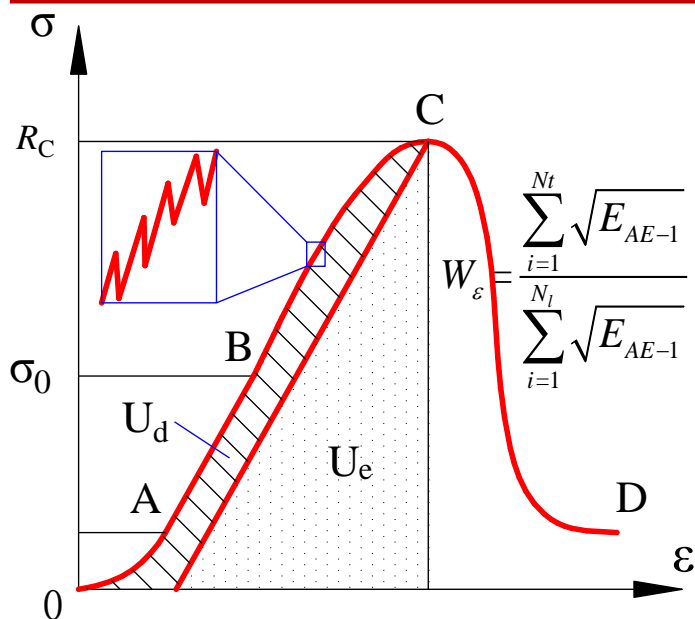




# 冲击危险监测预警的 冲击变形能指标及其应用

Bursting strain energy index and its application of coal burst



中国矿业大学  
窦林名 教授  
2016年10月15日  
<http://burst.cumt.edu.cn>



# 目 录



## □ 煤矿冲击矿压显现特征

Behavior Characteristics of Coal Burst

## □ 冲击变形能指标模型

Model Of Bursting Strain Energy Index

## □ 冲击危险监测预警实例

Case Studies of Coal Burst Monitoring and Early Warning

## □ 主要结论

Main Conclusion

# 1、煤矿冲击矿压显现特征

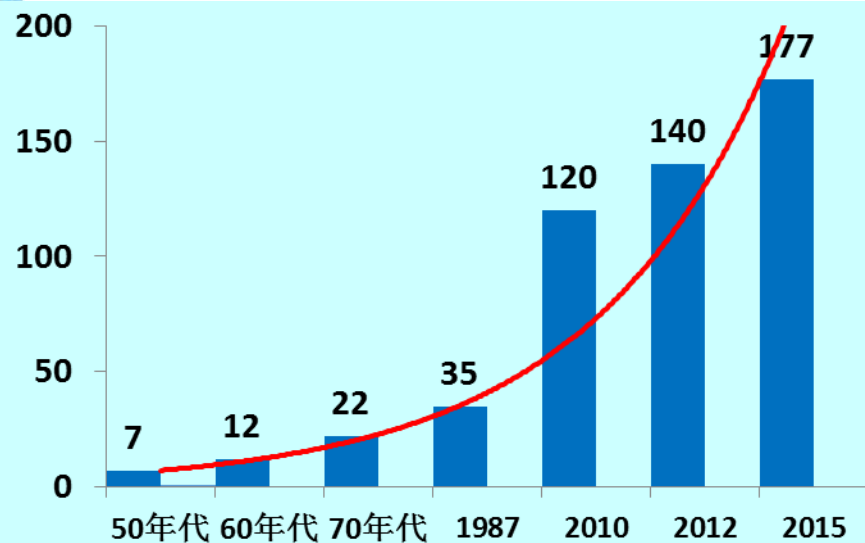
- 冲击矿压是采掘空间周围煤岩体中聚集的能量突然大量释放，快速破坏煤岩体，并产生剧烈震动，造成人员伤亡和采掘空间严重破坏的煤矿动力灾害。
- 随着开采深度和开采强度的增加，冲击矿压的强度和频度明显增加



# 1、煤矿冲击矿压显现特征



我国冲击矿压矿井分布



我国冲击矿压矿井数

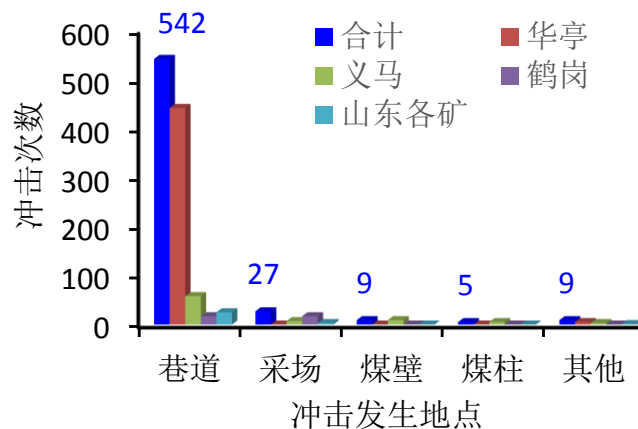
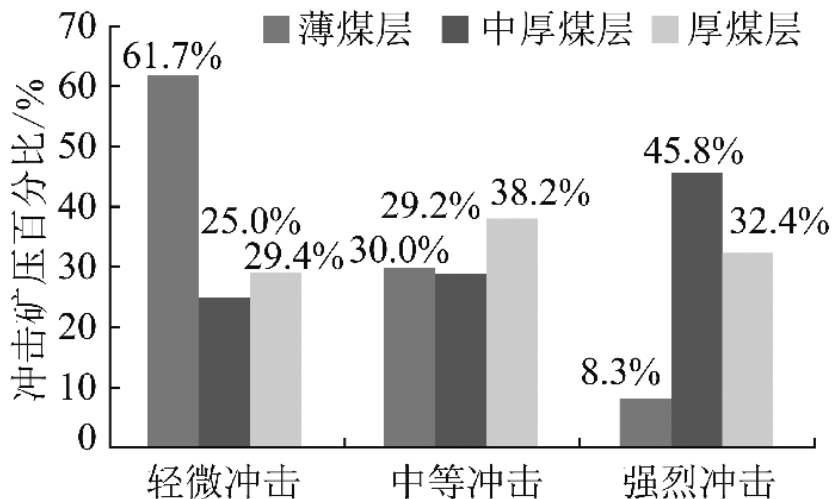
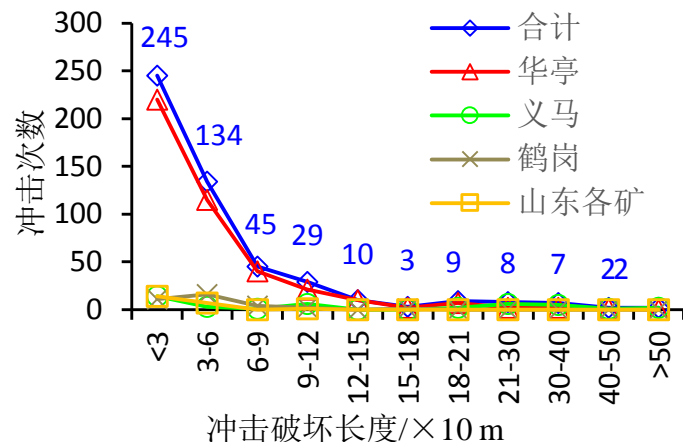
- 2015年已有177处煤矿发生过冲击矿压事故，遍布各大采煤矿区！
- 冲击矿压已成为制约煤矿安全高效生产的主要灾害之一。



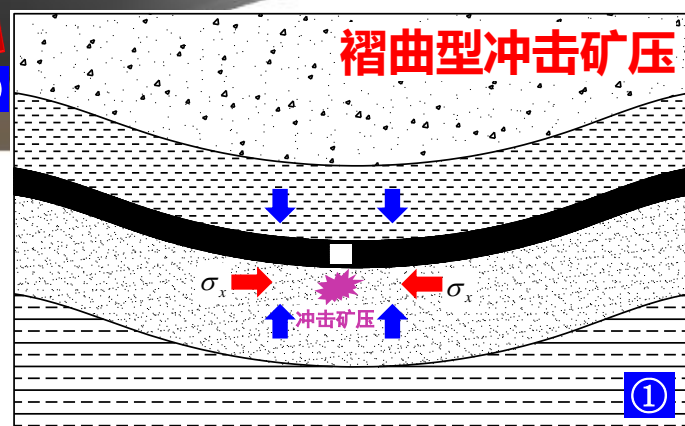
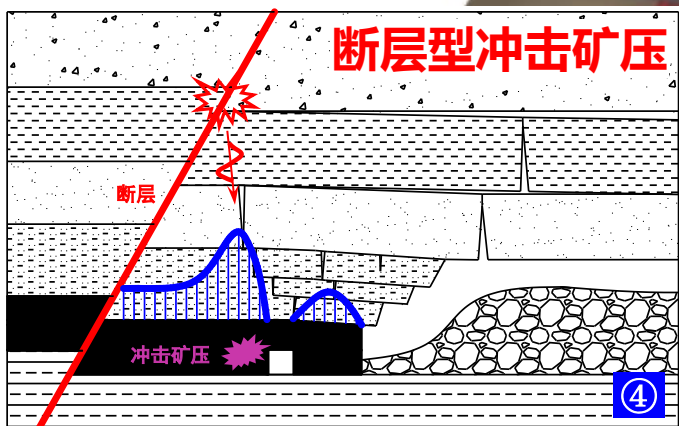
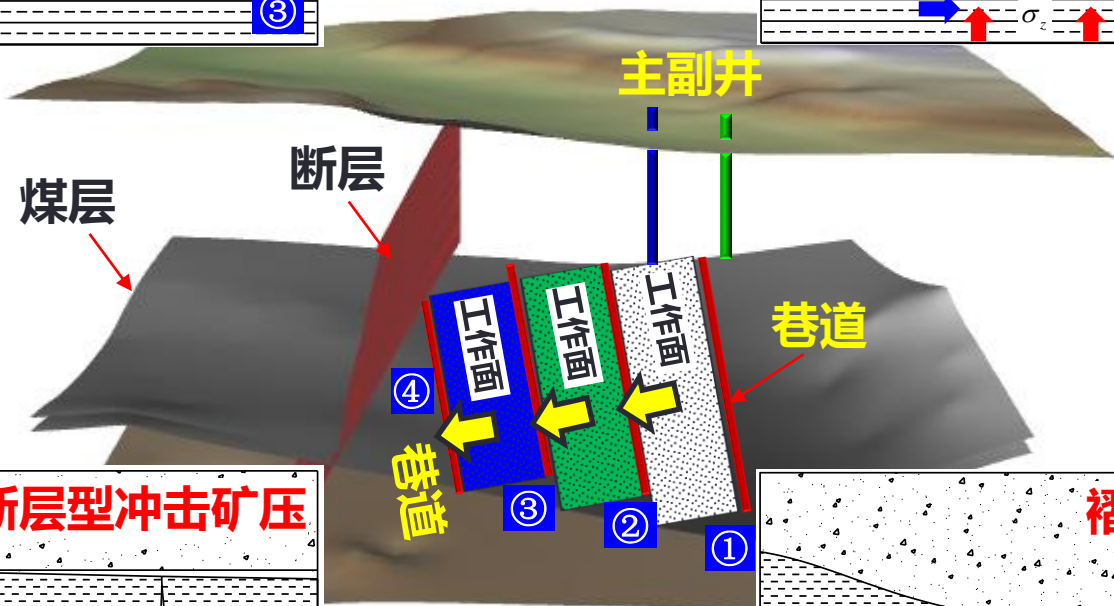
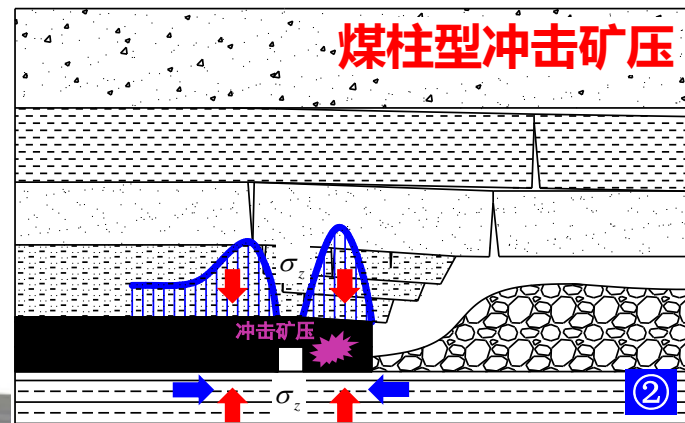
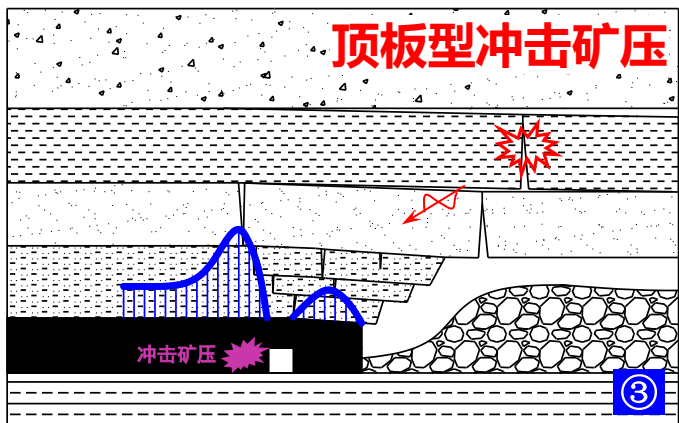
# 1、煤矿冲击矿压显现特征



- 显现特征：突发性、瞬时震动性、巨大破坏性
- 条件复杂：各采煤方法、煤层厚度 **0.6~37.5 m**
- 差异显著：**位置、范围、程度**
- **厚煤层开采以综放为主**
- 冲击频次高、致灾程度严重
- 08年来700余次冲击，综放500余次



# ● 冲击矿压类型





# 目 录



## □ 煤矿冲击矿压显现特征

Behavior Characteristics of Coal Burst

## □ 冲击变形能指标模型

Model Of Bursting Strain Energy Index

## □ 冲击危险监测预警实例

Case Studies of Coal Burst Monitoring and Early Warning

## □ 主要结论

Main Conclusion



# 目 录



## 二、冲击变形能指标模型



- 煤矿冲击矿压机理
- 煤岩破坏及变形能
- 冲击变形能指标模型



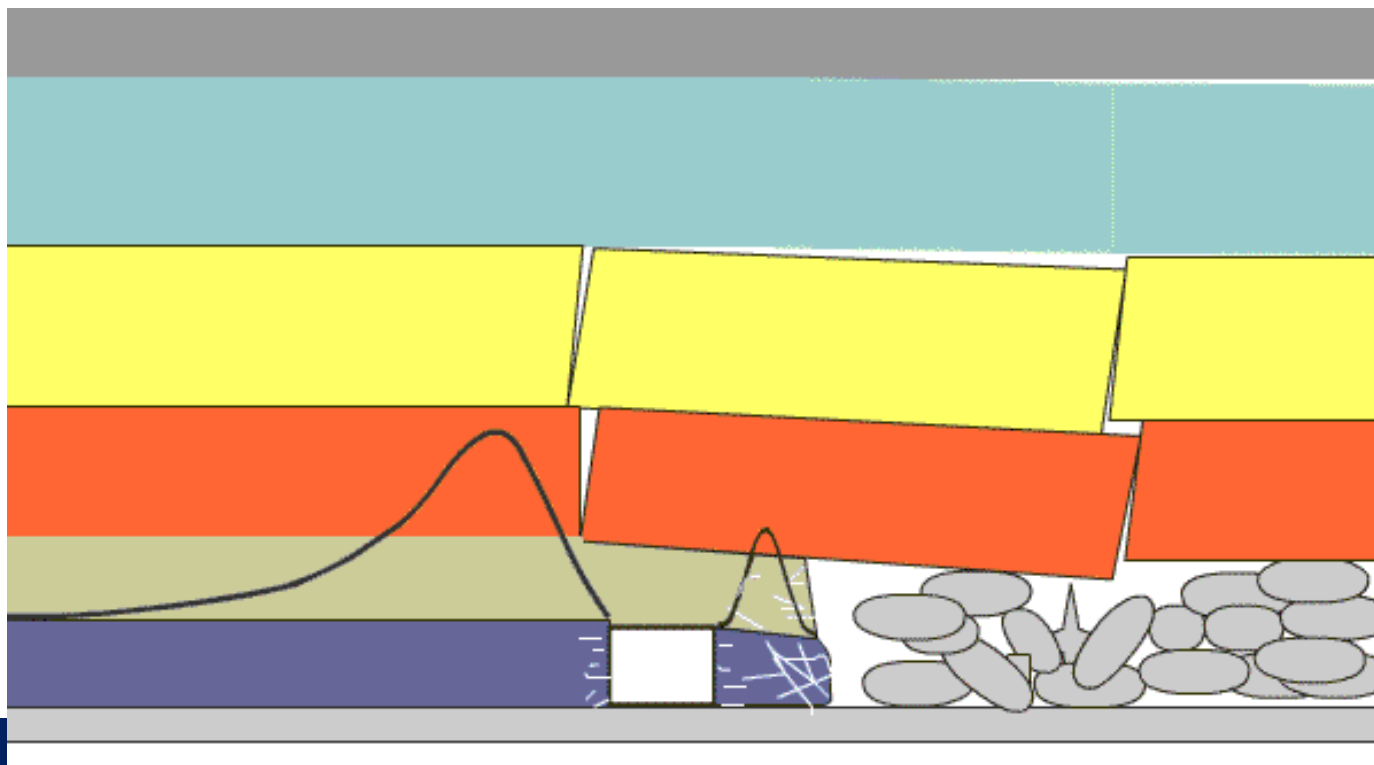
□ 冲击矿压——煤岩体内动静载叠加诱发的结果

➤ 静载+动载 → 诱发冲击

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

$\sigma_j$  —静应力  
 $\sigma_d$  —冲击应力波  
 $\sigma_{bmin}$  —临界应力

应力条件





## 2.1、冲击矿压机理——量变→质变



### □ 煤矿动静载——单位时间的应变率

- 煤岩动力学实验：应变率大于 $10^{-3}/s$ 时，煤岩破坏与应变率具有较强的相关性；
- 煤矿矿震动载：震源载荷应变率在 $10^{-3} \sim 10^{-1}s^{-1}$ 级之间。

应变率/ $s^{-1}$	载荷状态	载荷变化率/(MPa/s)	应力变化规律
$<10^{-5}$	静载	$<0.1$	基准载荷
$10^{-5} \sim 10^{-3}$	应力扰动	$0.1 \sim 10$	应力扰动
$>10^{-3}$	动载	$>10$	动态变化

煤矿动载特征：强度波动性、方向随机性、载荷不均匀性、快速衰减性、作用短暂性。

## 冲击矿压——煤岩体内能量聚集与释放的结果

### ➤ 能量条件

$$\frac{dU_R}{dt} + \frac{dU_C}{dt} + \frac{dU_S}{dt} > \frac{dU_B}{dt}$$

$U_R$  - 围岩中储存的能量

$U_C$  - 煤体中储存的能量

$U_S$  - 矿震能量

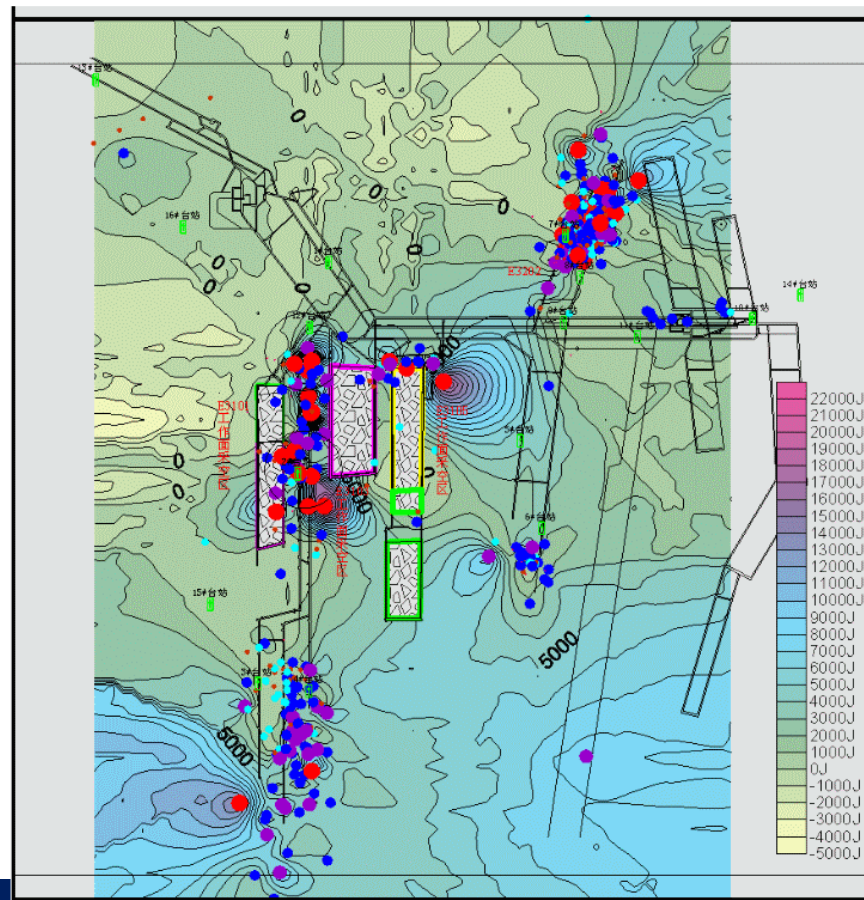
$U_B$  - 冲击时消耗的能量

### ➤ 能量与应力

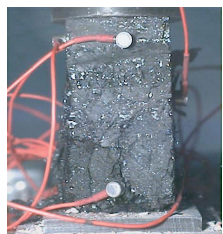
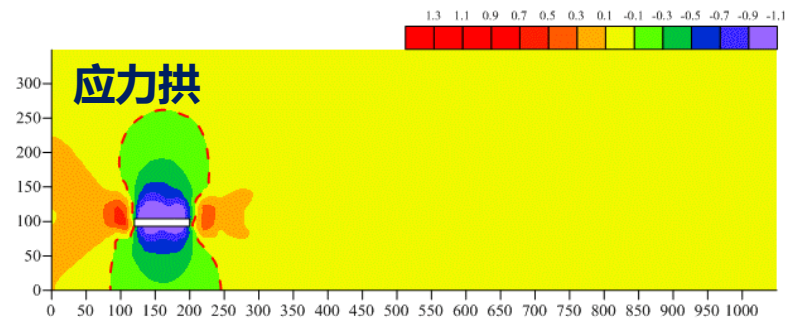
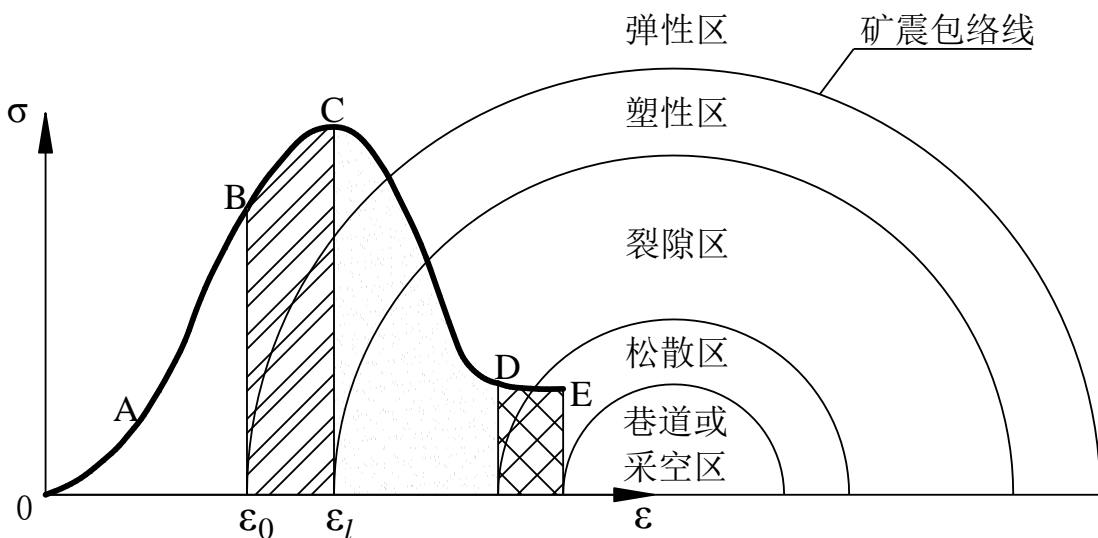
$$U = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)}{2E}$$

$$U_{b\min} = \frac{\sigma_{b\min}^2}{2E}$$

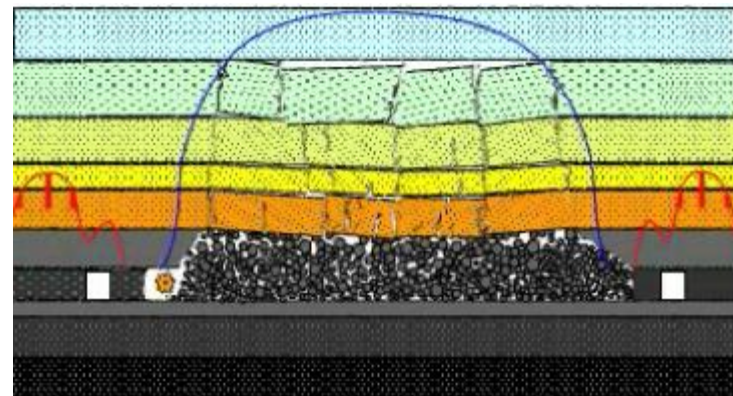
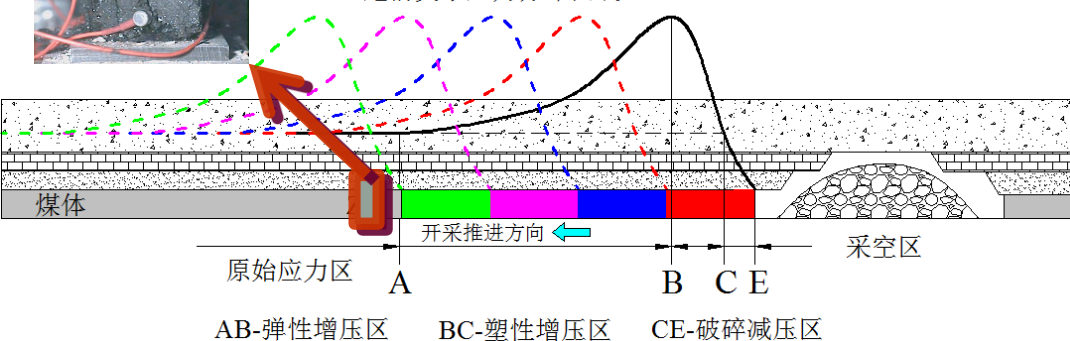
## 星村煤矿能量分布



## 冲击矿压——煤岩体的微破裂、宏观破裂、冲击破坏



超前支承压分布曲线

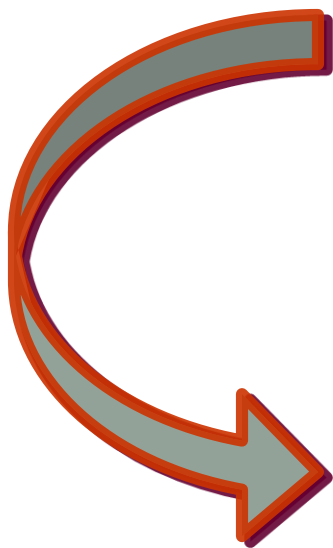




# 目 录



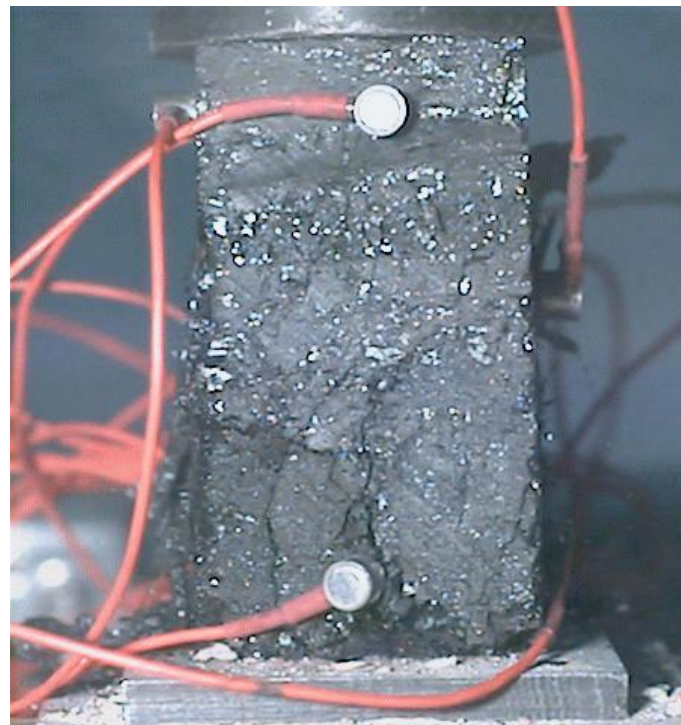
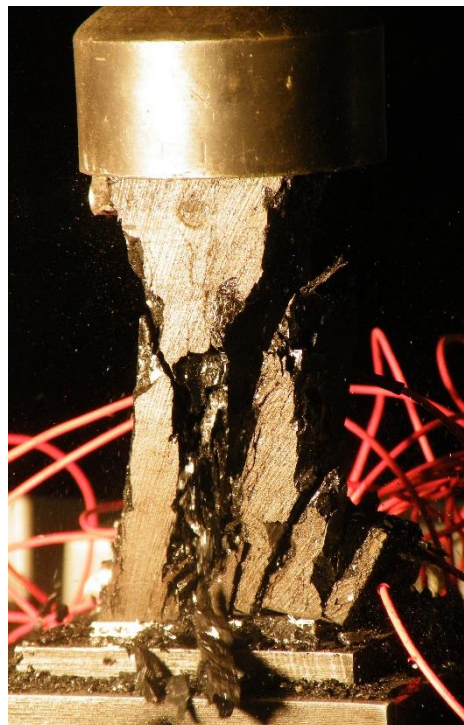
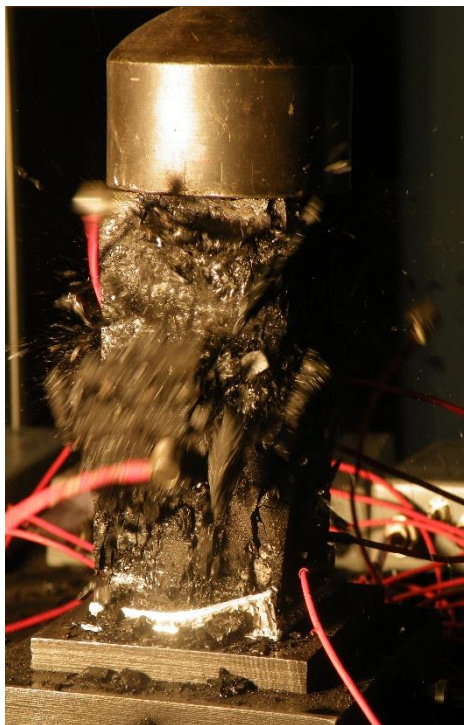
## 二、冲击变形能指标模型



- 煤矿冲击矿压机理
- 煤岩破坏及变形能
- 冲击变形能指标模型

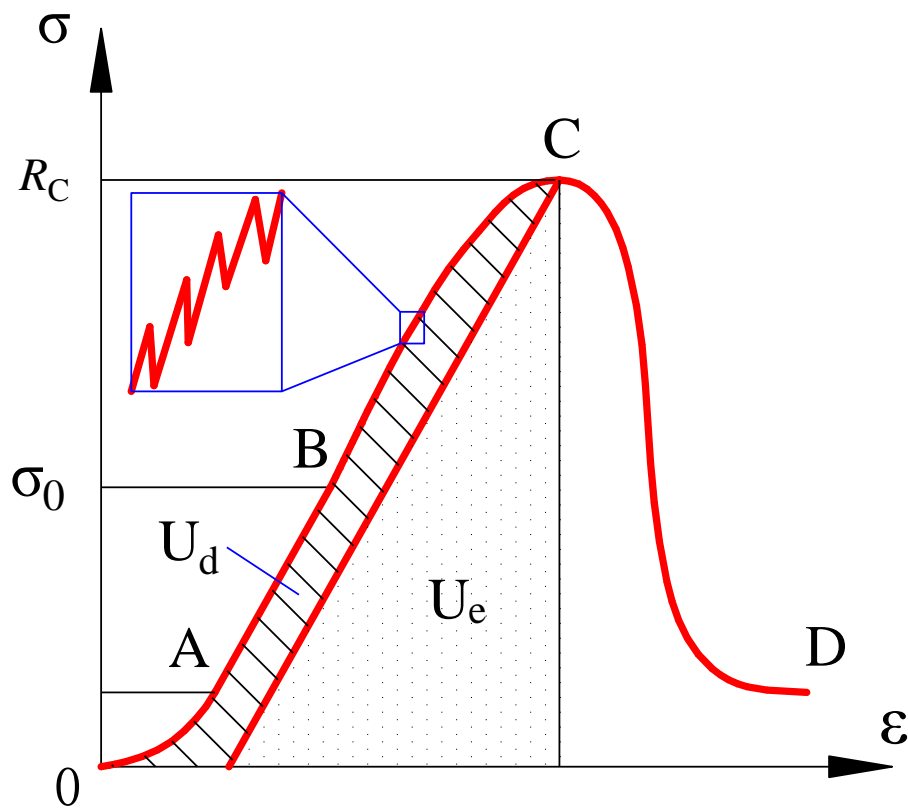
## □煤岩冲击破坏特征

- 煤岩试样整体摧毁
- 煤岩碎块弹射抛出



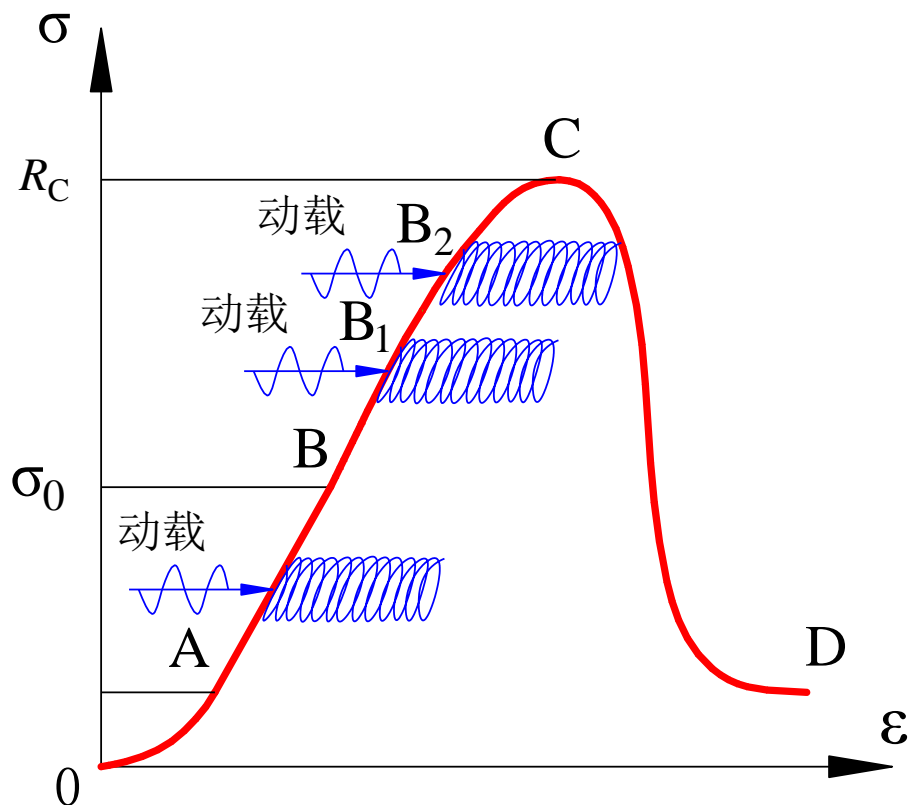
## 煤岩受载破坏前应力特征-静载作用

- 0A—压密阶段
- AB—线性弹性阶段
- BC—塑性应变软化阶段
- CD—冲击破坏残余阶段
- BC阶段应变软化——**应力降作用**
- BC应变软化阶段的**耗散能 $U_d$** 与微破裂产生声发射释放的能量一致



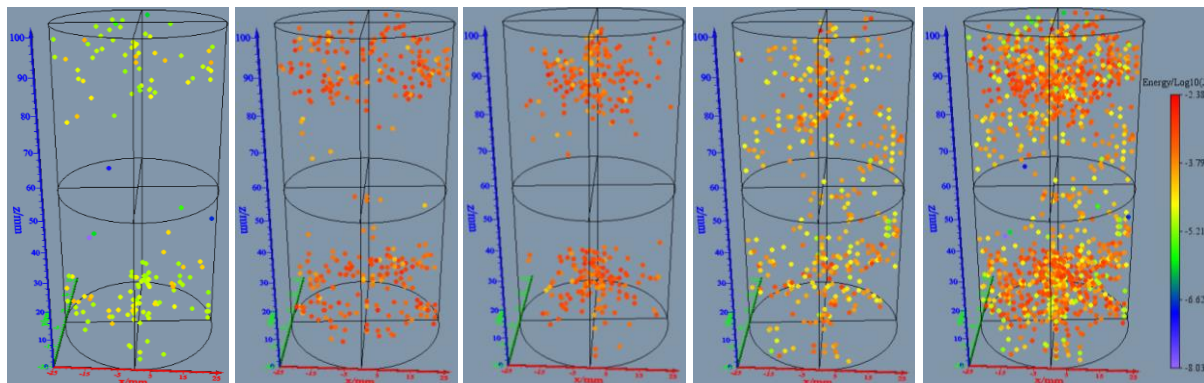
## 煤岩受载破坏前应力特征-动载叠加作用

- 动载→循环加卸载
- 岩石的非均质性→每次加卸载留下一段永久变形
- 高应力水平下叠加动载，永久变形短时间内发展到破坏阶段，如 $B_2$ 点。
- 低应力水平下叠加动载，需较长一段时间或更大的动载才能发生破坏，如A点。



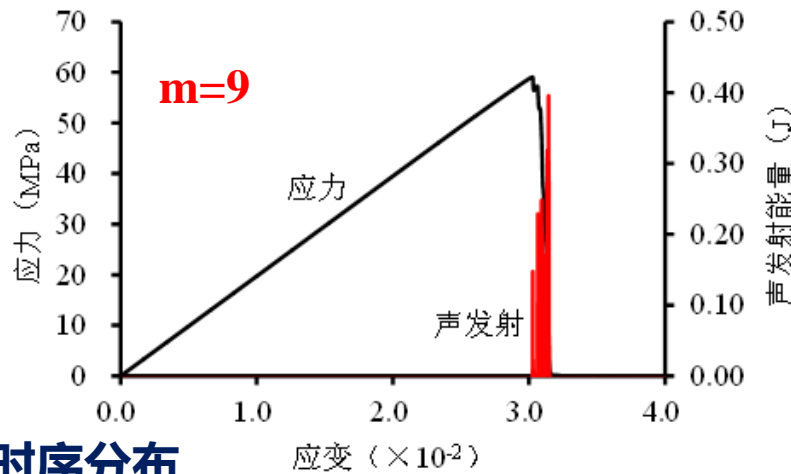
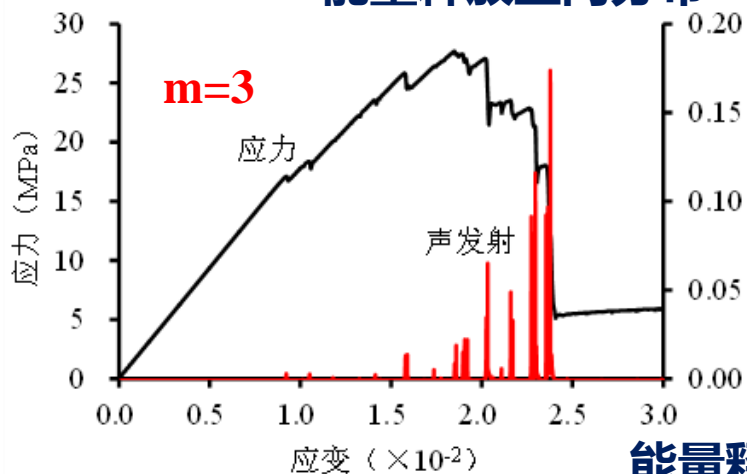


## 煤岩受载破坏前声发射特征



能量释放位置由  
试样两端向中间  
扩展、至贯通。

能量释放空间分布



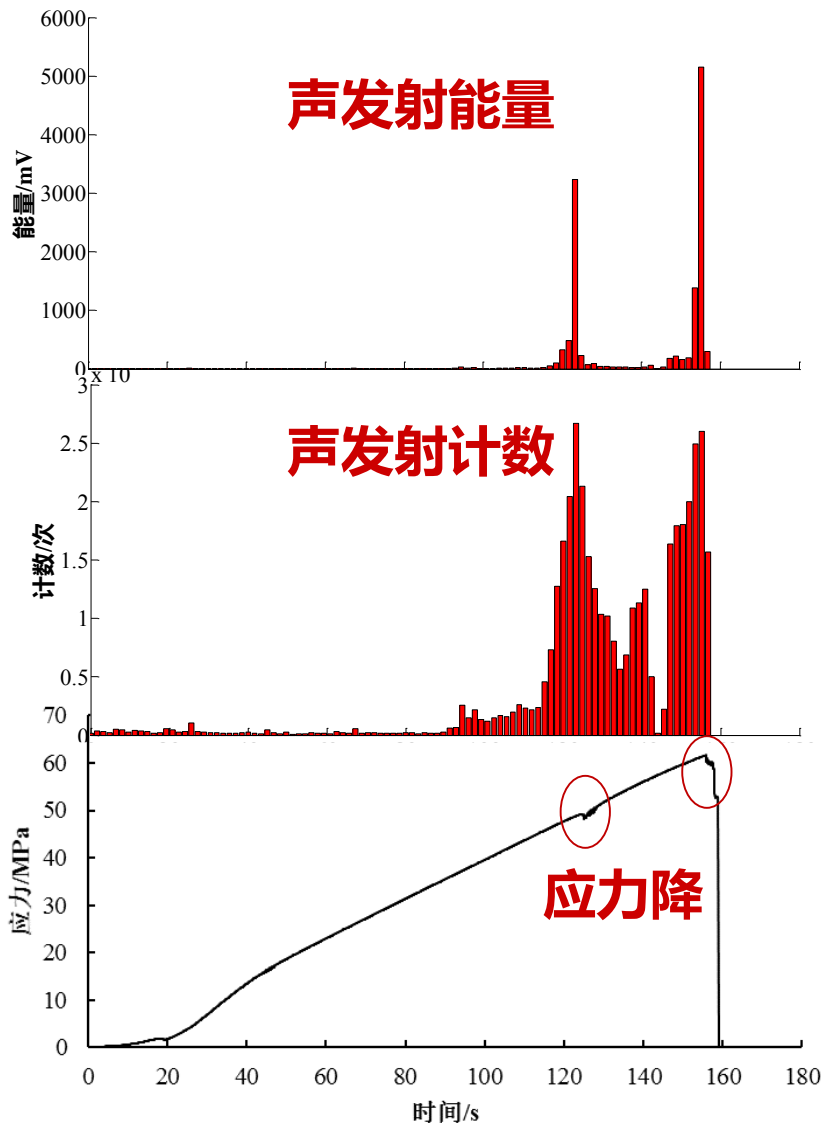
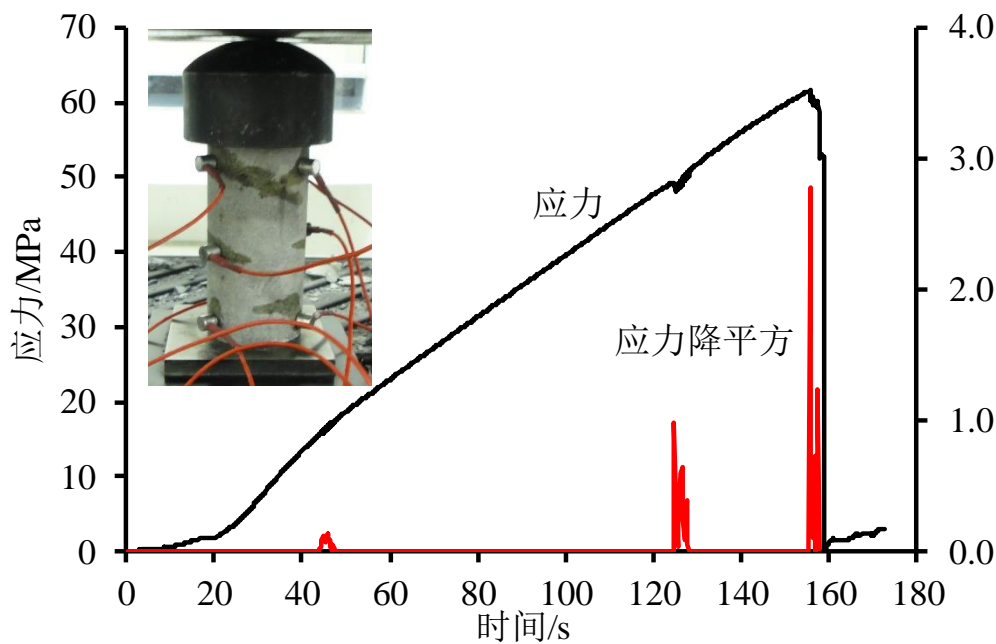
能量释放时序分布

非均质材料，即均质度越低（ $m$ 值越小），能量释放产生的前兆信息越多。

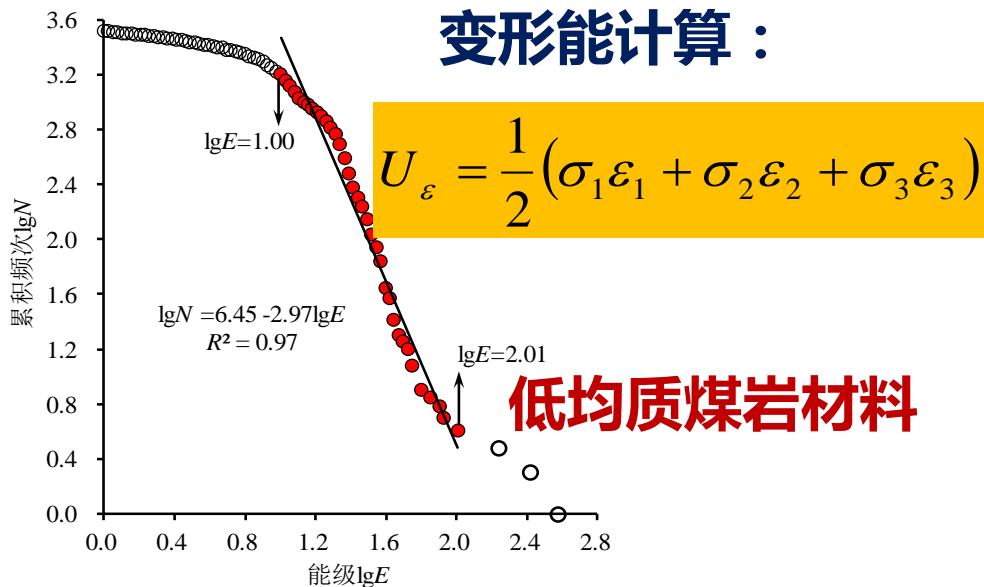
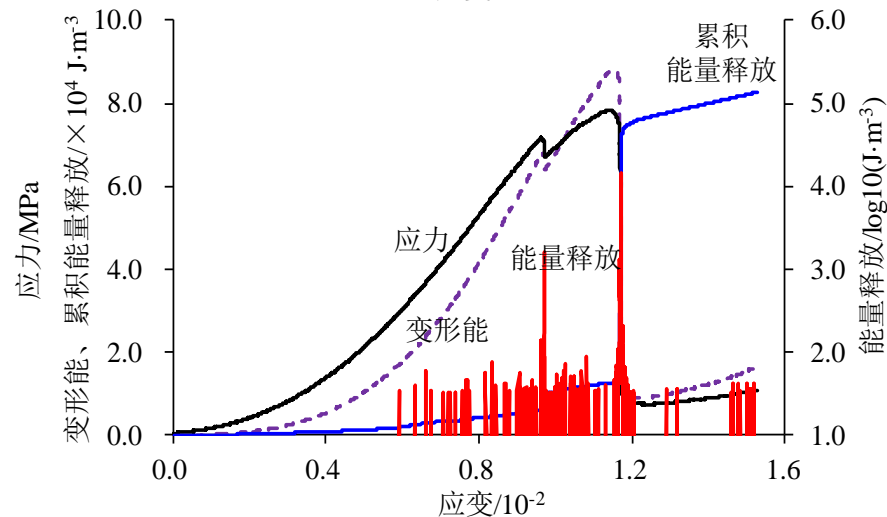
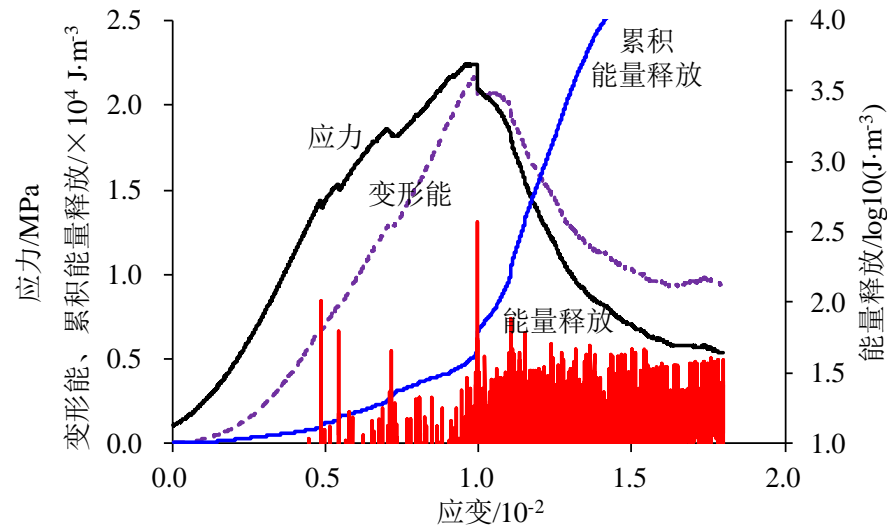
## 煤岩受载破坏的应力降特征

- 声发射能量与应力降的平方存在很好的一致性

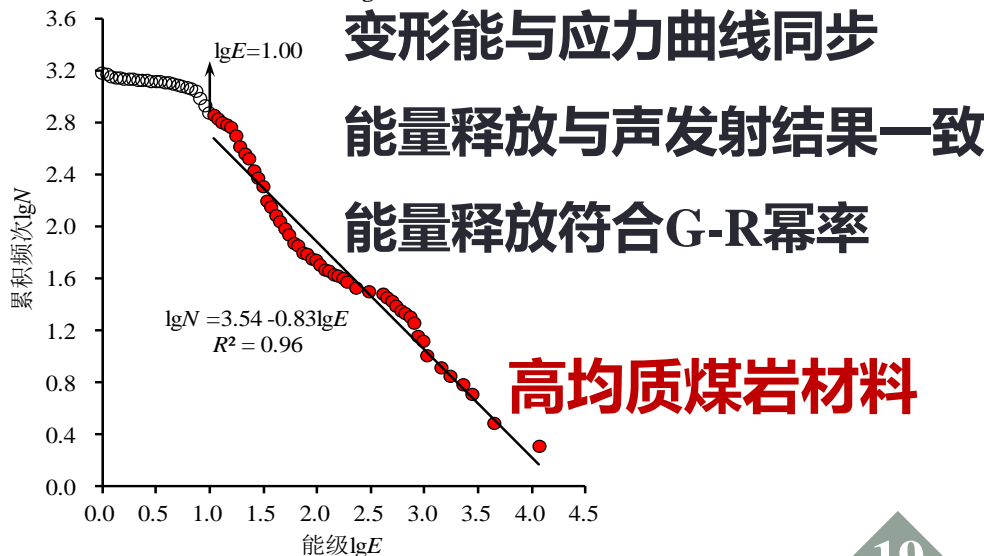
$$U_{AE} \propto \Delta\sigma^2$$



## 煤岩受载破坏的变形能特征



低均质煤岩材料



高均质煤岩材料

变形能计算：

$$U_{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3)$$

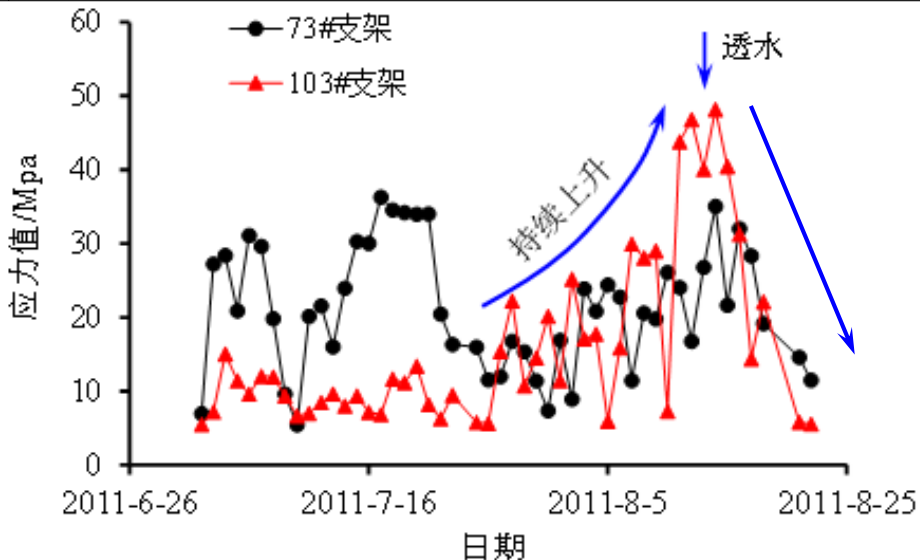
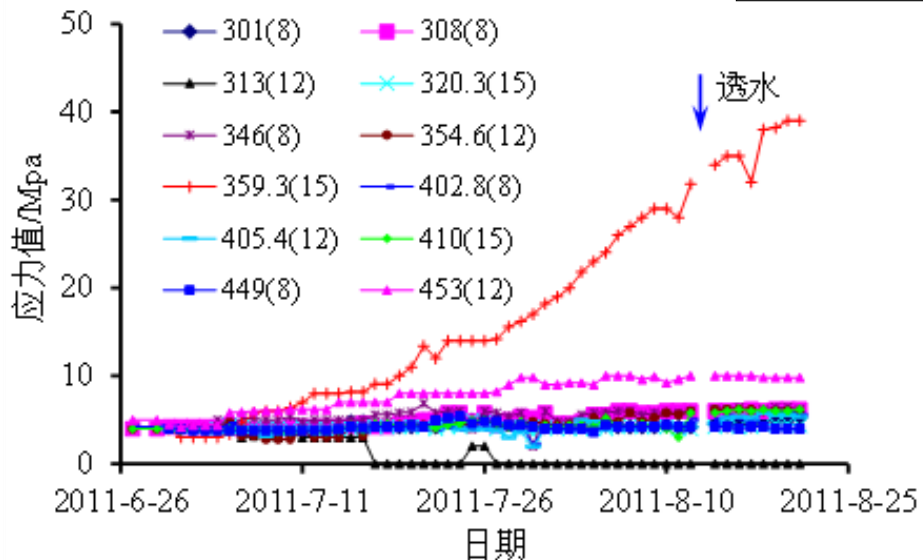
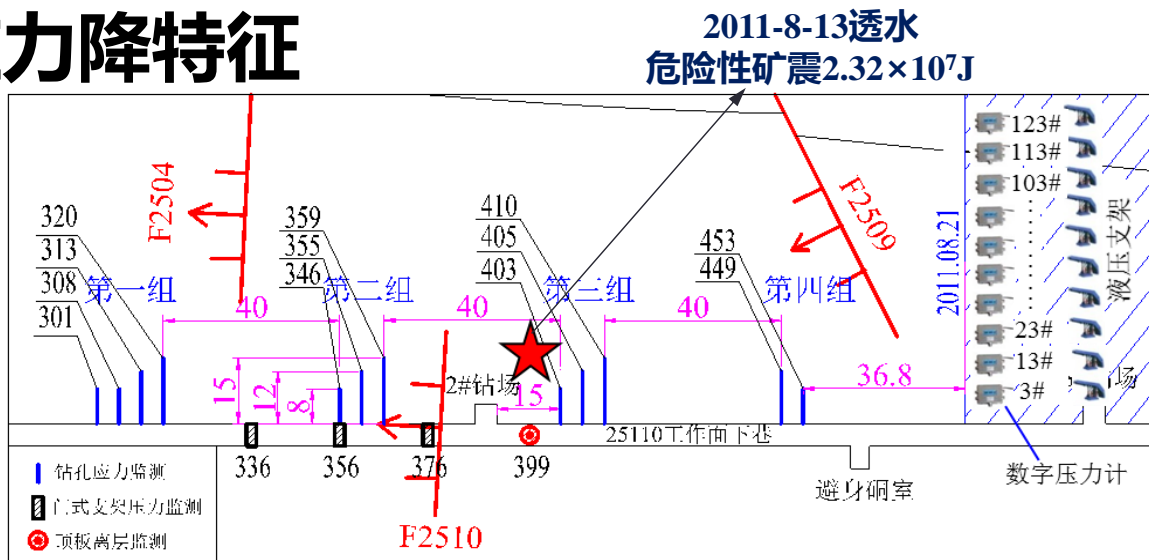
变形能与应力曲线同步

能量释放与声发射结果一致

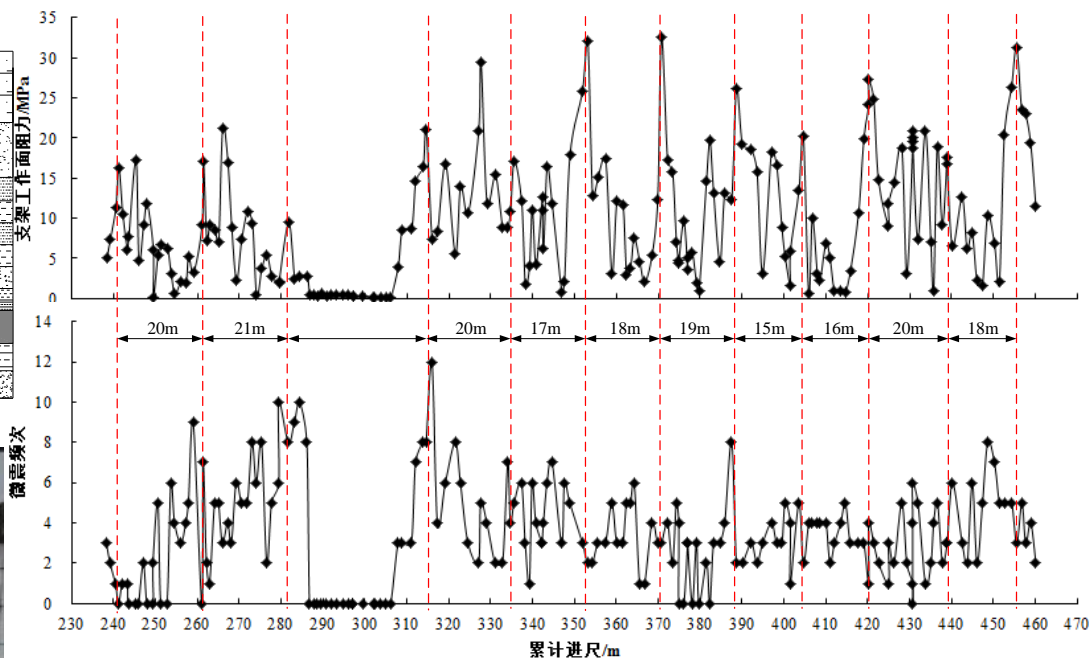
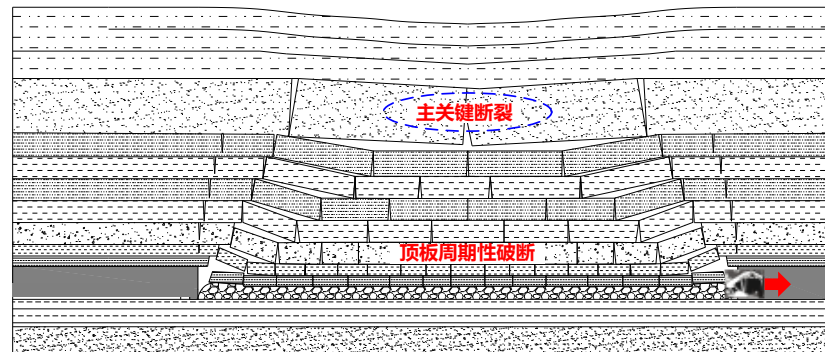
能量释放符合G-R幂率

## 现场冲击矿压的应力降特征

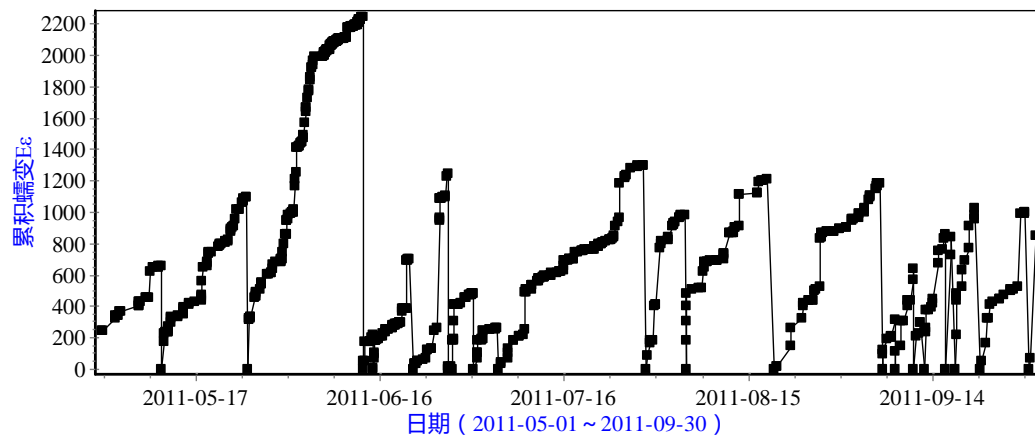
➤ 冲击之前，钻孔应力、支架压力产生明显的应力降。



# 2.2、煤岩受载破坏与变形能特征



归零蠕变分析 (能量释放阈值为1000000J)

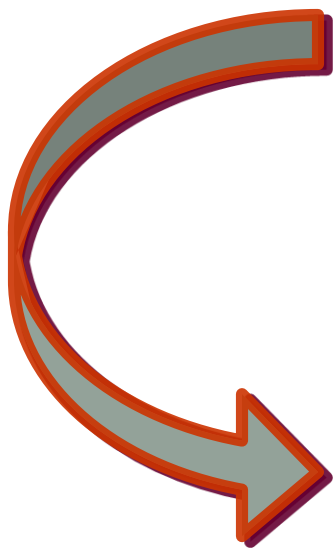




# 目 录

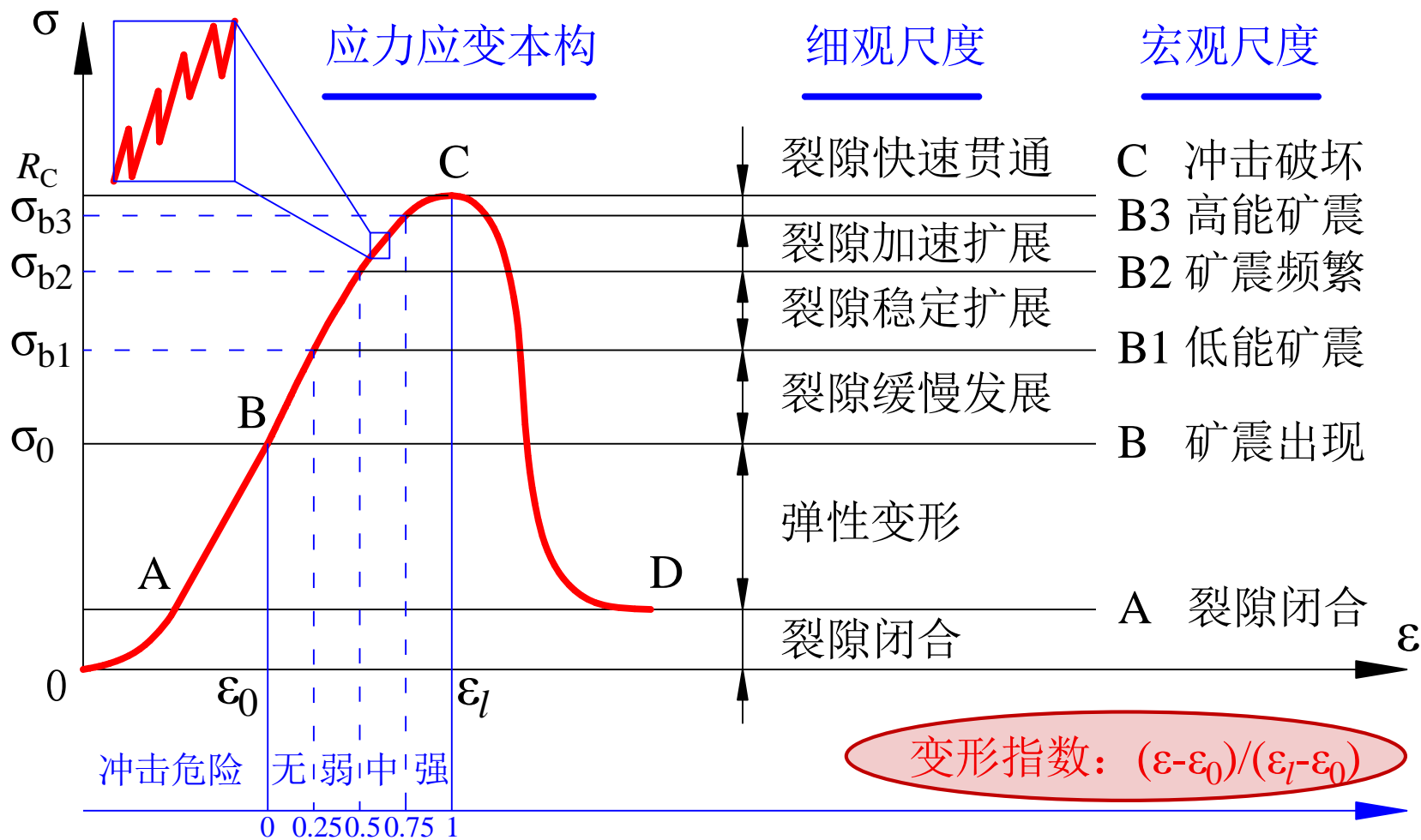


## 二、冲击变形能指标模型



- 煤矿冲击矿压机理
- 煤岩破坏及变形能
- 冲击变形能指标模型

# 2.3、冲击变形能模型及指标



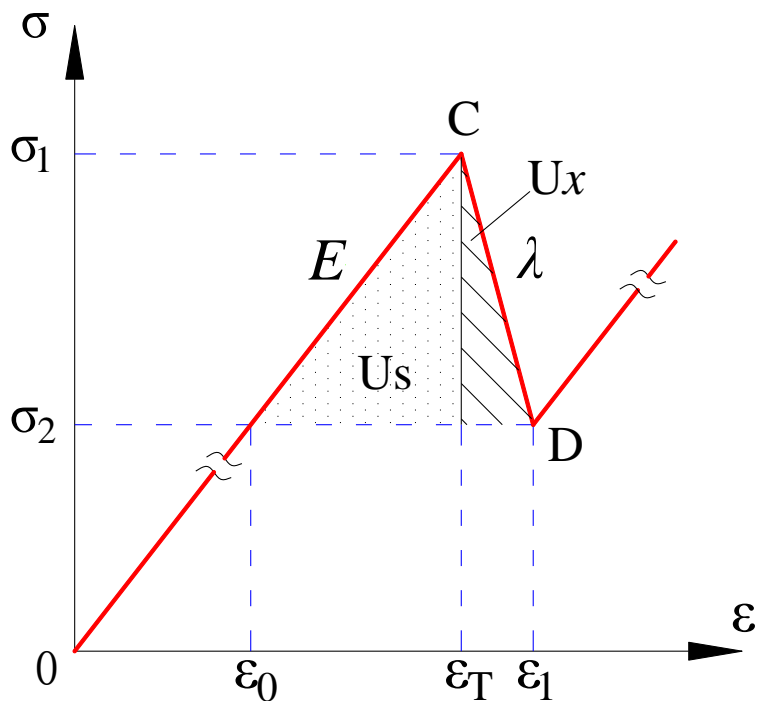
## 冲击变形能指标—时序构建

➤ 将每次应力降简化为线性应力应变本构，释放能量为

$$E_{AE} = U_s - U_x = \frac{\lambda - E}{2\lambda E} (\sigma_1 - \sigma_2)^2 = \frac{\lambda E (\lambda - E)}{2(\lambda + E)^2} (\varepsilon_1 - \varepsilon_0)^2$$

$E$ —弹性模量  
 $\lambda$ —降模量

### ➤ 冲击变形能指标构建



$$W_\varepsilon = \frac{(\varepsilon - \varepsilon_{Nt-1}) + (\varepsilon_{Nt-1} - \varepsilon_{Nt-2}) + \dots + (\varepsilon_1 - \varepsilon_0)}{(\varepsilon - \varepsilon_{Nl-1}) + (\varepsilon_{Nl-1} - \varepsilon_{Nl-2}) + \dots + (\varepsilon_1 - \varepsilon_0)}$$

$$= \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_l - \varepsilon_0} = \frac{\varepsilon_{Et} - \varepsilon_{E0}}{\varepsilon_{El} - \varepsilon_{E0}} = \frac{\sum_{i=1}^{Nt} \sqrt{E_{AE-i}}}{\sum_{i=1}^{Nl} \sqrt{E_{AE-i}}}$$

### ➤ 卸压识别：

$$\begin{cases} \sum E_{i-2} > \sum E_{i-1} > \sum E_i \\ E_{\max} > E_b \end{cases}$$



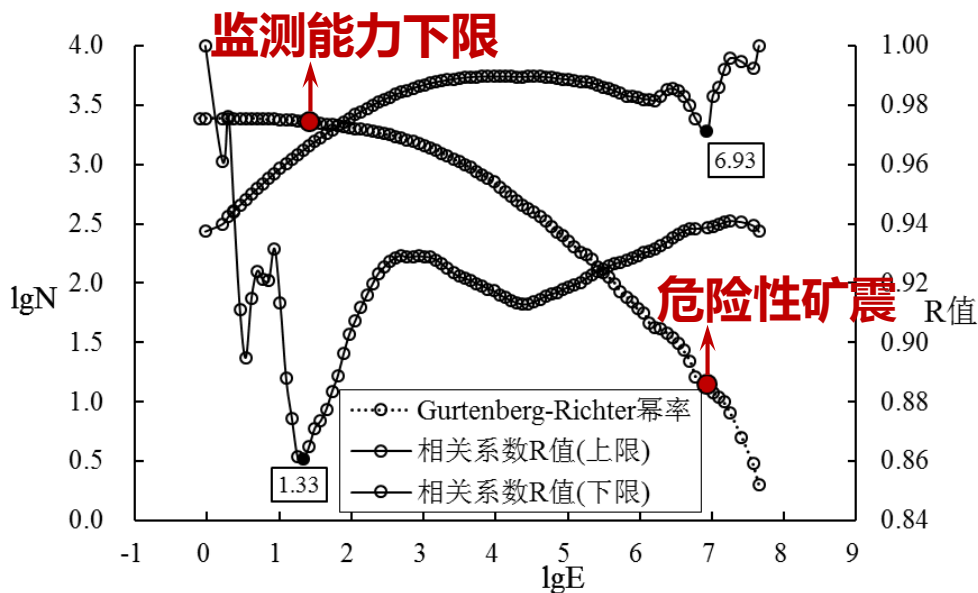
## 冲击变形能时序参数说明

**定义说明：**采用**应变参量**描述**冲击危险**，应变由**矿震能量**换算。

**应变初始值  $\varepsilon_{E0}$ ：**监测尺度下声震现象出现点或**监测能力下限**对应的应变值。

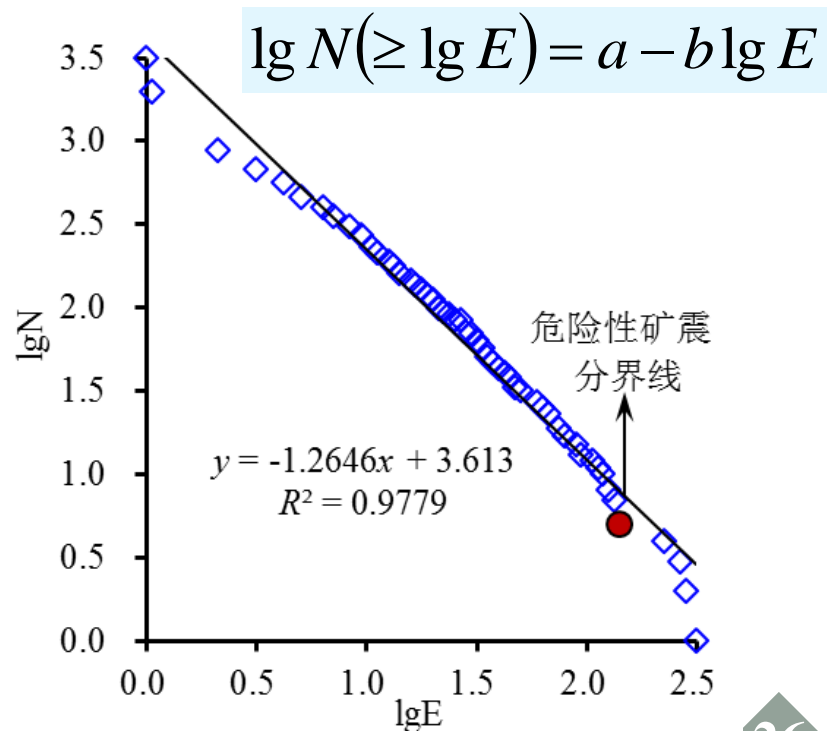
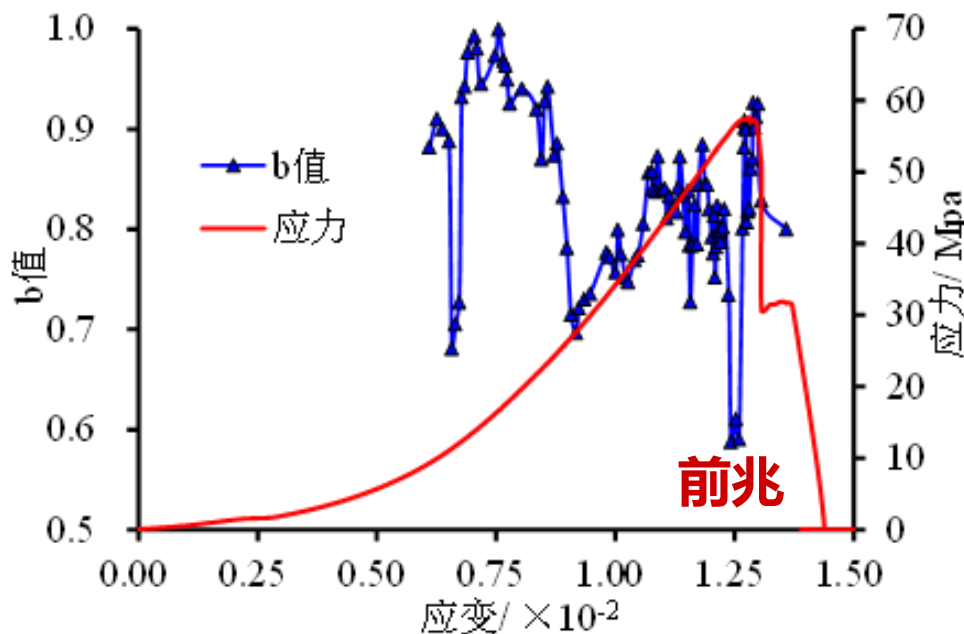
**应变临界值  $\varepsilon_{EI}$ ：**一般按**75%能效训练**预测已发生的**危险性矿震**获得。

**矿震背景值  $E_b$ ：**取所有小于危险性矿震的矿震数据的平均值。



## 危险性矿震的表征参量

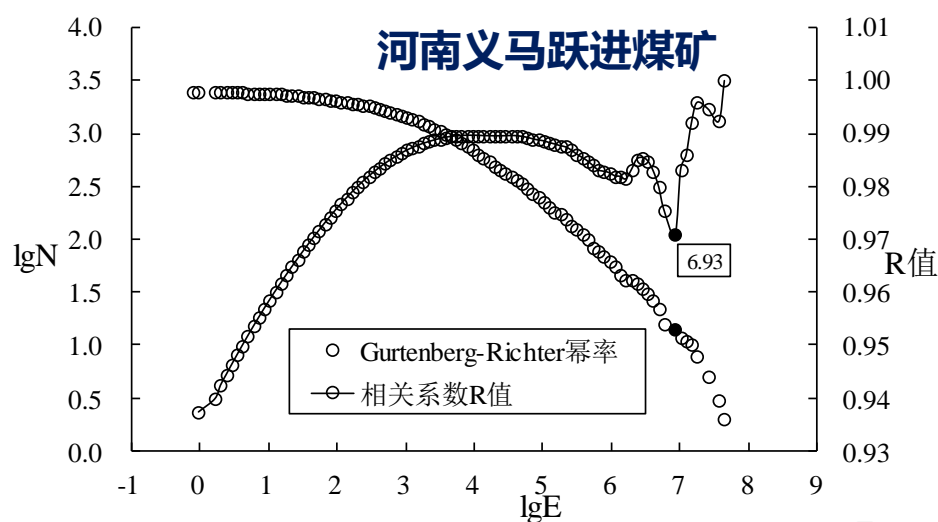
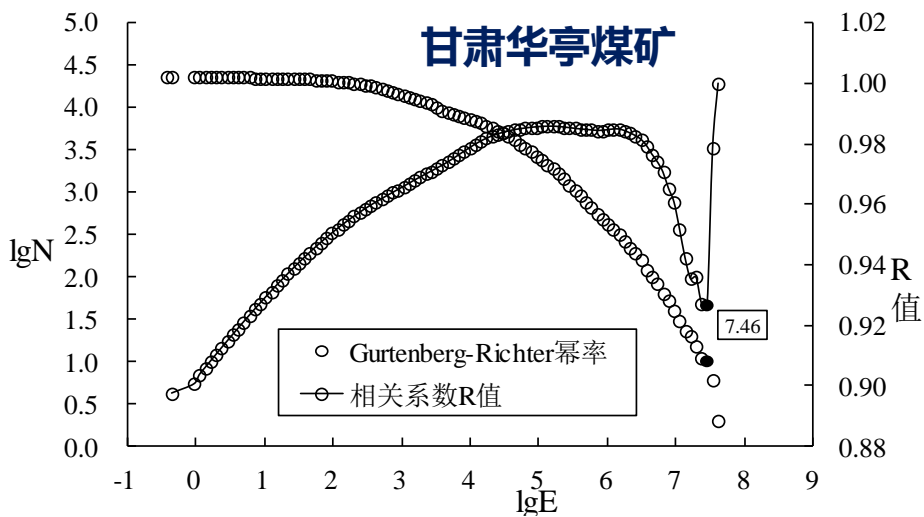
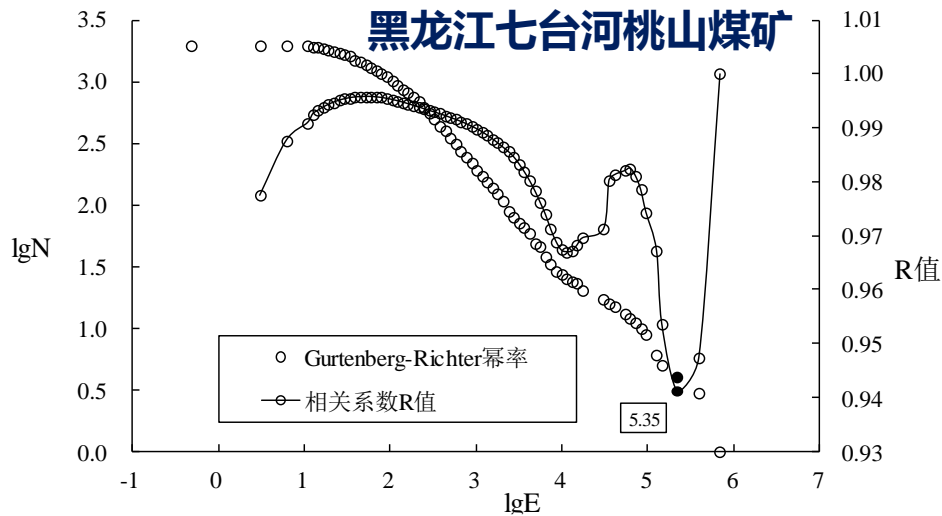
根据地震、矿震及声发射的Gurtenberg-Richter幂率，高能量（震级）端存在偏离幂率的现象，以拐点作为危险性矿震的分界线，可以很好揭示危险性矿震发生的前兆信息。



# 2.3、冲击变形能模型及指标

## 危险性矿震的识别模型

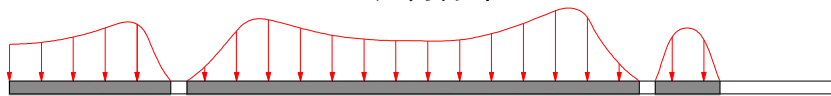
$$R_i = \frac{\sum_{j=i-1}^n (x_j - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{j=i-1}^n (x_j - \bar{x})^2 \sum_{j=i-1}^n (y_j - \bar{y})^2}}$$



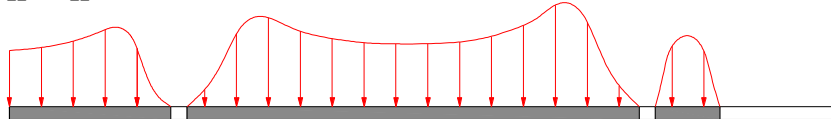
## 冲击变形能指标—空间构建

考虑定位误差概率模型：
$$S_g(q) = \frac{1}{T} \sum g_i \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(\frac{-d_i^2}{2\sigma^2}\right)$$

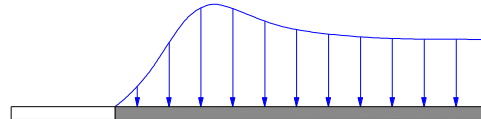
I—I' 垂直应力分布



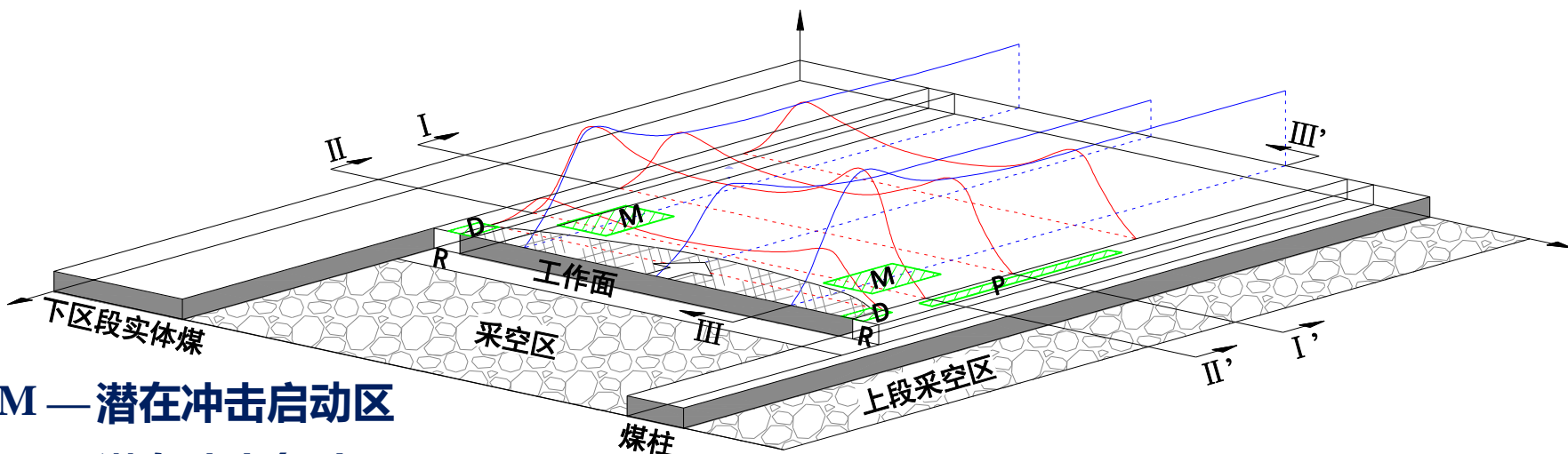
II—II'



III—III'



考虑空间统计滑移模型：
$$\varepsilon_E = \lg\left(\frac{\sum \sqrt{E_i}}{ST}\right)$$



M — 潜在冲击启动区

P — 潜在冲击危险区

## 冲击变形能空间参数

### 考虑定位误差概率模型参数：

概率密度云图

定位误差/m: 30

网格间距/m: 10

参数:

- 能量
- 频次
- 冲击变形能

引入定位误差仿真模型

概率密度云图

37579390.58	3840613.75	-420.00	35.8497
37579400.27	3840613.75	-420.00	27.1340
37579409.96	3840613.75	-420.00	26.5946
37579419.65	3840613.75	-420.00	26.7656
37579429.34	3840613.75	-420.00	25.4547
37579439.03	3840613.75	-420.00	23.3814
37579448.72	3840613.75	-420.00	26.0822
37579458.41	3840613.75	-420.00	22.8266
37579468.10	3840613.75	-420.00	22.4772
37579477.79	3840613.75	-420.00	22.9929
37579487.48	3840613.75	-420.00	23.4764
37579497.18	3840613.75	-420.00	21.6754
37579506.87	3840613.75	-420.00	21.4633
37579516.56	3840613.75	-420.00	21.3363
37579526.25	3840613.75	-420.00	20.0268
37579535.94	3840613.75	-420.00	20.2749

### 考虑空间统计滑移模型：

冲击变形能等值线云图

计算参数:

- 冲击变形能密度
- 平均冲击变形能
- 微震活动性密度
- 冲击变形能速率
- 最大冲击变形能
- 微震能量密度

引入高斯光滑模型

启用三维统计模式

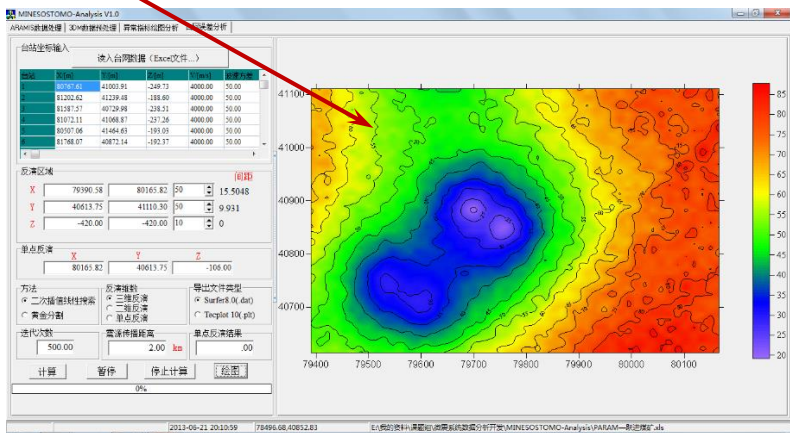
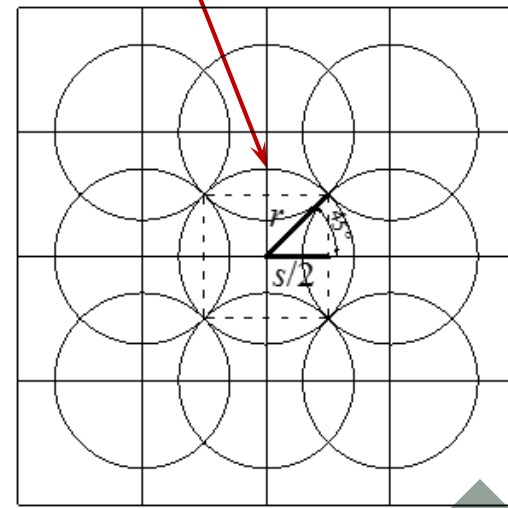
执行

二维统计参数:

- 网格划分间距/m: 28
- 统计滑移半径/m: 20

三维统计参数:

- 网格划分间距/m: 28
- 椭球平面半径/m: 20
- 椭球垂向半径/m: 50





## 2.3、冲击变形能模型及指标



### 冲击变形能判别冲击危险的指标值

$$W_{\varepsilon} = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} \sqrt{E_{AE-1}}}{\sum_{i=1}^{N_l} \sqrt{E_{AE-1}}}$$

危险等级	危险状态	危险指数 $W_{\varepsilon}$	防治对策
A	无危险	<0.25	所有的采掘工作可正常进行。
B	弱危险	0.25~0.5	加强冲击动力危险的监测预报。
C	中等危险	0.5~0.75	采取强度弱化减冲治理措施
D	强危险	>0.75	停止采掘作业，人员撤离，采取治理措施。经检验危险消除后，方可作业。



# 目 录



## □ 煤矿冲击矿压显现特征

Behavior Characteristics of Coal Burst

## □ 冲击变形能指标模型

Model Of Bursting Strain Energy Index

## □ 冲击危险监测预警实例

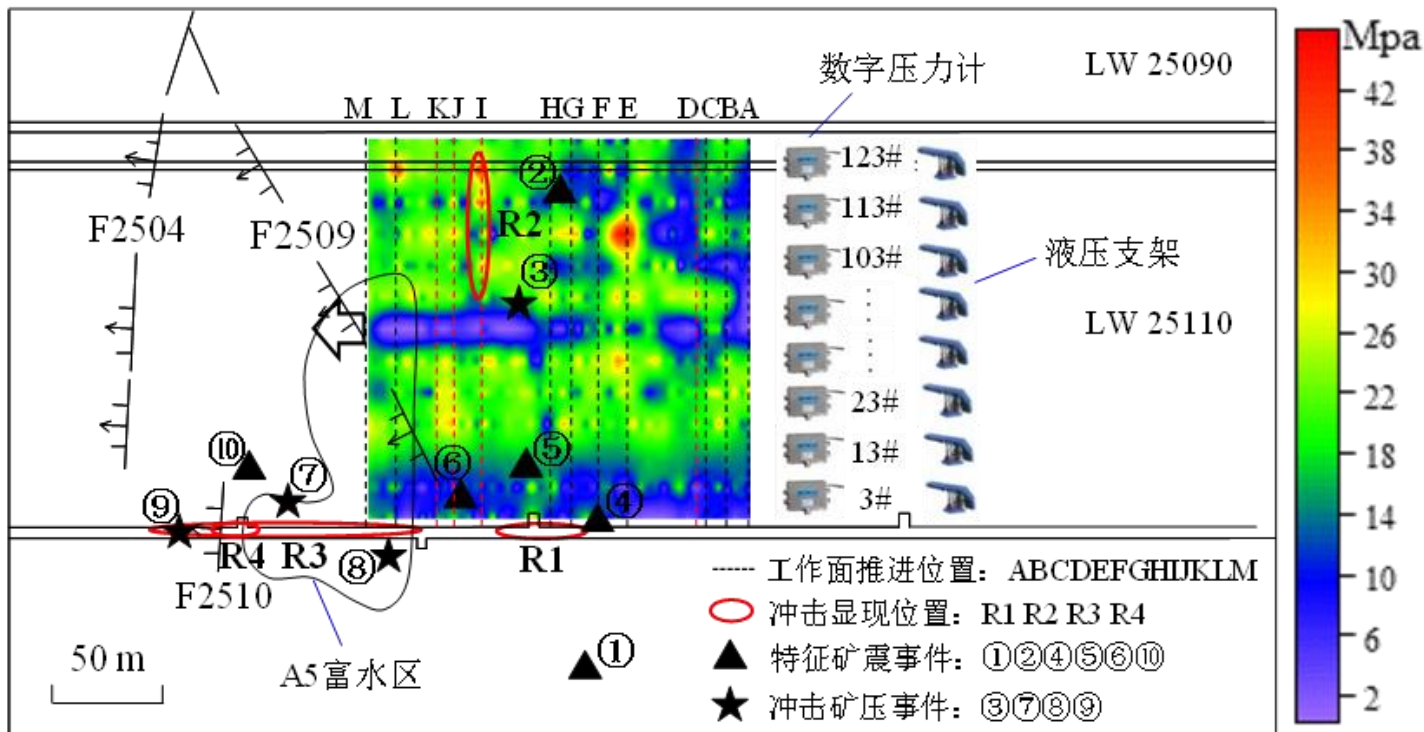
Case Studies of Coal Burst Monitoring and Early Warning

## □ 主要结论

Main Conclusion

# 3、冲击危险监测预警实例

## □ 河南义马跃进煤矿



A: 2011-05-01

G: 双工作面“见方”位置

M: 2011-10-01

①、B: 2011-05-11,  $1.03 \times 10^7$  J

⑥、H: 2011-07-20,  $3.12 \times 10^7$  J

②、C: 2011-05-24,  $9.22 \times 10^6$  J

⑦、R2、I: 2011-08-13,  $2.32 \times 10^7$  J

③、R1、D: 2011-05-26,  $2.42 \times 10^7$  J

⑧、R3、J: 2011-08-26,  $1.47 \times 10^7$  J

④、E: 2011-06-21,  $3.20 \times 10^7$  J

⑨、R4、K: 2011-08-29,  $1.77 \times 10^7$  J

⑤、F: 2011-06-29,  $4.41 \times 10^7$  J

⑩、L: 2011-09-16,  $1.47 \times 10^7$  J



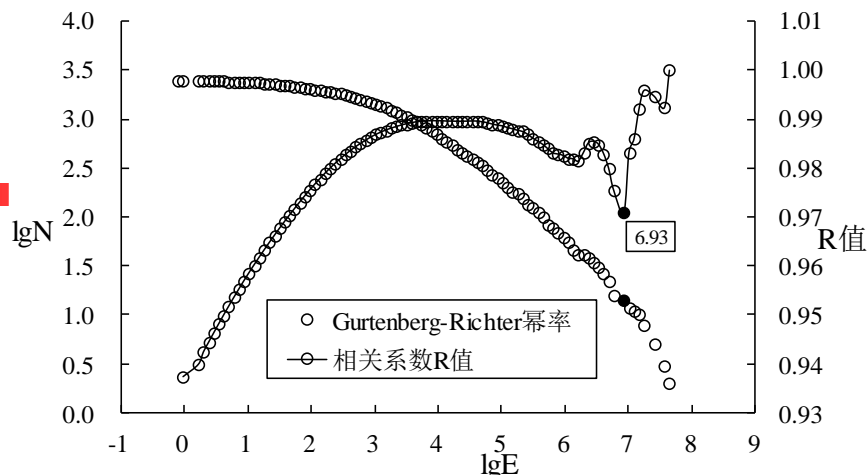


# 3、监测预警实例

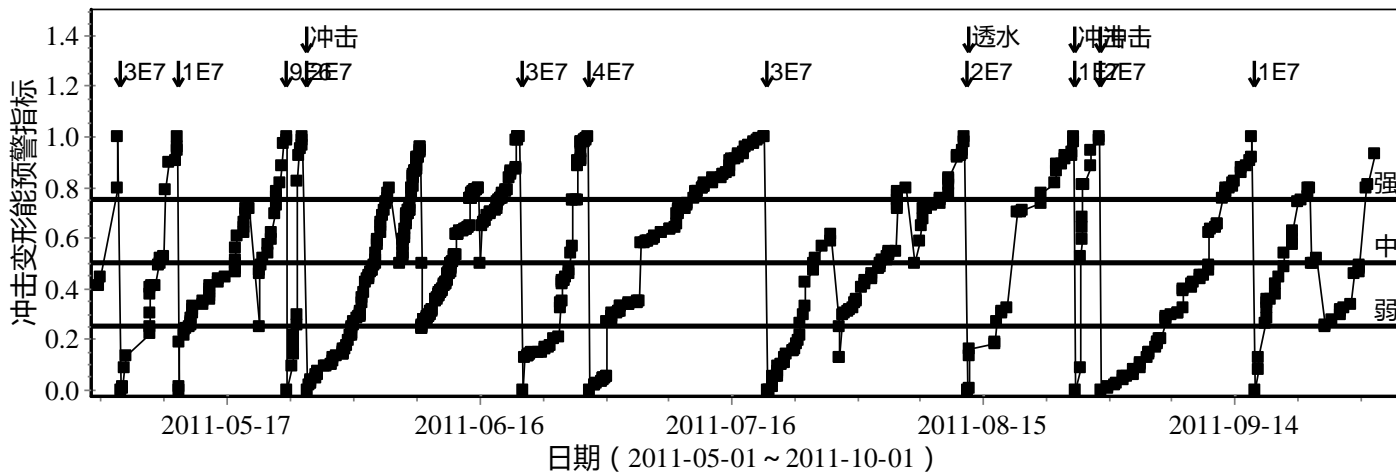
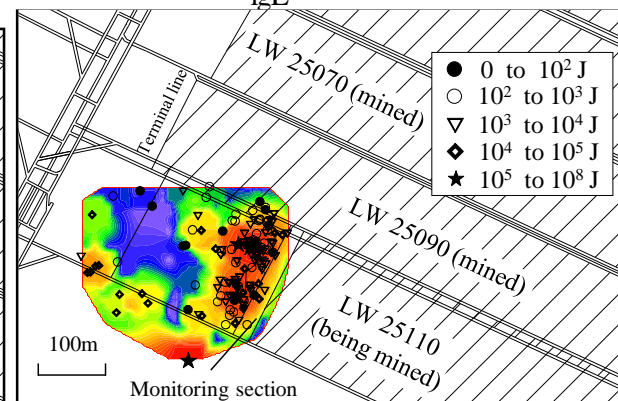
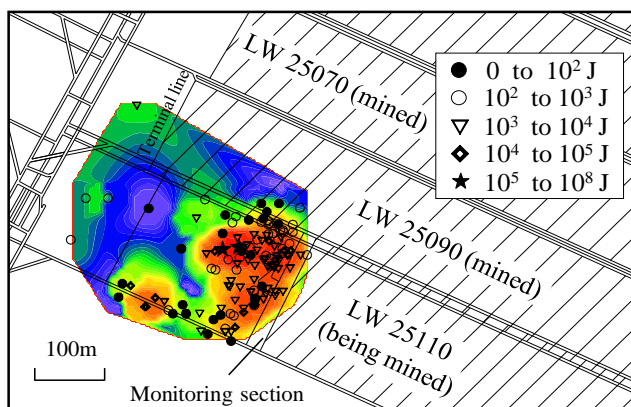
经计算：危险性矿震为 $10^{6.93}J$

应变临界值  $\epsilon_{El} = 2151$

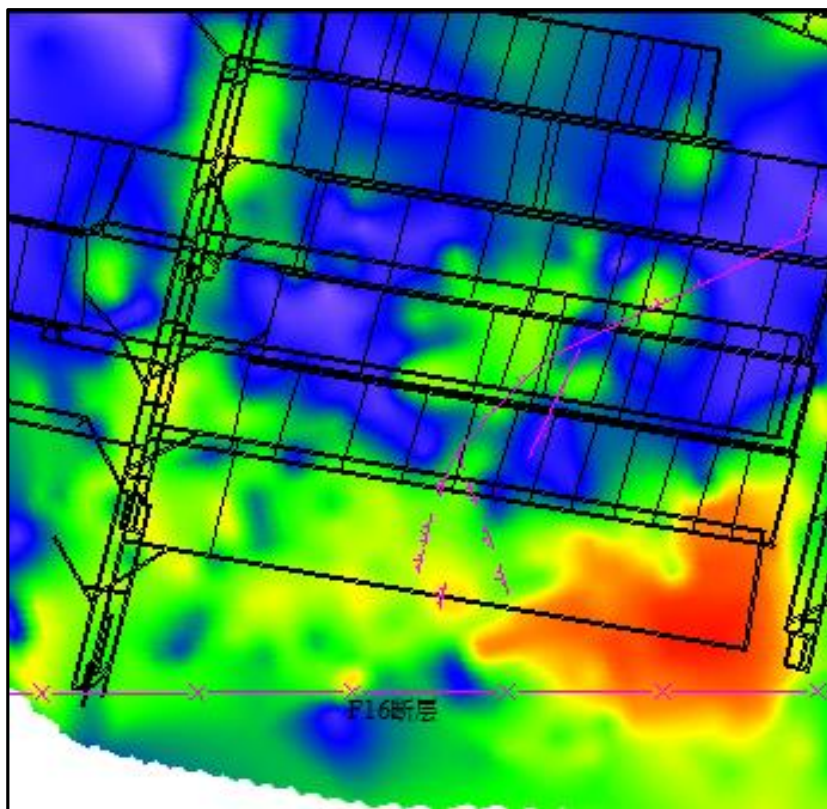
矿震背景值  $E_b = 99528J$



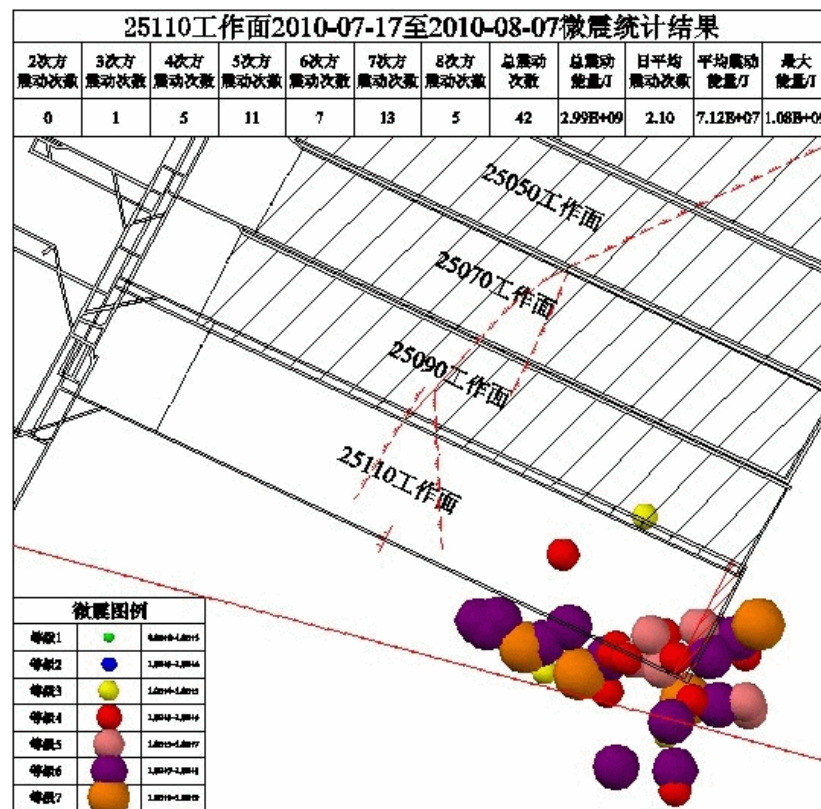
现场危险性矿震和冲击显现与冲击变形能预警指标对应，预测效能达85%以上。



# 3、冲击危险监测预警实例



掘进期间冲击变形能分布

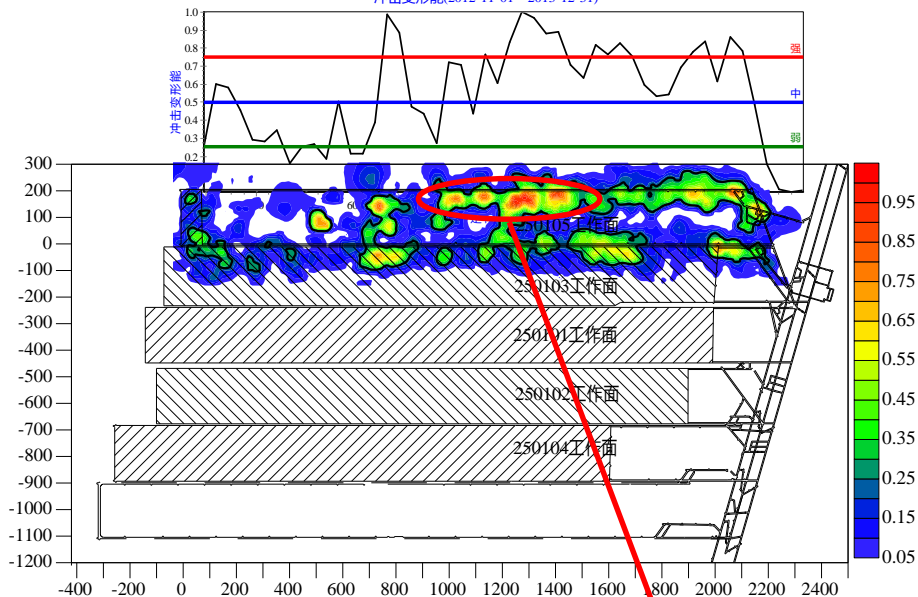


回采期间矿震分布

# 3、冲击危险监测预警实例

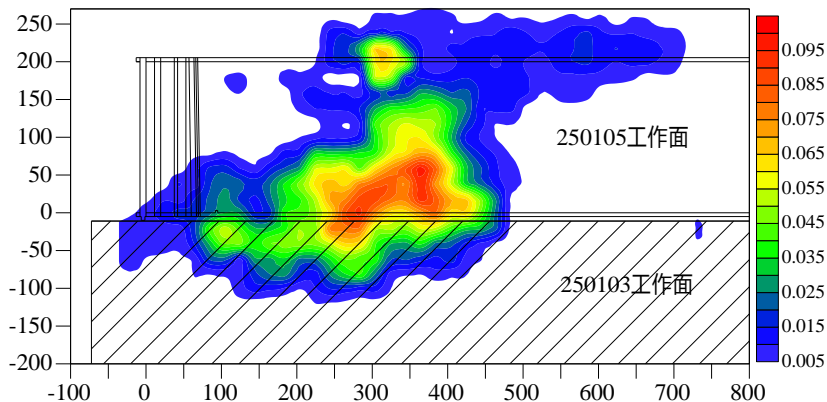
## 250105工作面掘进期间

冲击变形能(2012-11-01 ~ 2013-12-31)

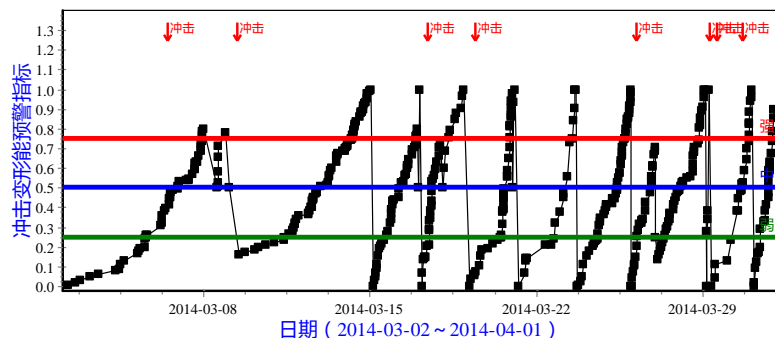
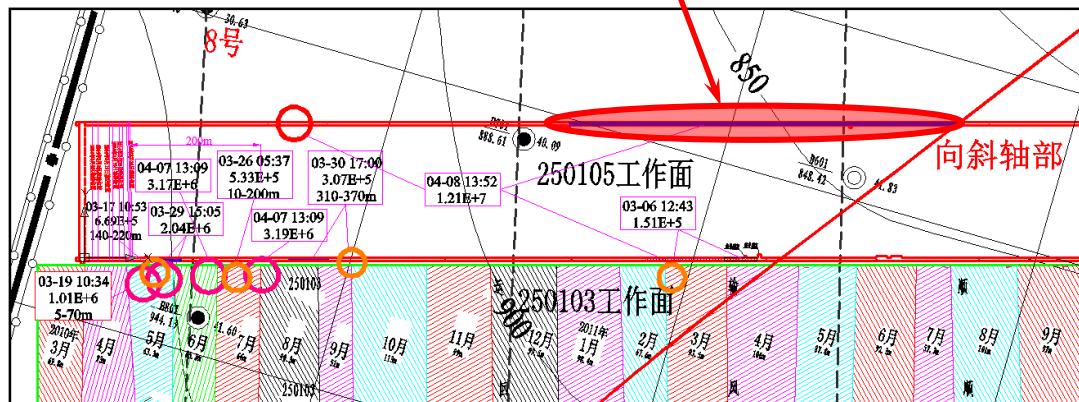


## 甘肃华亭煤矿

250105工作面回采初期发生了9次冲击动力显现；9次均进行了预警。



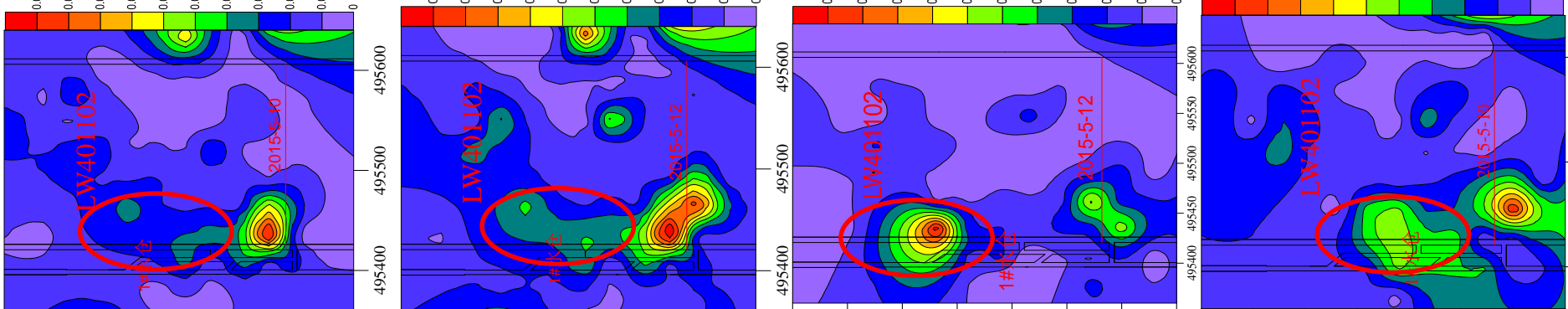
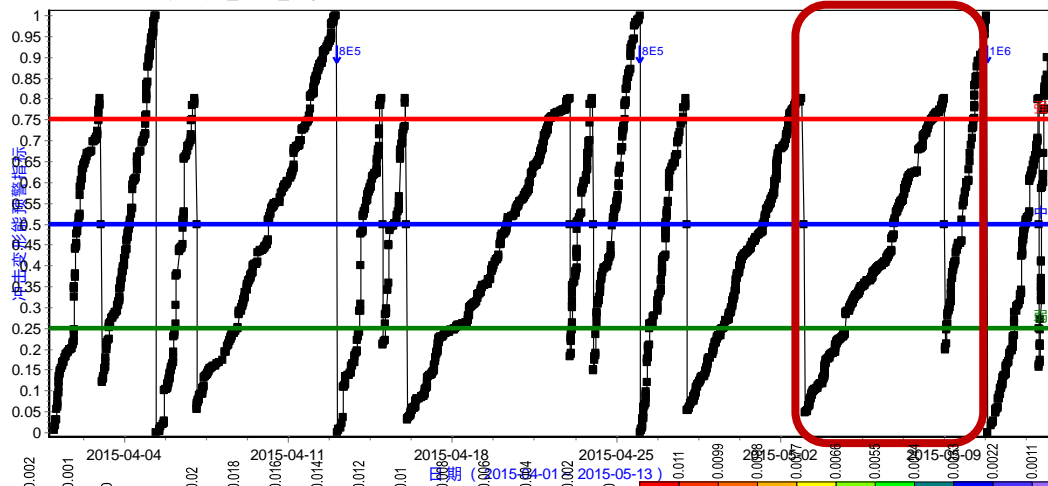
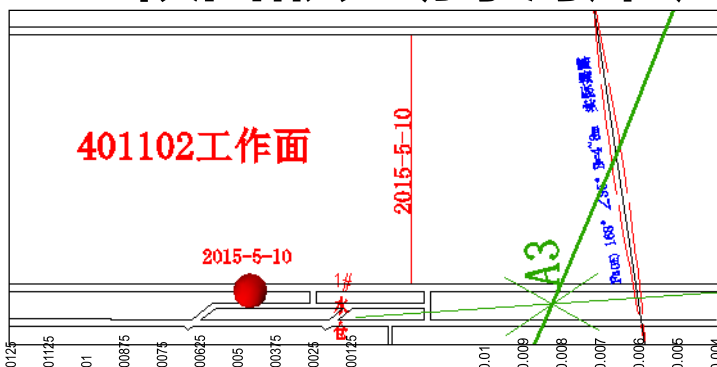
## 回采期间2014-4-8冲击显现区域



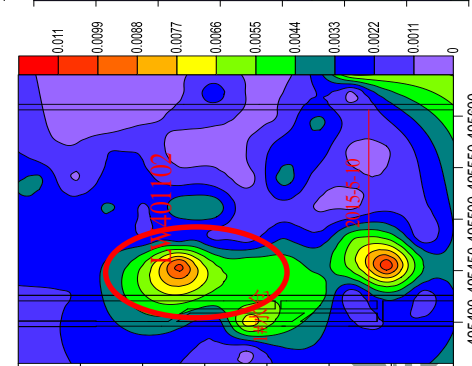
## 250105工作面回采初期

# 3、冲击危险监测预警实例

## □ 陕西彬长胡家河煤矿

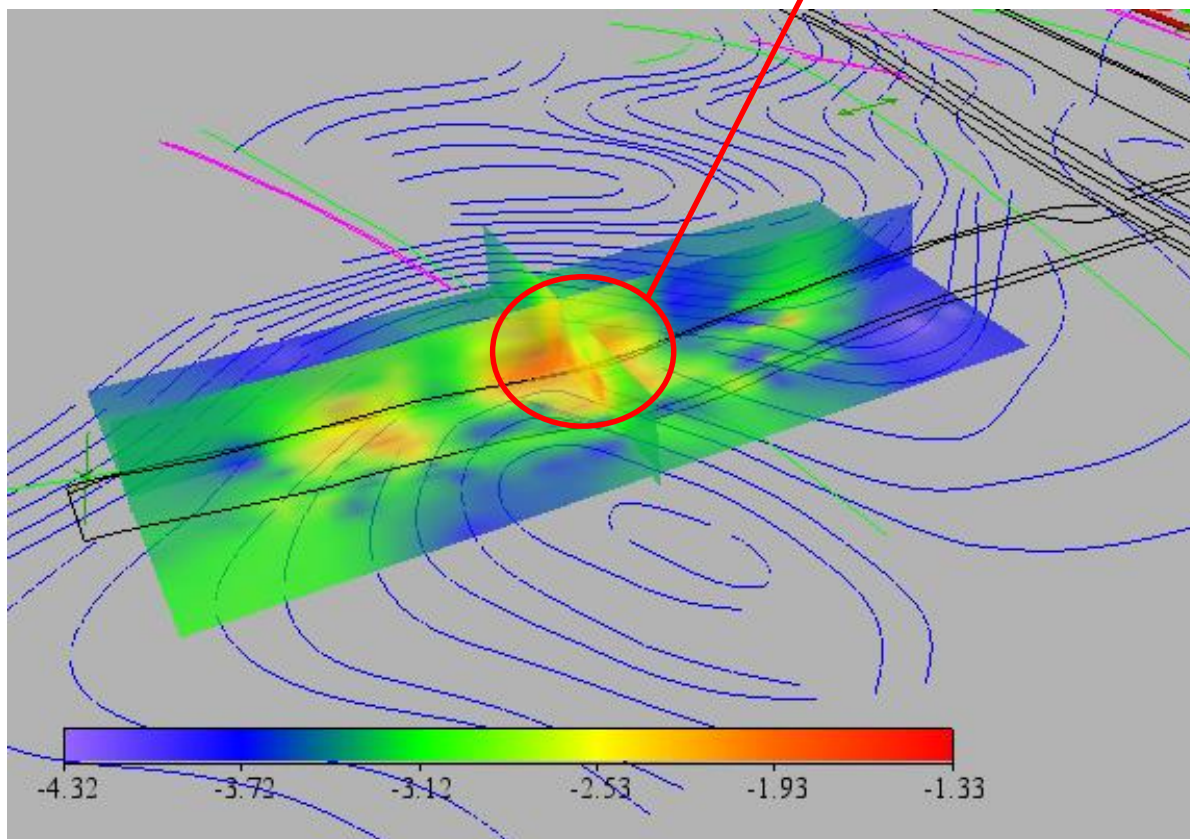
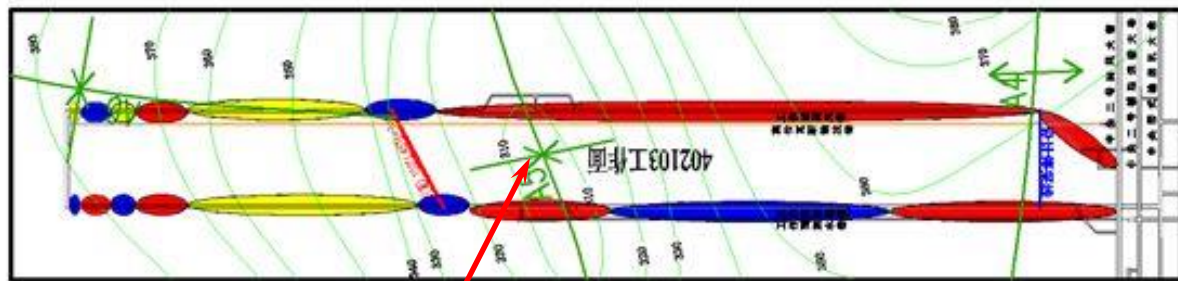


- 5月10日强矿震发生前，时间上为**强危险**，在水仓附近冲击变形能积聚速率值一直升高。
- **监测预警效能**：共发生11次矿震：9次显示为**强危险**，1次为**中等危险**。整体**强危险预警准确度在82%**。



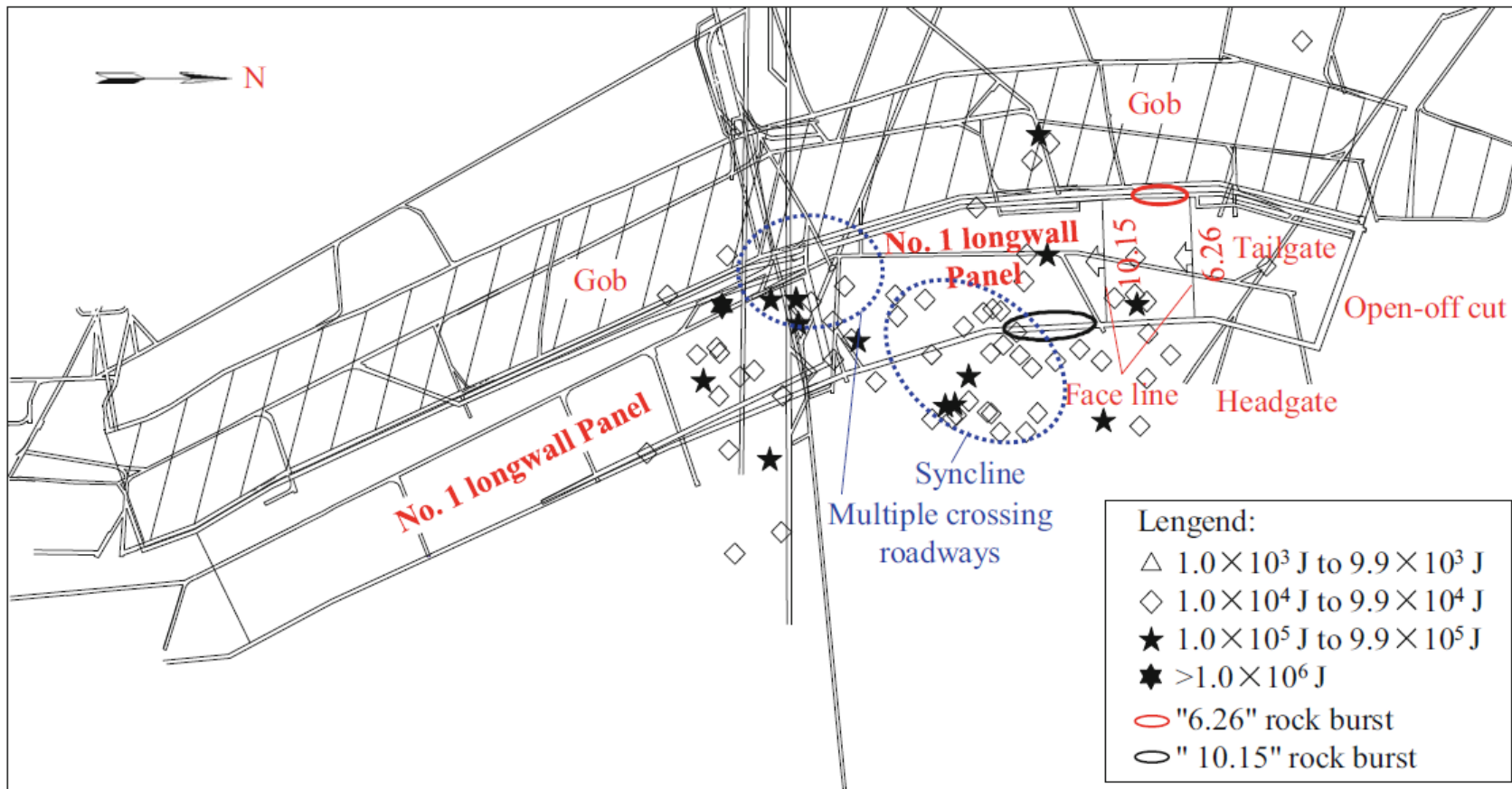
# 3、冲击危险监测预警实例

工作面回采至A5向斜轴部



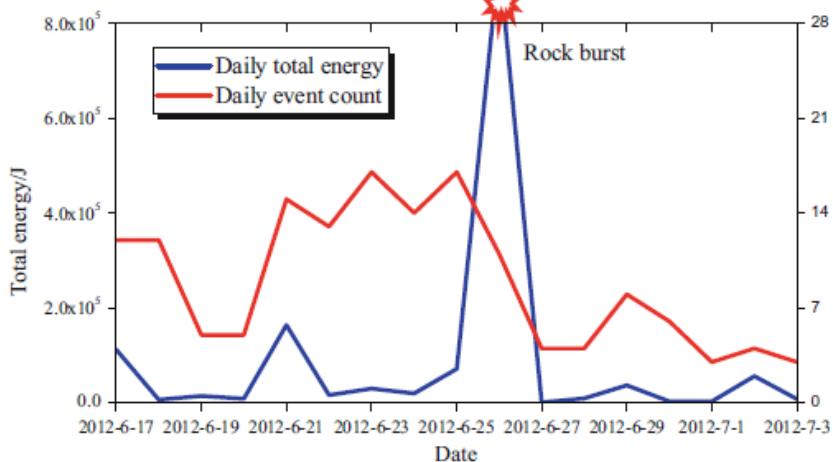
# 3、冲击危险监测预警实例

## 黑龙江鹤岗兴安煤矿

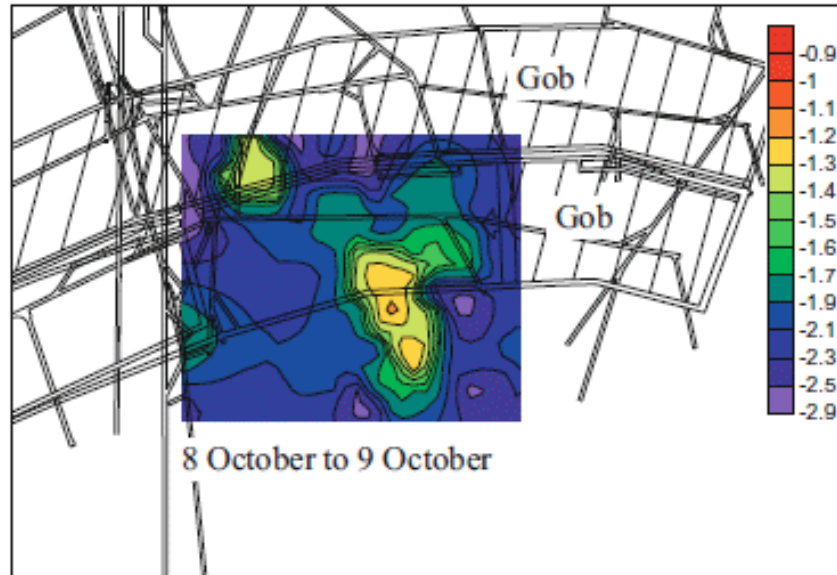
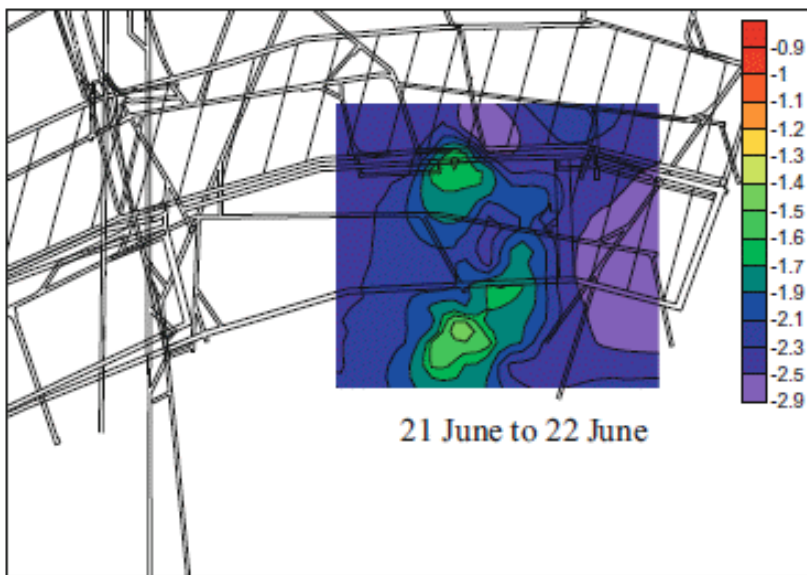
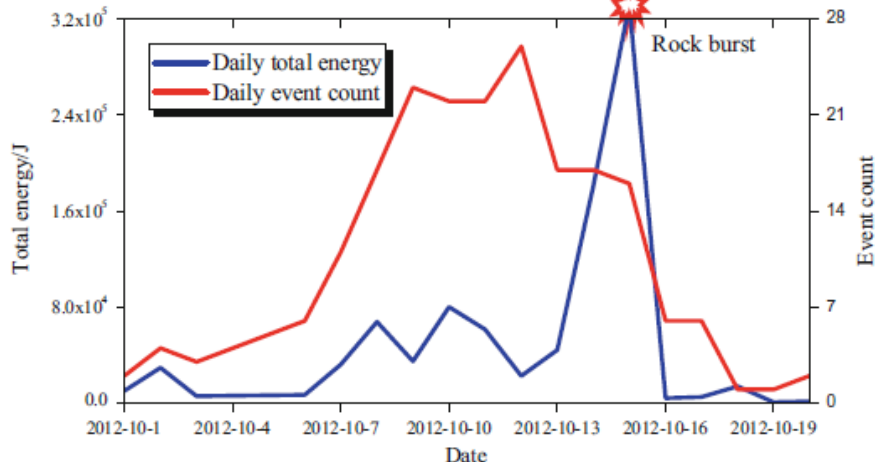


# 3、冲击危险监测预警实例

“6.26” 冲击

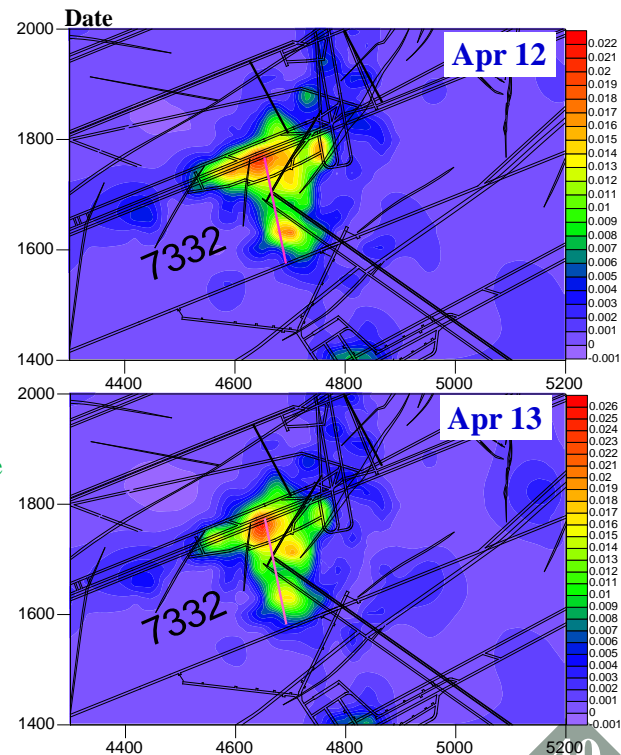
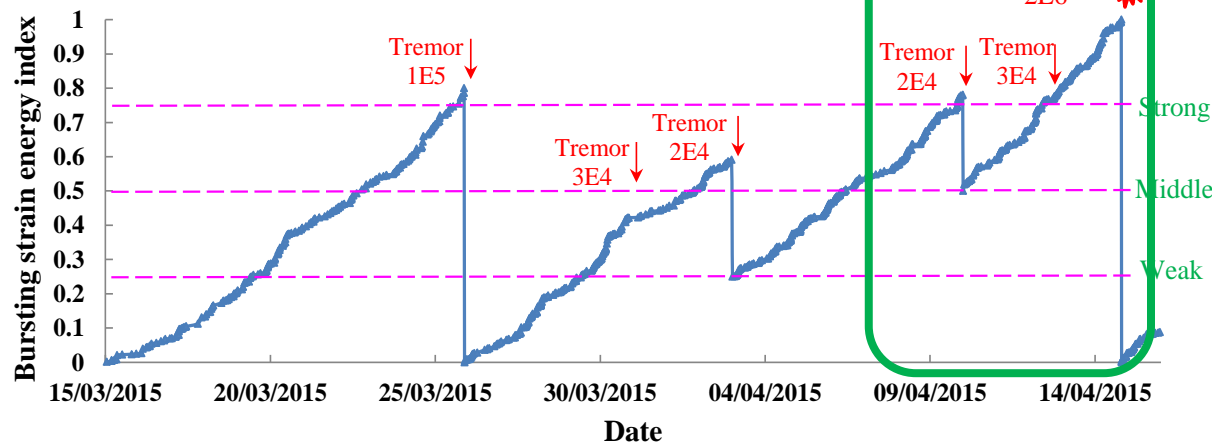
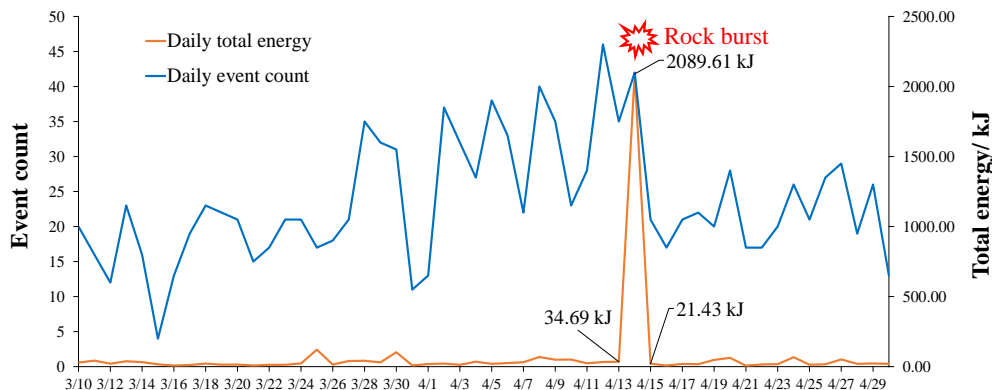
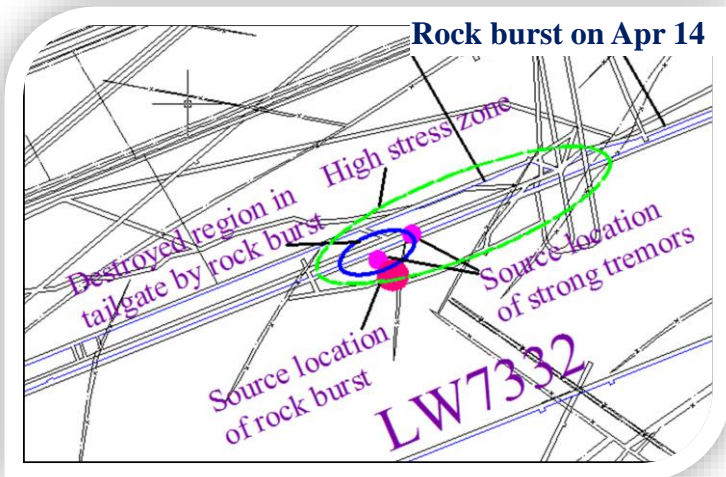


“10.15” 冲击



# 3、冲击危险监测预警实例

## 江苏大屯徐庄煤矿







# 目 录



- 煤矿冲击矿压显现特征
- 冲击变形能指标模型
- 冲击危险监测预警实例
- 主要结论



## 4、主要结论



□冲击矿压发生及孕育过程中的显现、应力、微破裂现象等具有共性特征，这些共性特征可以采用微破裂对应的变形能释放、应力降、声发射/微震等参量表征。

There exist common features for the behavior, stress, and micro-rupture presented during the process of coal burst occurrence or preparation. These features can be characterized by stress drop, strain increment, and strain energy release.



## 4、主要结论



□煤岩应力应变状态与能量储存平衡状态现象一致，由此产生的应力降或应变增量或变形能释放是声发射/微震等微破裂现象发生的本质。

Stress-strain state and energy balance state of loading coal/rock are the same phenomenon. The stress drop, strain increment, and strain energy release are the essence of AE or microseismicity occurrence.



## 4、主要结论



□由此建立了基于微震能量重构的冲击变形能预警指标及其判别准则，并编制了相应的计算机软件。

Bursting strain energy index and its criterion were established based on the reconstitution of microseismic energy, and thereby the software programming has been developed.



## 4、主要结论



□ 实践表明，冲击变形能指标能够实现冲击危险的时间与空间、定期与短临相结合的分区分级预警，综合预警准确率达到80%以上。

Practice shows that bursting strain energy index can be used for short-term spatial-temporal early warning of coal burst hazards. Its comprehensive early-warning accuracy exceed 80%.



***Many thanks!***



**Mobile phone: 13952261972**

**Email address: dlm\_burst@126.com**

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