

# 含气多孔介质卸压层裂的间隔特征 ——突出的前兆<sup>1)</sup>

俞善炳 谈庆明 丁雁生 孟祥跃

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 含气多孔介质在卸压下的拉伸破坏有两种模式——层裂和突出。达到或超过临界破坏条件, 引发骨架层裂破坏; 达到或超过更强一些临界突出条件, 则引发突出。从采煤实践中逐次掘进的长过程看, 层裂是已达破坏条件而未到突出条件的情况, 进一步发展可能引发突出。实验表明层裂显现规律的间隔特征, 因而与层裂相关的瓦斯浓度变化和地音信息可以认作是突出的前兆。如果在内部形成破坏区, 渗流场与应力场的耦合有可能导致延时突出、石门自揭(岩石巷道掘进过程中临近煤层时岩体失稳破坏)等一类现象, 显现强的时效特征, 其时效是由渗流过程控制的。

**关键词** 突出, 层裂, 含气多孔介质

## 1 层裂与突出

为了进一步认识煤与瓦斯突出的基本机理, 在实验室研究中我们就最简单的一维情况进行实验观测和理论分析, 研究了受压的含气多孔介质在突然卸压下的拉伸破坏<sup>[1,2]</sup>。

实验在煤激波管中进行。在圆管内压制成足够长的均匀煤样, 密封充气使其有均匀的初始孔隙气压  $p_0$ , 这是高压段; 低压段连通大气。突然破膜造成界面压力突降至大气压力  $p_a$ 。在系列实验中, 每次压制的煤样尽量保持相同, 只变动初始孔隙气压  $p_0$ , 这就是变  $p_0$  系列实验。变  $p_0$  系列实验表明, 两个临界初始孔压  $p_{cr1}$  和  $p_{cr2}$  区分了三个现象模式, 无破坏模式 ( $p_0 < p_{cr1}$ )、层裂模式 ( $p_{cr1} < p_0 < p_{cr2}$ ) 和突出模式 ( $p_0 > p_{cr2}$ )。后面两种是破坏的两种不同模式。

第一临界条件  $p_0 = p_{cr1}$  是骨架有无层裂破坏的临界条件, 第二临界条件  $p_0 = p_{cr2}$  是否突出的临界条件。当然, 临界条件在此用  $p_0$  显写的形式  $p_{cr1}$  和  $p_{cr2}$  应该决定于除  $p_0$  外影响破坏的其它特征参数 (即是其它参数的函数)。文 [2] 用一个简单的理论模型来描写这类拉伸破坏, 表述了这两个临界条件。

可以说, 突出条件比破坏条件更强的条件 (破坏不一定突出, 突出必然破坏)。突出是强破坏, 破坏达至两相流; 层裂则是已达破坏条件而尚未到突出条件的中间情况, 骨架有拉伸破坏但仍很快趋于静平衡。

## 2 层裂的间隔特征

本节叙述实验显示的层裂的现象特征。实验装置的详细叙述可参阅文 [3]。为了能观察层裂

<sup>1)</sup>国家自然科学基金资助项目。

1997-02-18 收到第一稿, 1997-09-30 收到修改稿。

破坏区的情况, 实验管用透明有机玻璃管制成, 管内压制均匀煤样, 密封充气 ( $p_{cr1} < p_0 < p_{cr2}$ ) 后, 突然破膜使界面压力突卸至  $p_a$ , 界面附近一段煤被破坏层裂. 通过透明有机玻璃管壁, 可观察破坏区煤样在侧壁的迹象. 裂纹的基本取向可认为垂直于管轴, 并明显地分为两类 (见图 1). 一类是很细的裂纹, 是骨架内随机分布的微裂纹的局部发展与相连, 在全截面平均意义上骨架虽已被损伤弱化变得疏松, 但还未破坏至完全失效而形成全截面断裂. 破坏区前沿  $D$  的位置一般难以确定, 因为越靠近前沿, 破坏越轻微, 而且由于侧壁阻尼的影响, 在前沿  $D$  所在的横截面上, 中央部分虽已有裂纹, 而在侧壁处则未显裂纹 (用数学术语讲, 破坏区的裂纹分布以前沿侧壁处的随机期望最小); 另一类是全截面断裂, 并形成宽度在毫米量级的间隙, 把破坏区煤样分离成段 (层裂), 因此在实验中层裂区前沿  $S$  的位置则十分明确. 我们曾勉强地确定破坏区前沿, 试图得到破坏区原长  $L_D$  (总原长减去未破坏区长度) 随  $p_0$  变化的规律, 但散布误差太大, 难以发现其规律. 后来我们索性用明确的层裂区原长  $L_S$  (总原长减去未层裂区长度) 来看其随  $p_0$  变化的规律, 原以为散布情况不会变好, 但却令人满意地得到了  $L_S$  随  $p_0$  呈阶梯上升的规律 (见图 2). 有两例实验 (图 2 中  $\times$  所示) 因破膜不正常, 卸压格外缓慢, 但  $L_S$  值却仍近似处于台阶高度. 在实验误差范围内, 这一规律可近似用简单的线性等间隔阶梯函数来表示, 同时我们还可以把台阶凸沿联成的直线近似作为  $L_D$  随  $p_0$  变化的规律. 这一实验结果表明, 这类层裂并不是由随机的初始缺陷所决定, 而是由破坏过程的内在规律所控制的, 存在有间隔层裂的特征厚度, 在所做的实验条件下这一特征厚度近似为 37 ~ 38 mm.

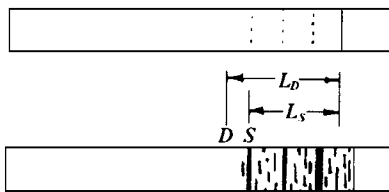


图 1  
Fig. 1

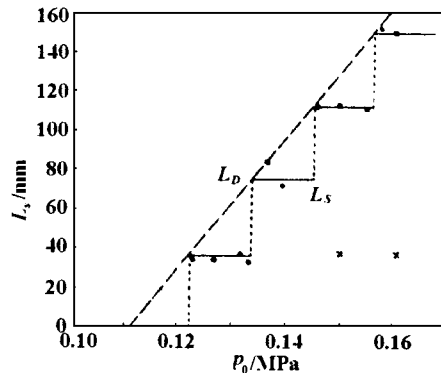


图 2  
Fig. 2

实际上, 在不少材料破坏的问题中出现有类似的特征长度问题, 如高速剪切变形中热塑剪切带有多个条带、泥土龟裂、靶弹破碎、砂土液化密实中都存在特征长度, 还可联想到散体输送中的特征长度等. 自然各有其具体的内在机理, 但或许有着失稳、分叉意义上的普遍共性, 是一类值得进一步研究的基本课题.

### 3 突出的前兆

前面讨论的一维模拟实验可以认为是开石门 (岩巷掘进至最后一层紧临煤层的岩石) 情况的理想模化, 从得到的认识出发可以进一步对煤巷掘进情况进行定性讨论.

我们仍讨论理想的一维情形. 把煤巷爆破掘进看成是在掘进后的新界面上造成突然卸压. 与开石门情况不同的只是孔隙气压的初始 (突卸瞬时) 分布不再是均匀的. 由于突卸时气体原是属于渗出状态, 因而孔压应有如图 3 所示的初始分布  $p_0(x)$ . 记炮掘掘进深度为  $x$ , 那么即时突出

的条件就是  $p_0(X) \geq p_{cr2}$ .

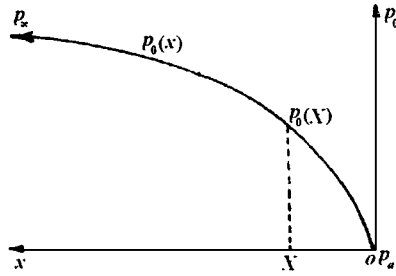


图 3  
Fig. 3

考虑周期性逐次掘进条件下的渗流过程. 假设不发生破坏, 孔隙率和渗透率认为均匀不变. 在周期 ( $T$ ) 突进 ( $X$ ) 的表面坐标系上, 孔隙压力分布随时间起伏 (掘进瞬时突然上升而时间  $T$  内逐渐下降): 在第  $i$  次掘进前瞬时, 孔隙压力分布为  $p_{0i}(x)$ , 掘进使表面 (坐标系) 突进  $X$ , 掘进后瞬时的孔隙压力分布为  $p_i(x) = p_{0i}(x + X)$ , 相当于孔隙压力“突升”, 随后在周期  $T$  内因气体渗出而降低. 我们感兴趣的是掘进新表面上的“突升”孔压  $p_{i0} = p_i(0) = p_{0i}(X)$ , 考察逐次掘进形成的时间序列  $\{p_{i0}\}$ , 应该有三种情形, 递增有界 ( $p_{i0} < p$ ), 递减有界 ( $p_{i0} > p_a$ ) 和恒值 (临界循环不变情况), 因而序列有极限  $p_l = \lim_{i \rightarrow \infty} p_{i0}$ . 我们可以利用恒速 (连续) 掘进下渗流的渐近解——渗流的恒稳推进解, 近似得到这一极限孔压. 恒稳推进的渗流压力分布为<sup>[1]</sup>

$$\frac{0 \mu w}{k p_a} x \text{ 由 } \frac{p}{p_a} \ln \left[ \frac{p}{p_a} \right] \text{ 缺陷 } \left. \vphantom{\frac{p}{p_a} \ln \left[ \frac{p}{p_a} \right]} \right\} \text{ 是由 } \frac{p}{p_a} \text{ 始 1}$$

即

$$\frac{p}{p_a} = \left\{ \frac{0 \mu w}{k p_a} x, \frac{p}{p_a} \quad (x \geq 0, p > p \geq p_a) \right.$$

是两个自变量的增函数,  $0$  为孔隙率,  $k$  为渗透率,  $\mu$  为气体粘性系数,  $w$  为推进速度. 令  $w = X/T$ ,  $x = X$ , 我们就近似得到

第 2 第  $\frac{p_l}{p_a} = \left\{ \frac{0 \mu X^2}{k p_a T}, \frac{p}{p_a} \quad (p > p_l > p_a) \right.$

$p_a$  是坑道大气压, 看作是不变的常量. 因此,  $(0 \mu X^2)/(k T)$  越大,  $p$  越大, 则  $p_l$  越大.

与我们讨论煤巷掘进情况下突出问题相关的是  $\{p_{i0}\}$  递增的情况. 如果

$$p_l > p_{cr2}$$

逐次掘进过程必然会在某  $N$  次导致  $p_{N0} \geq p_{cr2}$ , 而即时突出. 这就是说, 内部赋存状态特征量和外部掘进扰动特征量满足条件  $p_l > p_{cr2}$ , 掘进的发展终将引发突出, 我们称这一条件为突出的孕育条件.

在  $p_{i0}$  的逐次递增中, 显然有可能在某  $n$  次有  $p_{cr1} < p_{n0} < p_{cr2}$  ( $p_l > p_{cr1}$ ) 而在表面附近发生层裂破坏, 这表明继续递增容易到达  $p_{N0} \geq p_{cr2}$  ( $N > n$ ) 而即时突出, 因此层裂破坏可以看作是突出的前兆. 注意到如果  $p_{cr1} < p_l \leq p_{cr2}$ , 掘进发展虽会导致层裂, 但并不会导致突出; 另一方面当然也有可能一次跨过层裂条件而引发突出. 因此, 这儿“前兆”没有“充分”、“必要”的意味, 不表示“必然”、“必须”而只表示“可能”.

在第 2 节已叙述了层裂的间隔特征. 这有规律的间隔层裂会有规律的声发射, 并相应地会引起渗流的规律脉动, 而这两种信息能通过地音监测和瓦斯监测获取, 也就是得到内部间隔层裂的信息. 这样, 我们从理论上解释了下述经验认识: 突出前往往有规律的地音与规律的瓦斯脉动 (通常所说的瓦斯浓度忽大忽小).

#### 4 延时突出

对于延时突出, 人们往往笼统地归因于材料的时效——蠕变, 一直没有很好的解释. 为讨论简单起见, 我们将破坏条件写成

$$p_0 - \sigma \geq T_S$$

其中  $T_S$  为计及侧压及侧方剪阻影响的等效抗拉强度,  $p_0$  为掘进瞬时的孔隙气压,  $\sigma$  为总压应力.

看图 4(a), 掘进瞬时的孔隙压力分布是  $p_0(x)$ , 掘进  $X$  后新表面上应力突卸至  $p_a$ . 相对于应力波传播, 渗流是慢得多的过程, 因此我们先忽略不计渗流来考虑应力波向内传播, 在不发生破坏的假定下应该得到应力分布  $\sigma(x)$ .  $p_0(x)$  和  $\sigma(x)$  都是  $x$  的增函数. 如果在界面附近  $dp_0/dx > d\sigma/dx$ , 有效拉应力  $p_0 - \sigma$  有可能在内部某区域超过抗拉强度  $T_S$ , 而在界面附近则不满足这一破坏条件. 因此在应力波向内传播过程中有可能在内部某区域发生层裂破坏.

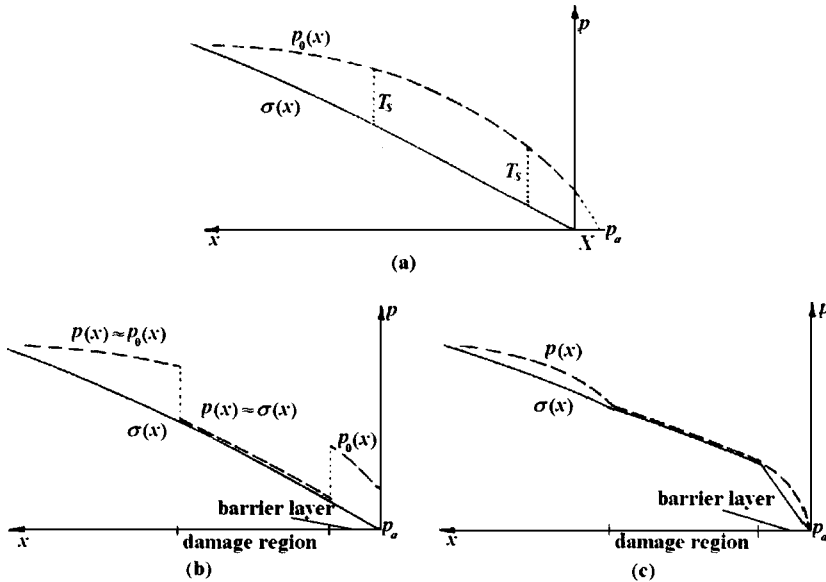


图 4  
Fig. 4

看图 4 (b), 应力波过程在内部形成层裂破坏区.  $\sigma(x)$  仍是  $x$  的增函数; 在未破坏区  $p(x) - p_0(x)$  保持不变, 而在破坏区骨架接近失效  $p(x) - \sigma(x)$ , 这一破坏区也就形成孔隙气体压力相对低的区域.

看图 4 (c), 在形成低压区的情况下, 渗流过程先使低压区压力升高. 如果把破坏区至界面之间的未破坏层叫做阻挡层, 那么阻挡层受到的压差在渗流作用下先有一增大期 (内壁压力  $p$  增高), 压差的增大有可能克服侧方剪阻而将阻挡层推出, 发生显现时效特征的压出、倾出或突出等现象<sup>[4]</sup>.

因此, 这类时效是由渗流过程控制的, 当阻挡层较厚、强度较高、渗透率较小、破坏区较大时, 可能会有较长的延时. 其实渗流场与应力场的耦合是显然的, 只是在通常情况下效应弱而忽略. 破坏是两相强耦合的显现, 破坏形成内部低压区后, 渗流更是明显改变应力场, 有可能发生显现这一时效特征的现象.

类似的情况可以发生在开石门前, 而掘进已近煤层的情形. 煤层中的  $p_0$  分布均匀, 岩层中炮掘引起的卸压应力波通过石门传入煤层, 石门附近的煤有可能层裂破坏形成低压区, 渗流使之会有升压, 压差增大有可能使石门阻挡层自行揭开. 顺便指出, 间隙突出的时效也可能源于同理.

层裂的信息作为突出的前兆, 也意味着可能延时突出.

### 参 考 文 献

- 1 Cheng Che-Min, Chen Li, Ding Yansheng. A laboratory study of coal gas outburst. In: Proc. of the 2nd Int. Symp. on Intense Dynamic Loading and Its Effects. Sichuan University Press, Chengdu, China, 1992: 3 ~ 15
- 2 俞善炳, 郑哲敏, 谈庆明, 丁雁生. 含气多孔介质的卸压破坏及突出的极强破坏准则. 力学学报, 1997, 29(6): 641 ~ 646 (Yu Shanbing, Cheng Che-Min, Tan Qingming, Ding Yansheng. Damage of porous media containing pressurized gas by unloading and the maximum damage principle for critical outburst. *Acta Mechanica Sinica*, 1997, 29(6): 641 ~ 646(in Chinese))
- 3 孟祥跃, 丁雁生, 俞善炳, 谈庆明. 一维含气多孔介质突然卸载破坏引起渗流变化的实验研究. 爆炸与冲击, 1997, 17(1): 15 ~ 22 (Meng Xiangyue, Ding yansheng, Yu Shanbing, Tan Qingming. Experimental study of gas permeability variation due to sudden unloading. *Explosion and Shock Waves*, 1997, 17(1): 15 ~ 22(in Chinese))
- 4 中华人民共和国煤炭工业部制定. 防治煤与瓦斯突出细则. 北京: 煤炭工业出版社, 1995. 59 (Anon. Details of protection from coal and gas outburst, issued by the ministry of coal industry of China. Beijing: Coal Industry Press, 1995. 59(in Chinese))

## SECTIONAL FRACTURING OF POROUS MEDIA CONTAINING PRESSURIZED GAS UPON UNLOADING ——FOREWARNING INFORMATION OF OUTBURST<sup>1)</sup>

Yu Shanbing Tan Qingming Ding Yansheng Meng Xiangyue  
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** A series of one-dimensional simulation experiments (coal shock-tube) showed that two kinds of damage, fracturing or outburst, could take place, when a porous medium containing pressurized gas and bearing compressive stress was suddenly unloaded. The critical condition of outburst is stronger than that of damage. In other words, outburst is a strong kind of damage. Therefore, there exists the case in which the damage condition is met while the outburst condition has not yet been met.

<sup>1)</sup> The project supported by the National Natural Science Foundation of China.

Received 18 February 1997, revised 30 September 1997.

Experiments showed a sectional characteristic of the weak kind of damage-fracturing, i. e. several sections were formed as a result of fracturing and they had regular length.

During the tunnelling of a coal seam, the fracturing may be regarded as forewarning of outburst. Therefore, special sound radiations and gas seepage pulses resulting from the regular fracturing may be considered as forewarning information of outburst.

A damage region may appear at a distance away from the newly exposed surface by excavation. Pore gas pressure in this damage region decreases at first because of the damage of skeleton and becomes lower than that of its neighbouring regions. Afterwards, porous gas will flow into the damage region from its neighbouring regions. The pore pressure and then the total compressive stress in the damage region will increase. If the total compressive stress increases towards a sufficiently high level to overcome the shear resistance then the undamaged layer near the exposed surface (barrier layer) will be pushed out. Thus, some delayed phenomena, elayed outburst and self-opening-up of coal seam, could be explained.

**Key words** outburst, fracturing, porous medium