



煤矿重大动力灾害协同创新中心
Collaborative Innovation Center for Major Dynamic Disasters in Coal Mines

煤矿冲击地压发生理论公式

潘一山

辽宁大学

2020年12月5日

汇 / 报 / 提 / 纲

一、为什么要有一个理论公式？

二、怎样得到？一个什么样公式？

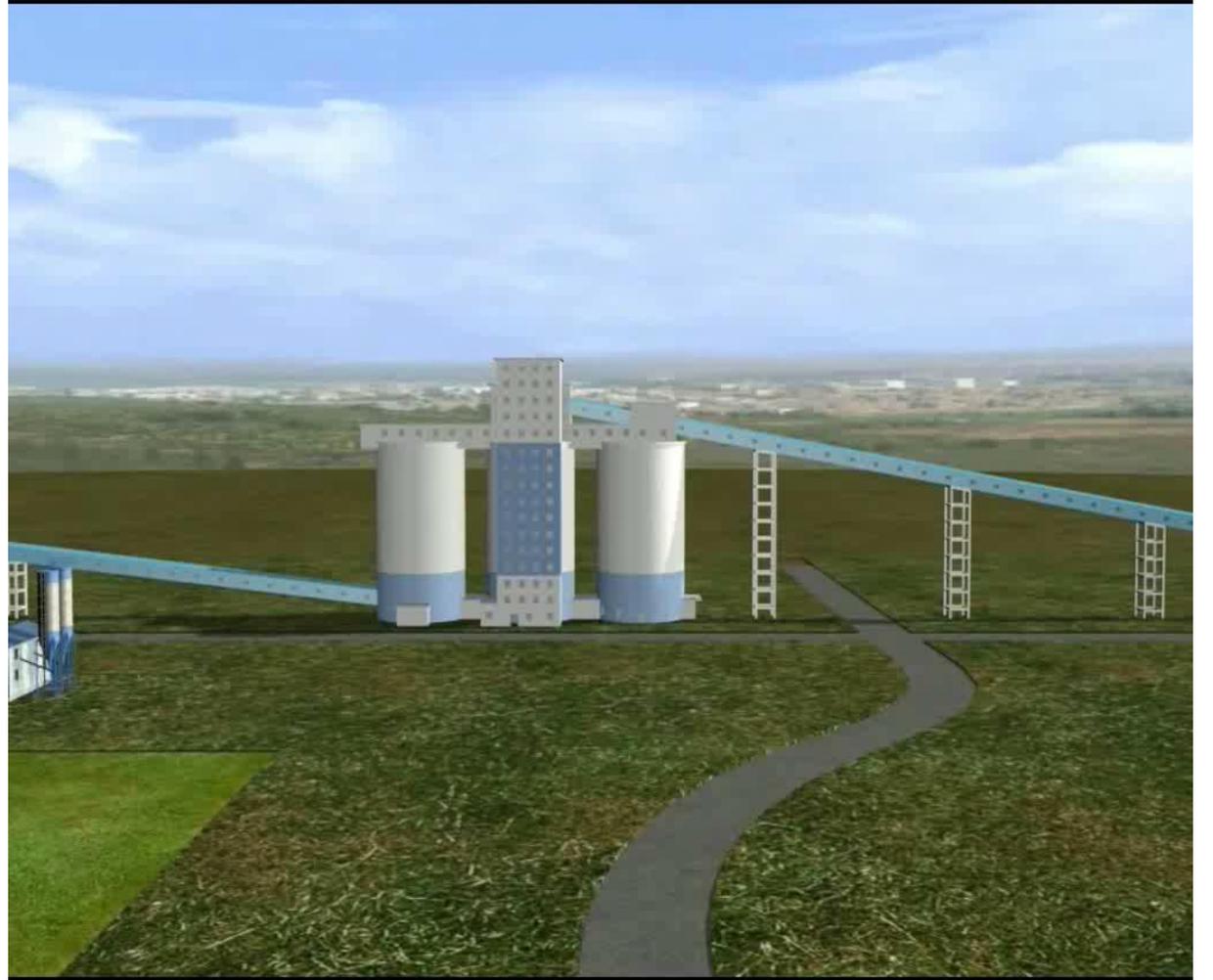
三、这样公式能解释哪些基本问题？

汇 / 报 / 提 / 纲

一、为什么要有一个理论公式？

一、为什么要有一个理论公式？

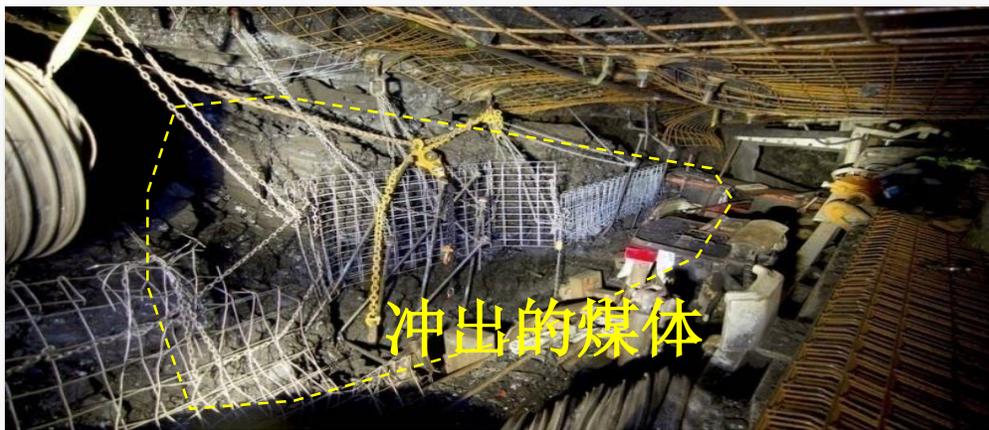
- **冲击地压**是煤矿井下工作面或巷道周围煤岩体弹性能突然释放而产生的动力灾害，**是煤矿安全的世界性难题。**



煤矿冲击地压

一、为什么要有一个理论公式？

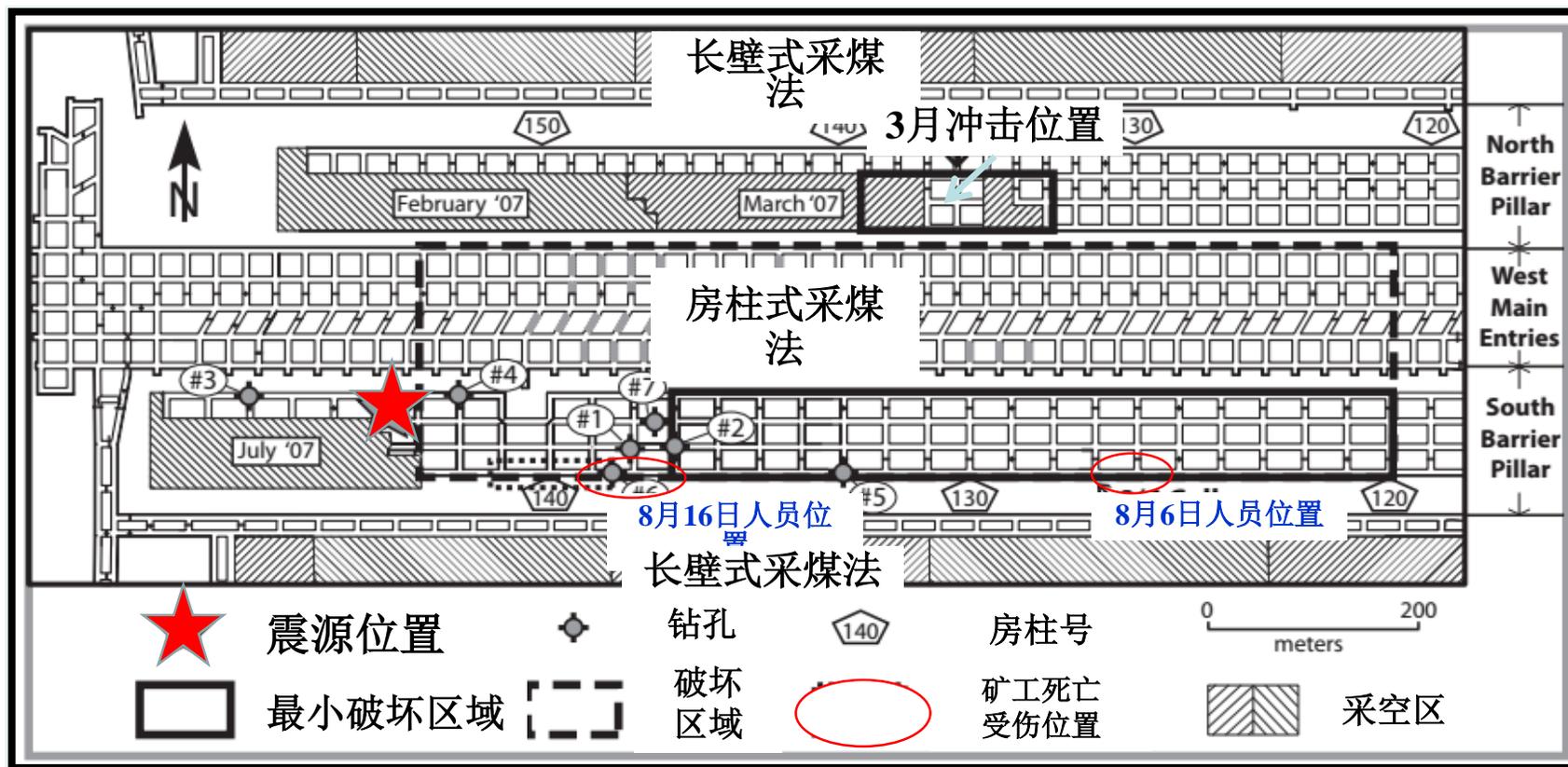
- 2014年4月16日，澳大利亚澳星煤矿发生冲击地压事故，2名矿工被埋死亡。



澳大利亚澳星煤矿冲击地压事故

一、为什么要有一个理论公式？

- 2007年8月6日，美国尤它州，克兰德尔峡谷煤矿发生冲击地压事故，震级3.9，造成6人死亡。8月16日救援过程中，又发生冲击地压，造成3人死亡，6人受伤。



美国克兰德尔峡谷煤矿两次冲击事故及人员伤亡位置

一、为什么要有一个理论公式？

● 2016年2月25日在俄罗斯科米共和国北方煤矿780m深处发生冲击地压事故，共造成**36人**死亡，其中包括28日救援过程中，矿井又发生瓦斯爆炸，造成5名救援人员和1名矿工遇难。

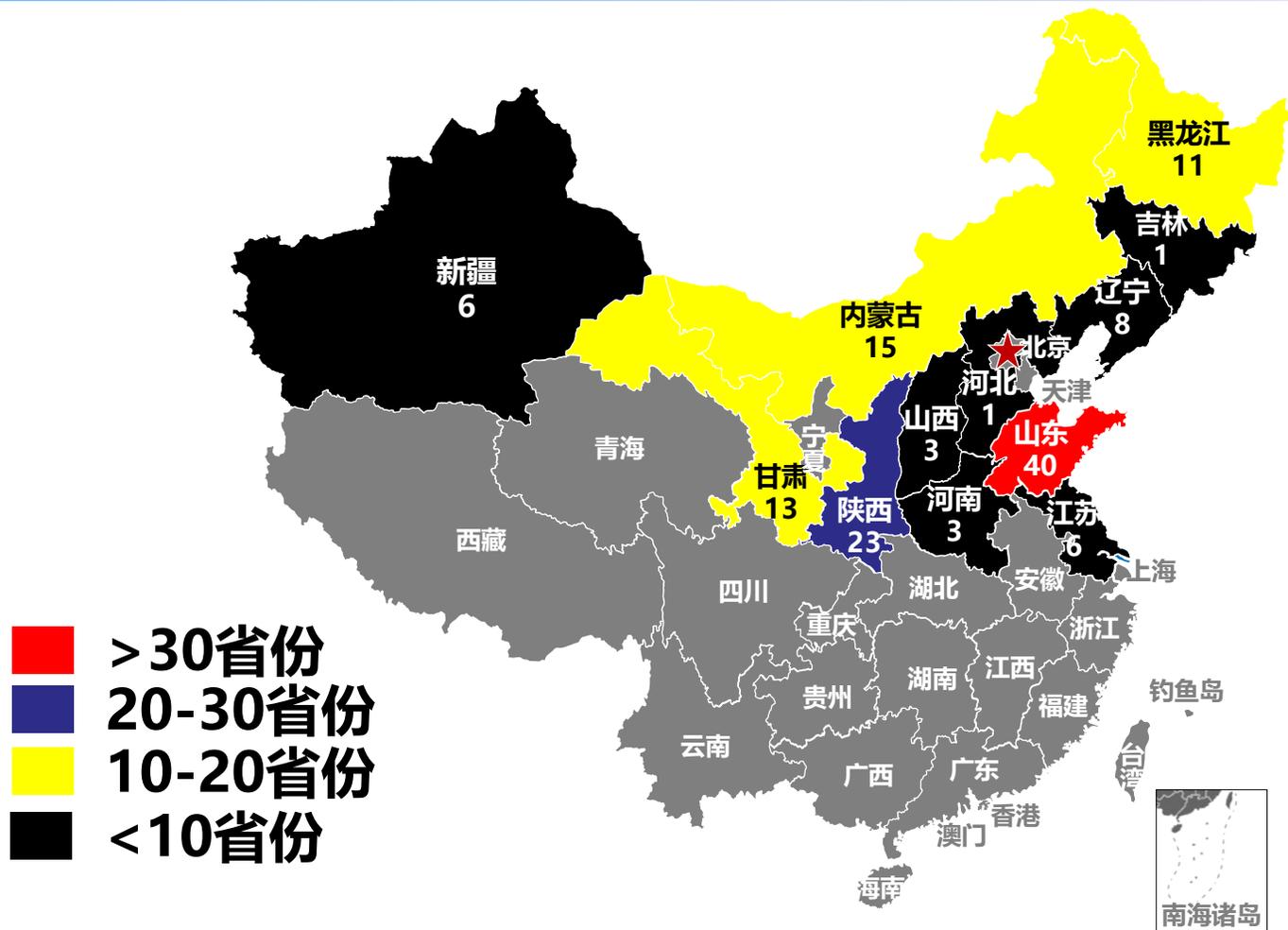


俄罗斯北方煤矿冲击地压事故

一、为什么要有一个理论公式？

□ 全国12个省、自治区
调研到132处冲击地
压矿井。

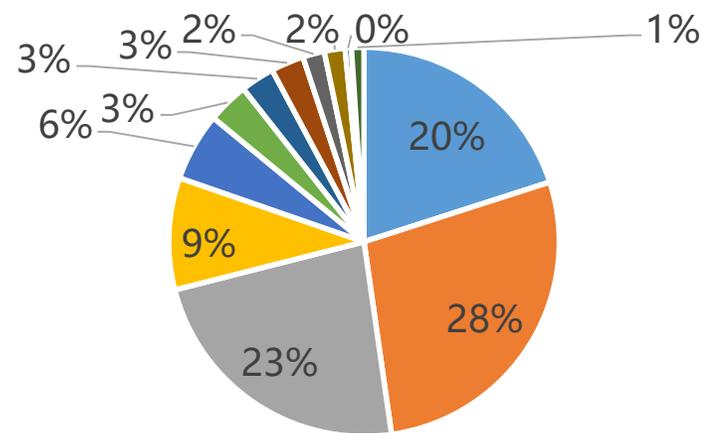
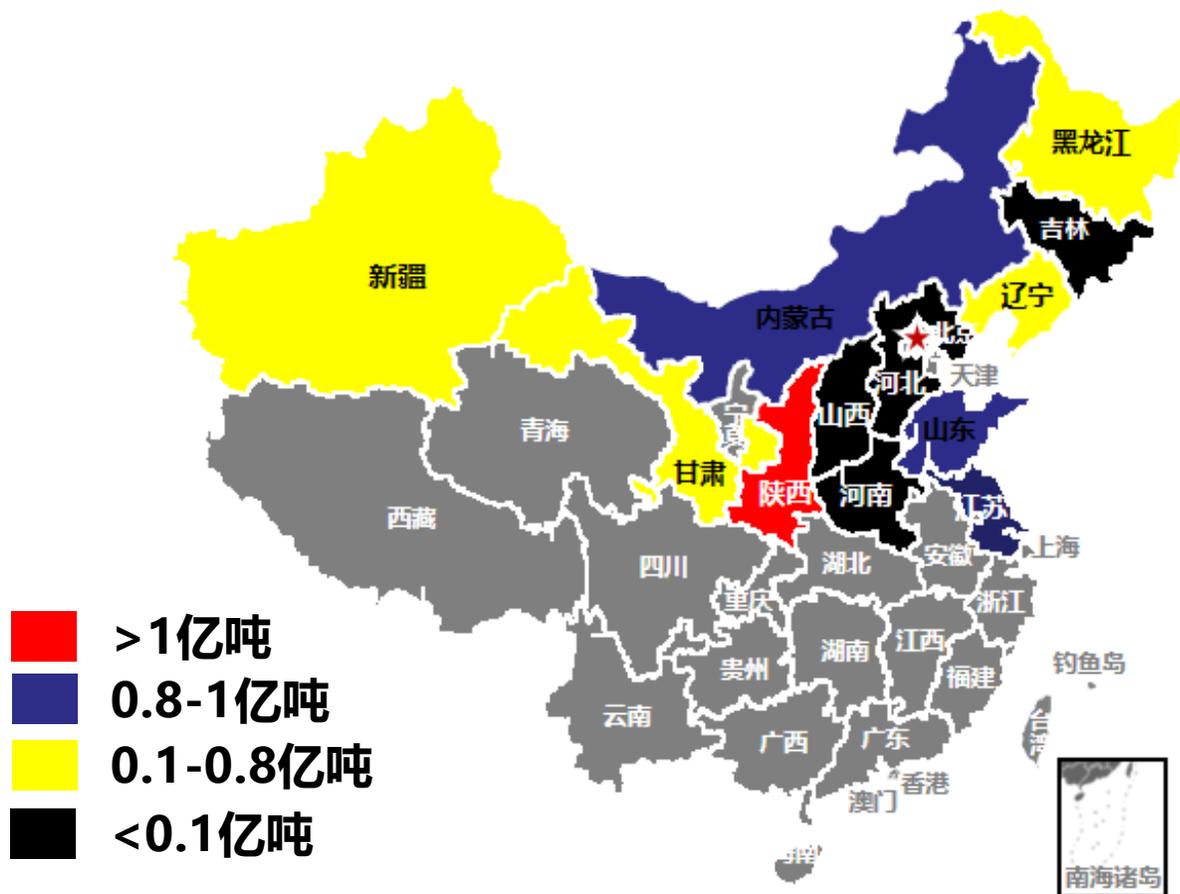
□ 山东、陕西、内蒙古、
甘肃、黑龙江冲击地
压矿井数超过10处。



山东	陕西	内蒙古	甘肃	黑龙江	辽宁	新疆	江苏	河南	山西	吉林	河北	合计
42	23	15	13	11	8	6	6	3	3	1	1	132

一、为什么要有一个理论公式？

□ 全国132处冲击地压矿井产能4.056亿吨，陕西省产能最多，达到1.12亿吨。

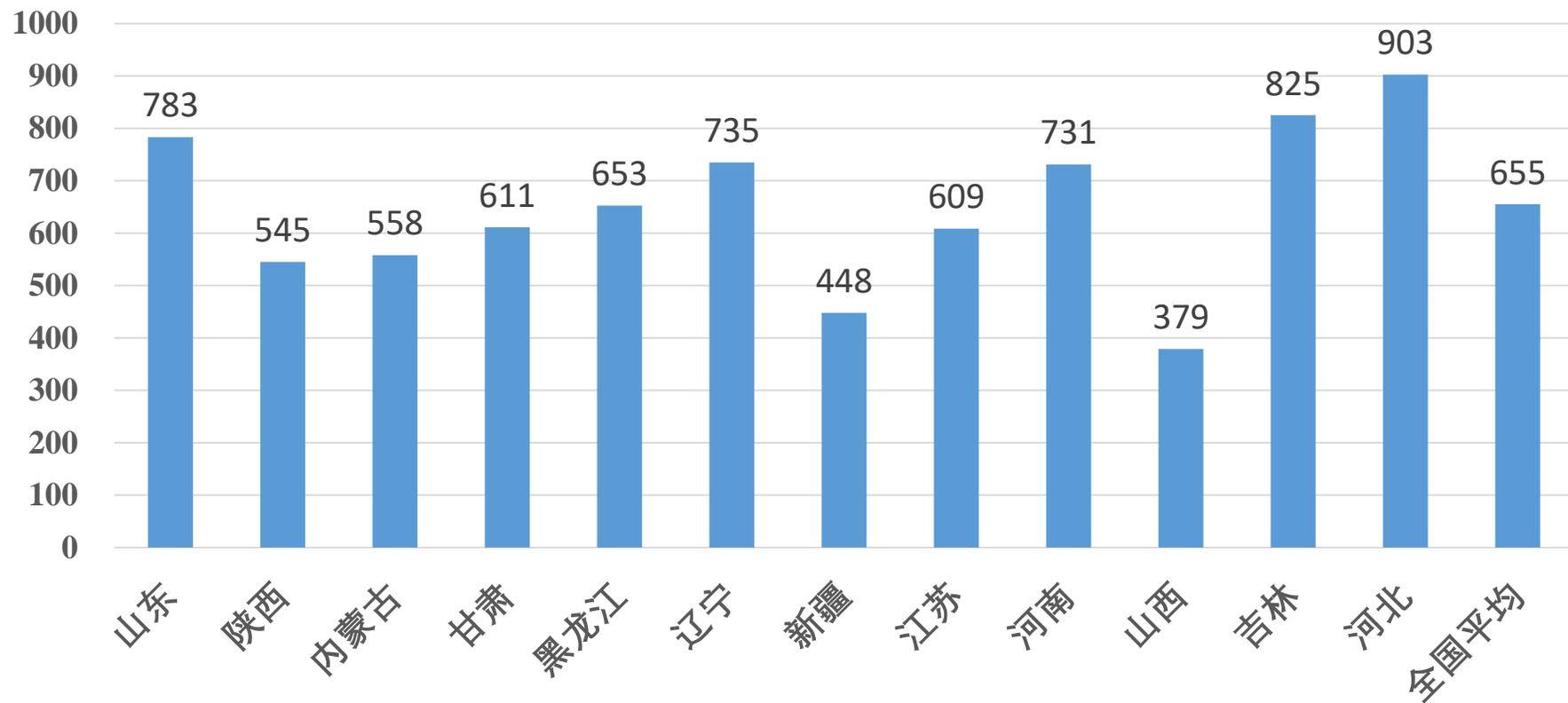


■ 山东 ■ 陕西 ■ 内蒙古 ■ 甘肃
■ 黑龙江 ■ 辽宁 ■ 新疆 ■ 江苏
■ 河南 ■ 山西 ■ 吉林 ■ 河北

山东	陕西	内蒙古	甘肃	黑龙江	辽宁	新疆	江苏	河南	山西	吉林	河北	合计
8262	11284	9280	3790	2305	1390	1140	1114	730	760	210	300	40565

一、为什么要有一个理论公式？

□ 全国132处冲击地压矿井煤层平均埋深655.2m。



一、为什么要有一个理论公式？

经典的冲击地压发生理论

序号	理论名称	出现时间	代表人物	主控因素与判据
1	强度理论	上世纪20年代	Cook N.G.	煤岩强度；应力判据
2	刚度理论	上世纪60年代	Cook N.G.	煤岩刚度；刚度判据
3	能量理论	上世纪60年代	Cook N.G.	能量守恒；能量（率）判据
4	冲击倾向理论	上世纪60年代	Singh S. P.	煤岩脆性；统计判据
5	三准则理论	上世纪80年代	李玉生	强度、刚度、脆性统计判据
6	系统失稳理论	上世纪80年代	章梦涛	煤岩系统特性；解析判据

一、为什么要有一个理论公式？

冲击地压之问：

- 如果说，冲击地压问题已经上升到一门科学的话，不用语言来描述，就拿出一个数学公式来，是什么公式？

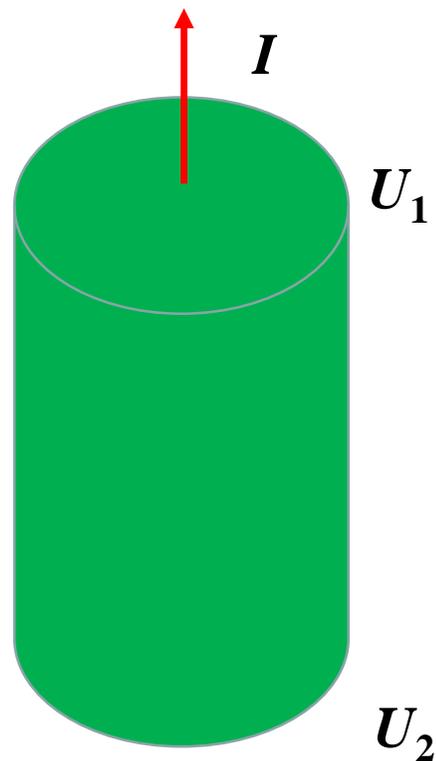
一、为什么要有一个理论公式？

电学电路问题

提出者：乔治·西蒙·欧姆

提出时间：1826年

定律内容：
$$I = \frac{U_2 - U_1}{R}$$



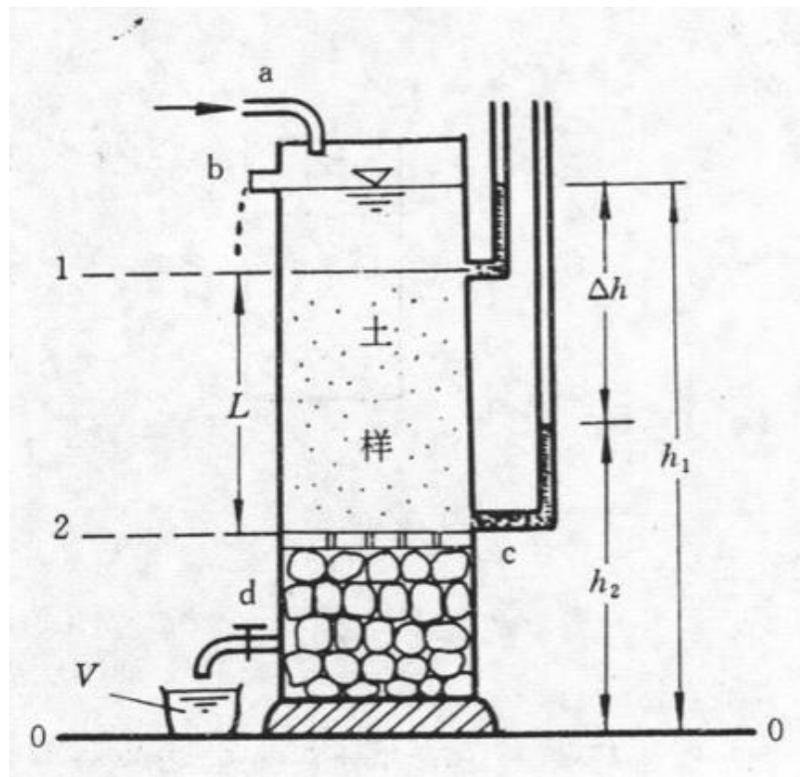
一、为什么要有一个理论公式？

流体在孔隙介质流动问题

提出者：达西

提出时间：1856年

定律内容： $Q=KA\Delta h/L$



一、为什么要有一个理论公式？

质点、刚体动力学问题

提出者：牛顿

提出时间：1687年

定律内容：
$$\mathbf{a} = \frac{F_2 - F_1}{m}$$



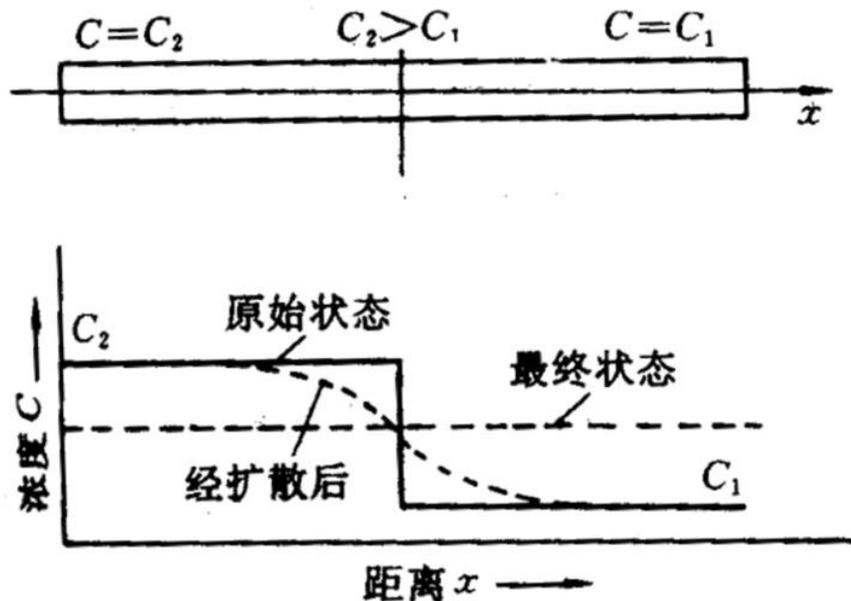
一、为什么要有一个理论公式？

流体扩散问题

提出者：菲克

提出时间：1855年

定律内容： $J=k(C_2-C_1)$



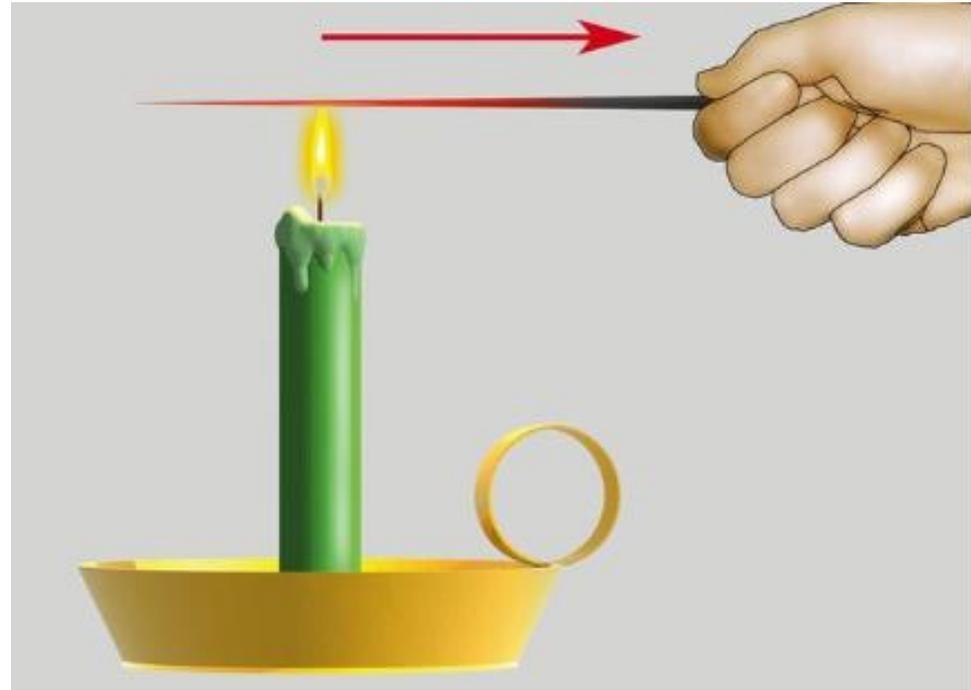
一、为什么要有一个理论公式？

热力学问题

提出者：傅立叶

提出时间：1822年

定律内容： $\dot{Q} = -\kappa \frac{dT}{dx} A$



冲击地压之问：

- **煤岩力学参数、巷道几何参数、地应力**等满足什么关系时，就发生了冲击地压？



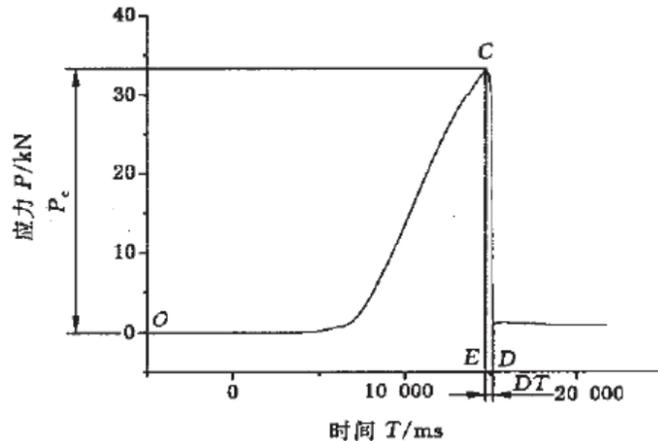
冲击地压现场监控录像

冲击地压之问：

□ 鉴定得到煤岩冲击倾向性参数、原岩地应力和采动应力，请问用什么公式计算冲击地压危险性？实现冲击危险性评价、预测与预警？

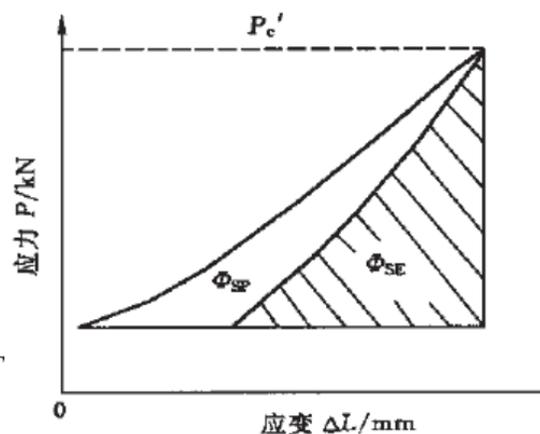
① 动态破坏时间

$$DT_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DT_i$$



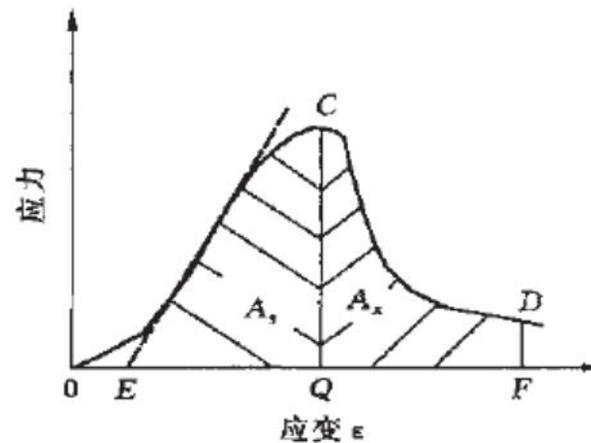
② 弹性能指数

$$W_{ET} = \frac{\Phi_{SE}}{\Phi_{SP}}$$



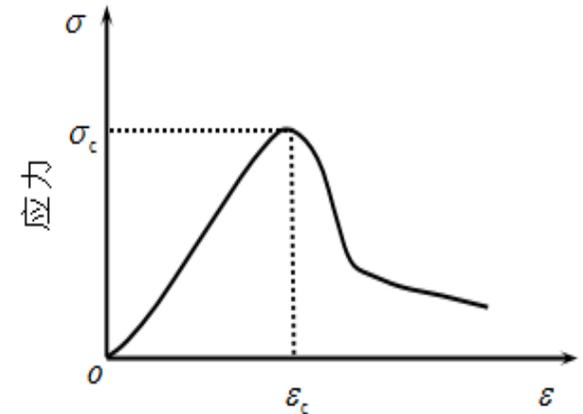
③ 冲击能指数

$$K_E = \frac{A_s}{A_x}$$



④ 单轴抗压强度

$$\sigma_c$$



煤岩冲击倾向性鉴定指标 (GBT 25217.2-2010)

冲击地压之问：

- 对冲击地压煤层防治后，请问已经采取措施的巷道区域，井下工人在作业时，**安全系数有多大**？目前不能给出冲击地压的**临界载荷**，无法对冲击地压防治工程进行**安全设计**？

$$\text{安全系数? } K_{cr} = \frac{P}{P_{cr}} \quad \begin{array}{l} \text{地应力 } \checkmark \\ \text{临界载荷?} \end{array}$$

冲击地压之问：

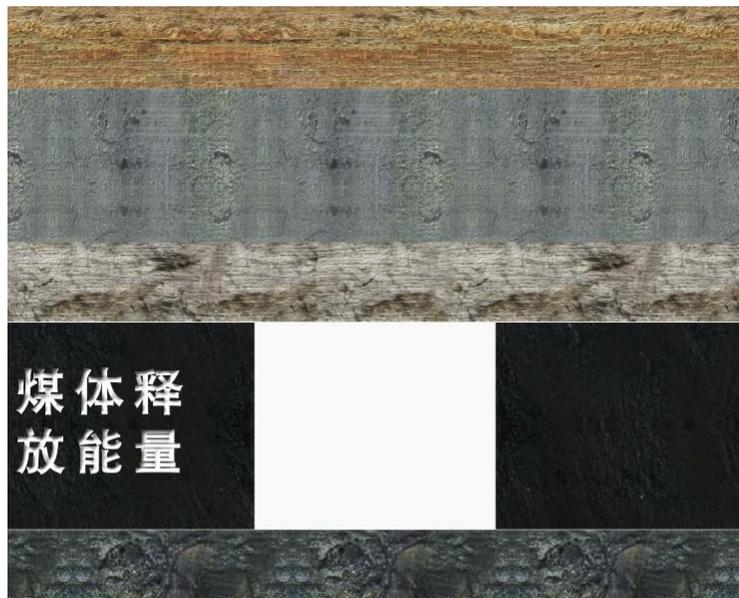
- 为什么近几年冲击地压都跑到巷道中，采煤工作面几乎没有人员伤亡，支护对冲击地压发生到底起到什么作用？缺乏理论公式依据？

汇 / 报 / 提 / 纲

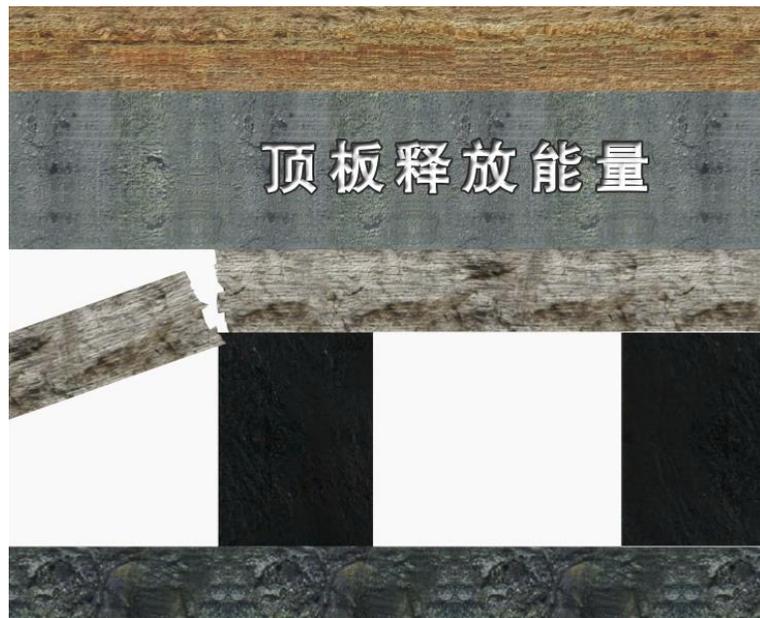
二、怎样得到？一个什么样公式？

二、怎样得到？一个什么样公式？

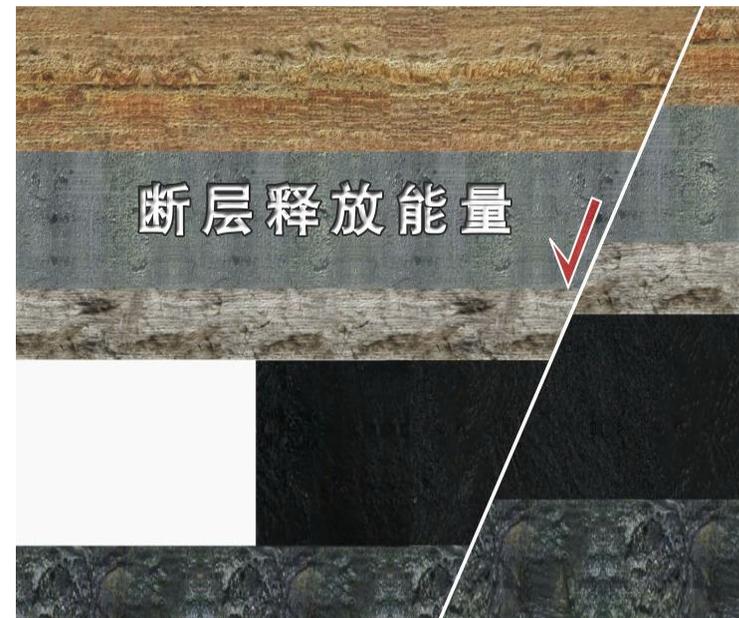
巷道煤体压缩



巷道顶板断裂



近巷道断层错动



典型冲击地压

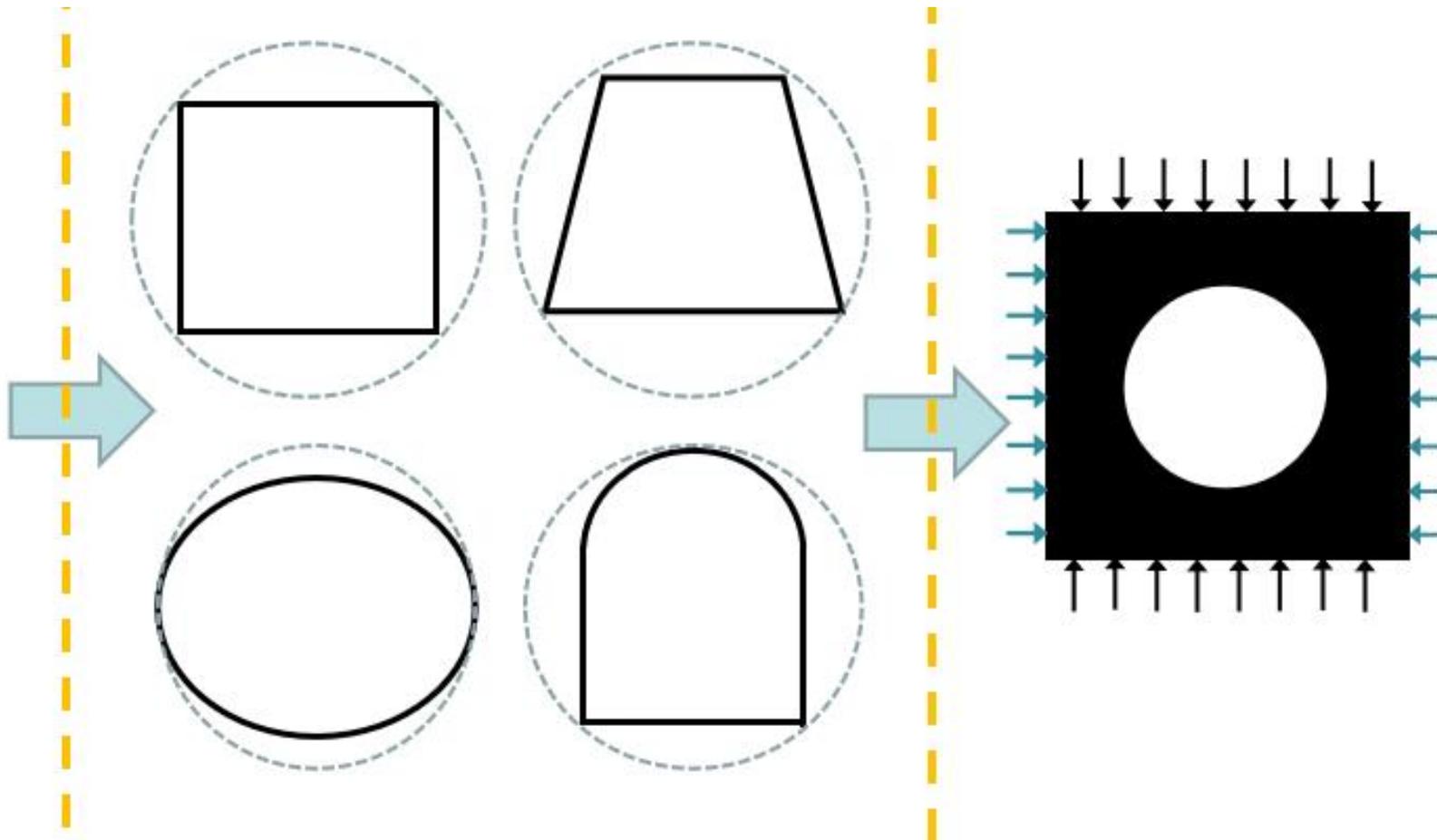
二、怎样得到？一个什么样公式？



典型冲击地压发生的巷道结构

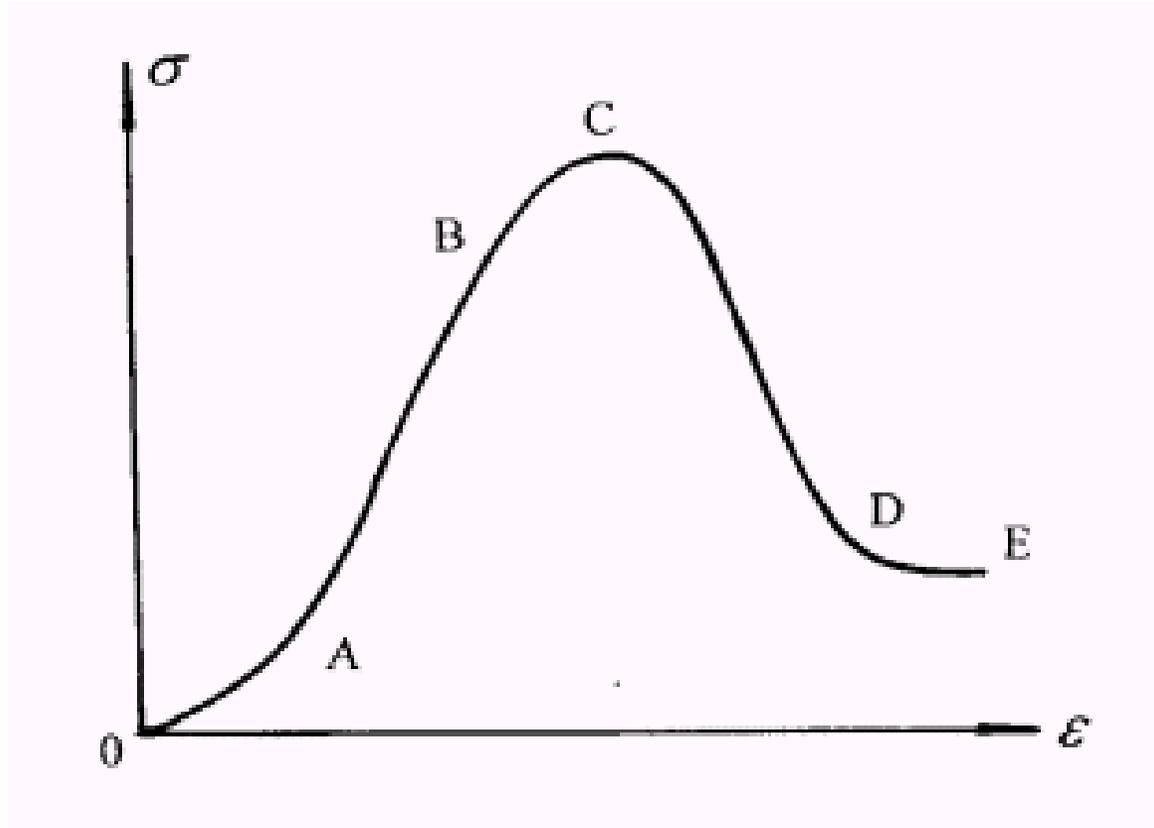
二、怎样得到？一个什么样公式？

冲击地压模型：巷道→圆形巷道→水平垂直相等应力作用



多种巷道断面形状的简化几何模型

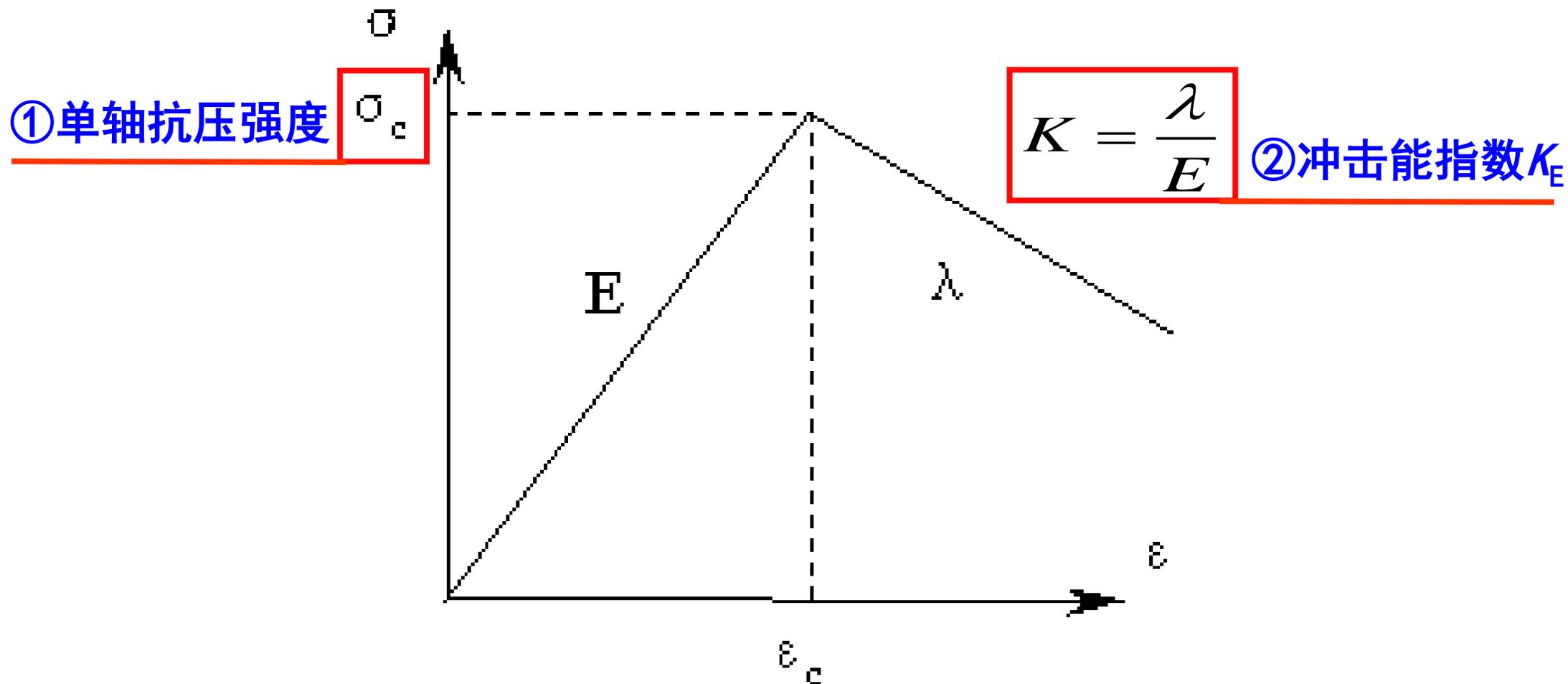
二、怎样得到？ 一个什么样公式？



典型煤岩全程应力应变曲线

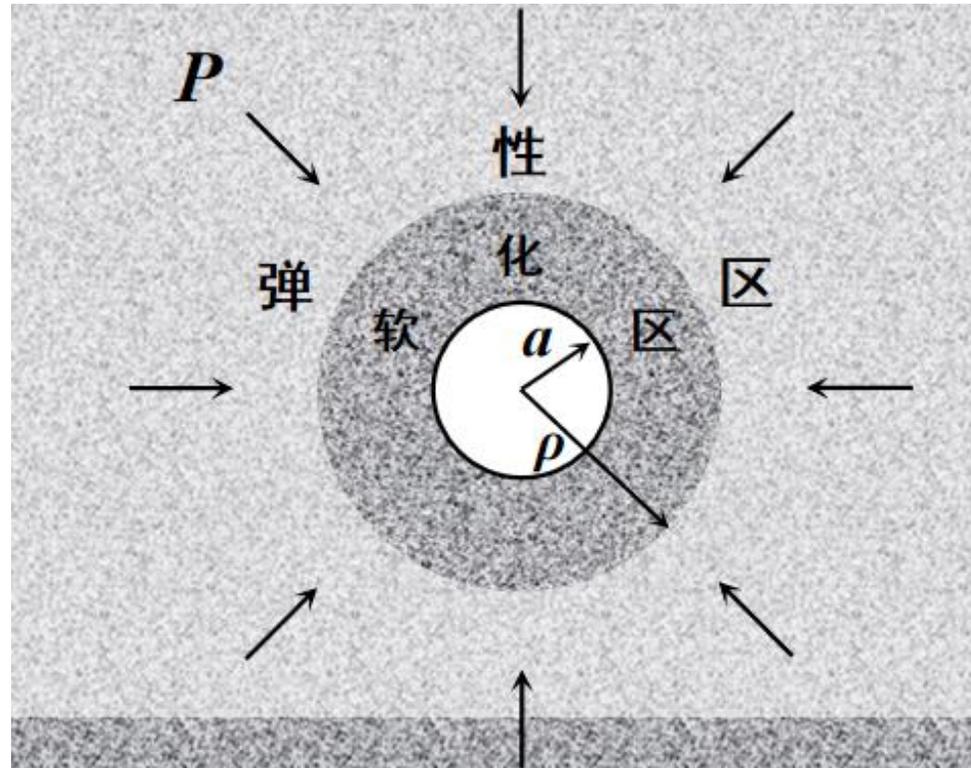
二、怎样得到？ 一个什么样公式？

煤岩体变形破坏的**双线性**本构模型



二、怎样得到？ 一个什么样公式？

- ◆ 将巷道抽象为半径为 a 的圆形巷道，受应力（原岩应力+采动应力 P 作用，产生塑性区深度为 ρ 。



“弹性区-塑性软化区”冲击地压巷道结构模型

二、怎样得到？ 一个什么样公式？

基本方程：

应力应变关系

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \text{if } \varepsilon_c \leq \varepsilon \\ \lambda(\varepsilon_f - \varepsilon) & \text{if } \varepsilon_c \leq \varepsilon \leq \varepsilon_f \\ 0 & \text{if } \varepsilon \geq \varepsilon_f \end{cases}$$

损伤演化方程

$$D = \begin{cases} 0 & \text{if } \varepsilon_c \leq \varepsilon \\ \frac{\lambda}{\sigma_c}(\varepsilon - \varepsilon_c) & \text{if } \varepsilon_c \leq \varepsilon \leq \varepsilon_f \\ 1 & \text{if } \varepsilon \geq \varepsilon_f \end{cases}$$

三维情况

$$D = \frac{\lambda}{\sigma_c}(\bar{\varepsilon} - \varepsilon_c)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$$

二、怎样得到？ 一个什么样公式？

基本方程：

平衡方程：

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0$$

应变分量：

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}, \gamma_{r\theta} = 0$$

弹性区本构关系：

$$\varepsilon_\theta = \frac{1-\mu^2}{E} \left(\sigma_\theta - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_r \right)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1-\mu^2}{E} \left(\sigma_r - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_\theta \right)$$

塑性区本构关系：

$$\sigma_\theta = m\sigma_r + (1-D)\sigma_c$$

二、怎样得到？ 一个什么样公式？

弹性区应力：

$$\sigma_r = \frac{\rho^2}{r^2} \sigma_r^p + \left(1 - \frac{\rho^2}{r^2}\right) P \quad \sigma_\theta = -\frac{\rho^2}{r^2} \sigma_r^p + \left(1 + \frac{\rho^2}{r^2}\right) P$$

损伤变量：

$$D = \frac{\lambda}{\sigma_c} \left(\frac{\rho^2}{r^2} \varepsilon_c - \varepsilon_c \right)$$

塑性区应力：

$$\sigma_r = \frac{\sigma_c + \lambda \varepsilon_c}{m-1} \left[\left(\frac{r}{a}\right)^{m-1} - 1 \right] - \frac{\lambda \varepsilon_c}{m+1} \left[\frac{\rho^2}{a^2} \left(\frac{r}{a}\right)^{m-1} - \frac{\rho^2}{r^2} \right]$$
$$\sigma_\theta = m \frac{\sigma_c + \lambda \varepsilon_c}{m-1} \left[\left(\frac{r}{a}\right)^{m-1} - 1 \right]$$
$$- \frac{m \lambda \varepsilon_c}{m+1} \left[\frac{\rho^2}{a^2} \left(\frac{r}{a}\right)^{m-1} - \frac{\rho^2}{r^2} \right] + \sigma_c + \lambda \varepsilon_c \left(1 - \frac{\rho^2}{r^2}\right)$$

二、怎样得到？ 一个什么样公式？

巷道系统平衡方程：

$$P = \frac{\sigma_c}{2} \left[\left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) + 2 \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) \left(\frac{\rho}{a} \right)^2 - \frac{\lambda}{E} \left(\frac{\rho}{a} \right)^4 \right]$$

$$K = \frac{\lambda}{E}$$

二、怎样得到？ 一个什么样公式？

冲击地压发生扰动响应失稳准则

若煤岩变形系统处于非稳定平衡状态，则无论扰动 ΔP 多么小，都会导致响应塑性破坏区 $\Delta \rho$ 的无限增长。

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta P} = \frac{d\rho}{dP} = \infty$$

二、怎样得到？ 一个什么样公式？

临界应力 P_{cr} :

$$\frac{P_{cr}}{\sigma_c} = \frac{1}{m-1} \left[K \left(1 + \frac{1}{K} \right)^{\frac{m+1}{2}} - K - 1 \right]$$

二、怎样得到？ 一个什么样公式？

□ 一般地，取煤岩介质的内摩擦角 $\varphi=30^\circ$ ，得 $m=3$ ，得：

临界应力：

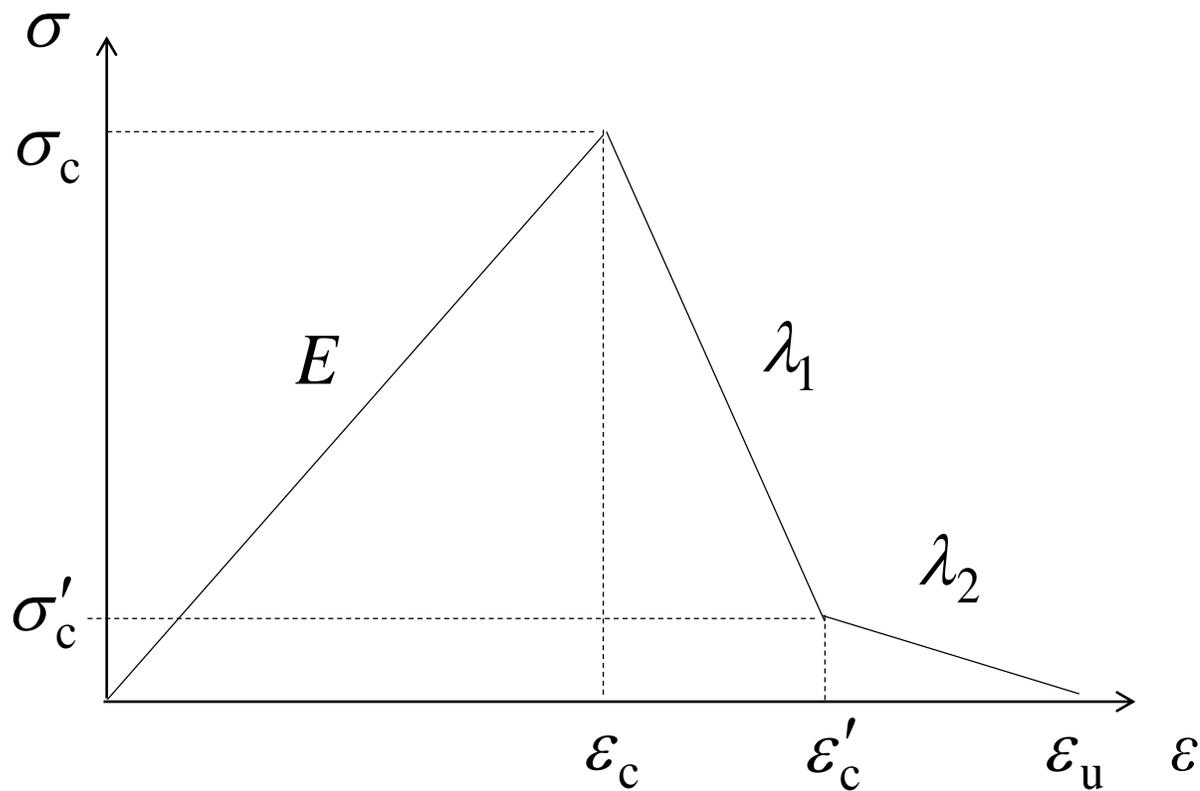
$$P_{\text{cr}} = \frac{\sigma_c}{2} \left(1 + \frac{1}{K} \right)$$

临界塑性区深度：

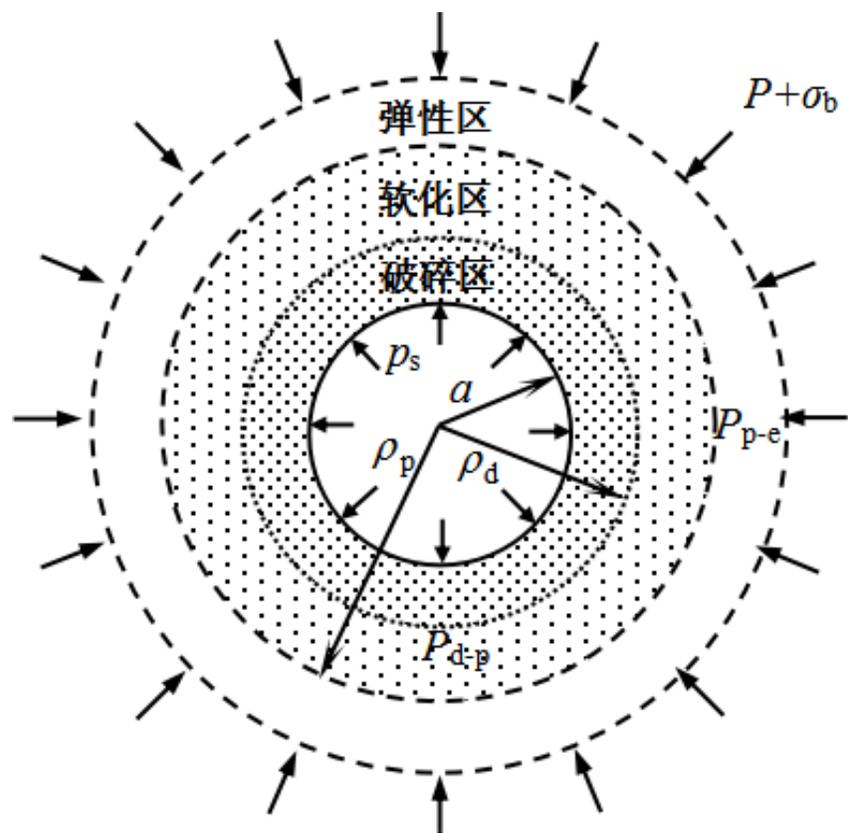
$$R = a \sqrt{1 + \frac{1}{K}} - a$$

二、怎样得到？ 一个什么样公式？

煤岩体变形破坏的**三线性**本构模型



二、怎样得到？ 一个什么样公式？



巷道系统方程

$$\frac{P}{\sigma_c} = \frac{m+1}{2} \left[\frac{p_f}{\sigma_c} + \frac{1+K}{m-1} - \frac{K}{m+1} \left(\frac{\rho}{\rho_f} \right)^2 \right] \left(\frac{\rho}{\rho_f} \right)^{m-1} - \frac{1+K}{m-1}$$

$$p_f = p_s \left(\frac{\rho_1}{\rho_0} \right)^{q-1} + \left(\frac{a}{1-q} \right) \left[1 - \left(\frac{\rho_d}{a} \right)^{q-1} \right] + \left(\frac{b}{1+q} \right) \left[1 - \left(\frac{\rho_d}{a} \right)^{q+1} \right]$$

失稳判据

$$\frac{d\rho}{dP} = \infty$$

◆ 冲击地压发生的临界指标

➤ 临界应力:

$$\frac{P_{\text{gr}}}{\sigma_c} = \frac{m+1}{2} \left(\frac{P_{\text{d-p}}(\rho_d = \rho_{\text{dcr}})}{\sigma_c} + \frac{1 + \lambda_1/E}{m-1} \right) \left(\frac{E}{\lambda_1} + (1 - \xi) \right)^{\frac{m-1}{2}} - \frac{\lambda_1/E}{2} \left(\frac{E}{\lambda_1} + (1 - \xi) \right)^{\frac{m+1}{2}} - \frac{1 + \lambda_1/E}{m-1}$$

➤ 临界软化区半径:

$$\rho_{\text{cr}} = \rho_0 \sqrt{\frac{p_s(q-1) + a}{b}} \sqrt{(1-\xi) + \frac{E}{\lambda_1}}$$

➤ 临界破碎区半径:

$$\rho_{\text{dcr}} = a \sqrt{\frac{p_s(q-1) + \alpha}{\beta}}$$

考虑“弹性-软化-破碎”三分区
巷道冲击地压力学分析模型

汇 / 报 / 提 / 纲

三、这样公式能解释哪些基本问题？

解决冲击倾向性与冲击危险性关系

定量厘清冲击倾向性与冲击危险性之间的理论关系

理论关系

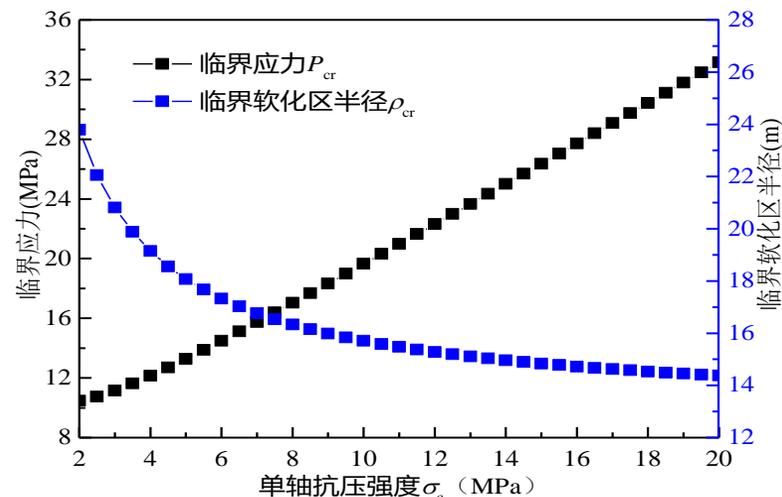
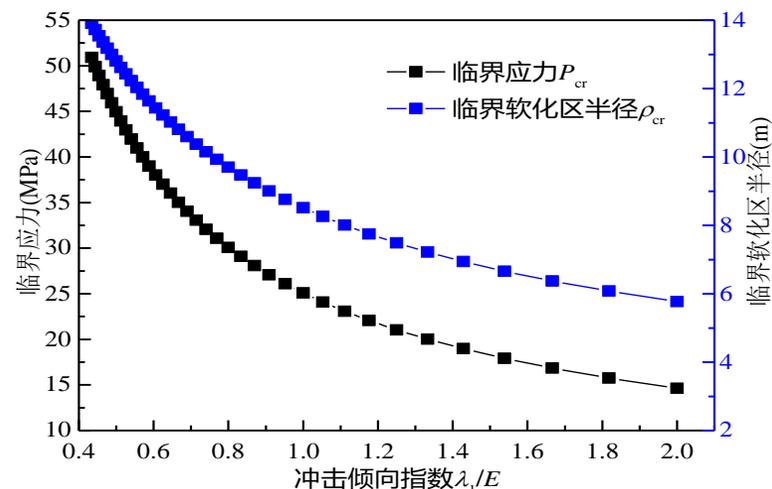
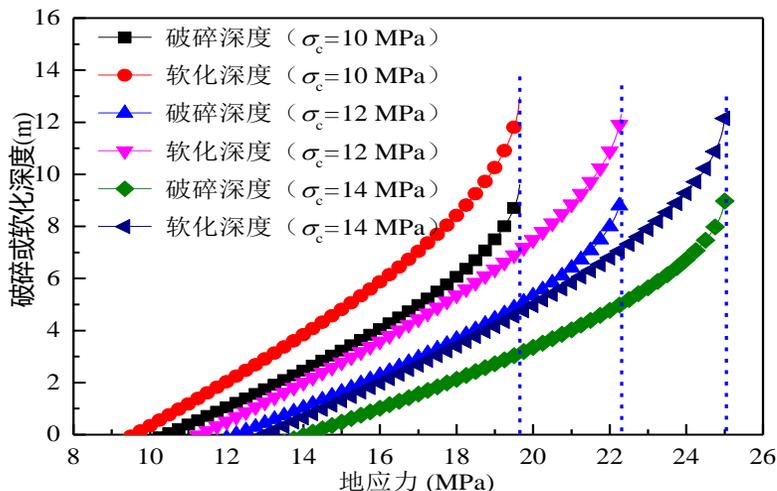
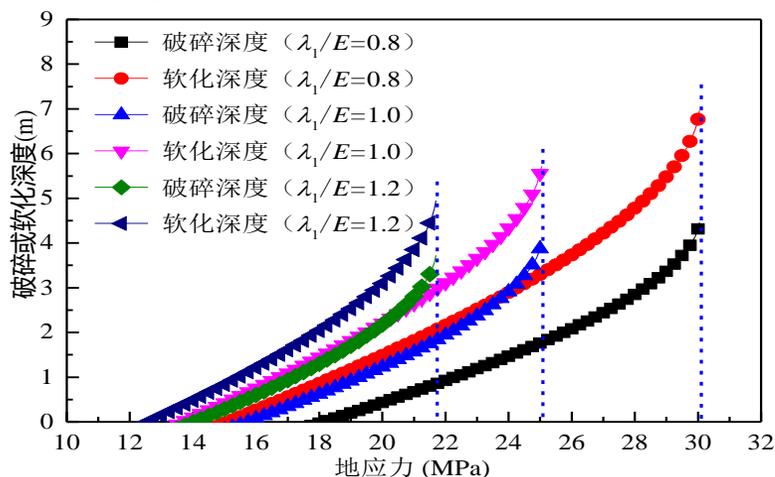
- 冲击危险性指标应根据巷道变形系统中应力参量临界值提出。

$$\frac{P_{cr}}{\sigma_c} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{K} \right)$$

冲击倾向性指标

冲击危险性指标 $K_{cr} = \frac{P}{P_{cr}}$

- 冲击倾向性越大，冲击启动临界载荷越低，冲击危险性越高。



解决冲击倾向性与冲击危险性关系

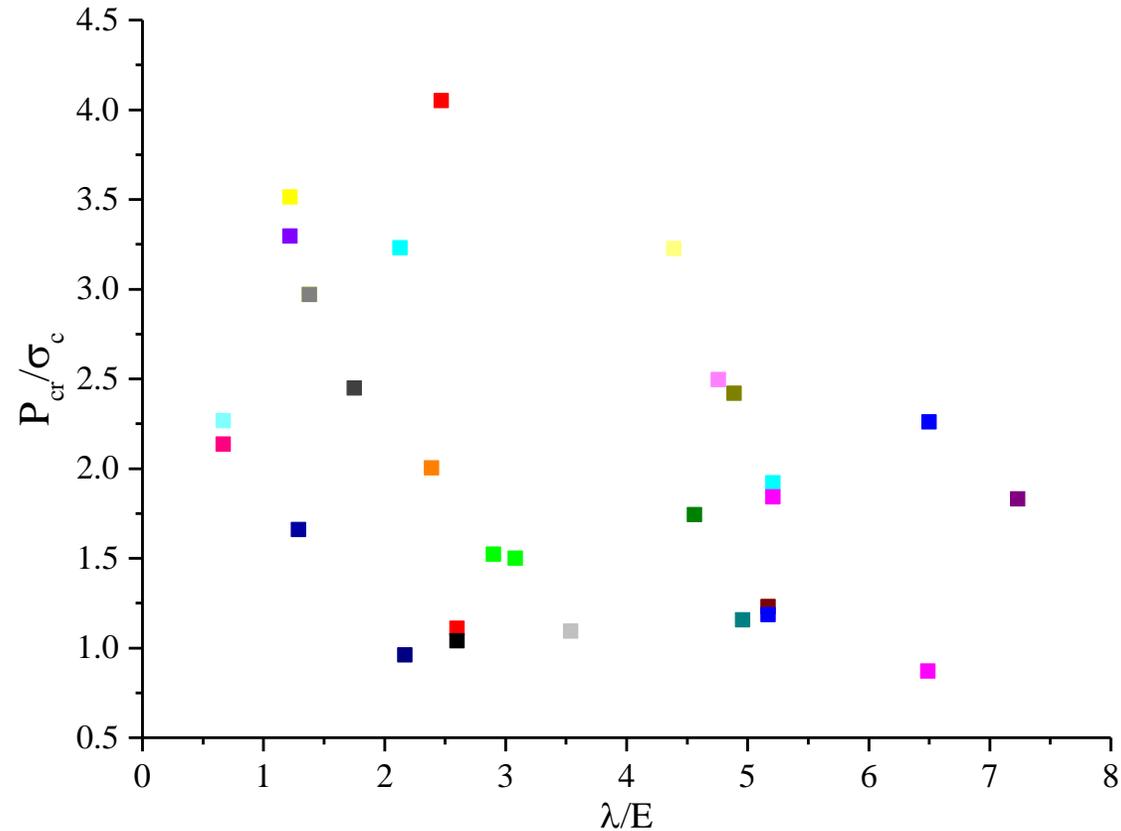
我国部分煤矿冲击地压发生的临界载荷理论值

矿名	现行煤层冲击倾向性鉴定指标				冲击倾向性指数 $K=\lambda/E$	临界载荷值 P_{cr}/MPa	临界载荷与抗压强度比 P_{cr}/σ_c
	动态破坏时间 DT/ms	弹性能指数 W_{ET}	冲击能指数 K_{ET}	单轴抗压强度 σ_c/MPa			
耿村煤矿	1665	1.38	3.37	16.00	2.60	17.74	1.11
千秋煤矿	1667	4.62	3.39	16.68	3.08	25.08	1.50
砚北煤矿	1023	7.06	12.80	9.85	6.50	22.28	2.26
华亭煤矿	2640	10.11	6.67	13.72	5.21	26.29	1.92
门克庆煤矿	325	8.84	8.62	28.01	6.49	24.29	0.87
集贤煤矿	186	4.30	1.56	7.33	1.38	21.79	2.97
山寨煤矿	1516	3.96	5.18	7.40	4.89	17.92	2.42
宽沟煤矿	774	12.07	2.52	17.33	2.17	16.65	0.96
东峡煤矿	33	6.94	9.08	11.98	7.23	21.91	1.83
崔木煤矿	352	1.86	5.56	17.10	5.17	21.04	1.23

解决冲击倾向性与冲击危险性关系

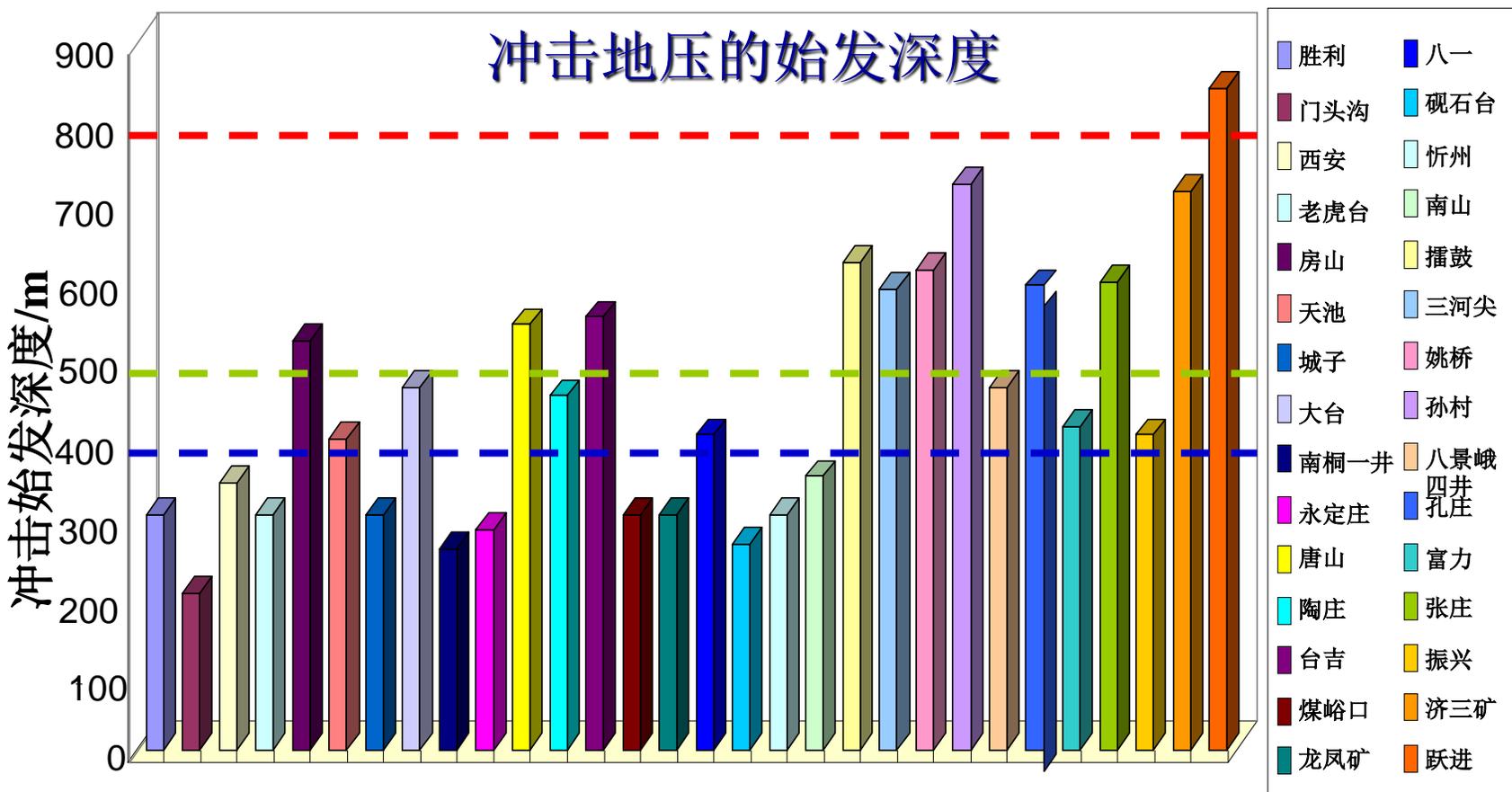
冲击倾向性 λ/E 和临界应力、单轴抗压强度比 P_{cr}/σ_c

的统计关系



解决冲击地压发生临界采深的理论界定

□ 揭示冲击地压矿井的临界开采深度：我国一般为**200m~400m**，少数矿井达到**500m**以上。苏联基泽洛夫和库茨涅茨等矿区冲击地压开始发生的深度为180~400m；波兰煤矿的冲击地压始发深度为200m；德国煤矿冲击地压的始发深度为300~400m。



➤ 基于理论公式的定量计算是量化确定某一矿区的临界开采深度或**预测新建矿井的临界深度的关键**。若不考虑构造应力，设煤层上覆岩层的容重为 γg ，巷道埋深为 H ，则上覆岩层压力 $P=\gamma g H$ 。

◆ 则发生**冲击地压临界开采深度**：

$$H_{cr} = \frac{P_{gcr}}{\gamma g}$$

解决冲击地压发生临界采深的理论界定

我国部分煤矿冲击地压发生的临界采深值

矿名	现行煤层冲击倾向性鉴定指标					冲击倾向性 指数 $K=\lambda/E$	矿井临界开采深度		
	动态破坏时 间 DT/ms	弹性能指 数 W_{ET}	冲击能指 数 K_{ET}	单轴抗压强 度 σ_c/MPa	理论 值/m		统计 值/m	计算误差	
张双楼矿	1188	8.23	5.46	19.66	4.96	910	850	7%	
唐山矿	459	5.90	1.43	9.63	1.29	639	540	18%	
红阳三矿	489	4.26	1.53	7.51	1.22	990	1082	8%	
龙郓煤业	287	6.35	0.84	12.70	0.67	1085	933	16%	
招贤煤矿	573	11.05	2.96	13.47	2.90	880	792	11%	
集贤煤矿	186	4.30	1.56	7.33	1.38	871	689	26%	
海石湾矿	674	3.29	4.76	7.83	4.39	1010	961	5%	

解决支护对冲击地压到底有什么影响的理论问题

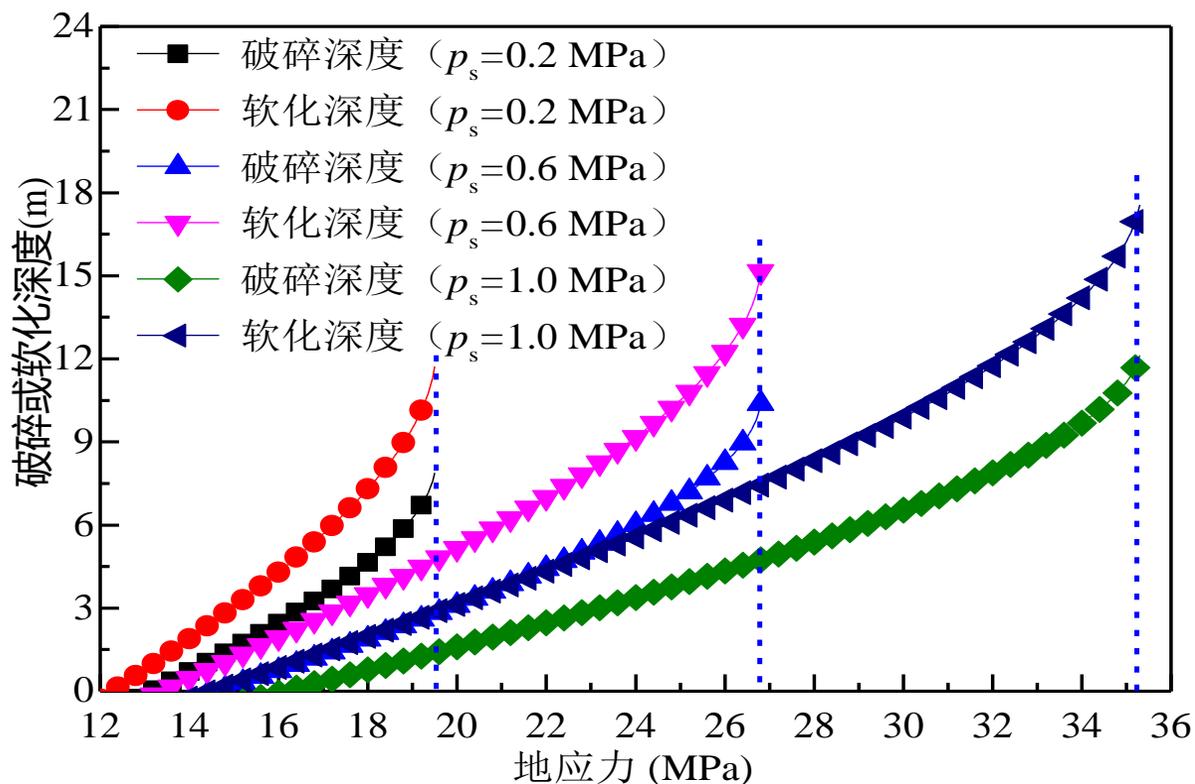
支护强度对临界载荷的影响：

$$\frac{\text{临界应力}}{P} < \boxed{P_{cr}} = \frac{\sigma_c}{2} \left(1 + \frac{1}{K} \right) \left(1 + \frac{\boxed{4p_s}}{\sigma_c} \right)$$

支护强度

支护对巷道冲击启动的影响机制及其规律

- 由理论公式绘制“围岩-支护”系统中围岩软化、破碎深度发育规律曲线。从理论曲线来看，支护对围岩的作用主要体现在两个方面：其一，**支护结构抑制围岩破碎发育速度**；其二，**支护大幅度提升冲击启动的门槛值-临界应力 P_{cr}** 。



“围岩-支护”系统中围岩软化、破碎深度发育规律

随环境应力增量围岩软化深度发育尺寸

地应力	支护强度			
	0 MPa	0.2 MPa	0.6 MPa	1.0 MPa
10 MPa	0	0	0	0
12 MPa	0.387	0	0	0
14 MPa	3.415	1.834	0.459	0
16 MPa	7.78	4.301	1.947	0.849
18 MPa	12.03	7.299	3.50	1.974
20 MPa	(冲击)	11.834	5.161	3.127
22 MPa	-	15.983	7.001	4.319
24 MPa	-	(冲击)	9.170	5.565
26 MPa	-	-	12.237	6.884
28 MPa	-	-	16.912	8.307
30 MPa	-	-	(冲击)	9.889
32 MPa	-	-	-	11.739
34 MPa	-	-	-	14.201

支护对巷道冲击启动的影响机制及其规律

➤ 支护强度增量与临界应力增量间定量关系：

$$\Delta P_{cr} = 2 \left(1 + \frac{1}{K} \right) \Delta p'_s$$

◆ 巷道支护强度增量与巷道冲击地压启动的临界应力增量间**呈现出正比关系**。二者增量的定量相关度，如右表所示。其中，当巷道**支护强度增加12.5%**时，巷道**冲击启动的临界应力增加一倍**。

支护强度增量与临界应力增量关系 (K=1)

ΔP_{cr}	5%	10%	15%	20%	25%
$\Delta p'_s$	20%	40%	60%	80%	100%

临界应力相关参数选择

组号	单轴抗压强度/MPa	冲击倾向性指数	内摩擦角/(°)	支护应力/MPa	临界应力/MPa
1	5	1	30	0.6	7.54
2	10	2	32	0.8	10.48
3	15	3	34	1.0	13.77
4	20	4	36	1.2	17.23
5	25	5	38	1.4	20.87
6	30	6	40	1.6	24.70

临界应力相关参数选择

组号	支护应力增量				
	0	0.25 MPa	0.50 MPa	0.75 MPa	1.00 MPa
1	7.54	8.68	9.88	11.12	12.41
2	10.48	11.39	12.31	13.25	14.21
3	13.77	14.63	15.51	16.40	17.30
4	17.23	18.11	18.99	19.89	20.79
5	20.87	21.87	22.71	23.64	24.58
6	24.70	25.67	26.65	27.64	28.63

解决巷道防治后安全系数到底怎样算的问题

我国部分煤矿巷道支护的防冲能力定量核算：

$$\text{安全系数 } K_{cr} = \frac{P}{P_{cr}} = \frac{\text{地应力 } \checkmark}{\text{临界载荷 } \checkmark}$$

矿名	现行煤层冲击倾向性鉴定指标				冲击倾向指数 $K=E/\lambda$	支护强度 p_s/MPa	临界载荷 P_{cr}/MPa	典型地应力均值 $/\text{MPa}$	安全系数	是否显现
	动态破坏时间 DT/ms	弹性能指数 W_{ET}	冲击能指数 K_{ET}	单轴抗压强度 σ_c/MPa						
龙郓煤业	287	6.35	0.84	12.70	0.67	0.33	33.85	34.50	0.98	是
陈家沟矿	5124	14.5	4.97	9.86	4.76	0.35	28.95	25.42	1.14	否
龙家堡矿	398	4.39	1.86	12.82	1.75	0.43	36.94	42.27	0.87	是
耿村煤矿	1665	1.38	3.37	16.00	2.60	0.33	19.57	17.92	1.09	是
红阳二矿	296	1.92	2.55	8.35	2.47	0.34	39.80	30.15	1.32	否
招贤煤矿	573	11.05	2.96	13.47	2.90	0.41	24.12	25.94	0.93	是
崔木煤矿	352.2	1.858	5.56	17.10	5.17	0.34	23.84	24.30	0.98	是
阳城矿	176	3.64	2.22	7.70	2.13	0.31	29.27	23.12	1.27	否
华亭煤矿	2640	10.11	6.67	13.72	5.21	0.36	29.74	27.69	1.07	是
红阳三矿	489	4.26	1.53	7.51	1.22	0.35	31.04	32.94	0.94	是

谢谢! Thanks!

