



中国矿业大学



实体煤巷道掘进 冲击机理及其控制对策



报告人：窦林名 教授

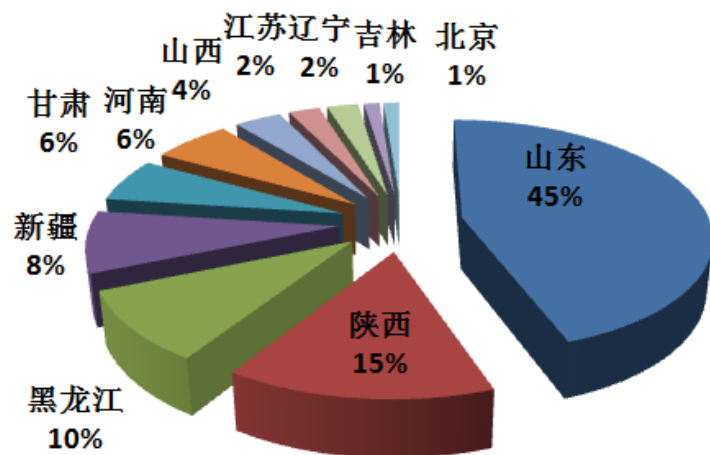
单位：中国矿业大学

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

汇报提纲

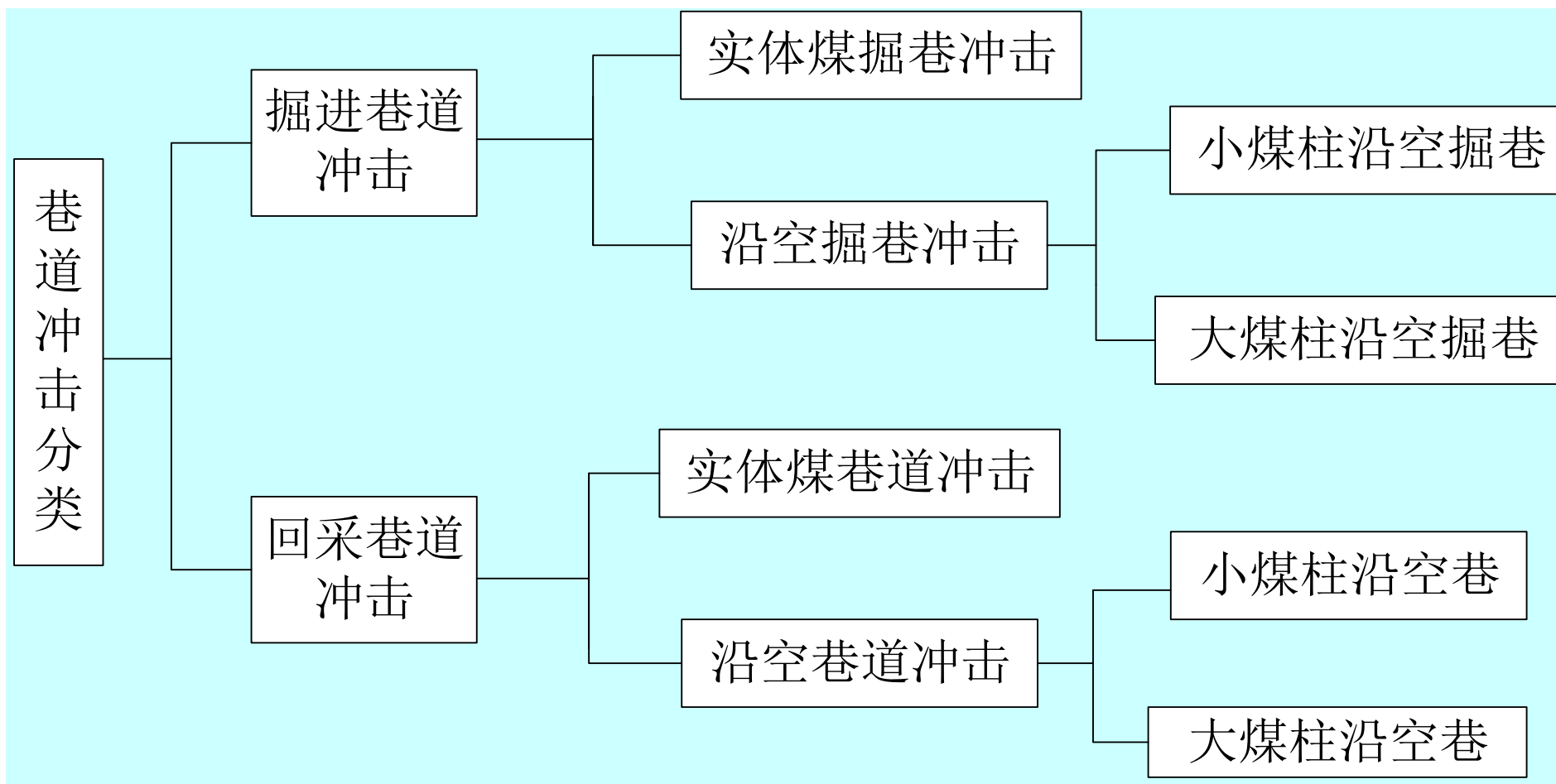
- 一、煤巷掘进冲击显现特征
- 二、实体煤巷道掘进冲击机理
- 三、巷道掘进冲击防治对策

- 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。



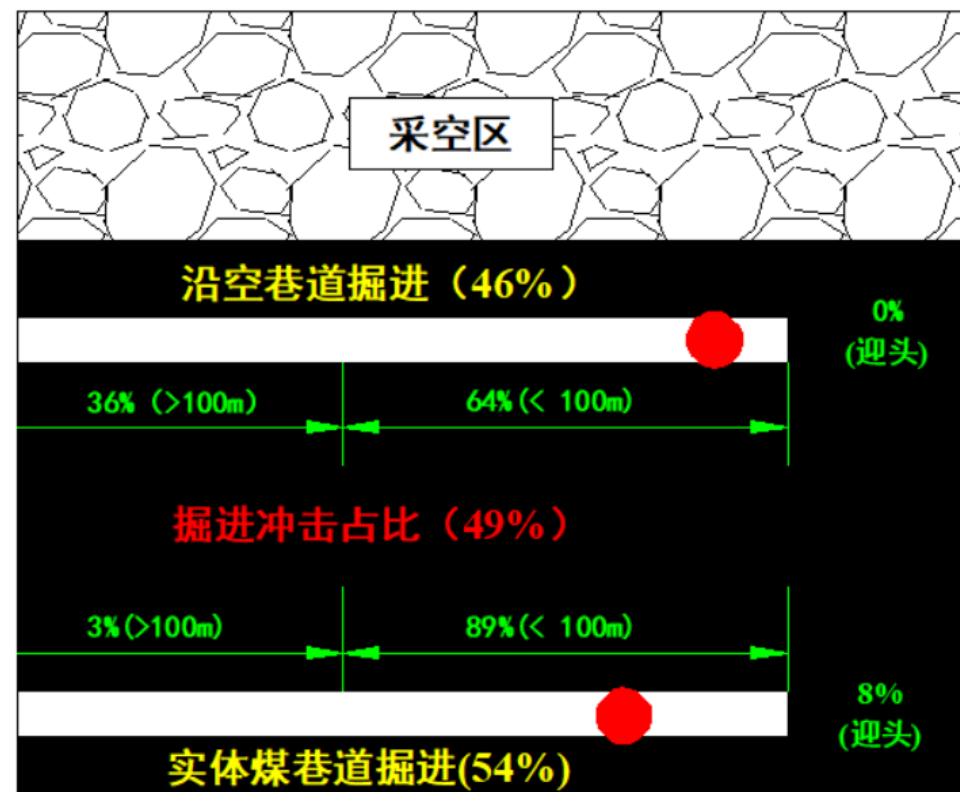
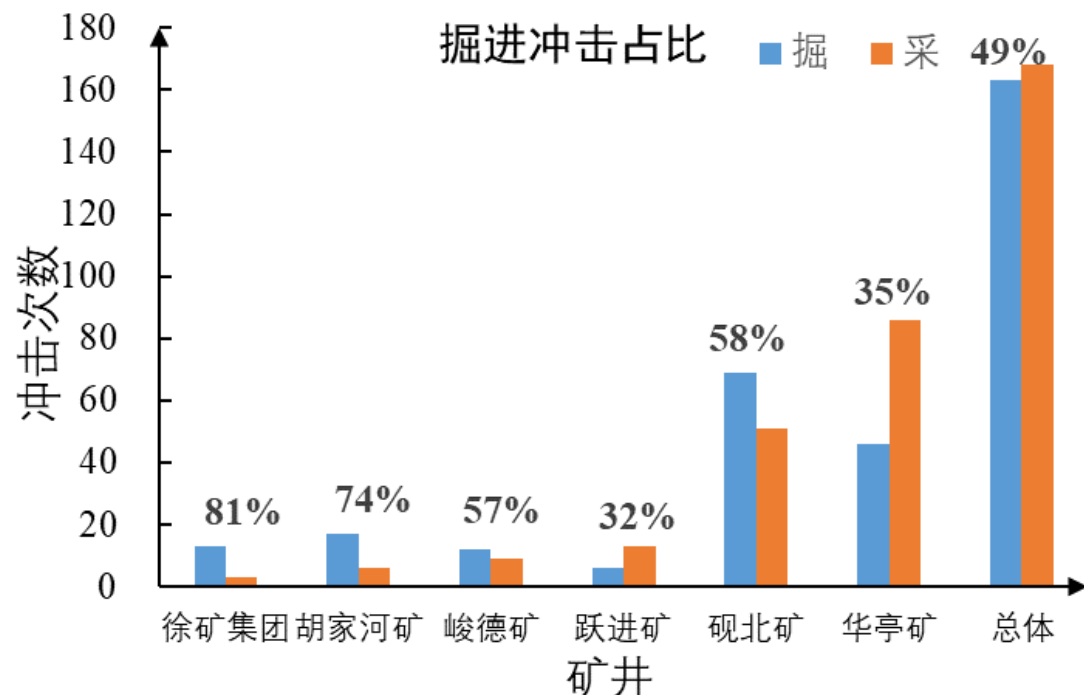
□ 巷道冲击分类

➤ 随着开采深度及强度的增加，掘进期间的冲击矿压大幅度上升。



□ 实体煤巷道掘进冲击概况

- ✓ 占比：巷道掘进期间冲击 **49%**、实体煤占掘进期间 **54%**
- ✓ 对人员危害大：实体煤 **90%以上冲击位于迎头后方100m范围**



一、煤巷掘进冲击显现特征

□ 实体煤巷道掘进冲击特征

➤ 最大冲击能量小

回采 / 沿空 / **实体煤**

1. 6E+8J/ 3. 1E+7J/ 1. 1E+7J

➤ 最大冲击破坏范围小

回采/沿空/**实体煤**

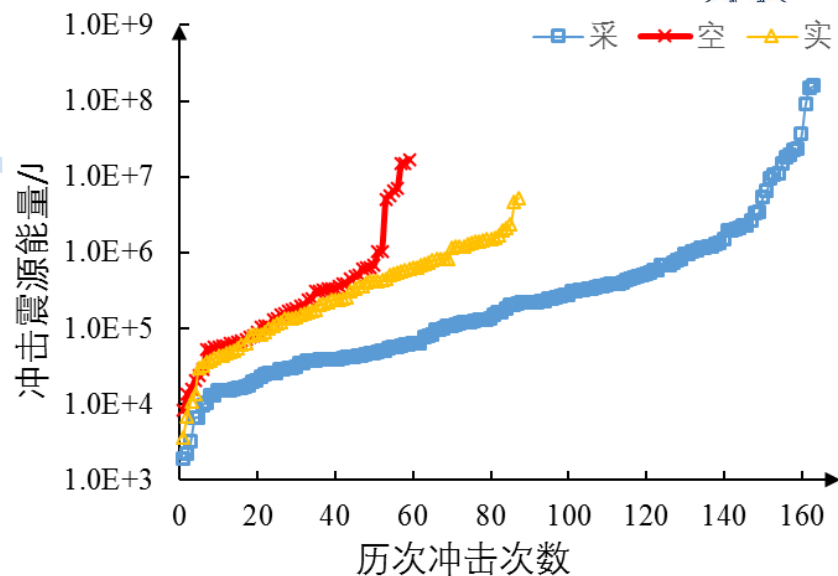
1000m/130m/ 200m

➤ 巷道变形量小

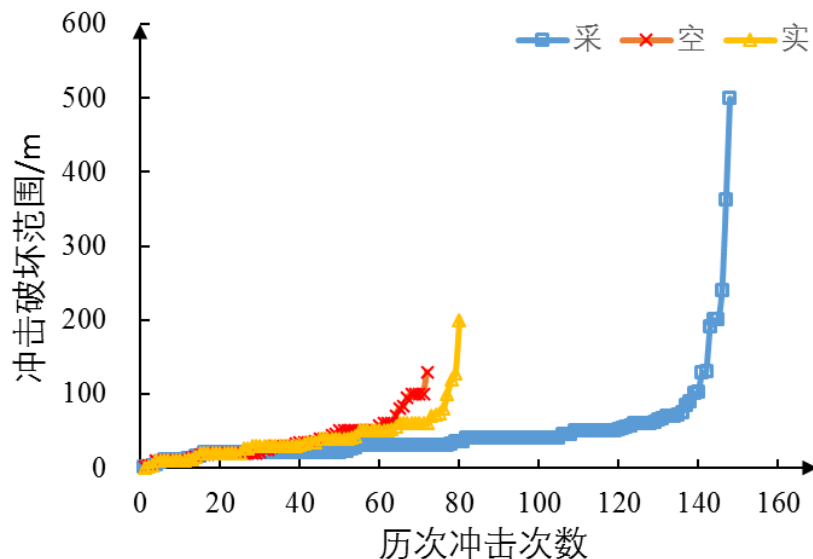
(>0. 6m变形量占比)

回采 / 沿空 / **实体煤**

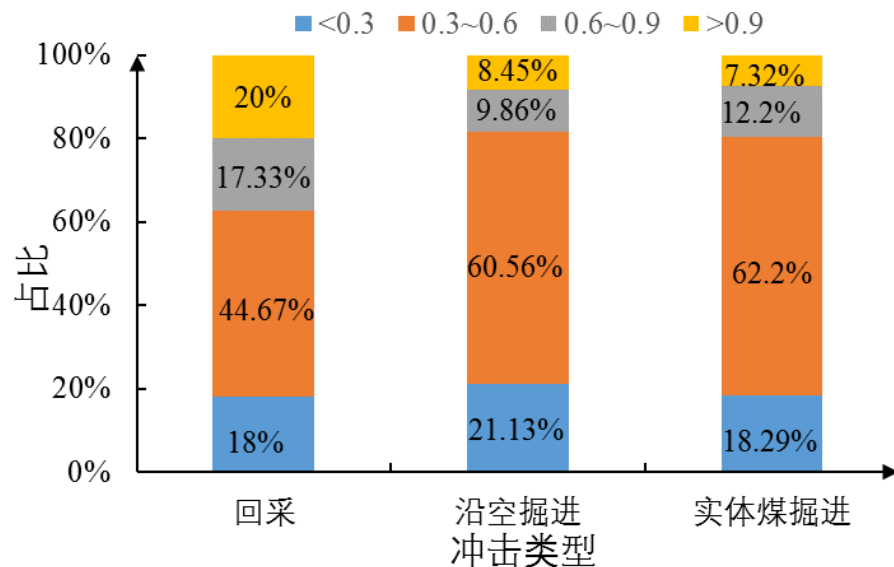
37. 3%/18. 3%/ 19. 5%



注：采：回采期间、实：实体煤掘进、空：沿空掘进。



注：采：回采期间、实：实体煤掘进、空：沿空掘进。



一、煤巷掘进冲击显现特征

□ 实体煤巷道掘进冲击特征

➤ 迎头/巷帮/底板不同

✓ 迎头：冲击占比小、冲击能量小、破坏程度小

8% / 8.0E+05J / 仅造成片帮（占比\能量\破坏）

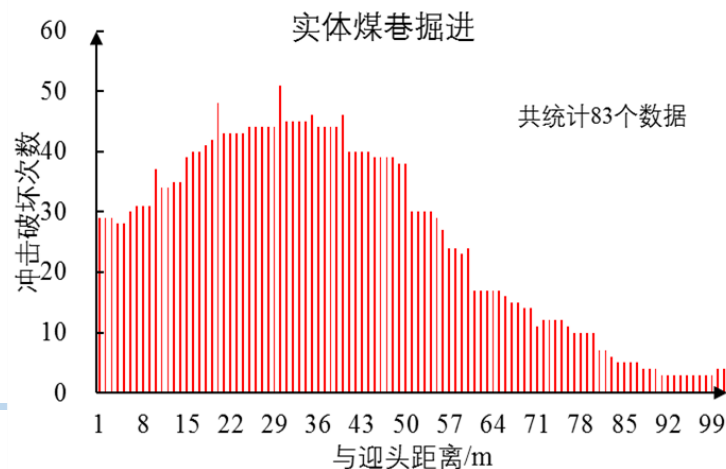
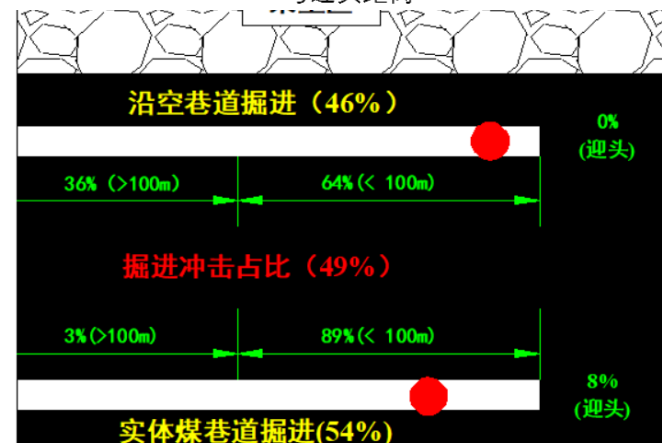
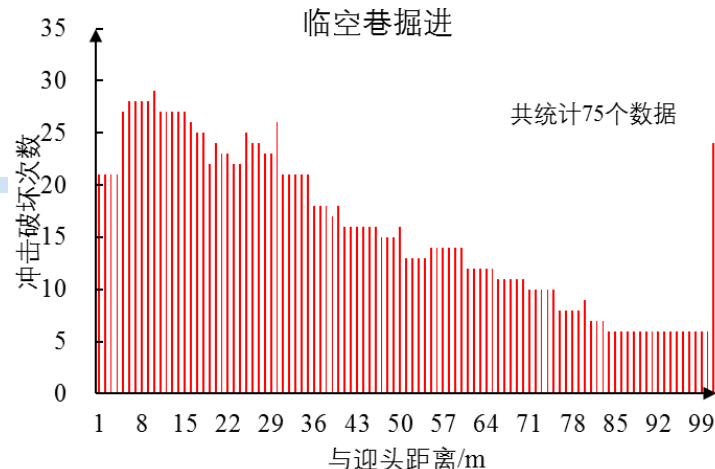
✓ 巷帮和顶底板

92% / 1.0E+07J / 煤体喷出、巷道闭合等

➤ 掘进扰动影响显著

✓ 97%的冲击破坏区位于距迎头**100m**范围巷道

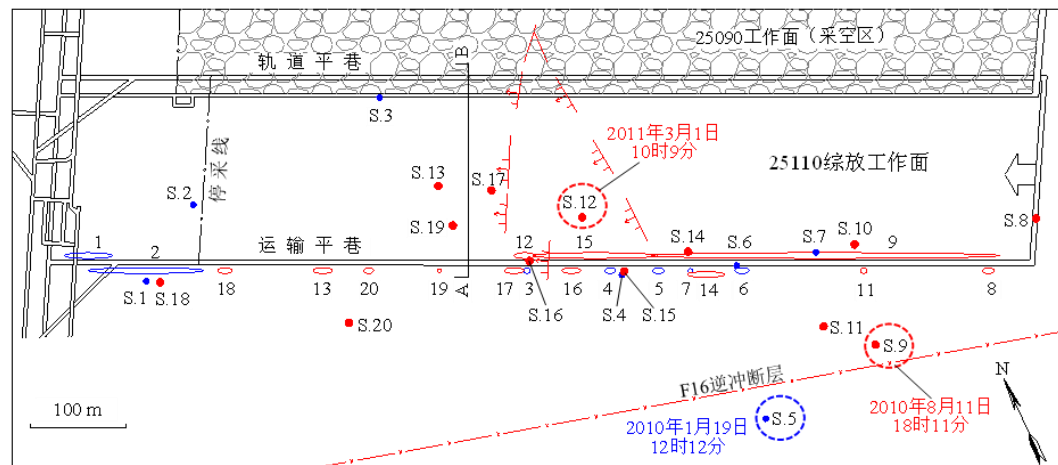
✓ 最易冲击位置距离迎头**15~45m**



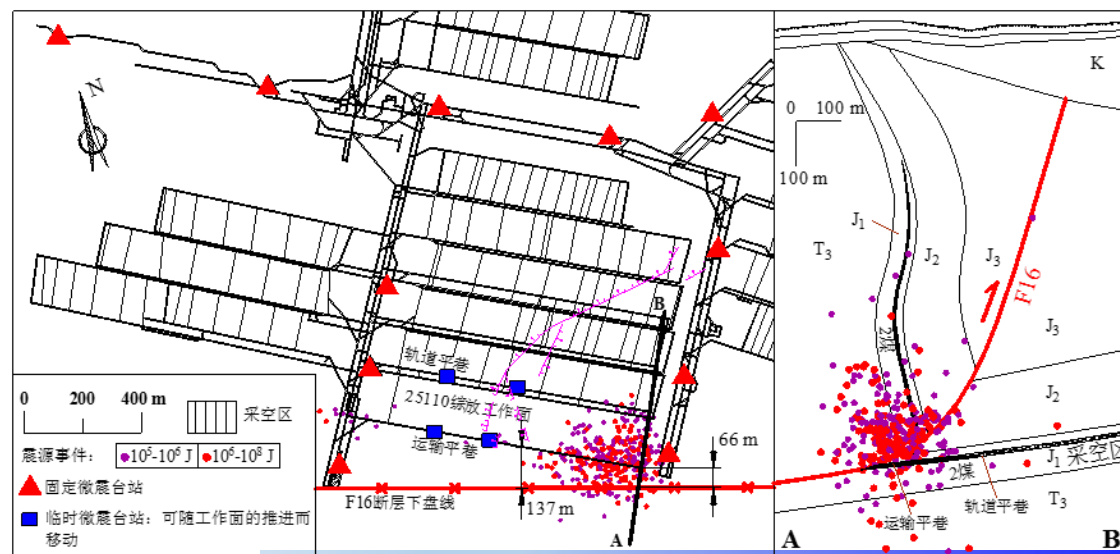
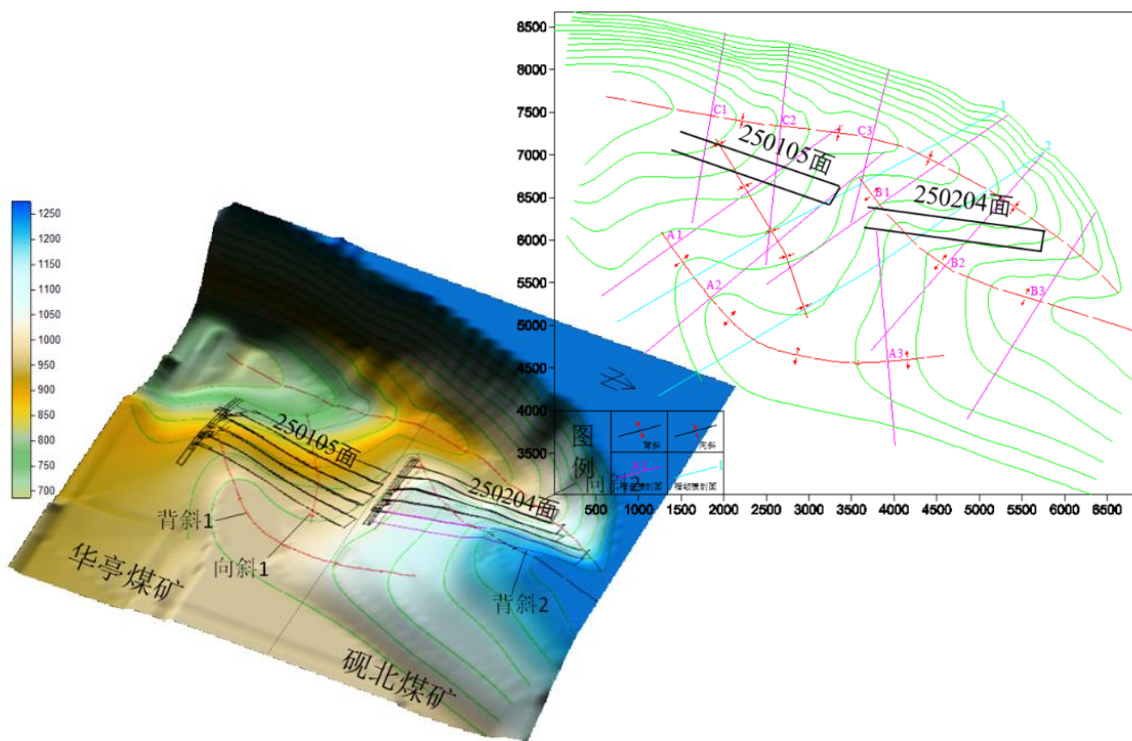
□ 实体煤巷道掘进冲击影响因素

➤ 地质异常区影响显著

近100% 褶皱、断层、分岔尖灭、深井高应力区等地质异常区



图例:
 S.1: 表示第一个冲击震源
 ●: 掘进期间的冲击震源
 ●: 回采期间的冲击震源
 1, 2, 3, ...: 对应的冲击显现位置序号
 ○: 掘进期间的冲击显现位置
 ○: 回采期间的冲击显现位置



□ 实体煤掘进冲击影响因素

➤ 煤厚影响显著

◆ 冲击频次增加

每掘进千米冲击发生的频次显著增加

矿井	工作面	煤层厚度	掘进冲击总次数	千米冲击频次
徐矿集团	多工作面	2~5m	13	0.65
峻德矿	三水平北16层 三四区一段	11m	12	3.76
跃进矿	25110	11.5m	6	3.00
胡家河矿	401102	23.6m	17	4.35
华亭矿	250105	37m	46	10.75
砚北矿	250204	40m	69	16.43

◆ 底板破坏比例增加

a) 煤厚5m以下沿顶底板掘进几乎不造成底板破坏。

b) 煤厚10m以上时，几乎93%的冲击引起底板破坏。

◆ 巷道破坏量增加

煤厚 / 冲击破坏范围

1m / 3m左右

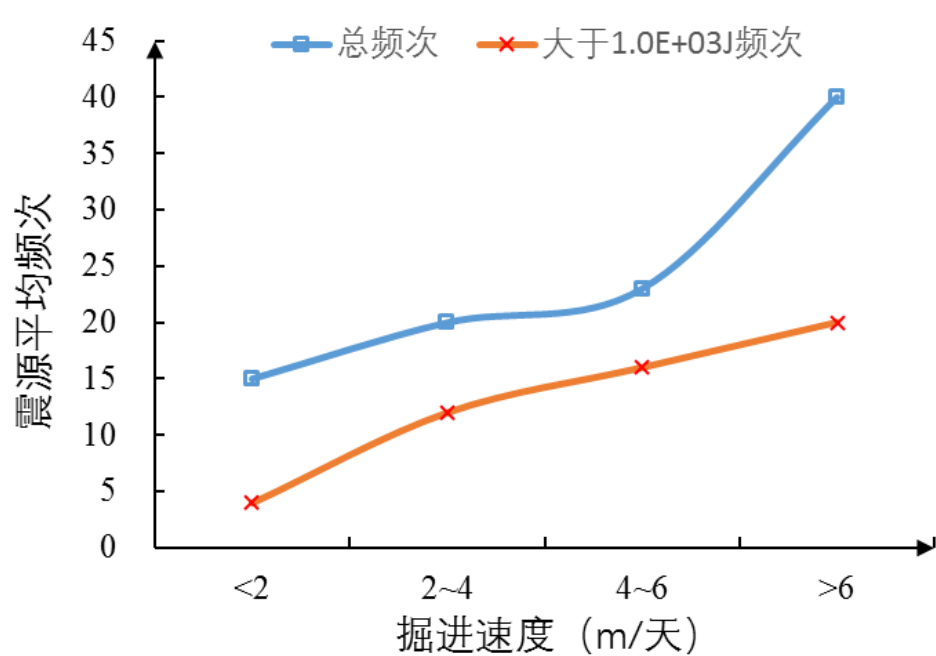
2~5m / 15~20m

11~40m / 36~66m

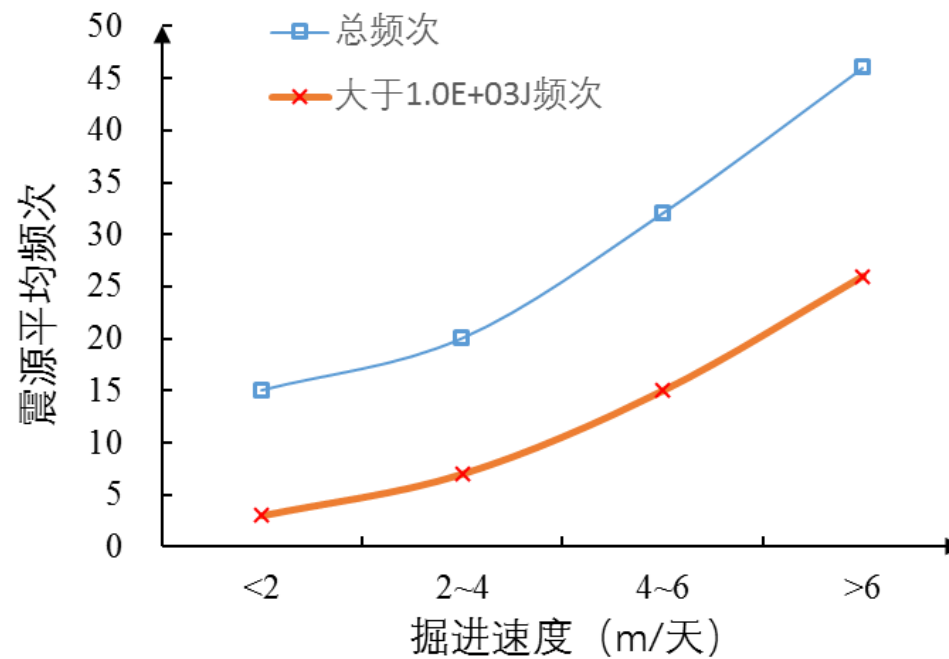
□ 实体煤掘进冲击影响因素

➤ 掘进速度增加冲击危险

随着掘进速度的增加，总震源和大能量震源频次均显著增加。



(a) 胡家河矿;



(b) 张双楼矿

汇报提纲

- 一、煤巷掘进冲击显现特征
- 二、实体煤巷道掘进冲击机理
- 三、巷道掘进冲击防治对策

二、实体煤巷道掘进冲击机理

2.1、煤体巷道掘进冲击条件

2.2、掘进巷道巷帮围岩应力路径

2.3、加卸载应力路径试验研究

2.4、巷道结构模型及应力变形特征

2.5、煤层巷道掘进冲击机理

2.6、煤层巷道掘进冲击影响因素

2.7、动载对围岩作用的仿真模拟

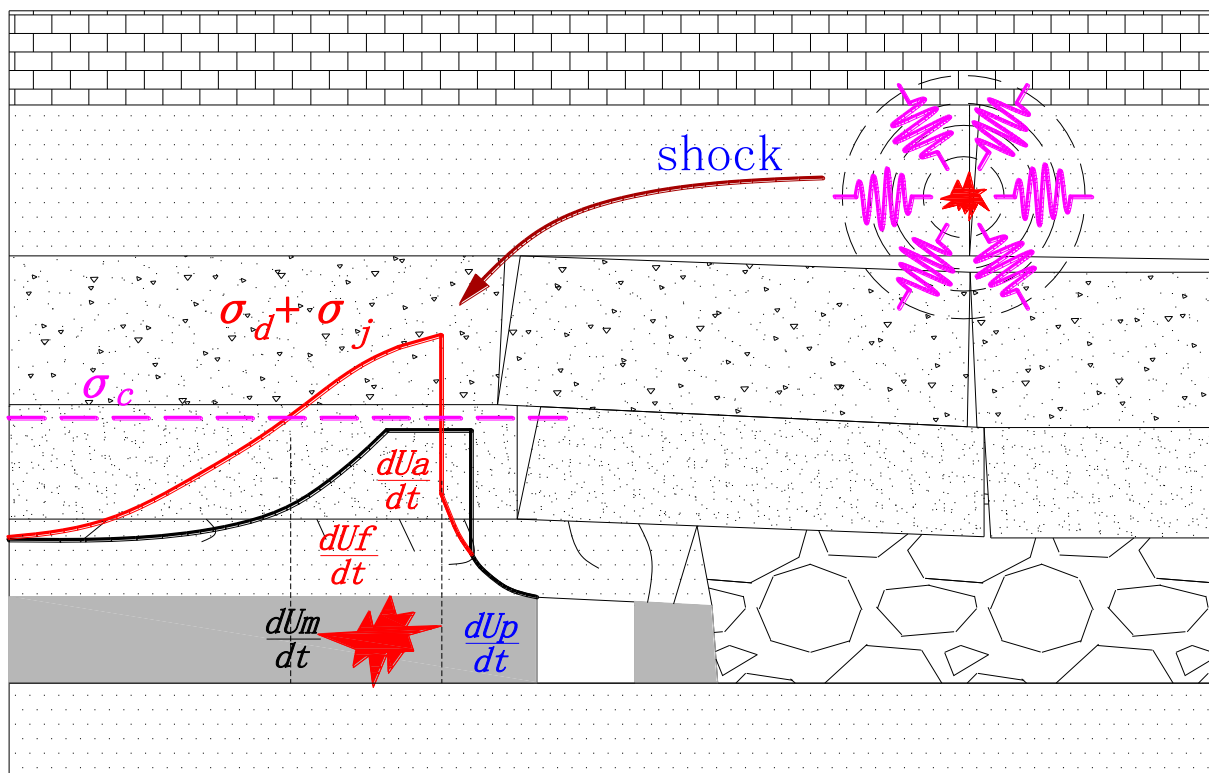
□ 2.1、煤体巷道掘进冲击条件

能量条件

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

应力条件

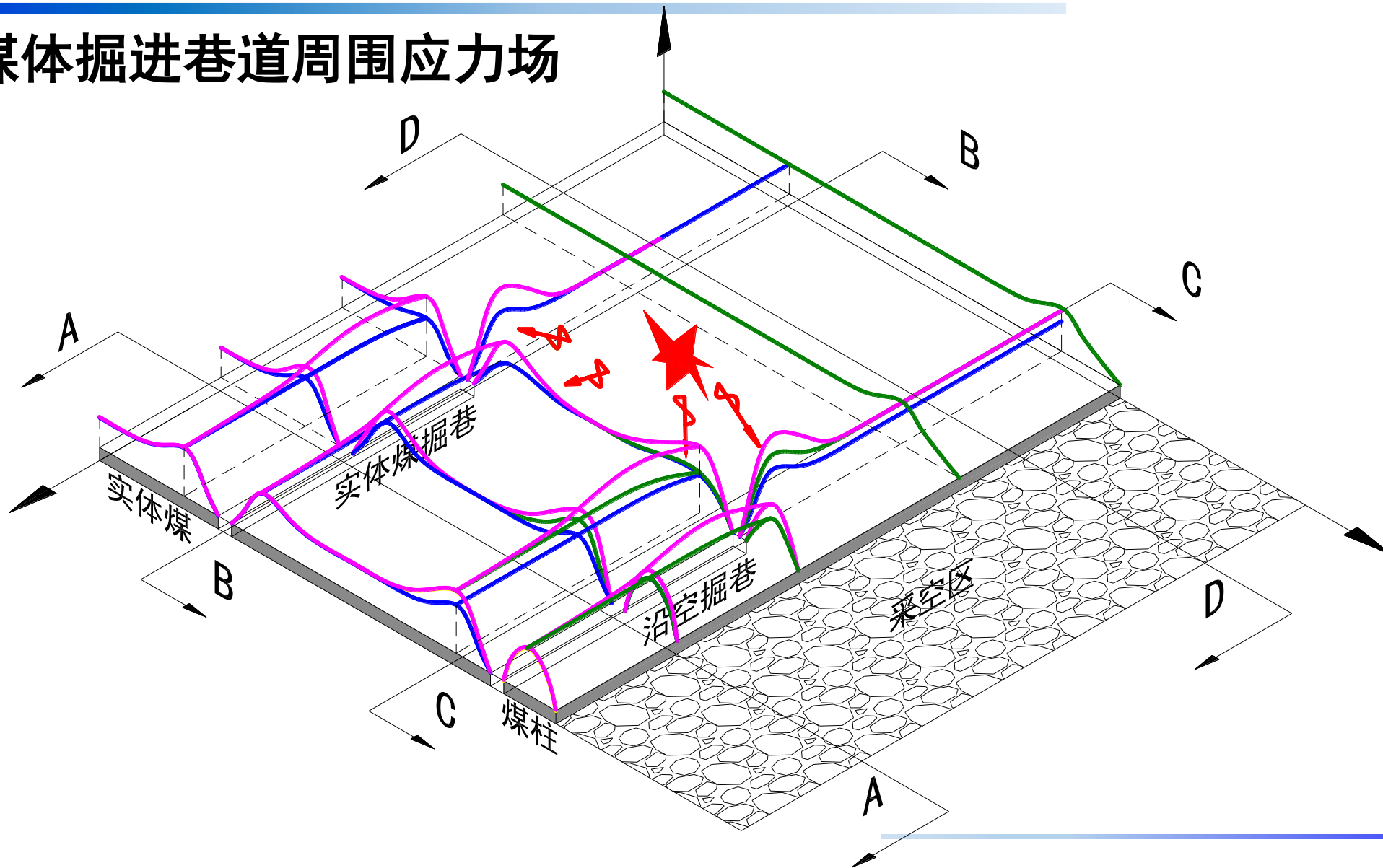
$$\sigma_j + \sigma_d \geq \sigma_{b \min}$$



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

□ 煤体掘进巷道周围应力场



二、实体煤巷道掘进冲击机理

2.1、煤体巷道掘进冲击条件

2.2、掘进巷道巷帮围岩应力路径

2.3、加卸载应力路径试验研究

2.4、巷道结构模型及应力变形特征

2.5、煤层巷道掘进冲击机理

2.6、煤层巷道掘进冲击影响因素

2.7、动载对围岩作用的仿真模拟

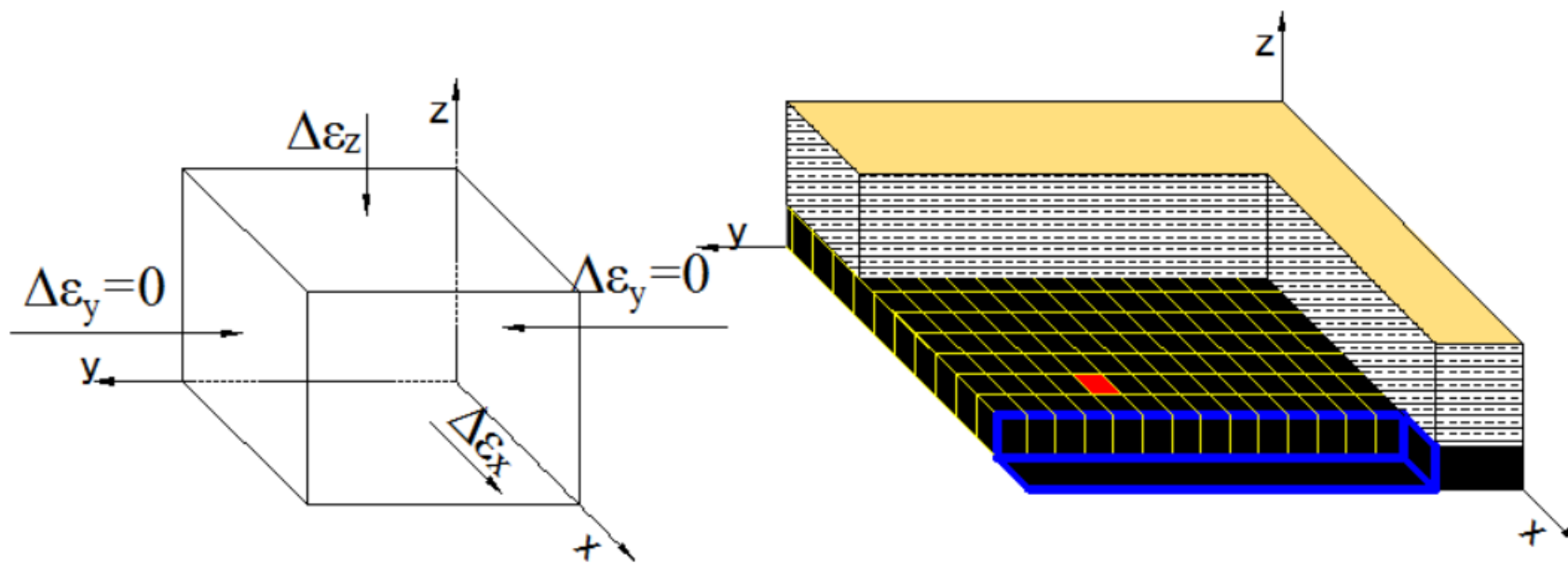
□ 2.2、掘进巷道巷帮围岩的应力路径

应变卸加比——水平应变速率与垂直应变速率之比。

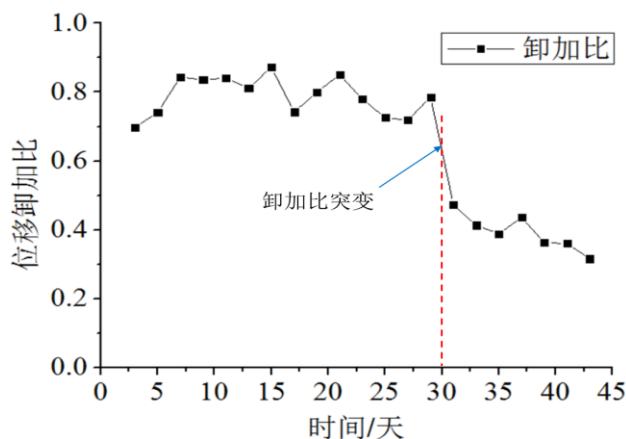
$$h' = \frac{\Delta \varepsilon_x}{\Delta \varepsilon_z}$$

应力卸加比——水平应力变化速率与垂直应力变化速率之比。

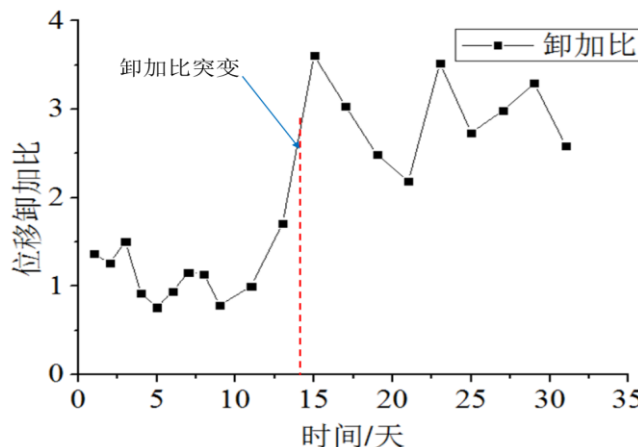
$$h_0 = \frac{\Delta \sigma_x}{\Delta \sigma_z} = \frac{(1-\mu) \cdot h' - \mu}{1-\mu-\mu \cdot h'}$$



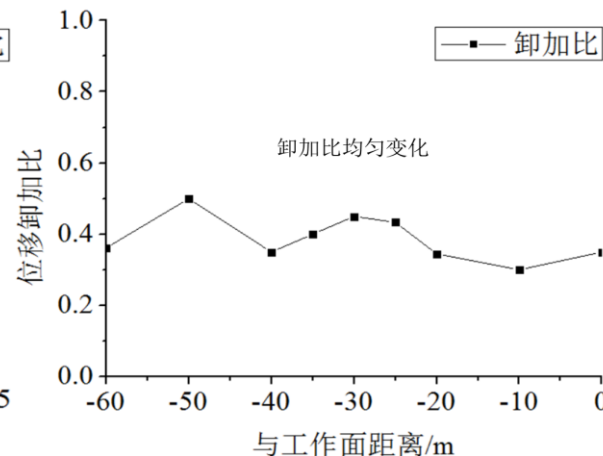
实地监测



A、平煤十一矿掘进



B、某矿3104面轨道巷掘进



C、平煤十一矿回采

A——在巷道掘进30天时，应变卸加比产生突降，从0.8降为0.4；

B——在巷道掘进15天时，应变卸加比由1突增至3。

C——回采期间，应变卸加比始终保持在0.4上下浮动。

A $h' = \frac{\Delta \varepsilon_x}{\Delta \varepsilon_z} = 0.8 \rightarrow 0.4$

$h_0 = \frac{\Delta \sigma_x}{\Delta \sigma_z} \Rightarrow 0 \quad \Delta \sigma_x = 0$

加卸载+加载

B $h' = \frac{\Delta \varepsilon_x}{\Delta \varepsilon_z} = 1.0 \rightarrow 3.0$

$h_0 = \frac{\Delta \sigma_x}{\Delta \sigma_z} \Rightarrow \infty \quad \Delta \sigma_z = 0$

加卸载+卸载

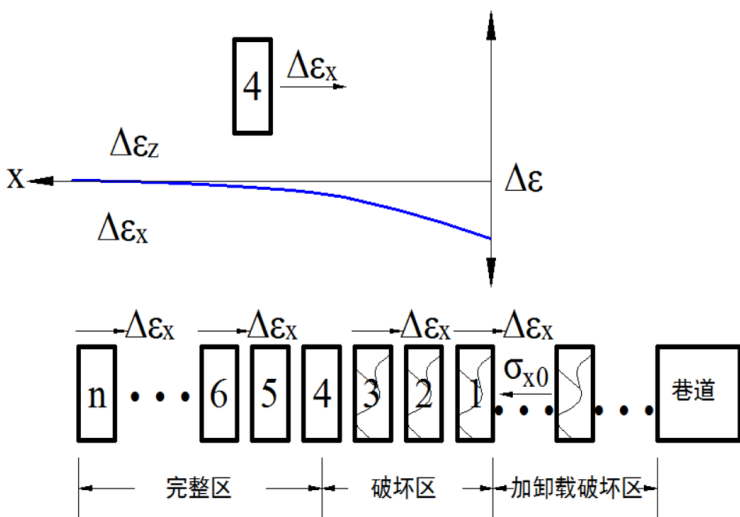
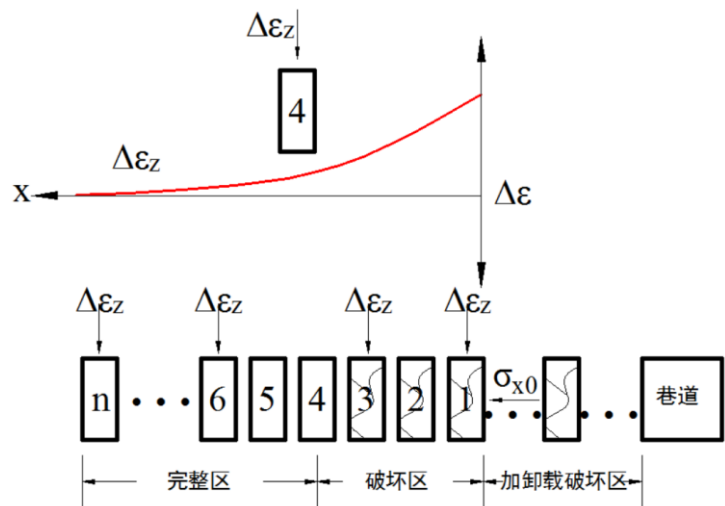
C $h' = \frac{\Delta \varepsilon_x}{\Delta \varepsilon_z} \approx 0.4$

$h_0 = \frac{\Delta \sigma_x}{\Delta \sigma_z} \approx 0 \quad \Delta \sigma_x = 0$

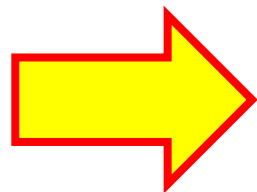
仅加载

2.2、掘进巷道巷帮围岩的应力路径

掘进
应变
加载
路径



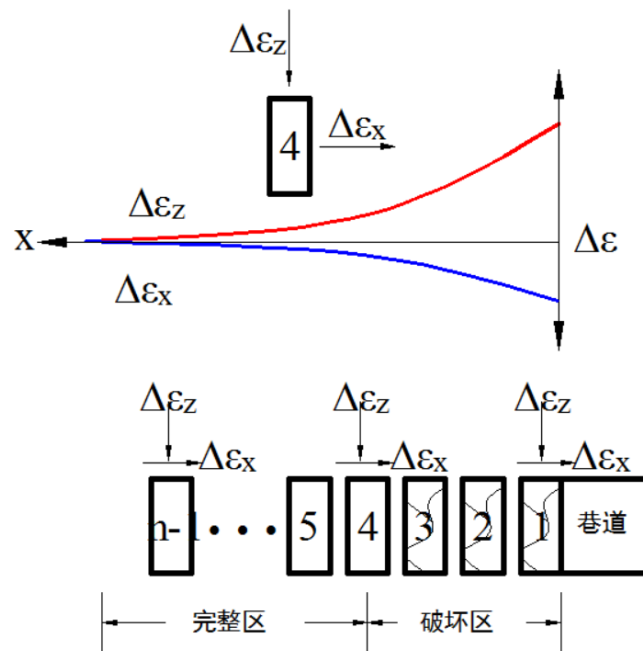
掘进
应变
卸载
路径



受力
类型

掘进期间 { —加卸载+加载
—加卸载+卸载

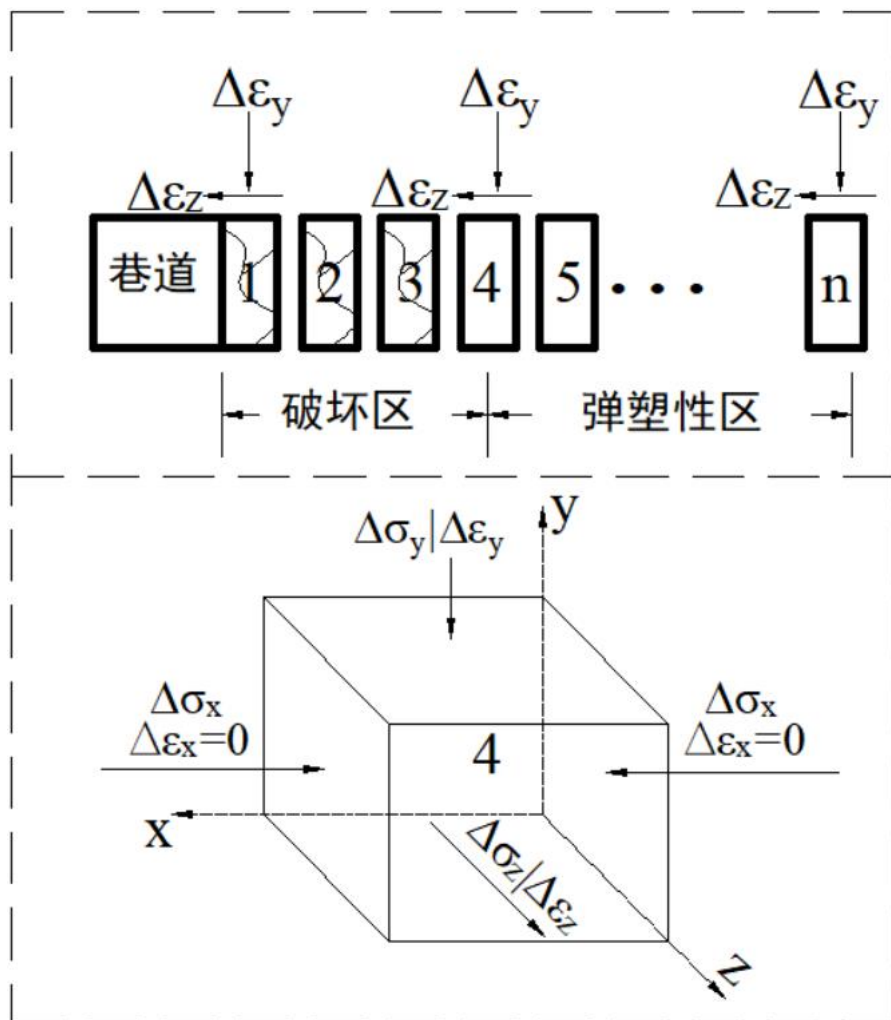
回采期间 —加载



掘进应变加卸载路径

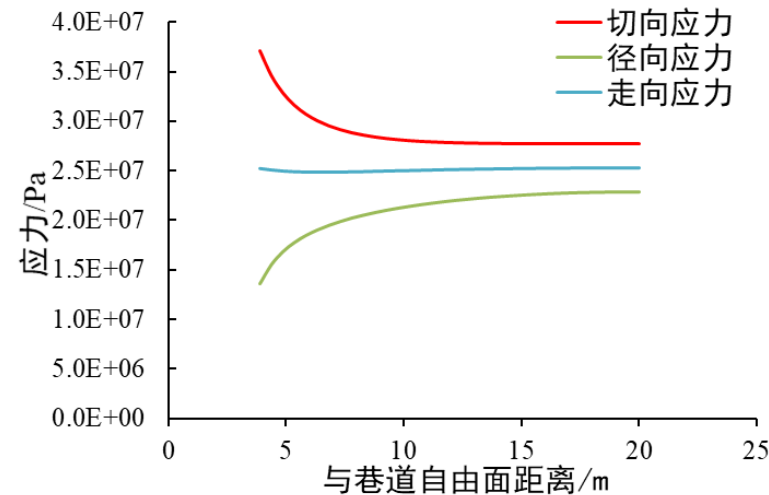
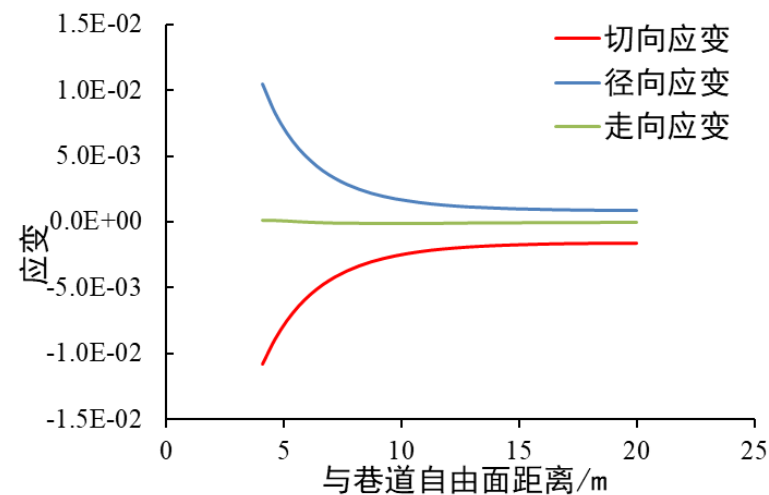
“切向加载-径向卸载-走向应变不变”

巷道围岩应力路径特征



围岩受力图

简称“加-卸”应力路径



二、实体煤巷道掘进冲击机理

2.1、煤体巷道掘进冲击条件

2.2、掘进巷道巷帮围岩应力路径

2.3、加卸载应力路径试验研究

2.4、巷道结构模型及应力变形特征

2.5、煤层巷道掘进冲击机理

2.6、煤层巷道掘进冲击影响因素

2.7、动载对围岩作用的仿真模拟

□ 2.3、试验研究：“加-卸”应力路径下煤样破裂特征

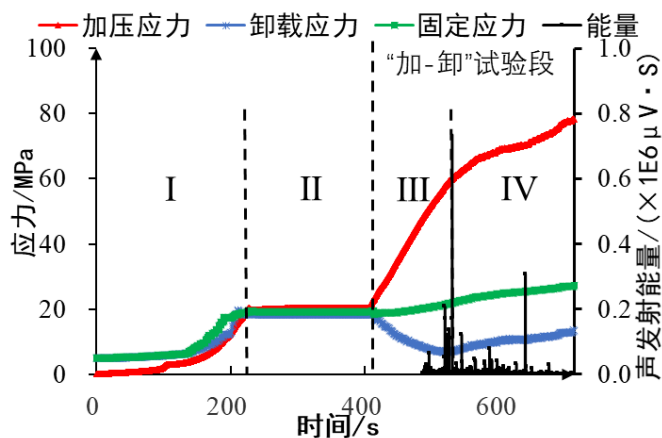


● 未冲击：层裂式

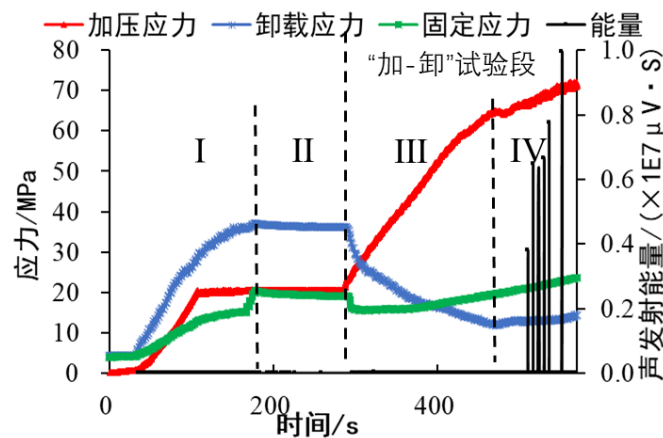


● 冲击：爆裂式

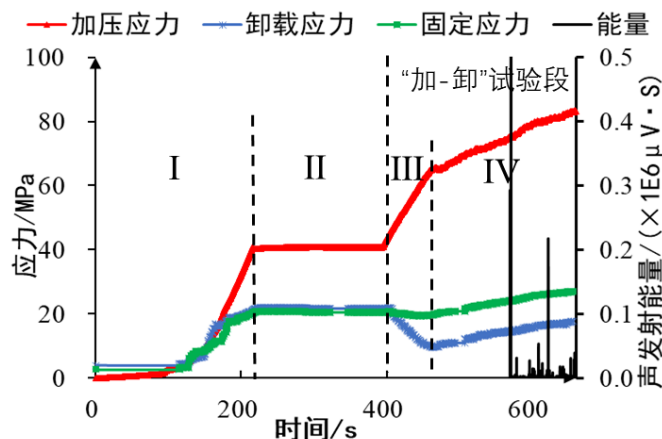
“加-卸”应力路径下煤样应力曲线特征



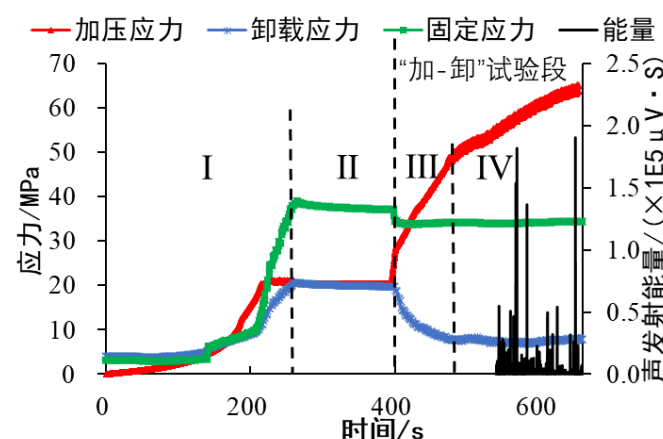
三向等压



高卸载侧应力



高加载侧应力

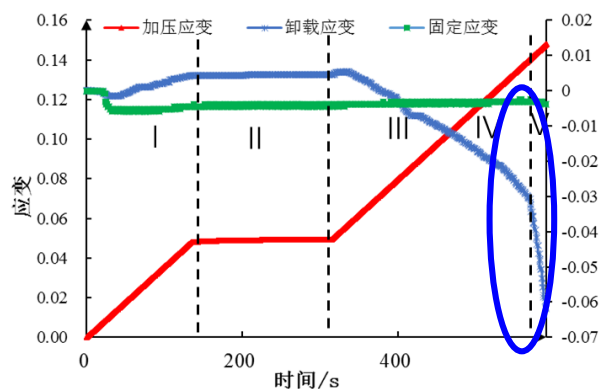
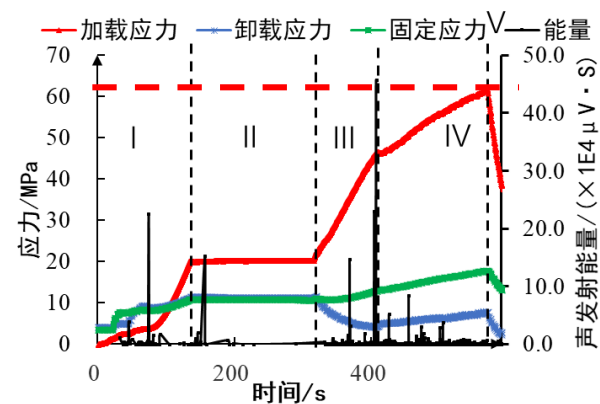
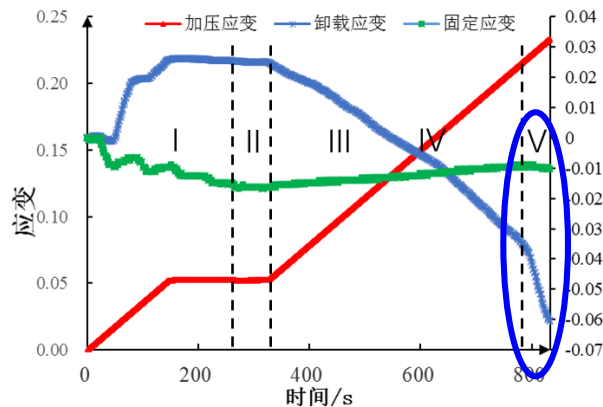
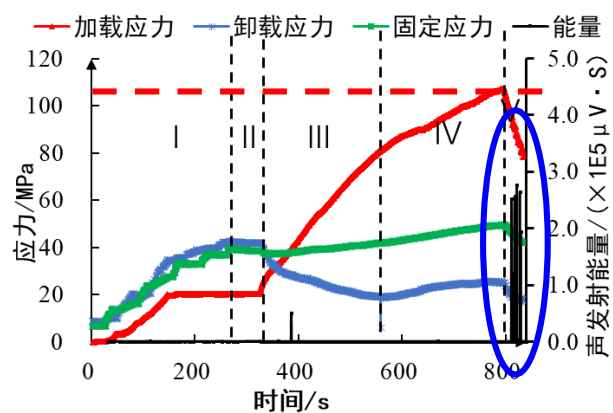


高固定侧应力

“加-卸”第一阶段（III）：
卸载侧应力降低、加载侧应力增加。基本没有声发射现象，说明并未出现大面积裂隙，试样处于弹性阶段。

“加-卸”第二阶段（IV）：
卸载侧的应力逐渐降低到一定值时，试样内部裂隙不断生成，扩容膨胀，声发射事件开始出现，试样进入塑性状态；

“加-卸”应力路径下煤样冲击临界值



冲击需要满足两个条件

● 卸载速率条件:

< 1.128mm/min, 未冲击

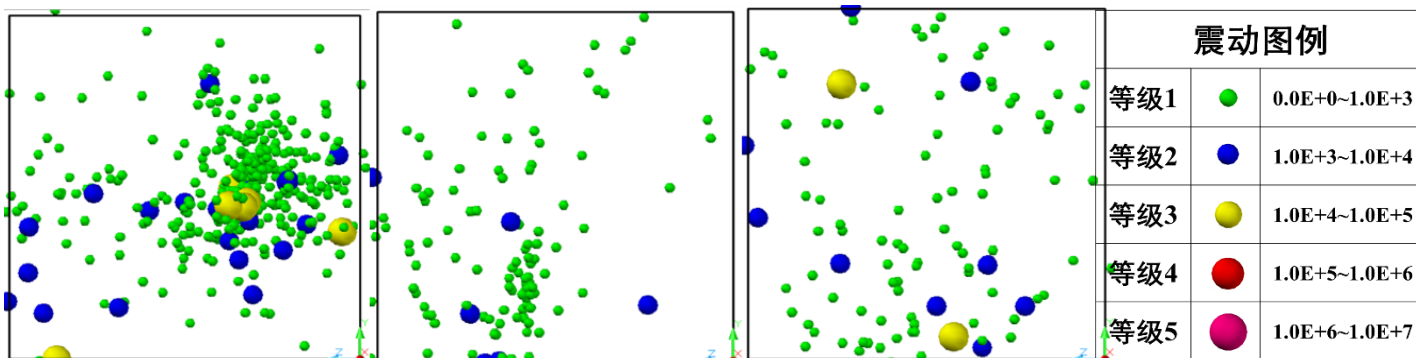
> 2.77mm/min, 冲击

● 应力条件:

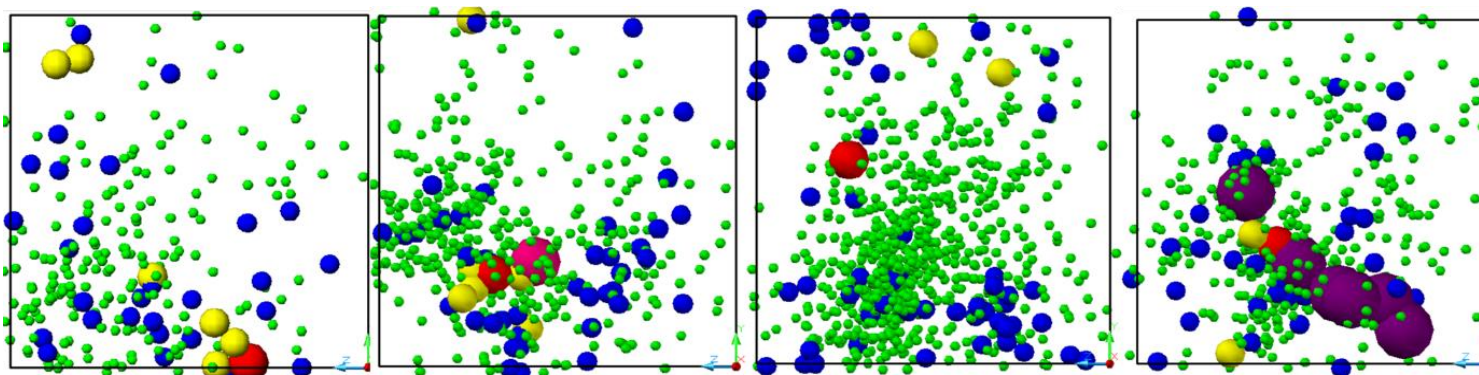
< 60MPa, 未冲击

> 60MPa, 冲击

“加-卸”应力路径下煤样声发射特征



I、III、IV阶段ZY面事件定位图（试块C）



I、III、IV阶段和高速卸载阶段ZY面事件定位图（试块M）

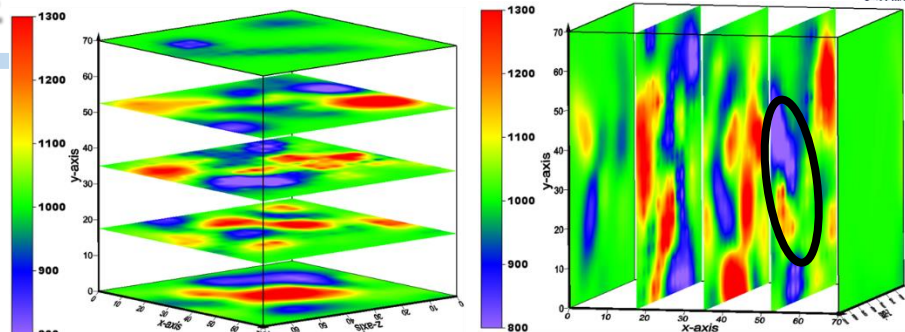
● 未冲击：能量小于
 $1.0E+05\mu V \cdot s$

● 冲击：能量大于
 $1.0E+07\mu V \cdot s$

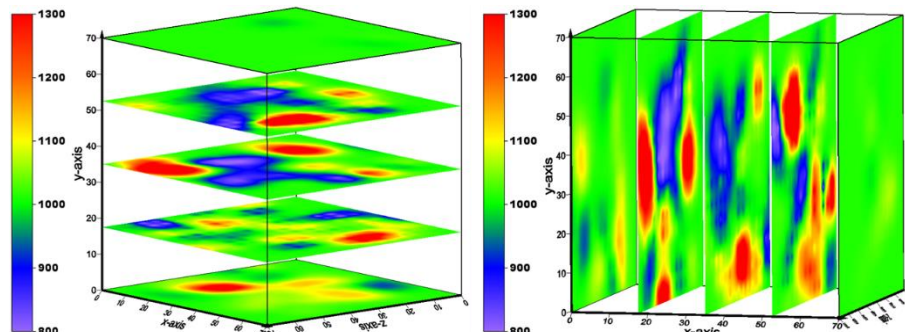
“加-卸”应力路径下煤样波速演化特征

- ▶ 试样加载初期内部存在随机裂隙，高低波速区交替出现。
- ▶ 随着实验的进行波速逐渐增加，低波速区逐渐消失，形成大面积高波速区。
- ▶ 由低波速区向高波速区变化的区域，是主要的承载区域，为冲击矿压发生的潜在区域。

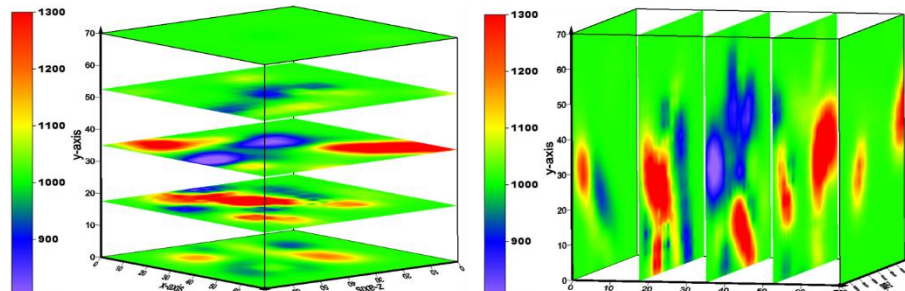
I 阶段



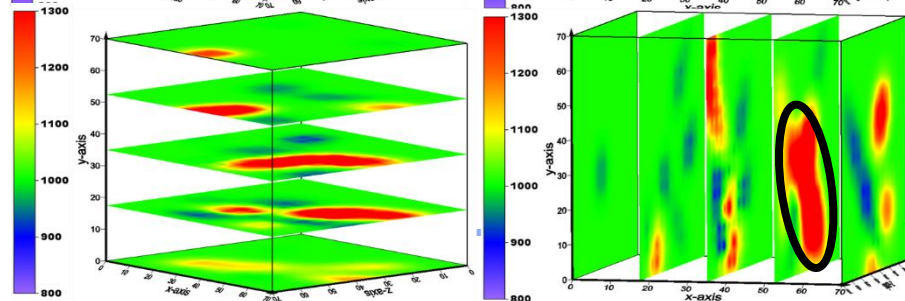
III阶段



IV阶段

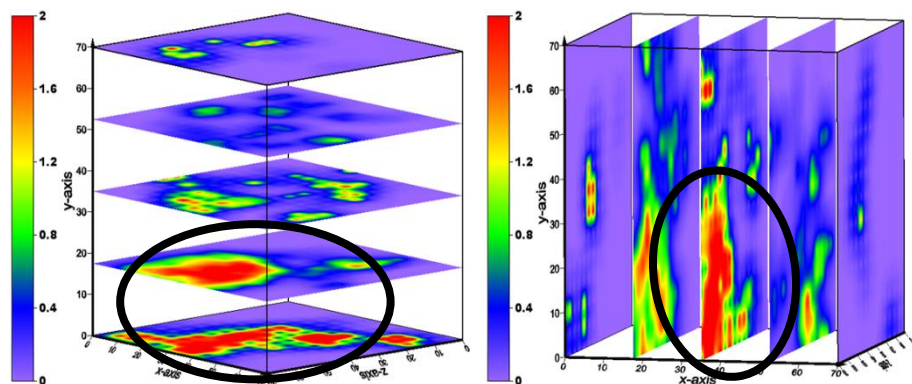


高速卸载阶段

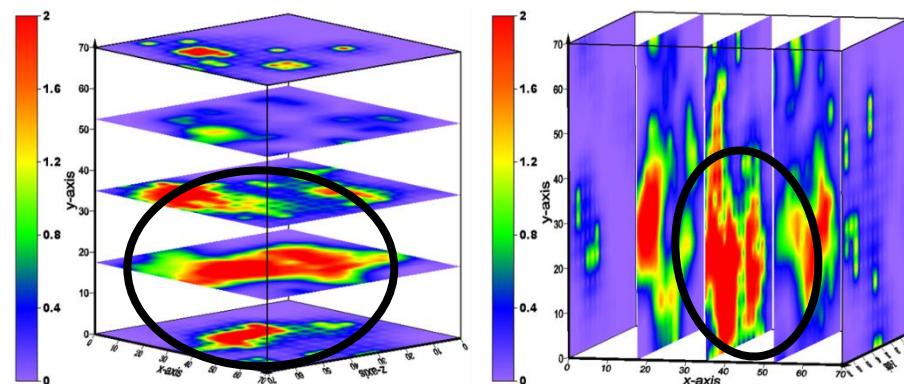


“加-卸”应力路径下煤样能量演化特征

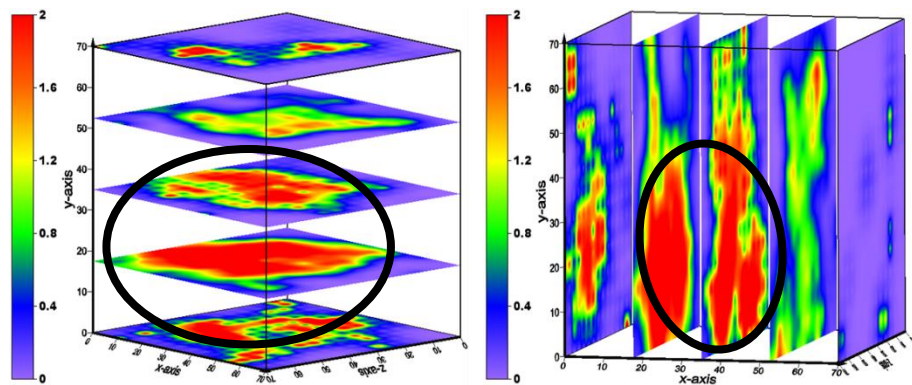
仅局部区域为高能量区，且各阶段变化较小，说明试样具有局部承载、破裂、释放能量特征。



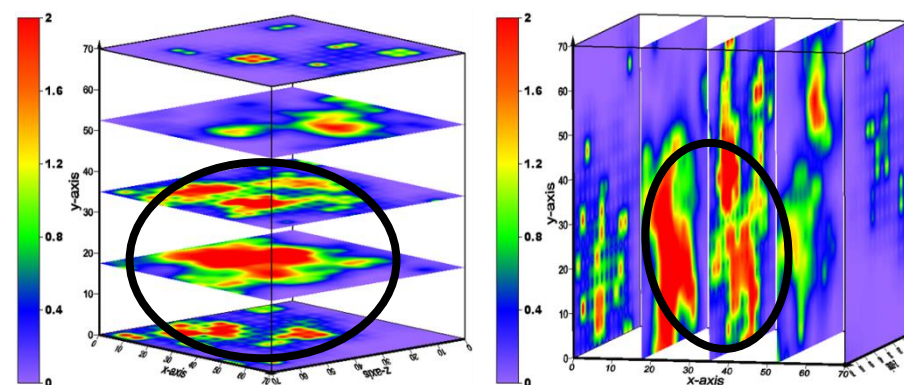
I 阶段



III 阶段



IV 阶段



高速卸载阶段（冲击）

二、实体煤巷道掘进冲击机理

2.1、煤体巷道掘进冲击条件

2.2、掘进巷道巷帮围岩应力路径

2.3、加卸载应力路径试验研究

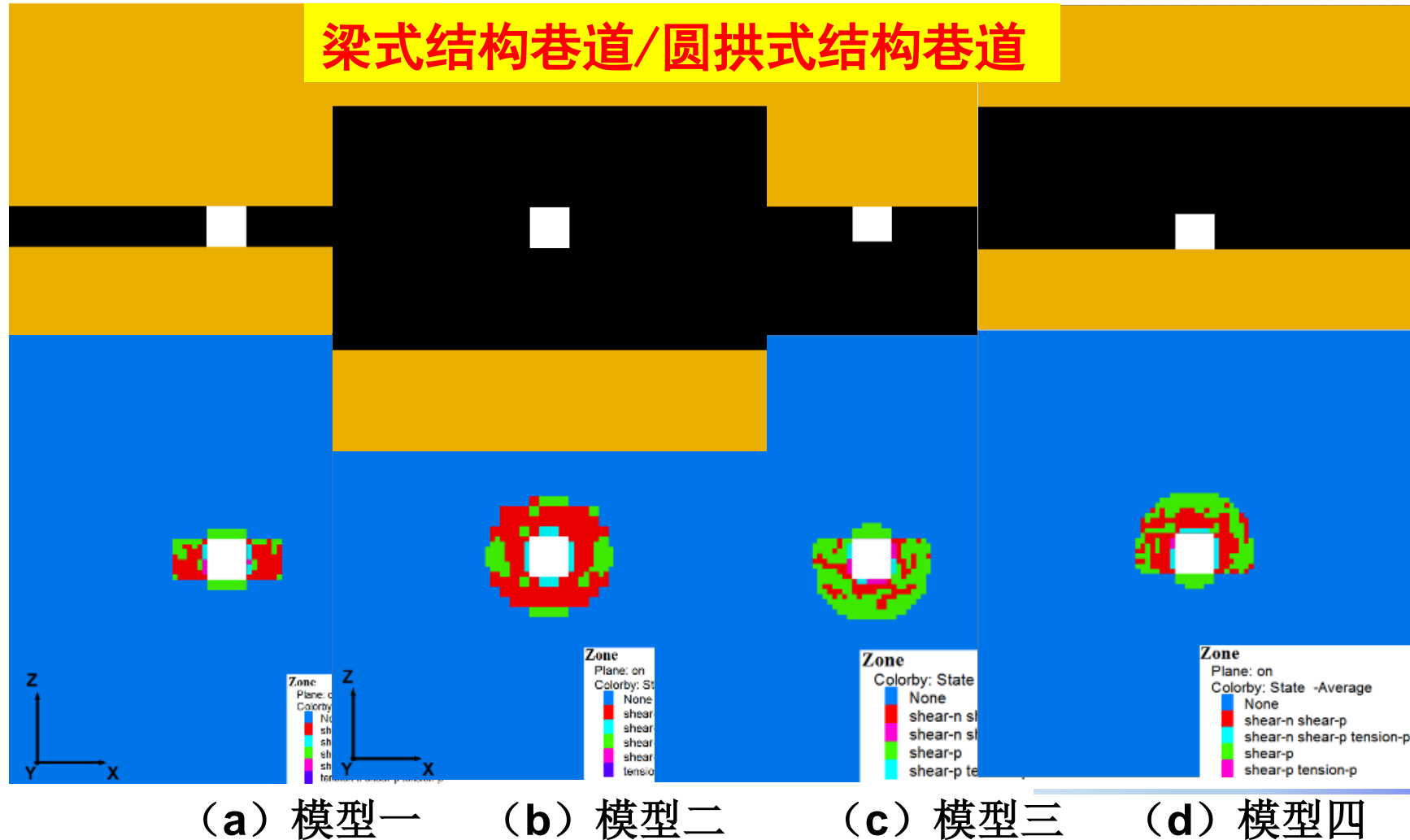
2.4、巷道结构模型及应力变形特征

2.5、煤层巷道掘进冲击机理

2.6、煤层巷道掘进冲击影响因素

2.7、动载对围岩作用的仿真模拟

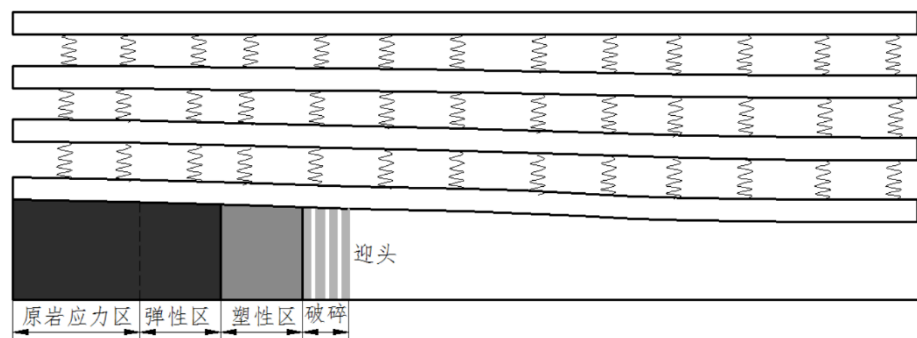
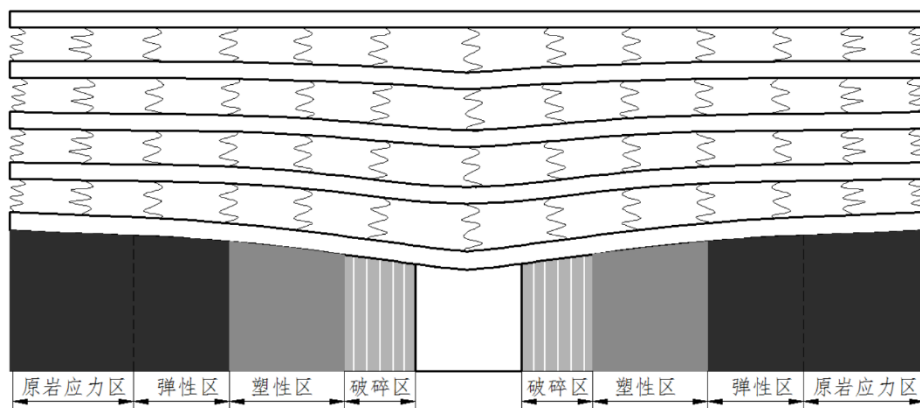
□ 2.4、巷道结构模型及应力变形特征



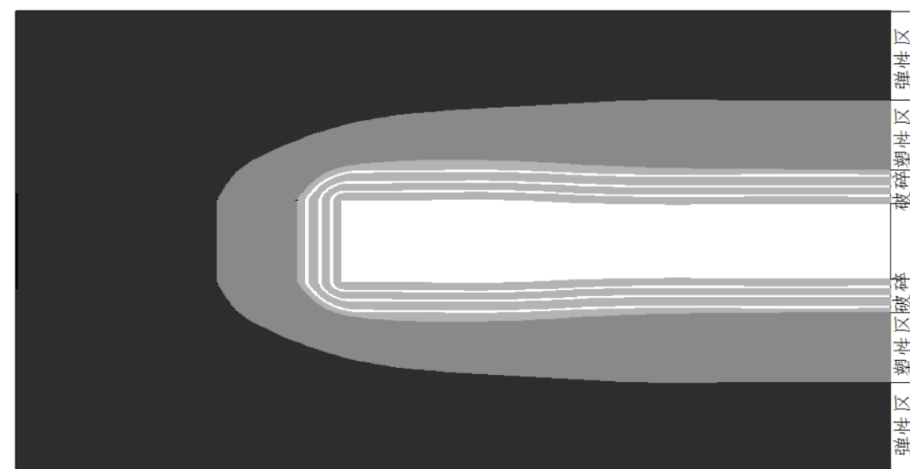
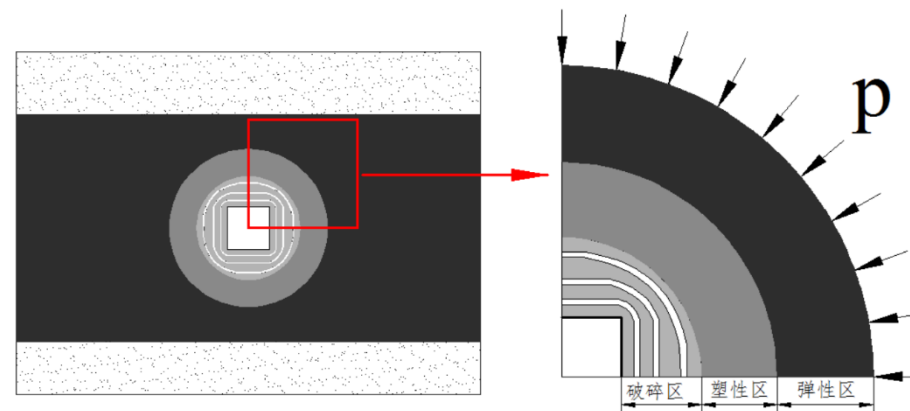
四种模型示意图及塑性区图

□ 掘进巷道围岩结构分类

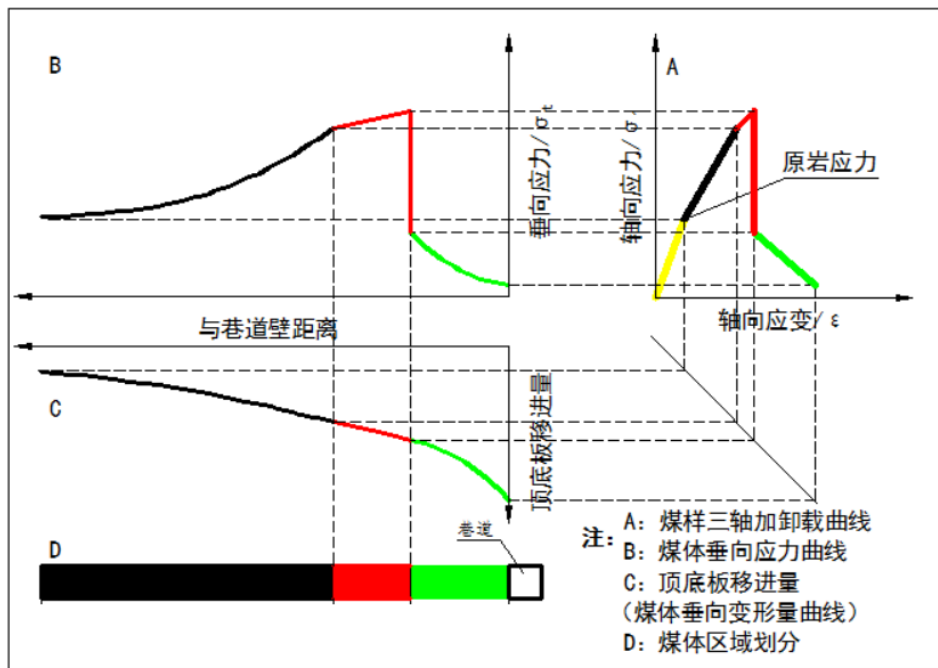
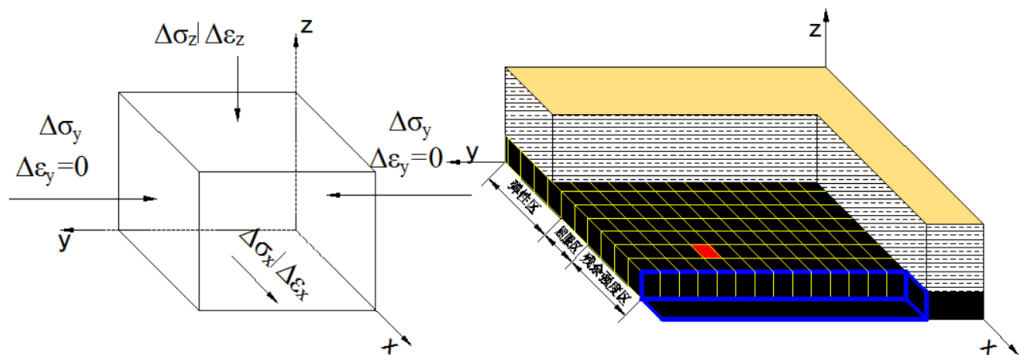
● 梁式结构巷道



● 拱式结构巷道



◆ 梁式模型围岩应力



➤ 弹性区应力

$$\begin{cases} \sigma_x = A \cdot \gamma \cdot H + \frac{E \cdot W \cdot (\mu - h' + \mu \cdot h')}{m \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)} \\ \sigma_z = \gamma \cdot H + \frac{E \cdot W \cdot (1 - \mu - \mu \cdot h')}{m \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)} \end{cases}$$

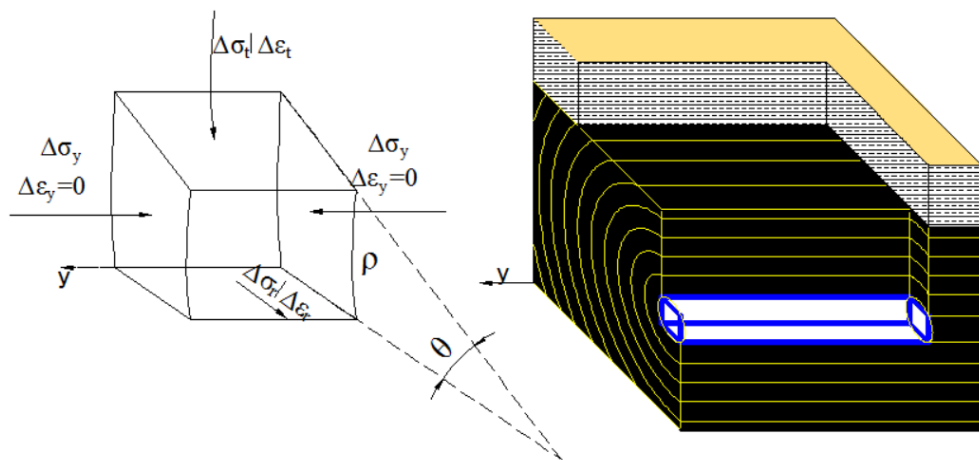
➤ 塑性区应力

$$\begin{cases} \sigma_x = (\sigma_x)_{x=x_1} + \frac{E \cdot \alpha \cdot W \cdot (\mu - h' + \mu \cdot h')}{m \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)} \\ \sigma_z = (\sigma_z)_{x=x_1} + \frac{E \cdot \alpha \cdot W \cdot (1 - \mu - \mu \cdot h')}{m \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)} \end{cases}$$

➤ 残余强度区应力

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{1}{a} \left(\frac{Q + C'}{\text{tg} \phi'} + a P_0 + R_c' \right) e^{\frac{2a \text{tg} \phi' x}{m}} - \frac{Q + C'}{a \text{tg} \phi'} - \frac{R_c'}{a} \\ \sigma_z = \left(\frac{Q + C'}{\text{tg} \phi'} + a P_0 + R_c' \right) e^{\frac{2a \text{tg} \phi' x}{m}} - \frac{Q + C'}{\text{tg} \phi'} \\ \tau_{xz} = (Q + C' + a \text{tg} \phi' P_0 + \text{tg} \phi' R_c') e^{\frac{2a \text{tg} \phi' x}{m}} \end{cases}$$

◆ 拱式模型围岩应力



➤ 当量半径

$$r = \left[(2a + b) + b^2 / (2a + b) \right] / 4$$

➤ 破碎区应力

$$\sigma_r^f - \sigma_t^f + r \frac{d\sigma_r^f}{dr} = 0$$

$$\sigma_t^f = \frac{1 + \sin \varphi'}{1 - \sin \varphi'} \sigma_r^f + \frac{2(C' + Q) \cos \varphi'}{1 - \sin \varphi'}$$

➤ 塑性区应力

$$\sigma_r^p - \sigma_t^p + r \frac{d\sigma_r^p}{dr} = 0$$

$$\sigma_t^p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_r^p + \frac{2(C + Q) \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

➤ 弹性区应力

$$\begin{cases} \sigma_r^e = \frac{1}{2} p(1 + \lambda) \left(1 - \frac{r_e^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2} p(1 - \lambda) \left(1 - 4 \frac{r_e^2}{r^2} + 3 \frac{r_e^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + p_e \frac{r_e^2}{r^2} \\ \sigma_t^e = \frac{1}{2} p(1 + \lambda) \left(1 + \frac{r_e^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2} p(1 - \lambda) \left(1 + 3 \frac{r_e^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - p_e \frac{r_e^2}{r^2} \\ \tau_{rt}^e = \frac{1}{2} p \left[(1 - \lambda) \left(1 + 2 \frac{r_e^2}{r^2} - 3 \frac{r_e^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \right] \end{cases}$$

二、实体煤巷道掘进冲击机理

2.1、煤体巷道掘进冲击条件

2.2、掘进巷道巷帮围岩应力路径

2.3、加卸载应力路径试验研究

2.4、巷道结构模型及应力变形特征

2.5、煤层巷道掘进冲击机理

2.6、煤层巷道掘进冲击影响因素

2.7、动载对围岩作用的仿真模拟

◆冲击力源

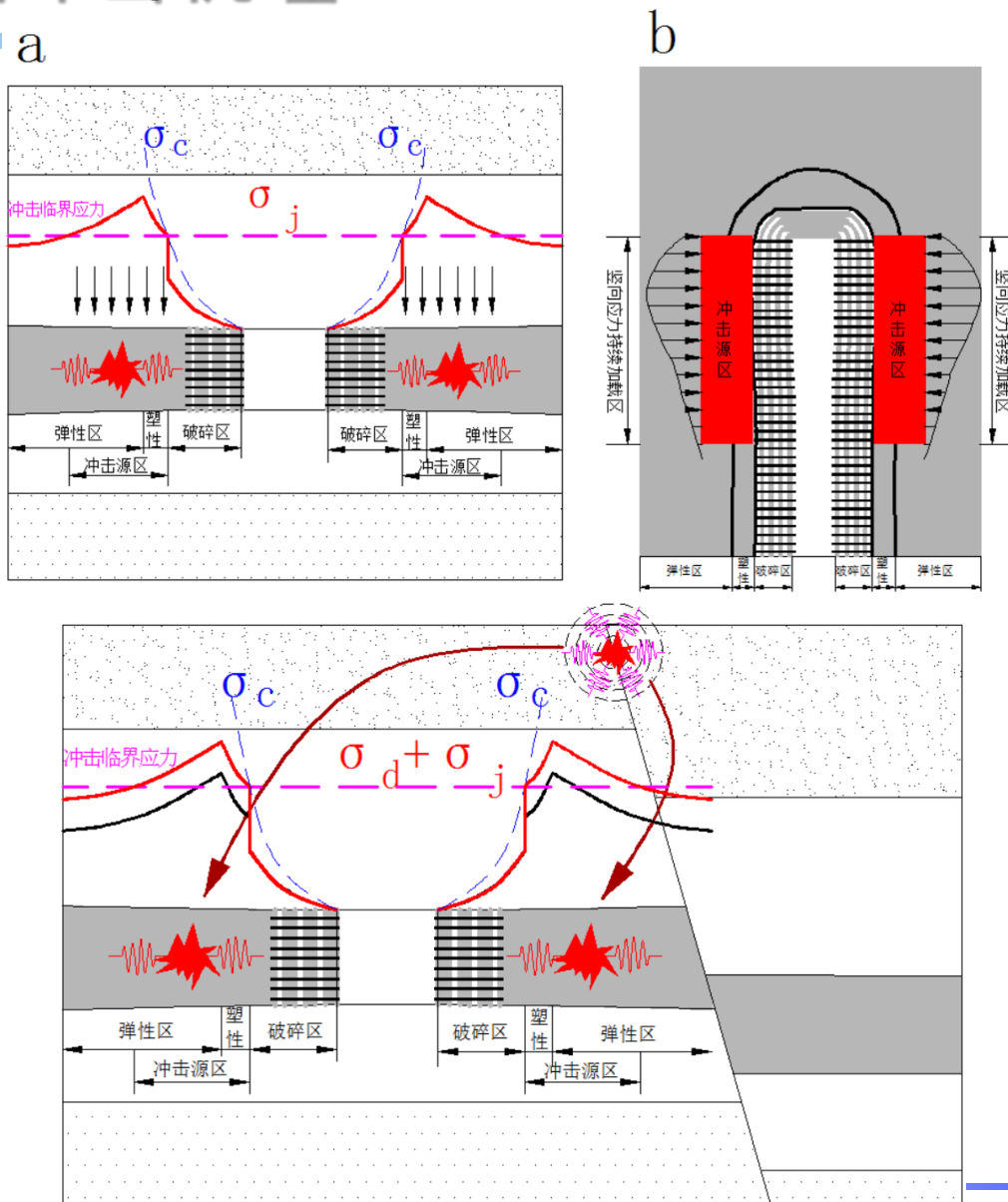
● 扰动静载型冲击力源

$$\sigma_j \geq 60MPa \text{ 和 } v \geq v_c$$

● 动静载叠加型冲击力源

$$\sigma_d + \sigma_j \geq 60MPa$$

改变应力路径
(加卸载速率的增加)



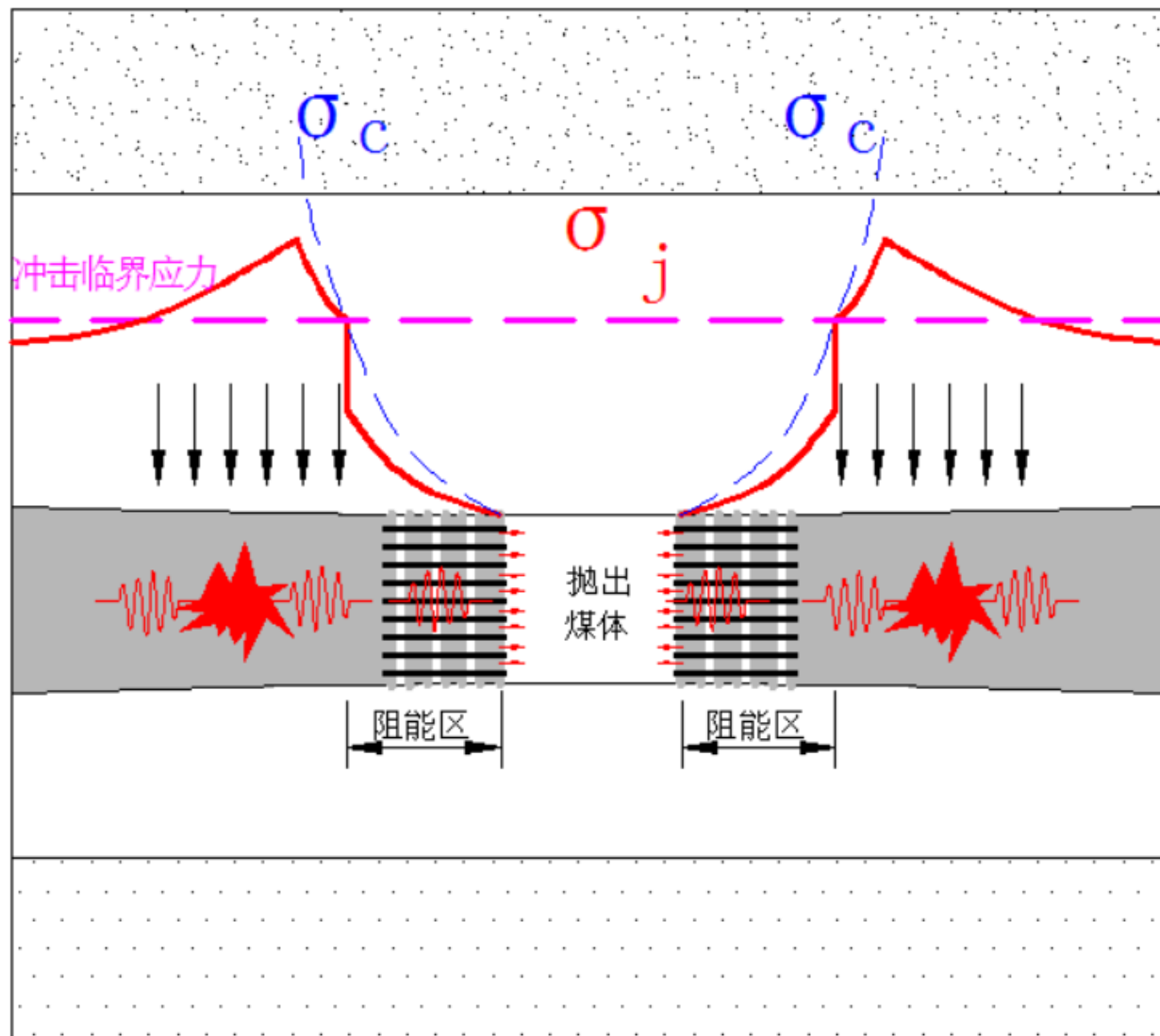
◆ 冲击阻能

● 膨胀应力作用克服的阻能

冲击源衰减力；锚杆和煤体组成的板结构强度

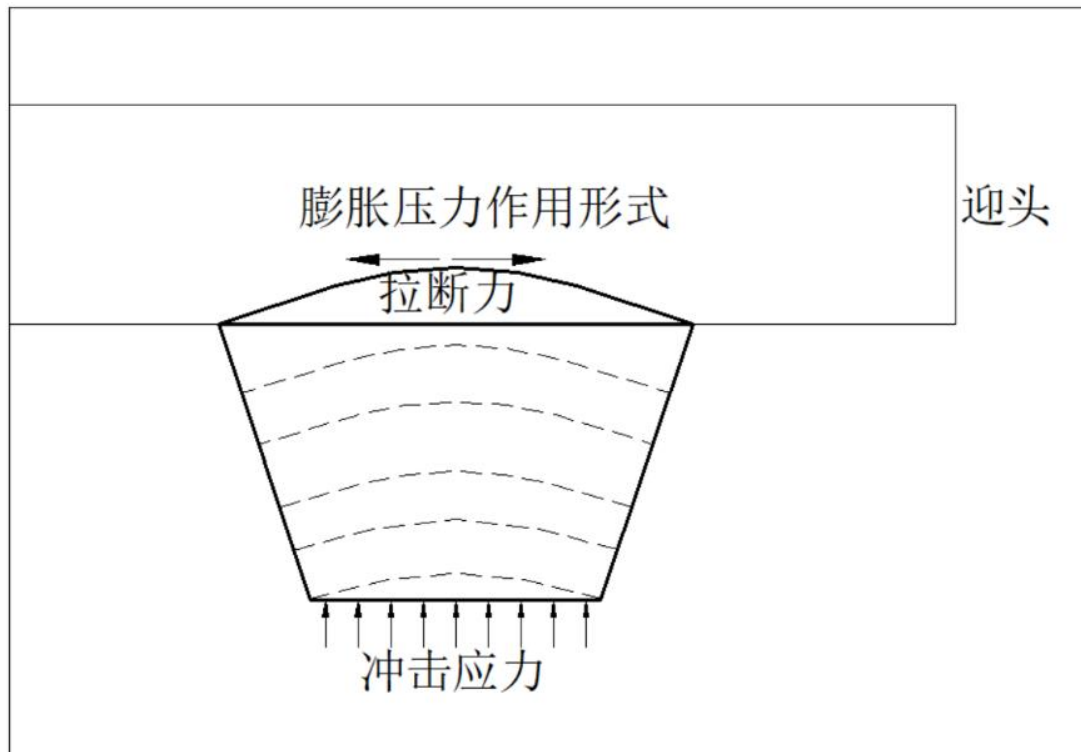
● 应力波反射拉伸作用克服的阻能

弹性波的衰减；锚杆及煤体的抗拉强度；煤体动能

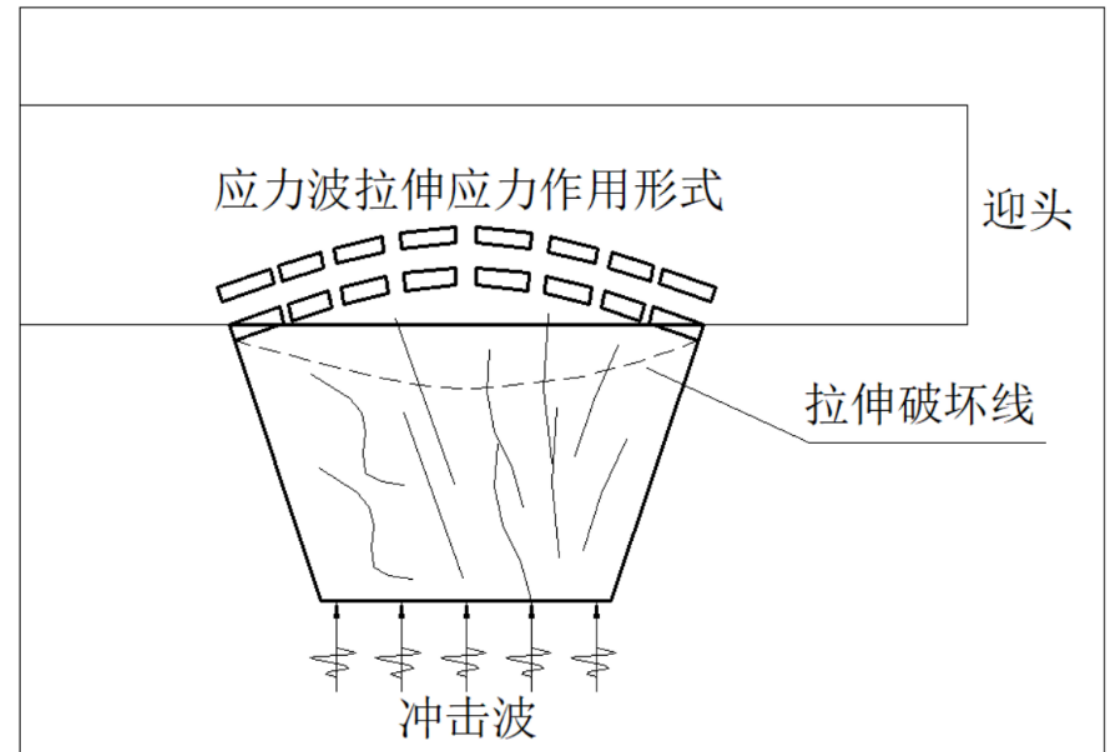


◆ 冲击破坏作用形式

● 膨胀应力作用



● 应力波反射拉伸作用



□ 煤层巷道掘进冲击危的判据

◆ 冲击危险性系数

● 膨胀压力作用形式

$$K = \frac{P_c}{P_x} \geq 1$$

冲击危险性系数：煤体破坏瞬间的应力增量与巷帮煤体破坏所需的最小应力的比值。该系数大于1，发生冲击破坏

● 应力波反射拉伸作用形式

$$K = \frac{E_c}{E_z} = \frac{\left[\alpha \cdot \left(\frac{dU_f}{dt} \Big|_{x_0'} \right) + \beta \cdot \left(\frac{dU_m}{dt} \Big|_{x_0'} \right) \right] \cdot L^{-\alpha}}{E_t + E_m} \geq 1$$

冲击危险性系数：煤体和围岩释放的能量（冲击源能量）与克服煤体和围岩阻力所消耗能量（冲击阻能）的比值。该系数大于1，是发生冲击的必要条件

二、实体煤巷道掘进冲击机理

2.1、煤体巷道掘进冲击条件

2.2、掘进巷道巷帮围岩应力路径

2.3、加卸载应力路径试验研究

2.4、巷道结构模型及应力变形特征

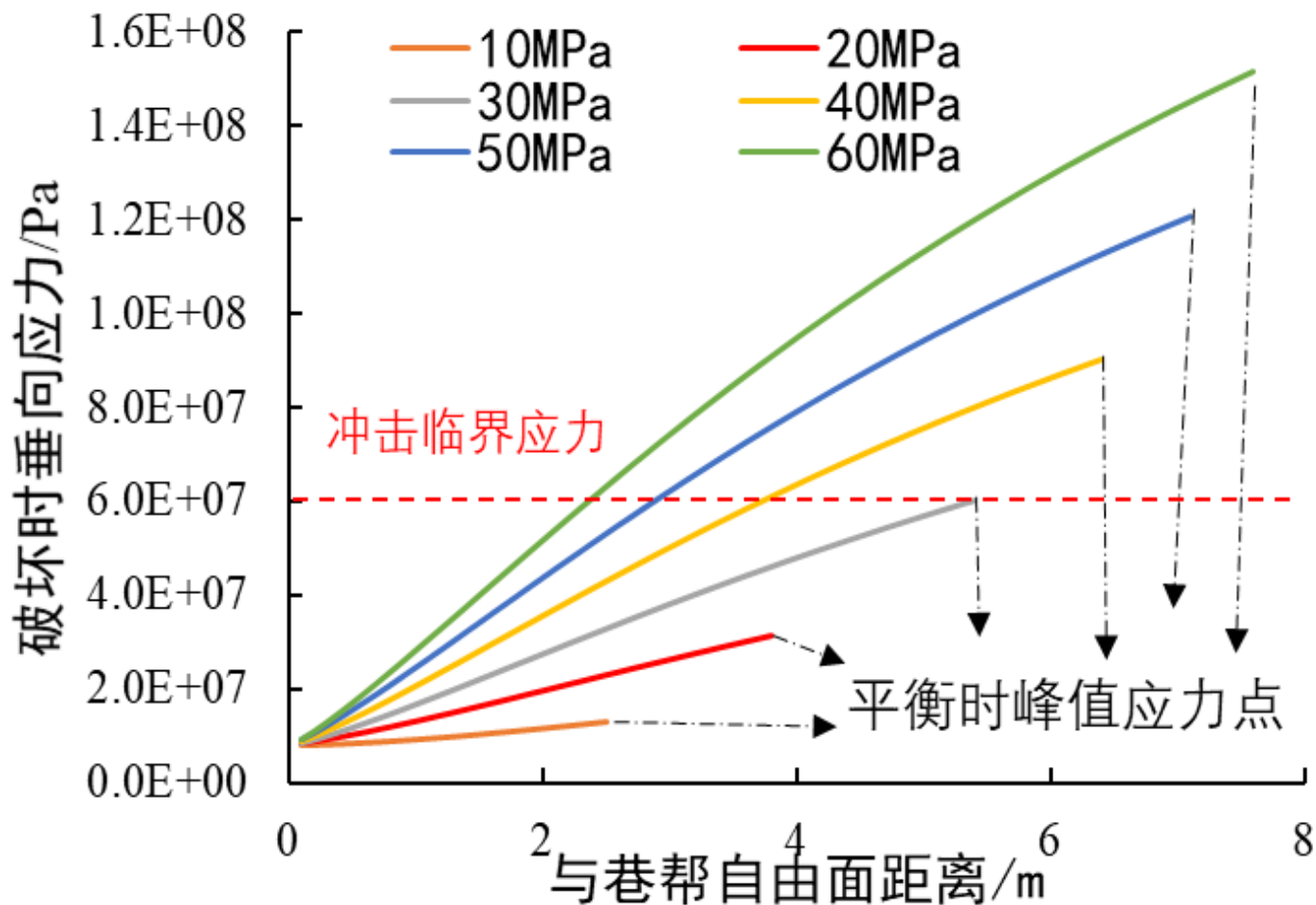
2.5、煤层巷道掘进冲击机理

2.6、煤层巷道掘进冲击影响因素

2.7、动载对围岩作用的仿真模拟

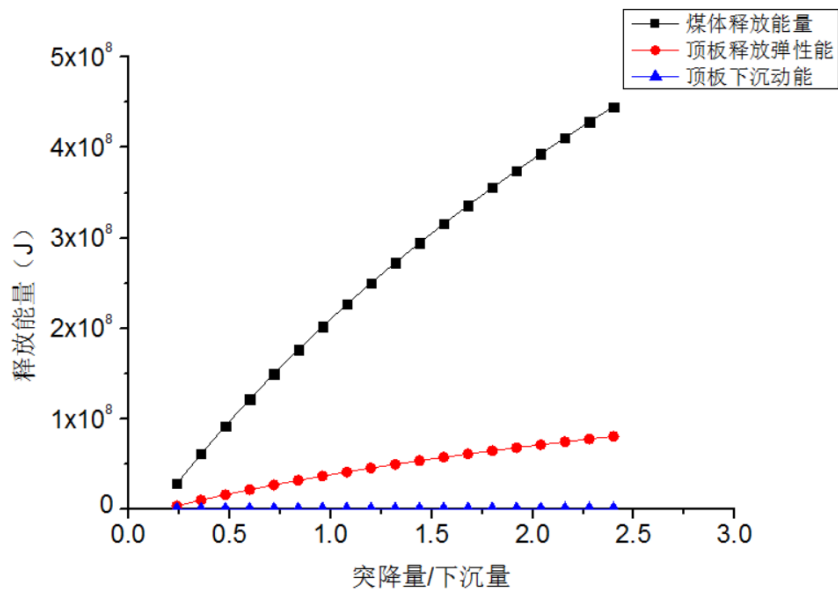
□ 2.6、煤层巷道掘进冲击影响因素分析

- 原岩应力达到30MPa，巷道围岩才会达到冲击临界应力60MPa
- 原岩应力越高，冲击临界区域与巷道自由面距离越小

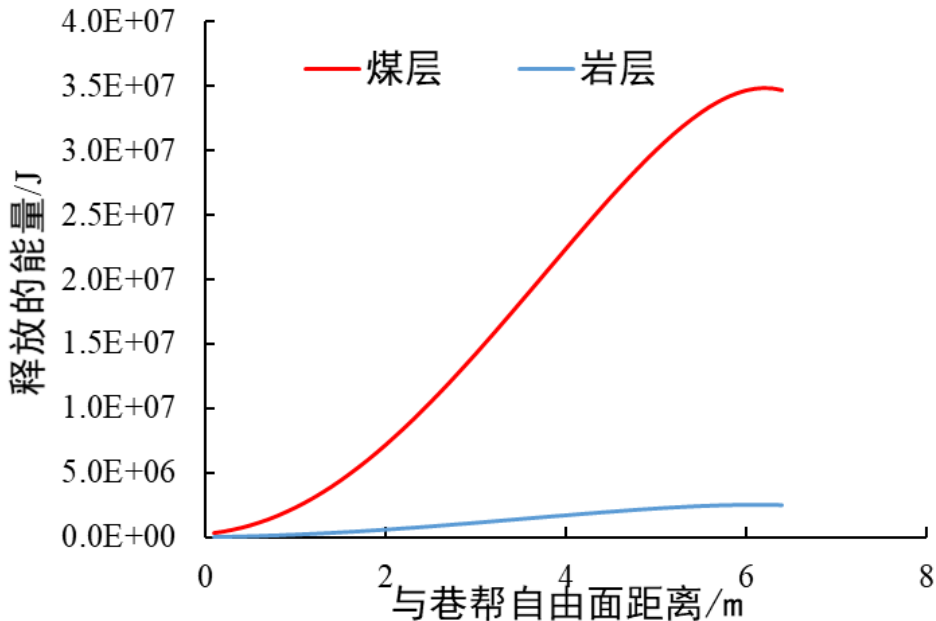
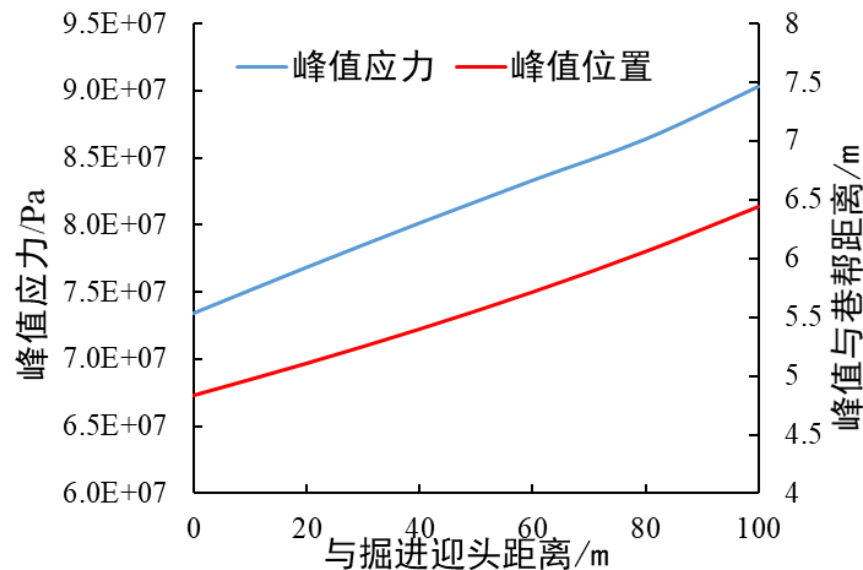


煤岩体
释放能量比较
煤体释放弹性
能为主

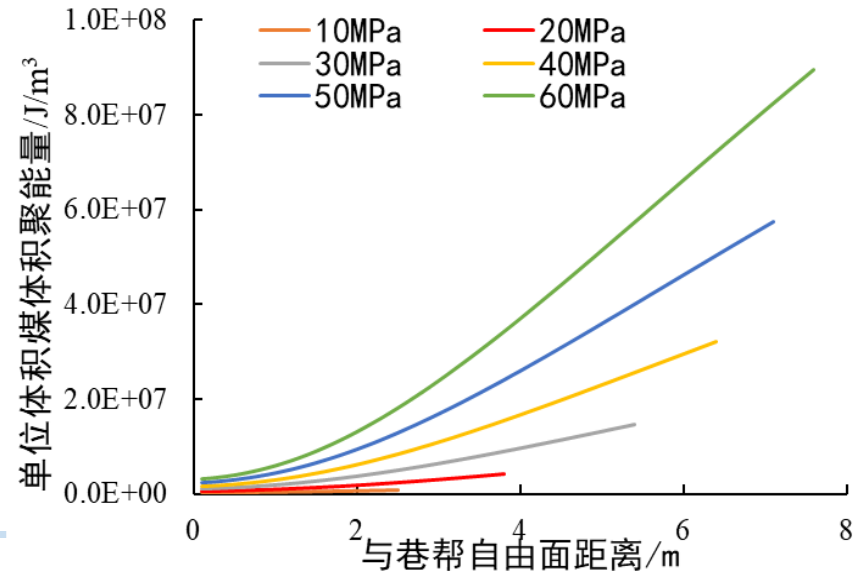
煤层和
岩层积聚的能量



随与迎
头距离
增加，
峰值应
力增加



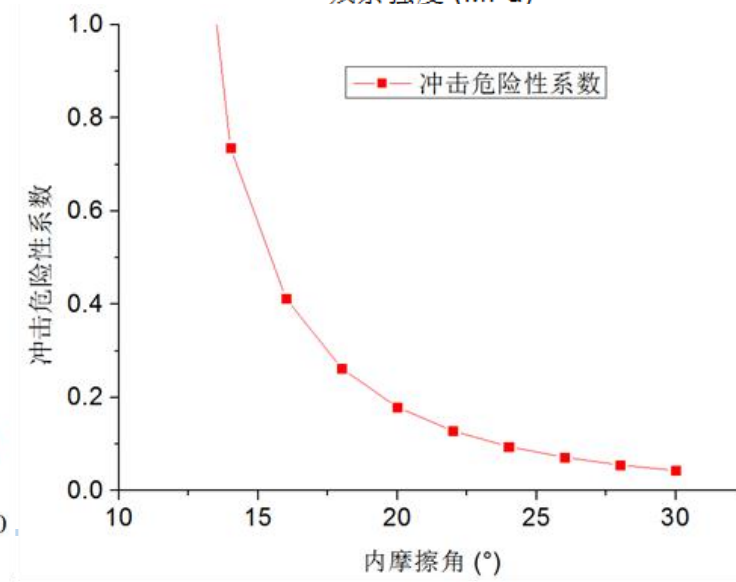
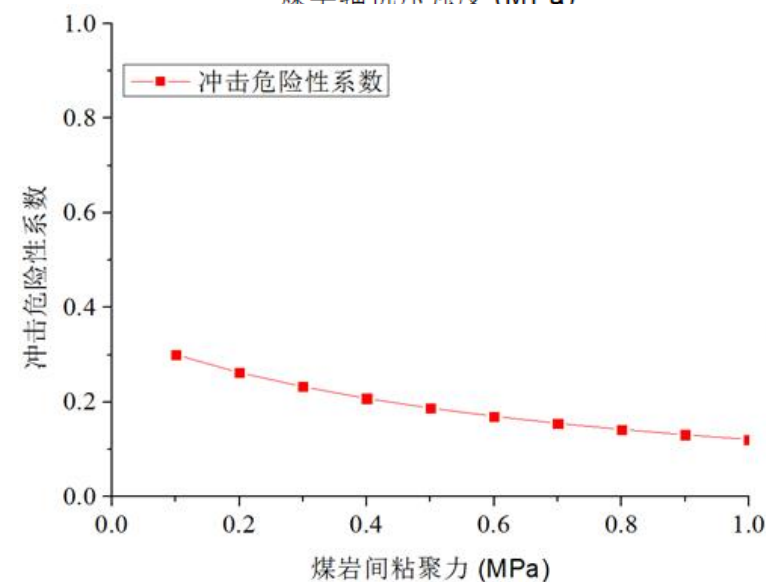
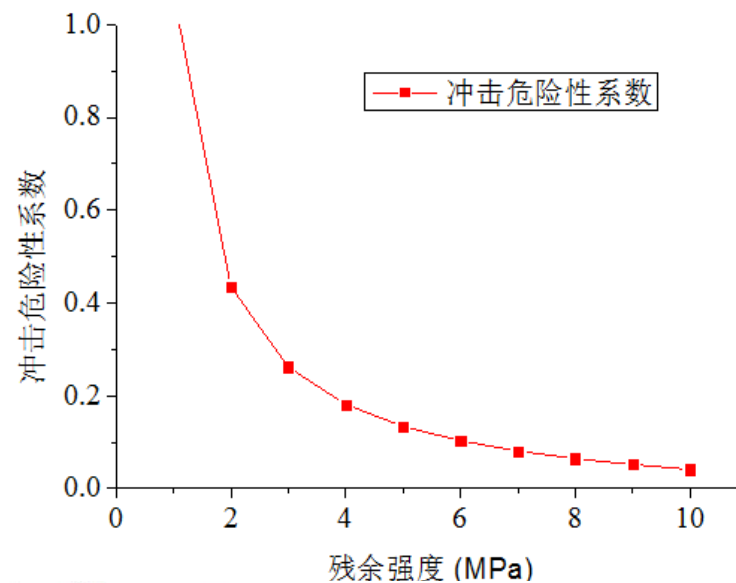
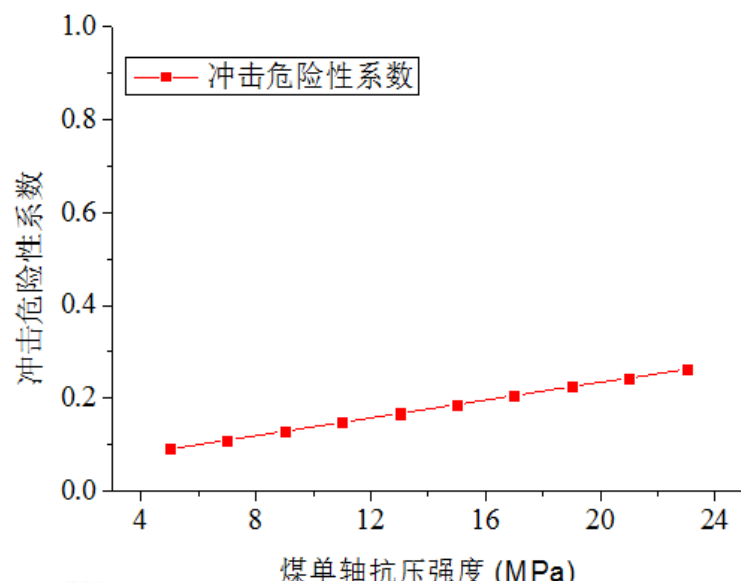
不同初
始应力
，煤体
围岩积
聚的能量



● 煤岩力学性质的影响

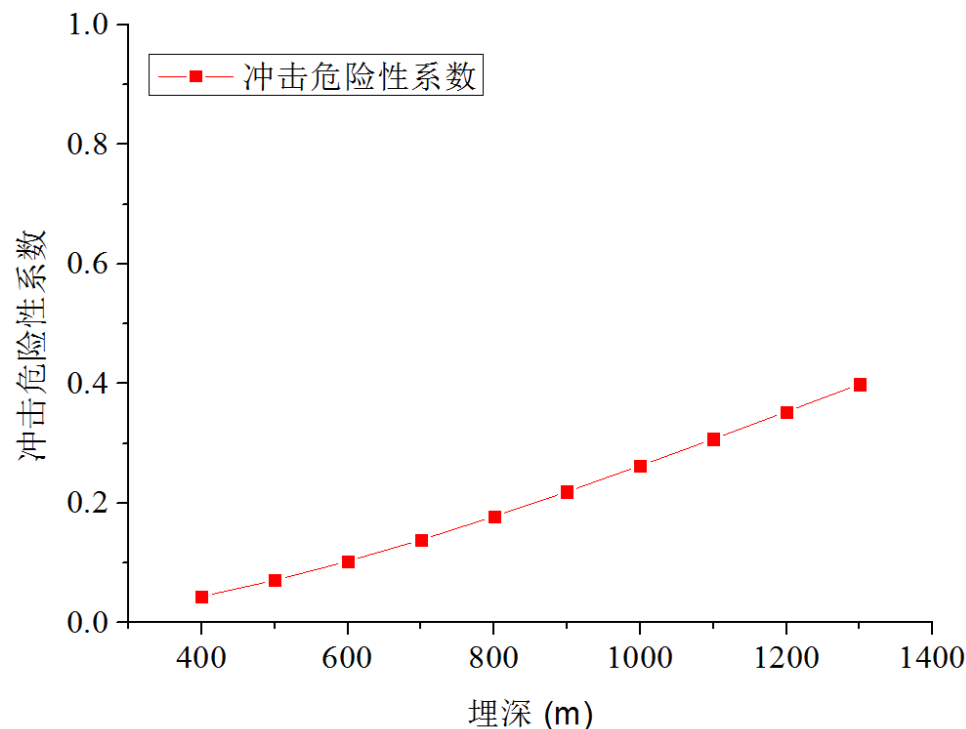
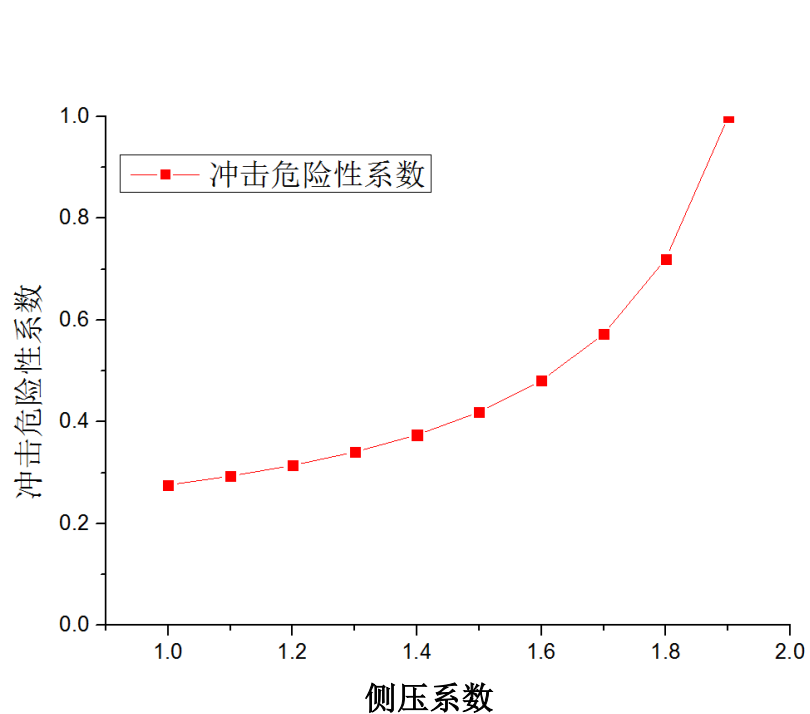
✓ 煤层力学参数的影响

✓ 煤岩界面力学参数的影响



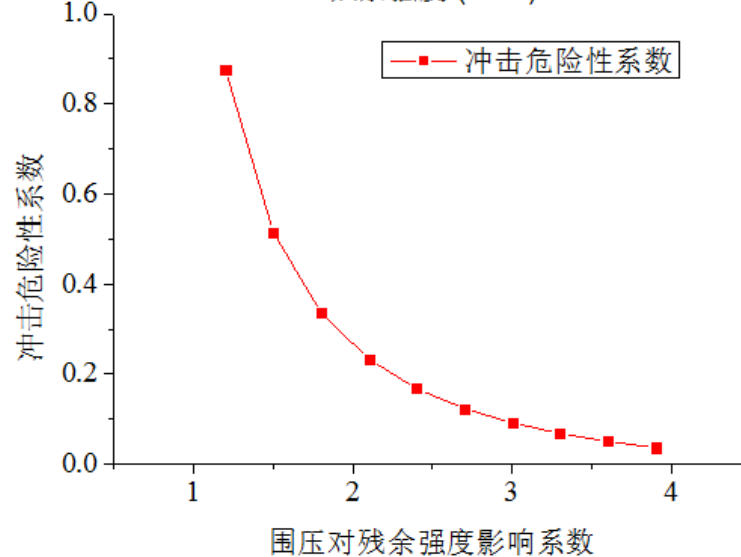
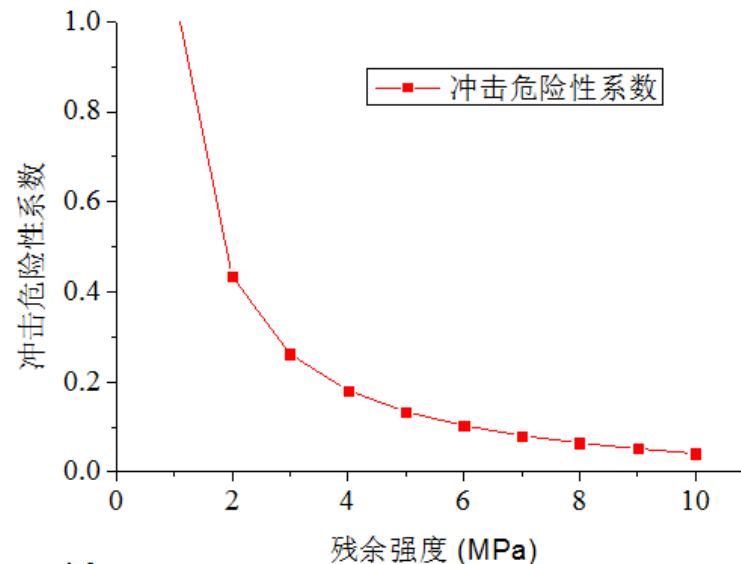
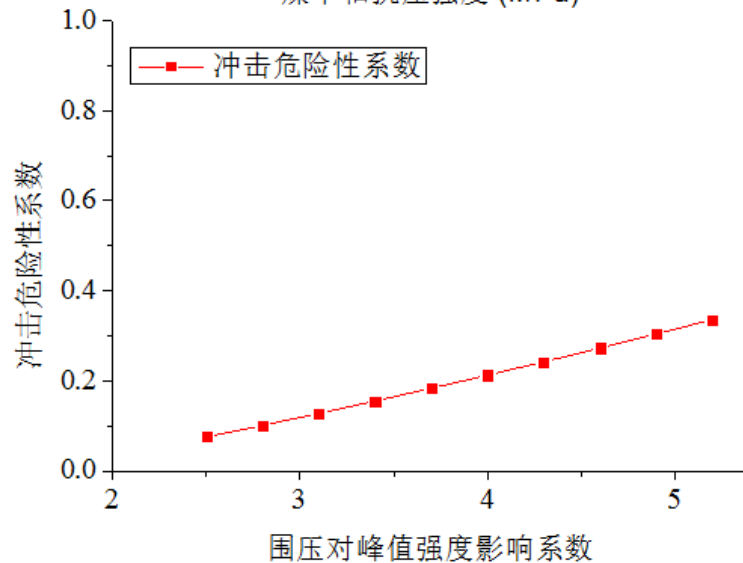
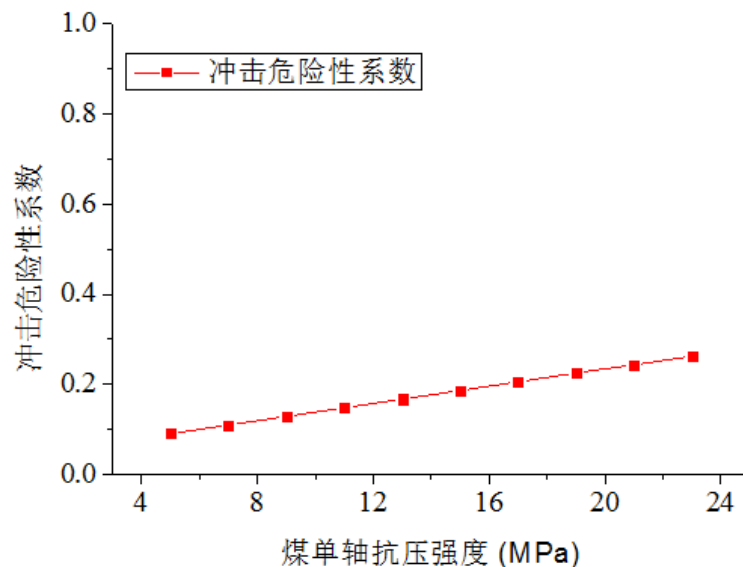
► 煤层埋藏条件影响

- ◆ 随着侧压系数和埋深的增加，冲击危险性呈线性增加。
- ◆ 侧压系数为 2 时的危险性是 1 时的 4 倍；
- ◆ 埋深 1300m 时的危险性是 400m 时的 1.7 倍。



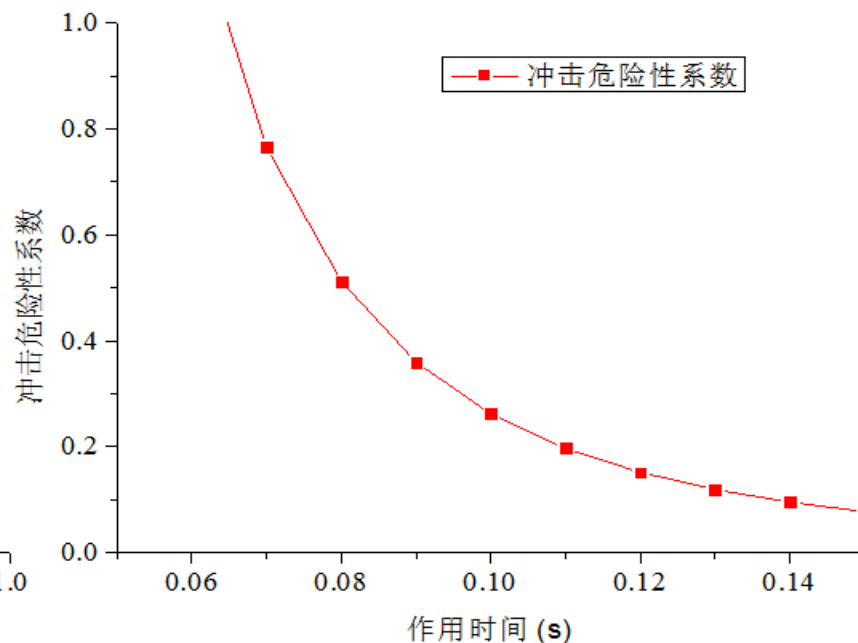
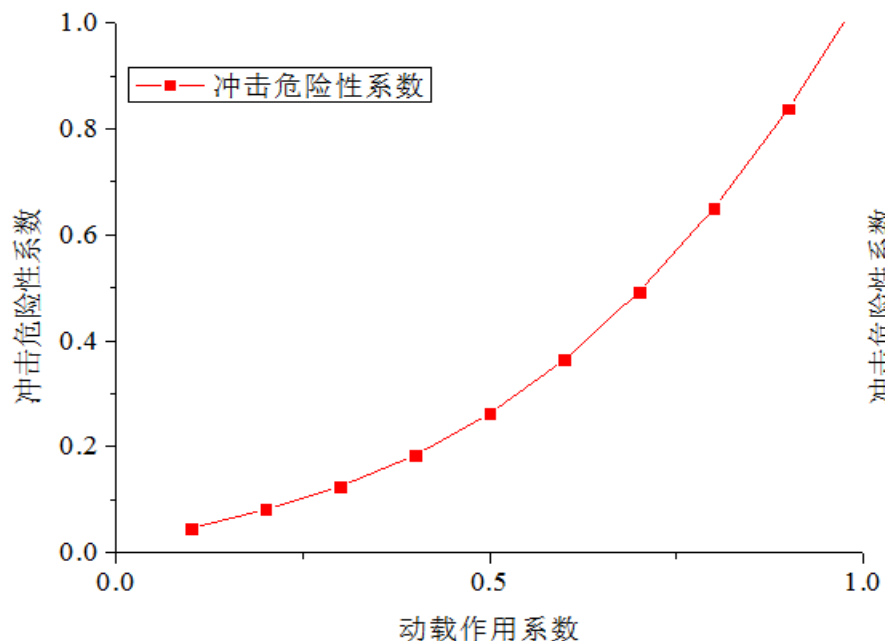
► 煤力学参数的影响

- ◆ 煤单轴抗压强度、围压对峰值强度影响系数与冲击危险性成正相关；
- ◆ 残余强度、围压对残余强度影响系数与冲击危险性成负相关



► 动载参数的影响

- ◆ 动载引起的顶板突然下沉量与冲击危险性成正相关；
- ◆ 动载作用时间与冲击危险性成负相关；
- ◆ 突降量与下沉量的比从0.2增加到1，危险性增加了25倍；
- ◆ 作用时间由0.07s增加到0.1s，危险性降低了3倍。

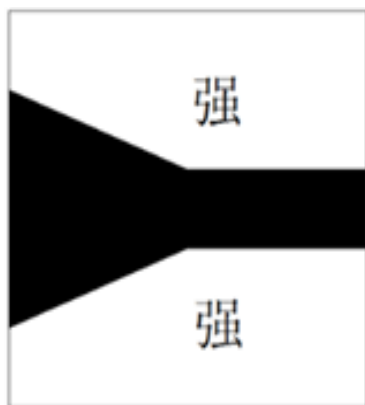


地质异常区对冲击矿压影响

断层、煤厚变化区、岩浆侵入、顶底板岩性变化区等地质异常带，使完整的岩层产生破断，形成弱面结构。



正常地层



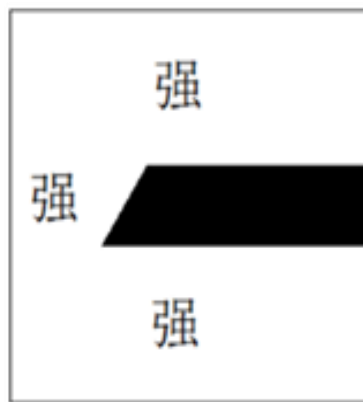
煤厚变化地层



光滑断层地层



粗糙断层地层



岩浆侵入地层



不同顶底板地层



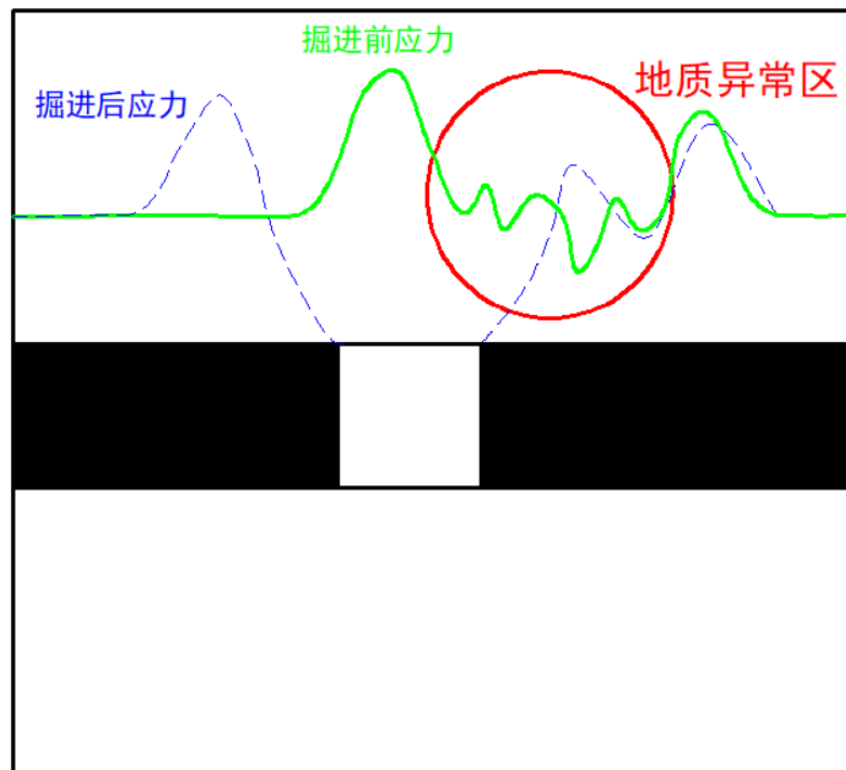
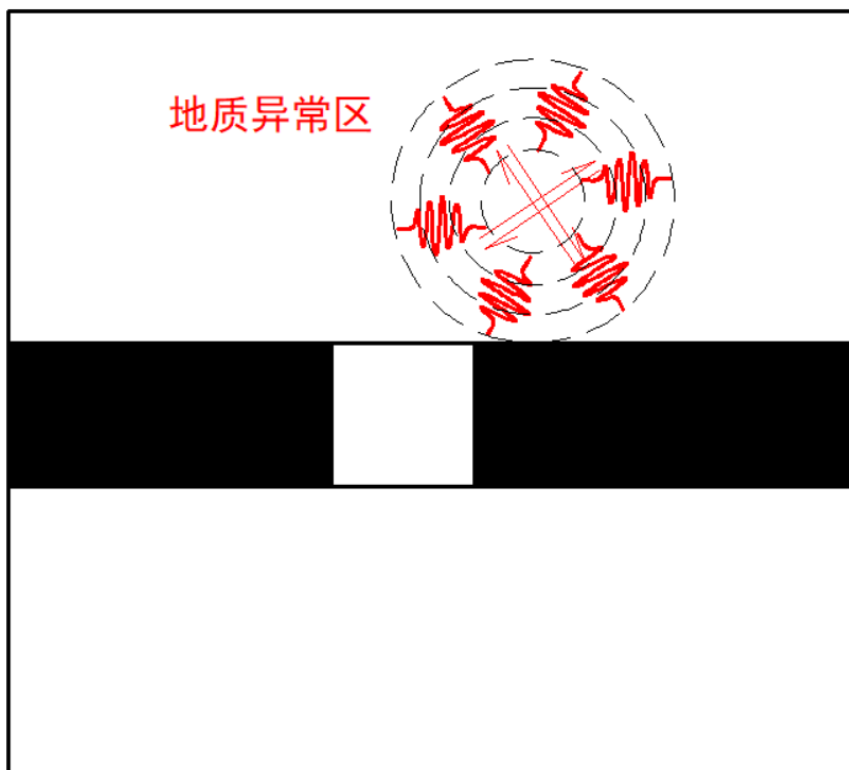
顶底板岩性变化地层



顶底板岩性变化地层

□ 地质异常区对冲击矿压影响

- 弱面结构在外界扰动下，微裂隙优先扩展，形成大的断裂面，错动、破断释放大能量震动事件，形成动载源。
- 地质异常区附近初始应力较高，煤体易达到冲击临界值。



二、实体煤巷道掘进冲击机理

2.1、煤体巷道掘进冲击条件

2.2、掘进巷道巷帮围岩应力路径

2.3、加卸载应力路径试验研究

2.4、巷道结构模型及应力变形特征

2.5、煤层巷道掘进冲击机理

2.6、煤层巷道掘进冲击影响因素

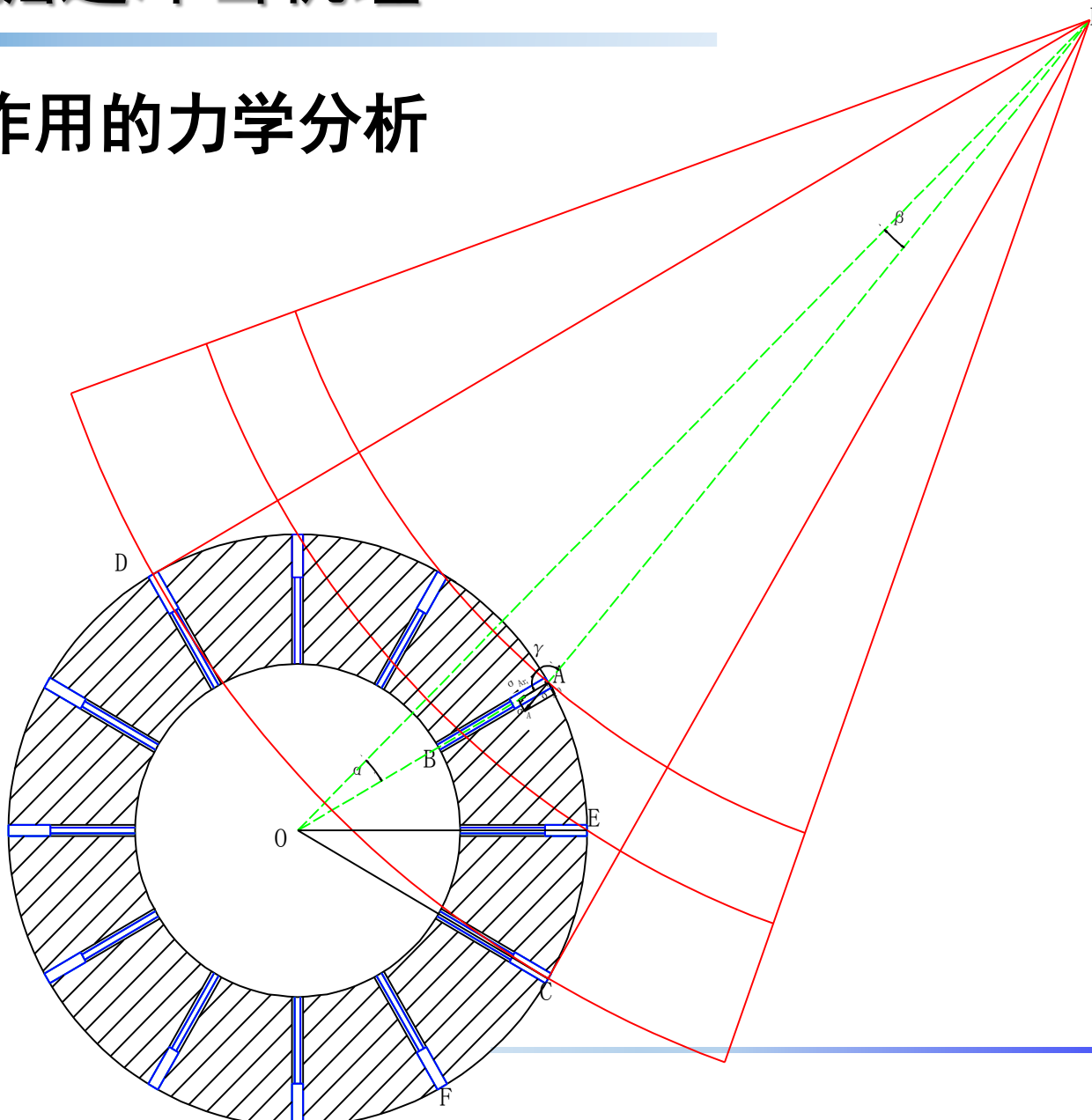
2.7、动载对围岩作用的仿真模拟

2.7、动载对巷道支护作用的力学分析

➤ A点的应力

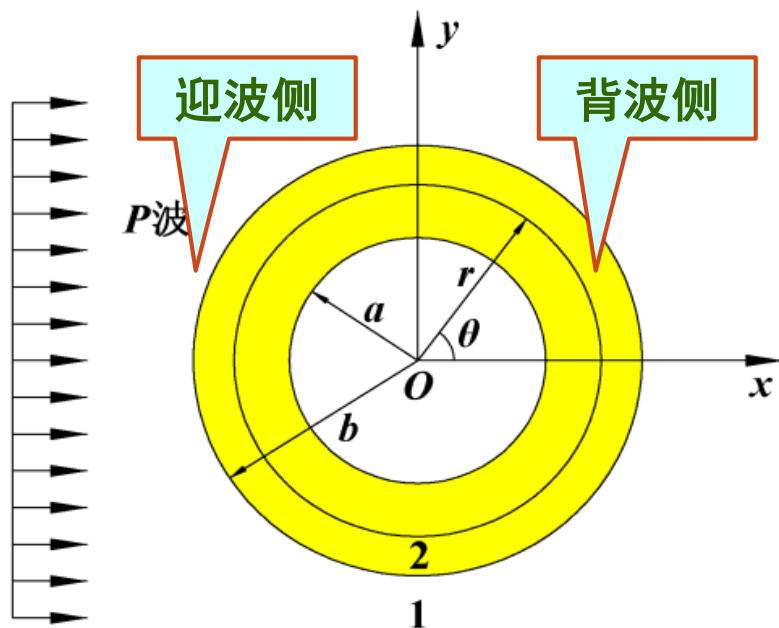
$$\sigma_A = \sigma_d (d - r - t_{AB})^{-\eta}$$

- ✓ 设震源距巷道中心的距离为 d
- ✓ 承载拱的厚度为 t_{AB}
- ✓ 巷道半径为 r



□ 分析模型与基本假定

- (1) 动载距巷道一定距离时，弹性球面波可近似按平面波处理
- (2) 锚固范围内的围岩组合成一个整体承载结构
- (3) 静水压力 ($\lambda=1$) 下的任意方向的应力波作用都是等效的
- (4) 围岩为均质，各向同性，线弹性，无蠕变或粘性行为



a 为巷道内表面半径；

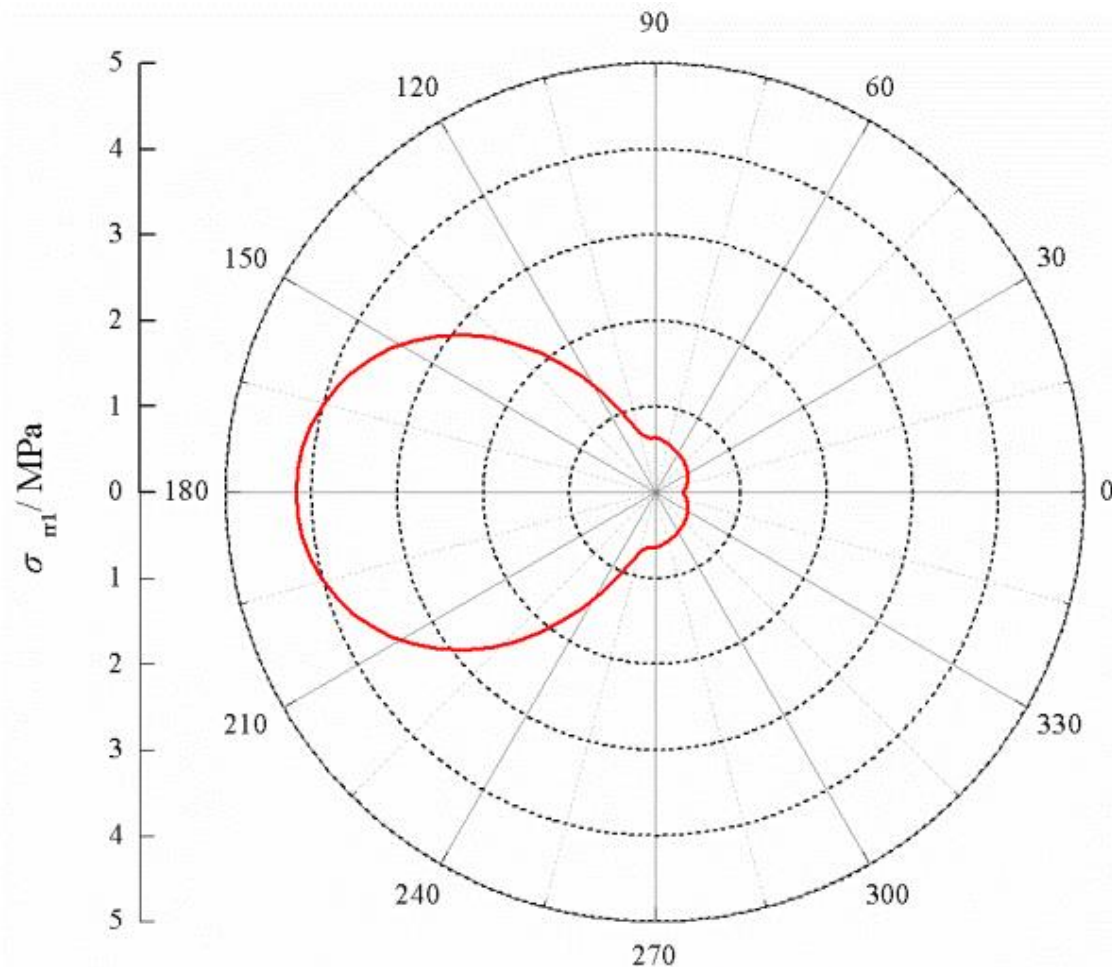
b 为承载拱结构的半径；

r 为任意一点到巷道中心的距离；

θ 为巷道圆周上任一点与 x 轴正方向的夹角

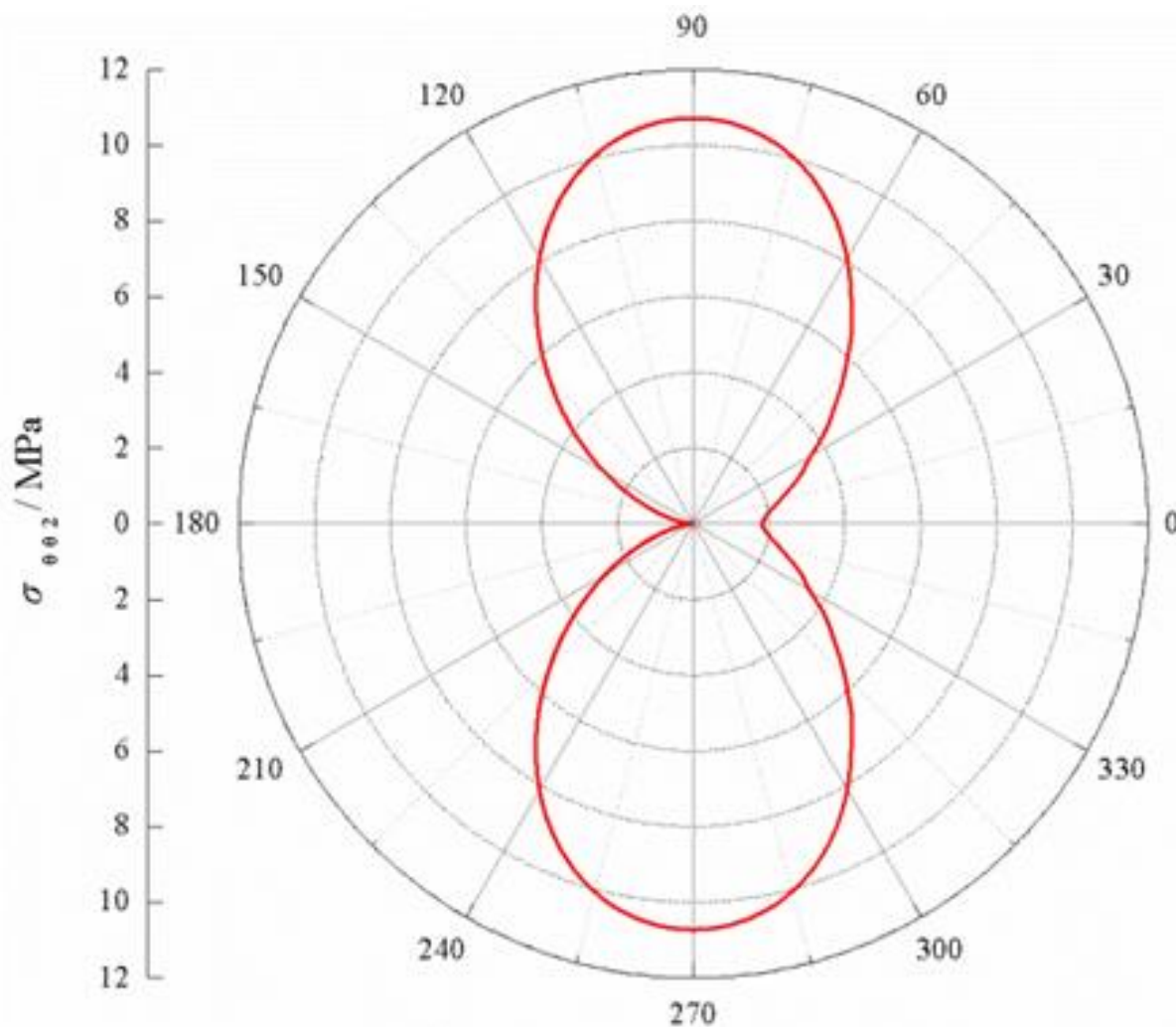
□ 围岩与承载拱交界面处的径向应力 ($r = b$)

- 离震源较近的**迎波侧**支护结构所受径向应力较大，最大在 180° 处；
- 离震源较远的**背波侧**支护结构所受径向应力较小，在 0° 处几乎为0。
- 迎波侧受动载影响比背波侧大
- 洞室使得应力波发生**绕射**，波作用结果使得洞室表面上的任意一点都是新波源，这些新的波源向各个方向发出“绕射波”，其叠加和互相干涉的结果形成了**洞室后方应力波消弱**。



□ 巷道自由表面处的环向应力 ($r = a$)

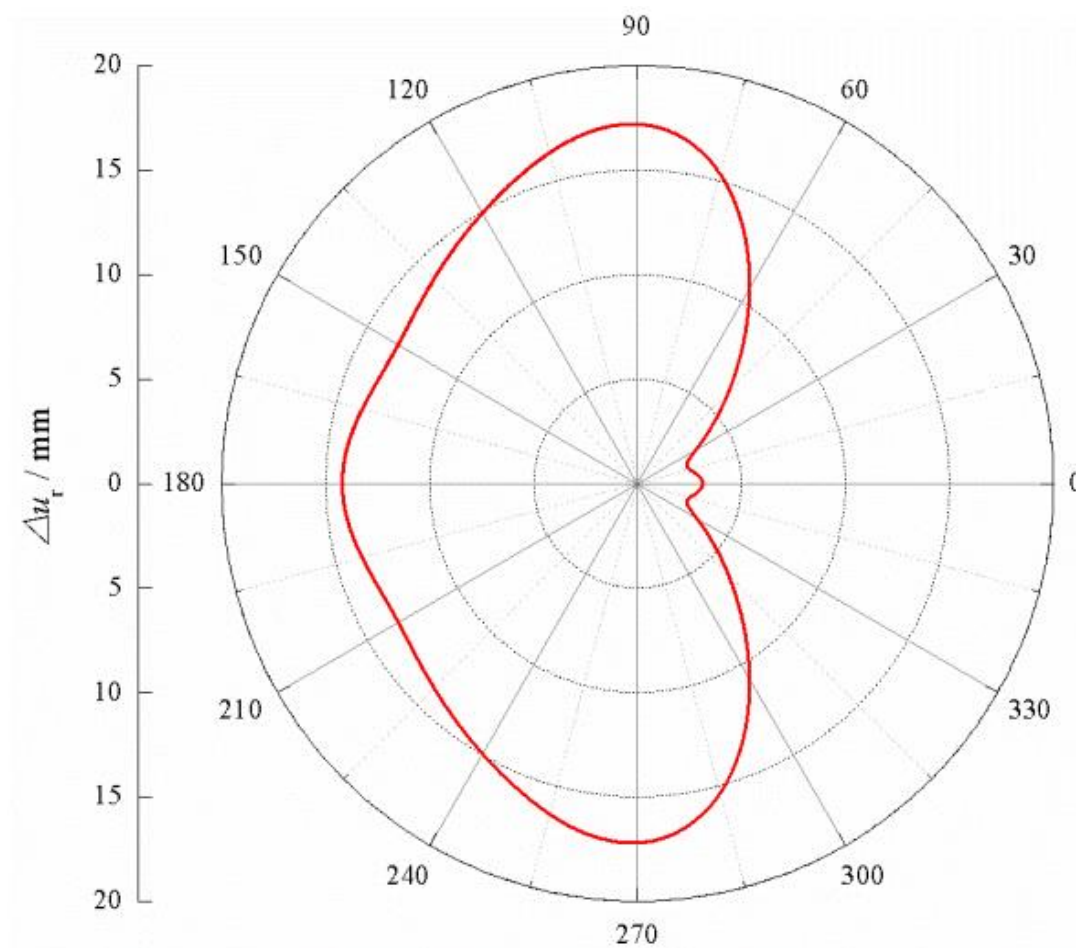
- 环向应力最大值出现在 90° 和 270° 附近，为应力集中区，该处围岩发生剪胀变形，向巷道空间变形量最大。
- 静载下巷道自由表面的环向应力最大，与动载下的最大环向应力 $\sigma_{\theta\theta 2\max}$ 叠加，将为最危险的区域，是支护重点关注的位
置。



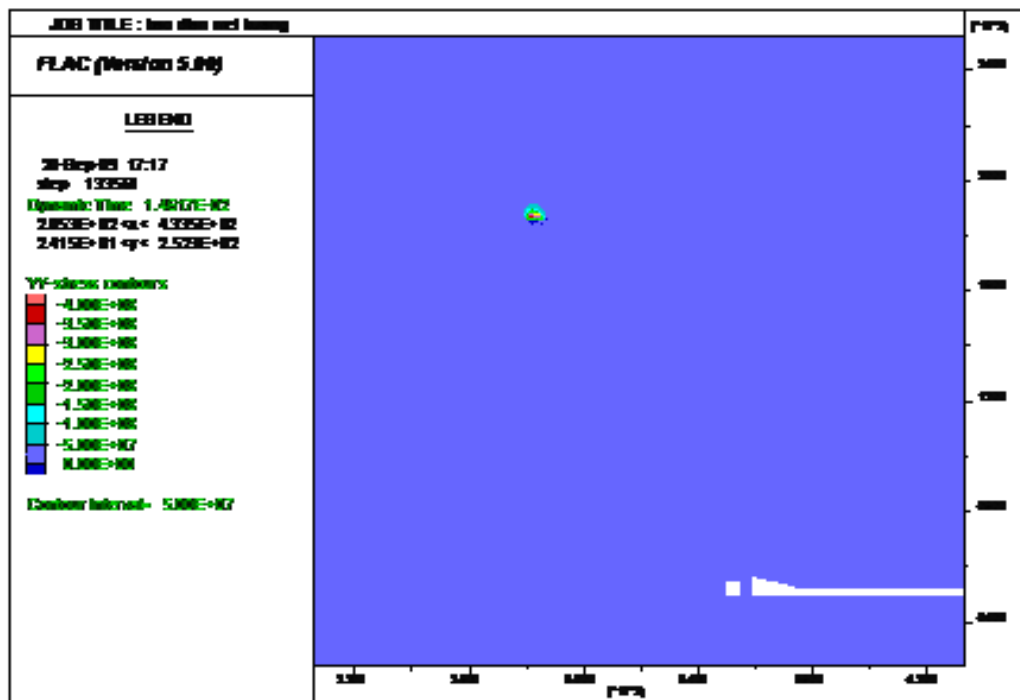
□ 径向位移差

$$\Delta u_r = u_{r2} - u_{r1}$$

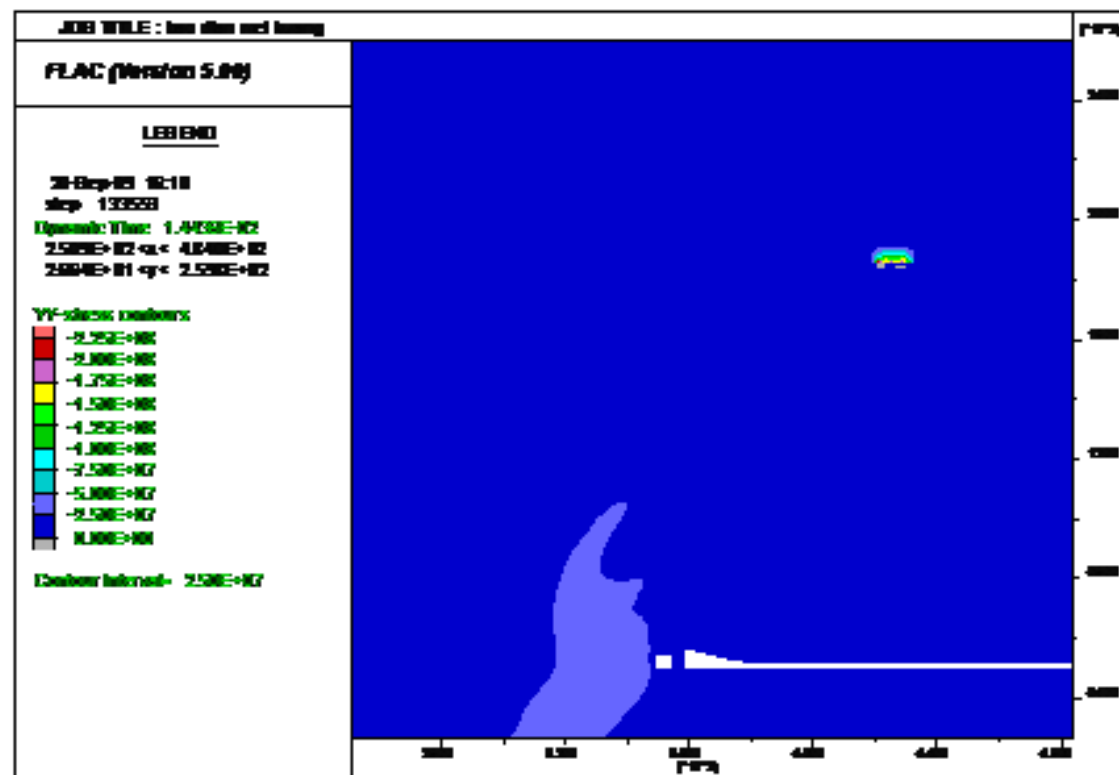
- 指巷道自由表面处的径向位移与深部围岩和承载拱交界面处的径向位移之差
- 动载作用下巷道表面和深部围岩不协调变形作用于锚杆，使锚杆杆体受拉。
- 迎波侧的径向位移明显大于背波侧径向位移，其中90°和270°附近的位移差最大，说明这些位置锚杆受拉最大，是支护重点关注的位置。



□ 动载对巷道围岩作用的动态模拟



厚硬顶板剪切破裂（倾角 60° ）
对巷道冲击效应



采空区上覆剪切破裂震源（倾角 60° ）
的冲击效应

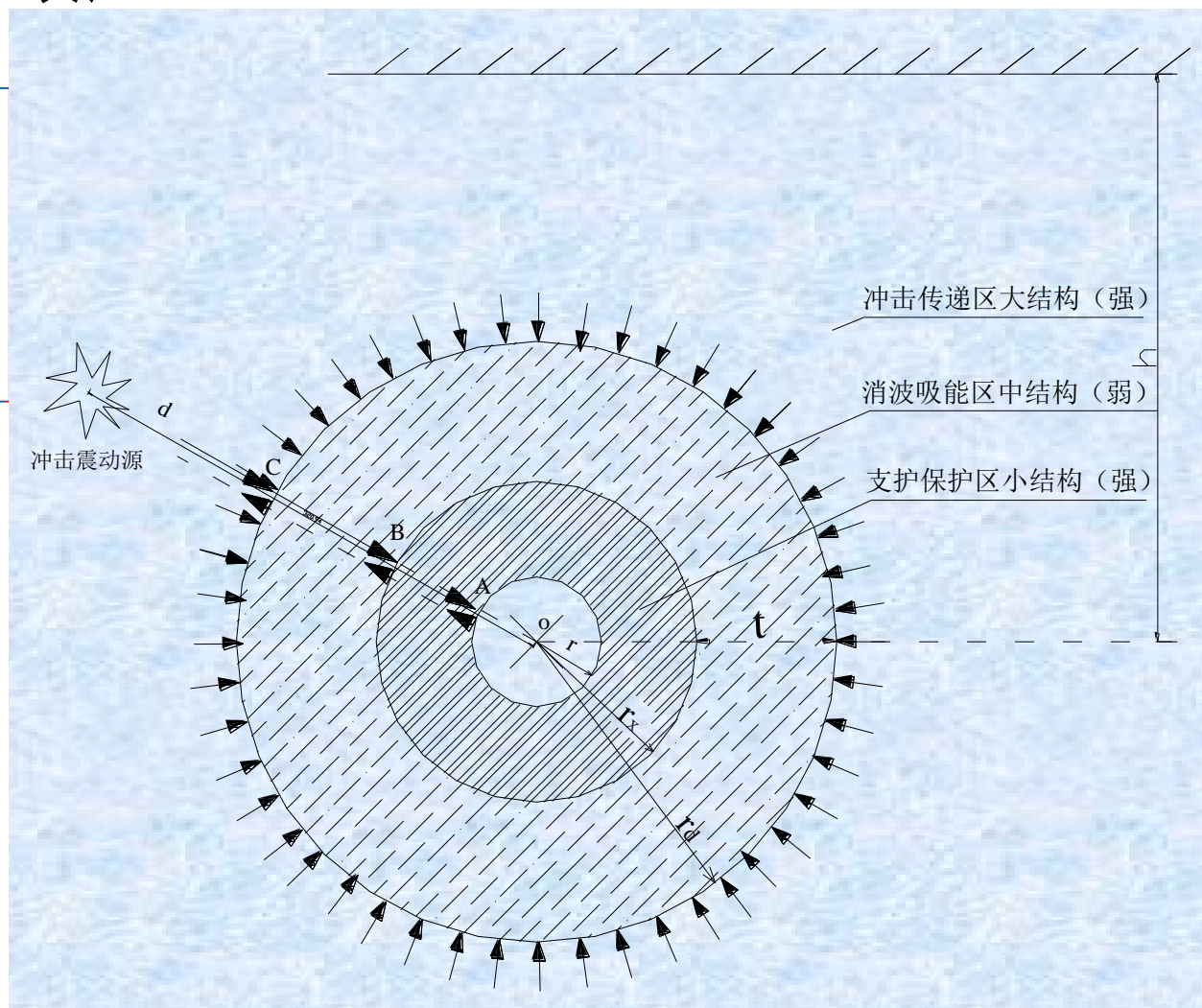
汇报提纲

- 一、煤巷掘进冲击显现特征
- 二、实体煤巷道掘进冲击机理
- 三、巷道掘进冲击防治对策

□ 3.1、巷道围岩的强弱强结构效应

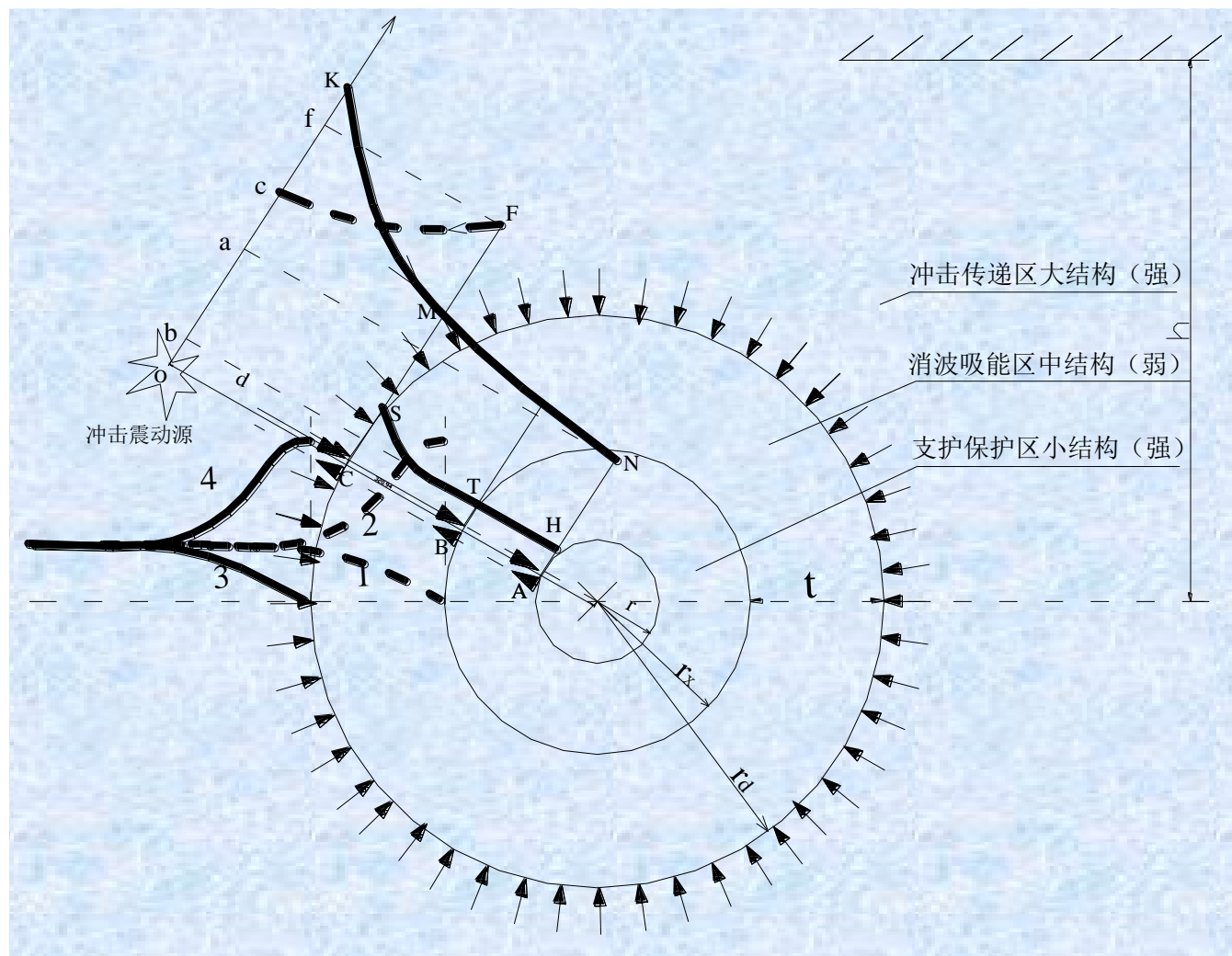
- 外强结构—冲击传递区的大结构
- 中间的弱结构—消波吸能区
- 内强结构—支护保护区小结构

- 控制冲击对策：
- 减小外界震源载荷
- 合理设置弱结构
- 提高支护强度



□ 强弱强结构的强度特征

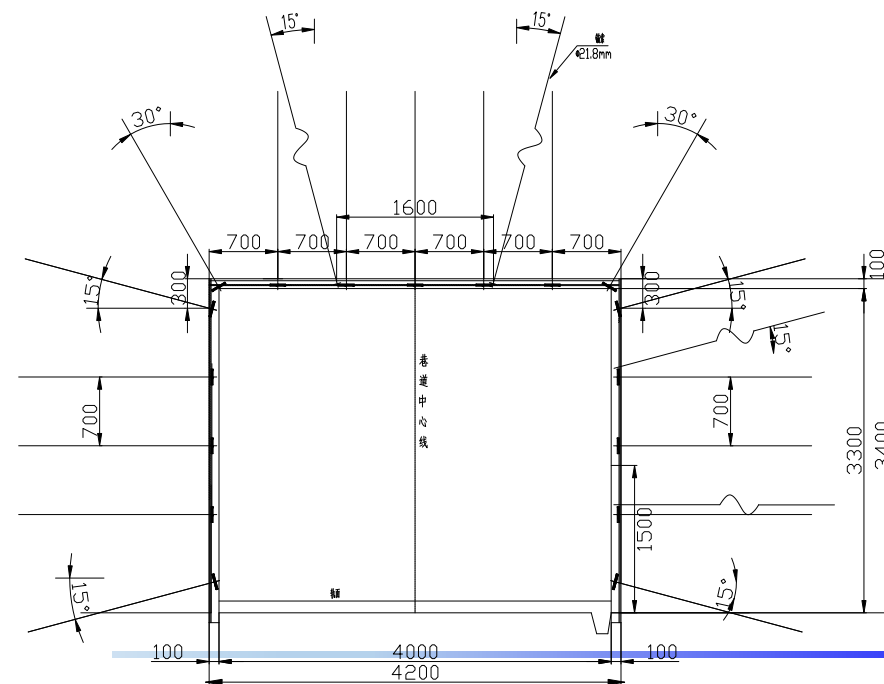
- 防冲抗震巷道围岩呈现出强、弱、强的结构特点
- 强弱强结构对冲击应力波起到一个衰减吸收效应
- 巷道围岩变形呈现出小、大、小的特点
- 巷道围岩呈现出小、大、小的能量耗散特点



◆ 冲击危险巷道的控制原理

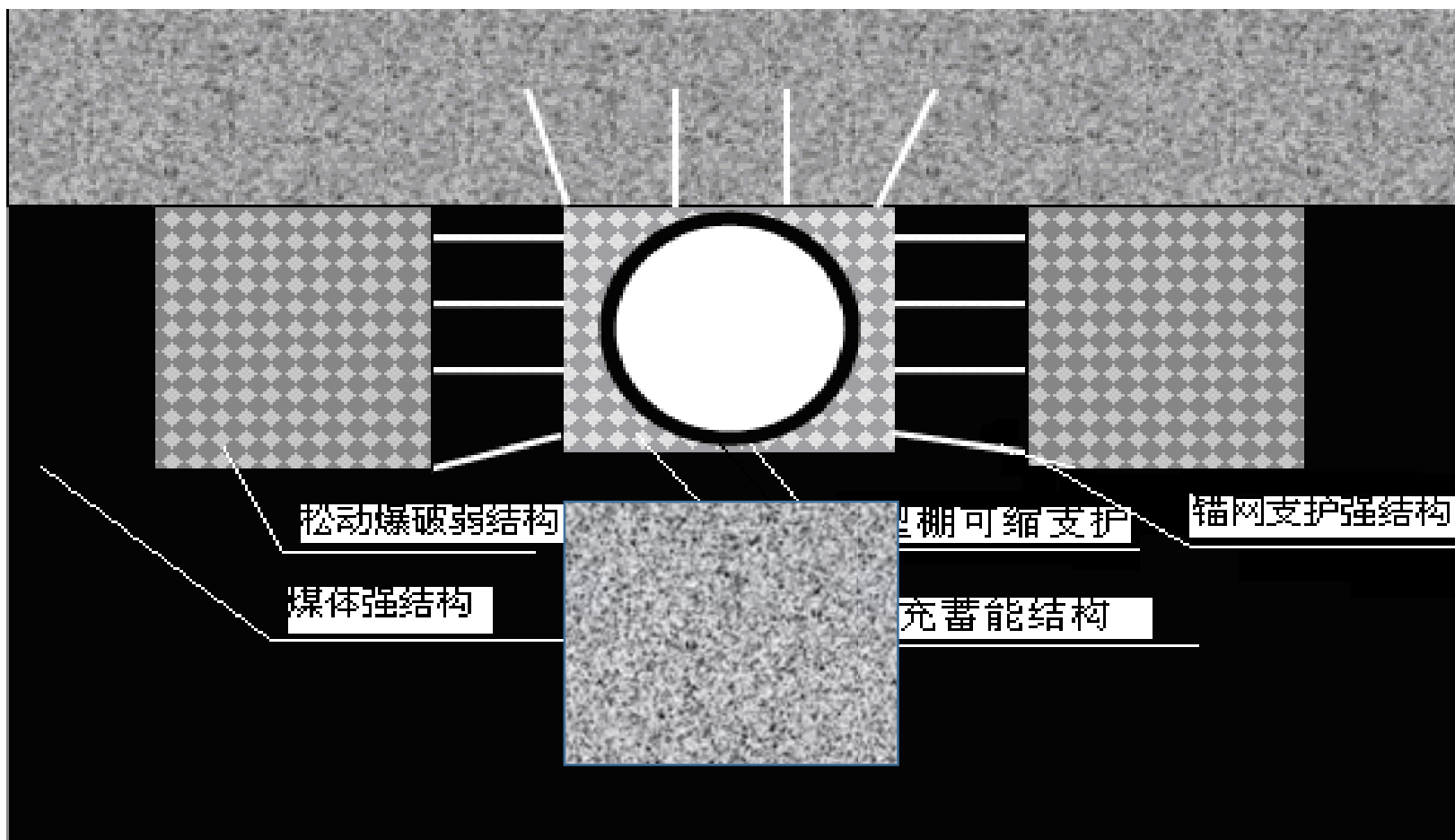
$$\sigma_d \cdot (d - r - t_{AB})^{-\eta} + \gamma h \left(1 - \frac{r^2}{(r + t_{AB})^2}\right) > \sigma_{ZAB}$$

- 减少外界震源扰动载荷 σ_d
- 设置弱结构，使得波传播的能量衰减指数增加 η
- 提高支护强度 σ_{ZAB}



◆ 巷道围岩柔性蓄能支护控制体系

锚网索+“0”型棚联合支护+门式支架



➤ 巷道围岩的强弱强结构效应

✓ 一级锚网索支护

□ 巷道支护防冲系统

✓ 二级锚网索+充填结构+“0”型棚支护

✓ 三级锚网索+充填结构及“0”型棚+门式支架支护



一级支护现场效果



二级支护现场效果

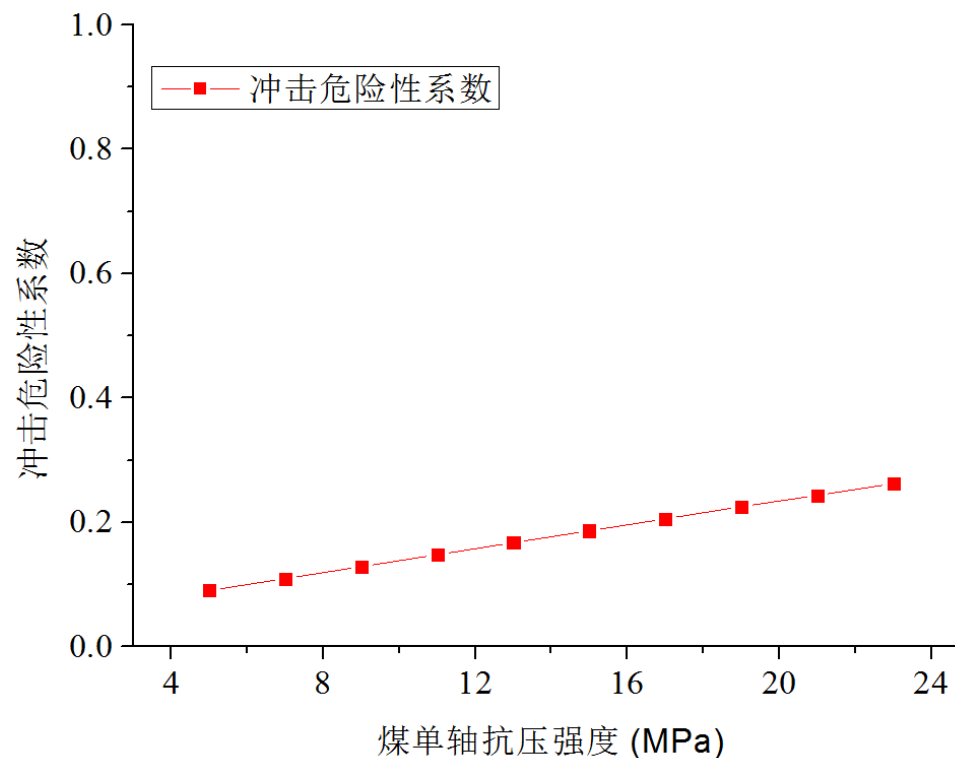
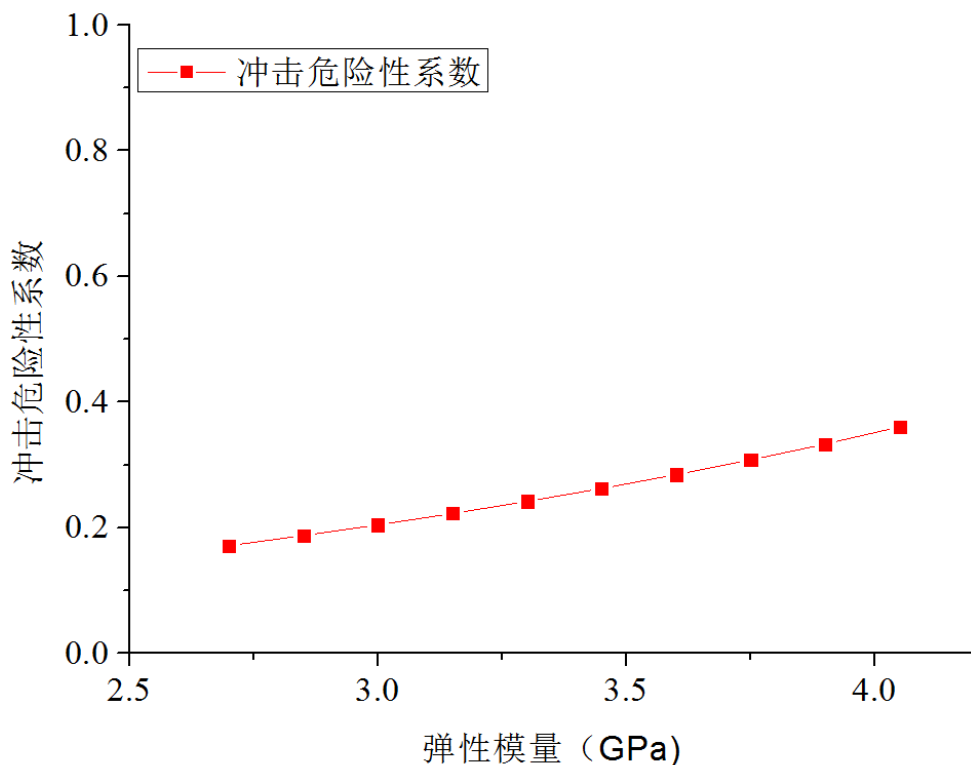


三级支护现场效果

工作面巷道支护防冲系统的形成过程

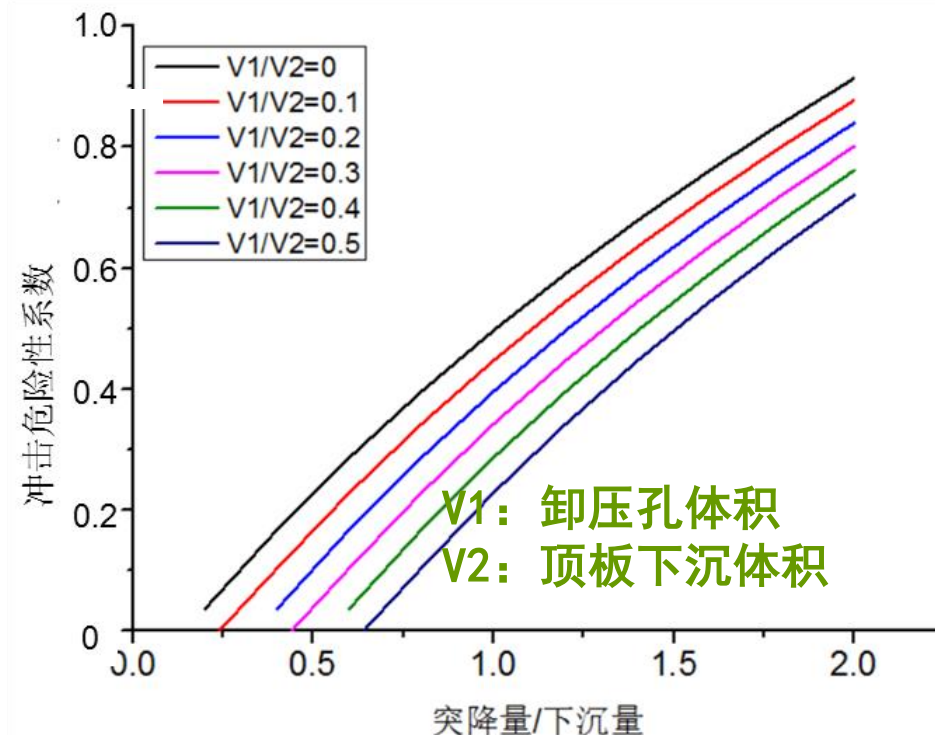
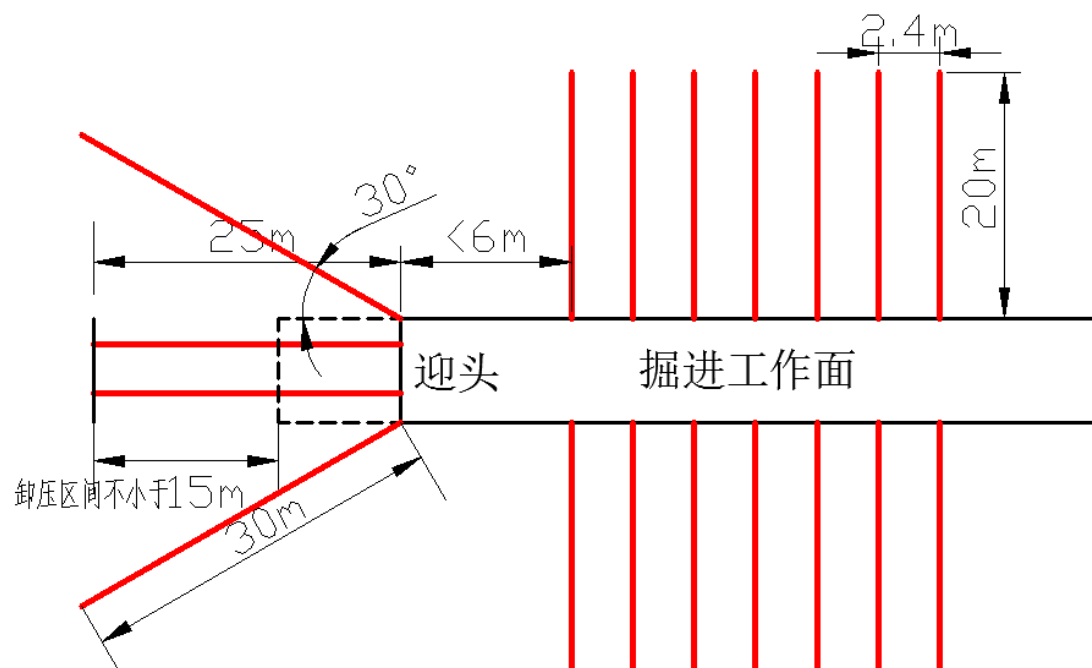
□ 3.2、改变煤体的力学性质——降低单轴抗压强度

- 随着煤的弹性模量和单轴抗压强度的增加，冲击危险性增加；
- 通过钻孔、爆破卸压、煤层注水等措施，降低煤体的单轴抗压强度、弹性模量和泊松比可降低冲击危险性。



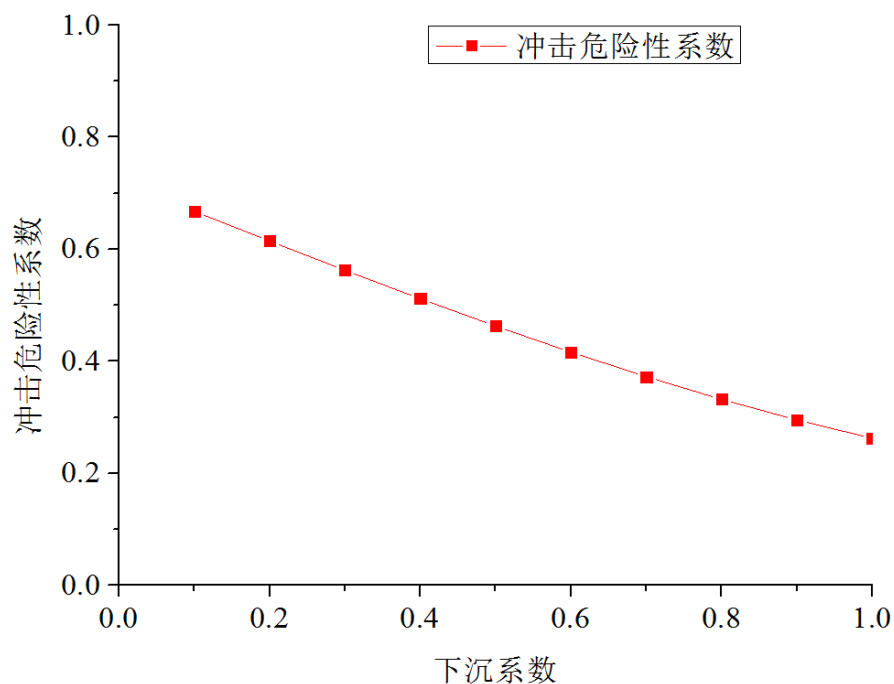
3.3、降低帮部煤体应力值——钻孔卸压、卸压爆破

- 对煤体施工大直径卸压孔能够有效的降低冲击危险性；
- 随卸压孔体积的增加，冲击危险性不断降低；
- 无卸压孔，动载引起突降量为下沉量0.2倍时，无冲击危险；
- 当卸压孔体积为下沉量体积的0.5倍时，动载突降量为下沉量的0.7倍时，不会发生冲击矿压。



□3.4、降低巷道迎头应力值——超前钻孔卸压

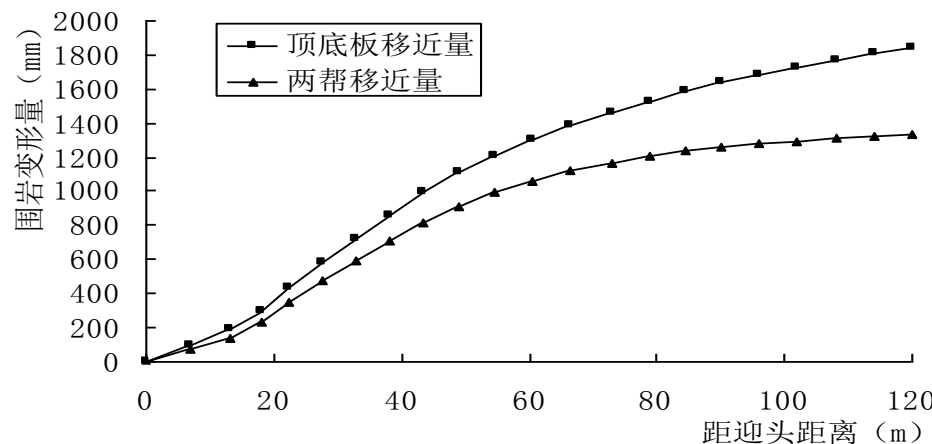
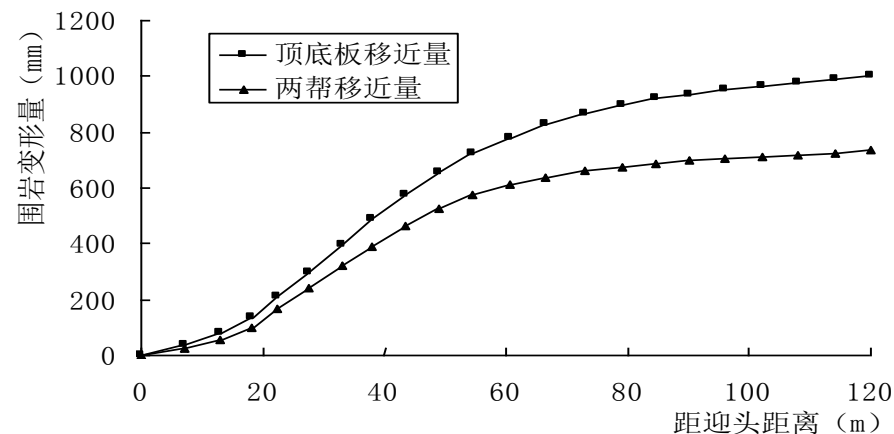
- 随着顶板下沉量的增加，冲击危险性不断降低；
- 施工超前钻孔后，顶板预下沉了将近800mm，占总下沉量的40%，冲击危险性由0.7将为0.5。



顶板下沉系数与冲击危险性关系

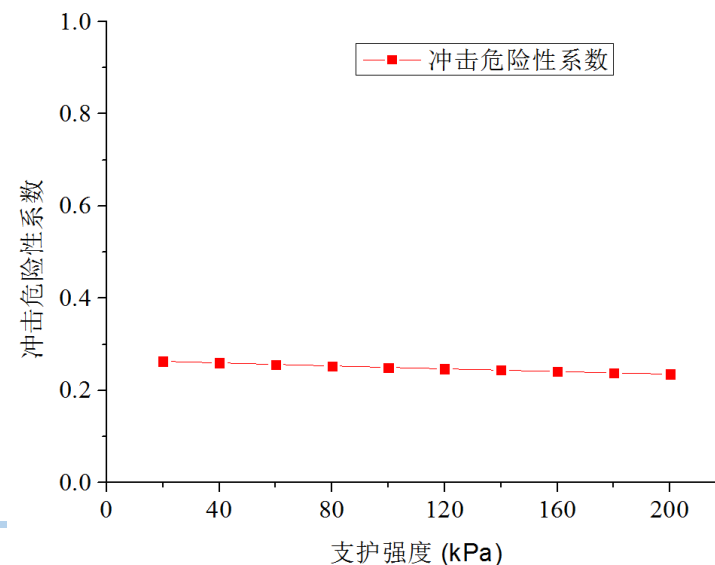
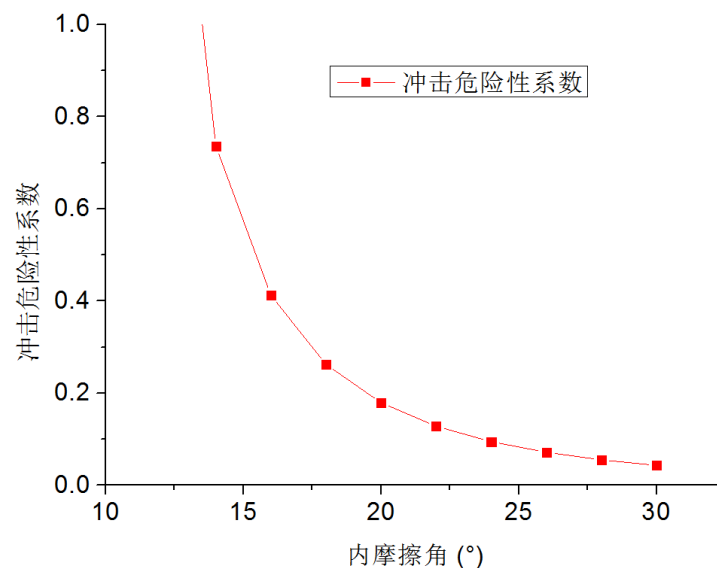
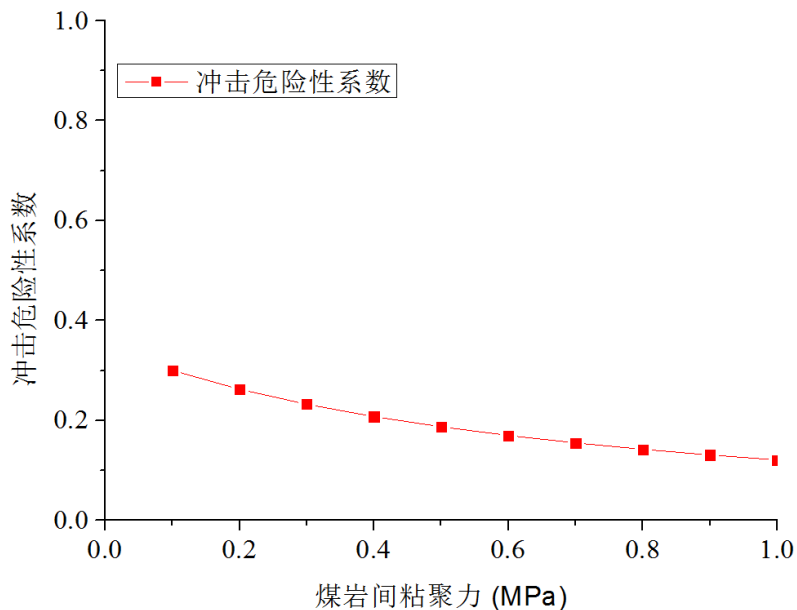
未施工超前钻孔时的巷道围岩变形量

超前钻孔后的巷道围岩变形量



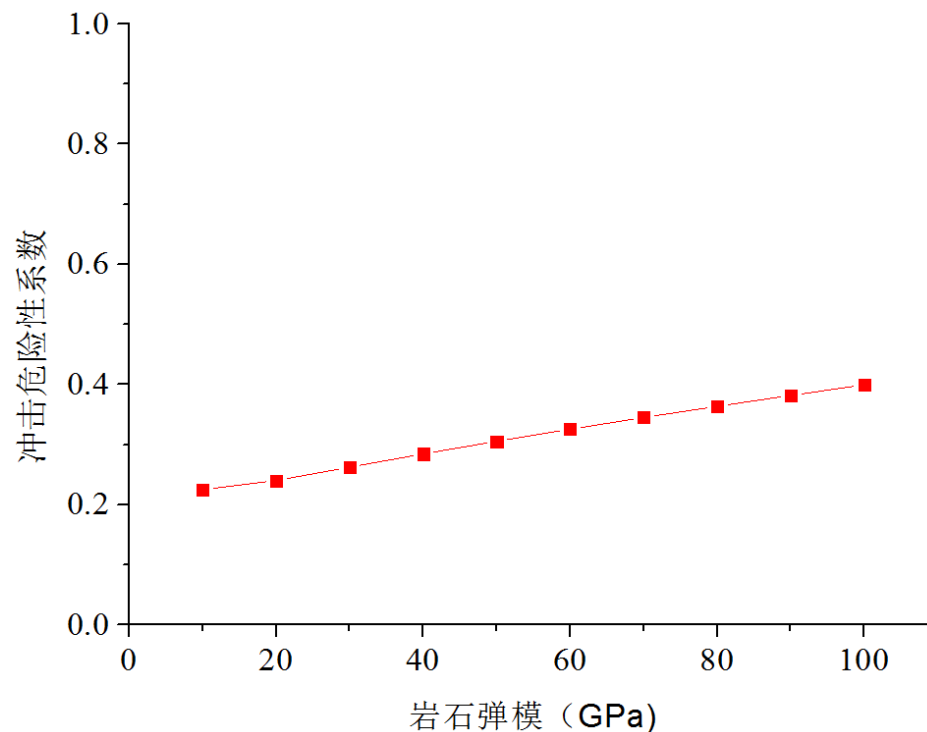
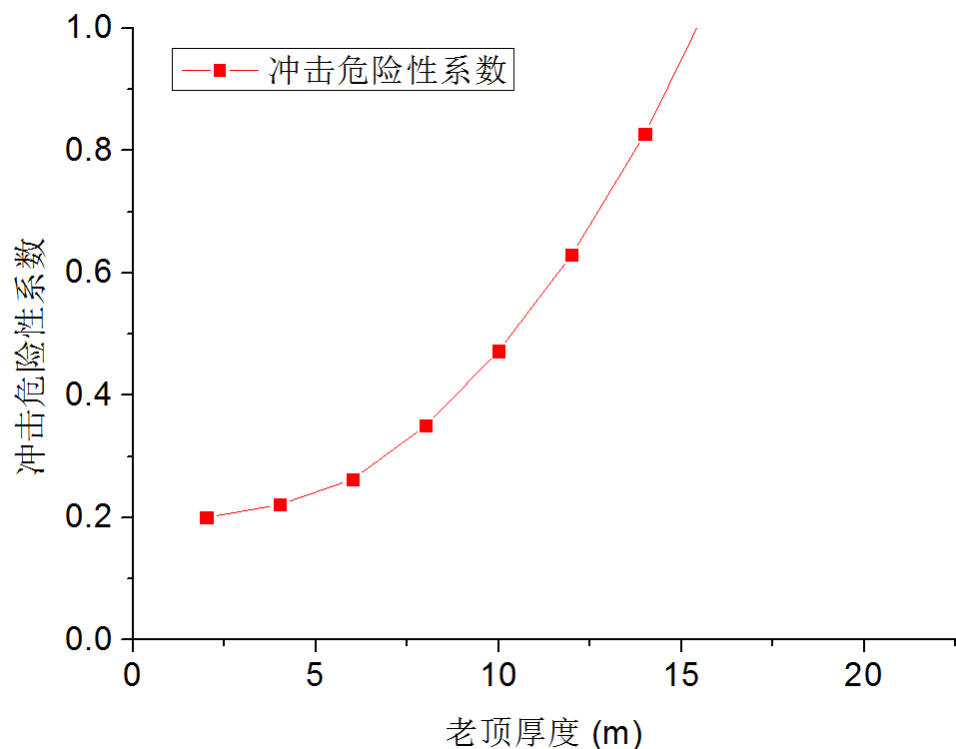
□3.5、巷道支护方式——支护位置、支护强度

- 煤岩间粘聚力和内摩擦角对冲击矿压的影响较大；
- 增加锚杆的支护强度，冲击危险性略有降低；
- 锚杆支护在岩层和煤层的交界面处，可增加煤岩间的粘聚力和内摩擦角，对冲击防护极为有利。



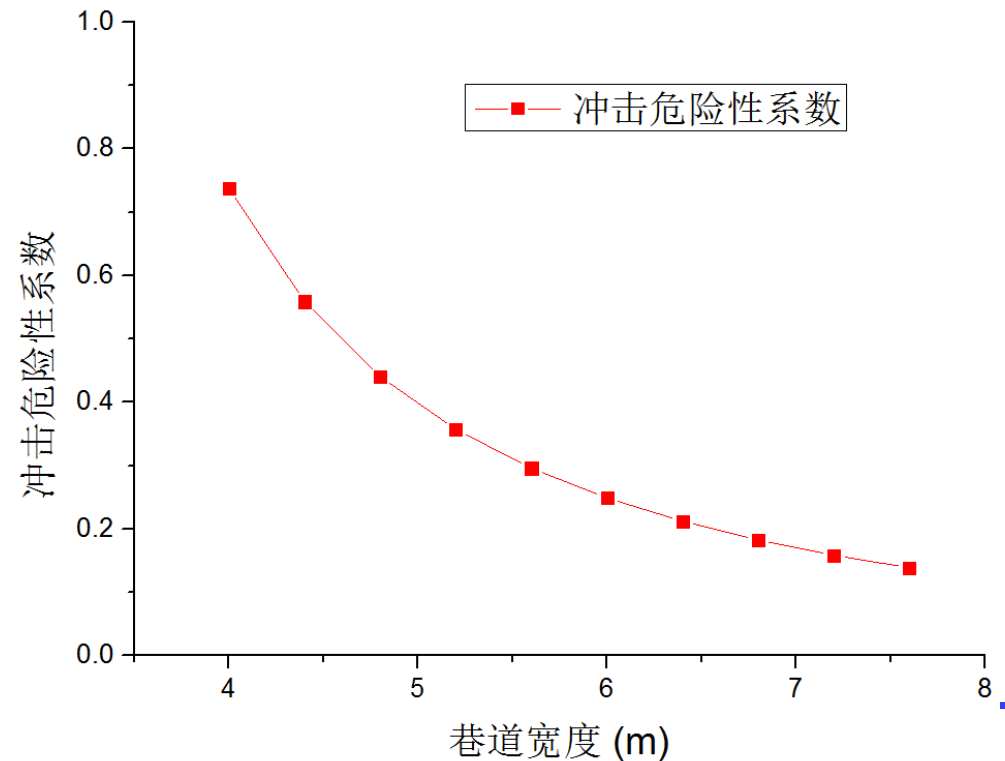
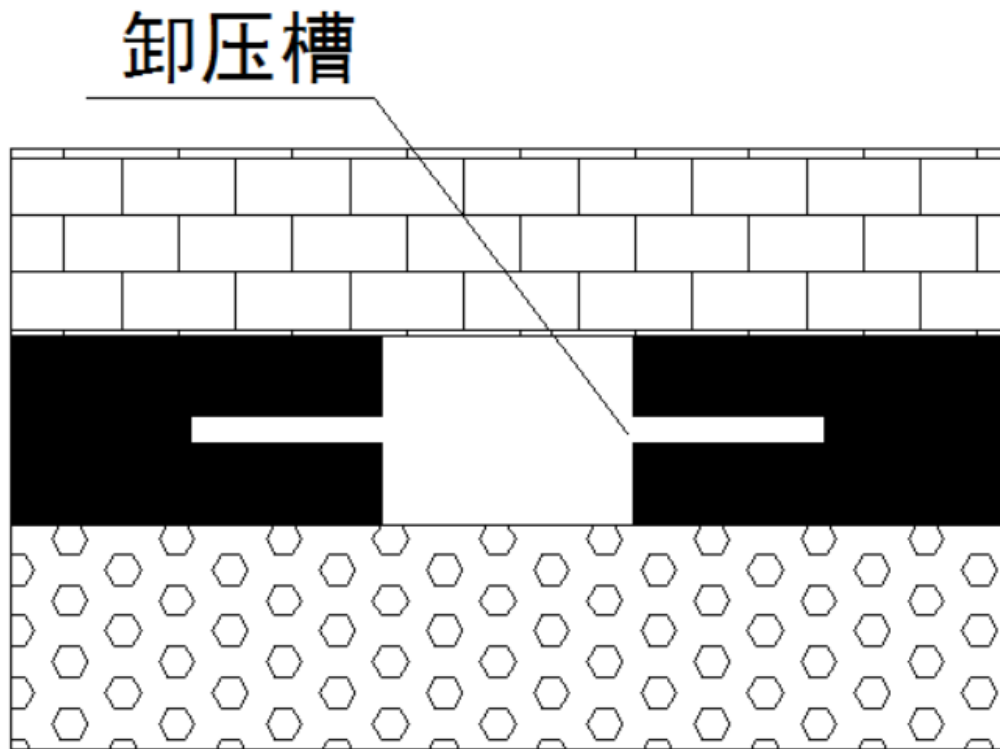
□ 3.6、改变顶板的力学性质——破坏顶板的完整性

- ▶ 老顶厚度和弹模的增加，冲击危险性不断增加，因此采取水力致裂、顶板爆破等措施分层老顶，增加老顶裂隙，可降低冲击危险性。



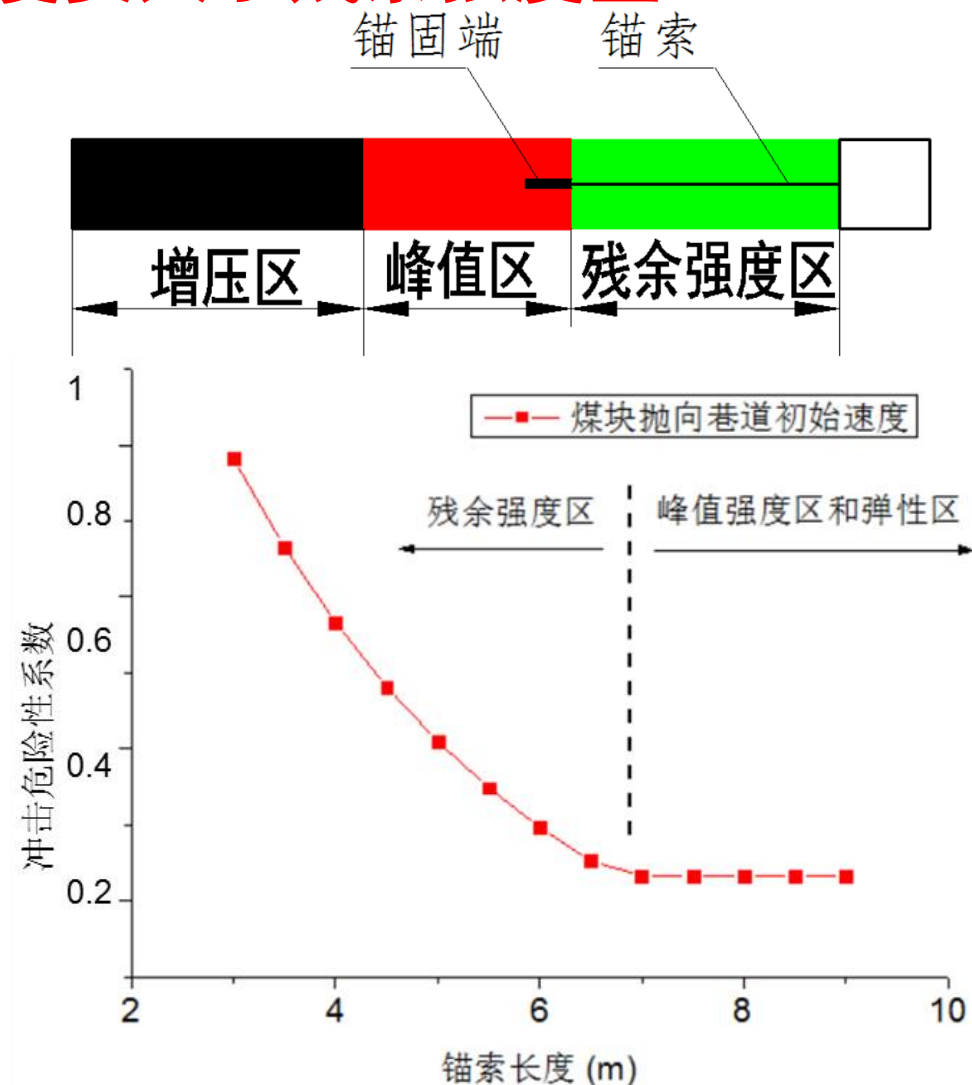
□3.7、增加巷道宽度——减小煤体对顶板的支撑力

- ▶ 巷道高度一定时，随巷道宽度的增加，冲击危险性降低。
- ▶ 通过在巷道周围形成卸压槽，也能起到降低冲击危险性的作用。



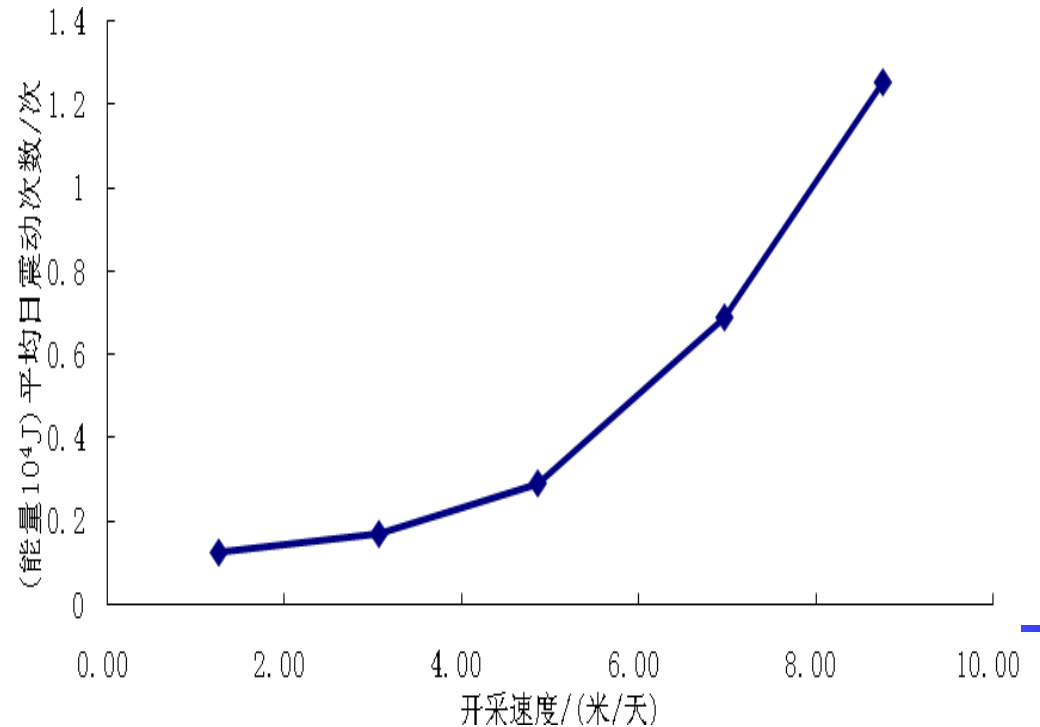
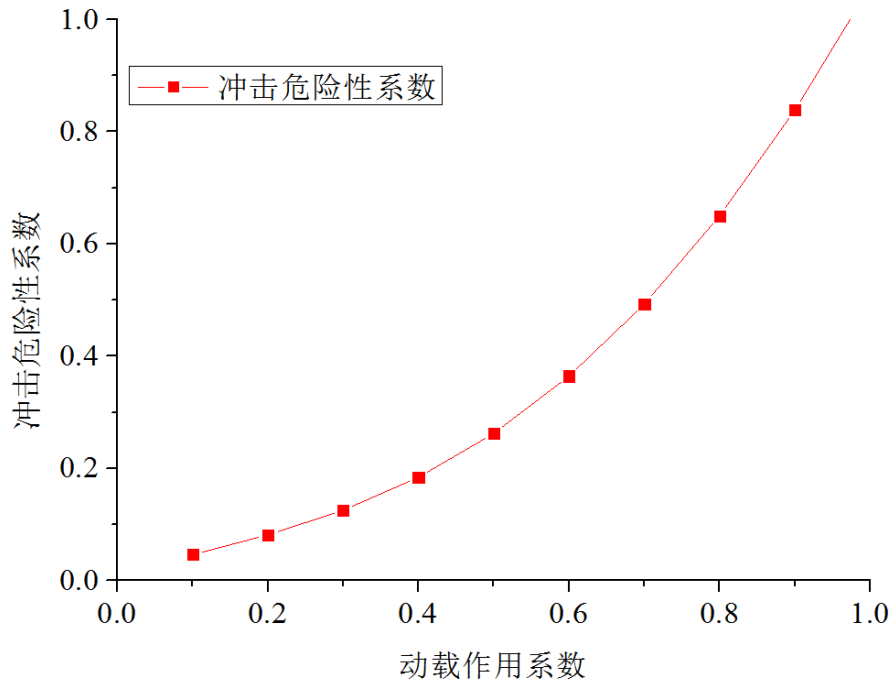
3.8、巷帮锚索支护——锚索长度要大于残余强度区

- 随锚索长度的增加，冲击危险性呈现降低；
- 当锚索长度大于残余强度区后，冲击危险性变化较小。
- 因此锚索长度需要大于残余强度区宽度，锚固端锚固在屈服区内。



□ 3.9、控制巷道掘进速度

- 动载引起的顶板突然下沉量与冲击危险性成正相关；
- 巷道推进速度与动载释放能量呈正相关；
- 控制推进速度能够有效的降低冲击危险性。



敬请指正!

谢谢!



Thanks!