

冲击矿压防治研究进展

——煤矿矿震及顶板爆破效能评价方法



报 告：窦林名 教授 Ph D. Prof.

单 位：中国矿业大学

冲击地压防治工程研究中心

网 址：<http://burst.cumt.edu.cn>

WeChat: 中矿冲击矿压研究



汇报提纲

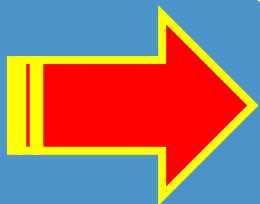
一、矿震及其风险评估

二、岩体爆破及其效果评价

三、双震源一体化CT探测



State Key Laboratory
of Coal Resources and Safety

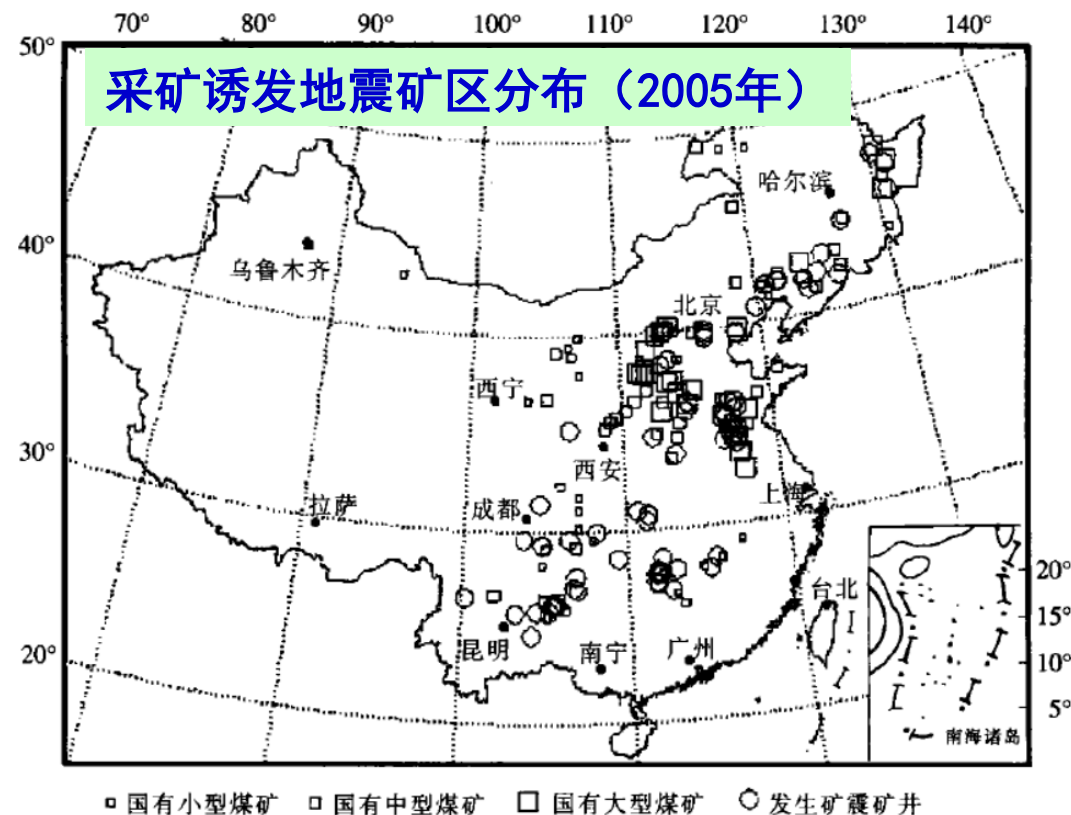


1、煤矿矿震特征

煤矿矿震 $\neq$ 冲击矿压

煤矿矿震特征

- 矿震也称矿山地震，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，统称为采矿诱发地震。
- 世界上最大的矿震发生于1975年6月23日德国东部的Suna钾碱矿区，震级 M 5.2；
- 国内最大的矿震发生于1970年北票台吉矿，震级达到4.3级，震后统计对地面的影响超过2km²；
- 鹤岗、抚顺、济宁地区、大屯矿区、鄂尔多斯地区、彬长矿区、华亭窑街矿区、新疆部分矿区等均是矿震较为严重的区域。



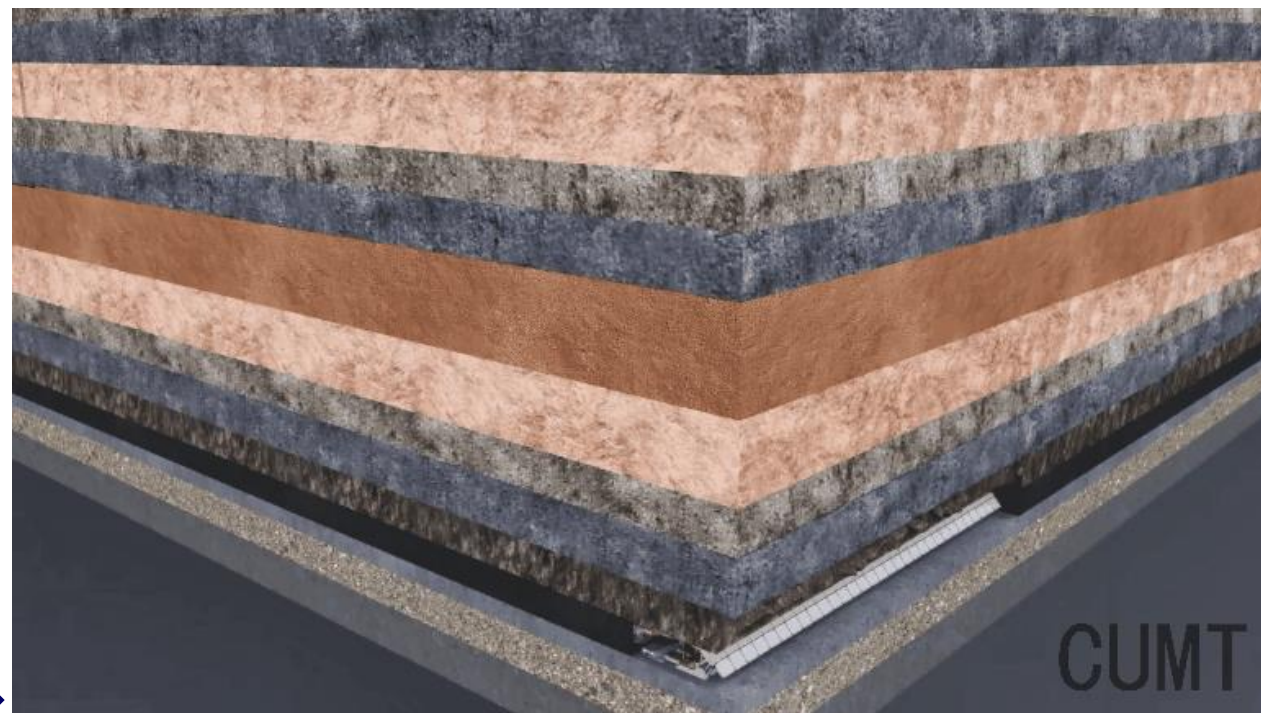
◆ 矿震与矿震灾害（冲击矿压）

- **矿震**：开采引起岩层应力失衡，造成岩层破断、断层活动、煤柱失稳、岩体塌陷等非天然地震。

矿震诱发的动力灾害

连锁 反应

- 矿震可能引发“动力灾害”，能量越大，越容易诱发冲击地压、煤与瓦斯突出、岩爆等矿震灾害。
- 冲击地压属于灾害性矿震。



矿震灾害（冲击矿压）

□ **冲击矿压**：就是矿震灾害，与矿震关系密切；

- 龙郓煤矿“2018.10.20”冲击矿压，能量 $2.2\text{E}+06\text{J}$ ，震级：M1.5级
- 龙家堡矿“2019.6.9”冲击矿压，能量 $1.5\text{E}+08\text{J}$ ，震级：M2.3级
- 唐山矿“2019.8.2”冲击矿压，震级：M2.0级
- 砚北矿“2019.8.8”强矿震，能量： $2.19\text{E}+07\text{J}$ ，震级：M2.8级
- 海石湾矿“2019.10.6”强矿震，能量： $2.3\text{E}+07\text{J}$ ，震级：M2.8级
- 新巨龙矿“2020.2.22”冲击矿压，能量 $4.2\text{E}+07\text{J}$ ，震级：M2.49级
- 孟村矿“2020.5.24”冲击矿压，能量 $1.52\text{E}+06\text{J}$ ，震级：M2.0级

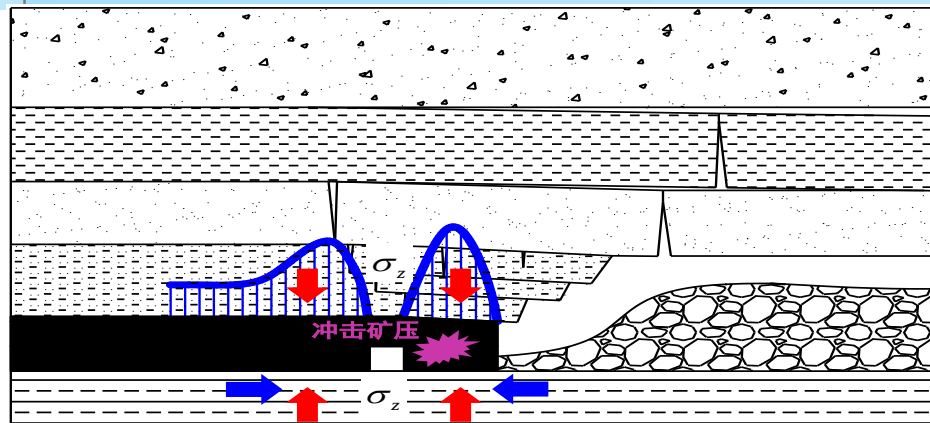
□ 矿震、冲击矿压（矿震灾害）、塌陷地震

- **矿震**：是矿山地震的简称，又称微震，是矿山开采引起的地震活动。当矿震能量较大时，地面有震感，地震台网能够记录；
- **冲击矿压**：就是**矿震灾害**。是发生在高应力区巷道、回采工作面围岩体内，以突然、急剧、猛烈破坏为特征的矿压动力现象。造成巷道破坏，设备损坏、人员伤亡等
- **塌陷地震或塌陷矿震**：是能被地震台网监测记录到的矿震，主要包括矿井大面积采空区塌陷、巨厚岩层破断滑移、采掘活动引起矿区断层活化、严重冲击地压事故等产生的地震事件等。

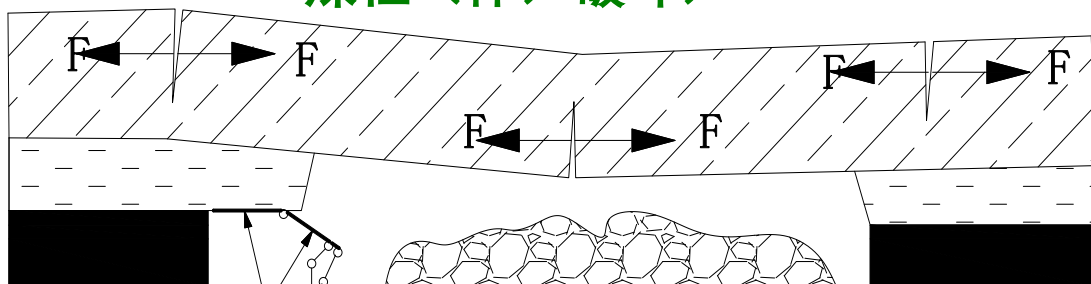
矿震、冲击矿压、塌陷地震



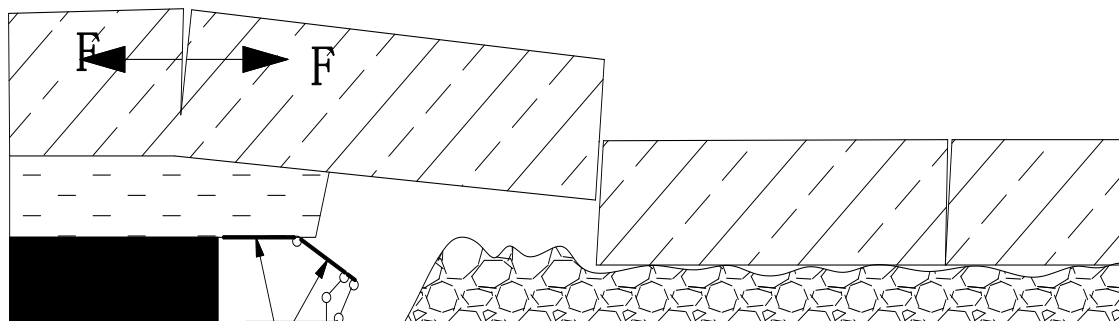
State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



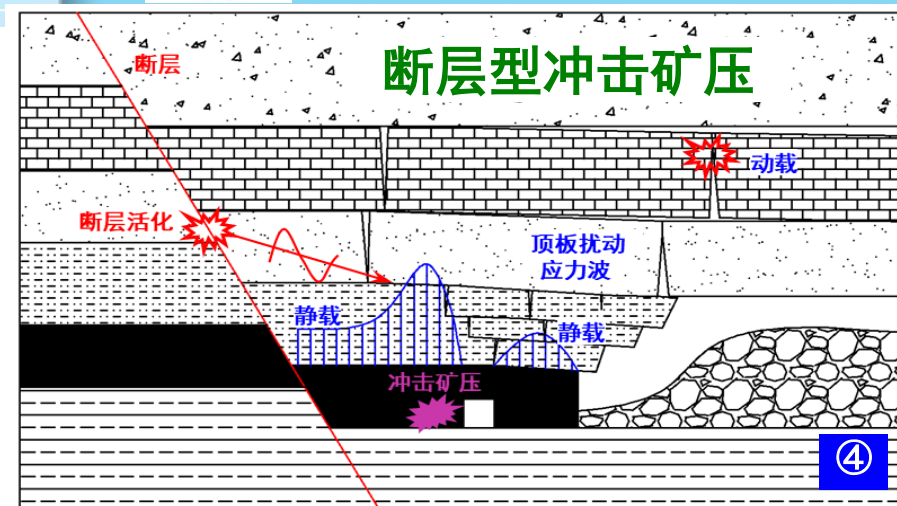
煤柱（体）破坏



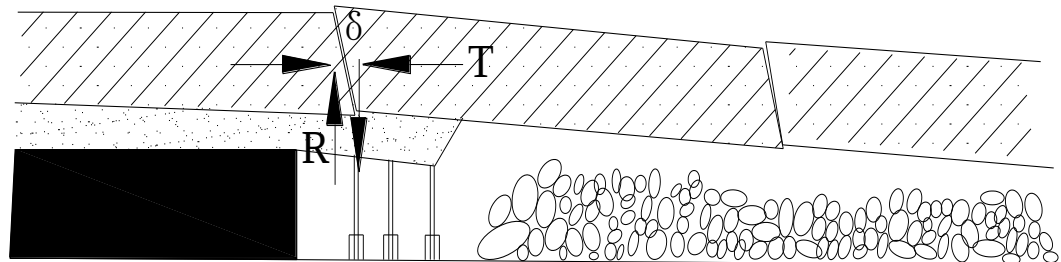
顶板初次来压拉张断裂



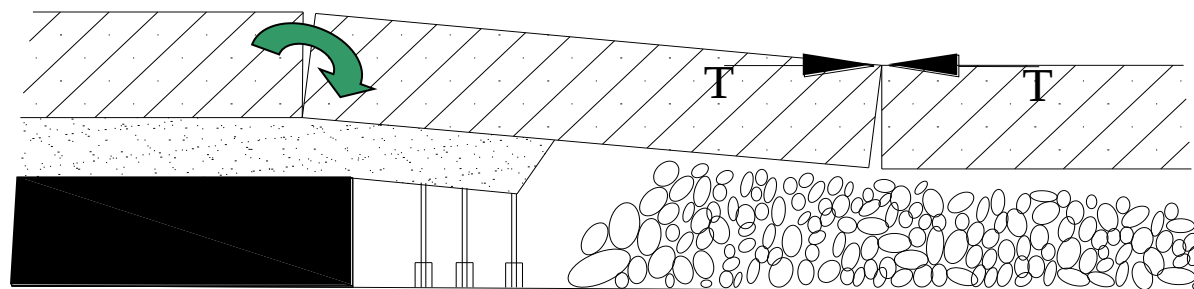
顶板周期来压拉张断裂



断层型冲击矿压



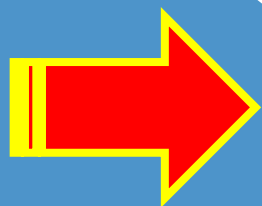
岩块滑落失稳示意



岩块回转失稳示意



State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



2、煤矿矿震的分类

矿震特征及其类型

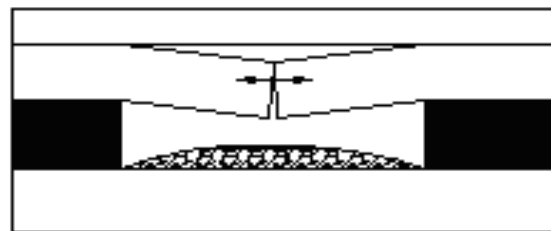
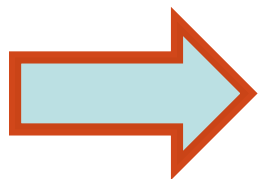


State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



1、矿震的类型一：——震源力源分类

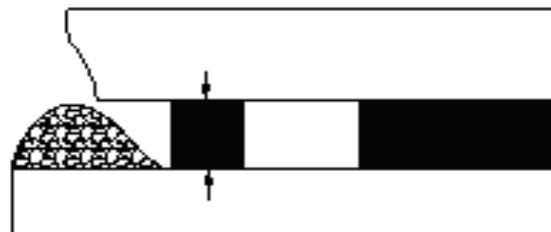
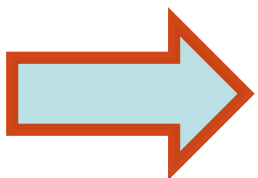
拉伸型



拉伸型（顶板拉张）



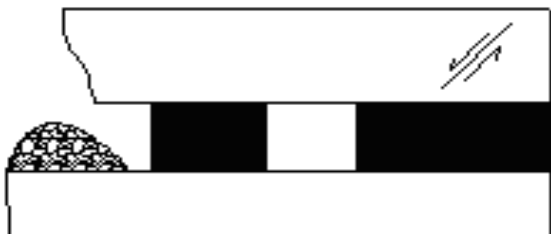
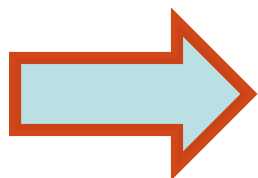
内爆型



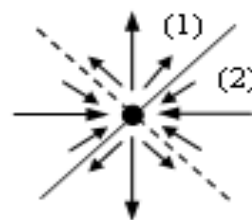
内爆型（煤柱压缩）



剪切滑移型



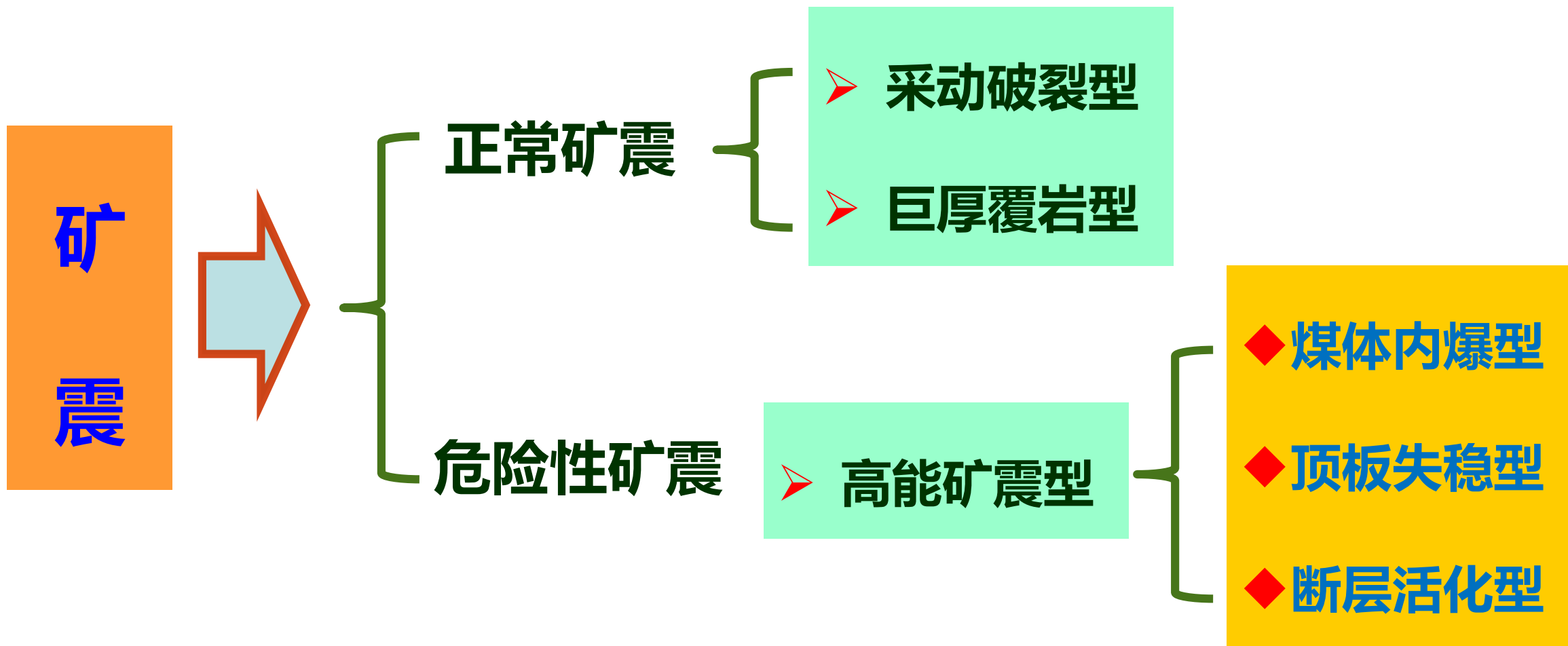
剪切型（断层滑移）



矿震特征及其类型

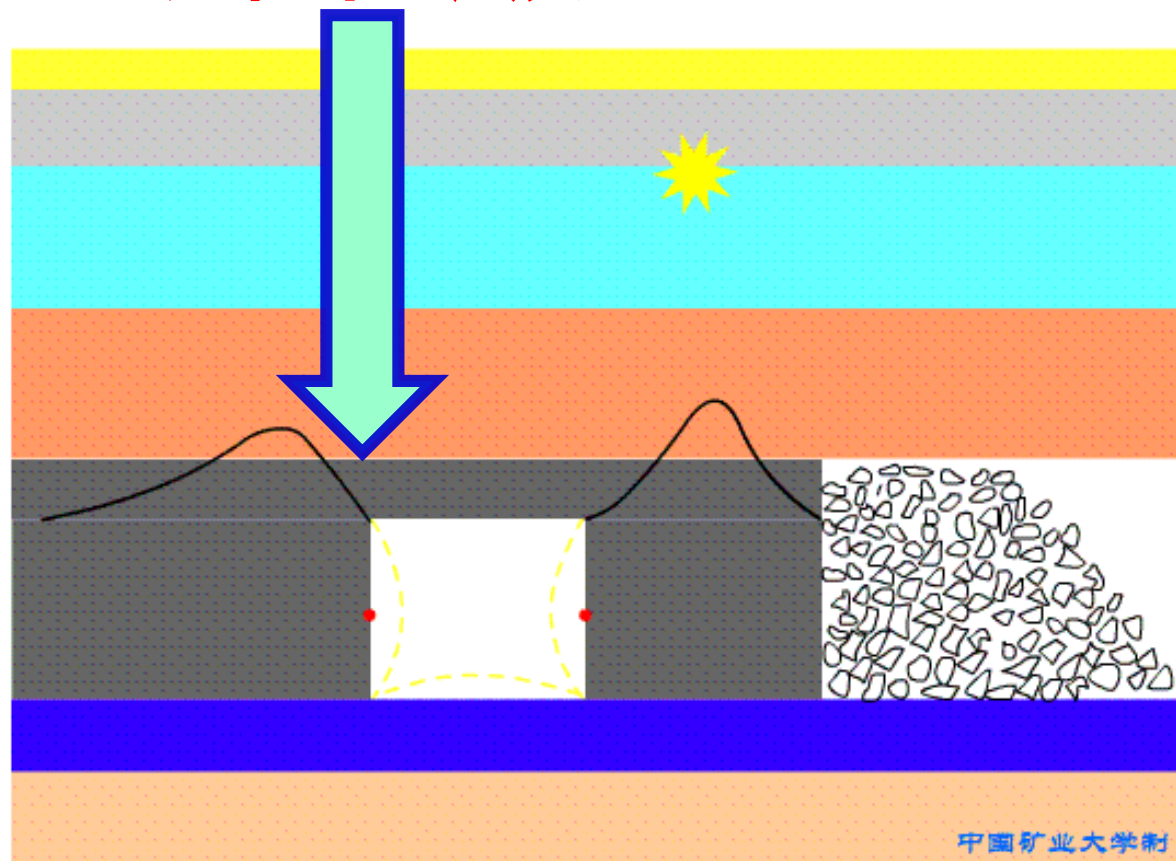


State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining

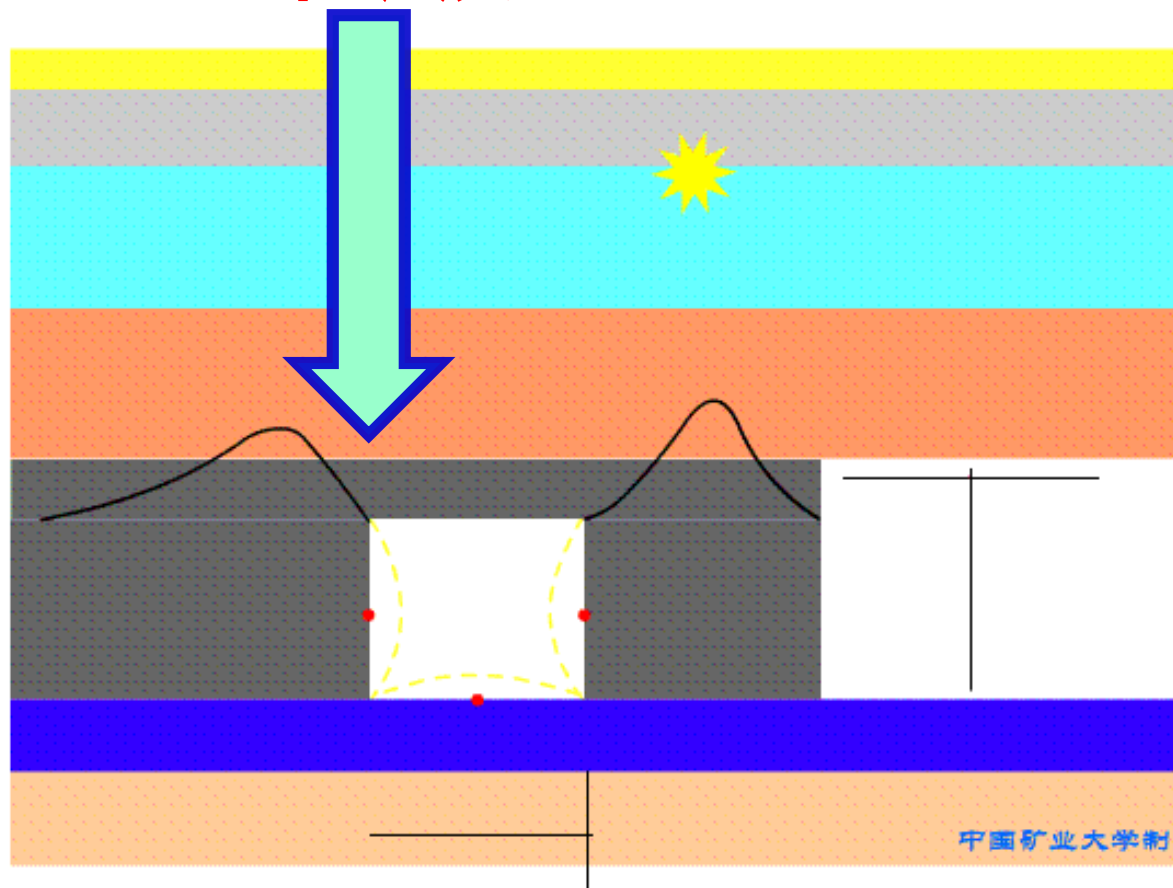


□ 2、矿震的类型二：——危险性矿震与正常矿震

危险性矿震



正常矿震



矿震分类

矿震类型	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
采动破裂型	$<10^4$ J	<200	P、S波不清晰、 波形持续时间短、 主频 >10 Hz	采掘工作面煤层 及其50m范围内的 顶底板岩层	煤炮声, 采掘面有轻微震 动, 地面无震感
巨厚覆岩型	$>10^5$ J	100-400	P、S波清晰、波 形持续时间长、 主频 <10 Hz	工作面采空区域、 距煤层100m以上 的巨厚覆岩中	井下、地面均有震感, 地 震监测系统能够监测到。
高能震动型	$>10^4$ J	200-400	P、S波清晰、波 形持续时间长、 主频 <10 Hz	震源位于采掘工 作面附近实体煤 及其顶底板岩层 之中	强烈震动与声响, 有时地 面有震感。部分高能量矿 震会诱发冲击地压, 造成 井巷破坏

矿震分类——高能矿震型

高能矿震型	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
煤体内爆型	$>10^4$ J	200-400	P、S波清晰、波形持续时间较长、主频 <10 Hz	工作面前方实体煤或大煤柱内部	震动与声响, 有时地面有震感。部分高能量矿震会诱发冲击地压
顶板失稳型	$>10^4$ J	200-400	P、S波清晰、波形持续时间较长、主频 <10 Hz	震源位于采掘工作面附近50m范围的顶底板岩层中	强烈震动与声响, 有时地面有震感。部分高能量矿震会诱发冲击地压
断层滑移型	10^4 - 10^8 J	200-500	P、S波清晰、波形持续时间较长类似地震波形、主频 <10 Hz	震源位置在断层附近、沿断层面展布	强烈震动与声响, 有时地面有震感。部分高能量矿震会诱发冲击地压

矿震特征及其类型



State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



⇒ 正常信号的矿震



小尺度破断

百米级

近场 中场



巷道位置

远场

高频
高幅值
持续时间短



低频
低幅值
持续时间长



大尺度
破断

千米级

近场

中场

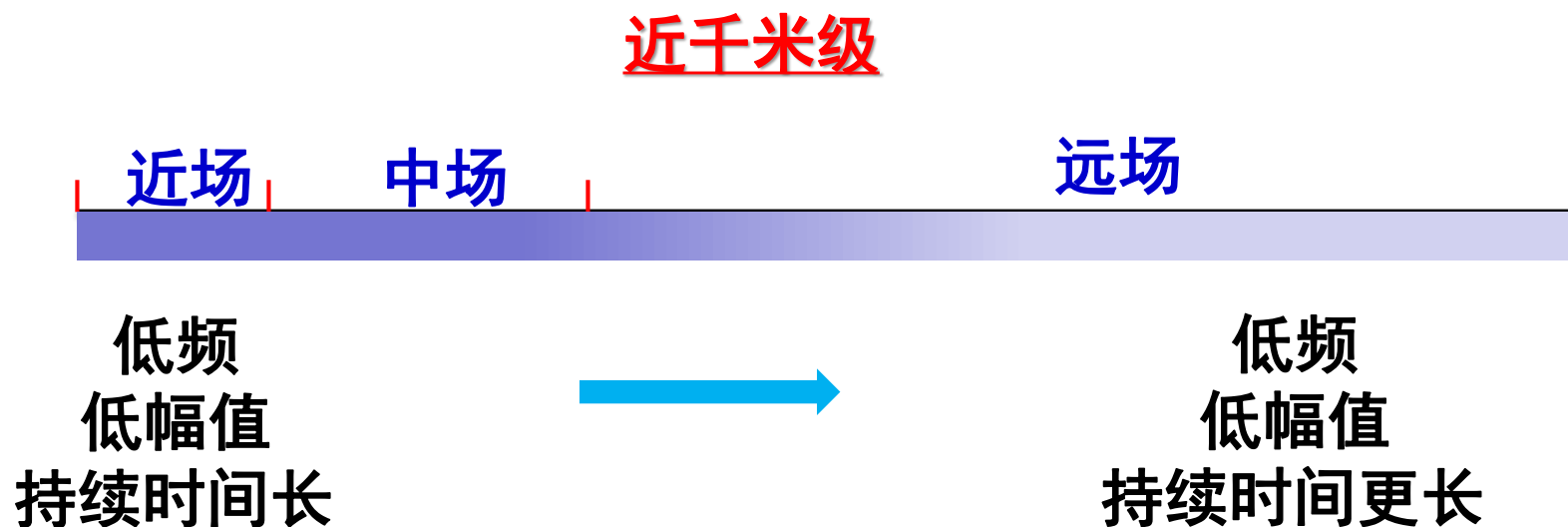
远场

高频
高幅值
持续时间短



低频
低幅值
持续时间长

巨厚覆岩型矿震

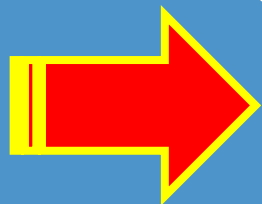


- 拐角频率;
- 应力降;
- 破裂半径;

极不易诱发冲击！！



State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



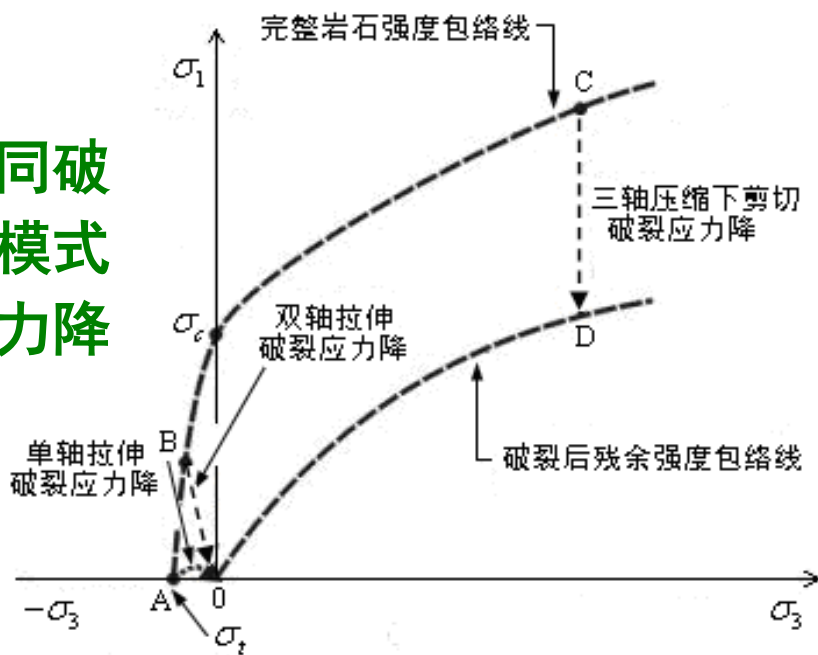
3、矿震特征及衰减规律

矿震特征及衰减规律

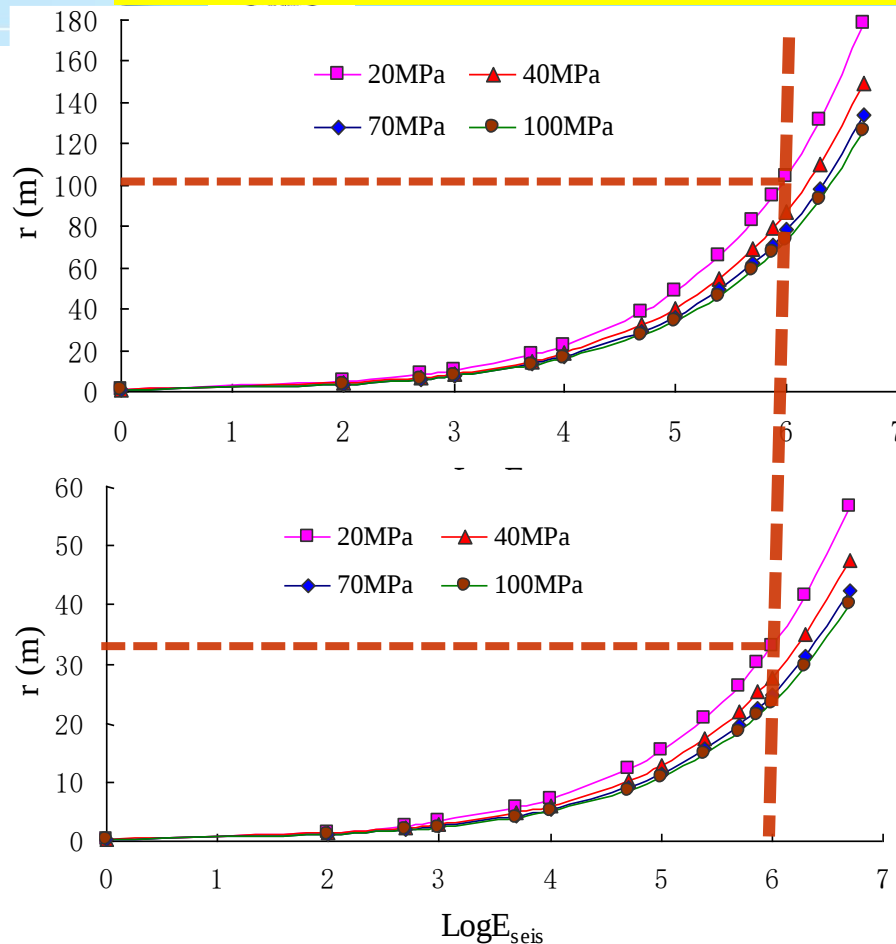
岩石破裂模式与破裂尺度、震动能量

- 剪切破裂的能量是拉张破裂的8~12倍；
- 剪切破裂32m释放的能量相当于拉张破裂100m

不同破裂模式
应力降



两种破裂模式破裂半径与震动能量的关系



$$r_2 = \sqrt[3]{\frac{W_2 E}{\pi \Delta \sigma_t^2}}$$

$$r_1 = \sqrt[3]{\frac{2W_1 G}{\pi \Delta \tau^2}}$$

能量/J	1.0E+05	1.0E+06	1.0E+07	1.0E+08
破半径级/m	15	35	60	120

矿震能量的传播规律——理论推导

- 设震源震动能量 E_0 ，传播到巷道时剩余的震动能量 E 。从震源开始，震动波经过距离 dr ，能量变化为 dE ，其能量损失为 λ 。

$$-dE = \lambda E dr$$

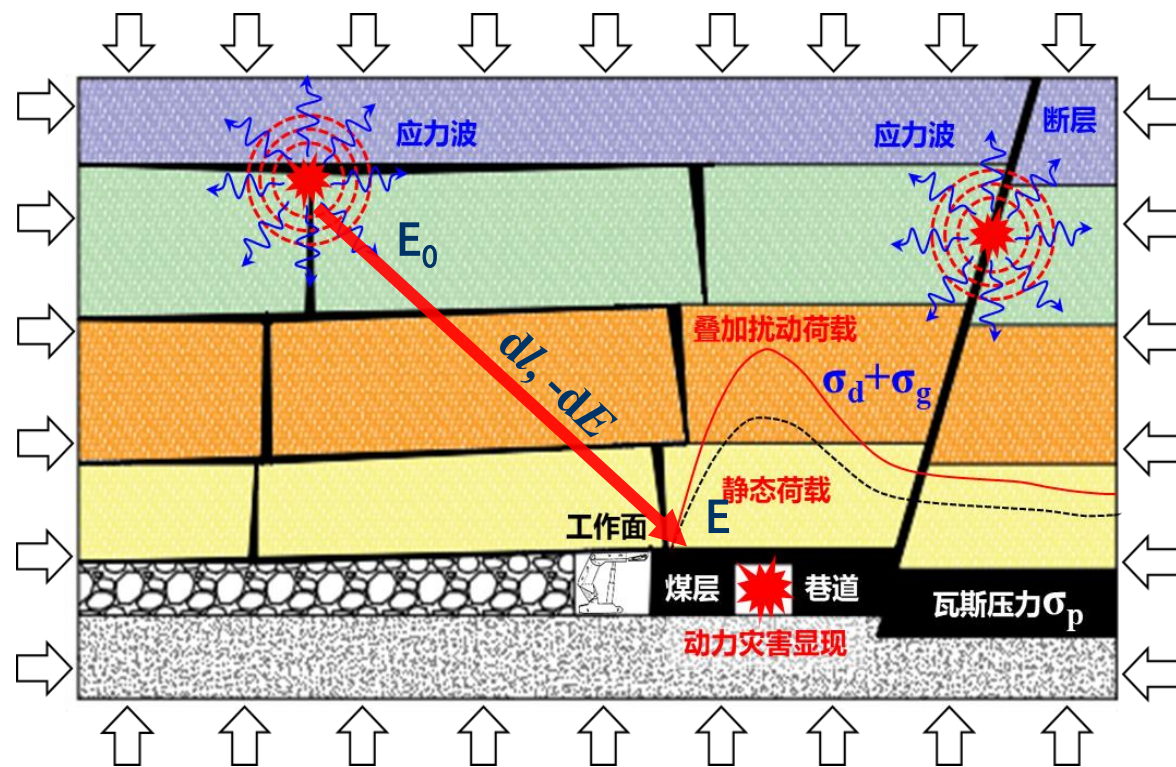
$$E = E_0 e^{-\lambda r}$$

- 对于非均质岩体：

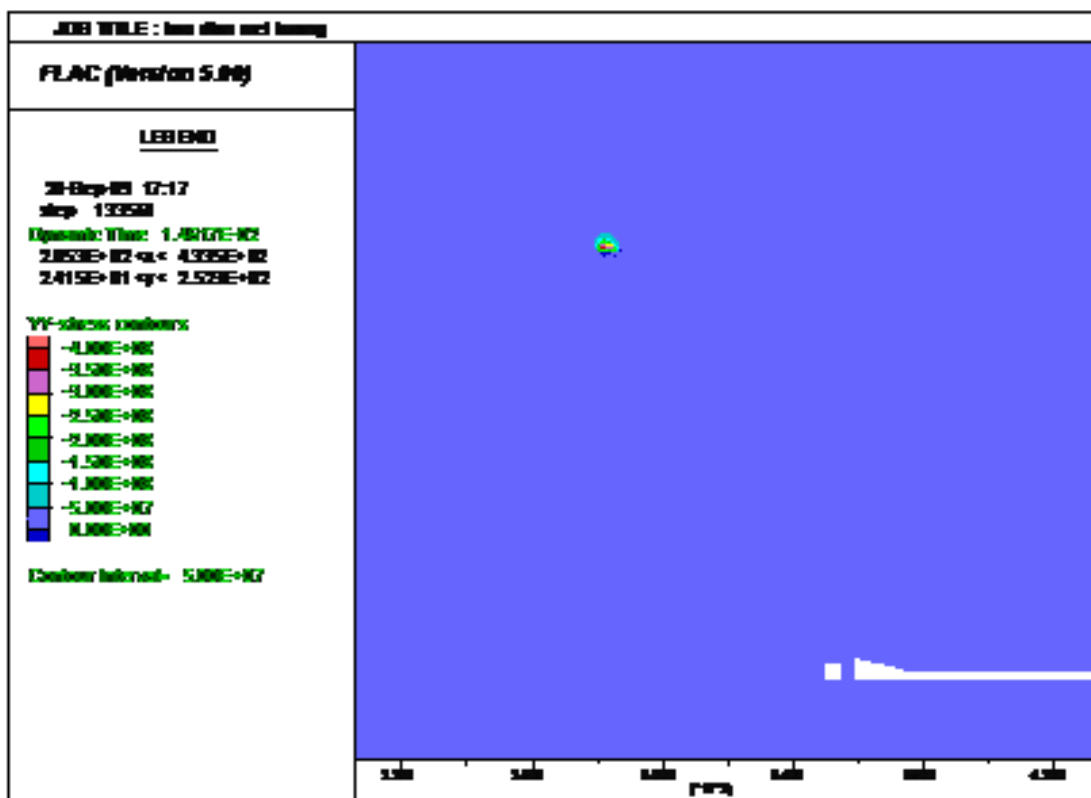
$$E = E_0 e^{-\sum \lambda_i r_i}$$

- 考虑震源半径：

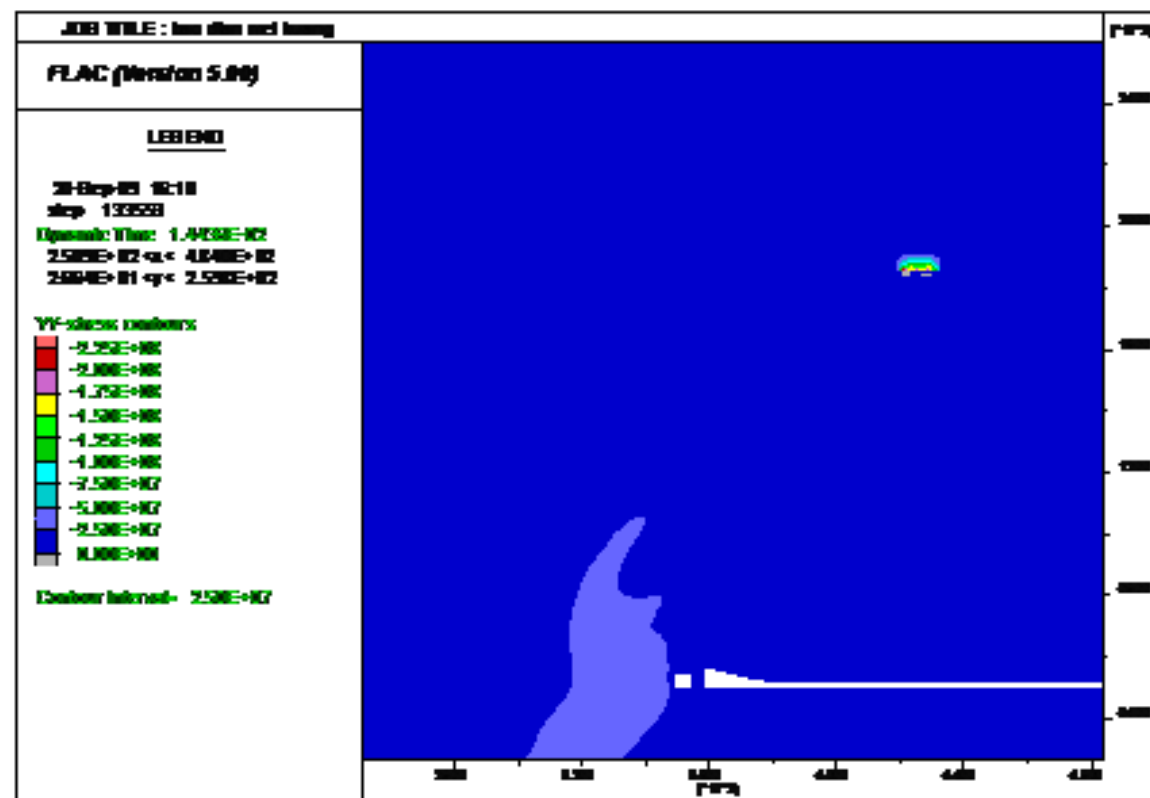
$$E = E_0 r_0^2 r_i^{-2} e^{-\lambda(r_i - r_0)}$$



矿震的传播规律



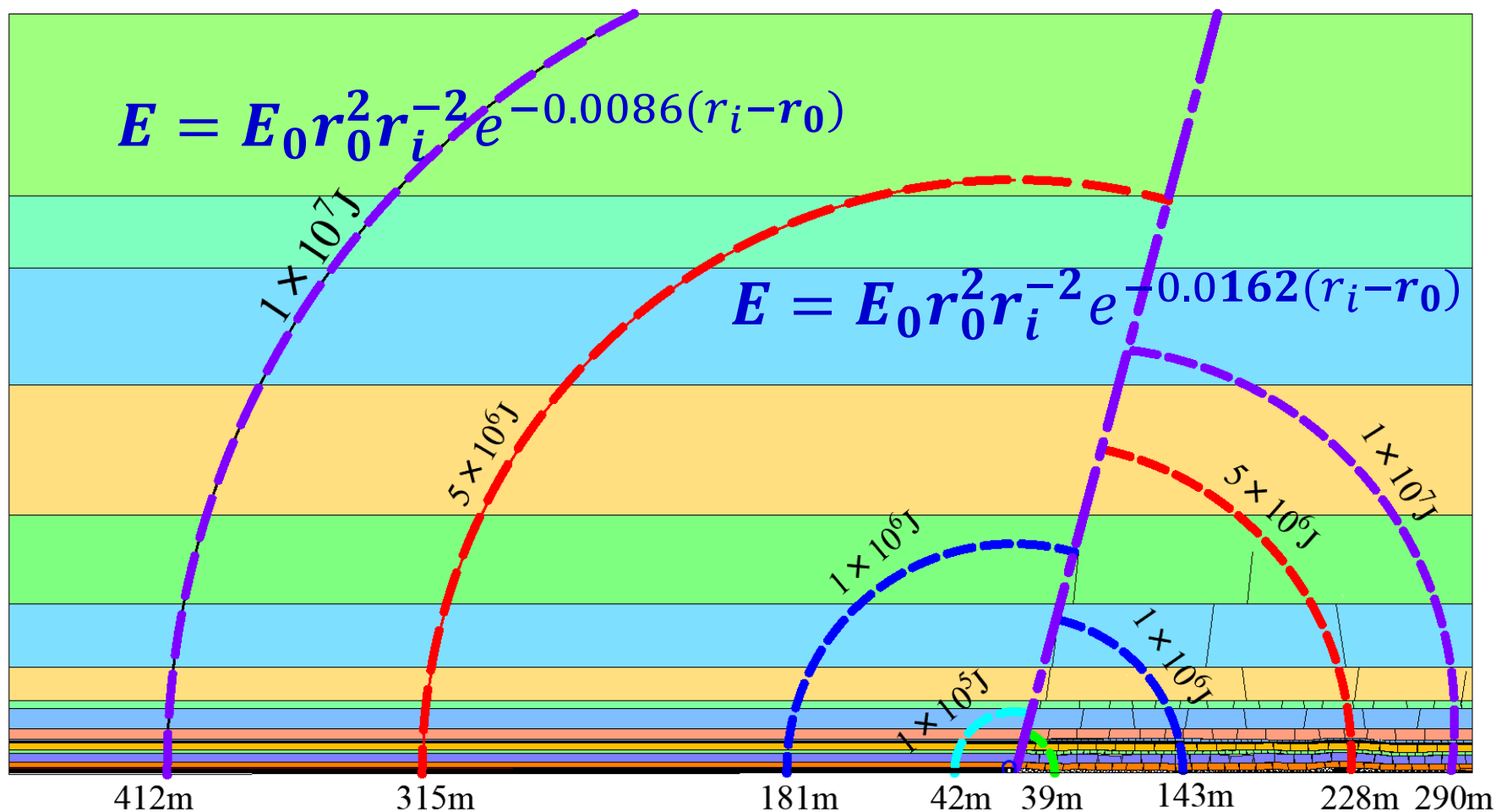
厚硬顶板剪切破裂（倾角
 60° ）对巷道冲击效应



米空区上覆剪切破裂震源
（倾角 60° ）的冲击效应

震动波对井巷的作用 (dongtan)

$$\beta_{\alpha} = \frac{\lambda_k}{\lambda_s} = 1.88$$



实体煤

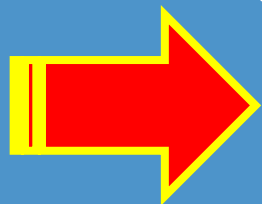
能级/J	距离/m
1.00E+05	42
1.00E+06	181
5.00E+06	315
1.00E+07	412

采空区

能级/J	距离/m
1.00E+05	39
1.00E+06	143
5.00E+06	228
1.00E+07	290



State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



4、矿震的风险评估

□ 矿震对井巷的损伤作用

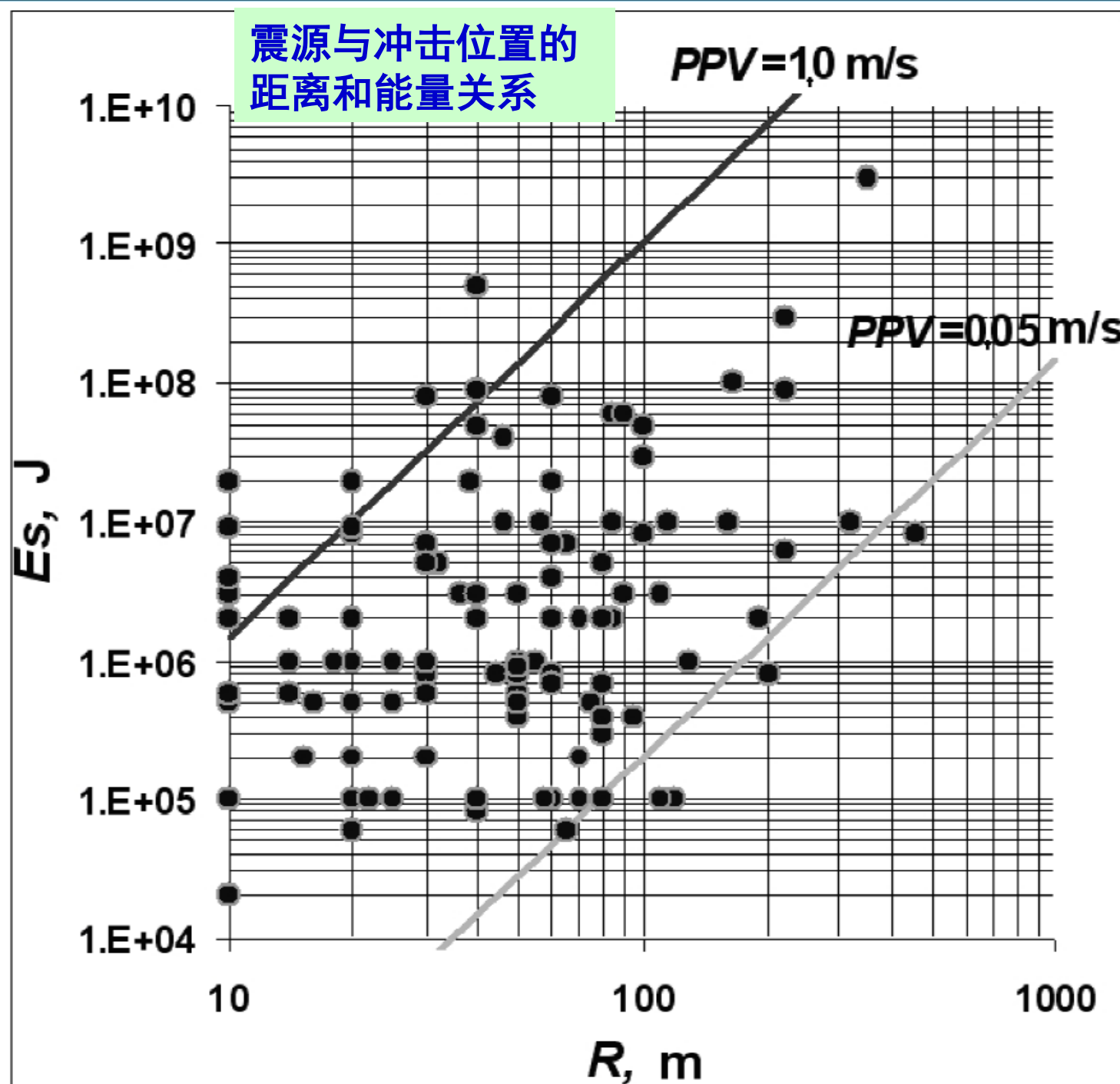
➤ 矿震对巷道的作用主要表现在矿震的振动速度。

影响程度	振动速度, mm/s	影响特征
I	<200	对井巷无影响
II	200--400	对井巷影响较小, 产生小破坏, 出现裂缝、剥落等现象
III	>400	对井巷影响较大, 出现大裂缝

矿震的危险性判别

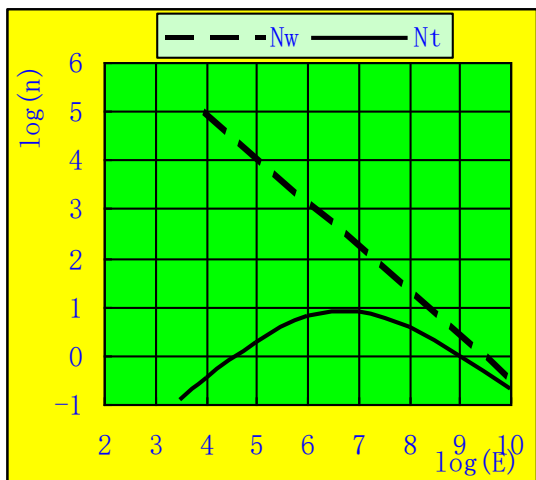
破坏判别准则：

- 巷道周边煤岩体的震动速度 **PPV**；
- 当质点运动速度 **PPV** 处于 **[0.05, 1.0]** 范围内时，就会发生冲击矿压显现。

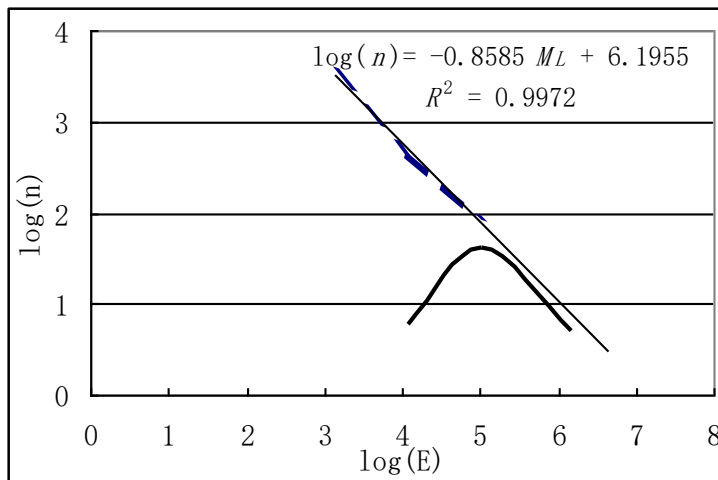


□ 震动能量判别方法

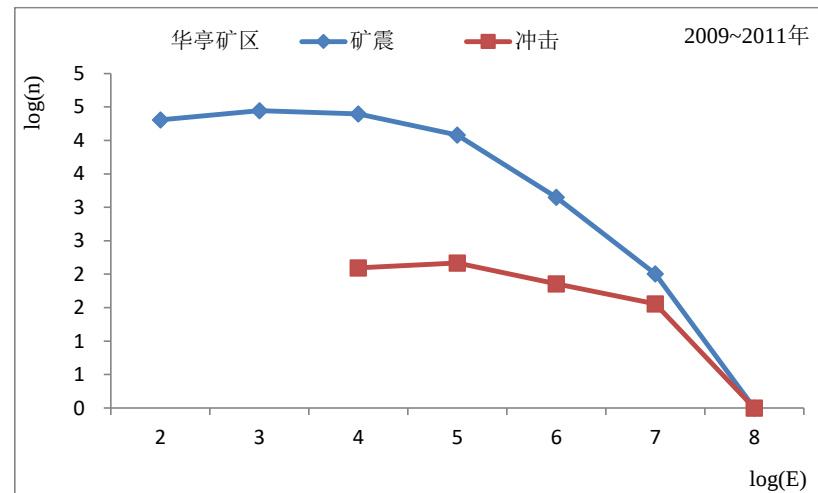
- 高能量的矿震会引发冲击矿压。矿震能量越大，致灾可能性也越大。
- 矿震能量： $<10^4\text{J}$ ，不会造成冲击矿压动力灾害；
- 矿震能量： $=10^5\text{J} \sim 10^6\text{J}$ ，造成冲击破坏概率为**万分之一**；
- 矿震能量： $>10^6\text{J}$ ，造成冲击破坏的概率为**十分之一**。



波兰



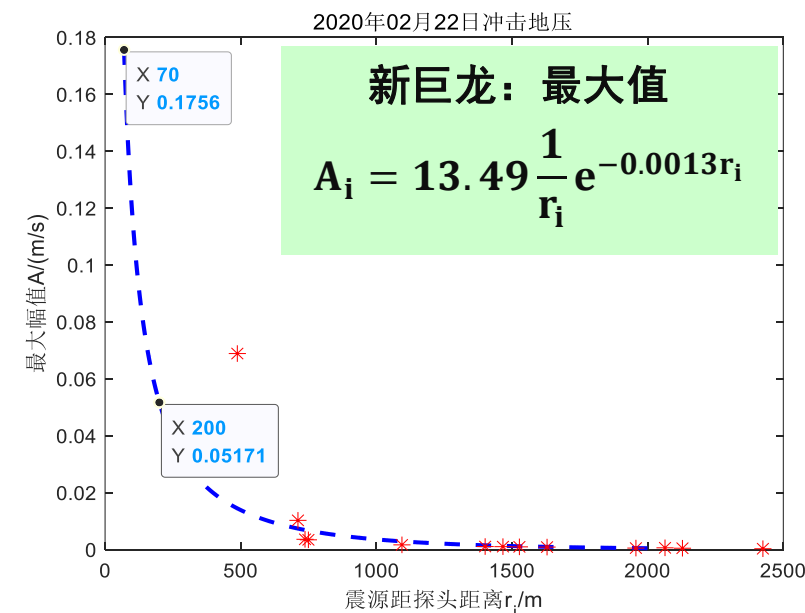
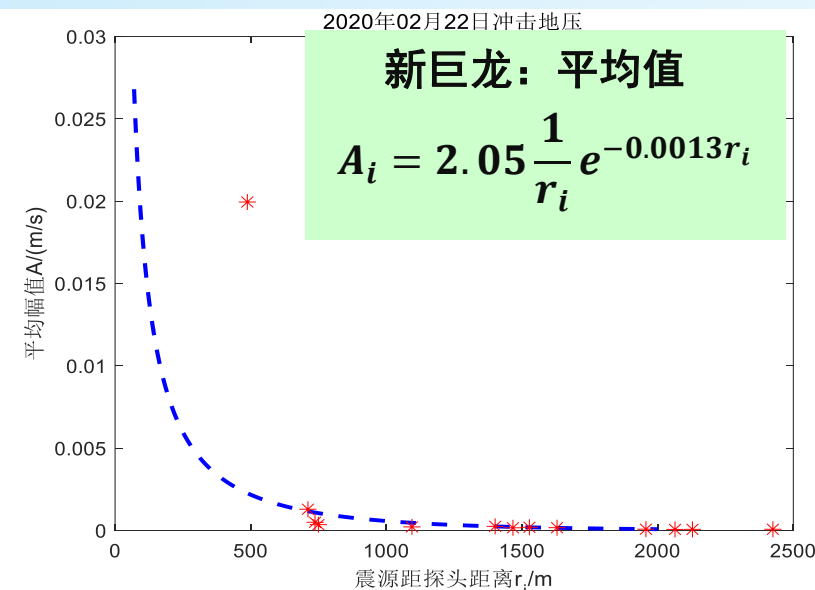
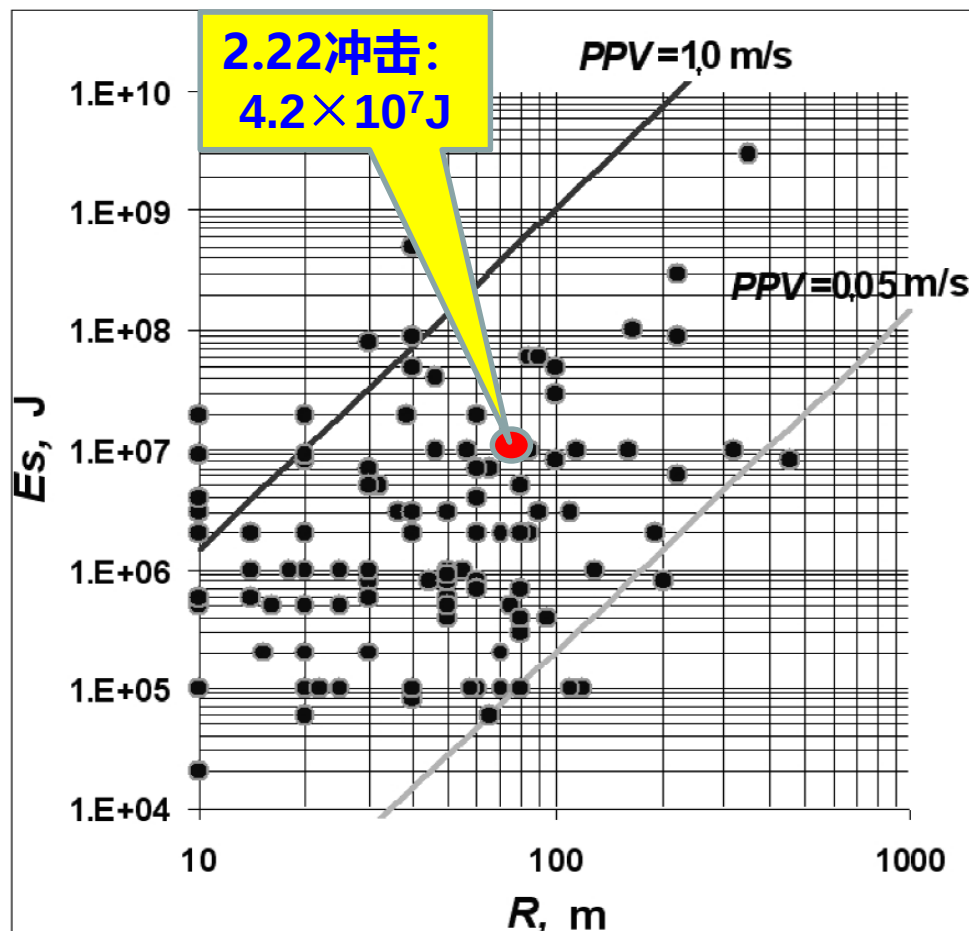
新汶华丰煤矿



甘肃华亭矿区

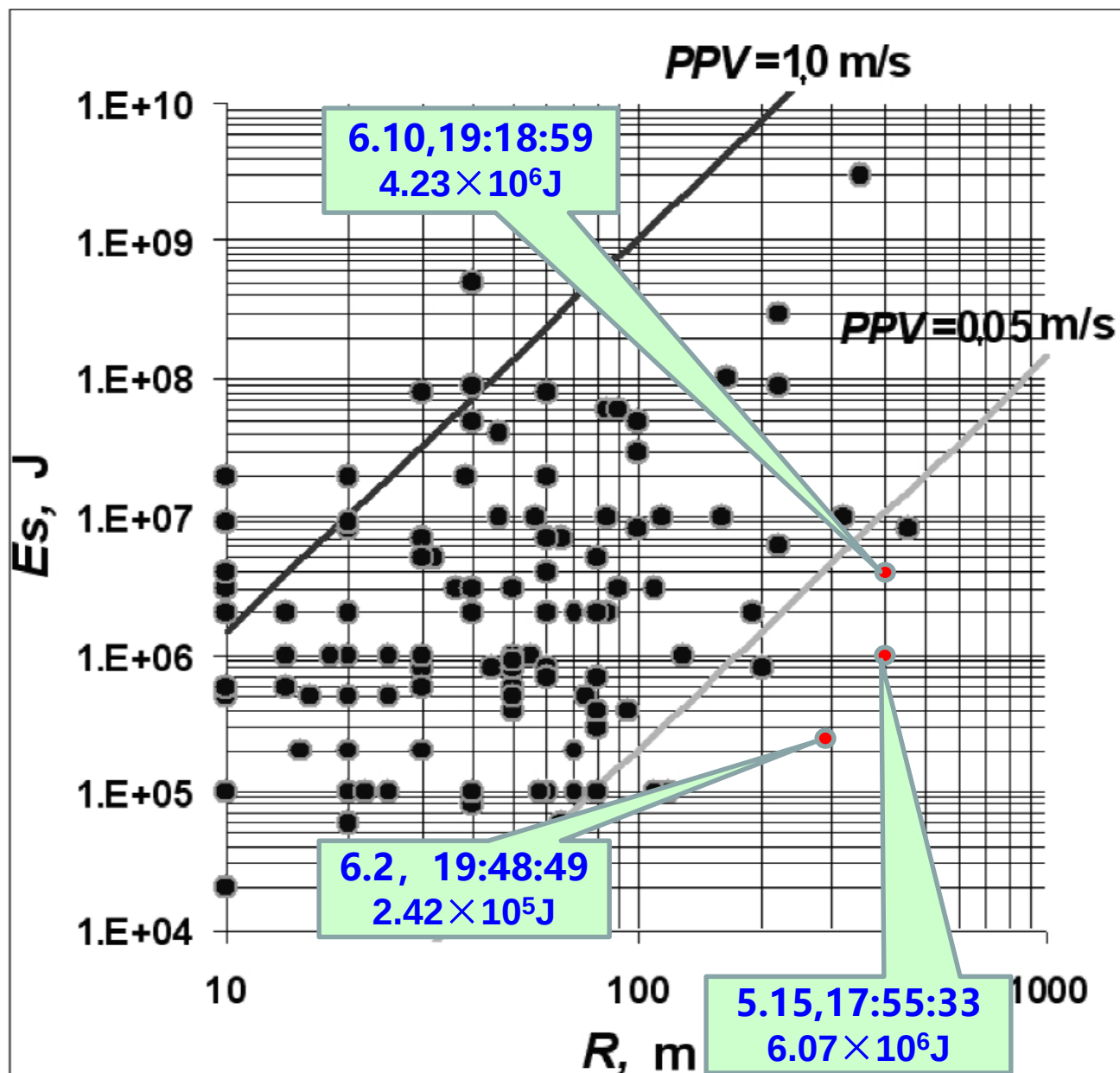
新巨龙“2.22”冲击矿压

新巨龙2.22
冲击矿压受
冲击显现范
围最远可达
距离震源的
200m。



东滩矿强矿震的风险评估

- 强矿震信号比例系数 c 较小，说明距震源较近的质点运动峰值速度小，诱冲能力较低。
- 在距震源300m处，质点运动速度为0.005 m/s，而强矿震事件1震源距煤层400m，峰值质点速度会进一步衰减，不会落在冲击显现范围，即[0.05 1.0]m/s。



□ 矿震对地面影响的烈度（Dedwon）

- ① **3和4级**：地面大楼中的一些居民能感觉到震动，振动类似于卡车在楼旁经过。
- ② **5级**：大楼中的所有居民均能感觉到震动，楼外的居民也能感觉到震动，动物受惊，悬挂的物体来回摆动，某些轻的物体移动，未锁的门窗来回扇动，振动类似于一个很重的物体从楼外掉下。
- ③ **6级**：大楼内外的居民均能感觉到震动，画从墙上掉落；书从书架上掉下；家具移动。
- ④ **7级**：振动类似于坐在行驶中的小汽车内；建筑物因内部家具移动受到强烈损坏。

矿震的危险性判别



State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



矿震对地面影响的烈度 (Dedwon)

强度等级	影响程度	震动能量, J	加速度, mm/s^2	速度, mm/s
1~4	0	$<10^7$	<120	<5
5	1a	$1 \times 10^7 \sim 5 \times 10^7$	120~180	5~7
	1b	$5 \times 10^7 \sim 1 \times 10^8$	180~250	7~10
6	2a	$1 \times 10^8 \sim 5 \times 10^8$	250~370	10~15
	2b	$5 \times 10^8 \sim 1 \times 10^9$	370~500	15~20
7	3a	$1 \times 10^9 \sim 5 \times 10^9$	500~750	20~25
	3b	$5 \times 10^9 \sim 1 \times 10^{10}$	750~1000	25~30



汇报提纲

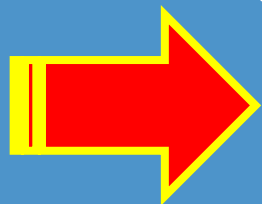
一、矿震及其风险评估

二、岩体爆破及其效果评价

三、双震源一体化CT探测



State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



1、冲击矿压的力能分类

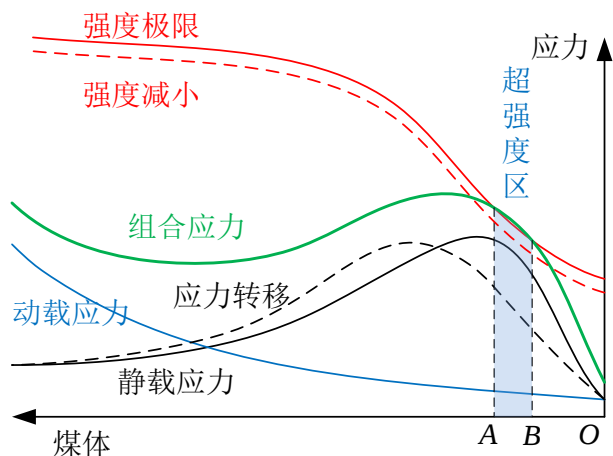
冲击矿压的力能分类

➤ 能量表达: $\frac{dU_R}{dt} + \frac{dU_C}{dt} + \frac{dU_S}{dt} > \frac{dU_B}{dt}$

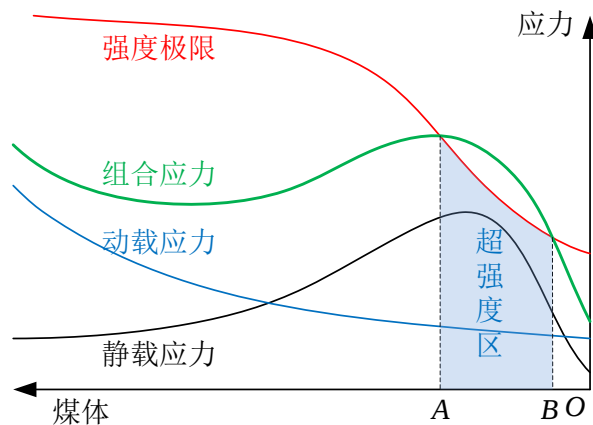
➤ 单向: $U = \frac{(\sigma_j + \sigma_d)^2}{2E}$ $U_{bmin} = \frac{\sigma_{bmin}^2}{2E}$

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

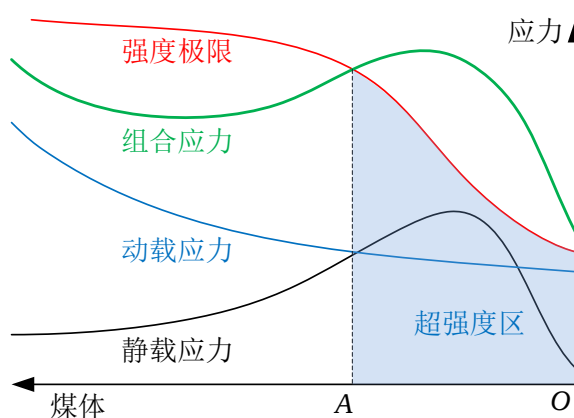
U_R —围岩中储存的能量;
 U_C —煤体中储存的能量
 U_S —矿震能量;
 U_B —冲击时消耗的能量
 U_{bmin} —动态破坏最小能量
 σ_j —静载应力
 σ_d —动载应力
 σ_{bmin} —临界应力



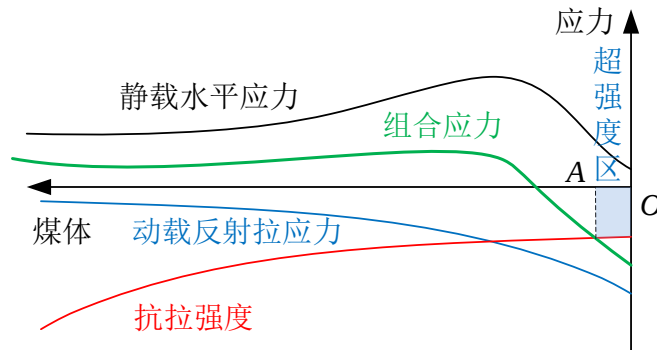
低应力扰动



动载扰动



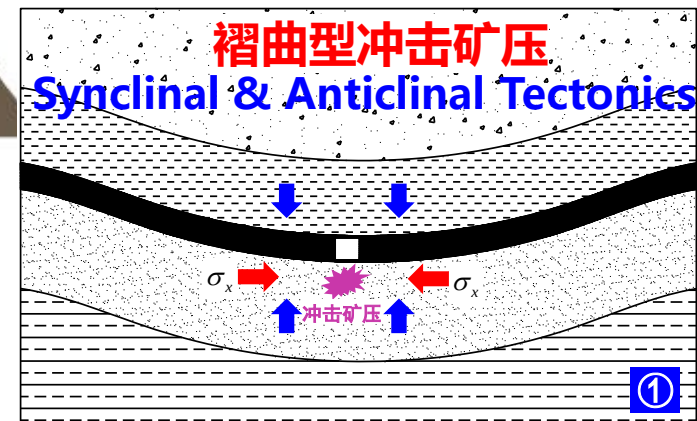
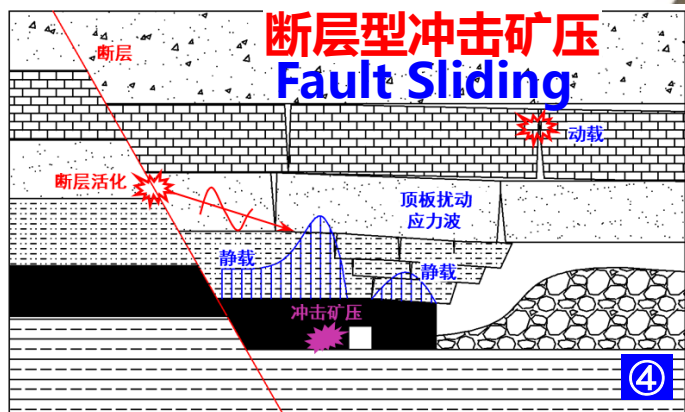
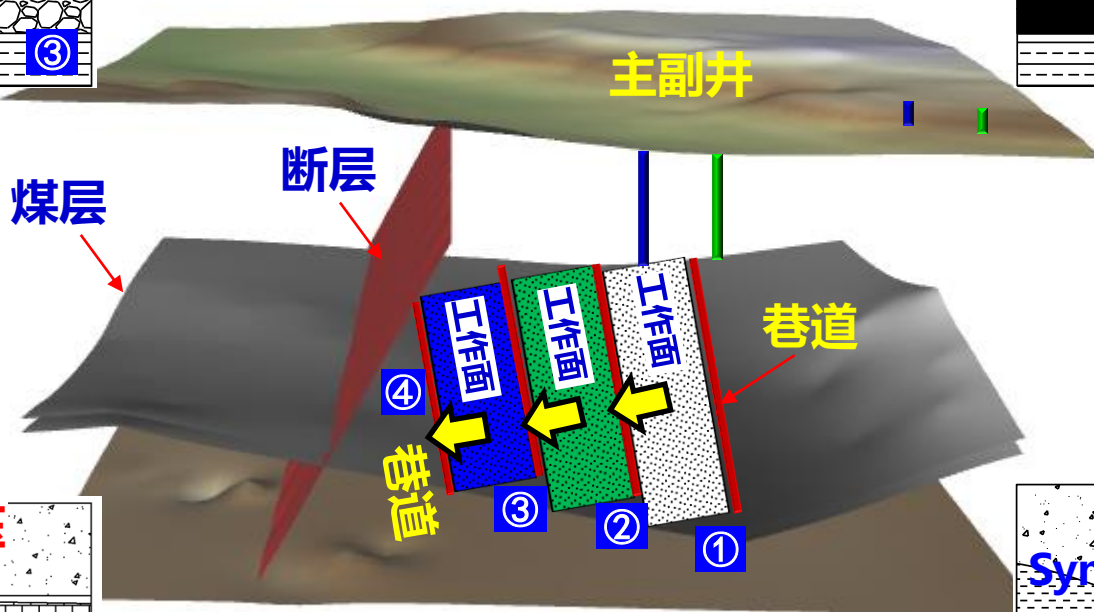
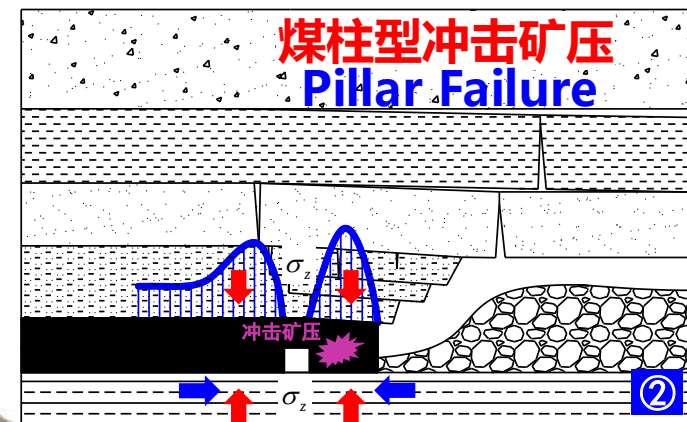
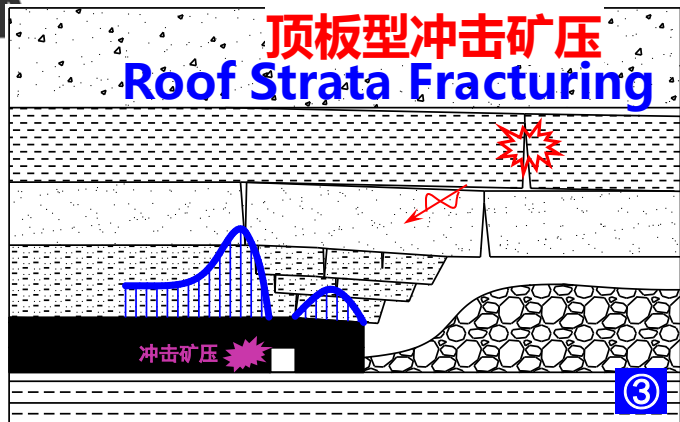
动静组合



反射拉伸

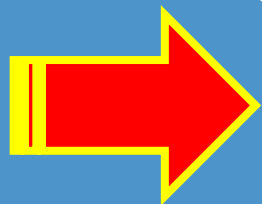


冲击矿压类型 Classification of Coalburst





State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



2、覆岩深孔预裂爆破原理

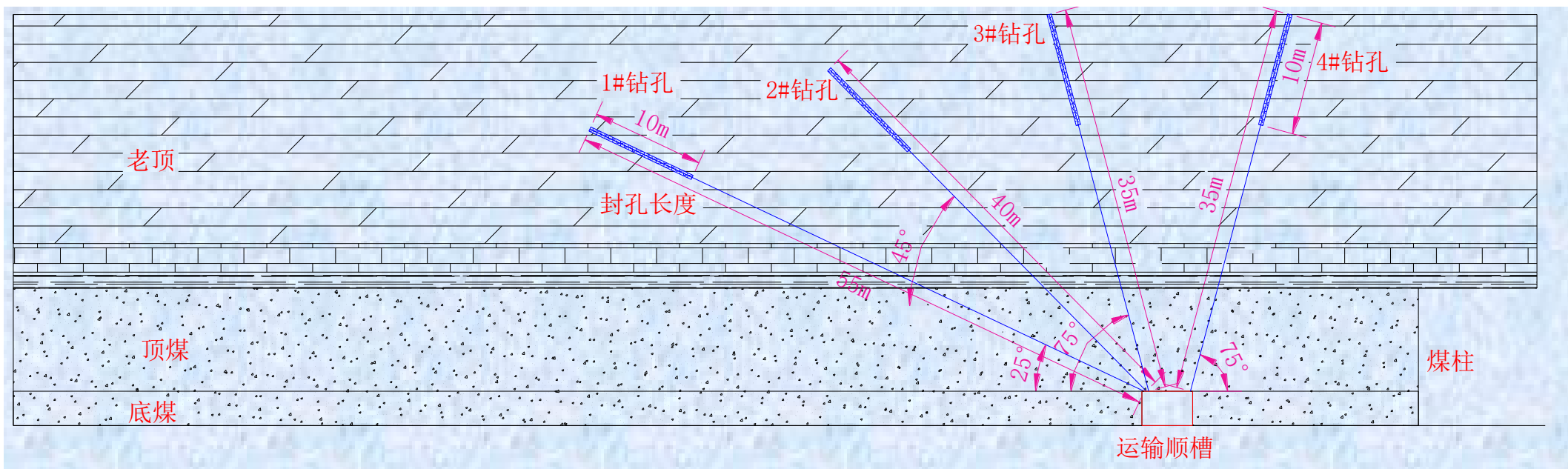
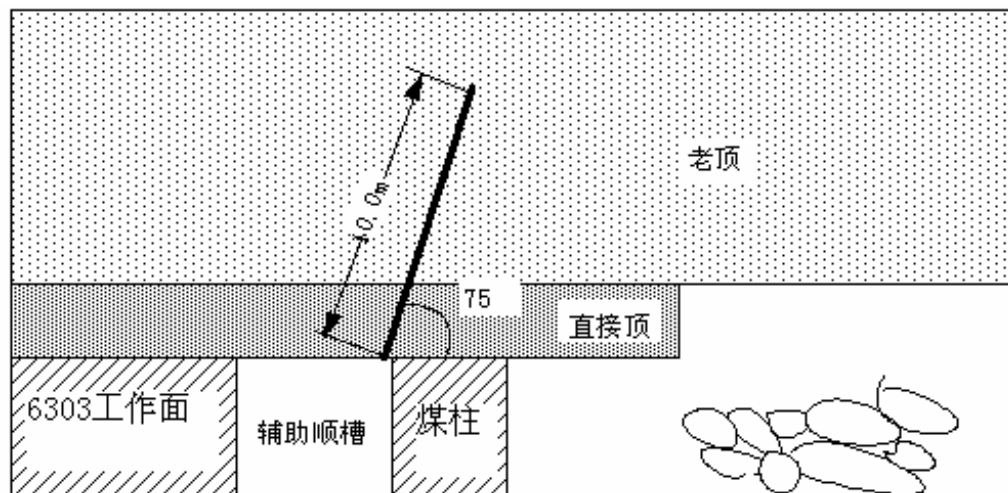
顶板覆岩的深孔爆破



State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



- 浅孔爆破断顶卸压；
- 深孔爆破断顶卸压。



顶板覆岩的深孔爆破

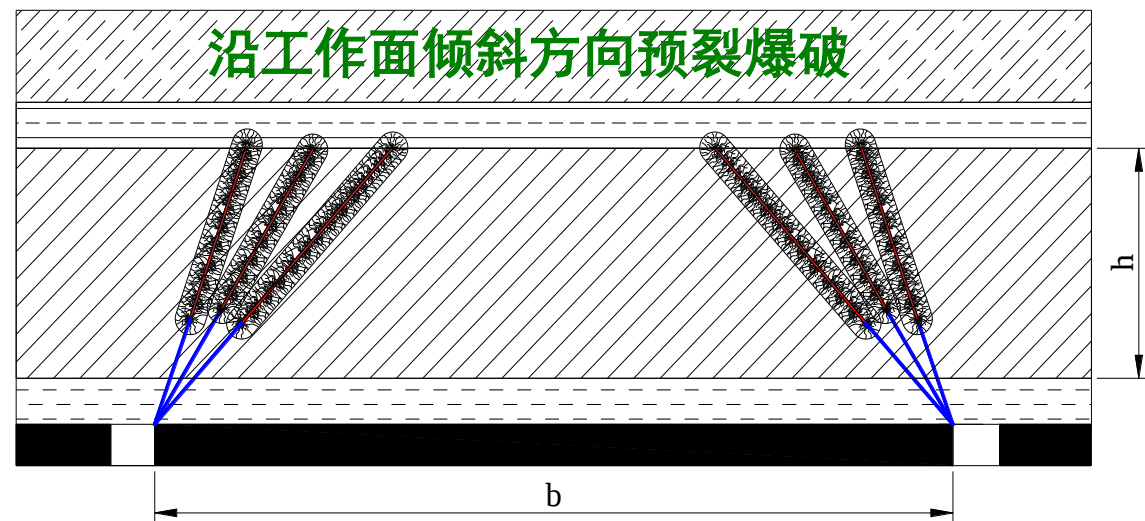
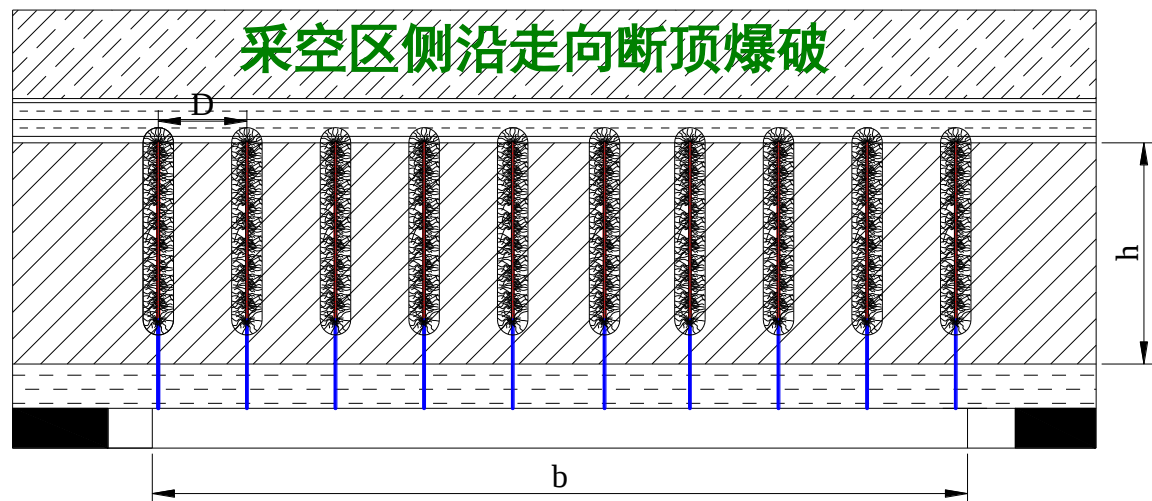
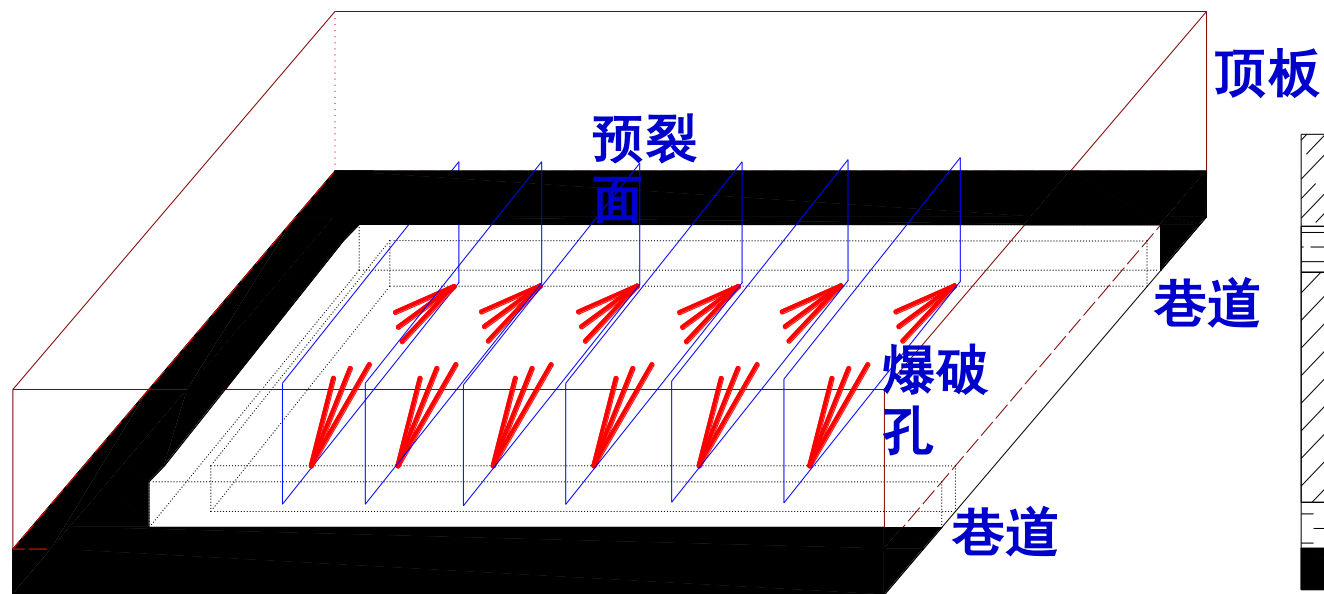


State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



□ 顶板断顶爆破方式

- 采空区侧沿走向断顶爆破
- 沿工作面倾斜方向预裂爆破



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。

顶板覆岩的深孔爆破



State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



□ 爆破降低岩体的强度

- 爆破后 降低岩体的强度，减小来压步距，降低顶板弯曲弹性能

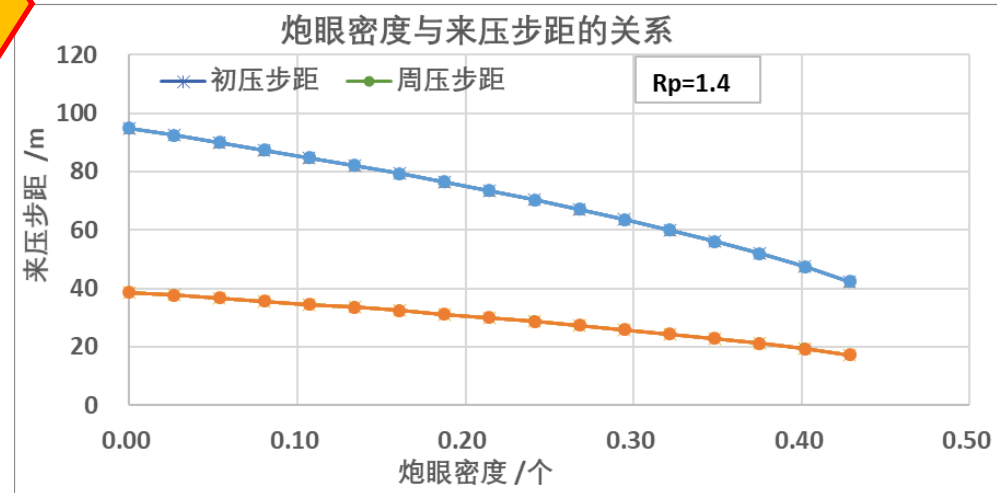
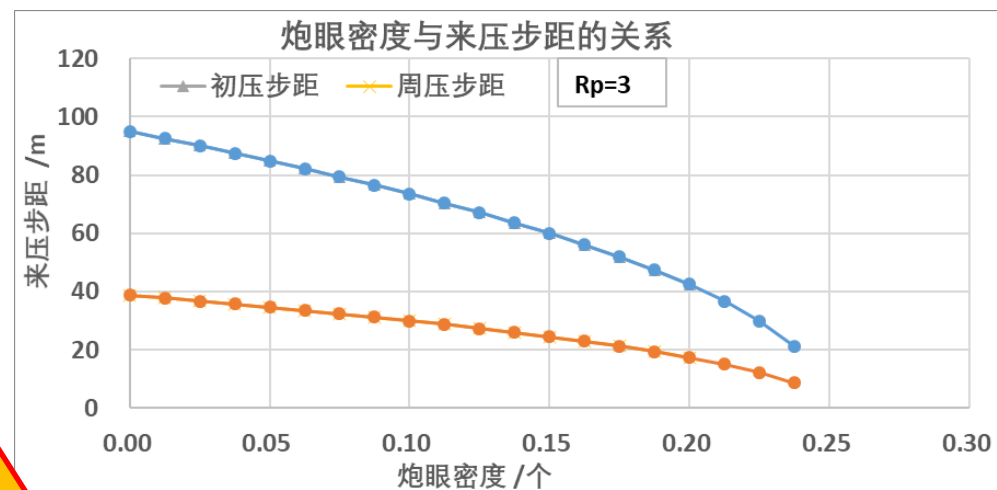
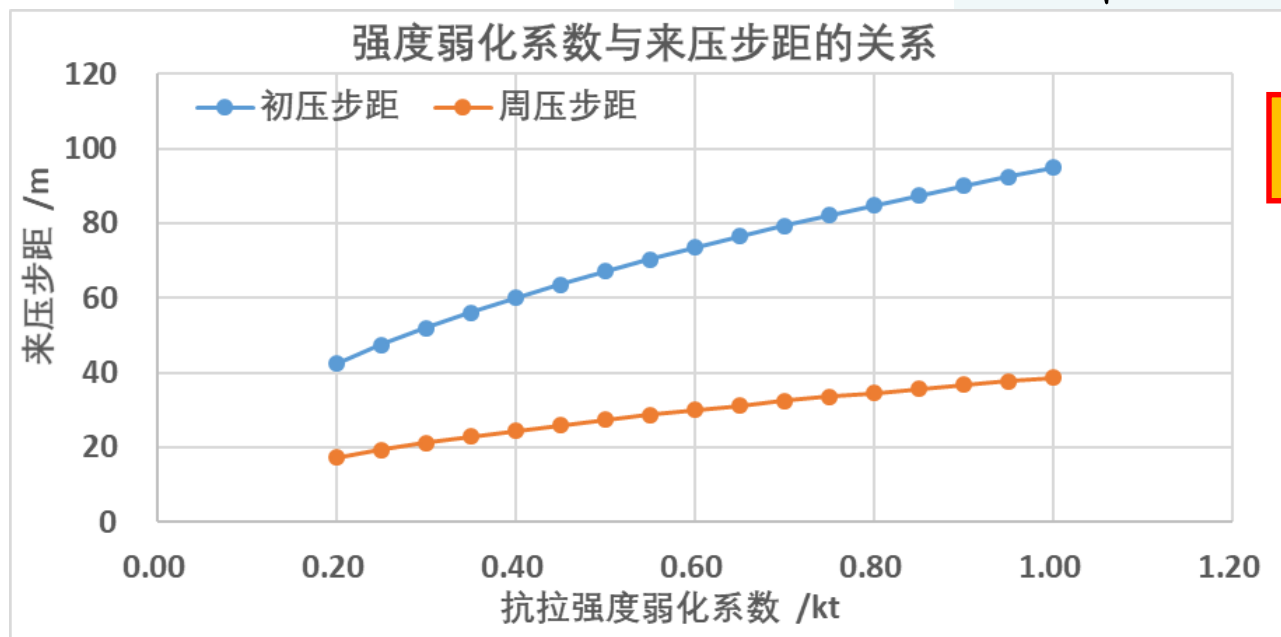
➤ 初压步距

$$L_1 = h \sqrt{\frac{2k_t [\sigma_T]}{q}}$$

➤ 周压步距

$$L_2 = h \sqrt{\frac{k_t [\sigma_T]}{3q}}$$

岩体抗拉强度取5MPa，顶板厚度取30m，载荷 $q=1.0 \times 10^6$ N/m(按40m)



液体炸药爆破新技术



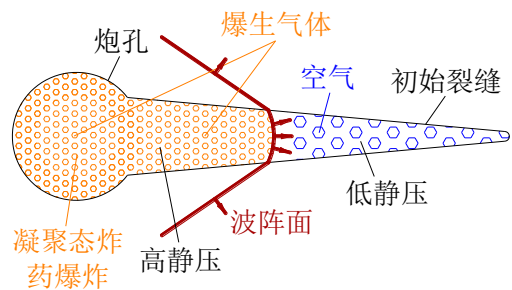
State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe



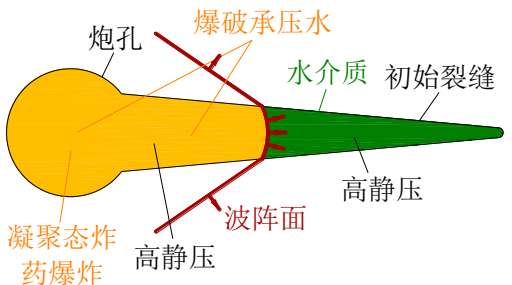
液体炸药爆破，简称“**液爆**”：采用**液体炸药、水、泥浆**等作为直接爆源或传爆介质，克服裂隙液黏滞阻力及毛管力作用，发挥裂隙液的动压转载和楔入增裂效能，实现**超动载作用下的静态破岩**，降低爆炸动态响应，方便深孔装药，改善爆破环境。

◆阶段一：充水承压爆破

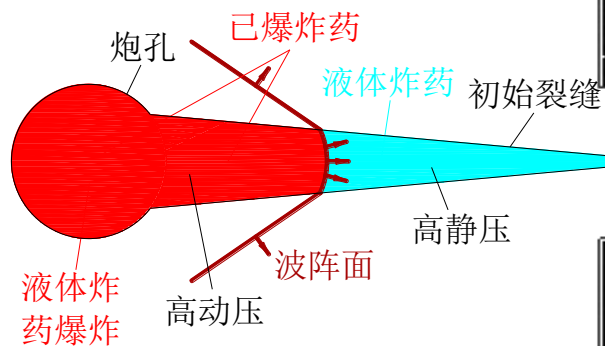
◆阶段二：液体炸药爆破



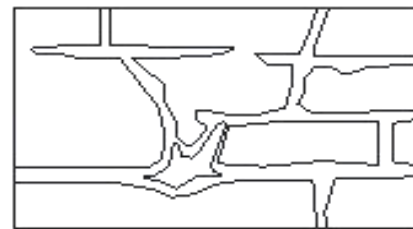
常规爆破条件



充水承压爆破



液体炸药爆破



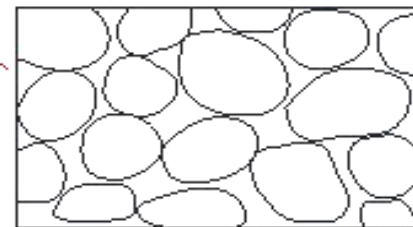
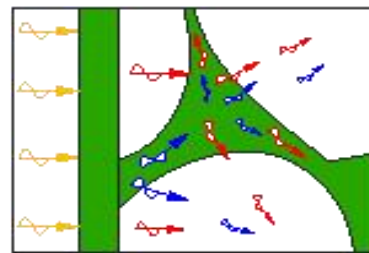
浸水



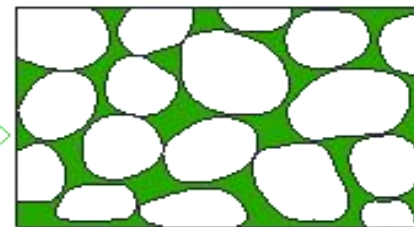
炸药爆轰截断

浸水基质转载

骨架基质转载



浸水



液体炸药的特点

- 水胶液体炸药，具有优良的物理**流动性**；
- 深孔灌装可以通过**液压隔离无摩擦输送泵**进行推送，解决了大角度深孔装药技术难题。
- 液体炸药适应温度**零下20℃**以内的环境。
- 可以**小临界直径起爆**特点，在单孔内实现重复爆破。



液体炸药爆破相关技术及装备

- 炮孔封孔优选基于两堵一注原理的改进型封孔器，自带注液和排气管；
- 液体炸药配合聚能管定向切缝，保证煤层顶板全面整齐切落。



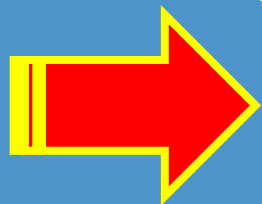
新型聚能管



液体炸药爆炸压裂用封孔器



State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



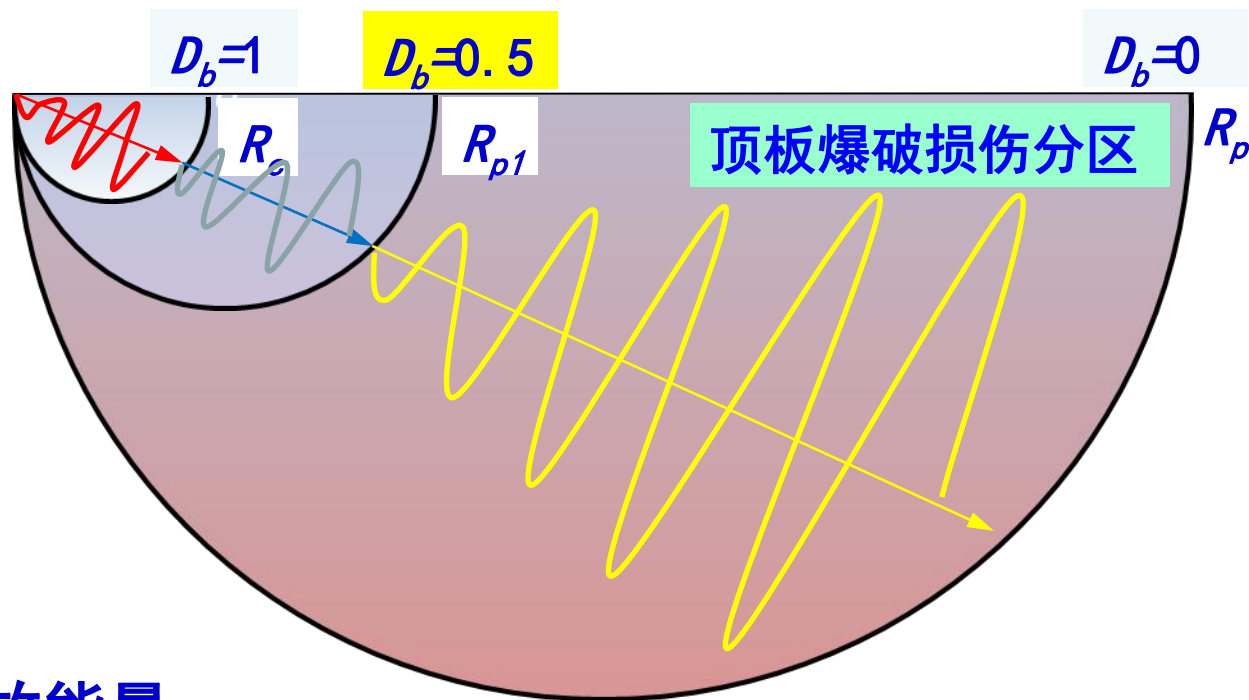
3、顶板爆破的效果评价

□ 顶板深孔爆破的作用

- 1、破坏顶板的完整性，形成裂隙区；
- 2、炸药爆炸，诱发顶板岩层中聚集能量的释放

□ 顶板深孔爆破效果评价方法

- 1、矿震能量法：是否大于炸药爆炸释放能量；
- 2、CT应力探测法：爆破前后应力场的变化；
- 3、来压步距观测：顶板来压步距是否减小；
- 4、钻孔探测法：探测爆破形成的裂隙区范围；



□ 矿震能量法

- 爆破效能指数 S_E : 定义顶板深孔爆破释放的能量减去炸药爆炸产生的能量, 除以顶板深孔爆破的装药量。

爆破效能评价判别标准

爆破效能指数	效果评价
$Se \leq 0$	无效
$0 < Se \leq 0.2$	有效
$0.2 < Se \leq 0.4$	良
$Se > 0.4$	优

$$S_e = \frac{k_r \log E_s - \log E_p}{\log P_e}$$

$$E_p = E_{pi} \times P_e \times 10^{-4}$$

k_r 岩体属性系数, E_s 爆破后测到的震动能量, P_e 炸药量, E_{pi} 单位炸药爆炸释放的能量, E_p 炸药爆炸传播剩余的能量。一般微震监测系统监测到的能量是震源(炸药爆破)能量的万分之一。

炸药类型	爆破能量 (J/kg)
TNT	4.26×10^6
2#岩石铵梯炸药	3.15×10^6
乳化炸药	3.10×10^6

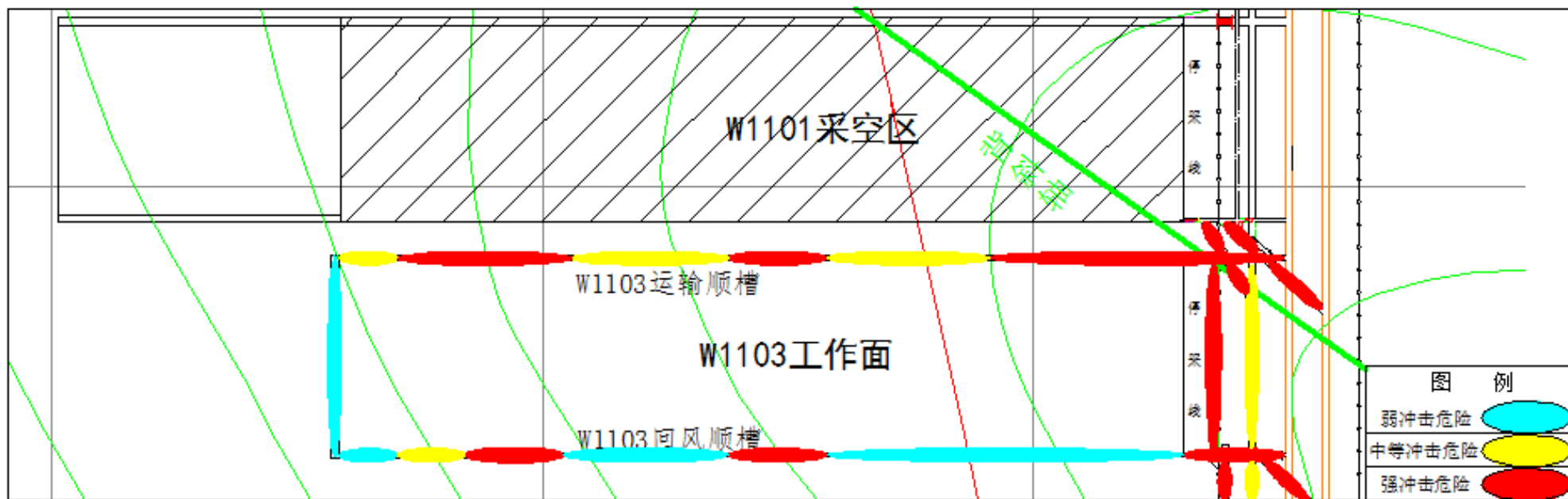
顶板爆破现场实例



State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



雨田煤矿 一采区西 翼各工作 面冲击地 压危险指 数与危险 区域



一采区 工作面	地质因素 W_{t1}	开采技术因素 W_{t2}	综合评估指数	冲击地压危险等级
W1101	0.71	0.33	0.71	中等冲击危险
W1102	0.81	0.67	0.81	强冲击危险
W1103	0.71	0.67	0.71	中等冲击危险
W1104	0.67	0.33	0.67	中等冲击危险

顶板爆破现场实例

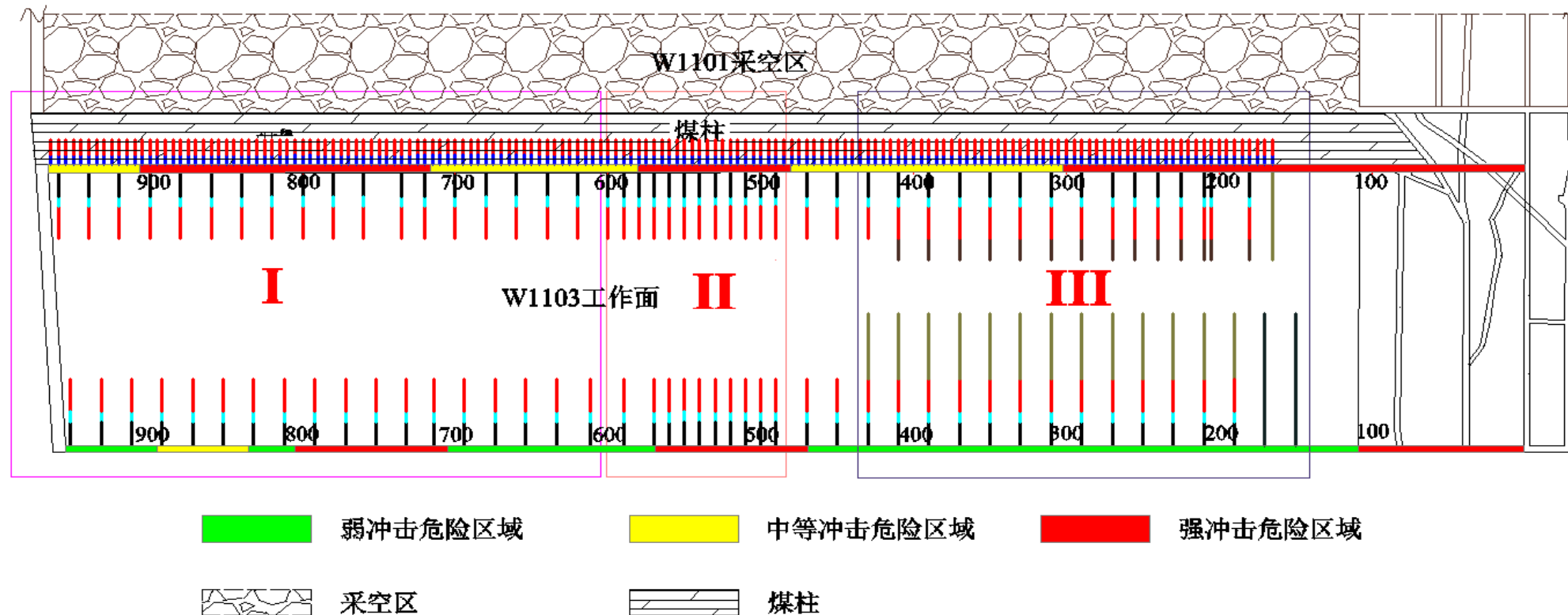


State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



□ W1103工作面顶板预裂爆破

- 第I阶段：600~980m，间距20m，3个孔，孔长度：35m、39m、56m；
- 第II阶段：500~600m，间距**10m**，3个孔，孔长度：35m、39m、56m；
- 第III阶段：100m~500m，间距20m，**4个孔**，孔长度：35m、39m、56m、**98m（回风顺槽）/76m（运输顺槽）**；



顶板爆破现场实例

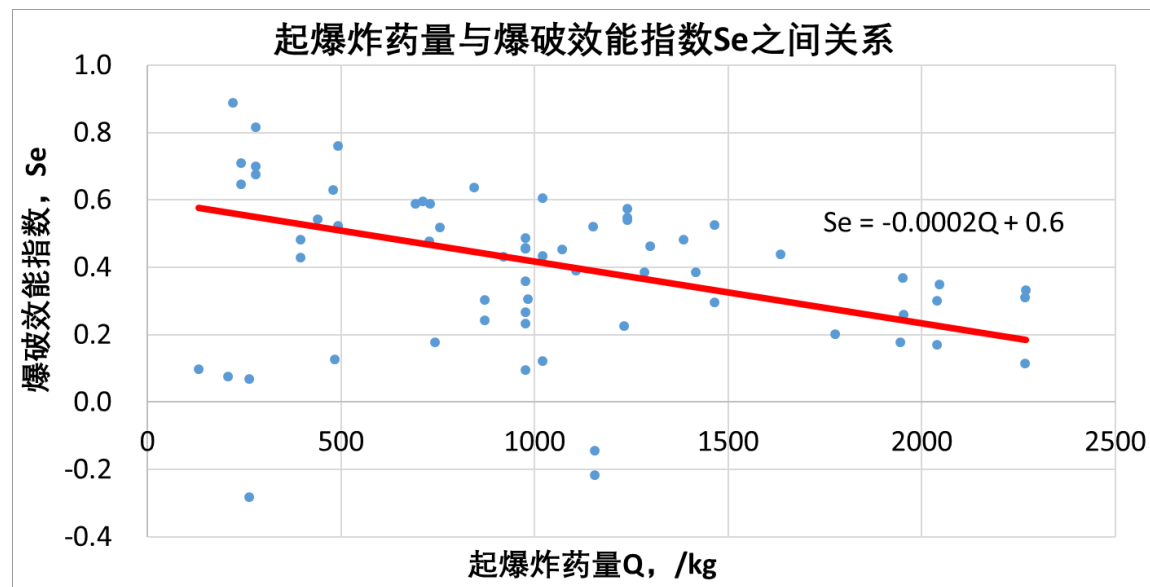
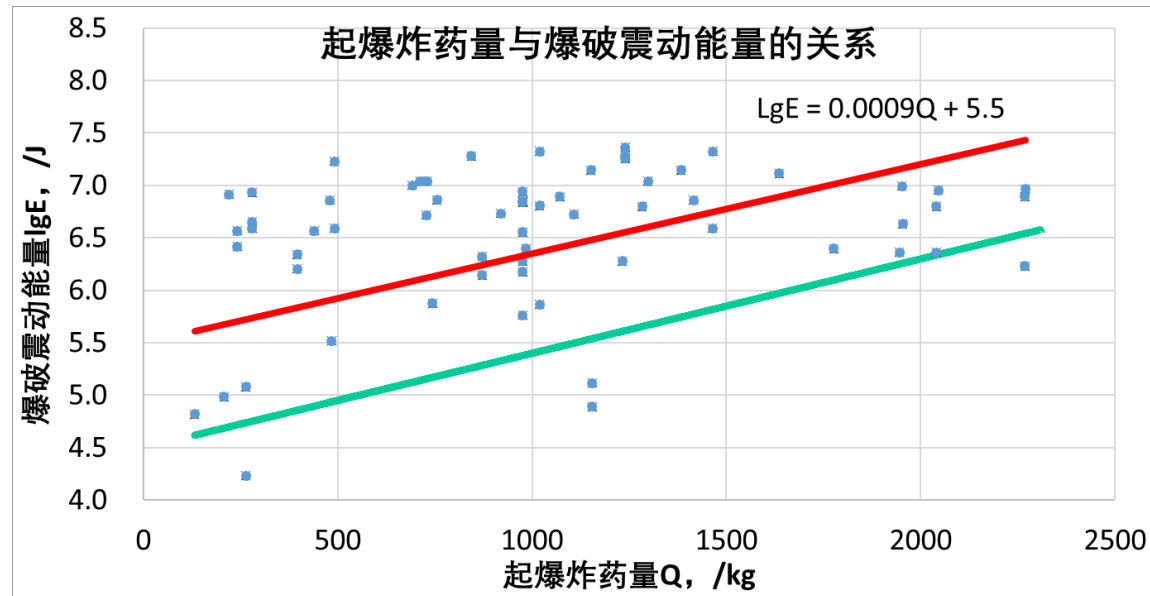


State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



新疆雨田煤矿爆破效果

- 雨田煤矿W1103工作面具有冲击危险性，顶板坚硬，强度高，层厚大；
- 采用预裂爆破方式处理顶板，采用乳化炸药。共进行了66次爆破；
- 起爆炸药量越大，爆破诱发的震动能量也越高；
- 当起爆炸药量达到一定值后，随着药量的增加，爆破效能会降低
- 统计表明，4.55%爆破无效，15.15%有效，25.75%效果良好，54.55%效果优良



顶板爆破效果-来压步距法



State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



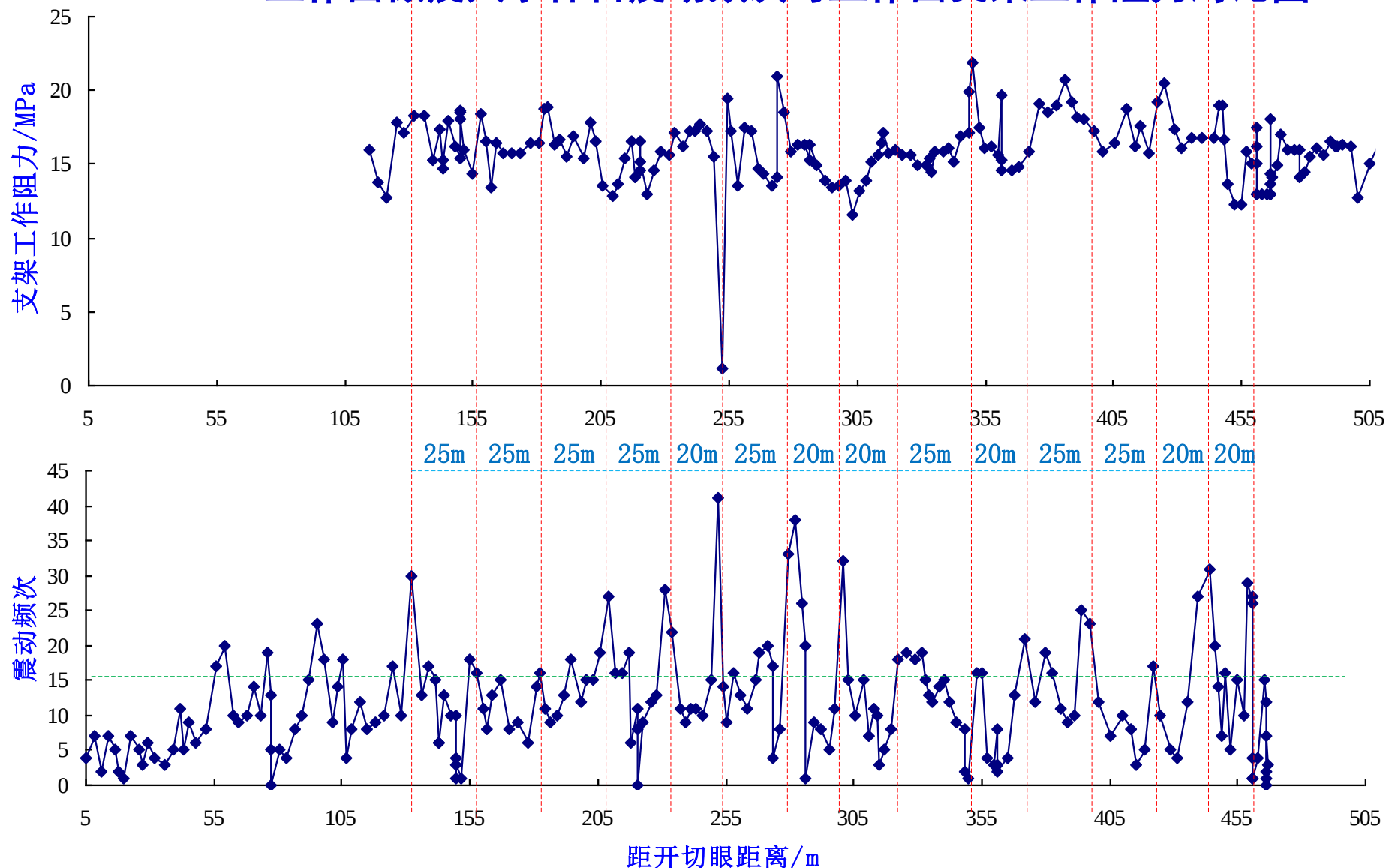
250103工作面微震大事件日震动频次与工作面支架工作阻力对比图

□ 顶板来压步距观测法

➤ 华亭煤矿
250103面

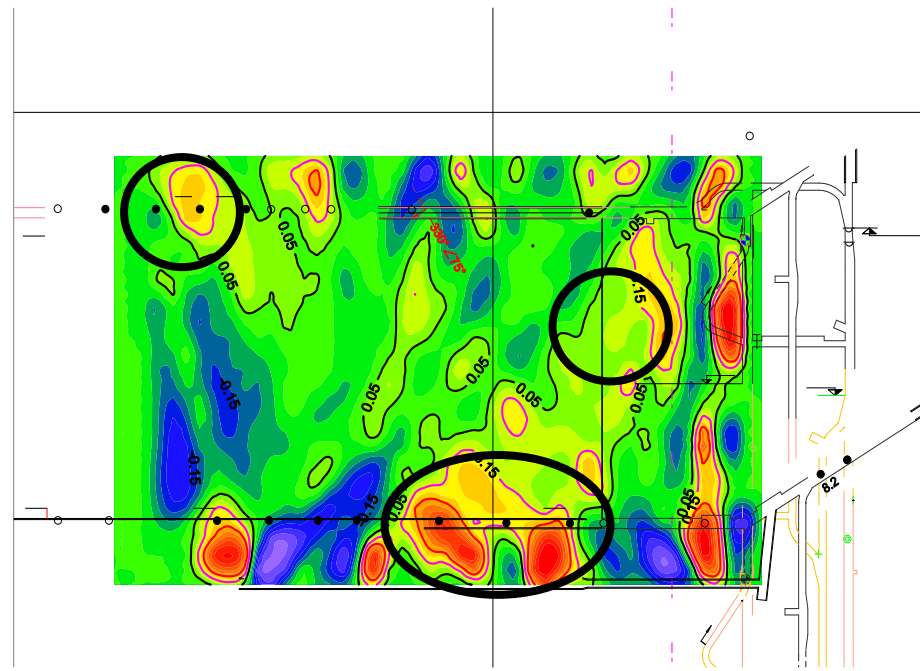
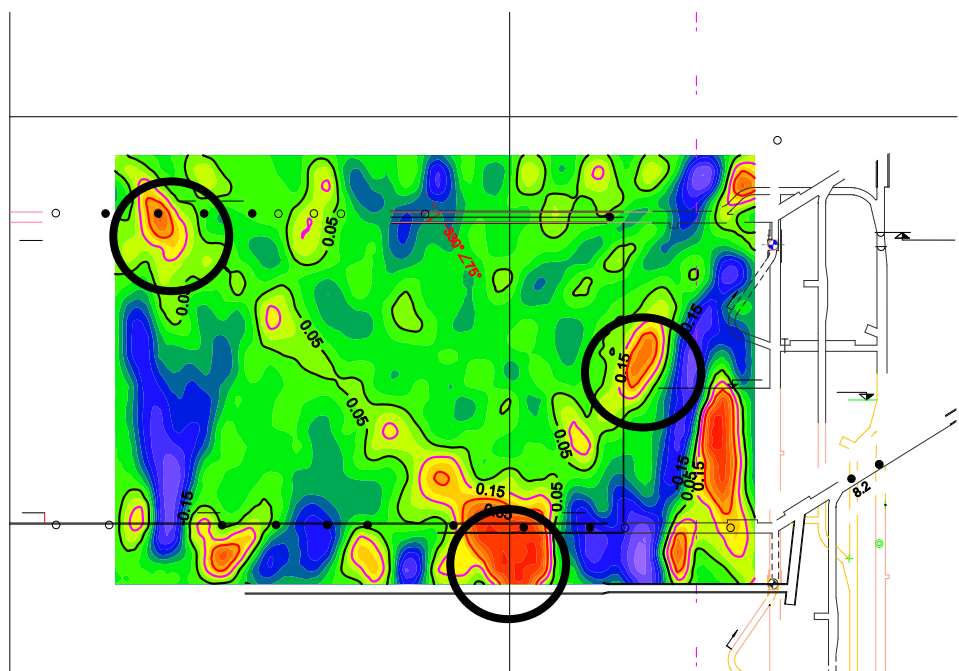
➤ 步距式顶板
爆破。

➤ 炮眼布置：
扇形孔，步
距25m



□ CT应力探测法——孟巴煤矿

孟巴矿1210D煤柱区在实施卸压爆破前后的两次主动CT反演波速分布结果：



- 爆破卸压前在工作面巷道周围共存在3个高波速区域；顶板深孔爆破后，三个区域波速均有所降低，高应力向周围区域转移，表明顶板预裂爆破卸压效果较好。



汇报提纲

一、矿震及其风险评估

二、岩体爆破及其效果评价

三、双震源一体化CT探测

应力场双震源一体化CT探测



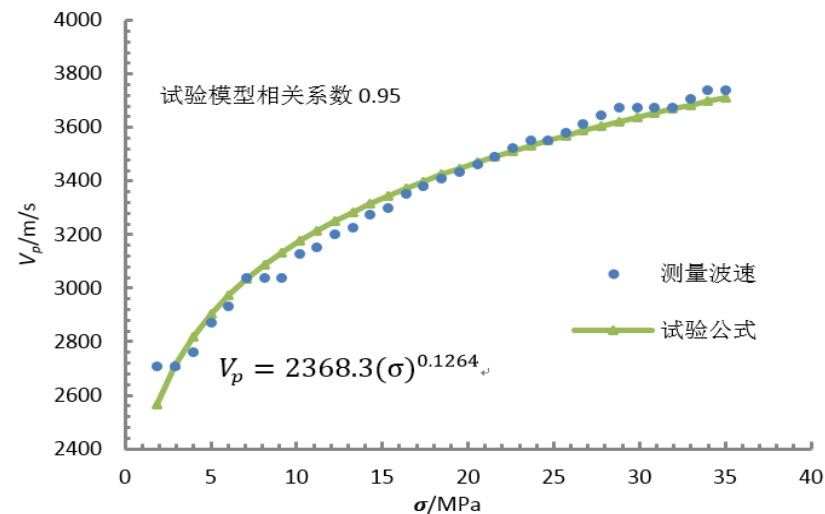
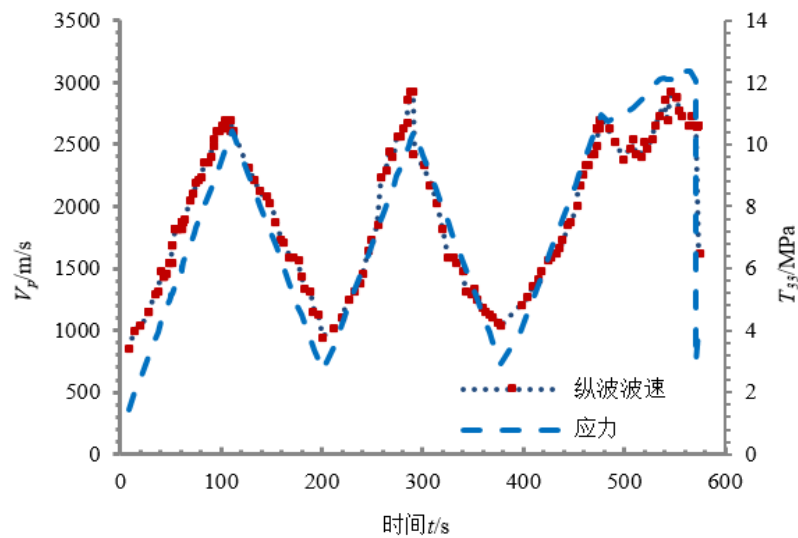
State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



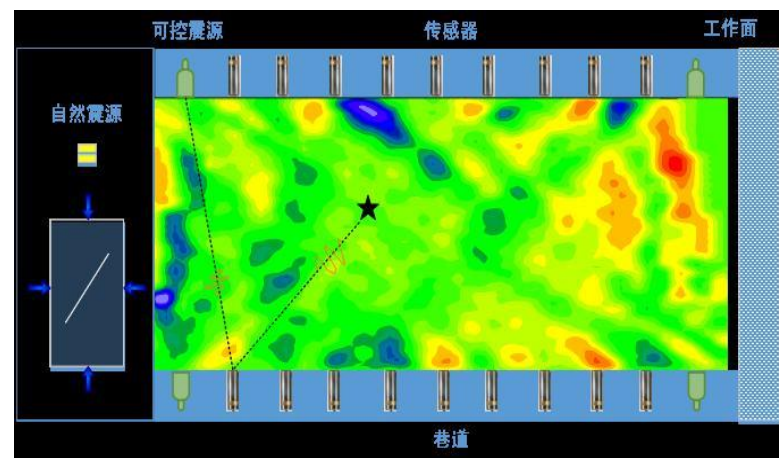
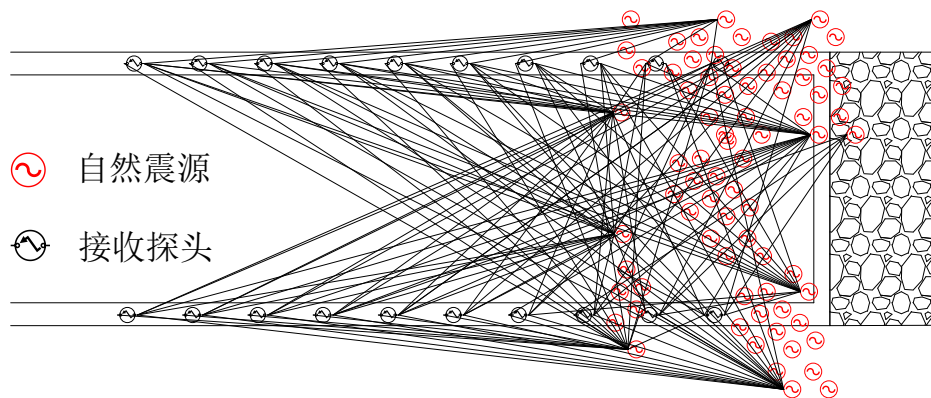
□ 理论基础

$$V_P = \varphi (\sigma)^\psi$$

□ 实验基础



□ 技术思路



应力场双震源一体化CT探测

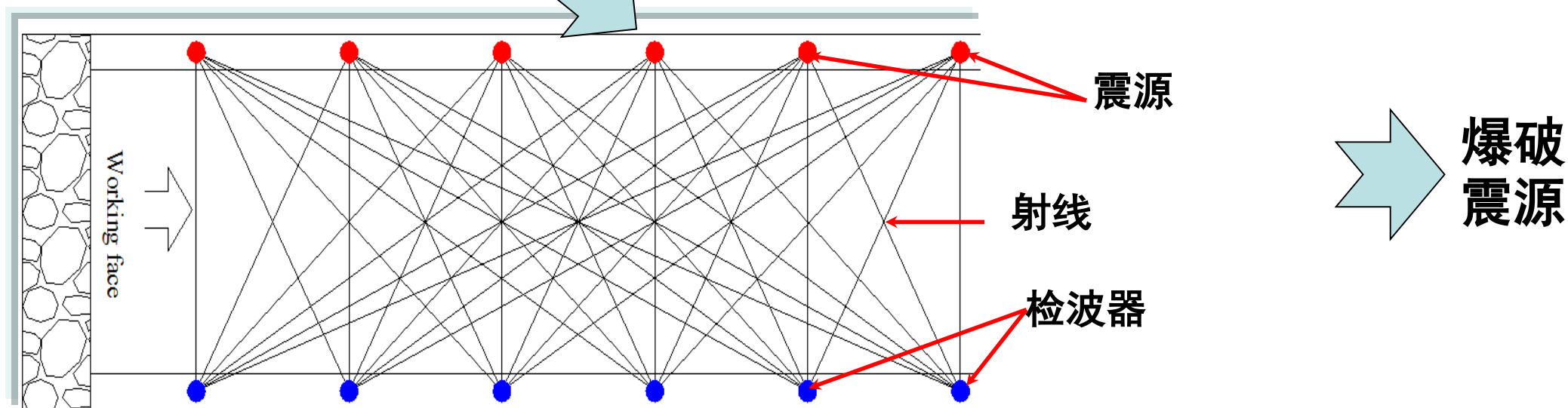
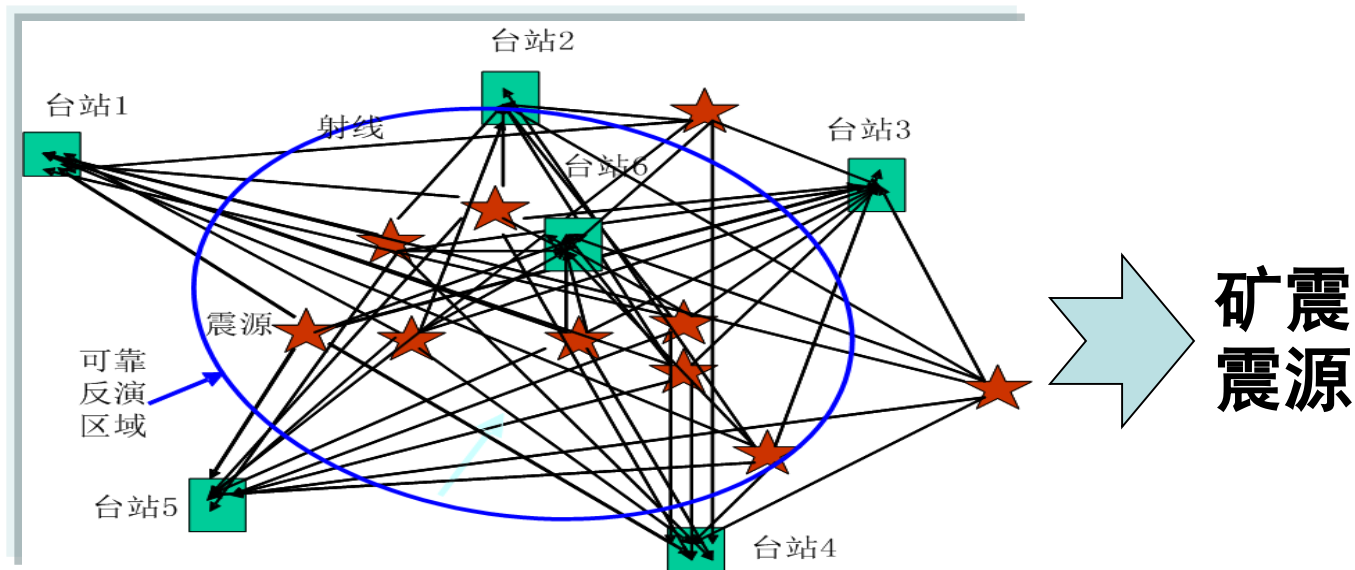


State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe



CT探测技术

- 震动波（被动）CT：
矿震被动震源
- 弹性波（主动）CT：
爆破主动震源



应力场双震源一体化CT探测



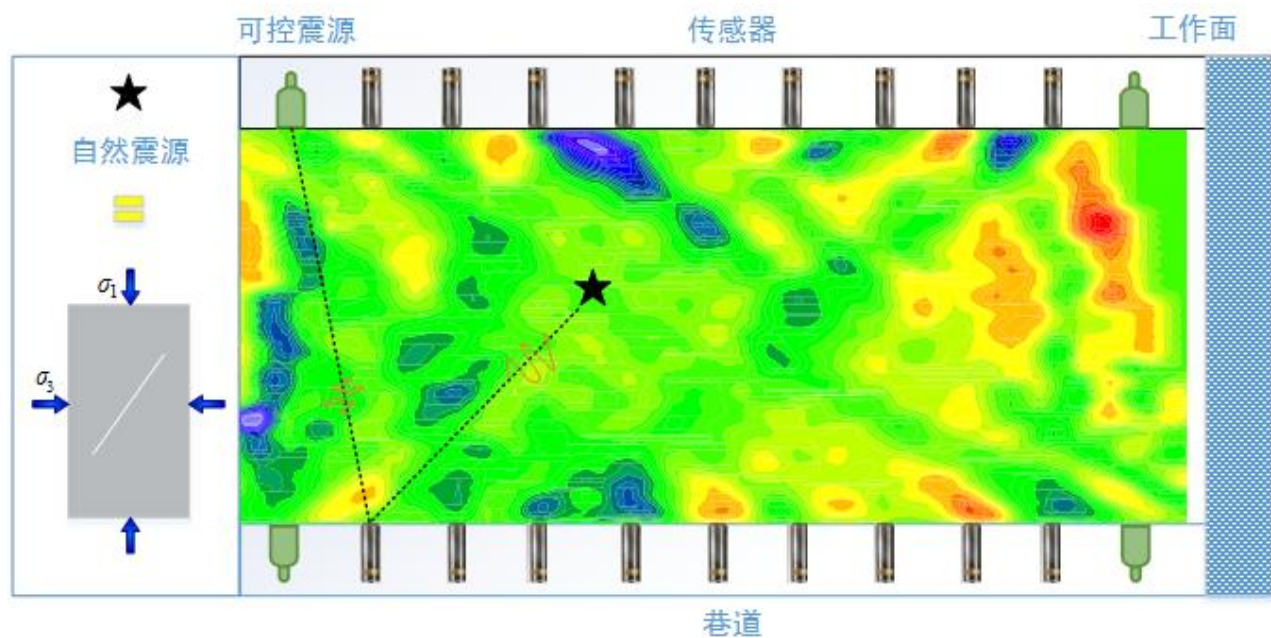
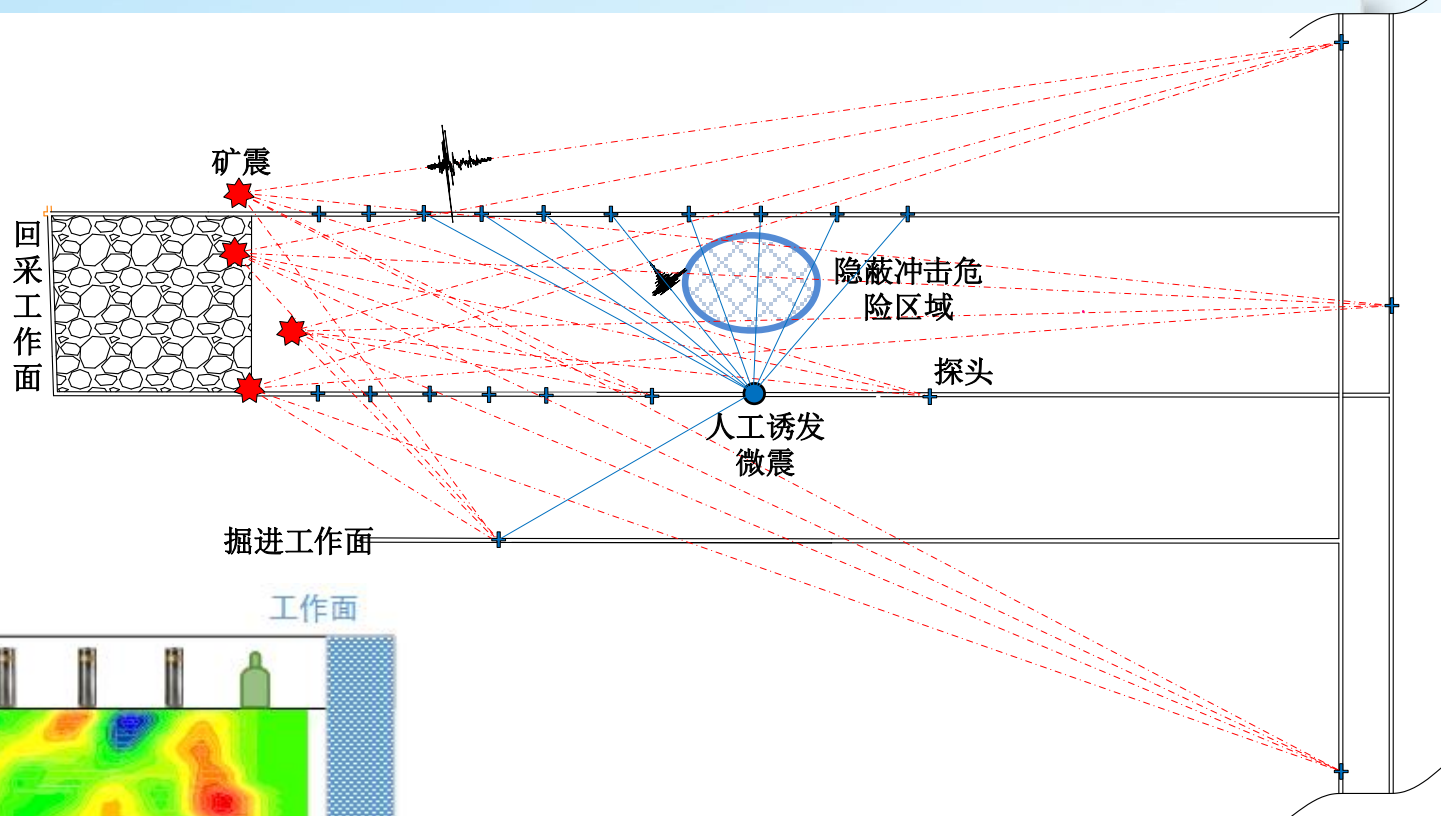
State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



□ 关键技术

➤ 主被动双震源一体化CT:

- ✓ 双源：可控震源和自然震源。
- ✓ 双触发机制：实现了双源震动波信号的采集和分析。



应力场双震源一体化CT探测

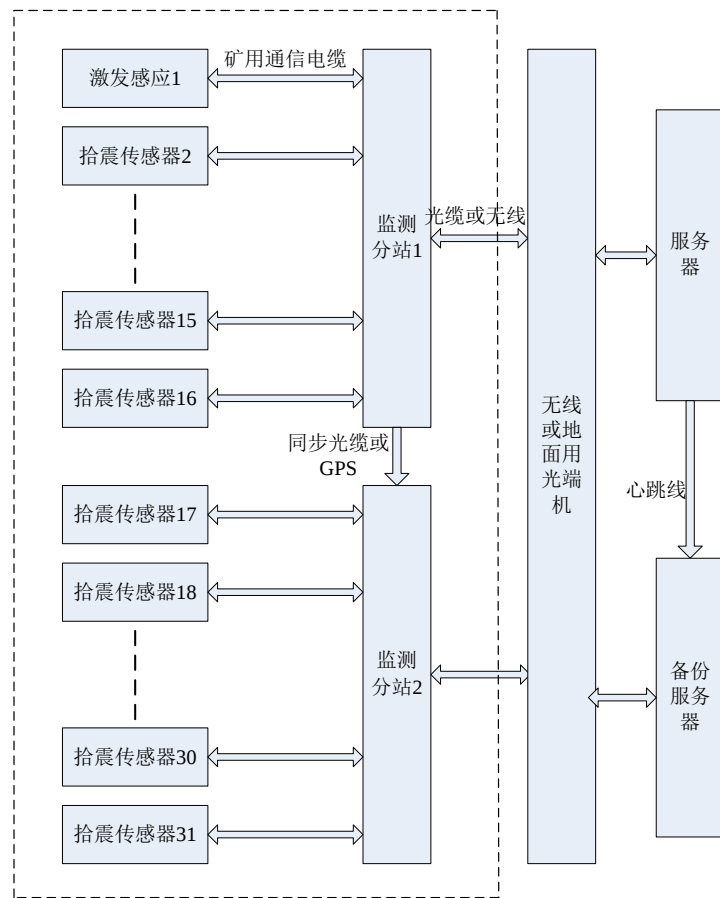
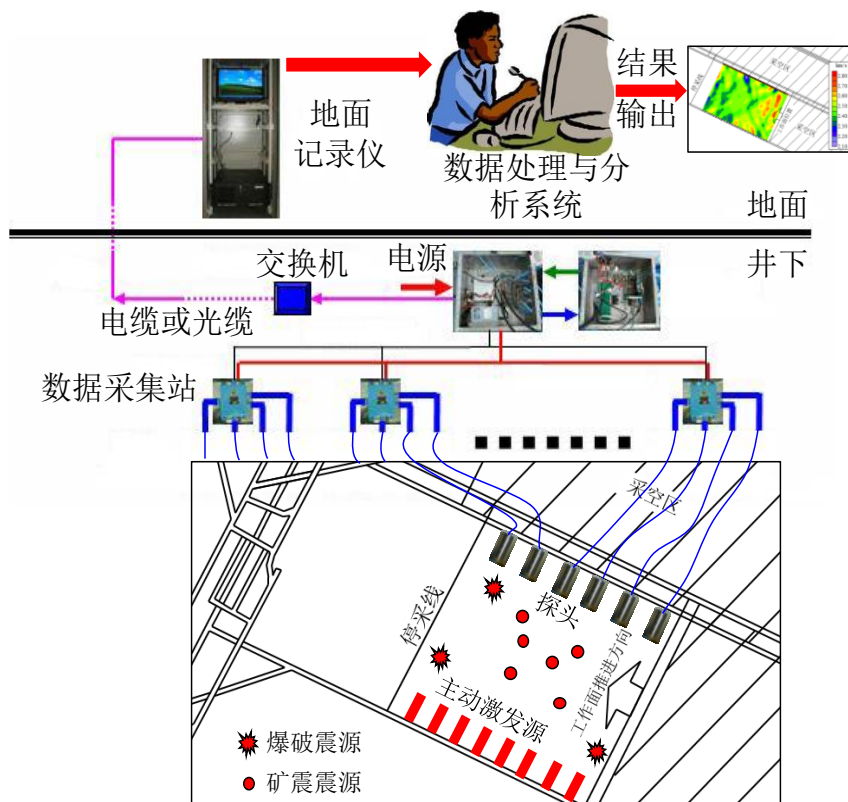


State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



关键技术

- 矿山震动智能识别，人工震源在线激发，弹性波CT反演在线智能分析；
- 实现区域应力场快速、在线、智能反演。



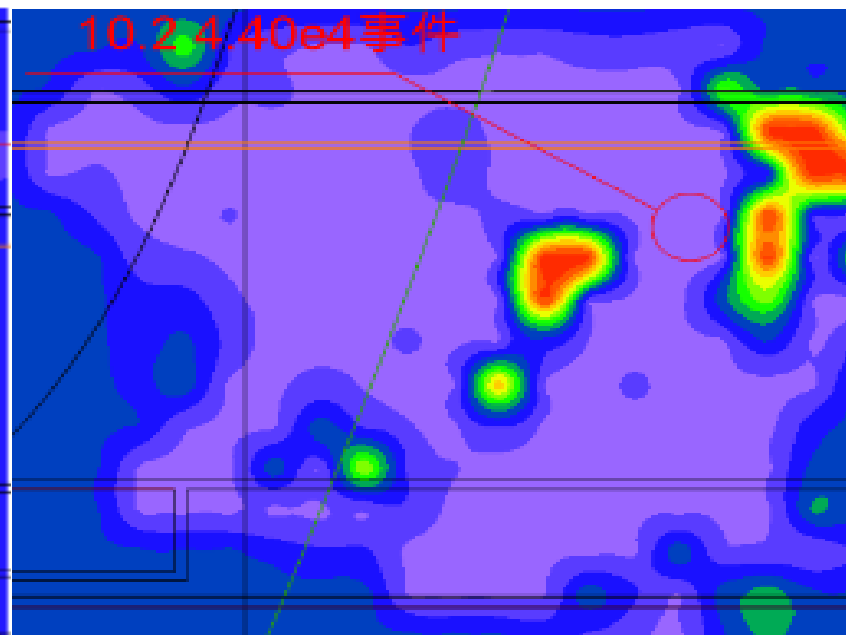
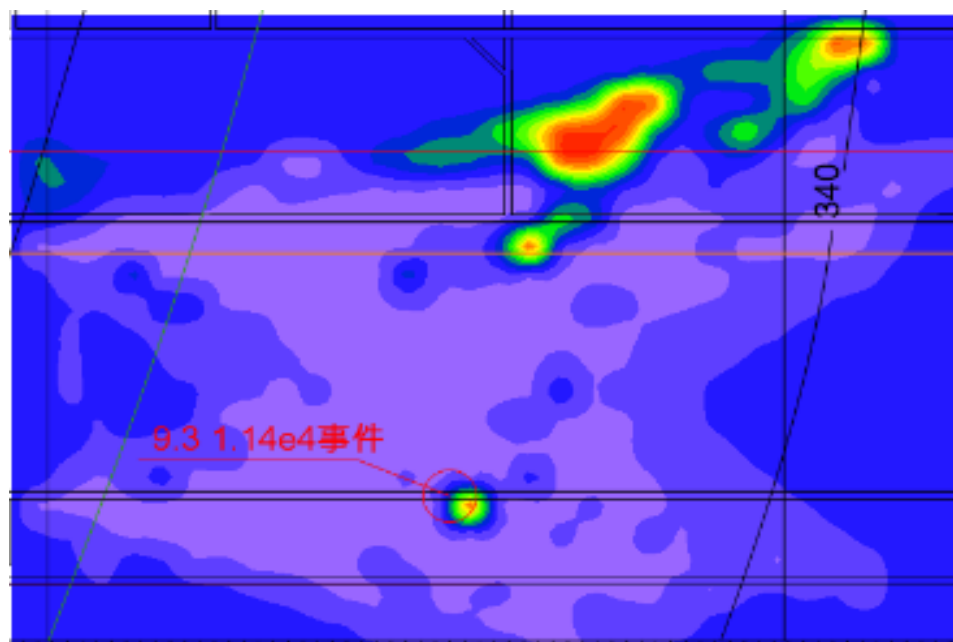
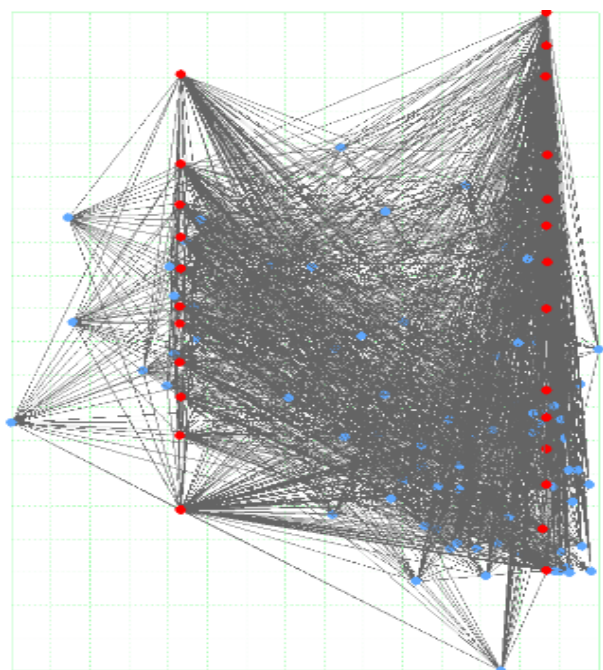
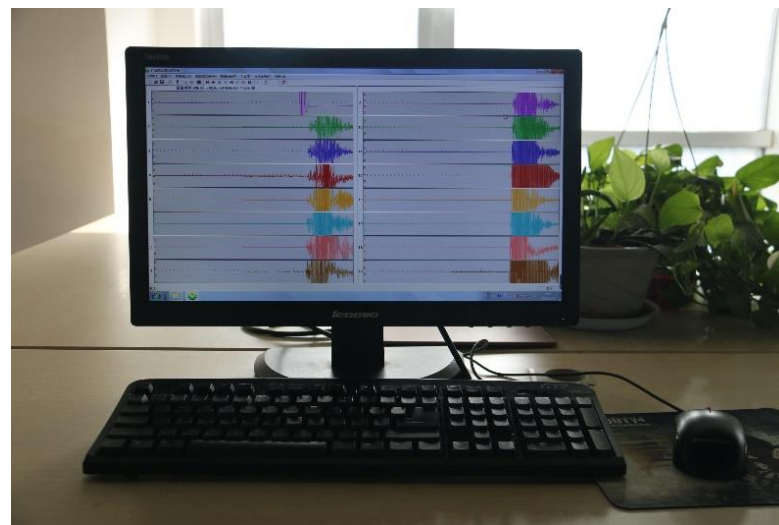
应力场双震源一体化CT探测



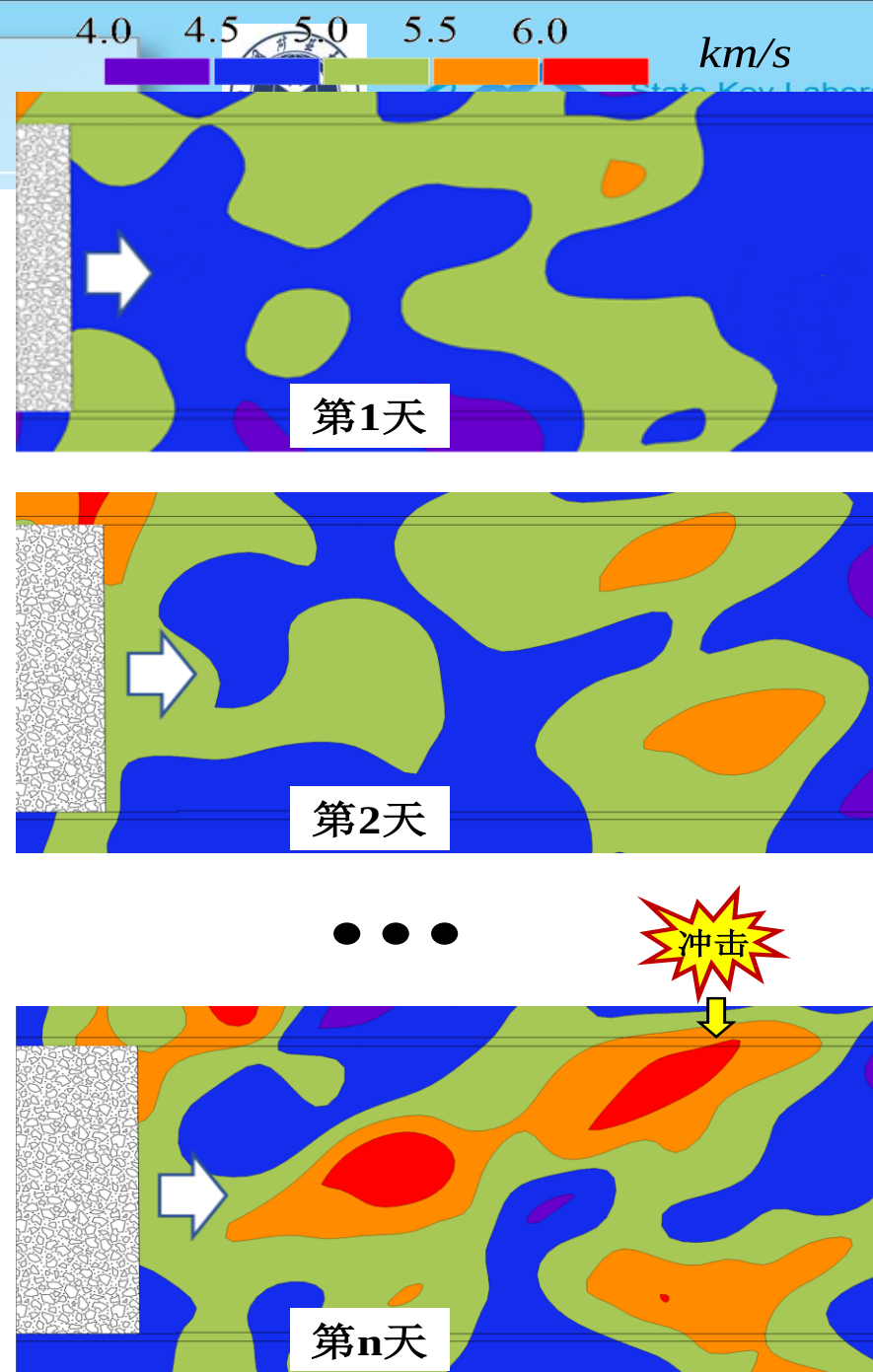
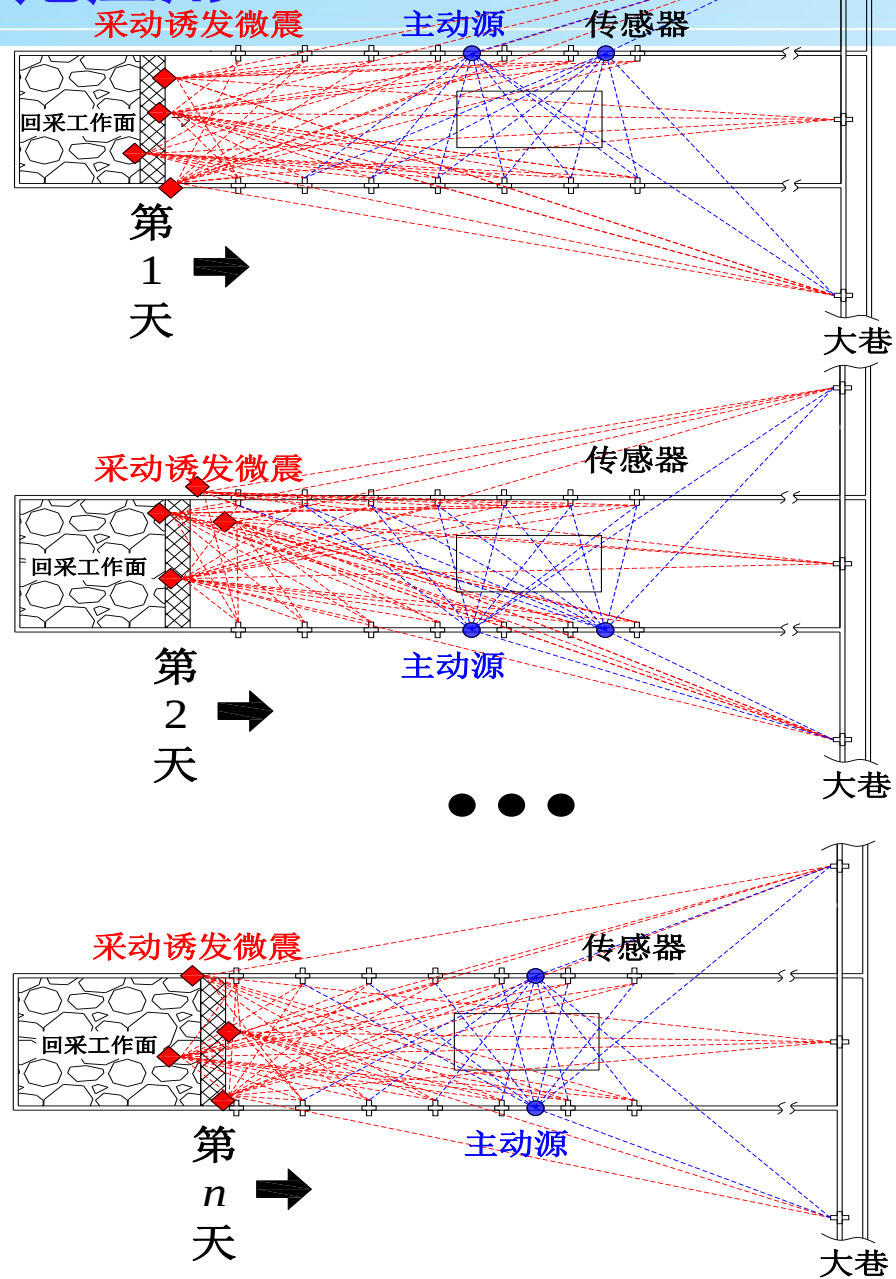
State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe Mining



- 示范矿井试验——某矿401103工作面
- 采用KJ470主被动双震源一体化CT探测技术
- 成功对能量高于 10^4J 的多次震动进行了预警



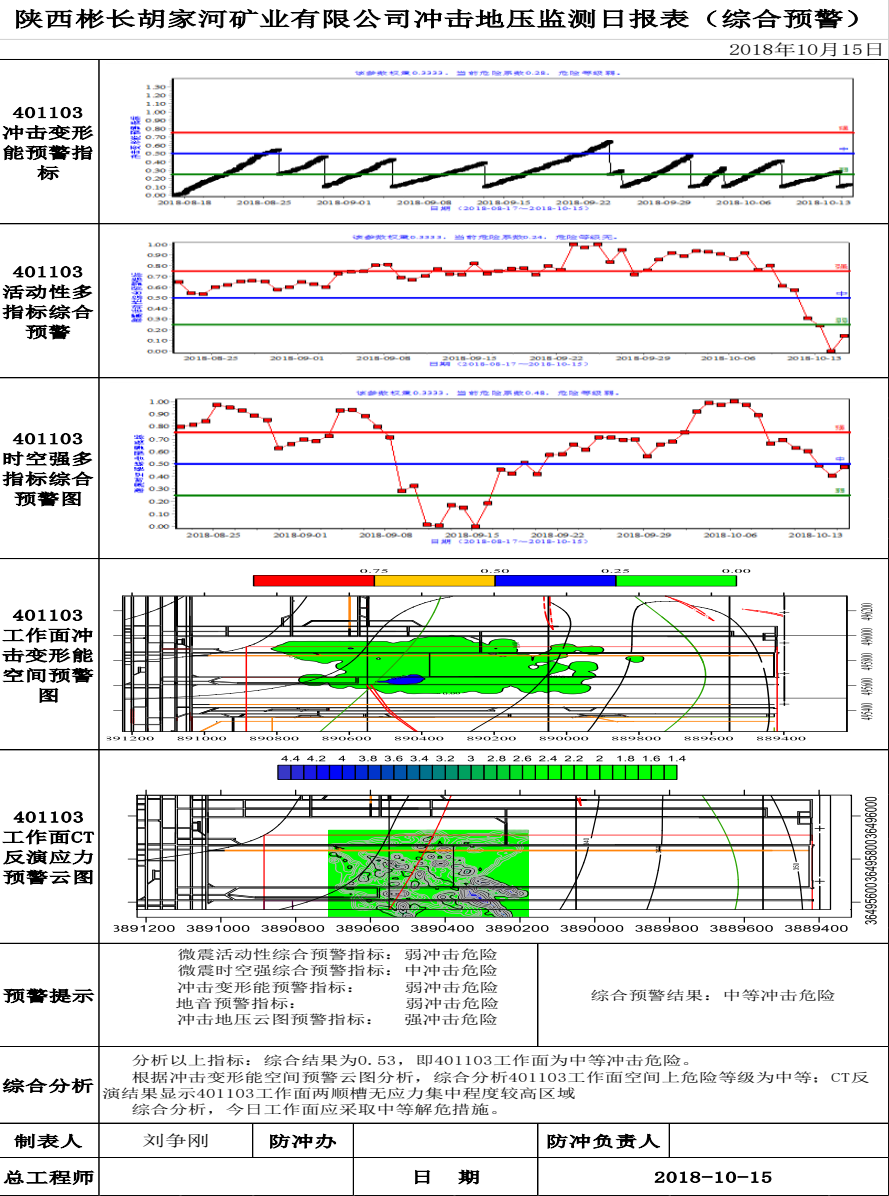
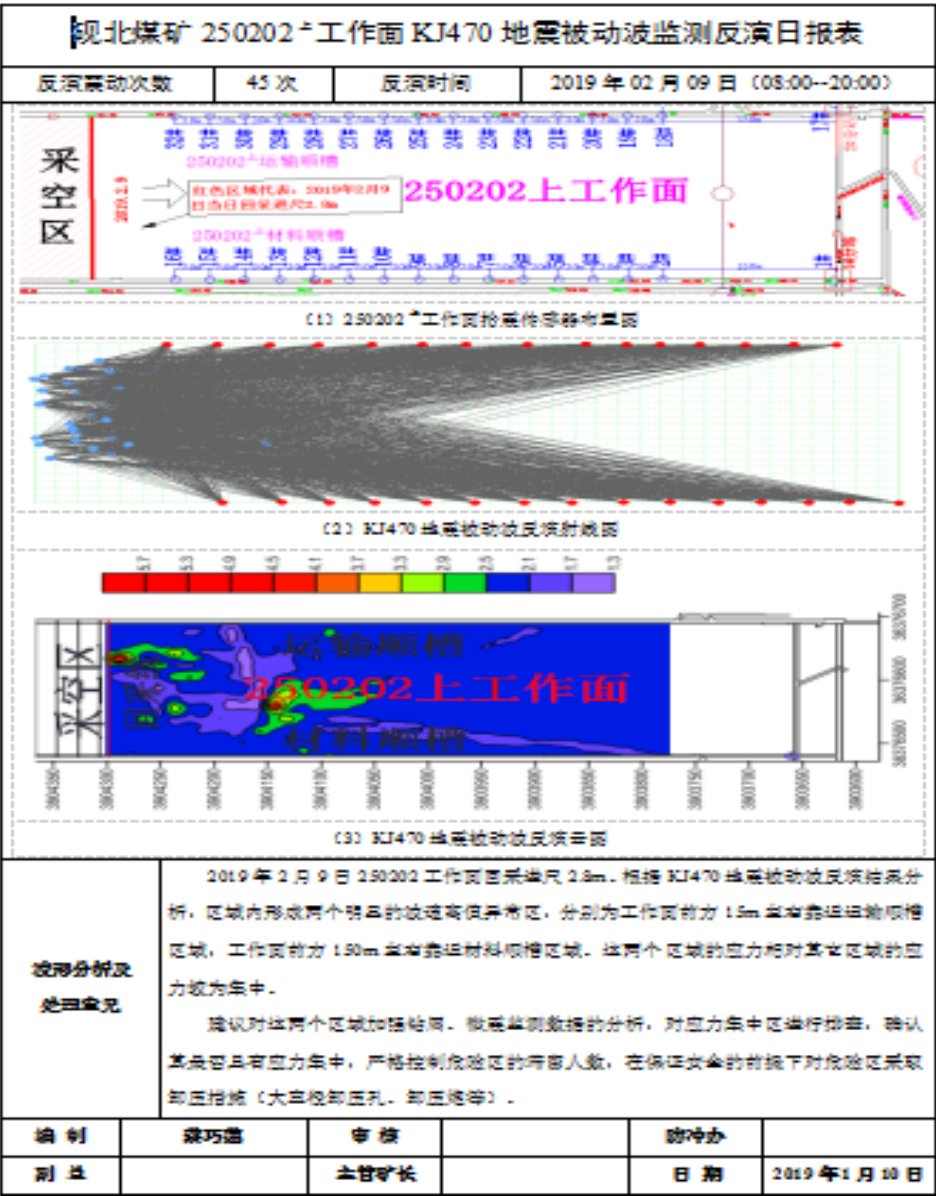
示范应用



应力场双震源一体化CT探测



State Key Laboratory
of Coal Resources and Safety





State Key Laboratory
of Coal Resources and Safe



敬请指正！

谢 谢！

Thanks!

