载特征及其冲击原理

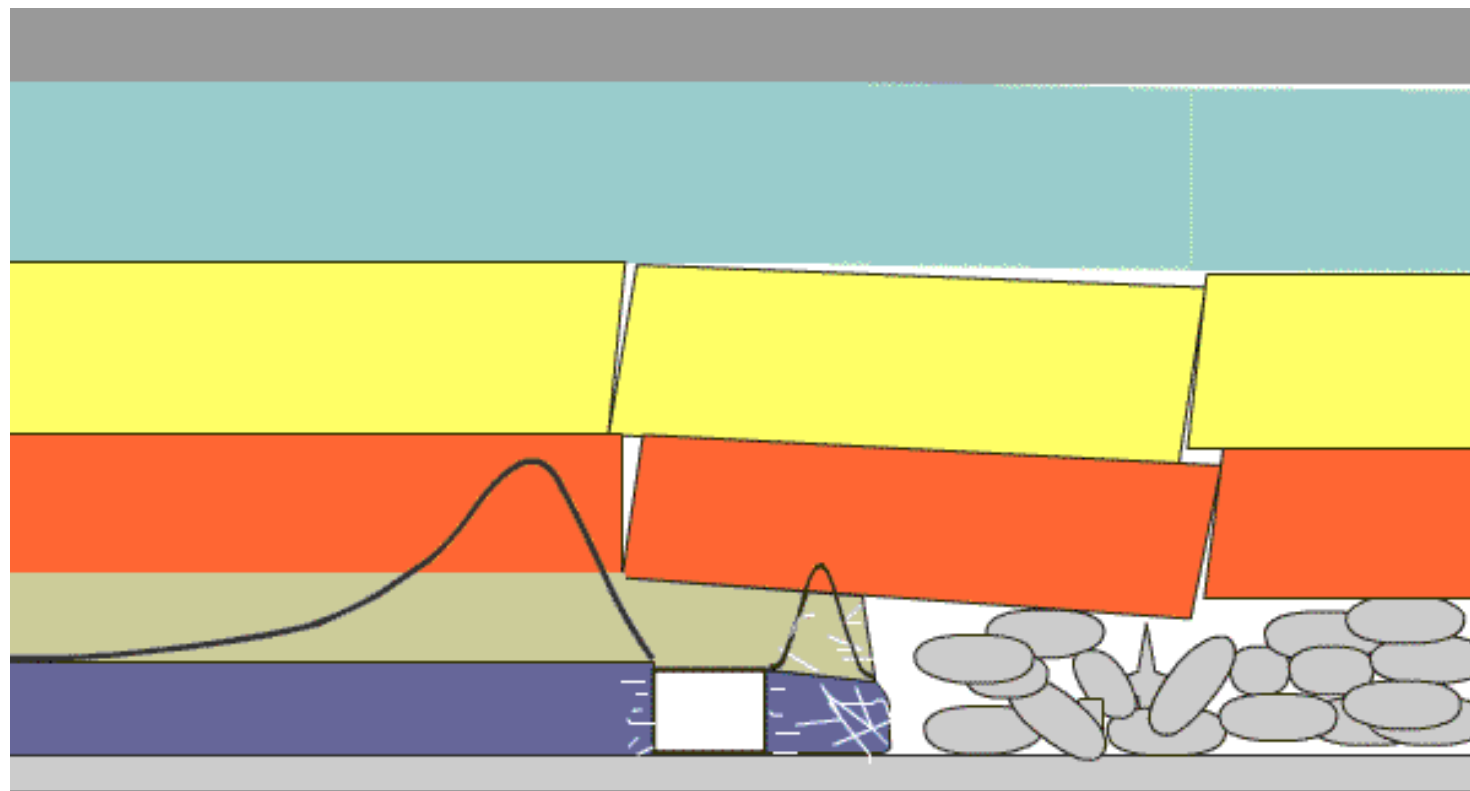
□ 煤岩体中静载荷与矿震形成的动载叠加之和大于诱发煤岩体冲击的临界载荷，就会诱发冲击灾害；

□ 静载+动载 \rightarrow 诱发冲击

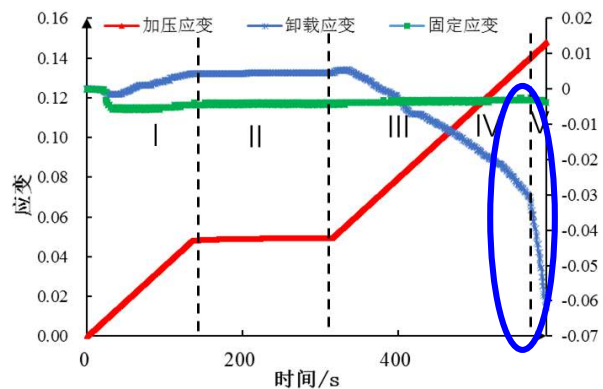
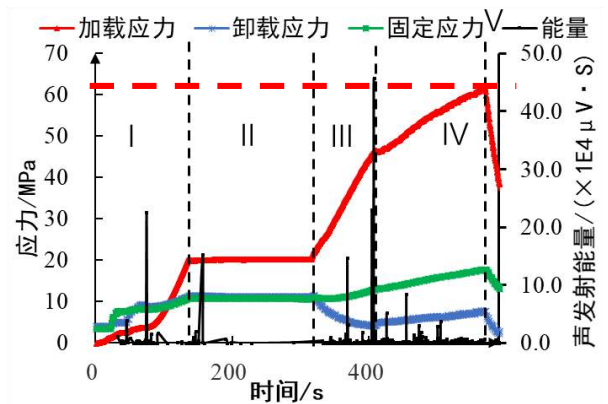
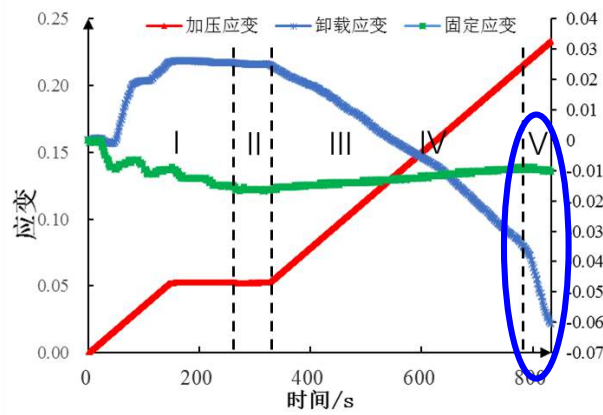
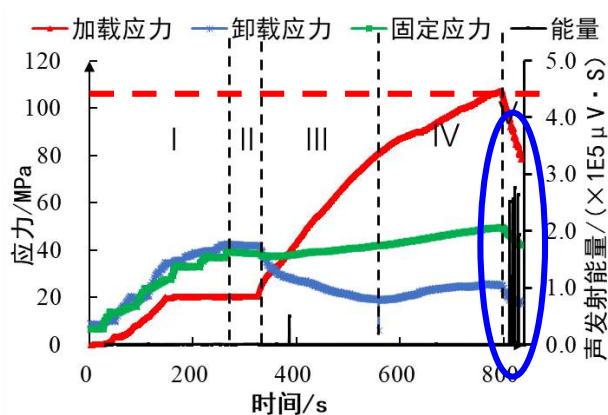
$$\sigma_j + \sigma_d \geq \sigma_{b\min}$$

σ_j - 静应力
 σ_d - 冲击应力波
 $\sigma_{b\min}$ - 临界应力

应力条件



煤样冲击临界值的试验研究



冲击定义：

- 人耳能听清试样破裂的巨大声响；
- 声发射监测到大能级事件、能量一般大于 $1.0E+07\mu V \cdot s$ ；
- 应力应变曲线加载侧应力突降。

● 卸载速率条件：

<1.128mm/min，未冲击

>2.77mm/min，冲击

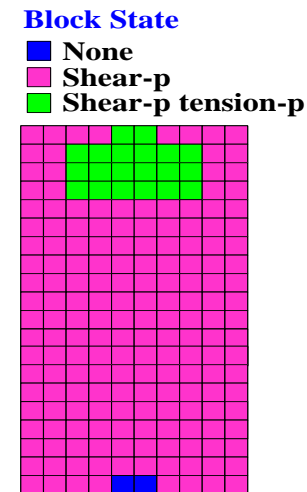
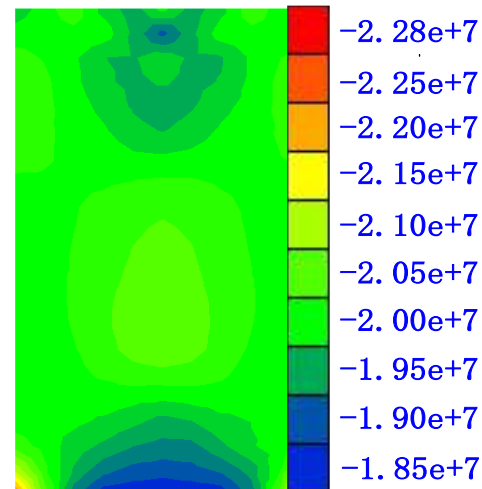
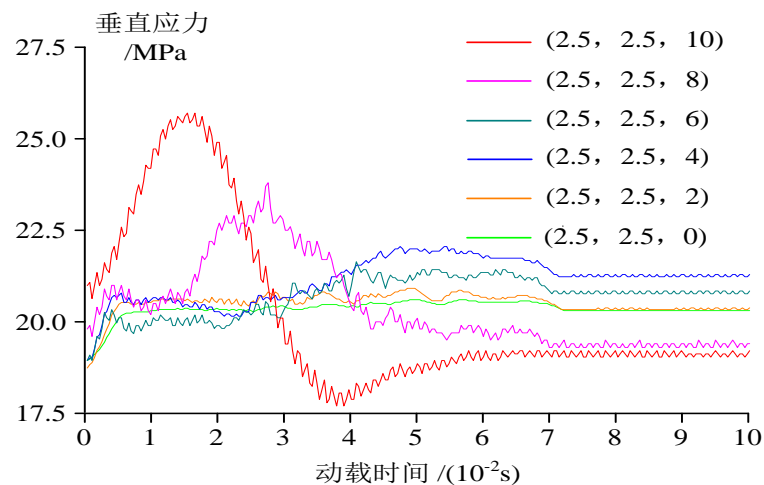
● 应力条件：

<60MPa，未冲击

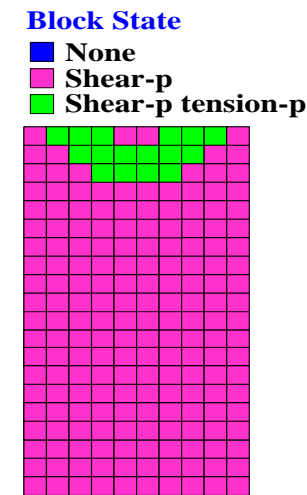
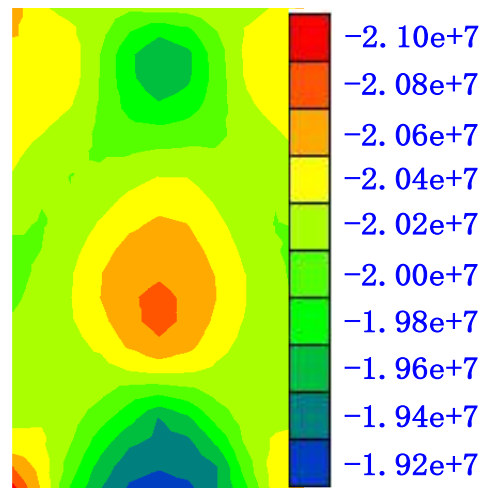
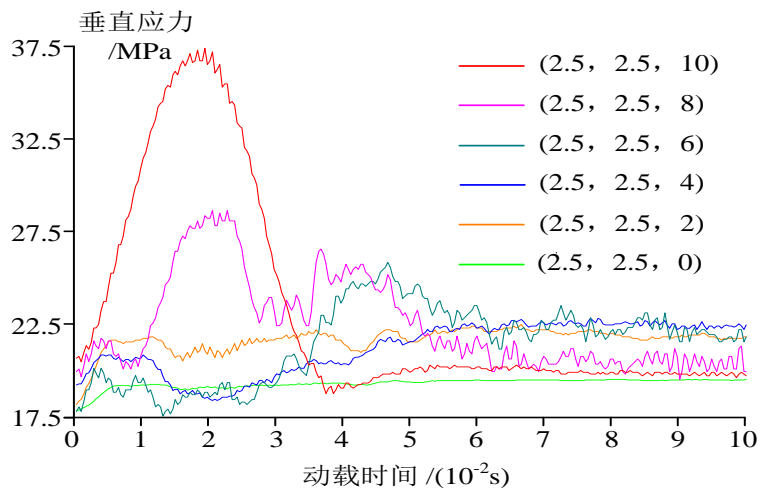
>60MPa，冲击

动静组合对煤体破效应

$\sigma_j = 20\text{MPa}$
 $\sigma_d = 10\text{MPa}$



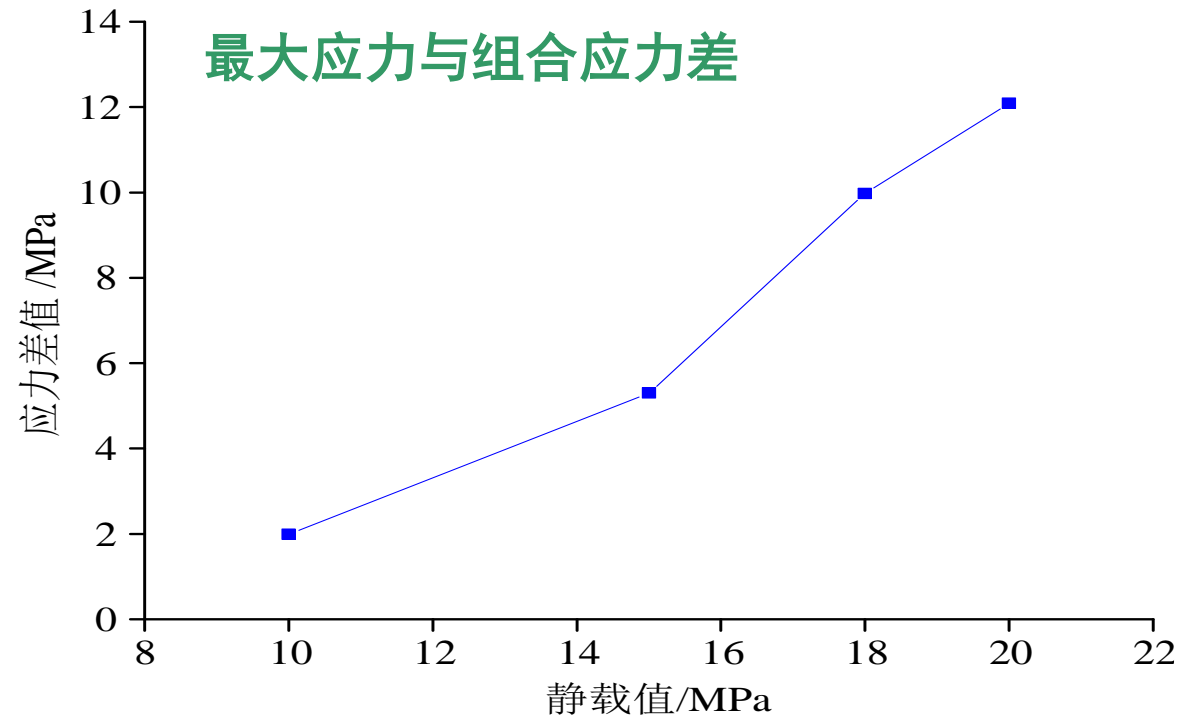
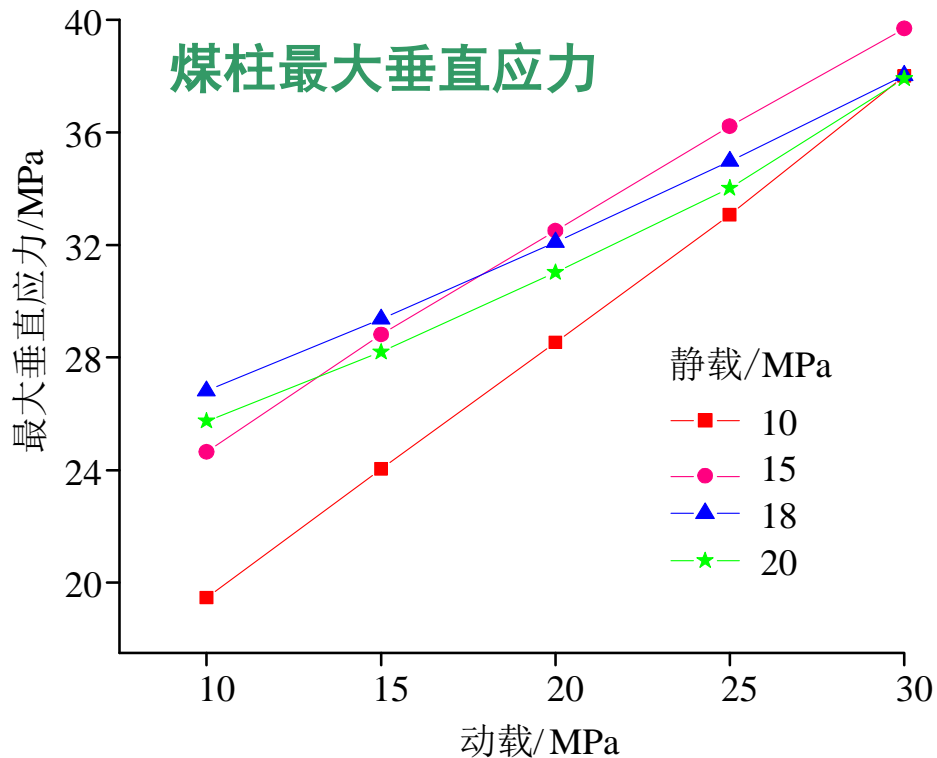
$\sigma_j = 20\text{MPa}$
 $\sigma_d = 30\text{MPa}$



3、煤柱受载特征及其冲击原理

□ 动静组合对煤体破效应

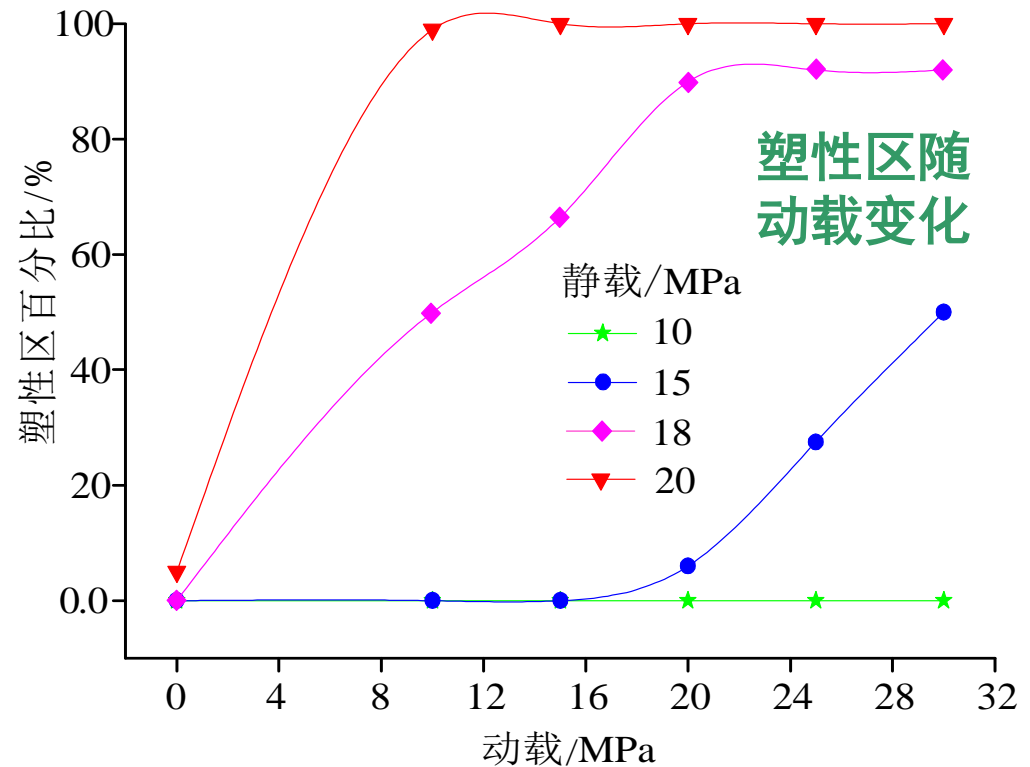
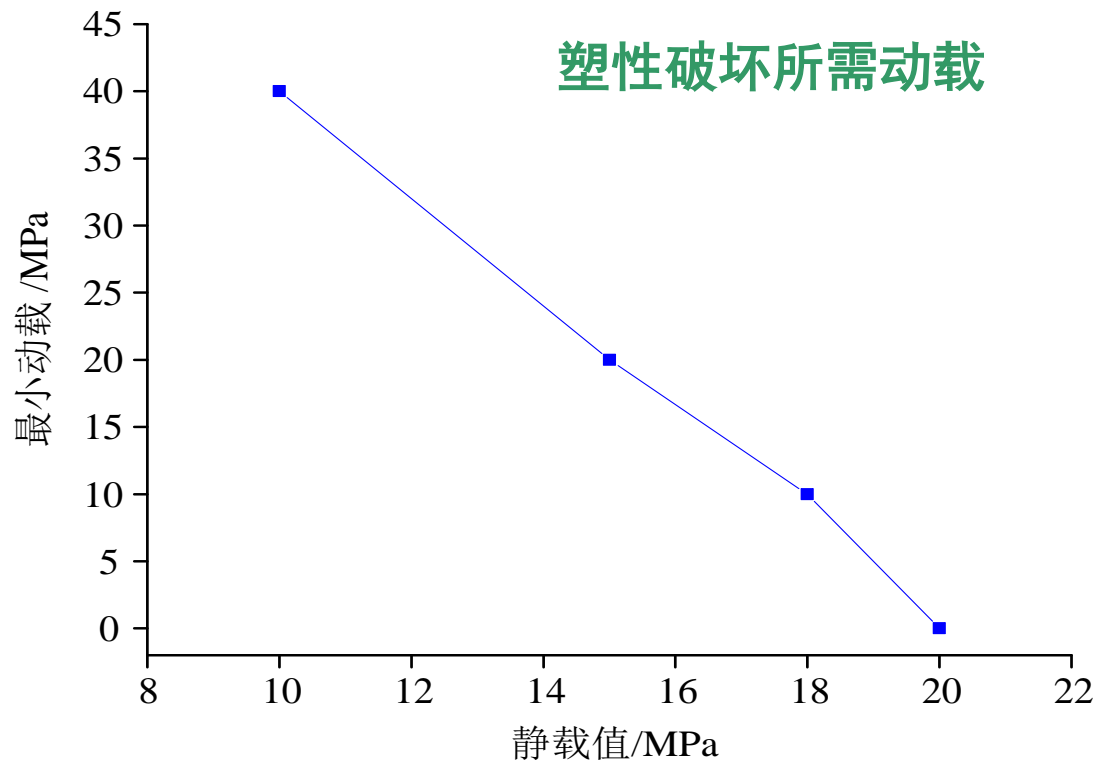
- 动载峰值的加大，煤柱中的最大垂直应力均线性增大，但是斜率不同。
- 随着静载的加大，应力差值越来越大，煤柱中出现塑性破坏后，应力叠加程度降低。



3、煤柱受载特征及其冲击原理

□ 动静组合对煤体破效应

- 静载提高降低了煤柱破坏所需的动载值，同时降低了塑性破坏的动静载之和。
- 对煤体破坏作用“高静载+低动载”大于“低静载+高动载”。



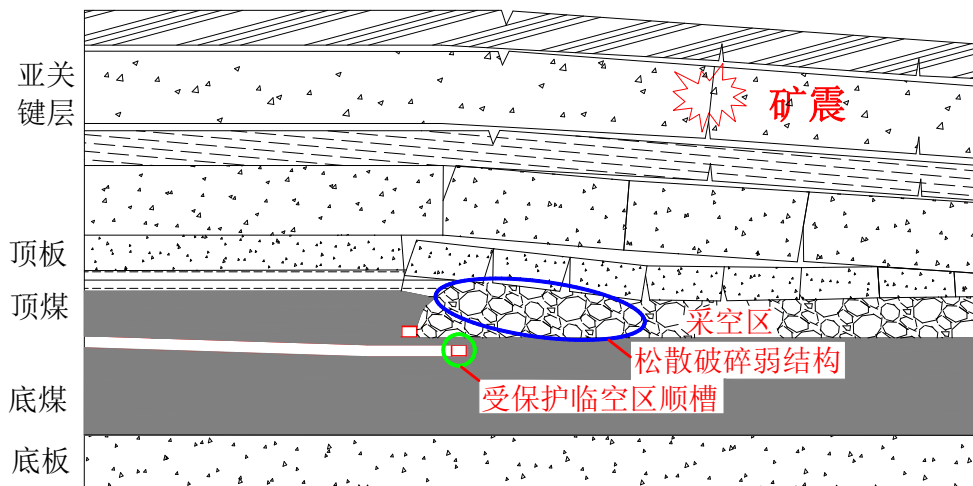
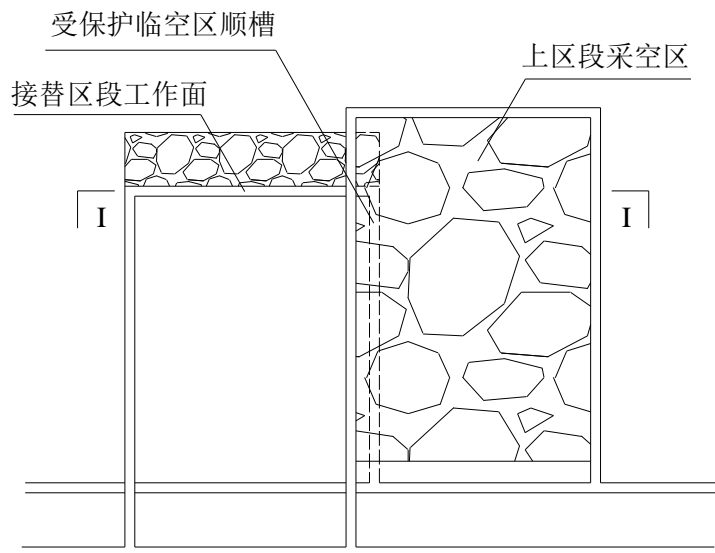
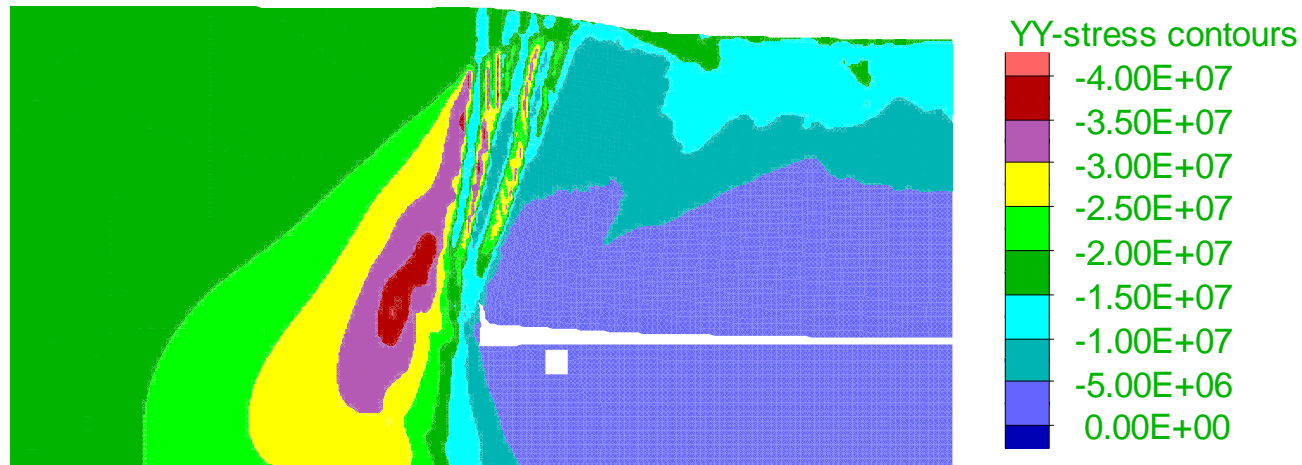
- ☐ 坚硬顶板下煤柱冲击实例
- ☐ 覆岩空间结构及失稳机理
- ☐ 煤柱受载特征及其冲击机制
- ☐ 冲击危险控制原理与技术

4、冲击危险控制原理与技术

- 煤体应力转移与强度弱化
- 顶板控顶爆破
- 顶板深孔卸压爆破
- 顶板定向水力致裂
- 特殊控制技术

□ 错层布置降压作用

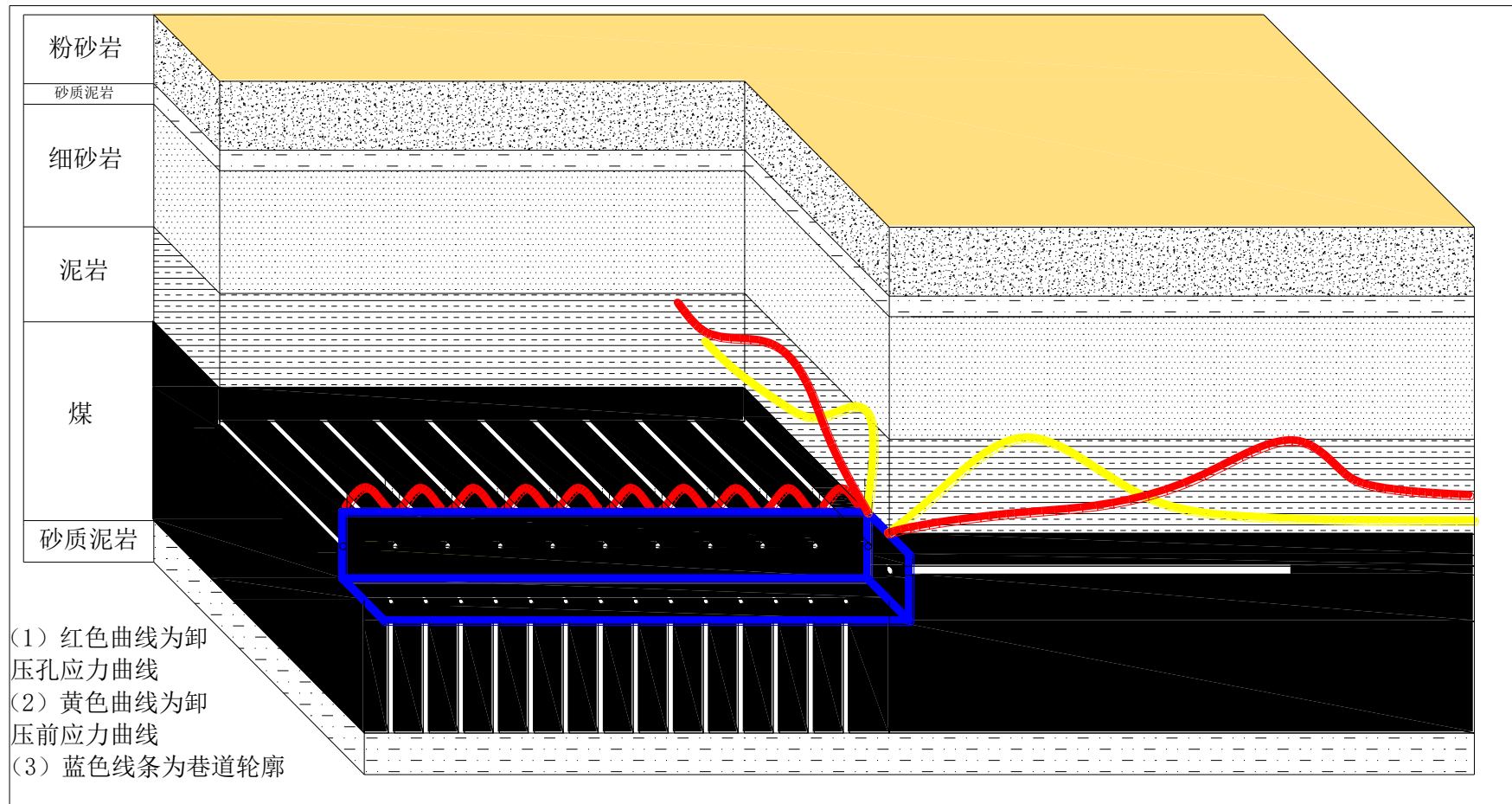
巷道外错—上区段采
空区下方布置顺槽



4、冲击危险控制原理与技术

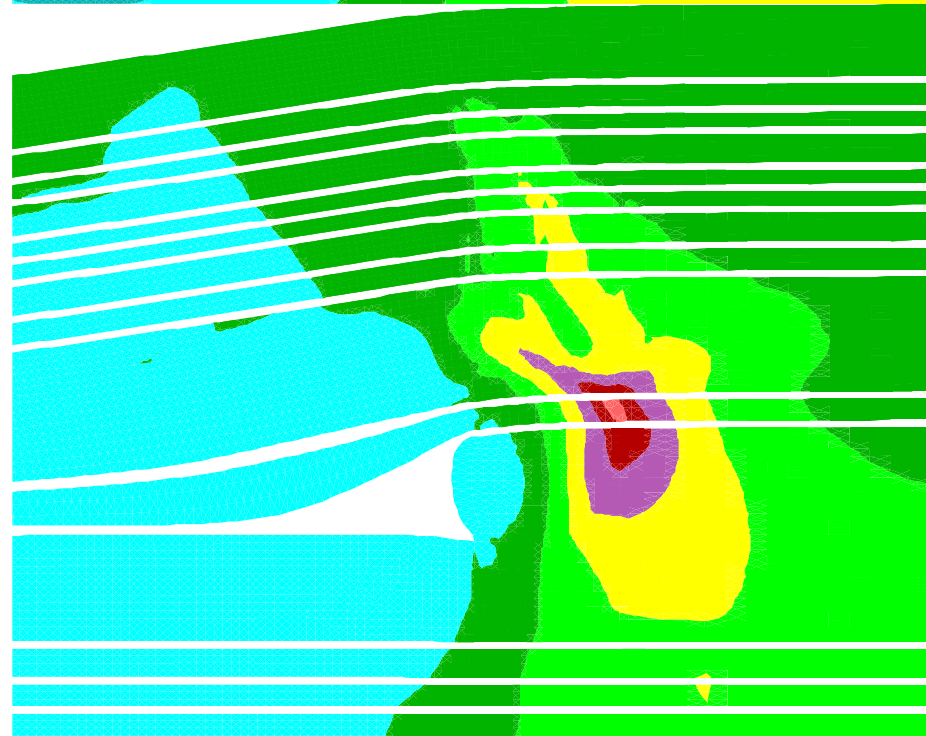
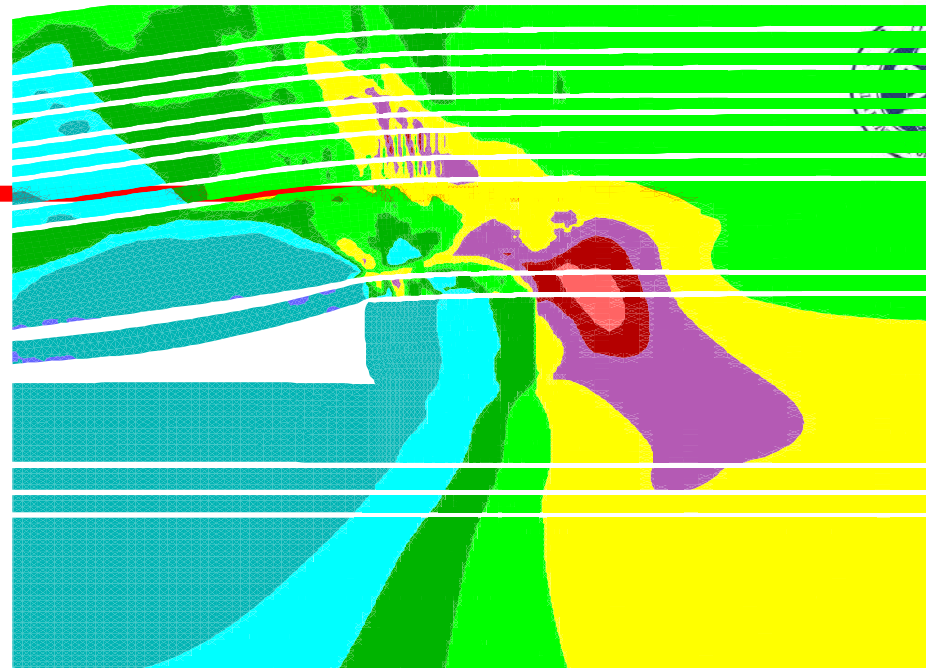
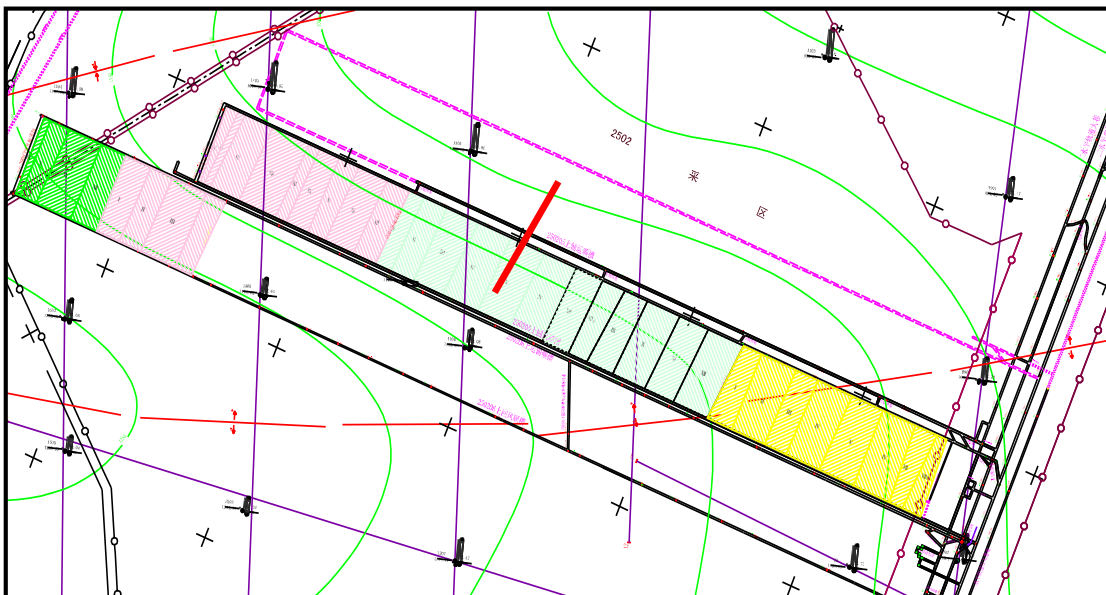
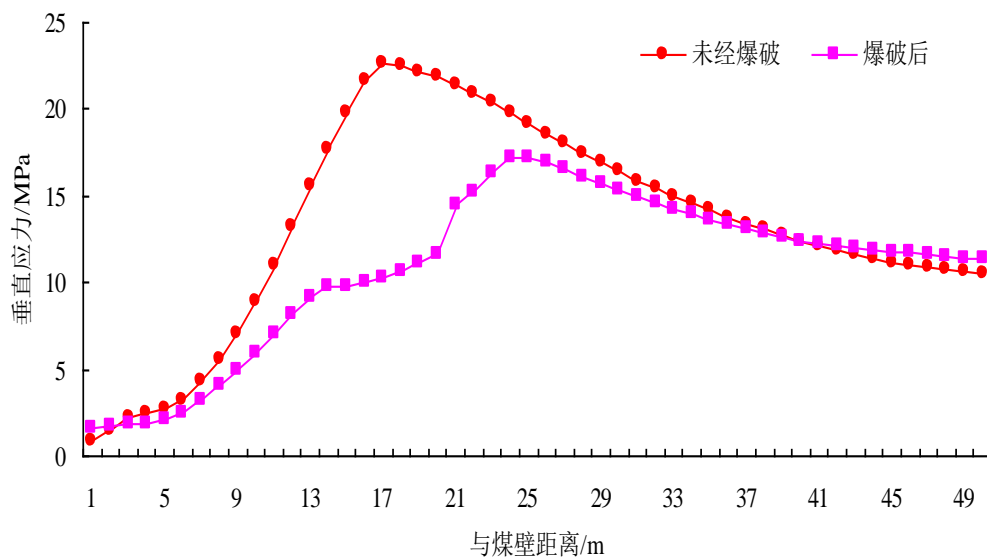
□ 煤体的钻孔、爆破卸压

巷道掘进头、两帮及底板的大直径钻孔卸压

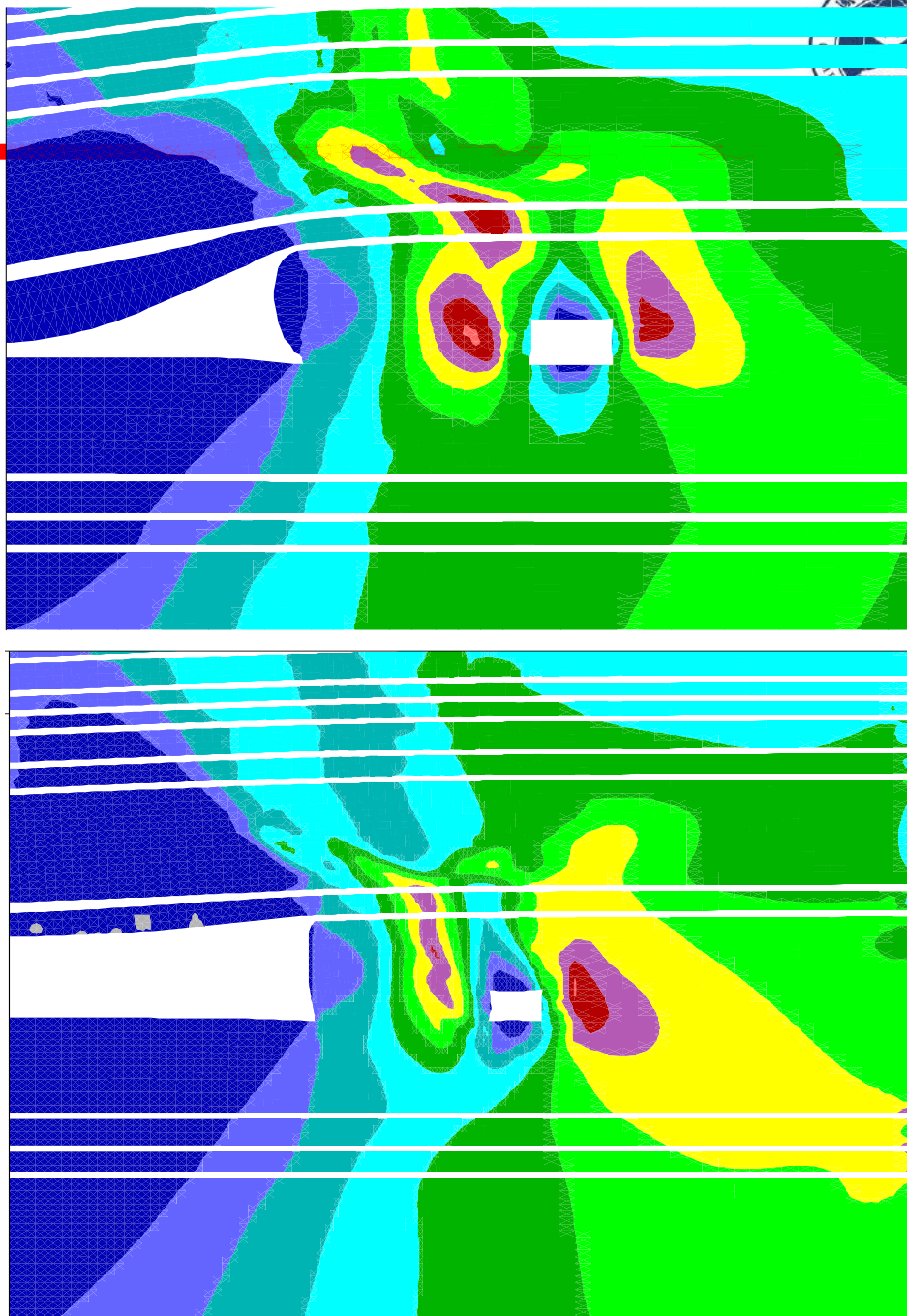
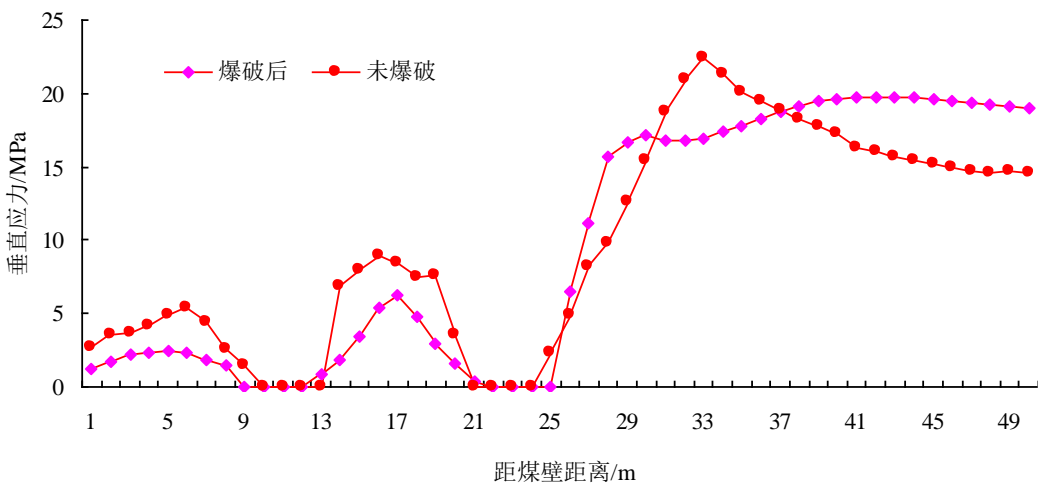
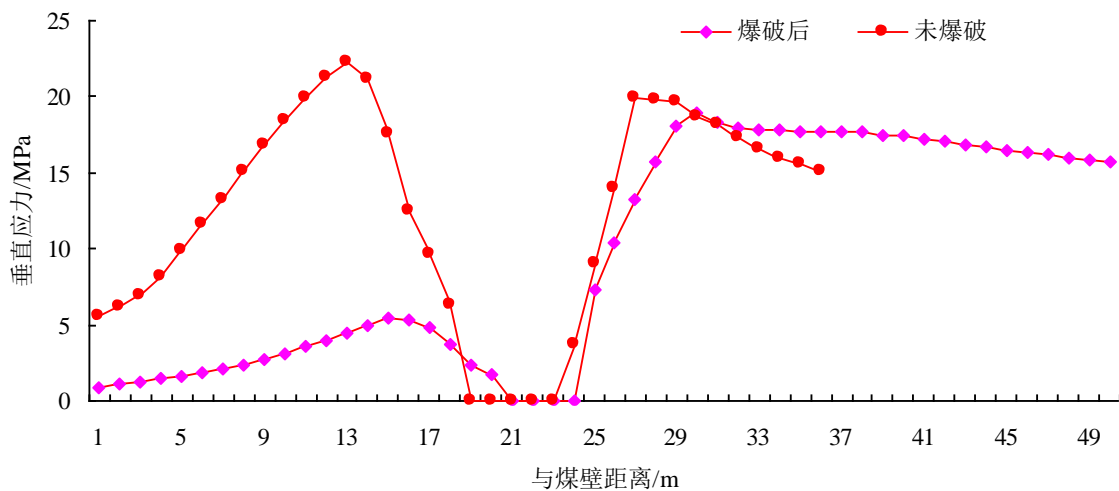


1、煤柱的处理

区段煤柱受力模拟分析



措施前后对比



2、工作面超前控顶爆破

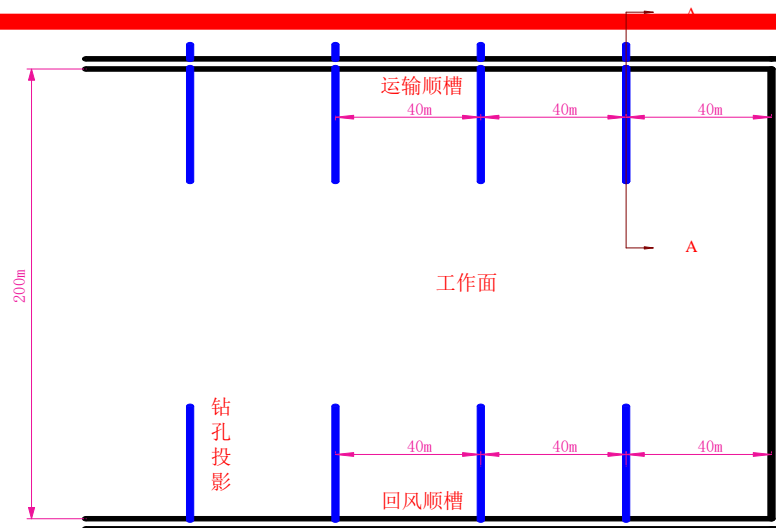
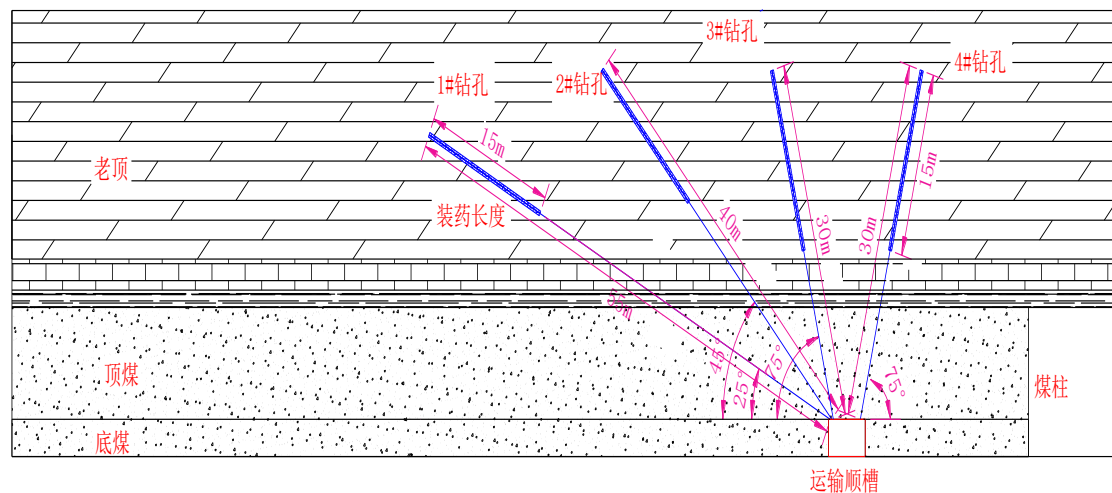
作用:

- 1) 破坏顶板完整性—采空区顶板充分垮落
- 2) 减少来压步距、降低来压强度
- 3) 降低顶板自然断裂产生的矿震强度
- 4) 降低顶板 - 煤体 - 底板组合系统势能

技术参数:

- 1) 不同条件差异很大。
- 2) 钻孔角度、深度根据顶板岩性、厚度及工作面长度等因素综合确定。孔长度从十几米到几十米不等。
- 3) 除关键层等特厚岩层外，一般对冲击有明显影响的是煤层上方100m以内的岩层。

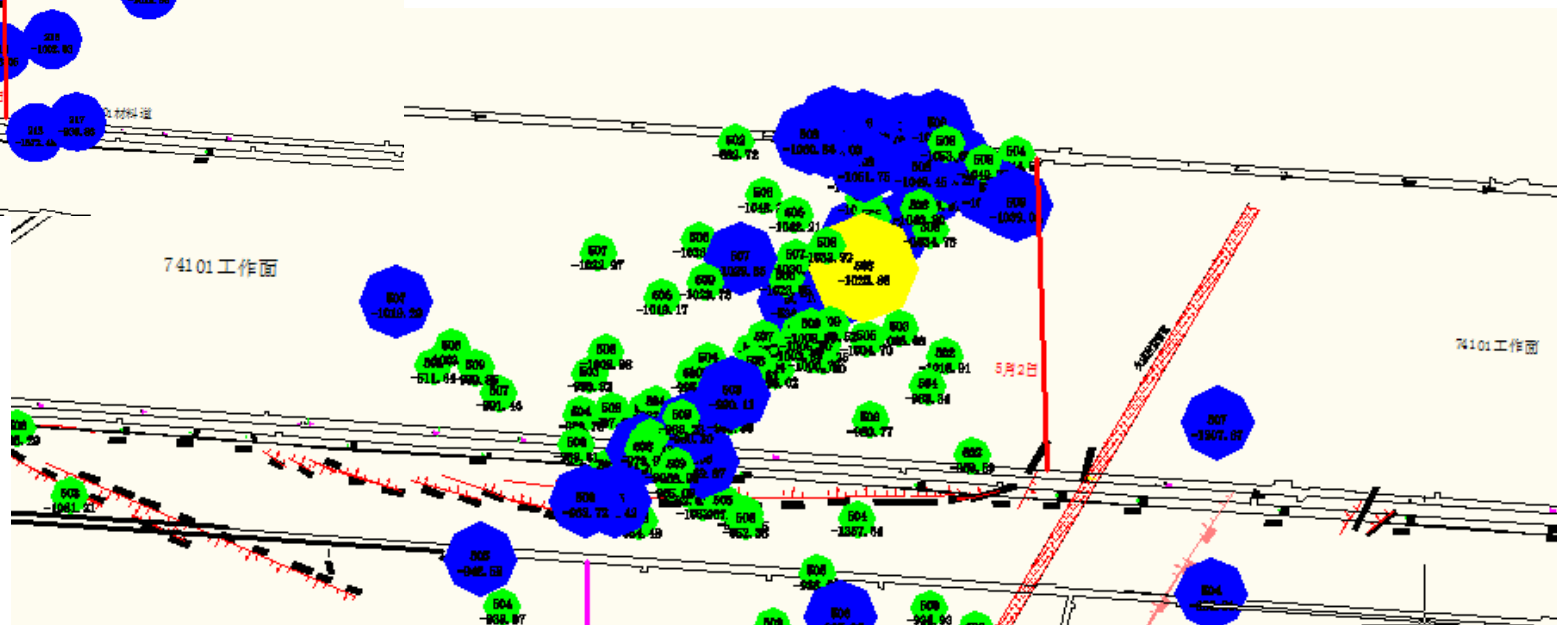
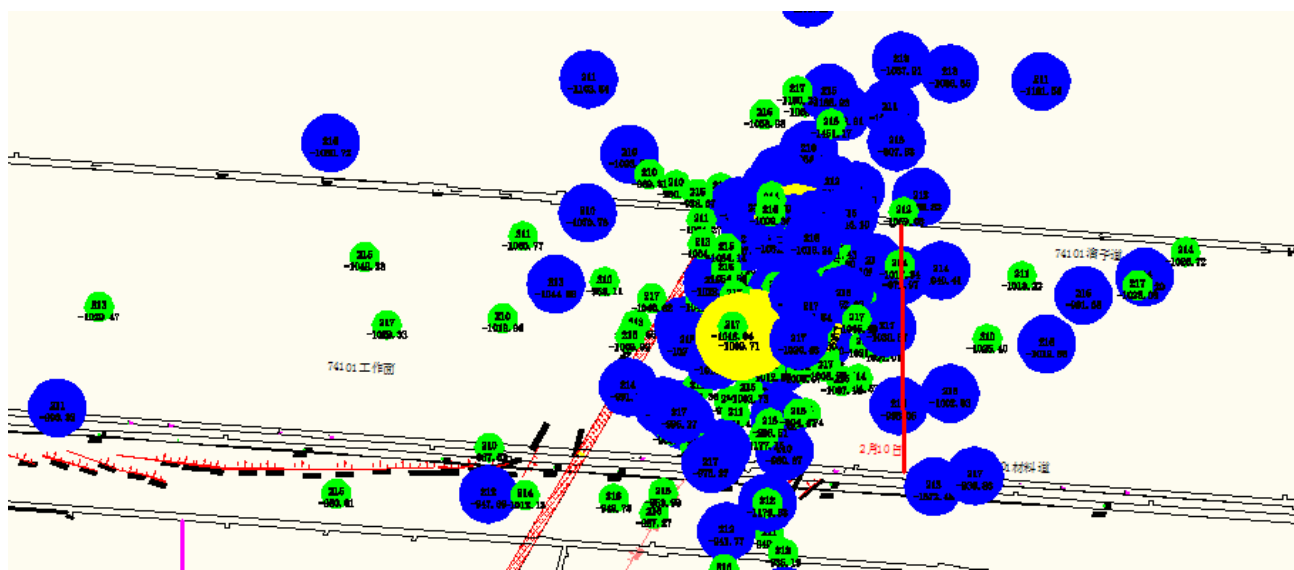
2、工作面超前控顶爆破



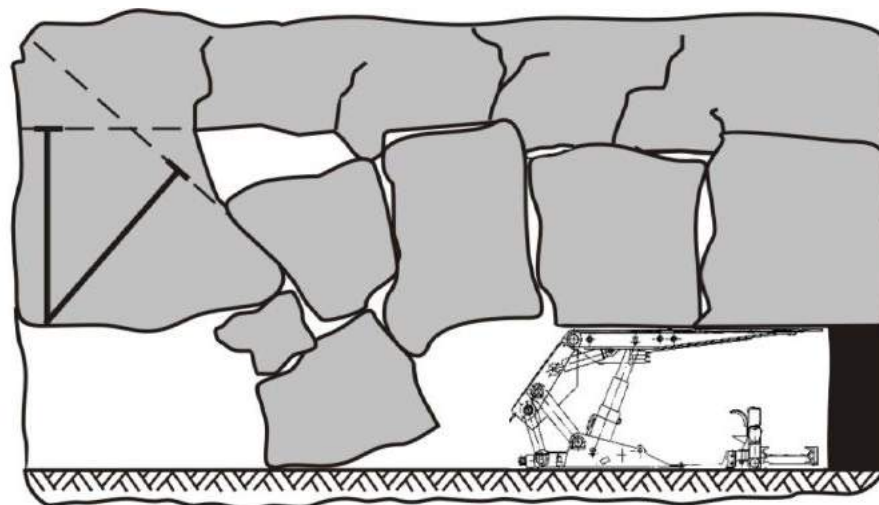
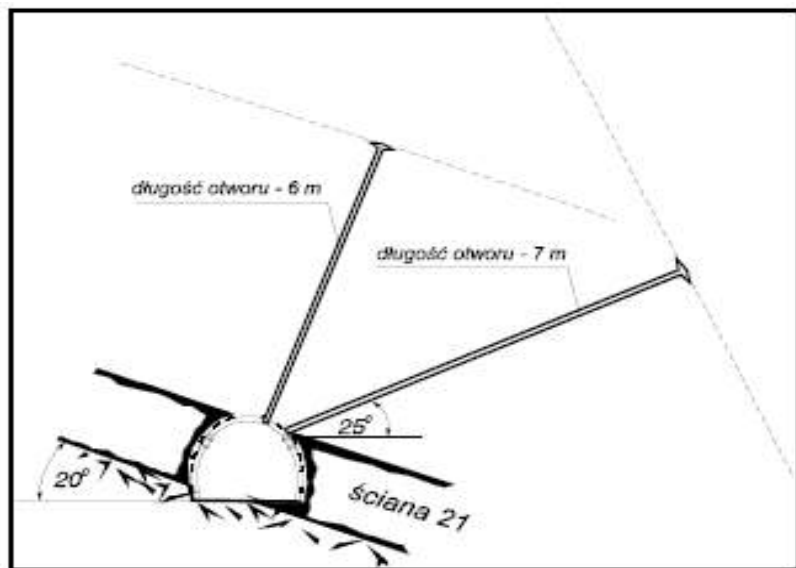
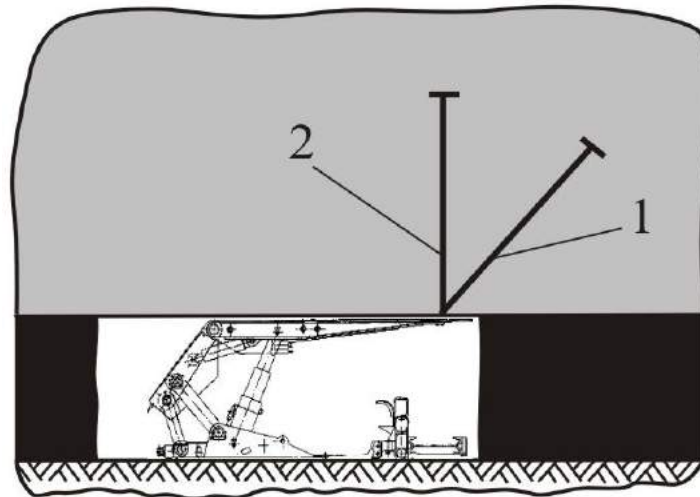
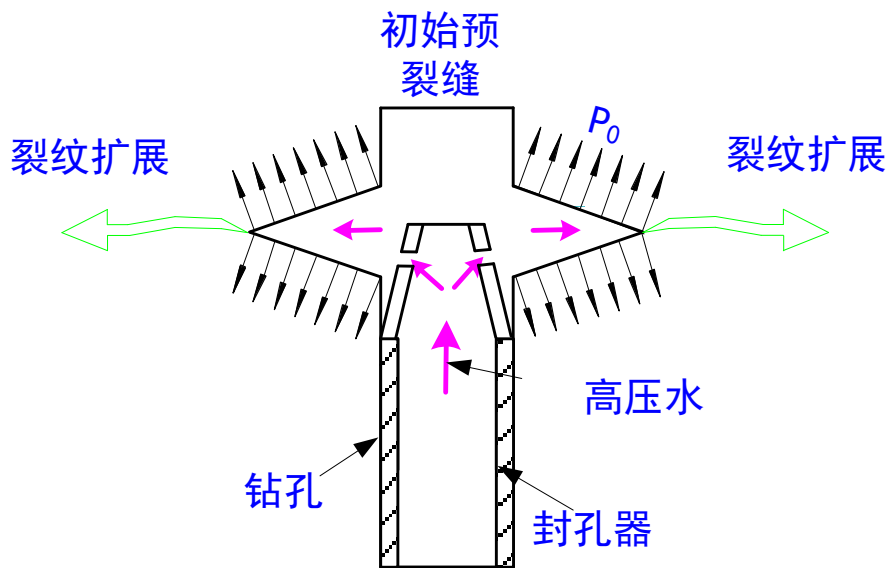
参数	孔号			
	1#钻孔	2#钻孔	3#钻孔	4#钻孔
长度/m	55	40	30	30
角度/°	25	45	75	75 (采空区方向)

参数	孔号			
	1#钻孔	2#钻孔	3#钻孔	4#钻孔
装药长度/m	15	15	15	15
封孔长度/m	15	15	10	10
装药量/kg	20	20	20	20

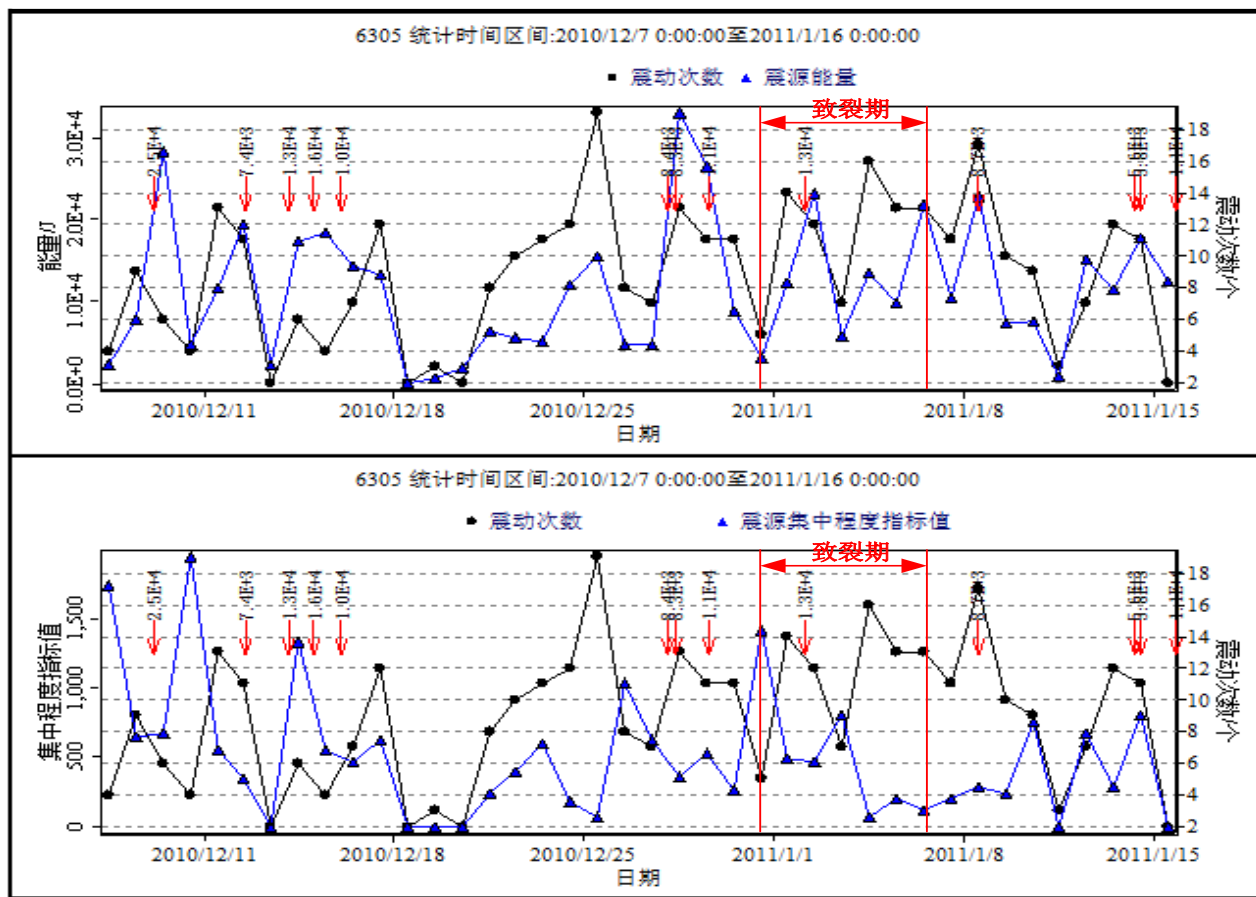
- 扇形步距式控顶爆破前后，74101工作面微震监测事件分布。



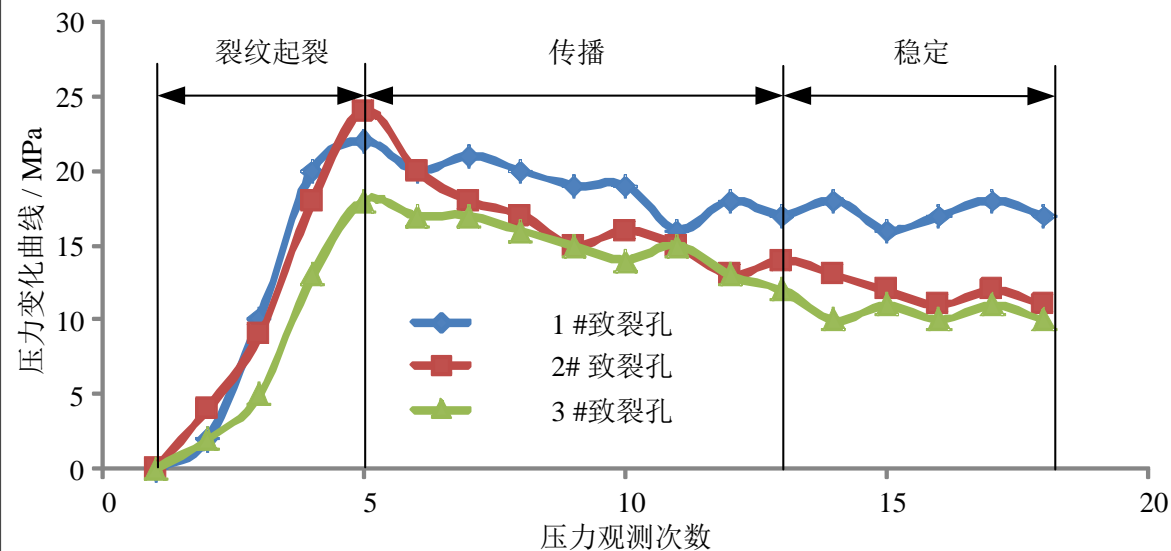
3、定向高压水力致裂



➤ 顶板致裂后微震分布规律



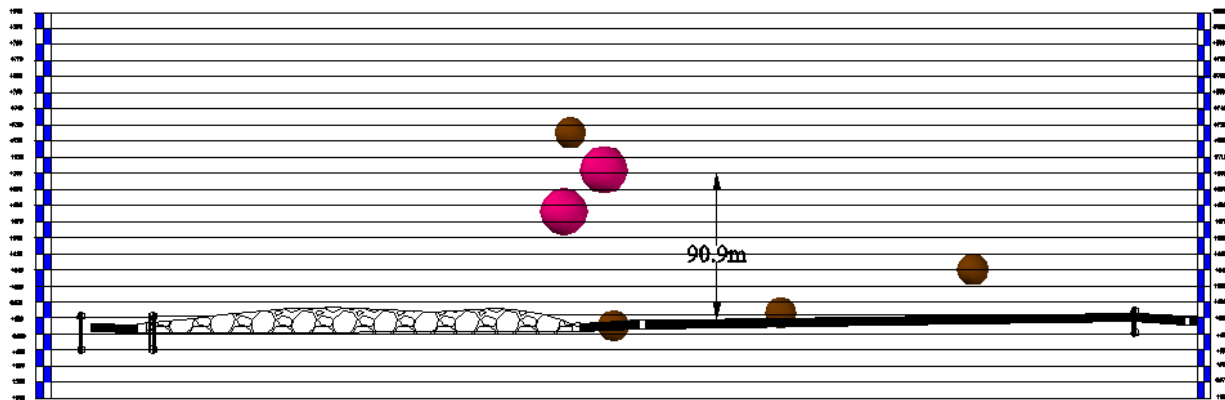
压力变化曲线



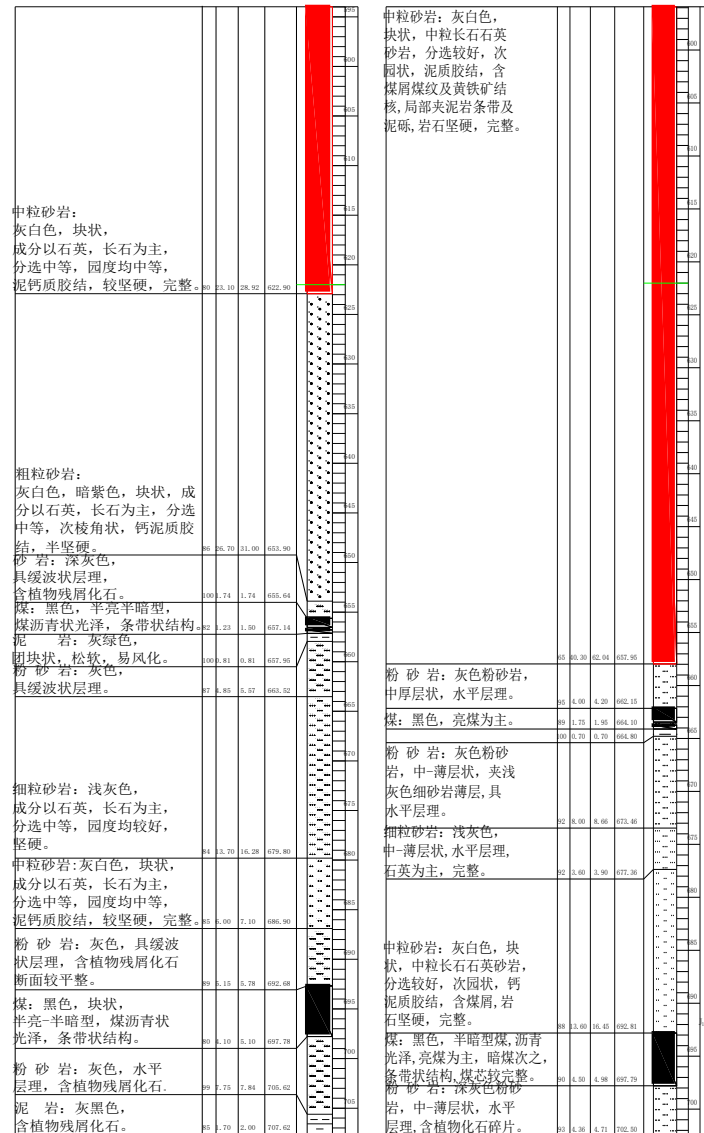
63_下05工作面微震事件震动频次、能量时间序列图 (2011.1.1~2011.2.1)

4、地面钻孔致裂高位顶板

- 常规顶板爆破 → 低位亚关键层
- 地面钻孔爆破 → 高位厚硬关键层
- 地面钻孔压裂 → 高位厚硬关键层



大能量事件定位剖面 (>10⁶J)

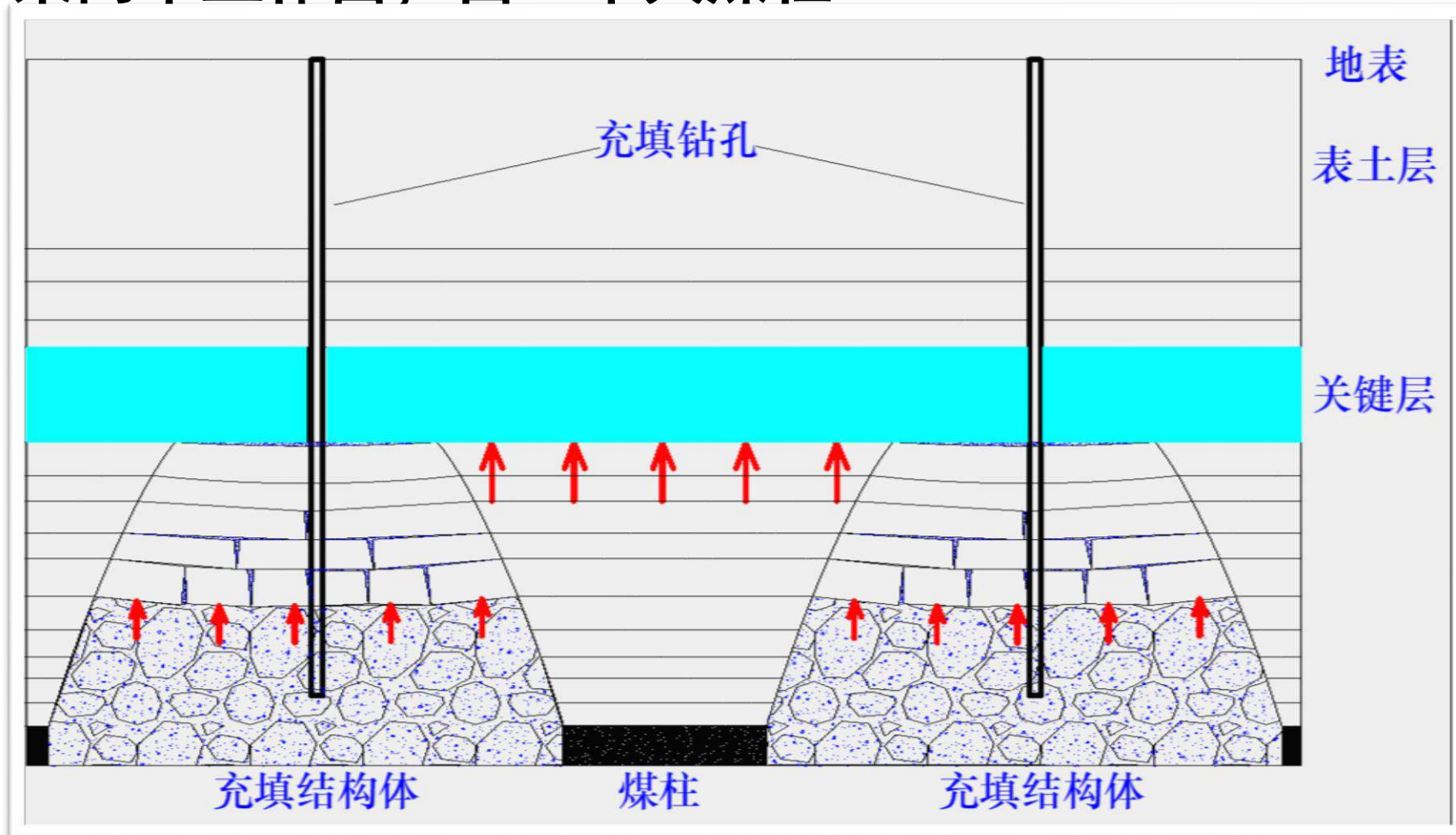


H062号钻孔

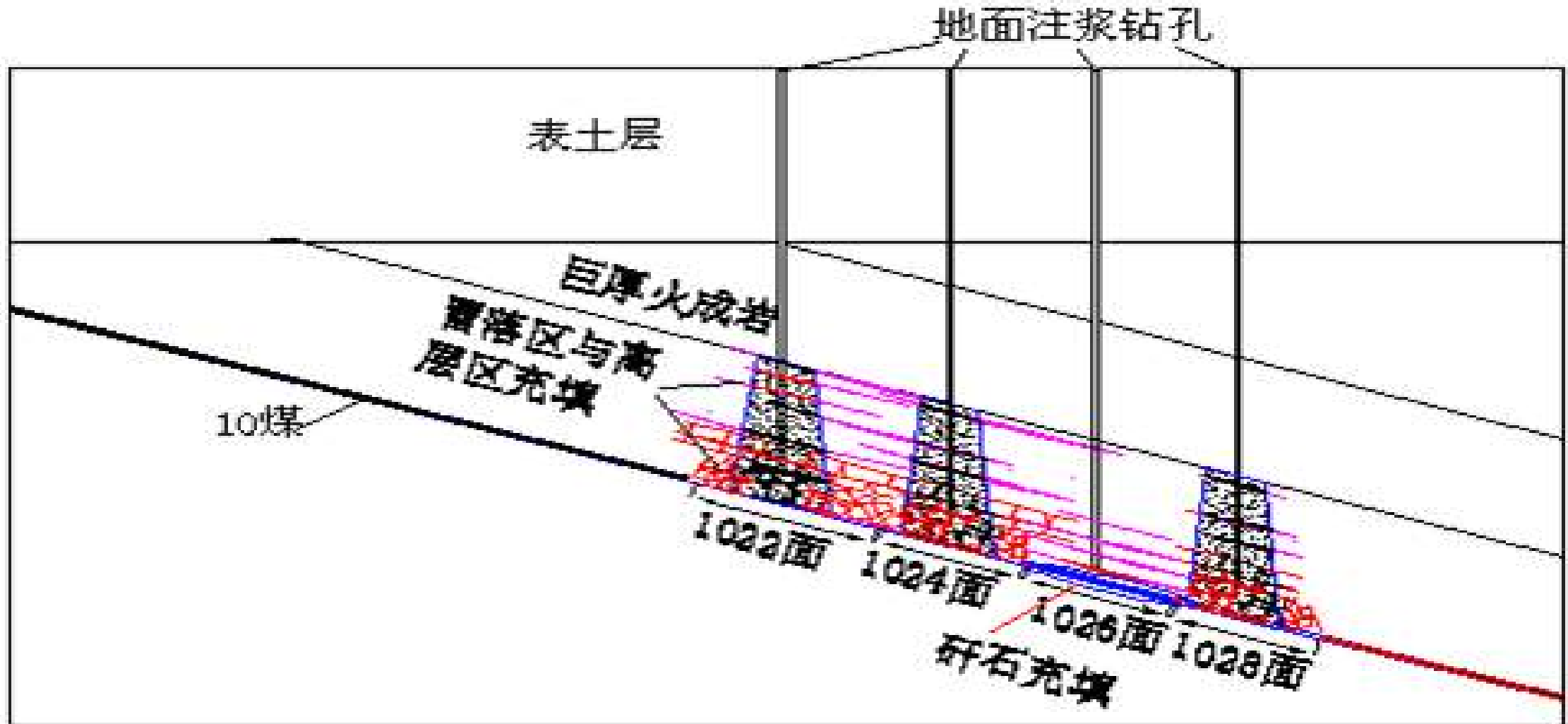
H072号钻孔

5、采空区与离层区注浆技术

- 采空区注浆加大条带煤柱控制上覆厚层坚硬关键层的破断
- 开采两个工作面，留一个大煤柱。



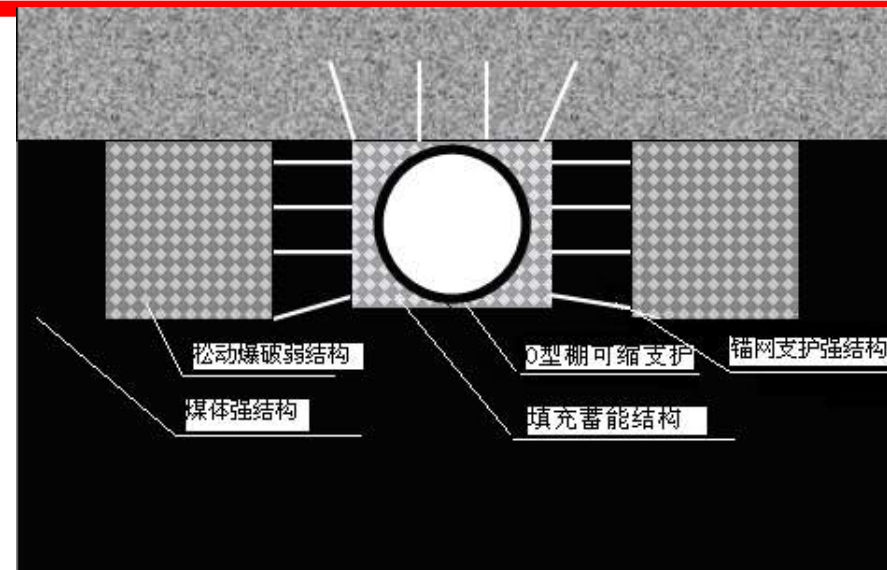
采空区注浆加条带充填控制上覆厚层坚硬关键层的破断



□ 巷道支护防冲原理

$$\sigma_d \cdot (d - r - t_{AB})^{-\eta} + \gamma h \left(1 - \frac{r^2}{(r + t_{AB})^2}\right) > \sigma_{ZAB}$$

锚网索+“0”型棚联合支护+门式支架



一级支护现场效果

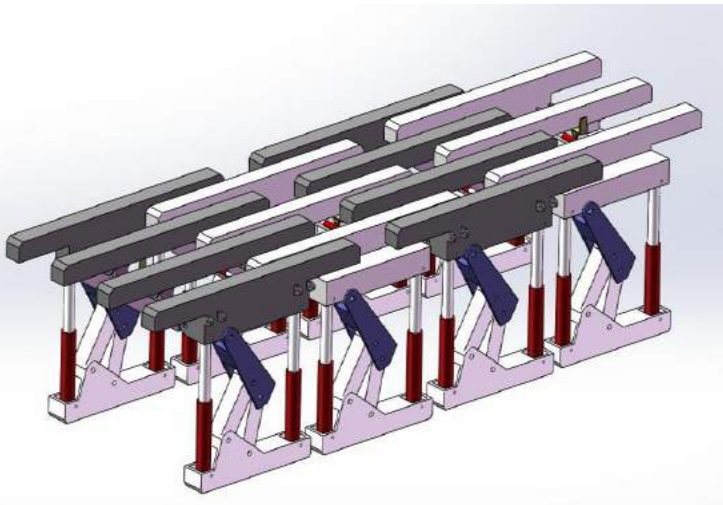
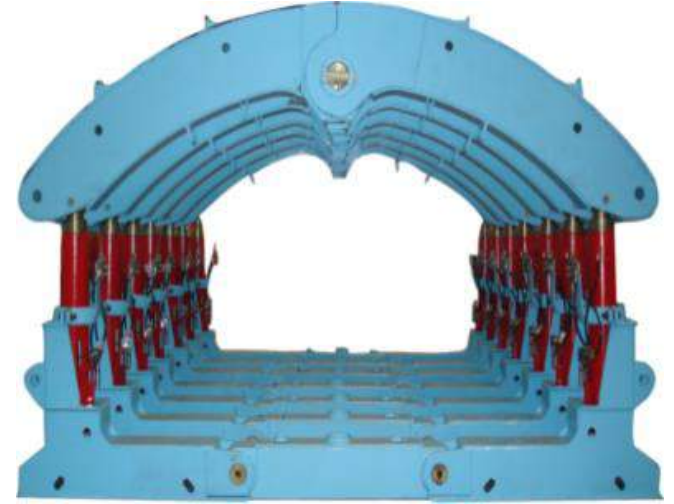
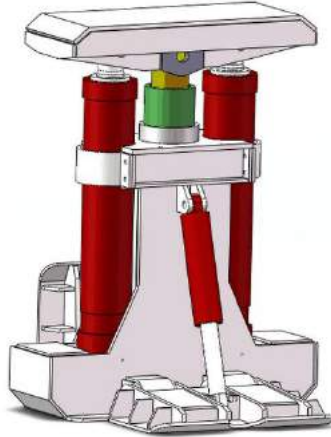


二级支护现场效果



三级支护现场效果

6、巷道防冲支护



谢谢

敬请指正!

