



第三届全国煤矿冲击地压防治学术大会会议交流

急倾斜特厚煤层水平分段开采 冲击矿压发生机理及其控制对策

窦林名

中国矿业大学

冲击地压防治工程研究中心





汇报提纲

- 急倾斜特厚煤层分段开采特点
- 急倾斜分段开采冲击显现特征
- 水平分段夹持型冲击矿压机理
- 急倾斜水平分段开采防冲对策





急倾斜特厚煤层分段开采特点



□ 急倾斜特厚煤层地质采矿特点

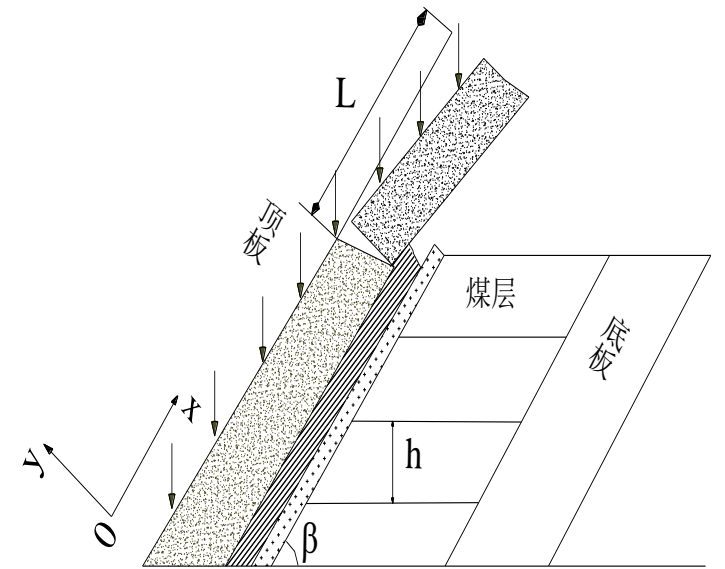
- 急倾斜煤层在我国探明煤炭储量中占20%左右；随着西部煤炭资源开发和探明储量增加，其比重会继续上升；
- 急倾斜煤层的构造复杂，断层和褶曲多，煤层厚度变化大，赋存条件普遍较差；
- 急倾斜煤层的倾角大于岩石安息角，煤层和围岩的节理发育，煤层易垮落。
- 采煤工作面初次来压和周期来压不明显，易发生无预兆的大面积突然冒顶垮落，造成顶板事故；
- 顶板压力垂直作用于支架或煤柱上的分力比缓倾斜煤层小，而沿倾斜作用的分力大，煤层开采后，煤层顶、底板都有可能沿倾斜方向滑动垮落，工作面支护工作的难度大。

□ 急倾斜特厚煤层开采覆岩结构特点

- 当煤层**直接顶较薄**，冒落的岩层对采空区充填度相对较低，在老顶为破断情况下，将处于**悬顶**状态，形成一种仰起的“**悬臂梁**”结构。
- 采深越大，结构的稳定性越低；
- 煤层倾角越大，铰接结构越稳定；
- 分段高度越大，铰接结构越易失稳；
- 岩板破坏沿工作面推进方向发展；
- 老顶初次破断后会形成较稳定的铰接结构，结构的整体失稳是由于在上部铰点 A 的滑落失稳引起的，因而上铰接点是岩层控制的关键点。

- 悬露顶板积聚的能量：
- 与其载荷二次方成正比，与其长度五次方成正比。

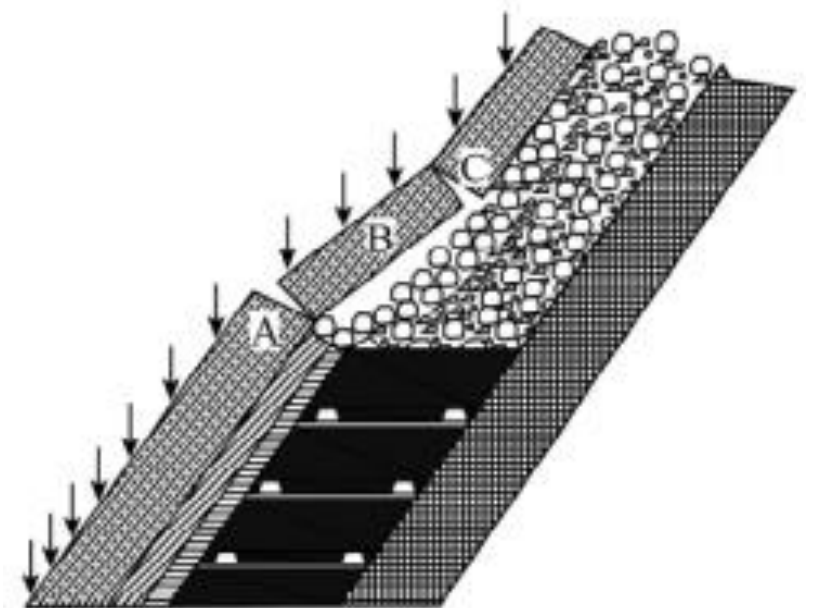
$$W = \frac{1}{2} M \alpha = \frac{(q \cos \beta)^2 l^5}{24EI}$$



覆岩破断力学模型

□ 矿压显现比倾斜煤层激烈得多

- 急倾斜特厚煤层采出煤量多，采空区不是平铺开而是垂直方向不断叠加，由此造成上方岩层移动幅度大、动态性强，容易形成冲击载荷；
- 顶板岩层移动存在向重力下沉、沿法线向底板移近、沿底板向下滑移等多种形式；
- 大体积煤体采出，在采场周围产生高度应力集中，特别是顶板巷附近，应力集中程度更高，致使顶板巷难维护；
- 底板巷周围，煤层采出后竖向应力得到释放，仍受到较大水平应力的作用，易发生底鼓。





汇报提纲

- 急倾斜特厚煤层分段开采特点
- 急倾斜分段开采冲击显现特征
- 水平分段夹持型冲击矿压机理
- 急倾斜水平分段开采防冲对策



□ 冲击矿压显现强烈——巷道冲击，工作面整体冲击

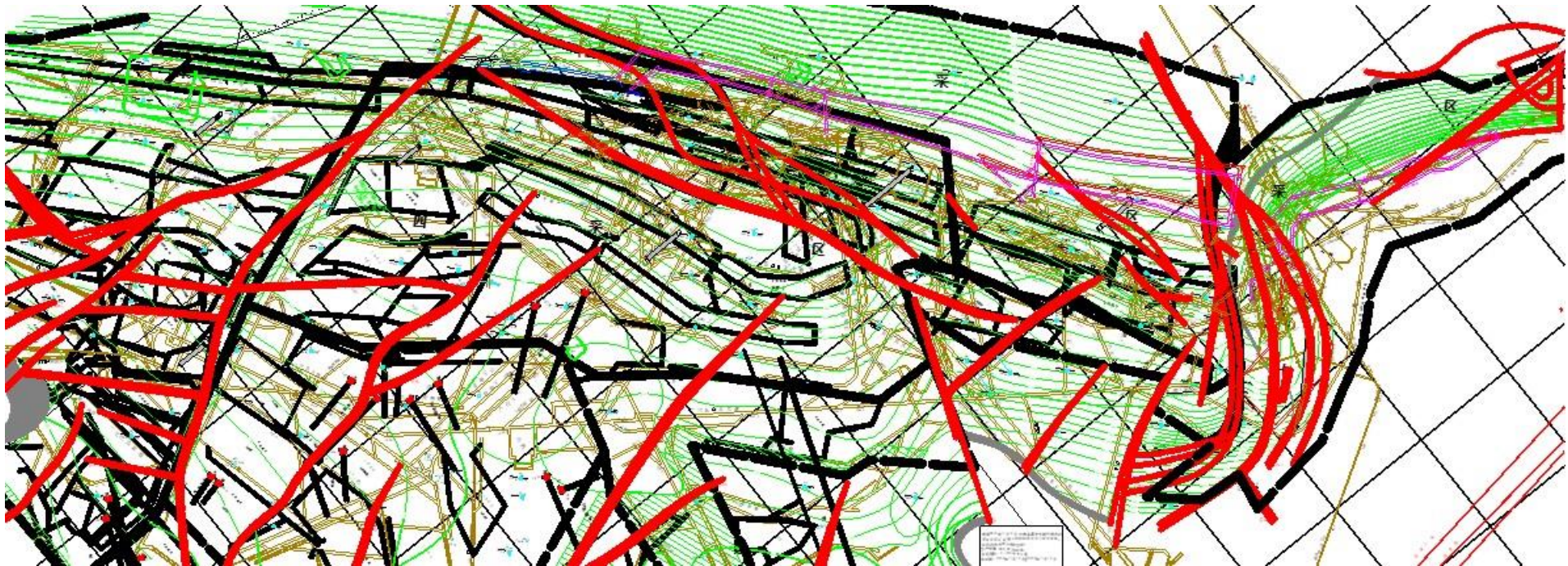


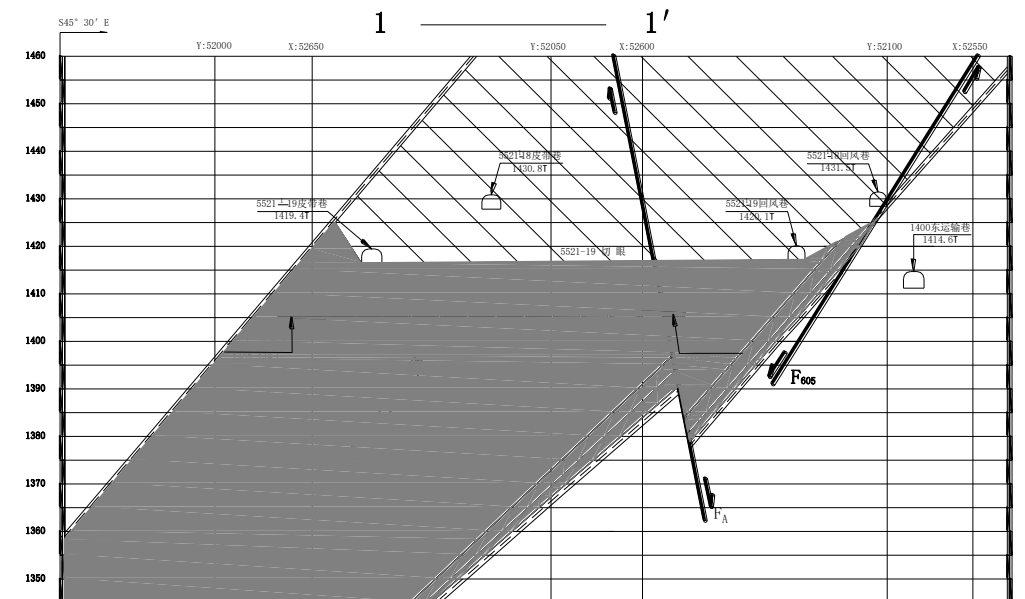
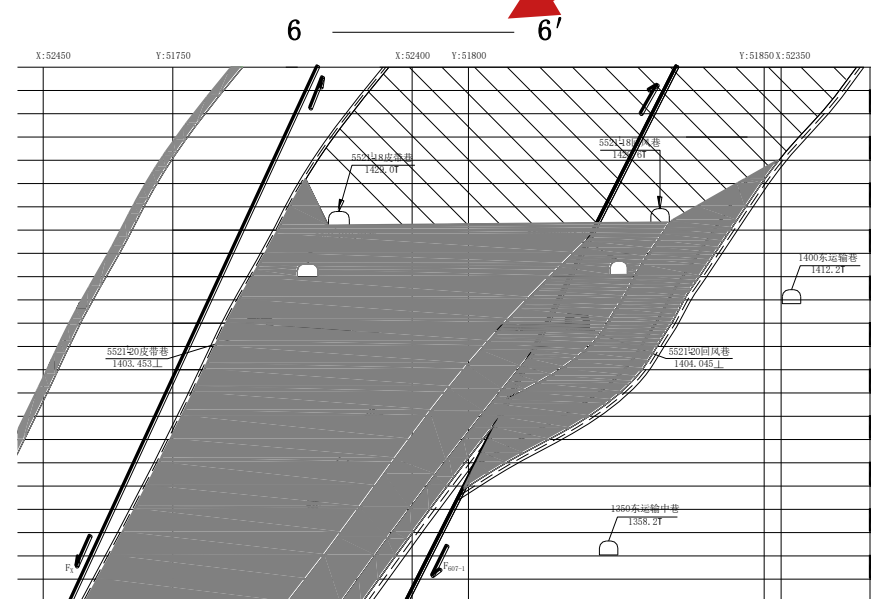
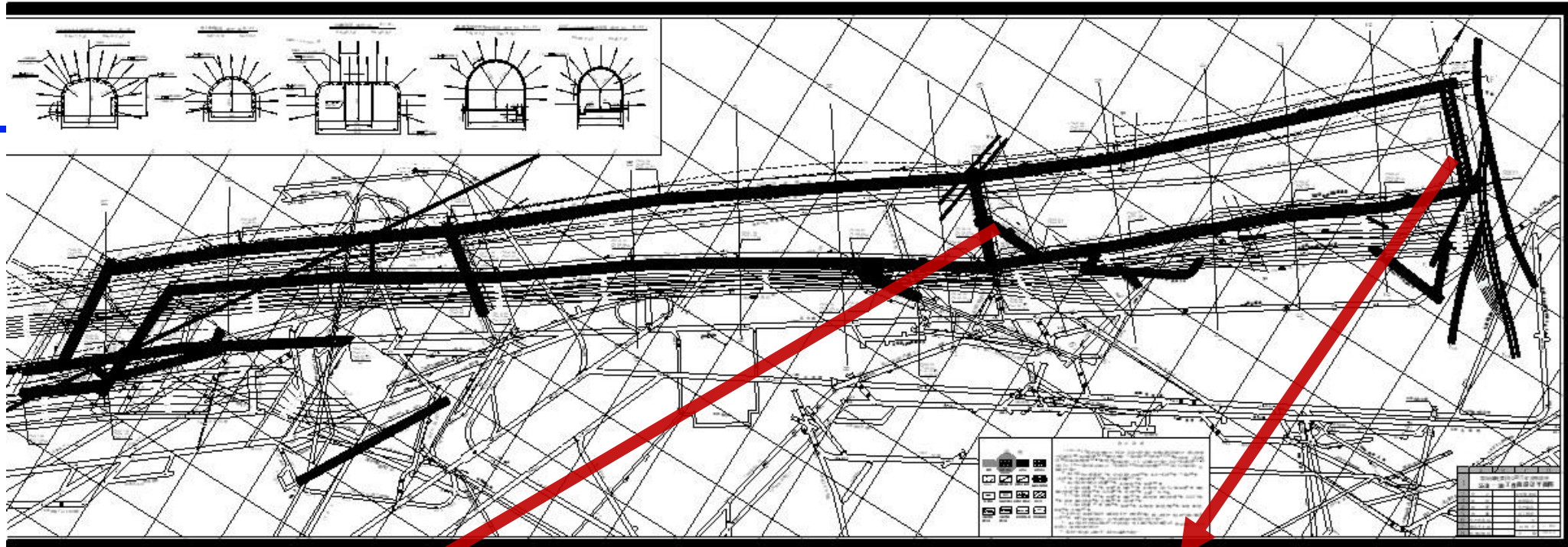
新疆乌东矿冲击显现——巷道，工作面



甘肃窑街三矿冲击显现——工作面

- 窑街三矿特厚煤二层，均厚27.4m。五、七三个采区生产
- 五采区已采20个分层，首分层标高1664m，1997年2月采。现开采5521-20面，底界标高为1400-1403m，埋深480-510m。
- 五采区5521-20综放面，煤层倾角 $45\sim 55^\circ$ ，采用急倾斜特厚煤层水平分段综放开采工艺。

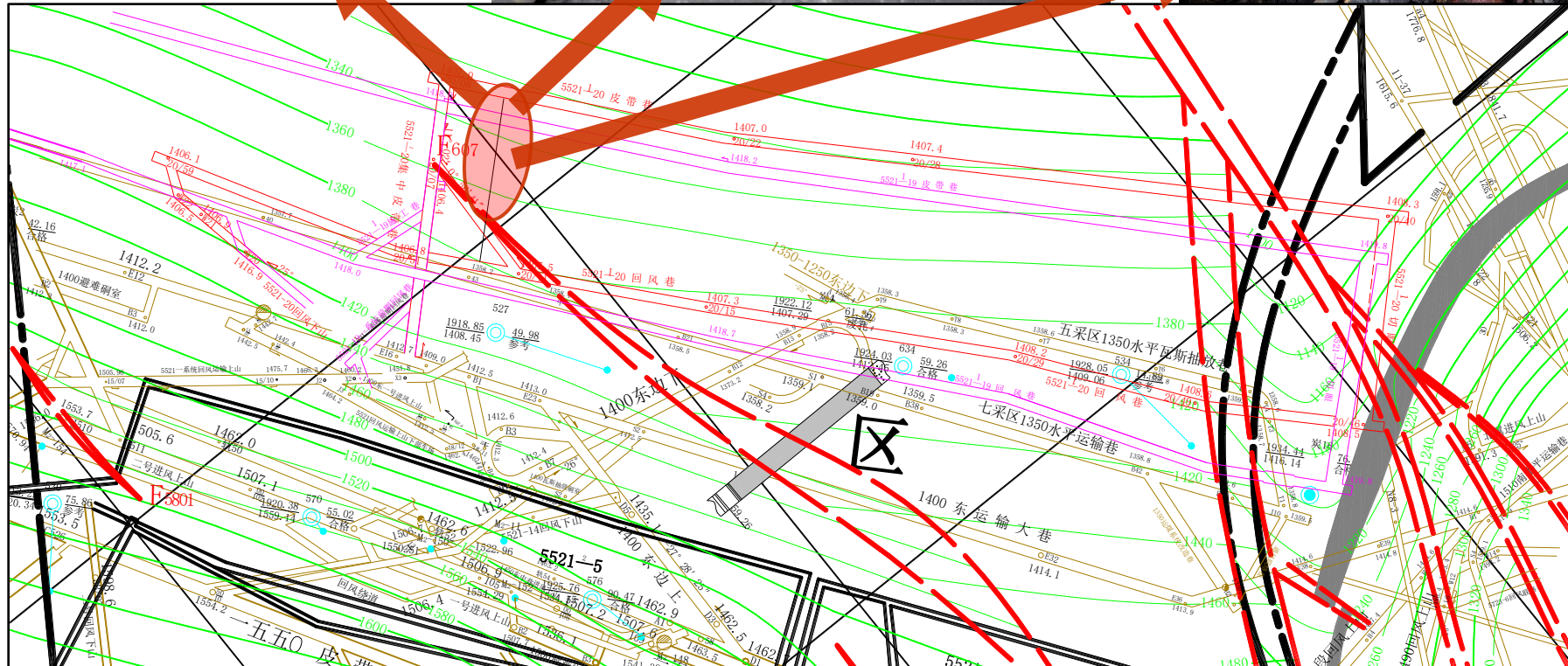




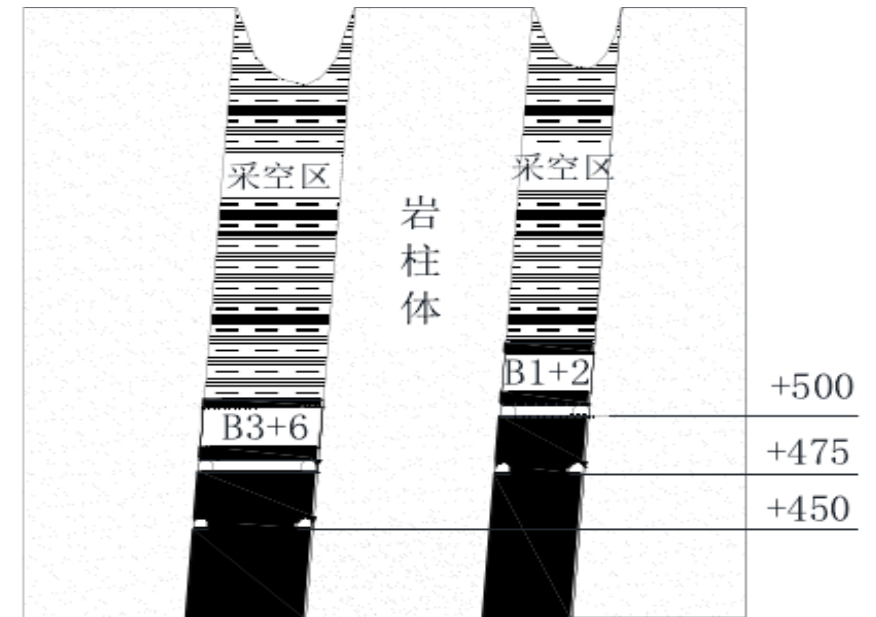
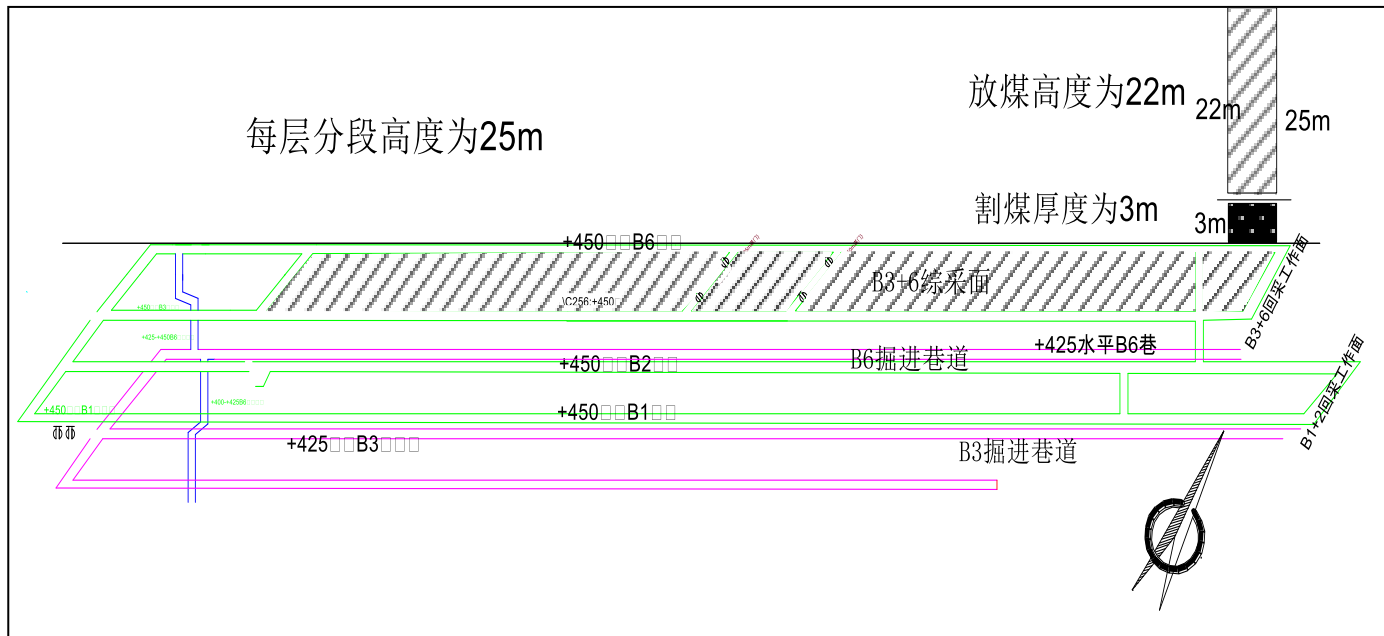
- 时间：2016年3月24日凌晨1点50分
- 地点：三矿5521-20工作面；
- 显现：工作面靠近顶板区域大量支架立柱折断，38副综采支架被压垮；**底板隆起1.3~1.5m左右；端头底鼓1.5m**
- 地面震感强烈，地震台记录里氏震级2.4级。



急倾斜分段开采冲击显现特征



- 乌东煤矿南采区采用的水平分段放顶煤的采煤方法，每层分段高度为25m，其中割煤厚度为3m，放煤高度为22m，上部采空区用黄土进行回填。
- B3+6设计宽43m，B1+2平均厚30m，中间岩墙厚100m，走向2520m。B3+6先于B1+2开采，2017年6月B1+2停采。

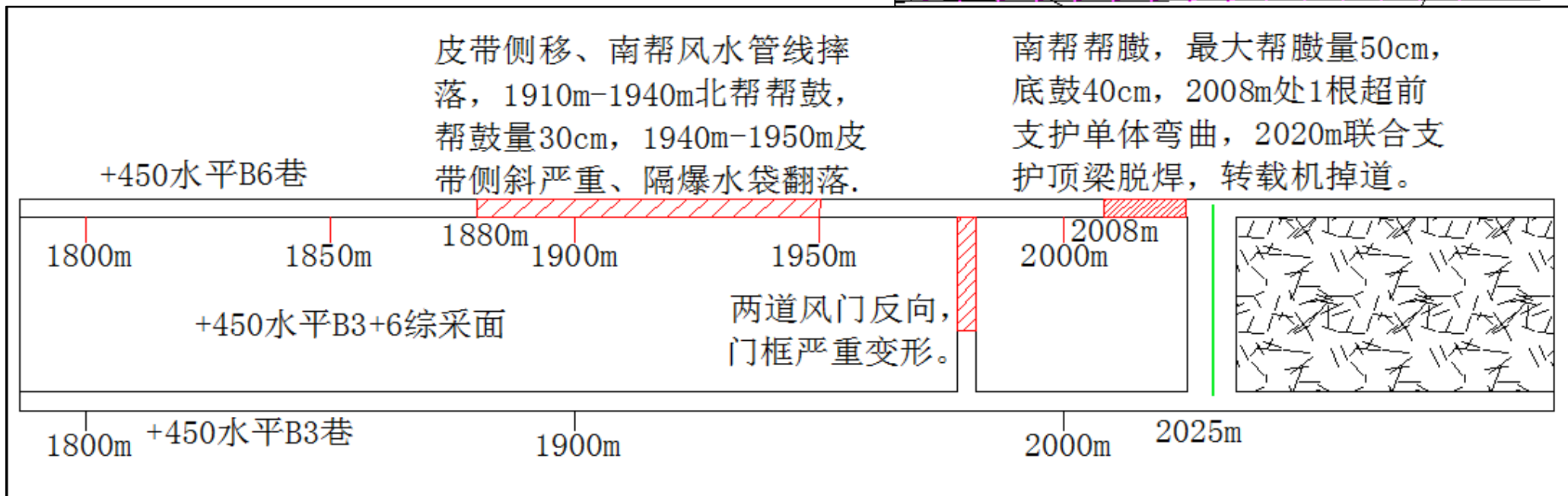
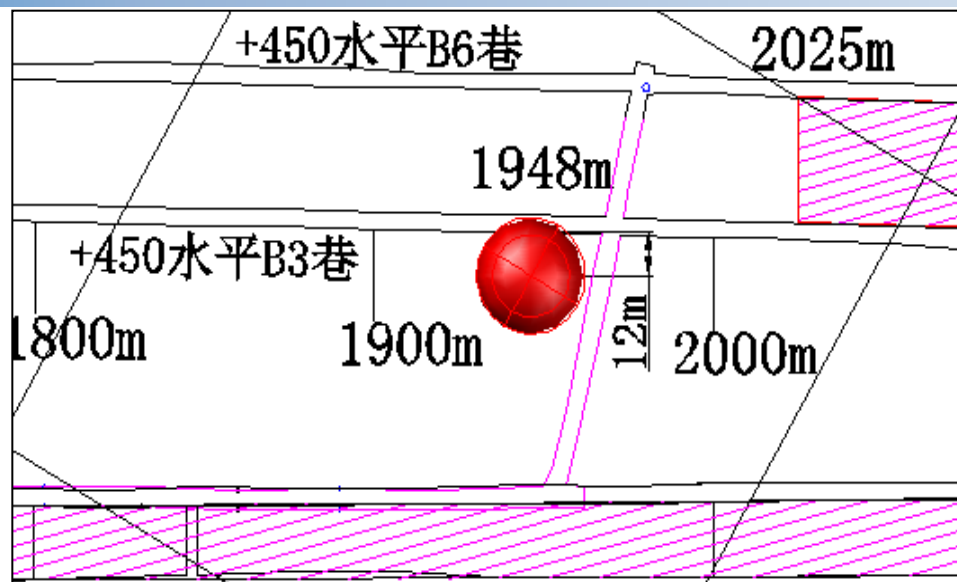


➤ 乌东煤矿自2013年以来，共发生过6次冲击地压

冲击日期	时间	工作面位置	冲击震源位置	冲击能量 (J)
2013/02/27	7:38	1959m	-	-
2015/03/13	7:41	1995m	走向1976m, 标高+480m	$5 \times 10^8 \text{J}$
2016/11/24	8:27	2026m	走向1948m, 标高+460m	$9.5 \times 10^6 \text{J}$
2017/02/01	21:51	1824m	走向1852m, 标高+460m	$2.1 \times 10^8 \text{J}$
2017/04/26	20:06	1568m	走向1556m, 标高+431m	$2.2 \times 10^6 \text{J}$



- 2016年11月24日早8时27分，+450水平B3+6综放面发生1次 9.5×10^6 J矿震
- 造成B6巷严重破坏，帮鼓、单体弯曲、皮带侧移、风水管路甩落、风门损坏等。

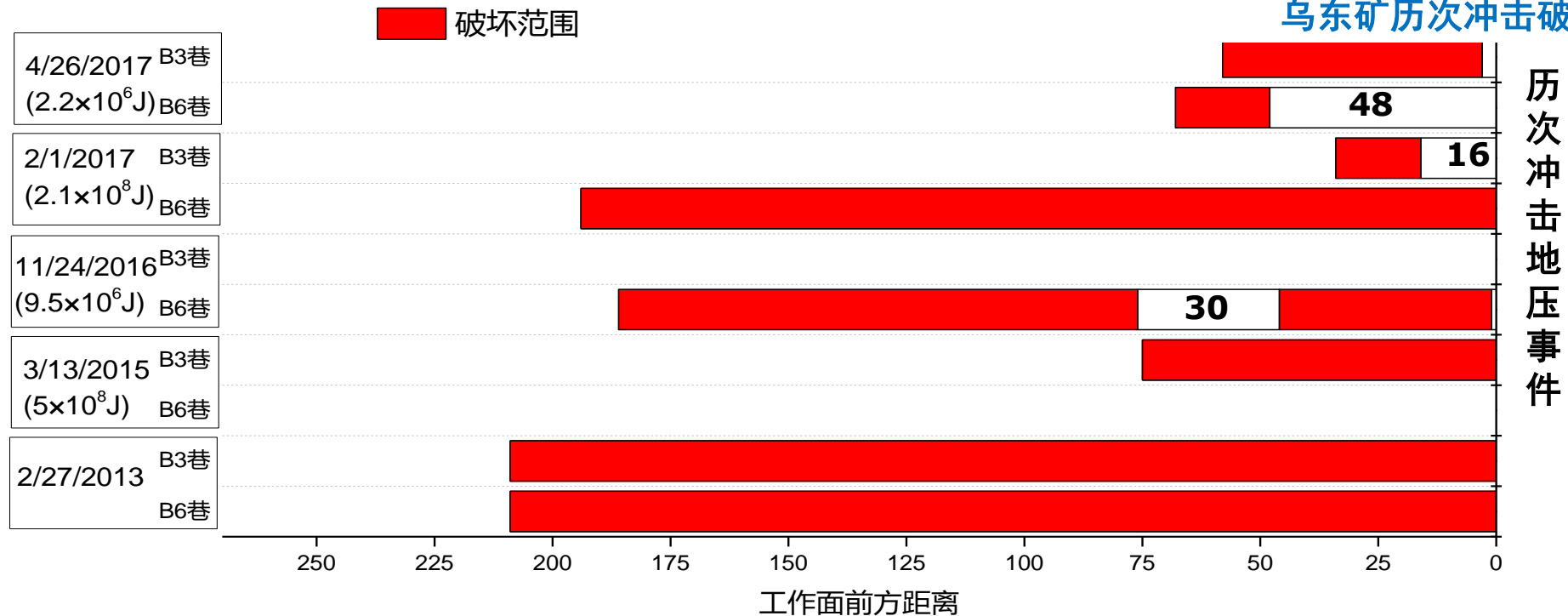
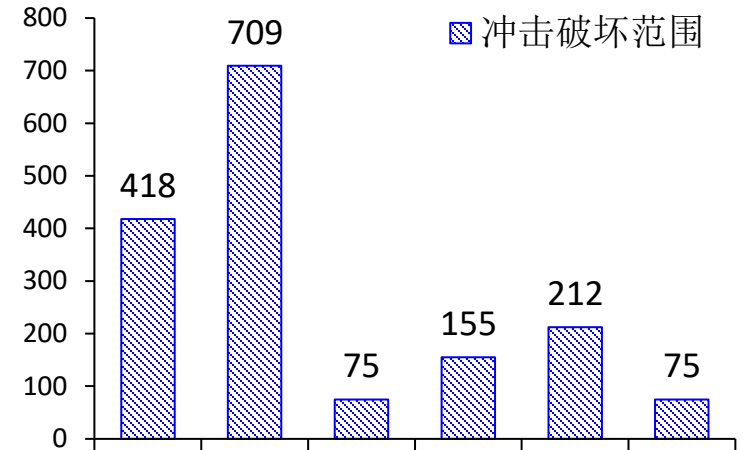




急倾斜分段开采冲击显现特征



- 巷道破坏多起始端头，5处，超前工作面 0~209m;
- 少数破坏超前端头，3处，超前3-48m;
- 巷道一般连续破坏，少数存在间断，如间断 30m。





汇报提纲

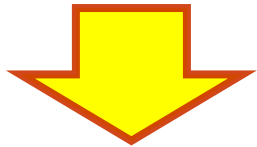
- 急倾斜特厚煤层分段开采特点
- 急倾斜分段开采冲击显现特征
- **水平分段夹持型冲击矿压机理**
- **急倾斜水平分段开采防冲对策**



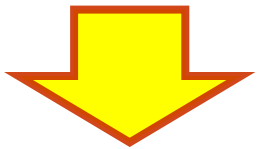
水平分段夹持型冲击矿压机理

□ 夹持煤柱型 → 静载+动载 → 诱发冲击

急倾斜特厚煤层
水平分段开采



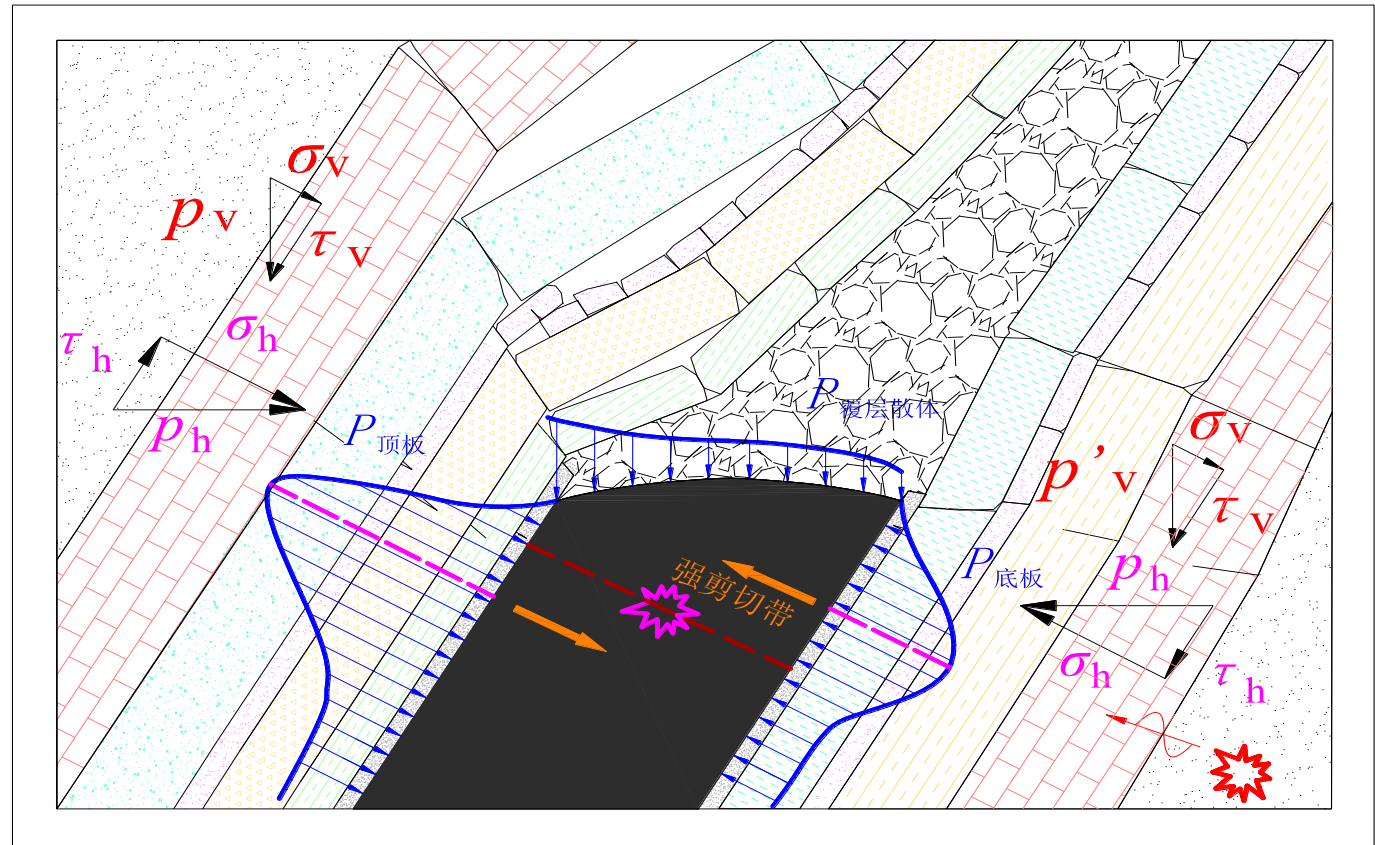
夹持煤柱型



夹持应力
剪切力
矿震动载

$$\sigma_j + \sigma_d \geq \sigma_{bmin}$$

σ_j - 静应力
 σ_d - 冲击应力波
 σ_{bmin} - 临界应力



水平分段夹持型冲击矿压机理

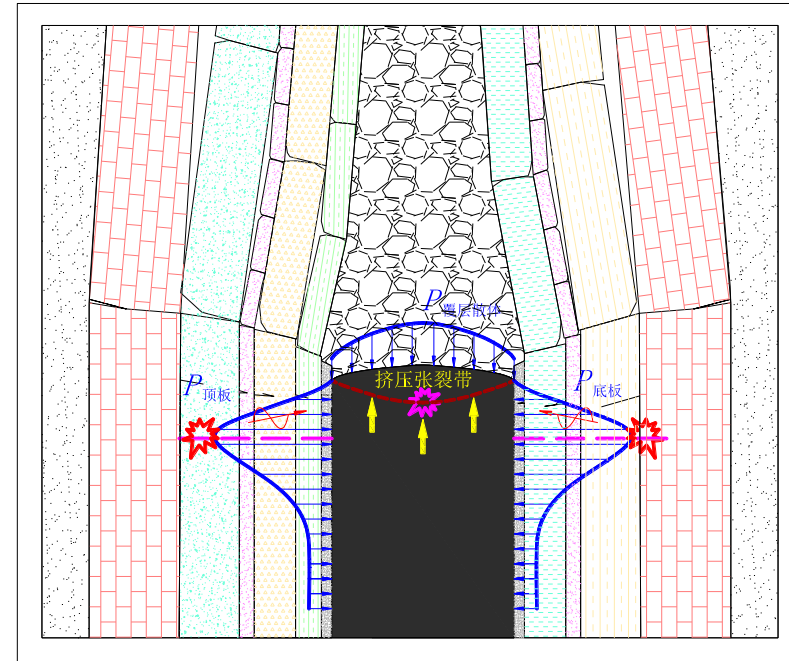
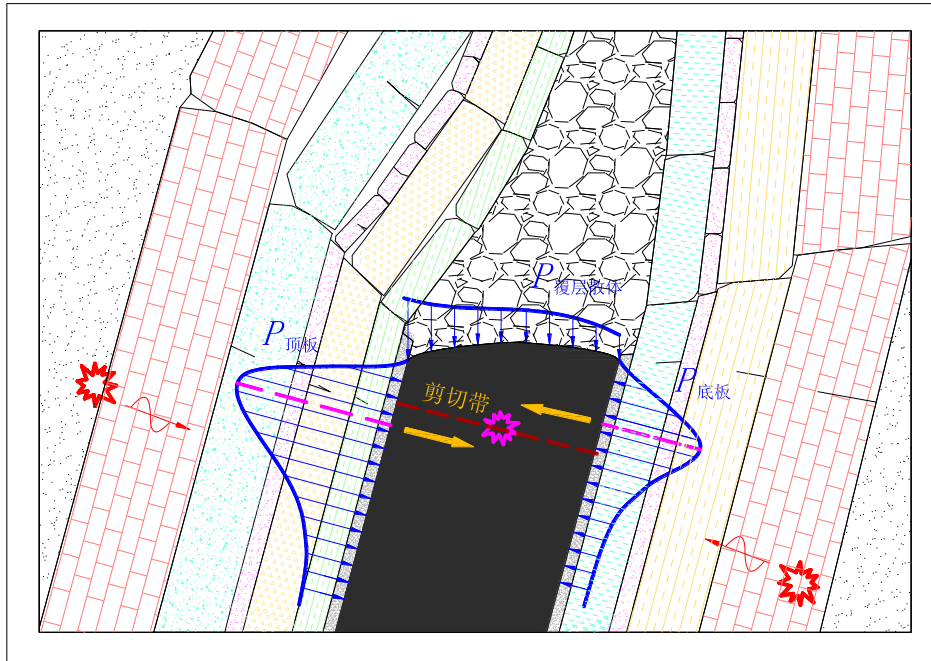
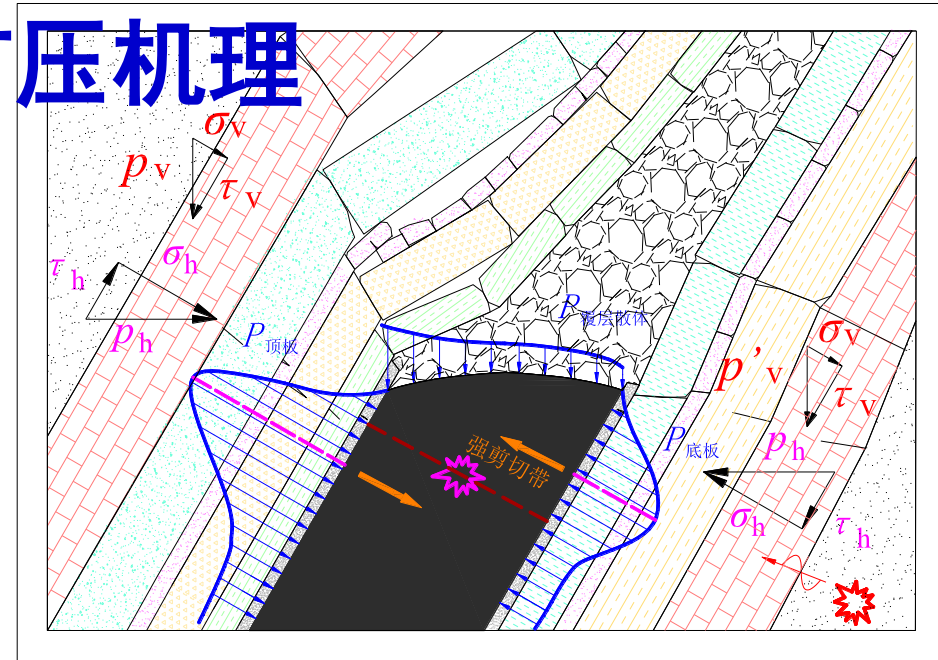
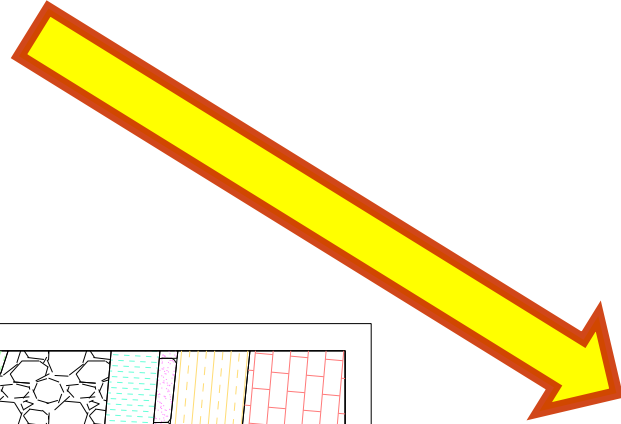
煤层倾角



$\alpha = 60^\circ$

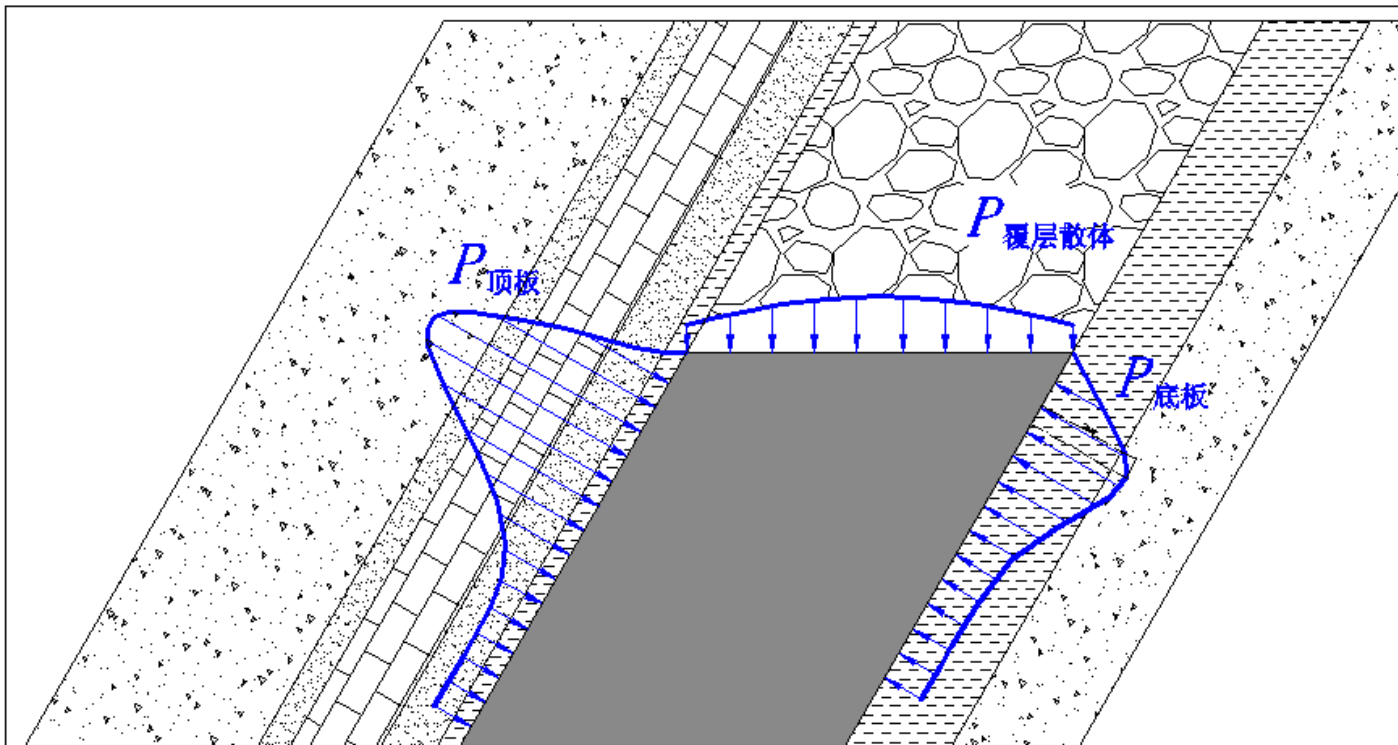
$\alpha = 90^\circ$

$\alpha = 75^\circ$

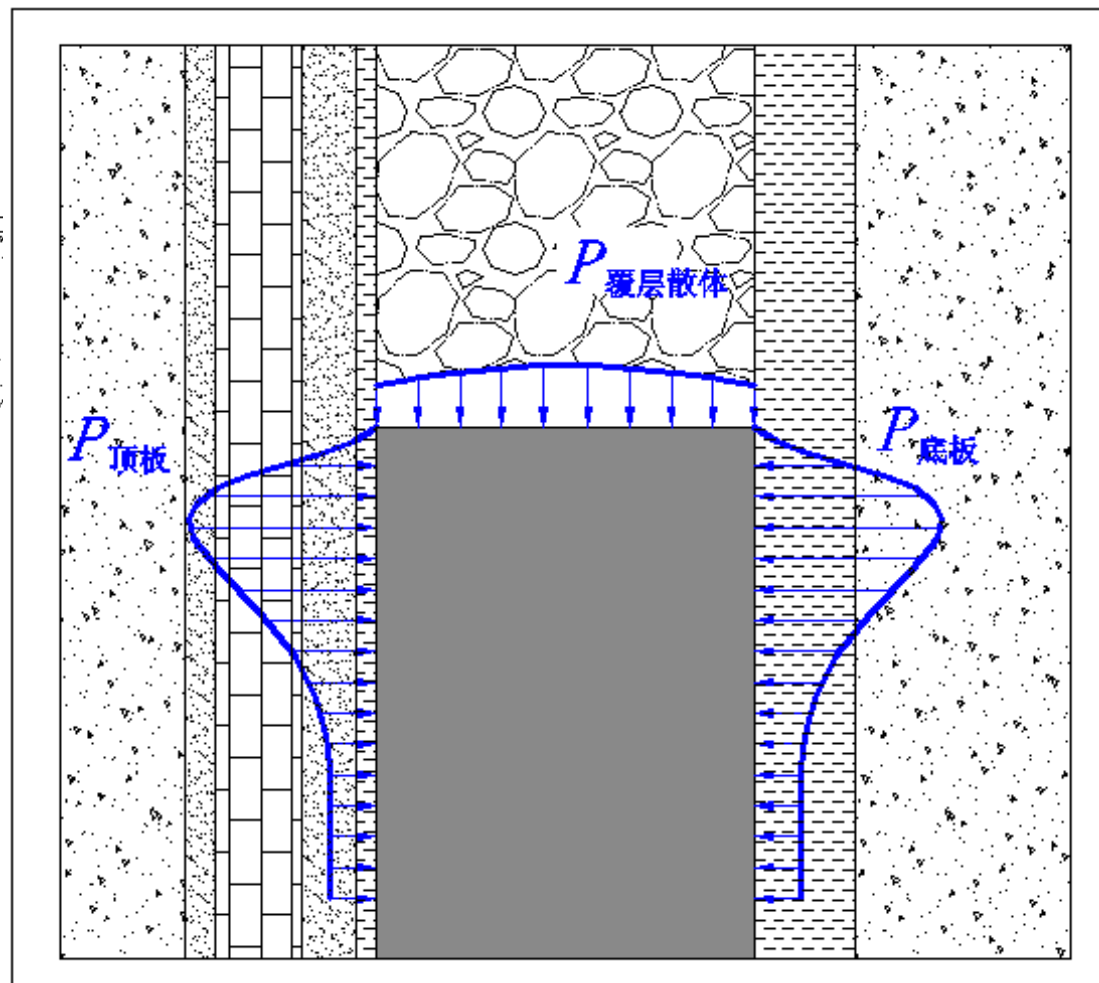


□ 夹持煤柱型冲击

倾角60度

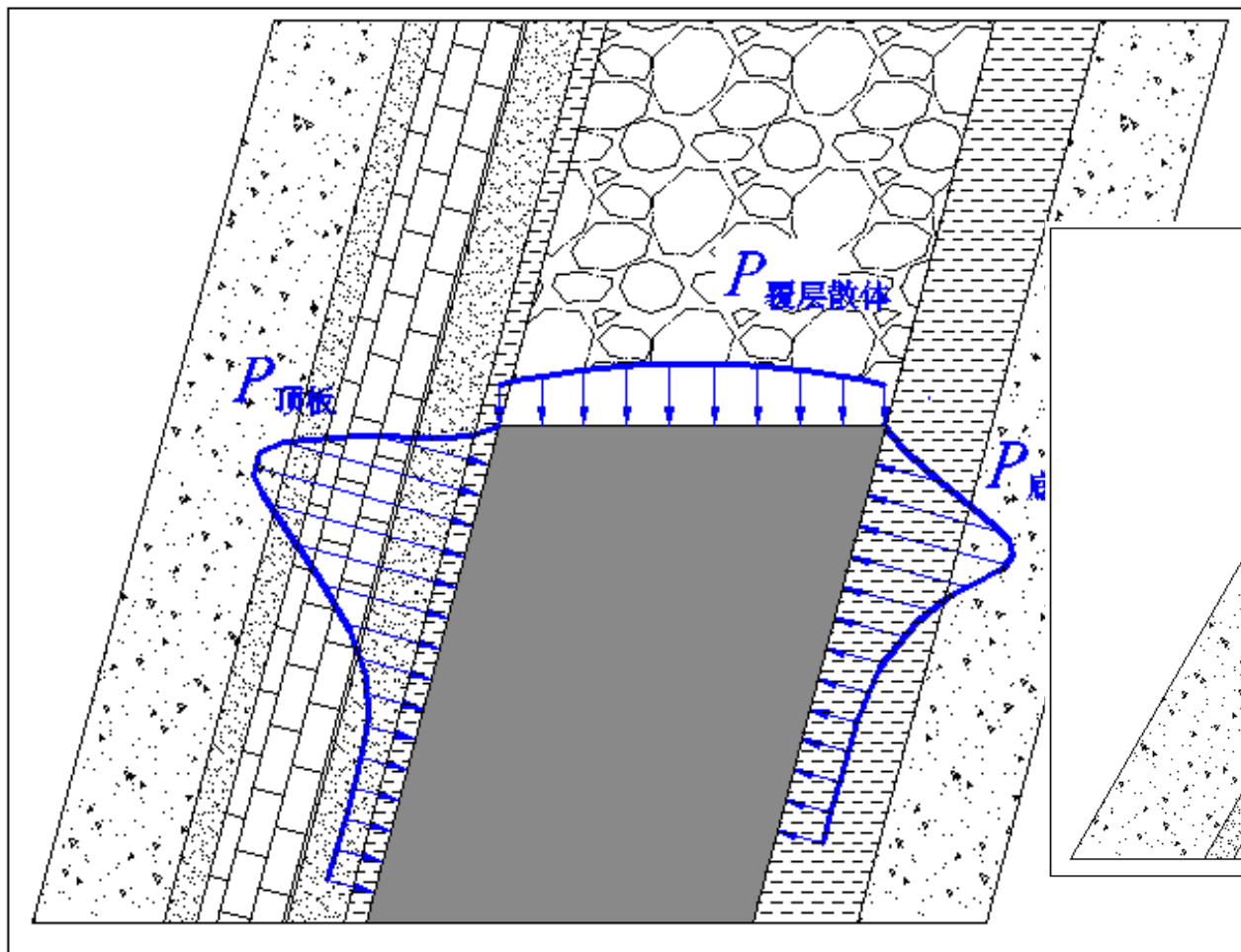


倾角90度

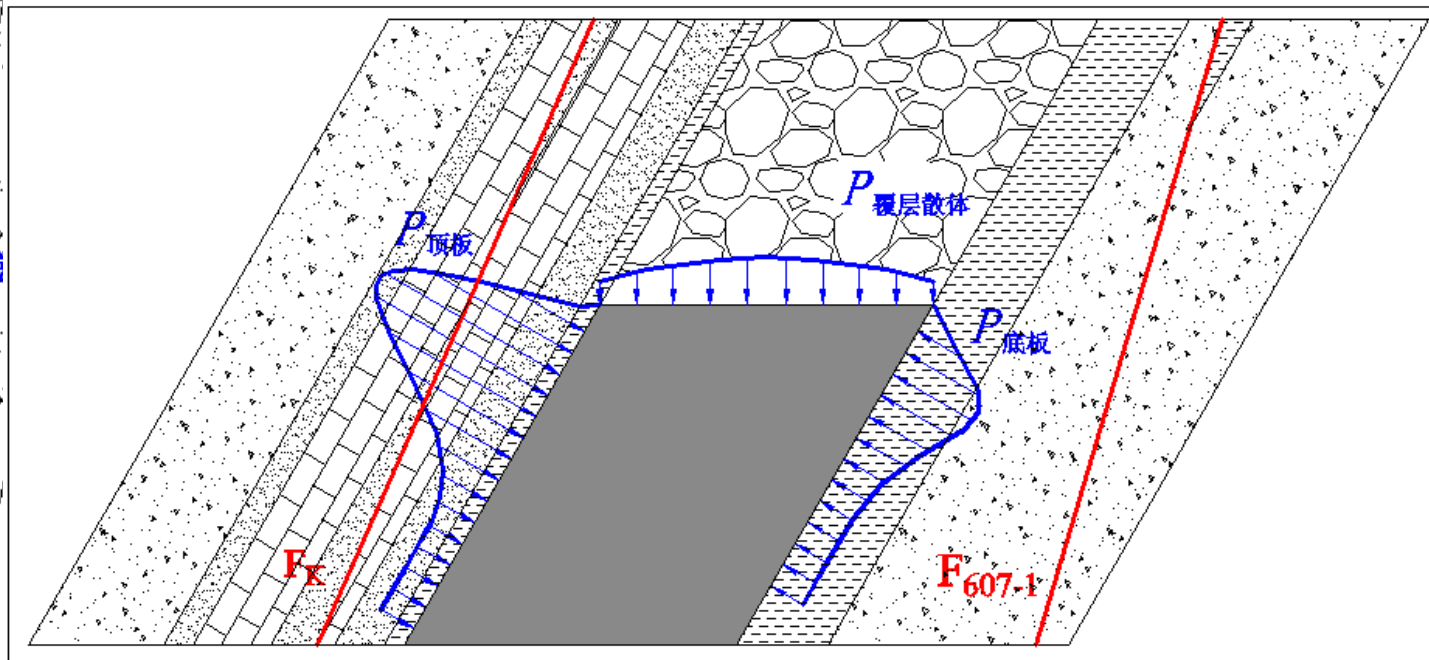


□ 夹持煤柱型冲击

倾角75度

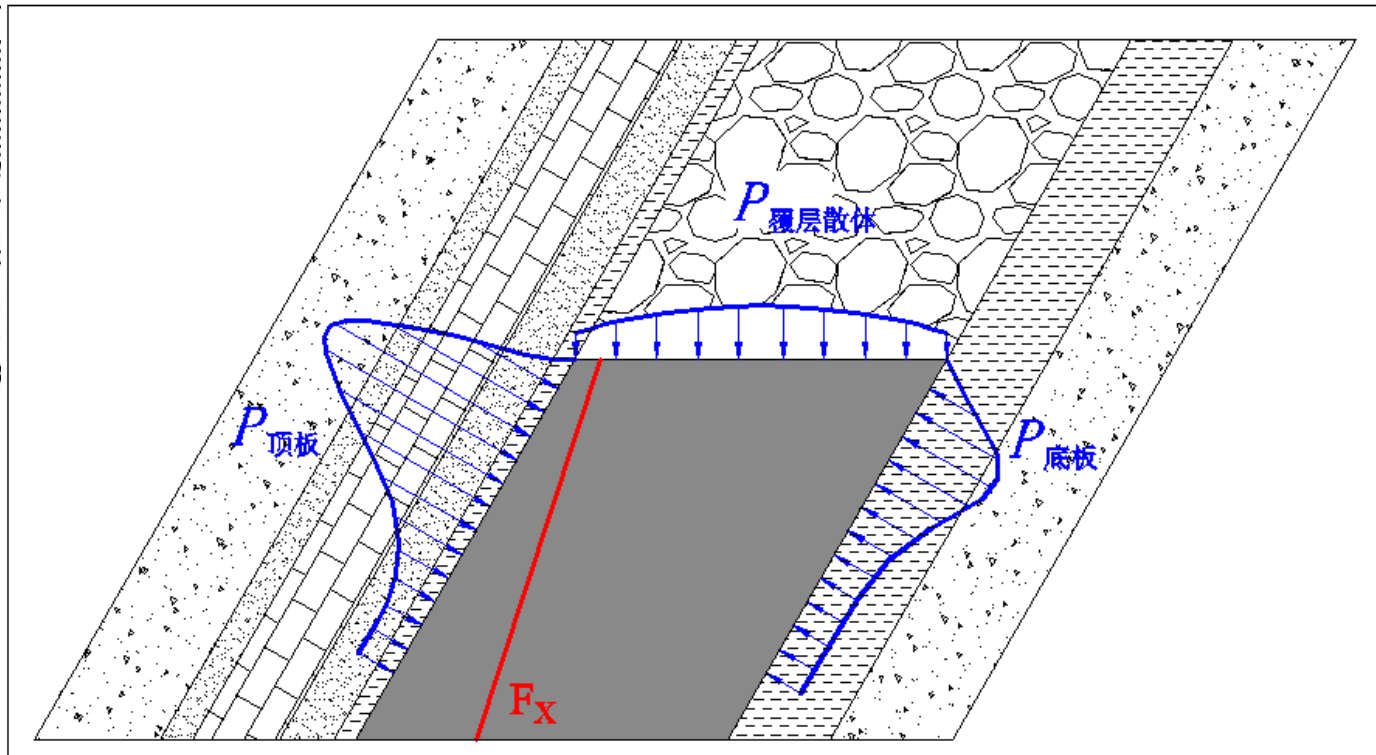
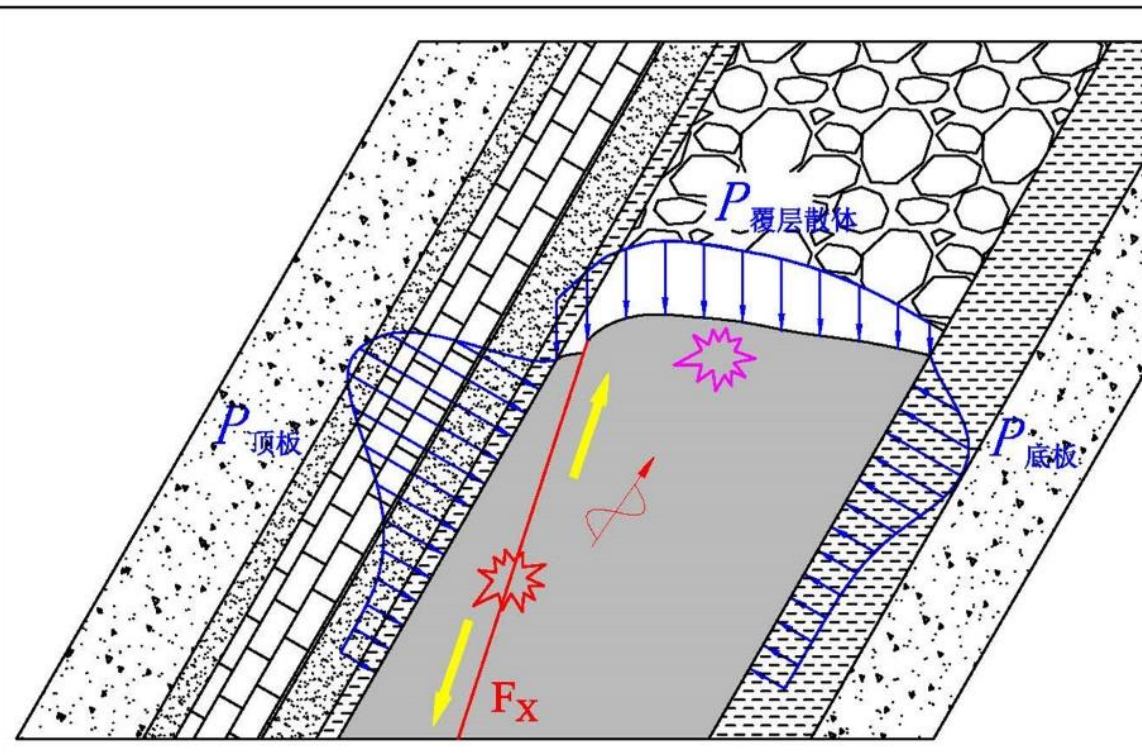


顶底板有断层

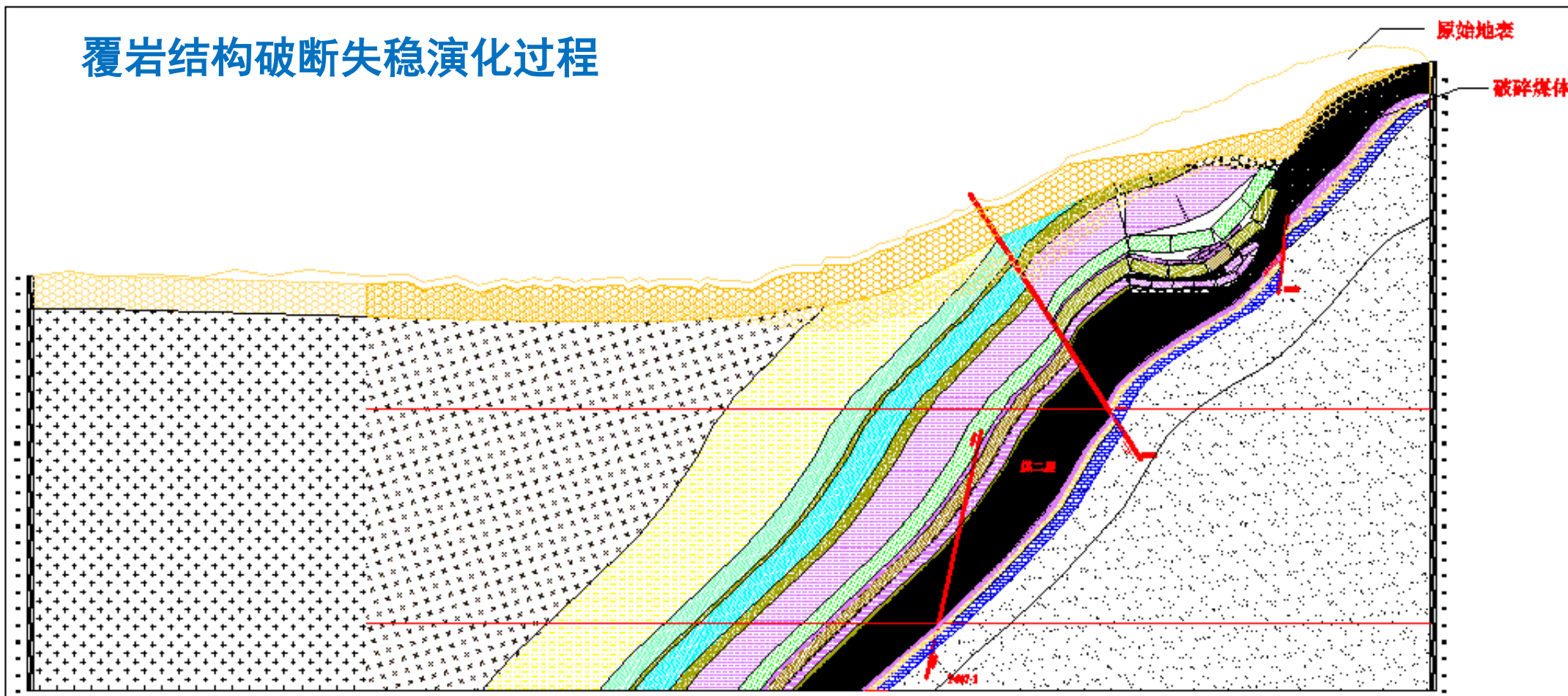


□ 夹持煤柱型冲击

煤层内有断层

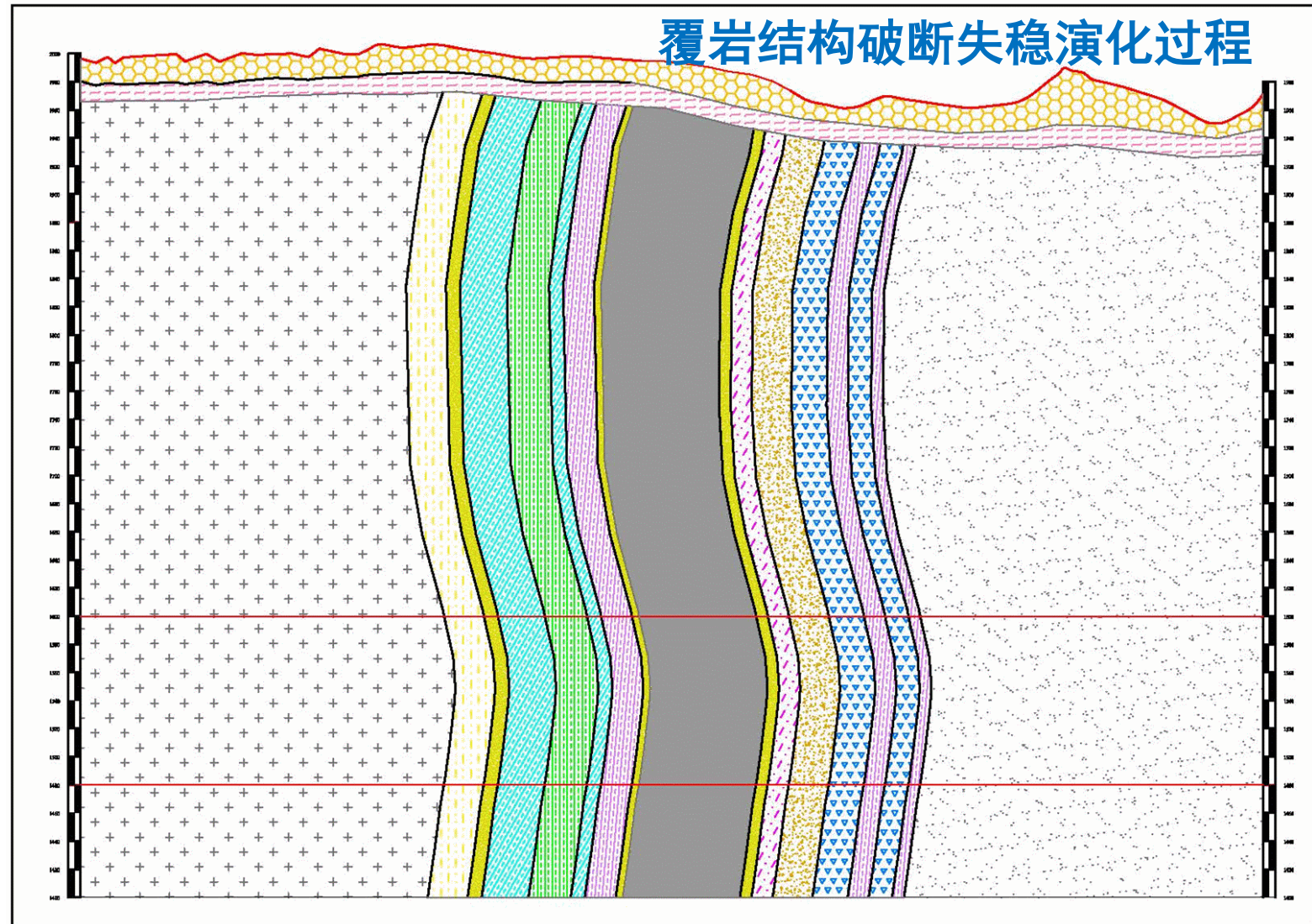


覆岩结构特征



窑街三矿五采区—急倾斜煤层（60度）

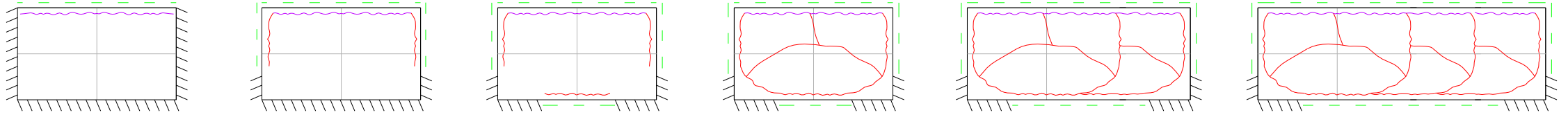
覆岩结构特征



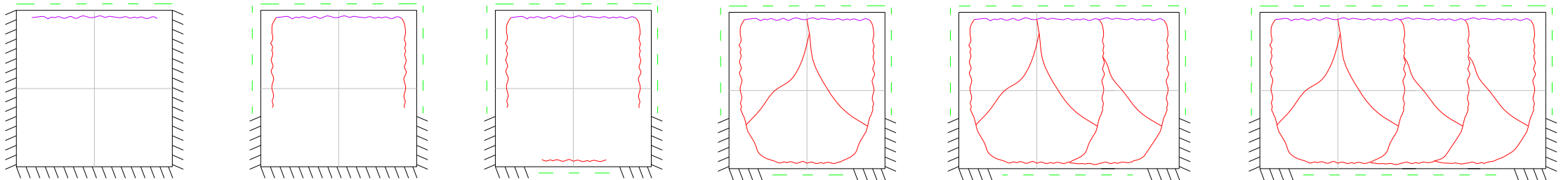
窑街三矿七采区一近直立煤层（85度）

水平分段夹持型冲击矿压机理

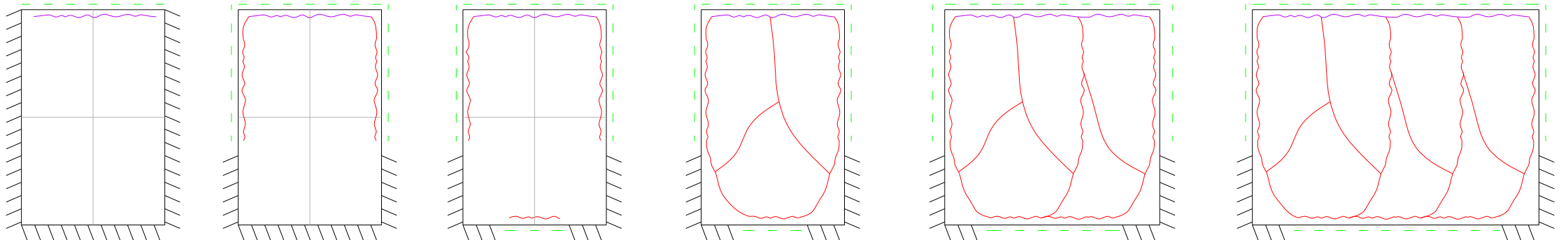
□ 急倾斜煤层顶底板的板状破断结构——U- λ



顶板破断距大于 $h/\sin\alpha$ 时，顶板破段模型为横U- λ 型



顶板破断距等于 $h/\sin\alpha$ 时，顶板破段模型为正U- λ 型

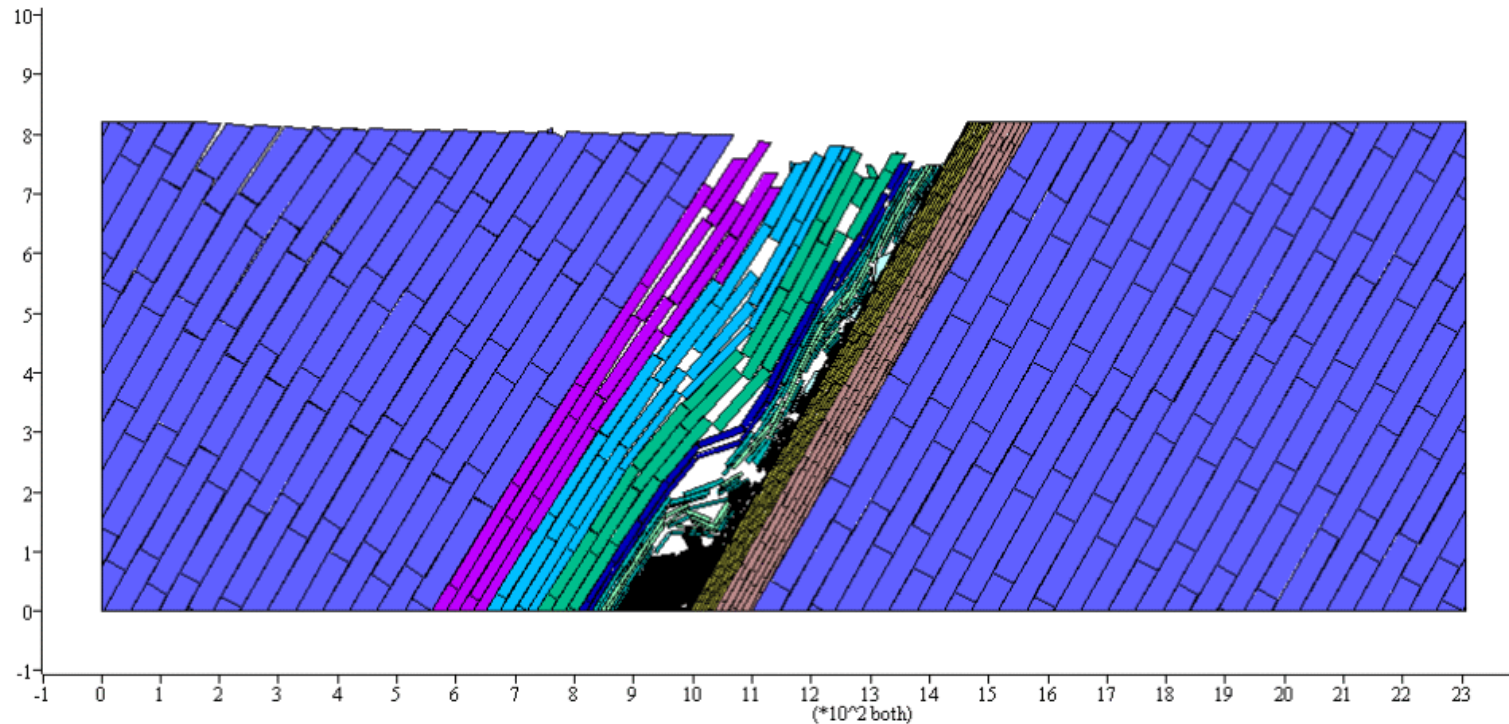


顶板破断距小于 $h/\sin\alpha$ 时，顶板破段模型为竖U- λ 型

□ 急倾斜煤层覆岩破断垮落形态的数值模拟

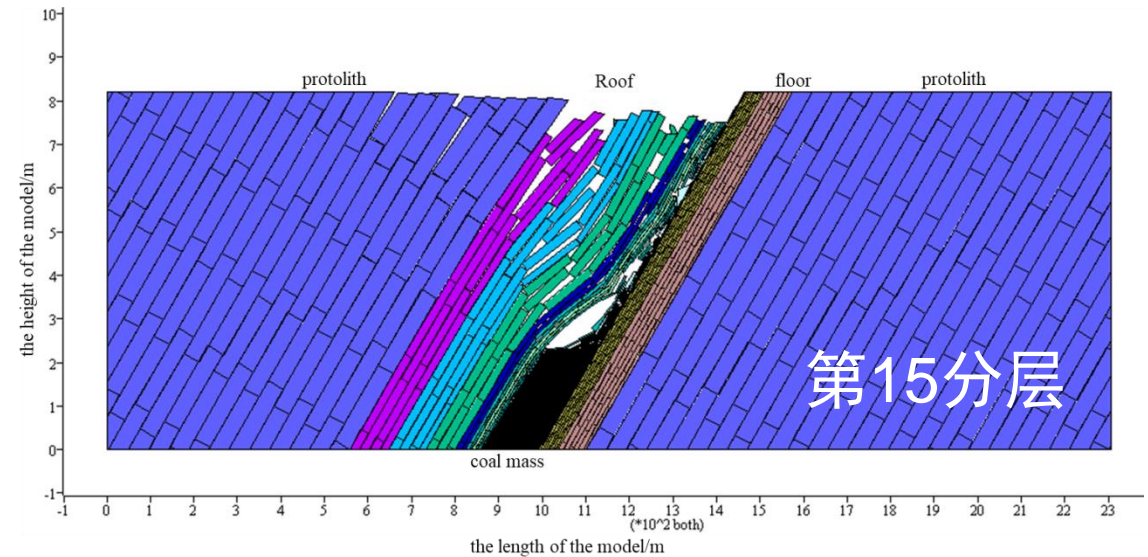
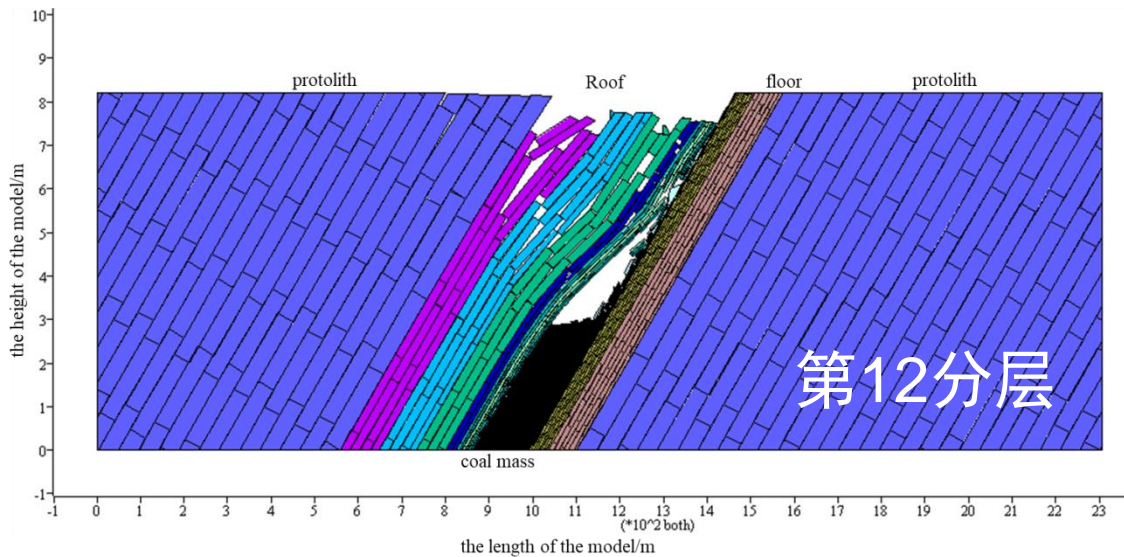
➤ **多重铰接岩梁**：急倾斜特厚煤层顶板主关键层以及亚关键层在分段开采过程中均有可能形成铰接岩梁结构，它们既相互独立又互相影响，将多个结构进行叠加，组合体称为“多重铰接岩梁”结构。

➤ **“多重铰接岩梁”结构周期性失稳规律**：对比分析数值模拟每分层开挖后的覆岩形态，可以发现每开采3-4个分层（每层高15m），组合体将出现重复失稳，将其称为急倾斜特厚煤层水平分层开采“多重铰接岩梁”结构周期性失稳规律。

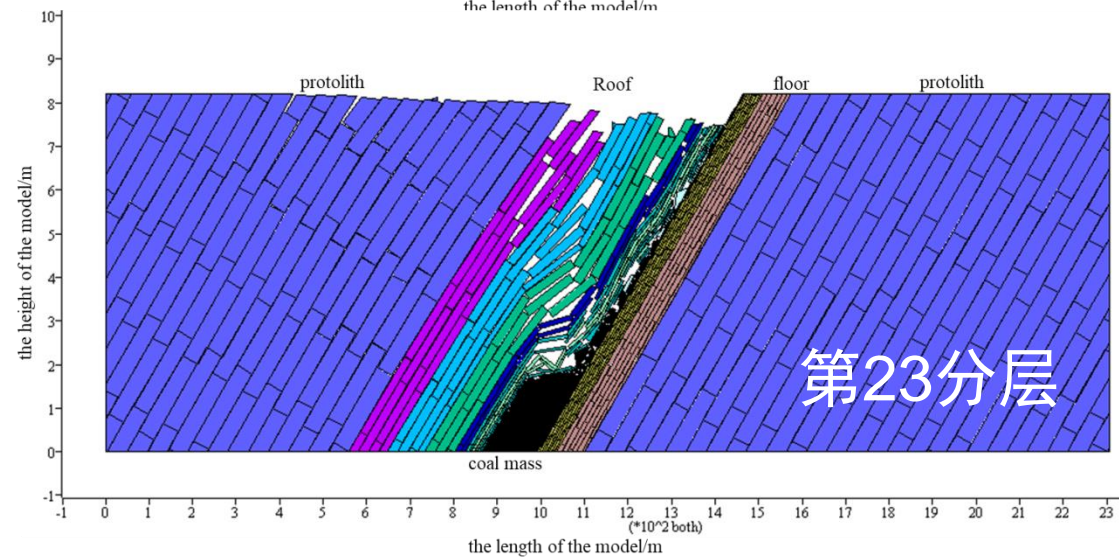
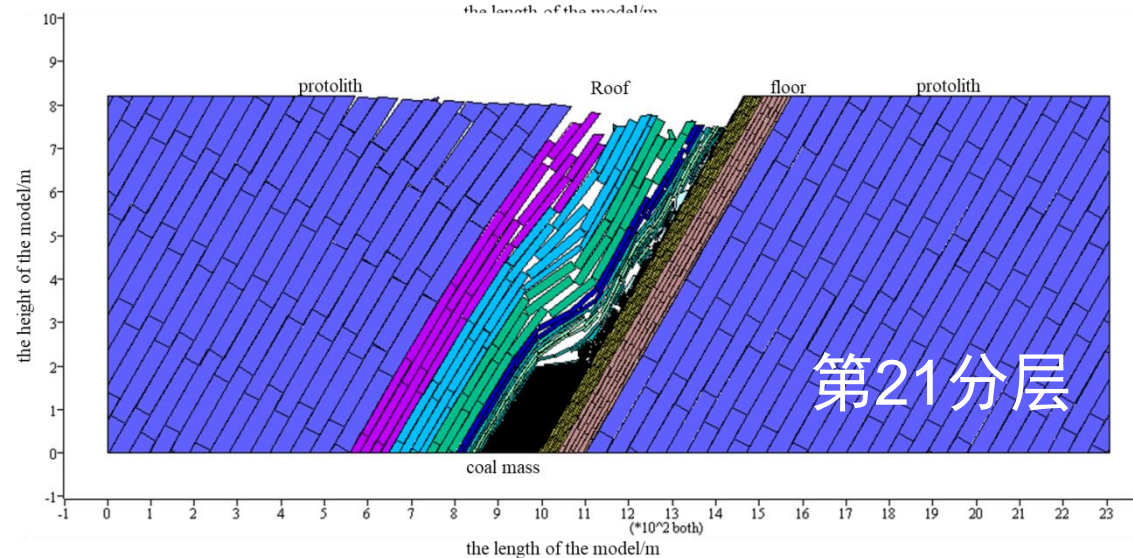
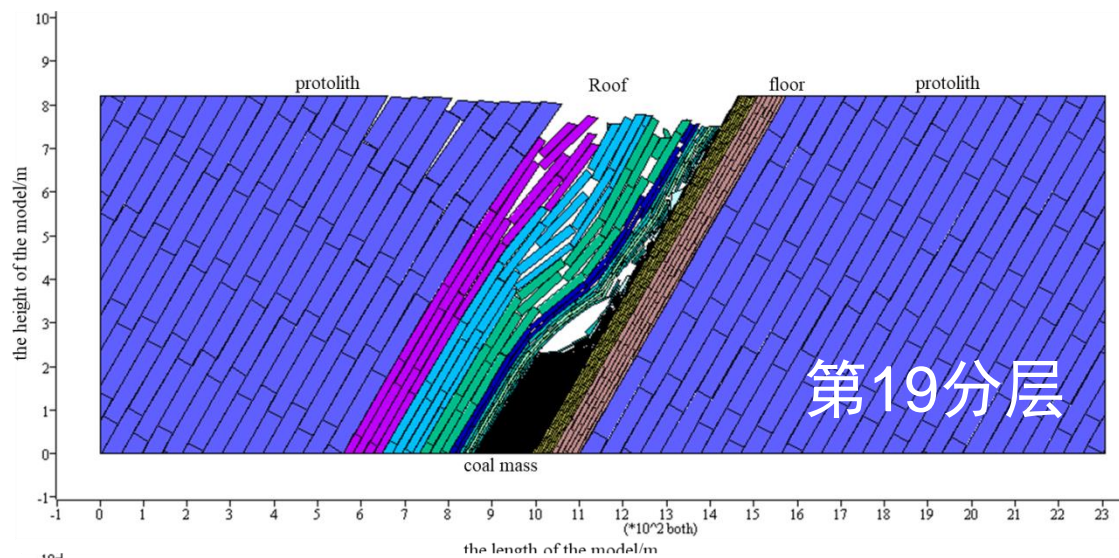
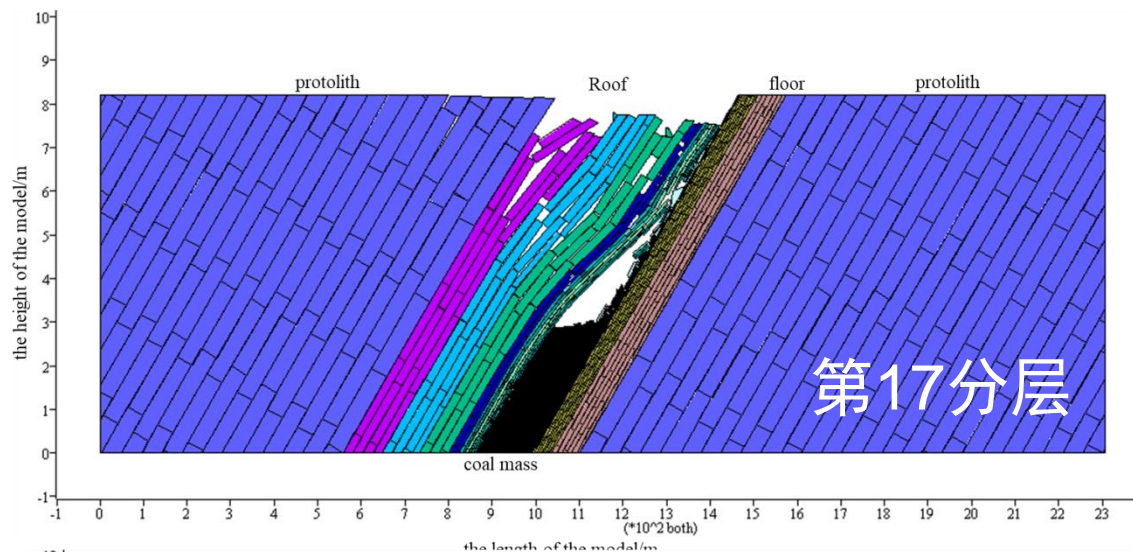


□ 急倾斜煤层覆岩破断垮落形态

- 为了研究急倾斜特厚煤层水平分段开采“裂隙场”演化过程，均匀选取了开采至第12、15、17、19、21、23、25、27分层时的覆岩垮落图进行分析对比。

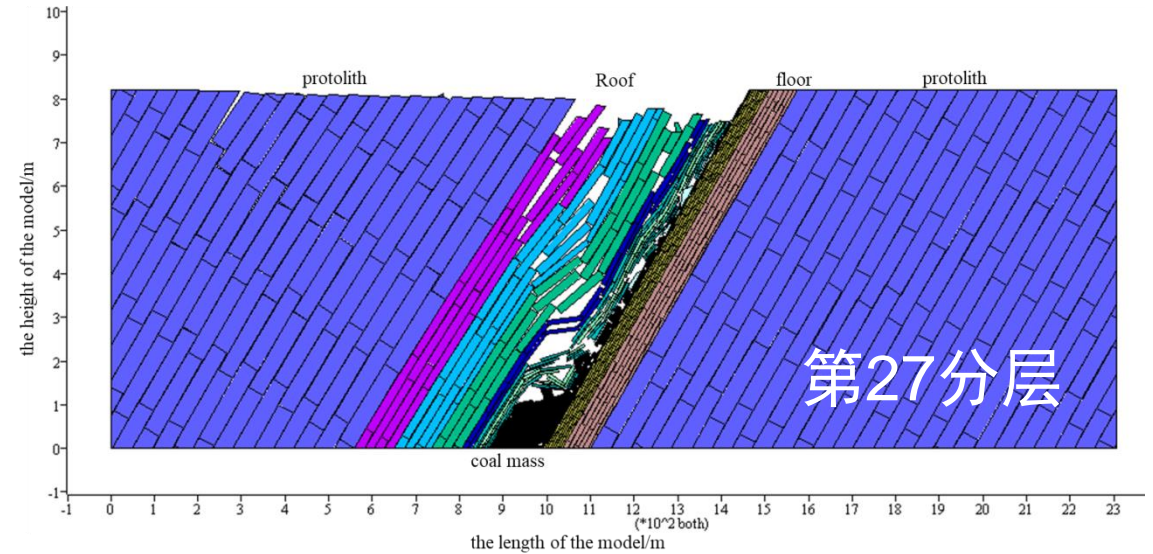
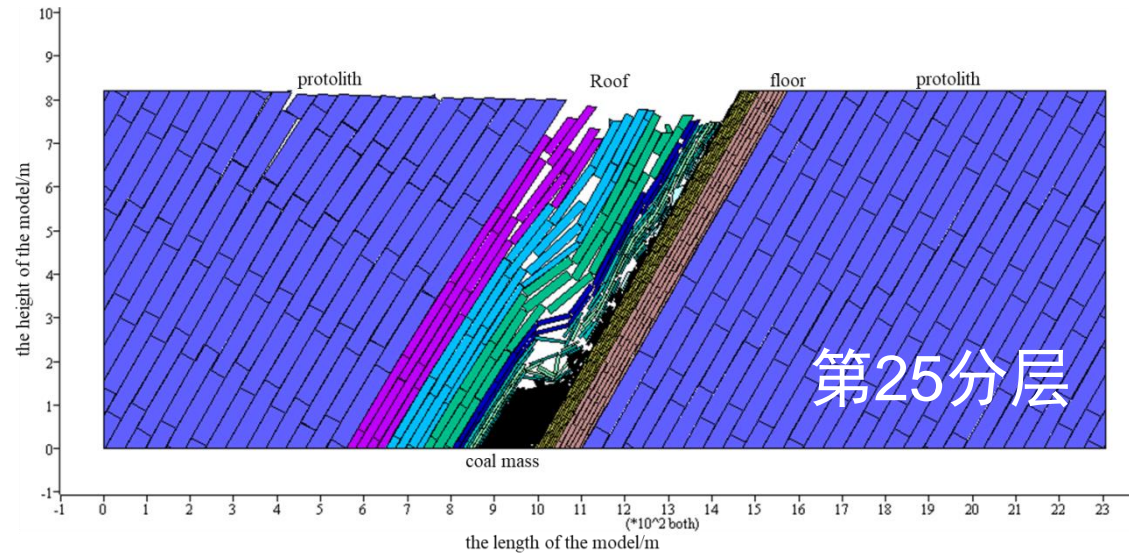


□ 急倾斜煤层覆岩破断垮落形态



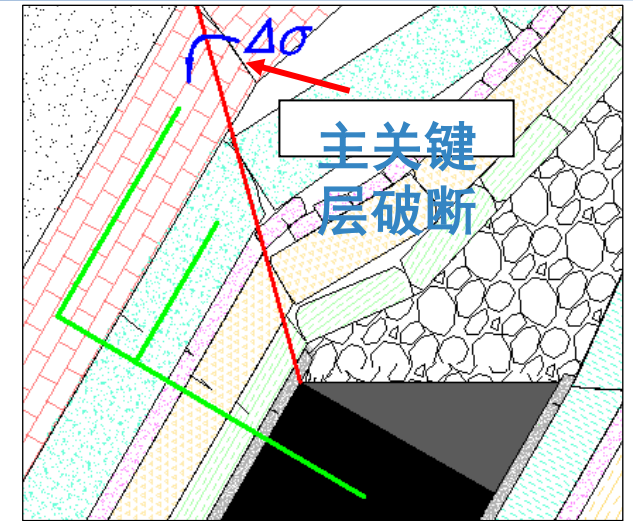
□ 急倾斜煤层覆岩破断垮落形态

- **浅部开采：**急倾斜特厚煤层水平分段开采中，过程中关键层随着煤体的多层开挖逐渐发生弯曲下沉，形成应力拱结构，而非明显的断裂、回转形成的铰接岩梁。
- **深部：**随着开采深度的增加，受静载应力升高、岩石疲劳破坏导致强度降低多种因素影响，由应力拱转化为悬臂梁，最后变为铰接岩梁。

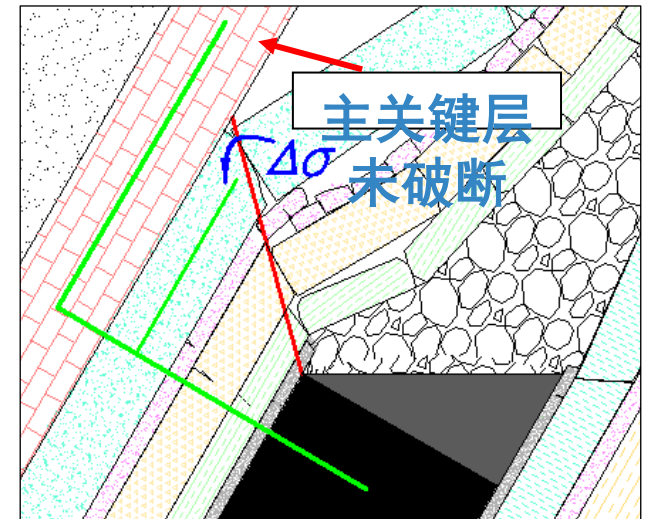


□ 覆岩对夹持煤体作用及破断结构类型

- 传递覆岩自重应力分量 $\gamma H \cos \alpha$ 和水平构造应力分量 $\lambda \gamma H \sin \alpha$ （为构造应力的侧压系数， α 为煤层倾角）；
- 覆岩破断后，覆层采空区岩层将传递至工作面煤体的应力增量 $\Delta \sigma$ ；
- 覆岩动力破坏瞬间产生动载应力 σ_d 。
- 当主关键层已破断，形成短臂“F”覆岩结构；
- 当主关键层未破断，形成长臂“F”覆岩结构。



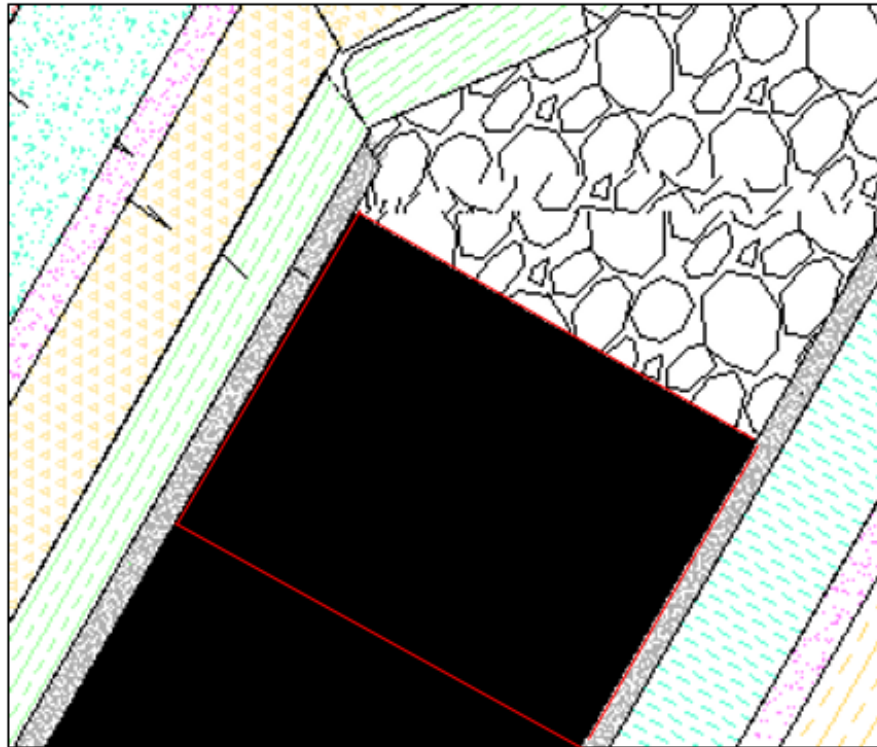
a 短臂“F”覆岩结构



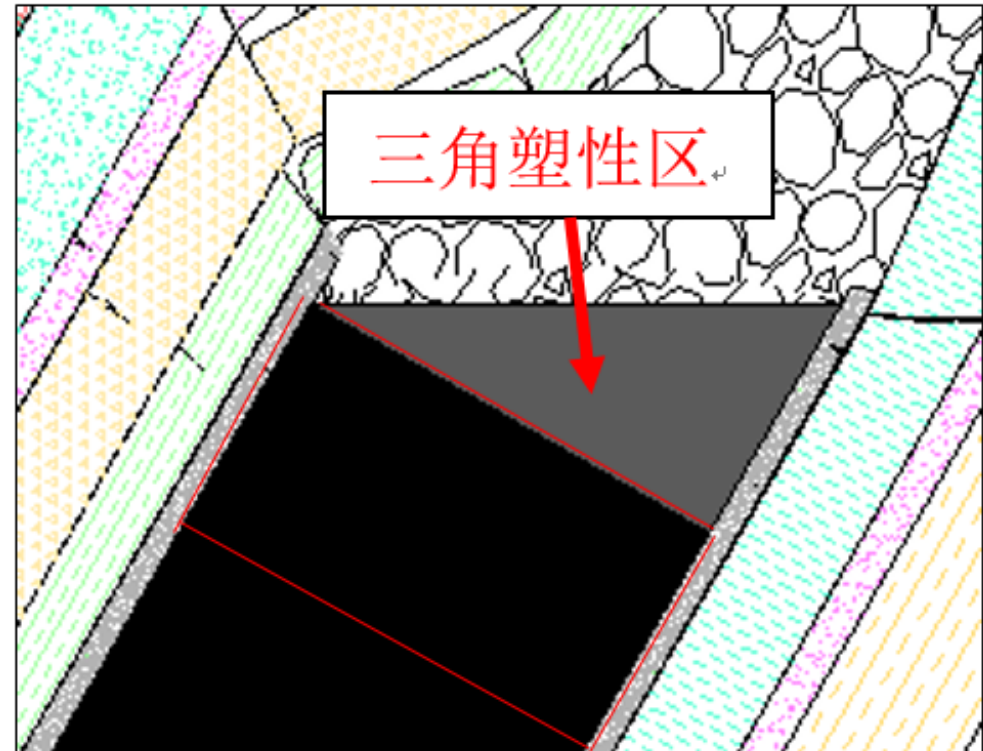
b 长臂“F”覆岩结构

□ 煤体塑性区分布情况

- 水平分段开采不同于常规大倾角回采，主要体现在顶底板的夹持煤柱为**直角梯形**，而不是大倾角回采时的**倾斜矩形**。多出来的区域为**三角煤体区域**。



a 大倾角工作面

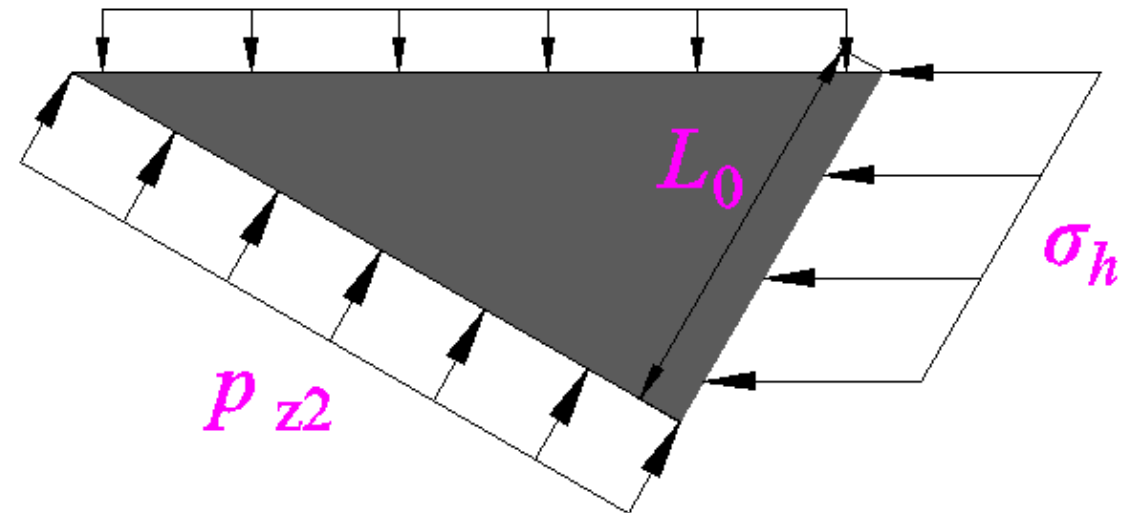


b 急倾斜水平分段工作面

□ 煤体塑性区分布情况

➤ 三角煤体区域受力极不均匀，一侧**直角边**为水平构造应力 σ_h ，**斜边**为覆层散体的载荷 P_{z1} ，另一**直角边**为一定煤体深度范围内的载荷 P_{z2} 。

➤ 显然， P_{z1} 和 P_{z2} 远小于 σ_h ，导致三角煤体区域满足摩尔库伦强度准则，因此可以称之为**三角塑性区**。



三角煤体区域受力示意图

□ 煤体塑性区分布情况

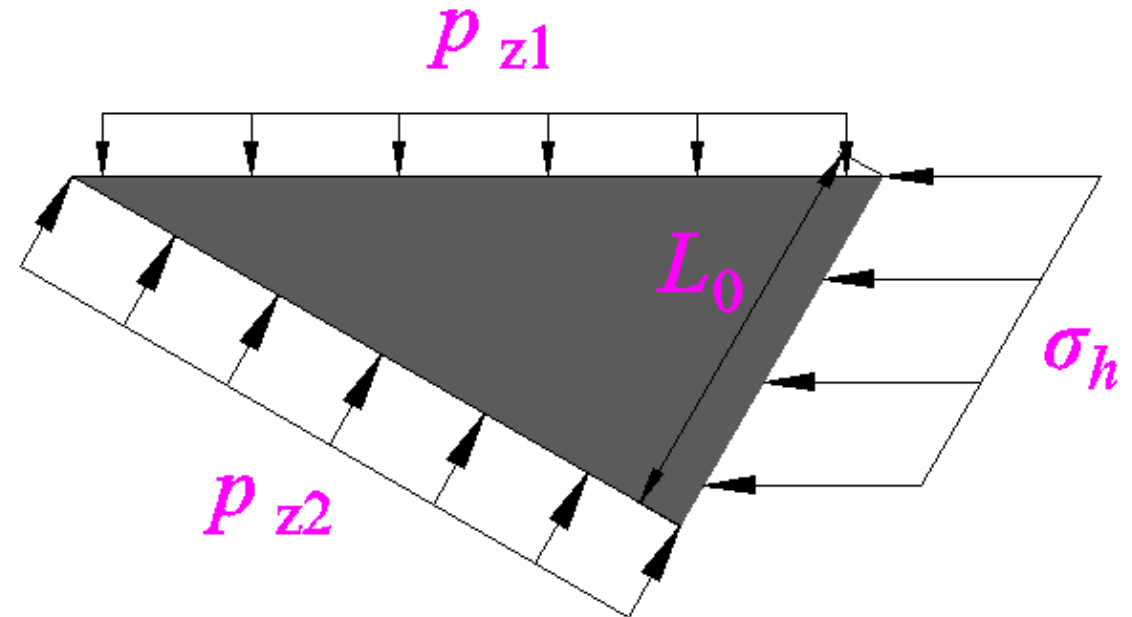
➤ 煤厚为 M ，则三角塑性区的直角边 L_0 满足 $L_0 = M \cdot \cot \alpha$ ($45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$)

三角塑性区的面积为：

$$S = \frac{1}{2} M L_0 = \frac{1}{2} M^2 \cdot \cot \alpha$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{当 } \alpha = 45^\circ, S = S_{\max} = \frac{1}{2} M^2; \\ \text{当 } \alpha = 90^\circ, S = S_{\min} = 0. \end{array} \right.$$

➤ 随着煤层倾角的增大，三角塑性区面积逐渐减小，直至为0。

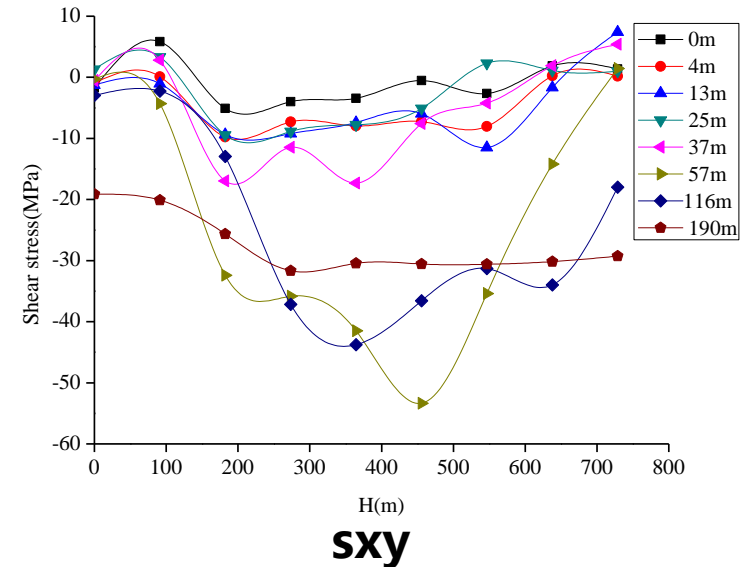
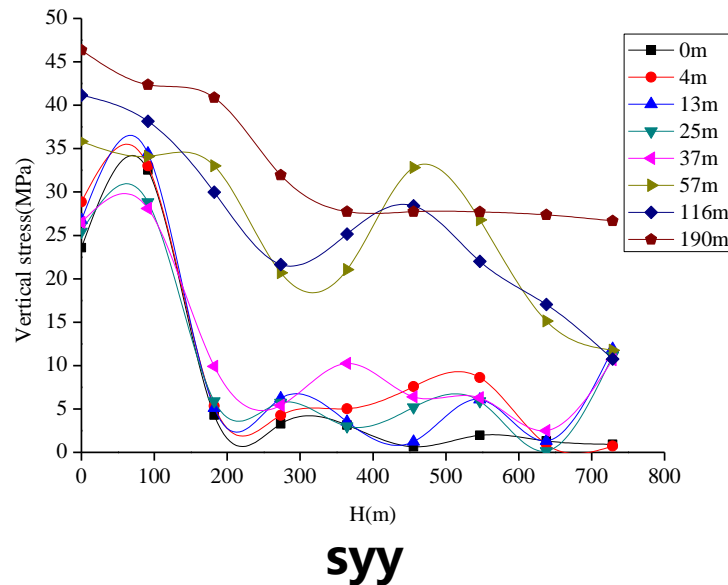
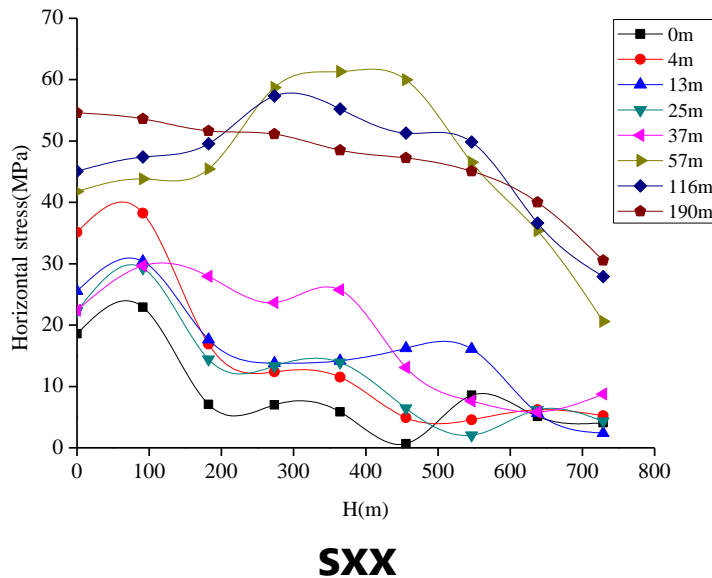


三角煤体区域受力示意图

□ 水平分段开采“应力场”分布规律

➤ 工作面开采后顶板岩层应力随垂高分布规律

工作面一定范围内的岩层处于卸压状态，局部出现应力波动，水平、垂直及剪切应力在沿岩层面法向及垂直方向上的演化规律具有一致性，均为先增大后减小。





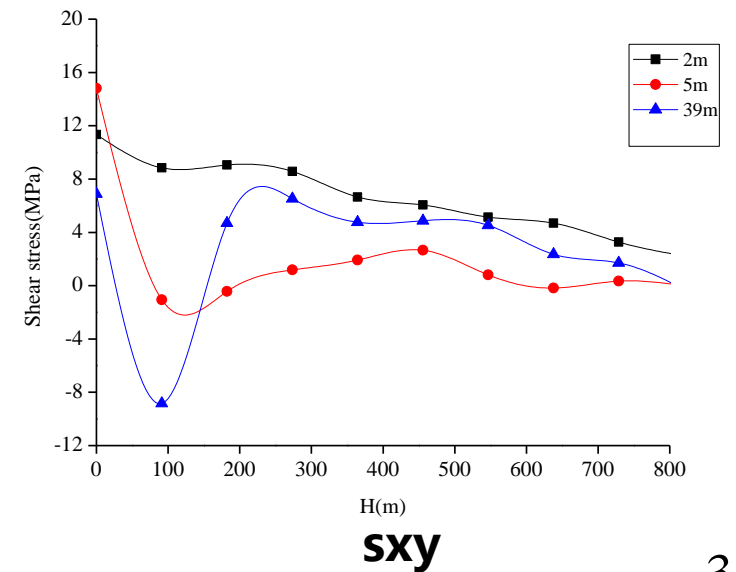
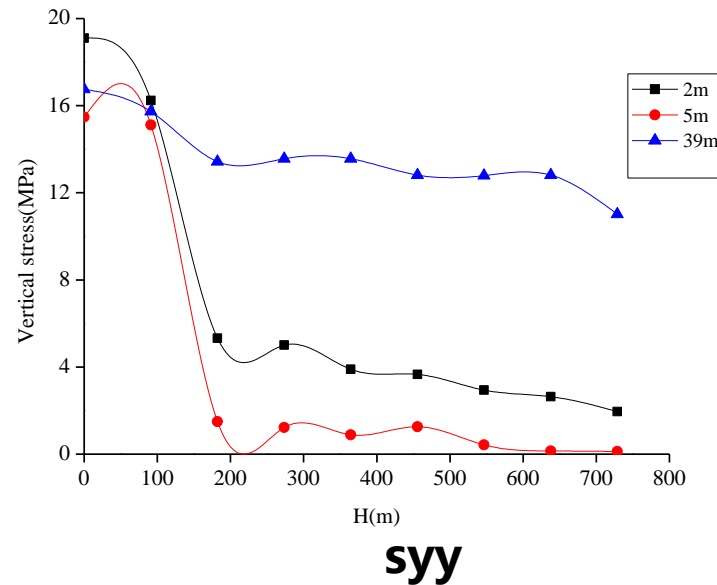
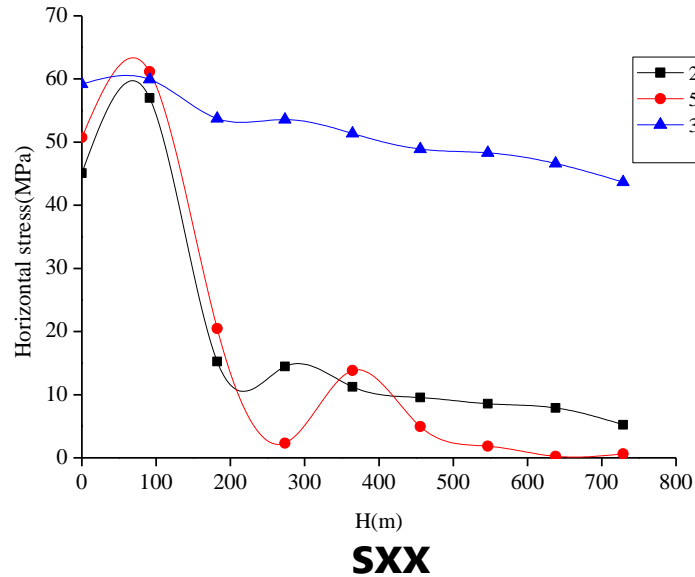
水平分段夹持型冲击矿压机理



□ 水平分段开采“应力场”分布规律

➤ 工作面开采后底板岩层应力随垂高分布规律

底板岩层整体处于卸压状态，水平、垂直及剪切应力在沿岩层面法向及竖直方向上均为先增大后减小。





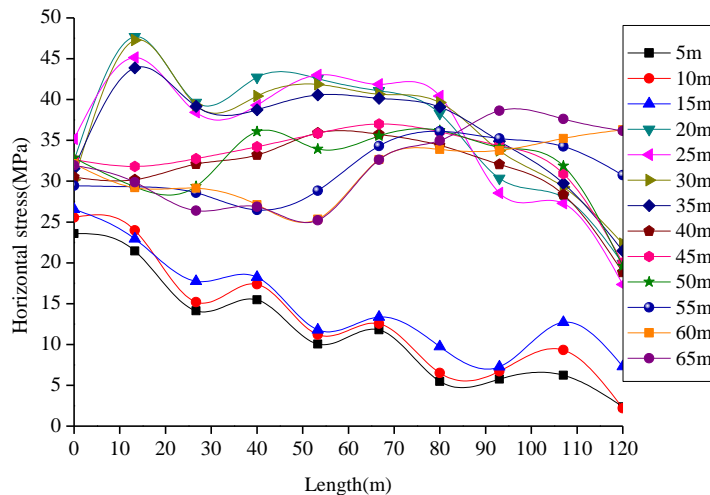
水平分段夹持型冲击矿压机理



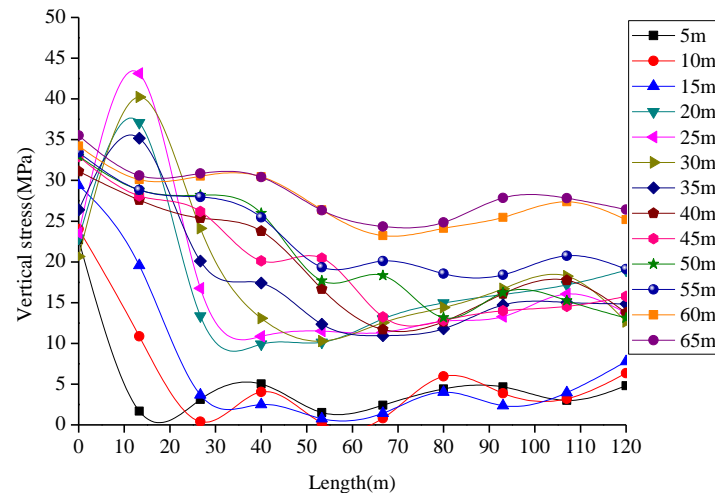
□ 水平分段开采“应力场”分布规律

➤ 工作面开采后底煤应力随工作面倾向距离（从顶板侧开始）分布规律

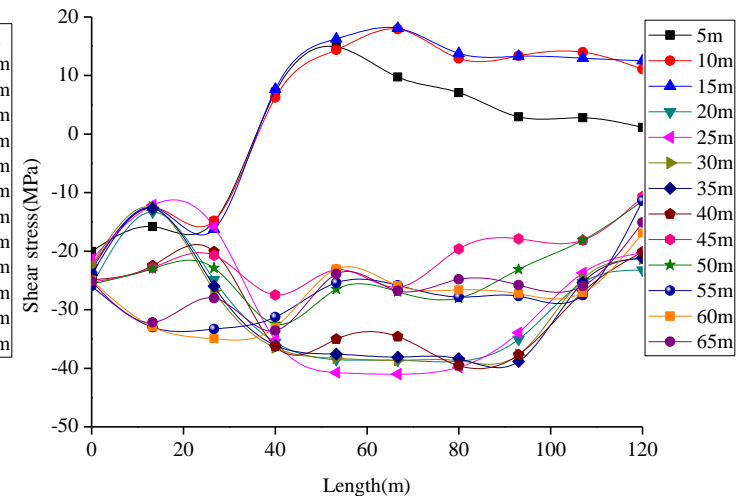
受顶、底板非对称作用，工作面底煤变形及应力状态沿倾向呈现不同的特征，主要为顶板侧“小变形，高应力”，底板侧“大变形，低应力”，工作面中部底煤“浅张拉、深压剪”。



SXX



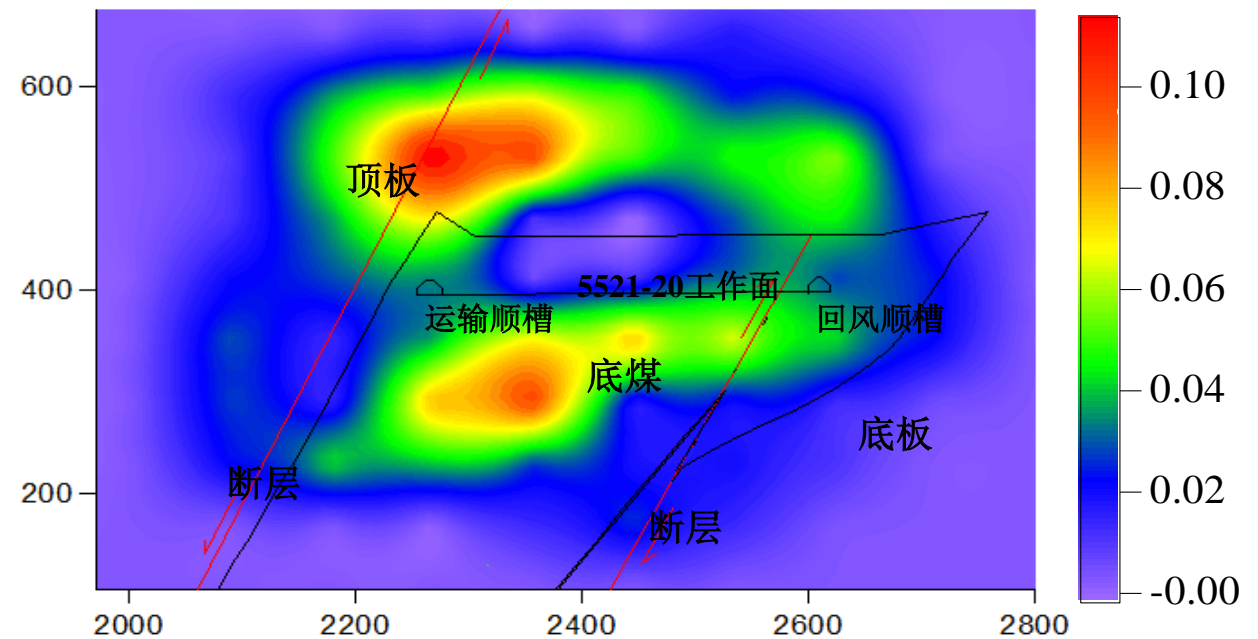
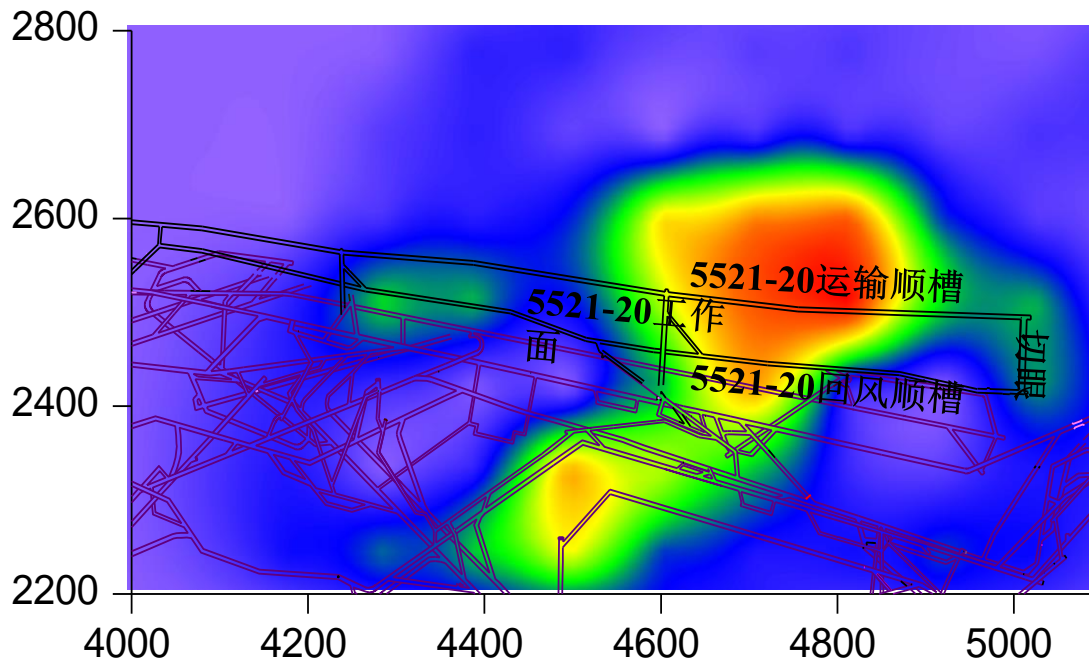
syy



sxy

□ 水平分段开采“应力场”分布规律

- 为获得工作面煤岩体中实际的应力分布情况，采用微震数据进行CT分析应力场，得到波速异常系数分布图。颜色从蓝色到红色代表应力逐渐增大。





水平分段夹持型冲击矿压机理



□ 水平分段开采“应力场”分布规律

- 由CT反演结果可以看出工作面回采后，受煤层开采卸压影响，**采空区、工作面开采水平一定范围及受采掘影响较小区域**的波速异常系数在0.00–0.12之间，处于**较低应力水平**；
- 工作面**顶板侧、深部底煤**波速异常系数在0.12–0.28之间，说明工作面覆岩破断导致顶板岩层应力集中，顶底板夹持作用下工作面深部底煤处于**高静载应力状态**；
- 在顶、底板非对称作用下，煤岩体中应力分布有**明显差异性**，高应力区域集中分布于顶板及靠近顶板一侧的深部底煤。



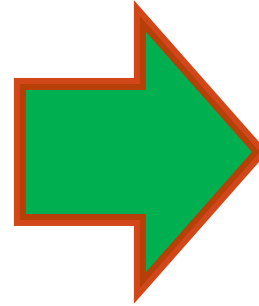
汇报提纲

- 急倾斜特厚煤层分段开采特点
- 急倾斜分段开采冲击显现特征
- 水平分段夹持型冲击矿压机理
- 急倾斜水平分段开采防冲对策



□ 强度弱化减冲原理

- 松散煤岩体，降低煤岩体的强度和冲击倾向性，使冲击危险性降低；
- 对煤岩体强度弱化后，降低应力集中程度，应力高峰向岩体深部转移；
- 降低震源动载，降低冲击危险性。

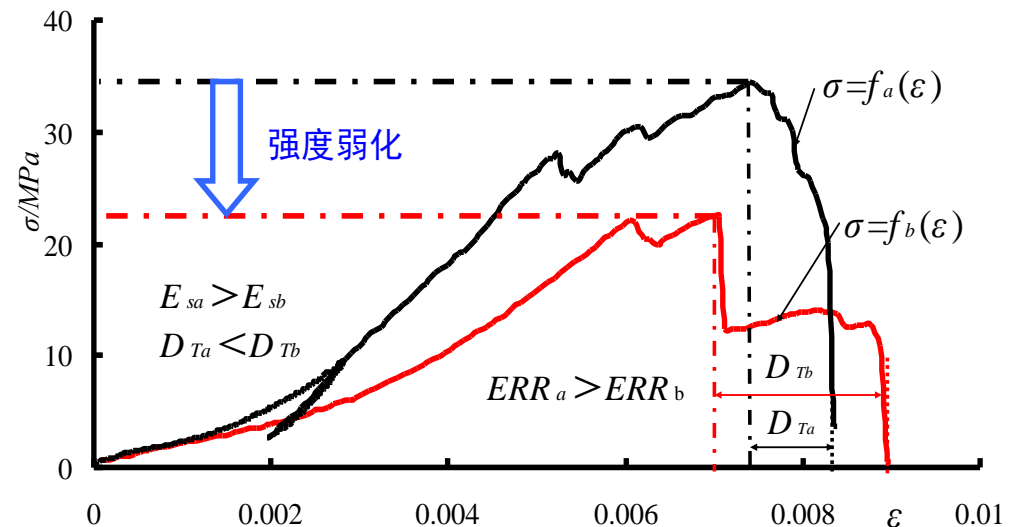
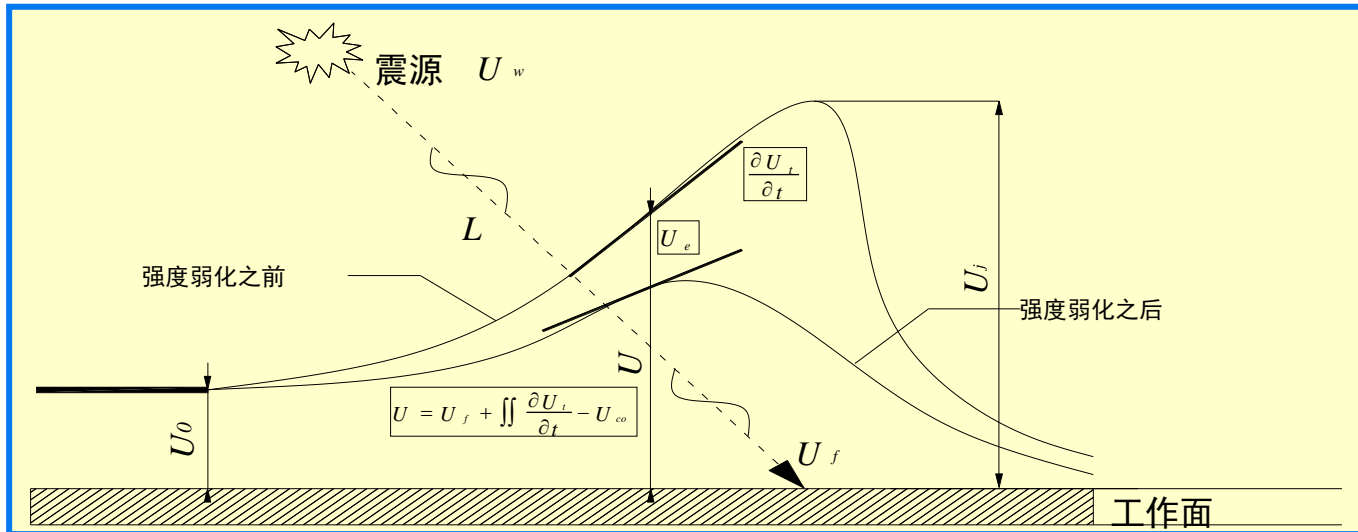


动静载叠加小于临界冲击应力

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

煤岩体弹性能小于最小冲击能，

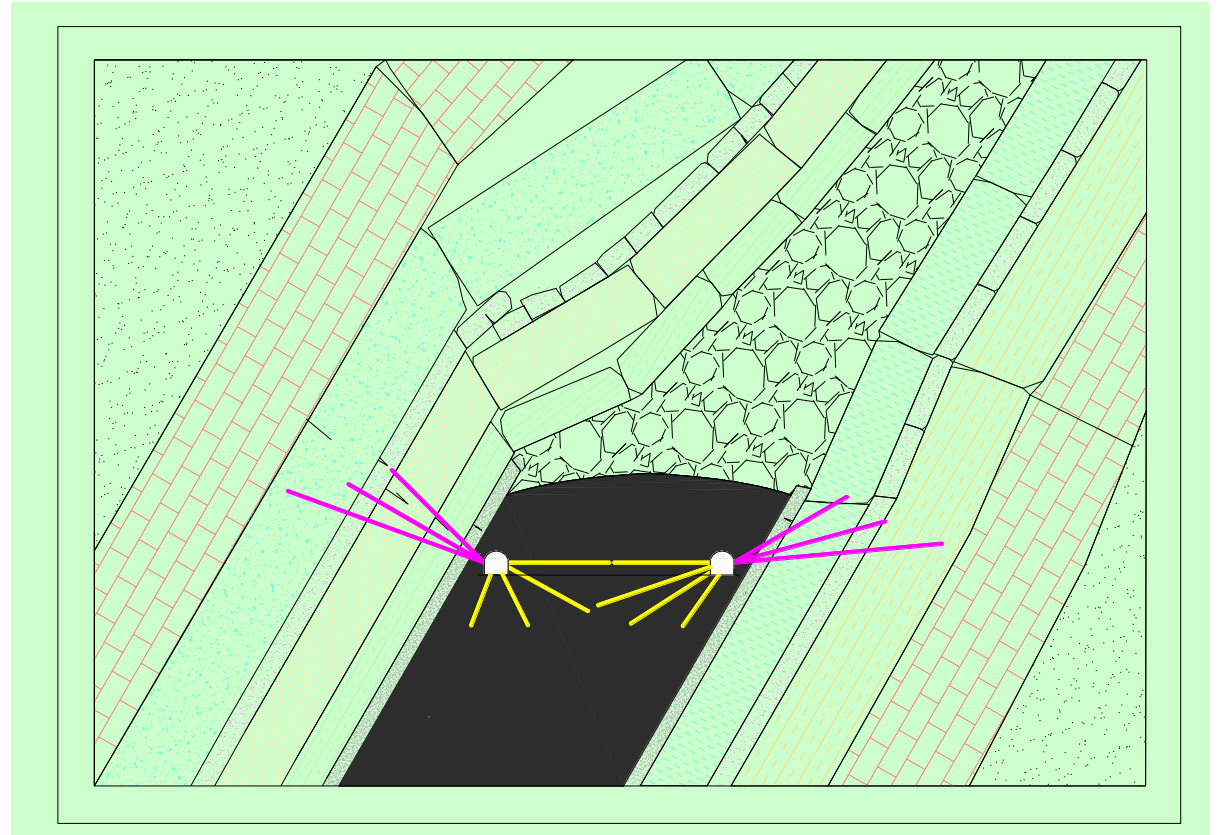
$$\frac{\partial U_t}{\partial t} = AU'_t(\sigma) \frac{d\sigma}{dt}$$



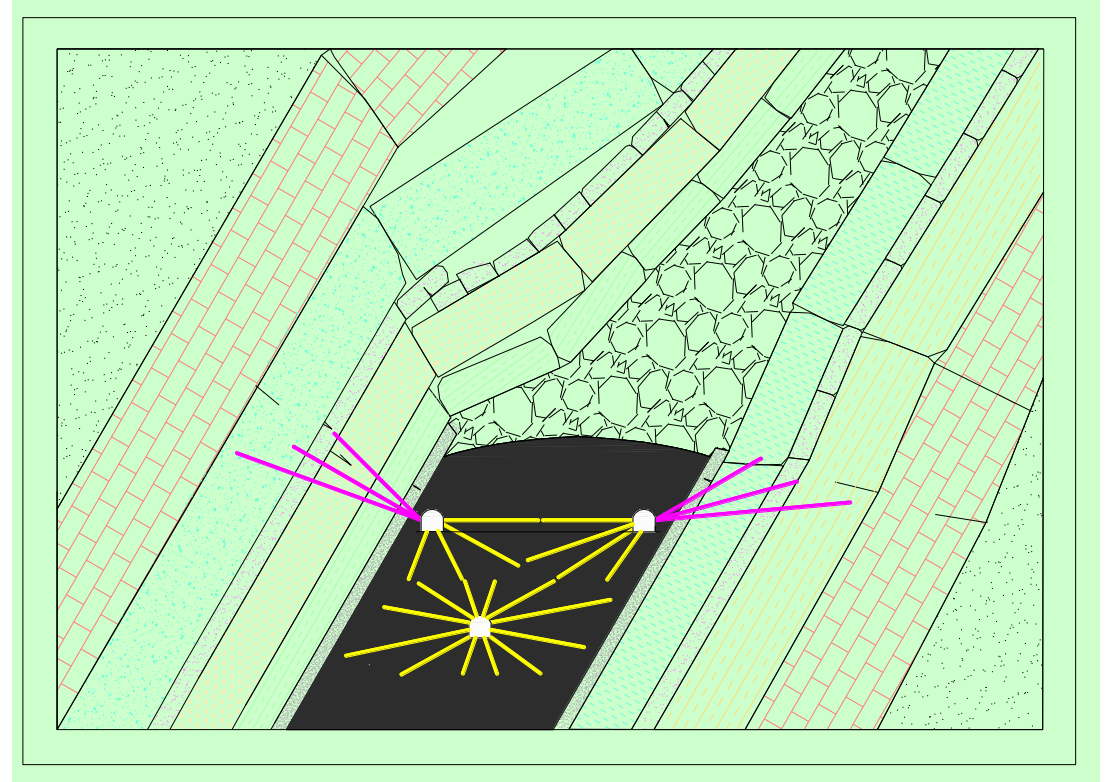
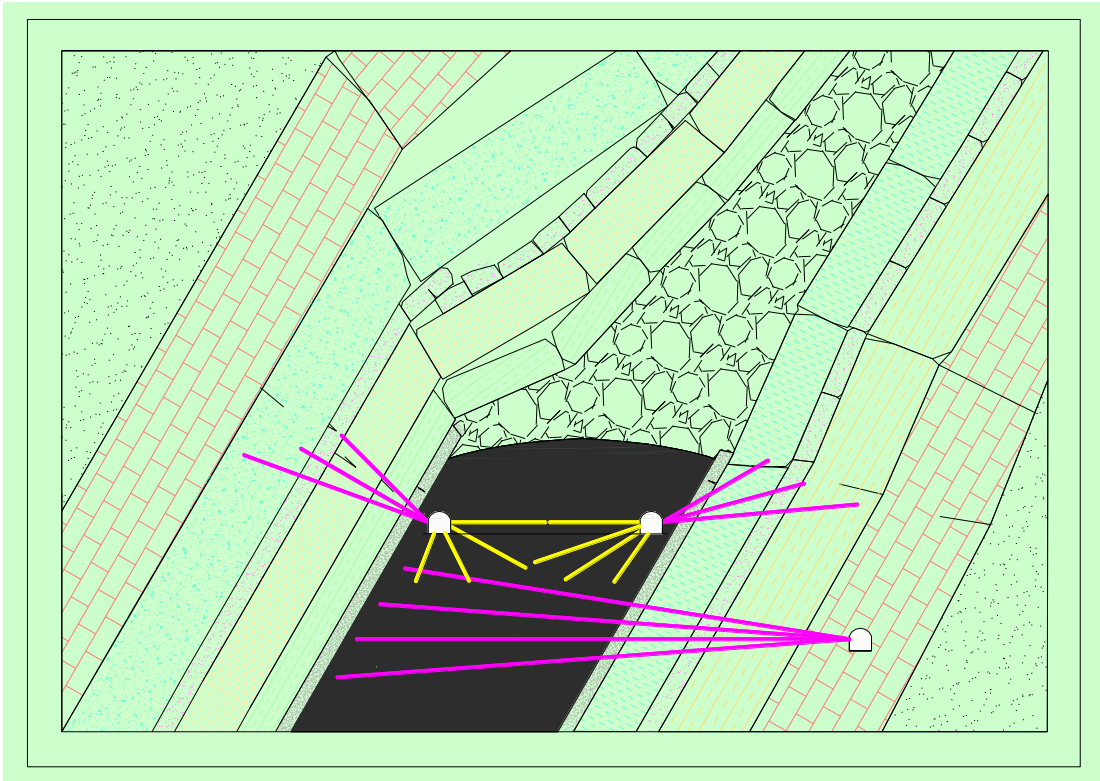
- 降低煤体的冲击倾向性
- 受夹持煤柱的卸压，降低夹持应力集中程度
- 破坏顶底板的完整性，降低夹持力

➤ 煤层 $\alpha=60^\circ$

- ✓ 本分层煤体卸压—钻孔、爆破
- ✓ 顶板、底板分层扇形爆破



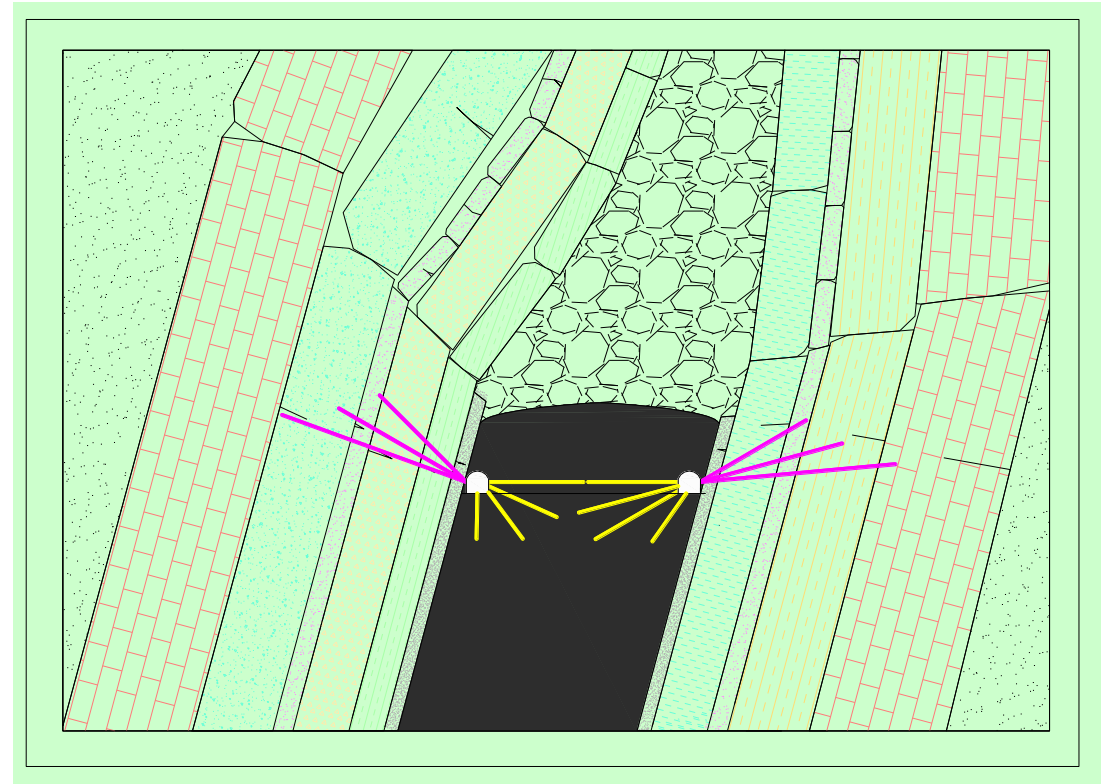
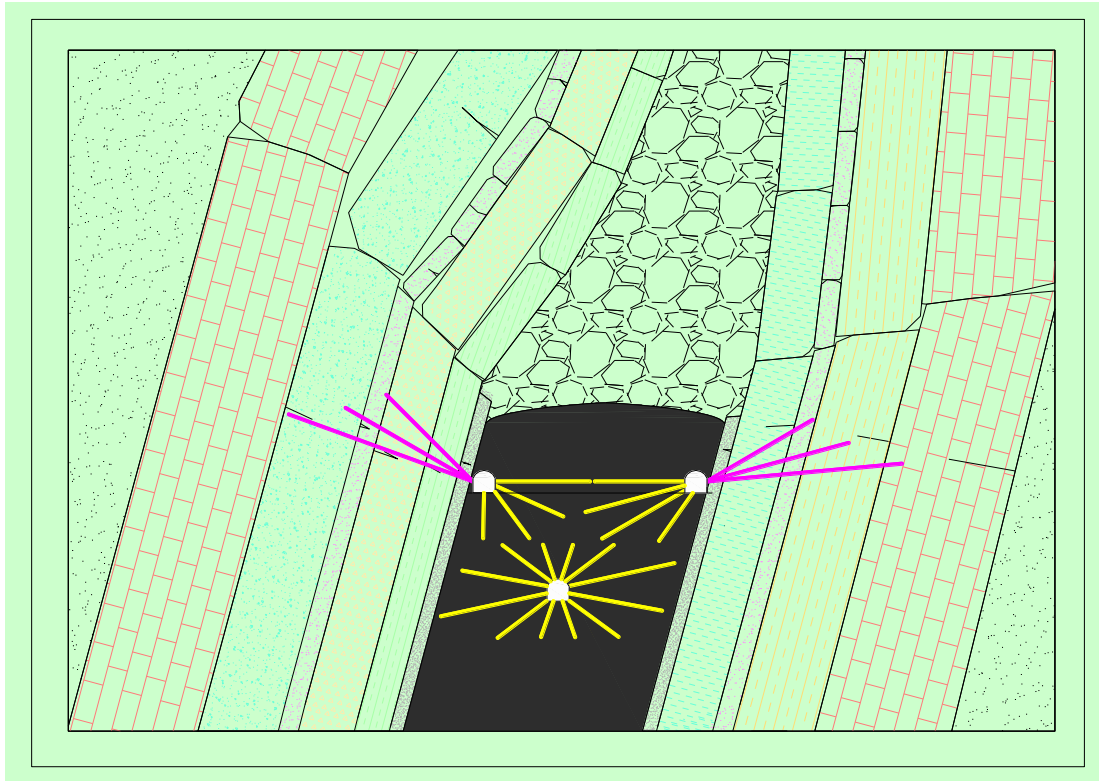
- ✓ 顶板、底板分层扇形爆破
- ✓ 本分层、底板集中煤体解危巷卸压—钻孔、爆破



- ✓ 顶板、底板分层扇形爆破
- ✓ 底抽巷向煤体卸压—钻孔、爆破

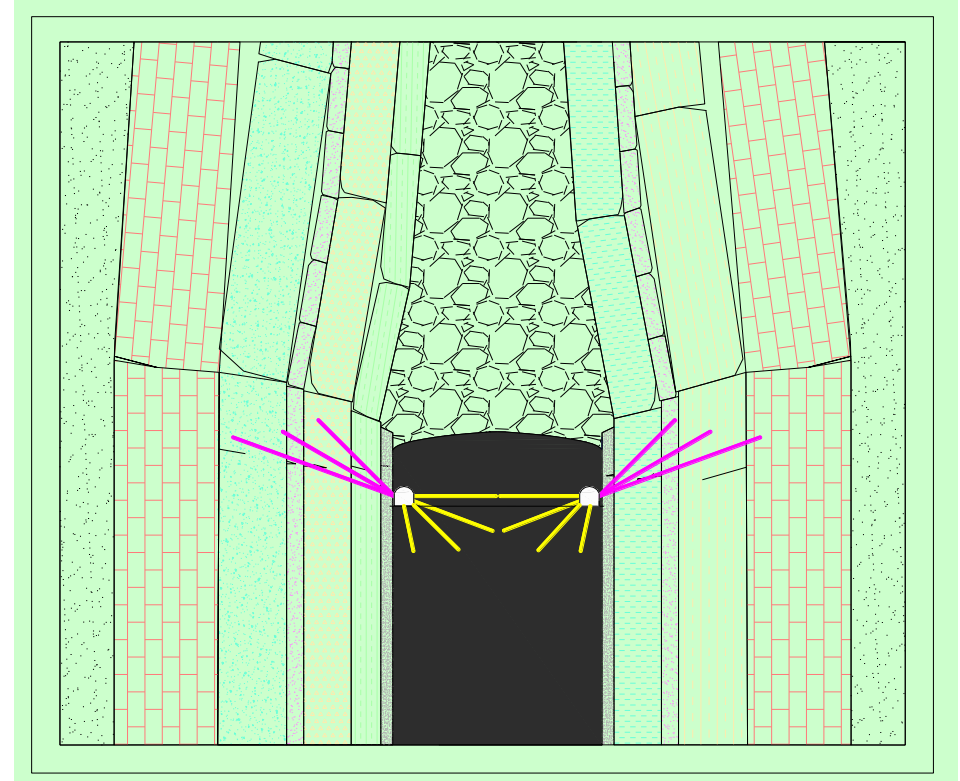
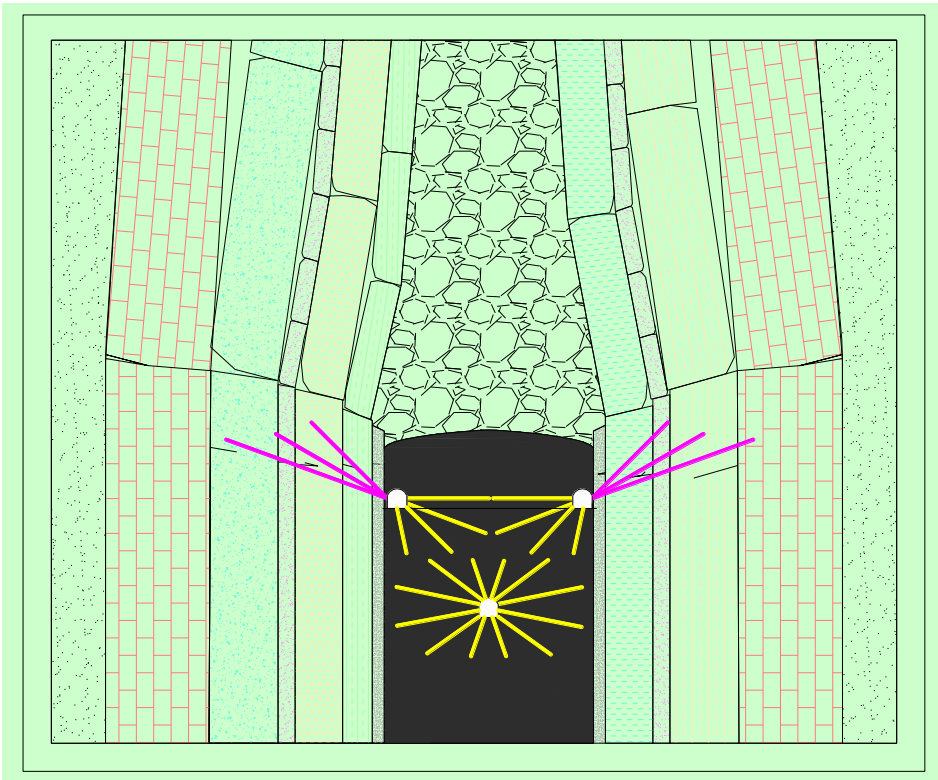
➤ **煤层** $\alpha=75^\circ$

- ✓ 本分层煤体卸压—钻孔、爆破
- ✓ 顶板、底板分层扇形爆破



- ✓ 顶板、底板分层扇形爆破
- ✓ 本分层、底板集中煤体解危巷卸压—钻孔、爆破

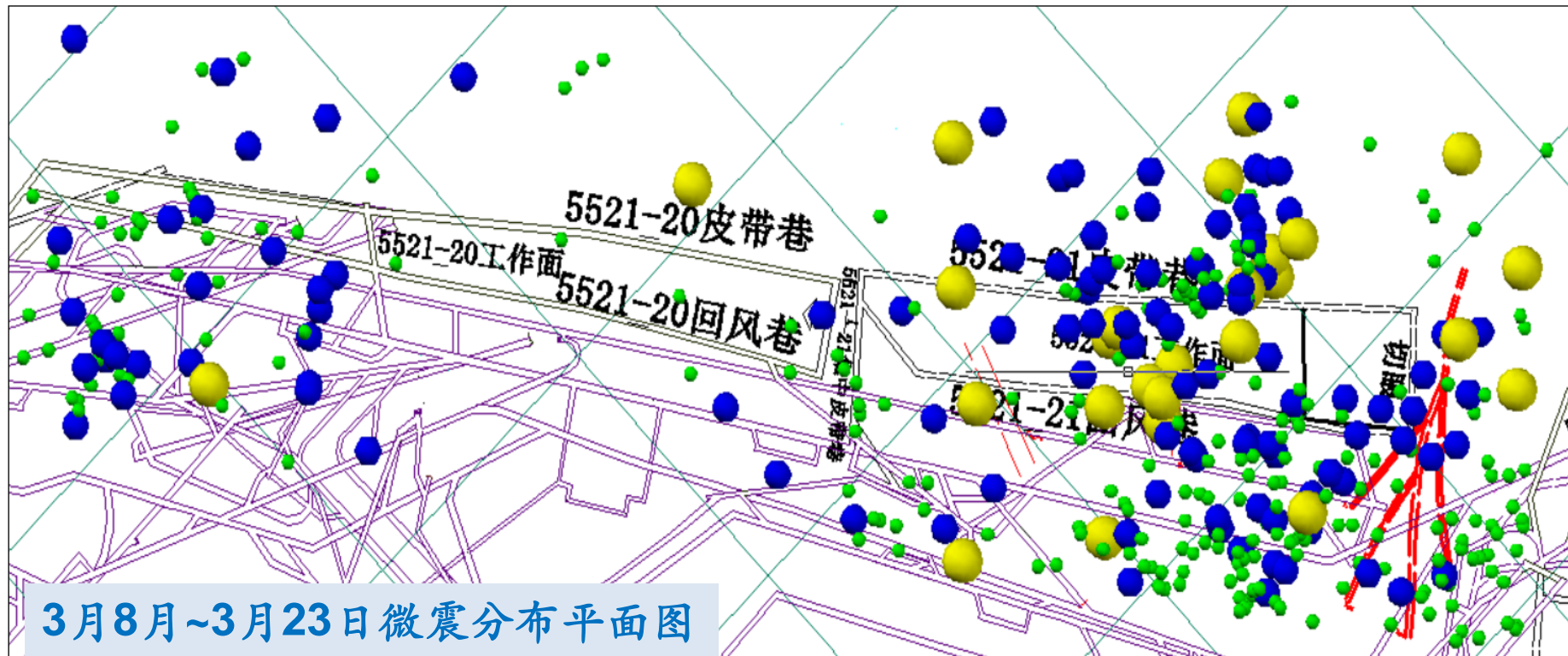
- **煤层** $\alpha=90^\circ$
- ✓ **本分层煤体卸压—钻孔、爆破**
- ✓ **顶板、底板分层扇形爆破**



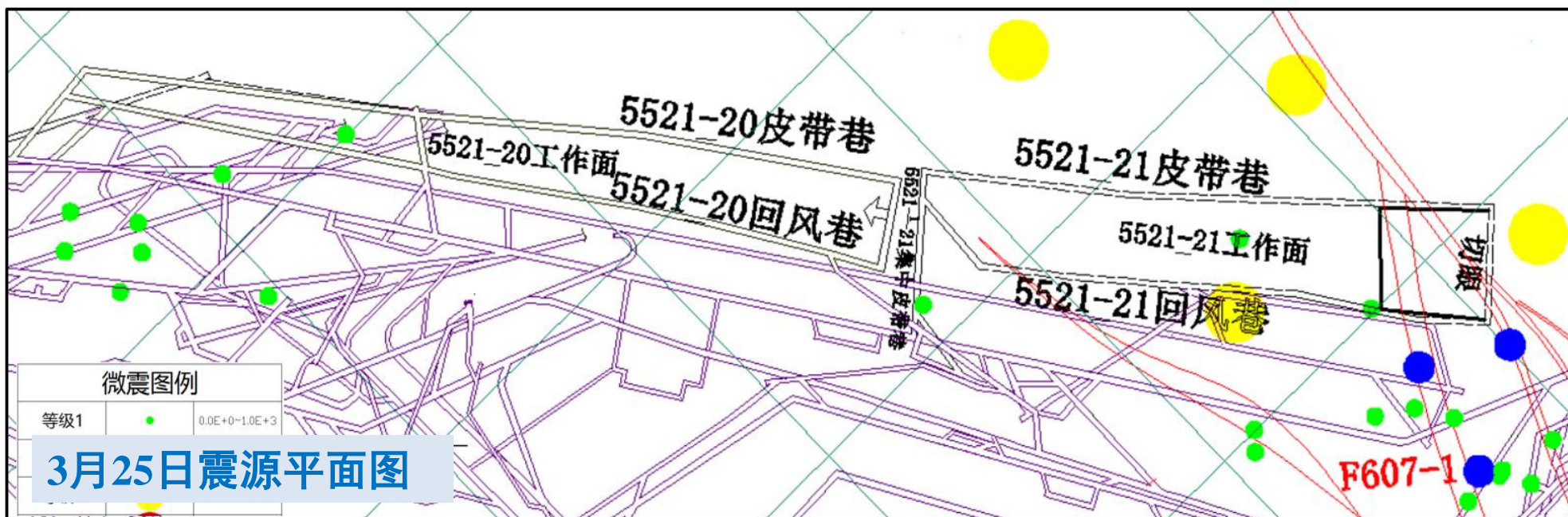
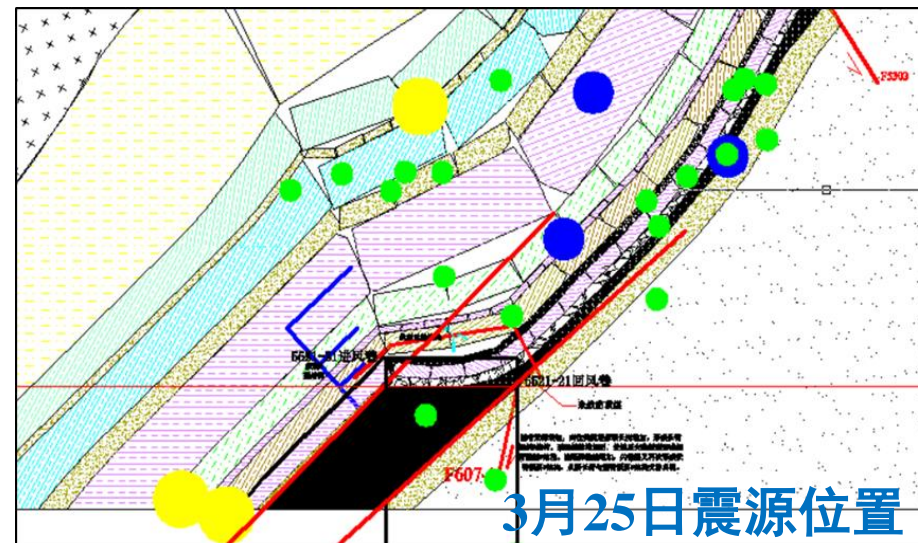
- ✓ **顶板、底板分层扇形爆破**
- ✓ **本分层、底板集中煤体解危巷卸压—钻孔、爆破**

□ 窑街三矿防冲实践

- 较大能量的矿震（ $1.0E4J$ 以上）主要分布在5521-21工作面**顶板及底板深部**，表明采取的解危措施使工作面附近的**高应力向深部转移**，而蕴藏在深部岩层中的能量释放对工作面的冲击影响较小，**解危效果明显**。



- 1. 0E4J矿震事件主要分布在5521-21工作面的顶板、底板深部以及断层附近。
- 由于工作面实体煤及顶板侧采取有效的**解危措施**，即使深部发生大于1. 0E4J矿震事件，对**工作面的影响也较小**。





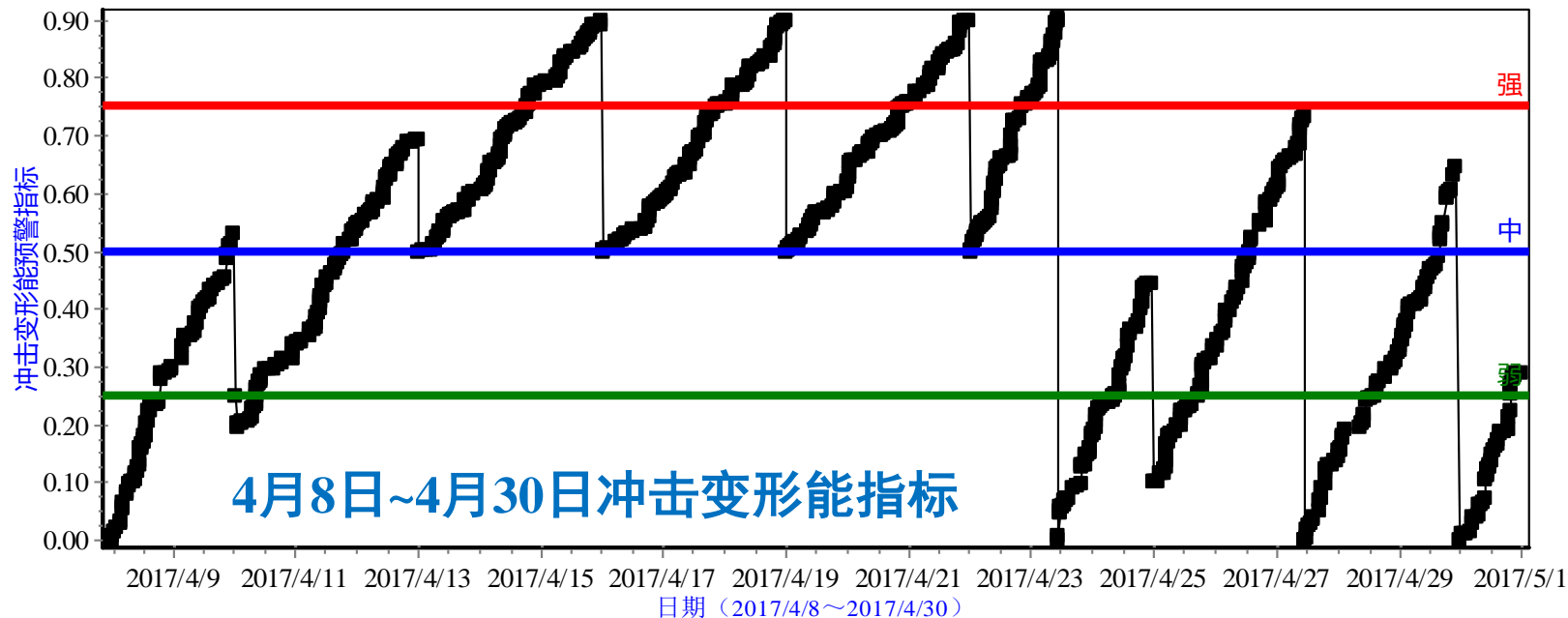
急倾斜水平分段开采防冲对策



冲击变形能预警

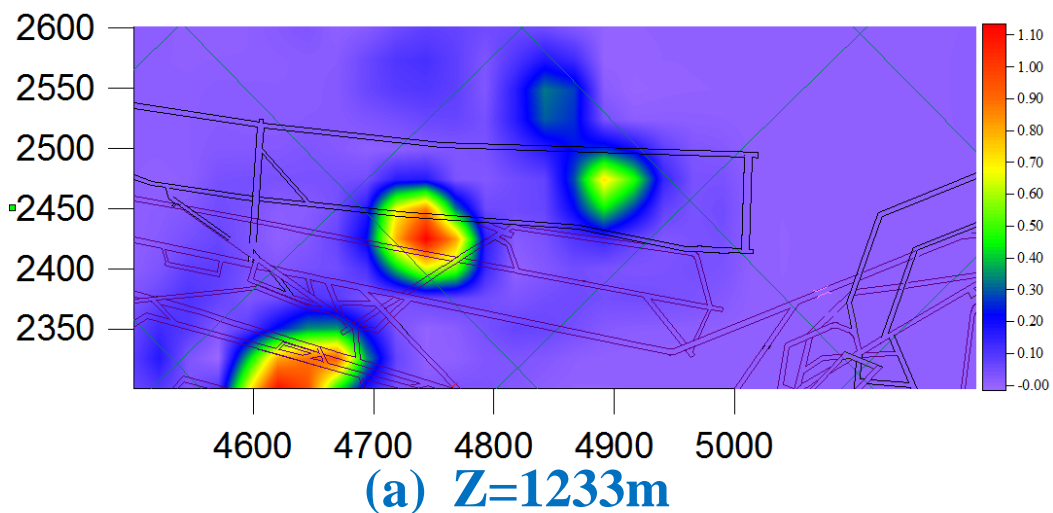
- 4月13日~4月23日期间矿震总能量存在着**集聚释放循环**，并且处于**较高的冲击危险状态**，其原因是发生的大多是单次能量较低的矿震事件。
- 随后能量处于累积阶段，期间在**4月25日**能量有小幅度释放，随后便继续集聚，直到**4月27日**有一次较大的能量释放。

该参数权重0.3333，当前危险系数0.64，危险等级中。

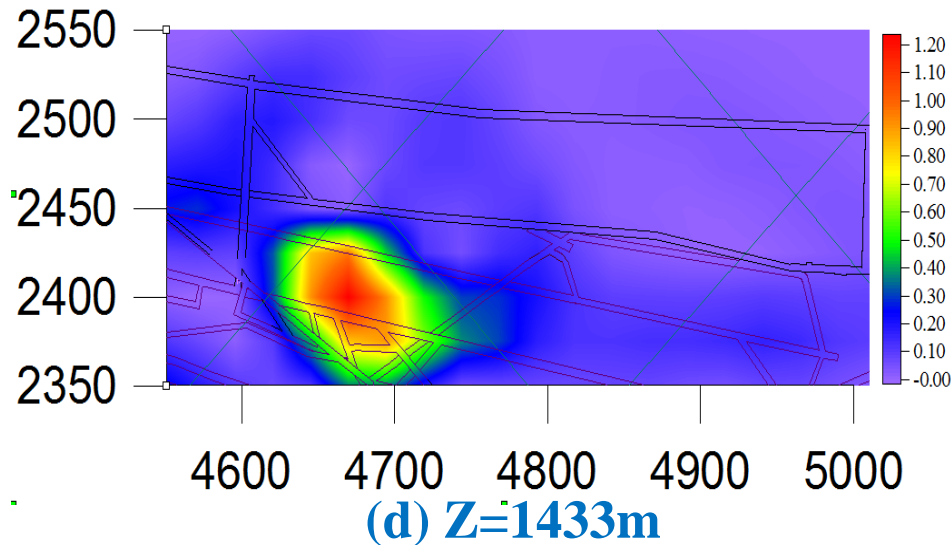
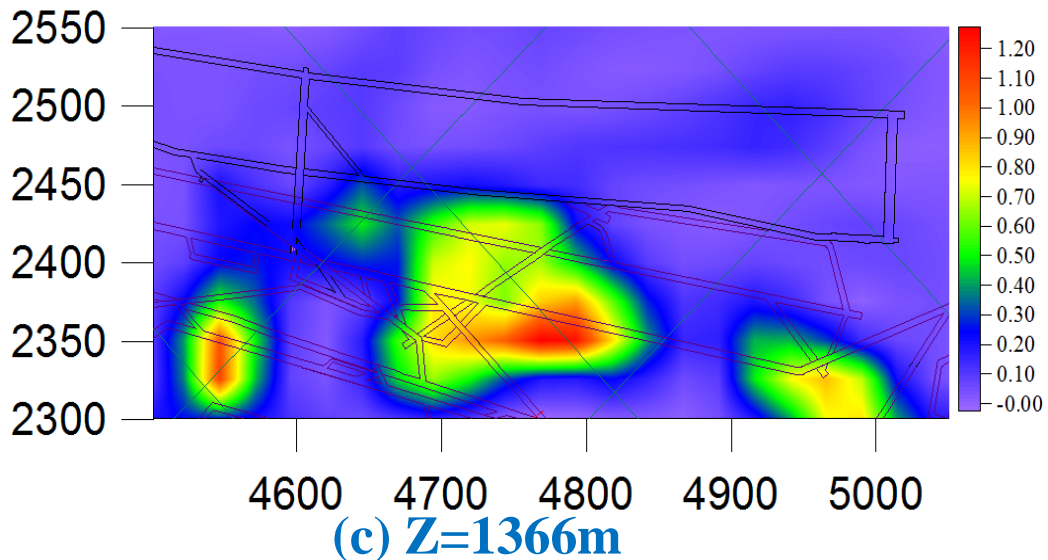
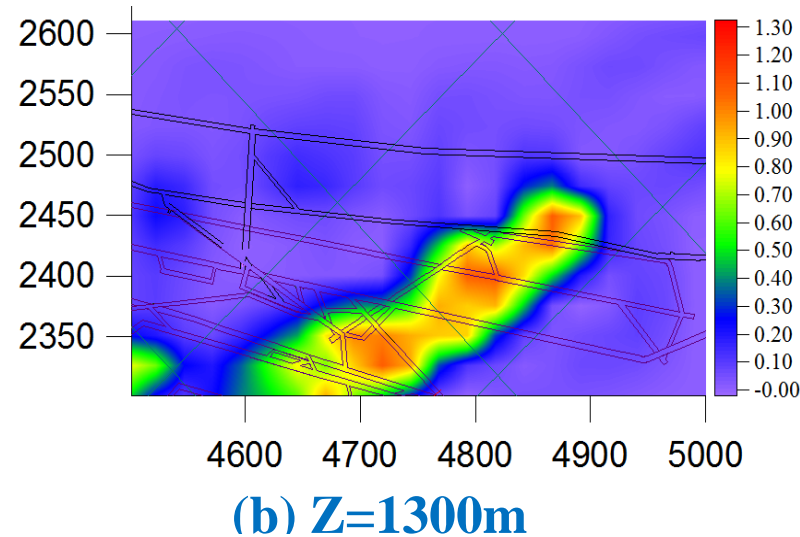


□ 震动波速CT探测

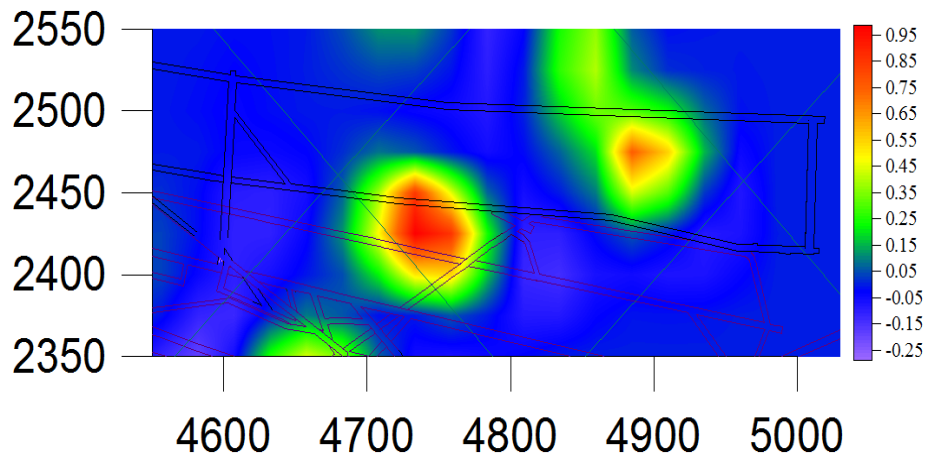
✓ 波速变化梯度值VG图



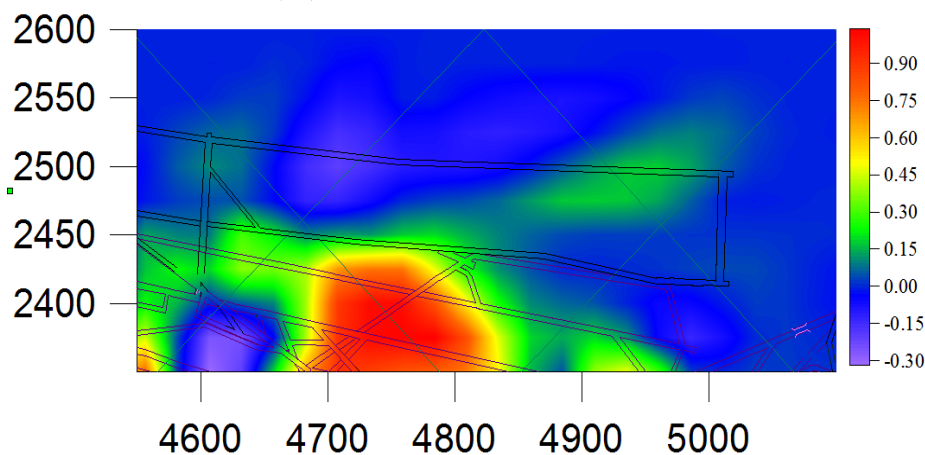
波速变化梯度值VG图
(2017.07.13~
2017.07.28)



□ 震动波速CT探测



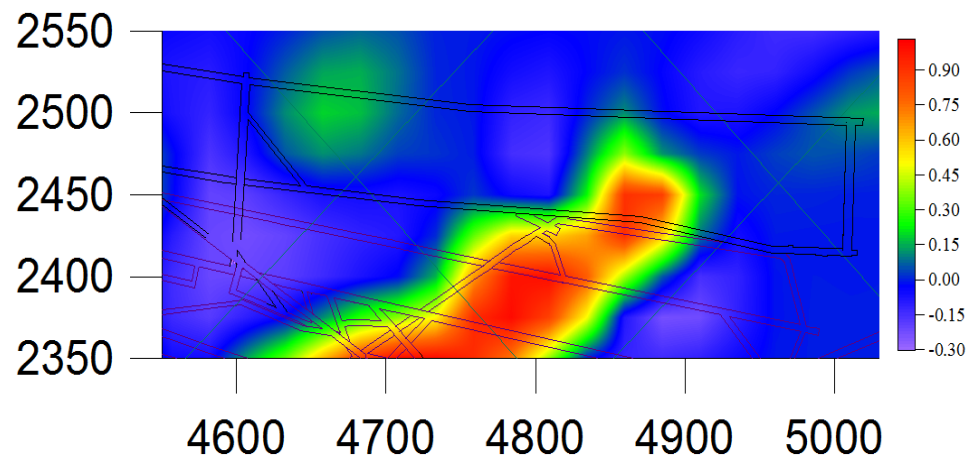
(a) Z=1233m



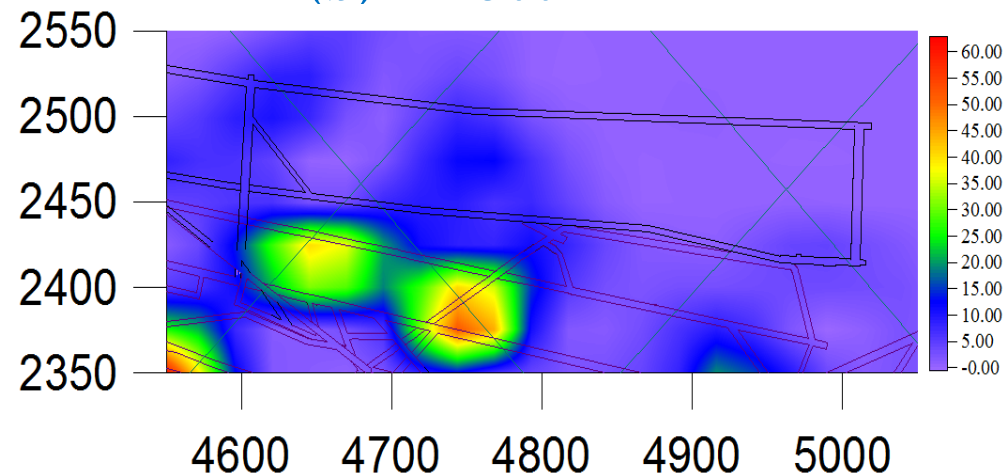
(c) Z=1366m

波速异常系数AN图
(2017.07.13~
2017.07.28)

✓ 波速异常系数AN图



(b) Z=1300m



(d) Z=1400m



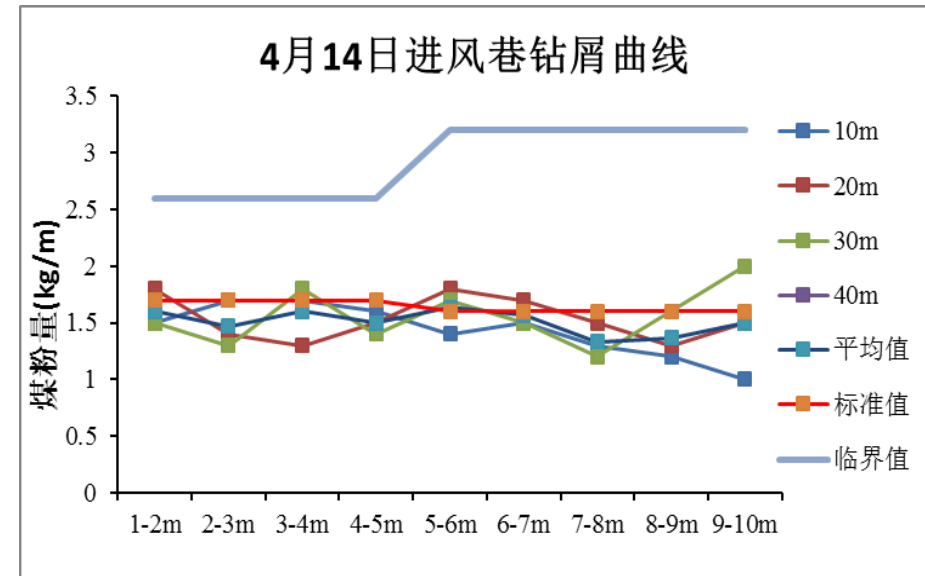
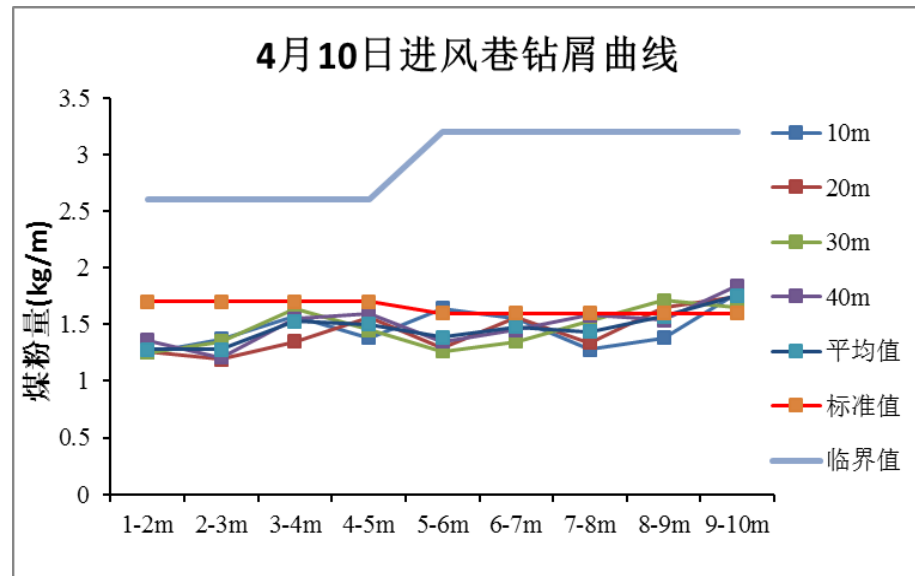
急倾斜水平分段开采防冲对策



□ 钻屑检测

□ 钻屑监测数据分析

- 图中钻屑量均未超过临界值。表明此时工作面超前应力较小，期间虽存在四次方能量的事件，但并不在工作面附近，高应力已被赶至岩层深部，这与及时解危措施的严格实施有直接关系。



5521-21工作面进风巷钻屑量



谢谢大家!

