

突然卸载下含气煤的层裂*

黄弘读 郑哲敏 俞善炳 谈庆明

(中国科学院力学研究所)

摘要 在模拟煤与瓦斯突出的激波管实验中发现, 按瓦斯初压大小存在两种破坏模式: 低压开裂和高压突出. 在低压开裂模式中发现了层裂现象: 破坏区煤样分成数段, 每段的厚度大致相等, 段间裂缝的宽度在毫米量级. 用准静态层裂模型来讨论层裂现象, 分析认为, 层裂段的特征长度是煤的拉伸强度和侧壁摩擦力的比值. 计算结果说明: (1) 层裂段的个数随气体初压的变化关系与实验相符; (2) 层裂的产生是个快过程, 可忽略渗流; (3) 裂缝的发展是个慢过程, 由渗流和侧壁摩擦共同控制.

关键词 含气煤 层裂 渗流
中图分类号 TD 712.5

一维煤激波管模拟实验^[1]表明, 根据卸载的强弱, 发生持续突出和开裂两类破坏. 在低压开裂模式中发现了层裂现象^[2,3], 下面将提出一个考虑渗流的准静态层裂模型来讨论层裂现象.

1 一维激波管模拟实验中的层裂现象

图 1 是一维煤激波管的示意. 圆管以铝膜分为两段, 一段内装压制的均匀煤样, 并充气达到初始孔压 p_0 ; 另一段连通大气, 压力为 p_a . 突然破膜使煤样自由面突然卸压至 p_a .

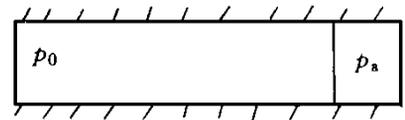


图 1 煤激波管

Fig. 1 Coal shock-tube

变 p_0 系列实验表明, 存在两个临界初始孔压 p_{cr1} 和 p_{cr2} , 它们区分了 3 个现象模式: (1) $p_0 < p_{cr1}$ 为无破坏模式; (2) $p_{cr1} < p_0 < p_{cr2}$ 为开裂模式, 自由面附近一段煤被破坏开裂, 破坏区总长度 l_0 随 p_0 增加而增加; (3) $p_0 > p_{cr2}$ 为突出模式, 破坏发展到流化, 形成两相流.

若瓦斯初压 p_0 略高于 p_{cr1} , 突然破膜后, 自由面附近有一小段煤被破坏, 出现许多细小的裂纹; 若升高 p_0 , 则破坏区向煤的纵深发展, 出现更多的小裂纹, l_0 增大; 继续升高 p_0 使之达到某一定值, 出现了第一条横贯截面的大裂缝; 若再升高 p_0 , 则破坏区继续发展, 在第一条大裂缝的左边出现了小裂纹; 若 p_0 继续升高达到一定值, 则会出现第二条大裂缝; 若进一步升高 p_0 , 则破坏区继续发展, 有可能出现第三、第四条大裂缝. 这些大裂缝把破坏区煤样分成数段, 每段的长度大致相等, 这就是层裂现象. 图 2 所示为出现 3 条大裂缝的情况. 裂纹的前沿与自由面的距离为破坏区原始长度 l_0 , 层裂区前沿 s 离自由面的距离为层裂区的原始长度 l_s . 从 p_0 的系列实验, 得到了 l_s 随 p_0 呈阶梯上升的规律^[3] (见图 3). 这说明层裂现象不是随机的, 而是由破坏的内

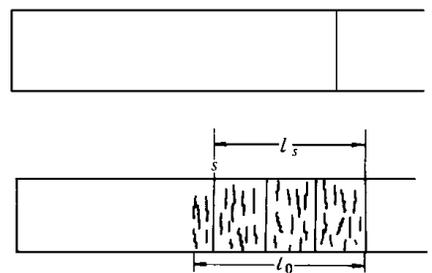


图 2 层裂现象

Fig. 2 Layered fractures

收稿日期: 1998-10-20

* 中国科学院自然科学基金项目、国家自然科学基金项目 (批准号: 19572068)

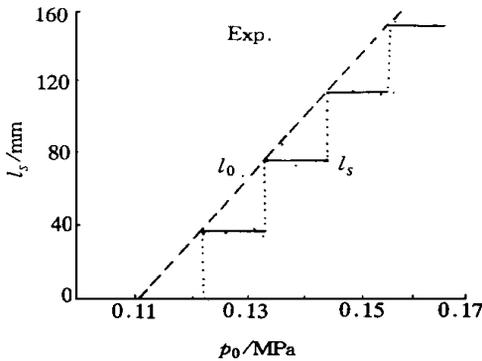


图 3 l_s 随初压的变化关系

Fig. 3 Variation of length of layered section with initial gas pressure

2 含气煤的层裂模型

2.1 层裂的特征长度

在丁晓良^[4]的工作中, 发现煤样的初次破坏面呈拱状, 见图 4. 笔者的模型借用了这个概念, 认为层裂破坏都经历了拱形结构的形成和破坏过程. 一旦形成拱形结构, 压力通过拱传递到侧壁, 同时拱受到侧壁的摩擦剪力, 因此客观上存在一个



图 4 初次破坏面形状

Fig. 4 Preliminary fracture surface

拱的影响区, 其有效厚度 l^* 取决于煤的结构、管截面形状以及管壁与煤的接触特性. 当瓦斯初压增加到某一数值时, 拱结构即被破坏, 于是出现一个层裂段, 而拱的影响区长度就是层裂段的特征长度 l^* . 如果气体初压足够高, 则可能依次有多个拱结构的形成和破坏, 出现多个层裂段. 当先形成的拱被破坏, 原来由它承担的压力将转移到后形成的拱结构上, 从而促使它的破坏, 而它们的破坏条件是一样的.

下面对层裂段的特征长度 l^* 作一分析. 从实验来看, 存在开始破坏的临界孔压 p_{cr1} . 可以认为, 当超压 p (即 $p_0 - p_a$) 小于煤样的拉伸强度 σ_t 时, 不发生破坏; 随着 p 增加并超过 σ_t , 破坏区开始出现并扩展; 当 p 继续增加并达到某一数值 p^* 时, 出现第一个层裂段. p^* 与煤样力学特性、管壁摩擦等有关, 可写成 $p^* = f(\sigma_t, \mu, k, \rho_s, \rho_g, l/A)$, 其中, ρ_s, ρ_g 分别为固相和气相的密度; ρ_g 为煤样的初始孔隙率; σ_t 为煤样的拉伸强度; k/μ 为气体渗流系数; l/A 为单位长度的管壁摩擦.

因为层裂出现的时间在毫秒量级, 在出现之前可忽略渗流效应, 于是在上式右端可去掉 $\rho_g \mu/k$ 参数; 开裂破坏时质点速度比开裂破坏波的传播速度小得多, 因而作为开裂条件可忽略煤和气体的惯性, 于是在上式右端可去掉参数 $\rho_s(1 - \rho_g)$. 所以有 $p^* = f(\sigma_t, l/A)$.

因为拉裂是压差 p^* 克服抗拉强度 σ_t 及管壁总摩擦力 $l^* l/A$ 的结果, 因此有 $p^* - \sigma_t - l^* l/A = 0$ 或 $l^* = (p^* - \sigma_t) / (l/A)$, 从而得到 $l^* = F(\sigma_t, l/A)$.

取量纲独立的 $\sigma_t, l/A$ 为基本量, 则可得到 $(l^* l/A) / \sigma_t = c$, 其中 $(l/A) / \sigma_t$ 不随压力而变化, 右端的 c 为一常数. 由于 σ_t 和 l/A 很难准确测定, 特别是因为实验研究中管中的煤样受有大小不详的侧向压力, 这里将利用实验资料间接予以确定. 文献 [3, 5, 6] 指出, 由实验得到的破坏区总长度 l_0 随瓦斯初压的变化 (图 3 中的虚线) 近似为线性关系, 即 $l_0 = (p_0 - p_a - \sigma_t) / (l/A)$, 其斜率即为管壁摩擦倒数的值, 而在 p_0 轴上的截距为 $(p_a + \sigma_t)$. 于是得到: $l/A = 0.35 \text{ MPa/m}$, $\sigma_t = 0.012 \text{ MPa}$. 同时根据实验所测到的层裂段长度 $l^* = 37 \text{ mm}$, 可以确定 $c = 1$. 因此 $l^* = \sigma_t / (l/A)$, 即层裂段的特征长度为煤的拉伸强度与单位长度管壁摩擦的比值.

若 $p < p^*$, 破坏区总长度 l_0 未超过拱的影响区长度 l^* , 则只在自由面附近的煤中发生散布的裂纹, 不发生层裂. 若 $p > p^*$, 则当破坏区长度 l_0 发展到 l^* 时, 拱结构被破坏, 出现第一个层裂段. 该层裂段将在压差作用下克服侧壁摩擦向前运动, 而在其后方则出现裂缝间隙. 随着裂缝不断增宽, 裂缝内的气体压力下降, 于是从邻接裂缝的煤体中将有气体渗进裂缝而使那里的压力升高. 裂缝内气体的压力由已层裂的煤段的运动和气体渗流共同决定. 随着裂缝内气体压力的下降, 对于深处煤样来说相当于又一次卸载, 其破坏也是先出现拱形破坏面. 当裂缝内气体的压力下降得足够小, 使新破坏区的长度 ($l_2 = (p_0 - p - \sigma_t) / (l/A)$, 其中 p 为裂缝内气体的压力) 能达到拱的影响区长度 l^* 时, 则出现第二个层裂段. 如果出现第二个层裂段, 那么它也像第一个层裂段那样在压差的作用下运动, 其后方的裂缝宽度增大, 裂缝内的气体压力下降, 于是从该裂缝两端的煤体中又有气体渗进而使裂缝内压力升高. 同样地, 裂缝内气

体的压力由煤段的运动和气体渗流共同决定. 若裂缝内气体的压力下降得足够小, 则可能出现又一层裂段. 如此反复, 可以判断是否还会出现更多的层裂段.

在笔者的模型中作如下假设: 每个层裂块产生后作刚体运动, 忽略变形但计及惯性力; 气体状态方程满足等温关系; 侧壁摩擦及渗流系数均取平均意义上的常数值.

2.2 层裂段的运动和裂缝宽度的变化

如前所述, 若 $p > p^*$, 则在离自由面 l^* 处出现第一个层裂段. 第一个层裂段产生后, 其前后方的压差使其克服侧壁摩擦向前运动, 其后方的裂缝宽度随之扩展, 裂缝内气体压力下降, 两端有气体渗入, 在这里层裂段的运动和气体渗流是耦合的. 下面分别描述层裂段的运动以及裂缝宽度的变化 (参考图 5).

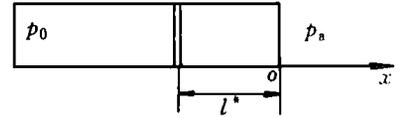


图 5 层裂区坐标

Fig. 5 Layered section and crack

(1) 层裂段的运动

层裂段的运动方程和初始条件为

$$p - p_a - l^* l / A = s(1 - \epsilon_0) l^* \ddot{l}, \quad t = 0, \quad \dot{l} = 0, \quad l = 0, \quad (1)$$

式中, p 为裂缝内气体的压力; ϵ_0 为裂缝初始宽度, 这里 ϵ_0 取为煤样最小粒径的一半.

(2) 裂缝宽度的变化

随着层裂段的运动, 其后方的裂缝宽度随之增大, 裂缝内的气体压力下降, 而裂缝两端有气体渗入又使压力升高. 记层裂段为 1 区, 裂缝后的煤样为 2 区, 先给出两区气体的控制方程和定解条件, 即

$$\begin{cases} -\frac{\partial p_1}{\partial x} = \frac{\epsilon_0 \mu}{k} u_1, \\ \frac{\partial p_1}{\partial t} + \frac{\partial (\epsilon_1 \mu_1)}{\partial x} = 0, \\ p_1 = \epsilon_1 a^2, \\ t = 0: u_1 = 0, p_1 = p_0, \\ x = -l^*: p_1 = p, \\ x = 0: p_1 = p_a. \end{cases} \quad (2)$$

从 1, 2 区流入裂缝 的质量流量分别为

$$q_{m_1} / A = -\epsilon_0 \epsilon_1 u_1, \quad x = -l^*; \quad q_{m_2} / A = \epsilon_0 \epsilon_2 u_2, \quad x = -l^*. \quad (4)$$

t 时刻裂缝 内气体的质量和密度分别为 $m = m_0 + \int_0^t (q_{m_1} + q_{m_2}) dt$, $\epsilon = \frac{m}{A}$, 其中 m_0 为 ϵ_0 内的气体质量, $m_0 = \epsilon_0 A \epsilon_0$. 利用等温关系 $p = \epsilon a^2$, 得到决定裂缝内气体压力 p 与裂缝宽度 之间的第二个关系, 即

$$p = a^2 m / A. \quad (5)$$

由于煤段的运动和气体的渗流是耦合的, 需要联立以上 5 个方程来求解.

如果压力足够高, 能够产生第二个或更多个层裂段, 那么各层裂段的运动方程和定解条件与上面的数学描述相类似, 而且各层裂段的运动是互相联系的.

3 结果及分析

描述层裂现象有 3 个要点: 层裂段的特征长度; 层裂段的个数随气体初压的变化关系; 各层裂段相邻的裂缝的宽度. 其中 已在 2.1 节中讨论过, 下面将讨论后两点, 特别是裂缝内气体压力的变化对能否产生更多的层裂段及裂缝的发展至关重要.

为检验模型的合理性, 需要对照有关实验结果. 这里给出一个算例, 主要参数取如下数值.

煤样: $s = 1.53 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $t = 0.012 \text{ MPa}$, $\epsilon_0 = 0.376$, $l^* / A = 0.35 \text{ MPa/m}$;
孔隙气体 CO_2 : $k = 10.6 \times 10^{-13} \text{ m}^2$, $\mu = 1.491 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ($T = 300 \text{ K}$), $\epsilon_0 = 1.80 \text{ kg/m}^3$.

图 6 把计算得到的 3 条裂缝内气体的压降过程 (左) 和实验中固定空间点上测到的压降过程 (右) 进行对比. 这里要说明的是, 实验曲线对应的气体初压较高, 而计算曲线对应的气体初压较低, 并且实验所测为管壁气压, 非单纯的裂缝气压. 尽管如此, 二者还是有可比性. 可以看到: 两者的压力曲线的形状大体上是相似的. 气体压力变化先是陡降, 而且时间尺度都在毫秒量级, 在陡降谷底有一个“驼峰”, 然后是缓降, 而且越往煤的深处发展, 气体压降幅值越小. 计算曲线和实验曲线的比较在总体一致的前提下, 存在细节上的差别. 实验曲线上陡降谷底的“驼峰”的时间尺度为理论曲线的 2~3 倍, 这可能是因为实验曲线对应的煤样比理论曲线对应的煤样压得更为密实因而渗流较慢的缘故.

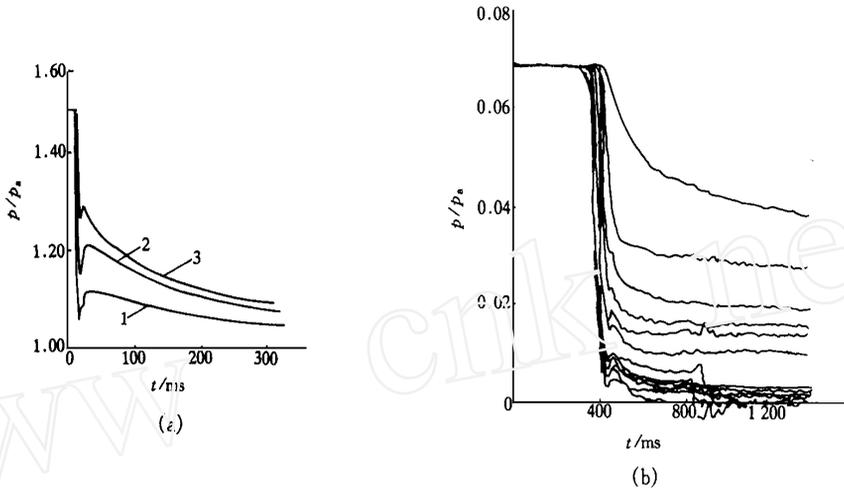


图 6 理论压力曲线与实验压力曲线的对比

Fig. 6 Variation of pressure in crack with time

(a) 理论压力曲线; (b) 实验压力曲线

表 1 列出了破坏区情况随气体初压的变化关系. 其中 p_0 为气体初压; l_i ($i = 1 \sim 5$) 为各个破坏区的长度; l_0 为破坏区总长; l_i ($i = 1 \sim 4$) 为各裂缝的宽度.

表 1 破坏区长度与裂缝宽度随初压的变化

Table 1 Variation of length of damage section(s) and width of crack(s) with initial pressure

p_0 /MPa	l_1 /mm	l_2 /mm	l_3 /mm	l_4 /mm	l_5 /mm	l_0 /mm	1/mm	2/mm	3/mm	4/mm
0.126	37	12				49	1.4			
0.130	37	27				64	1.8			
0.133	37	34				71	2.1			
0.135	37	37	5			79	2.4	0.1		
0.138	37	37	15			89	3.0	1.1		
0.142	37	37	30			104	3.8	2.1		
0.144	37	37	36			110	4.2	2.8		
0.147	37	37	37	16		127	4.6	3.0	1.0	
0.150	37	37	37	28		139	5.0	3.3	1.6	
0.153	37	37	37	37	6	154	5.3	3.7	2.0	0.6

从表 1 可以看到, 离自由面越近, 裂缝宽度越大; 离自由面越远, 裂缝宽度越小, 这与实验现象相符. 按上表的数据画出层裂区长度随初压的变化曲线见图 7. 与实验曲线图 3 比较可以看出, 计算得到的层裂段的个数随气体初压的变化关系与实验基本上相符.

4 结 论

用准静态层裂模型能够解释煤与瓦斯突出中低压开裂下层裂现象的主要特征, 包括: (1) 层裂现象存

在特征长度 l^* ; (2) 层裂段的个数随气体初压升高呈阶梯上升的关系; (3) 裂缝的宽度在毫米量级, 越靠近自由面处的裂缝越宽; (4) 层裂段的出现是个慢过程, 由气体渗流和侧壁摩擦所控制.

在煤矿开采过程中, 如果瓦斯压力略高于 p_{cr1} ($p_{cr1} = p_a + \dots$), 则开挖只发生开裂破坏; 如果瓦斯压力较高而造成煤体的层裂, 则层裂煤段的运动可能导致危险. 分析说明, 出现第一个层裂段所需的瓦斯压力值为 $p_d = p_a + \dots + l^* / A$. 为了预防层裂可能带来的危险, 可采取预抽瓦斯的方法使得瓦斯压力低于 p_d .

另外, 在模型中假设层裂段的运动过程中煤样不发生变形, 孔隙率也认为不变. 但实际上煤在运动中是要发生变形的, 孔隙率也要变化, 这对结果会有影响, 需要今后进一步考虑.

参 考 文 献

- 1 Cheng Chemin, Li Chen, Ding Yanshen. A laboratory study of coal gas outburst. In: Proc of the 2nd int Symp on intense dynamic loading and its effects. Chengdu: Sichuan University Press, 1992. 3~15
- 2 孟祥跃, 丁雁生, 俞善炳等. 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
- 3 俞善炳, 谈庆明, 丁雁生等. 含气多孔介质卸压层裂的间隔特征——突出的前兆. 力学学报, 1998, 30 (2): 145~150
- 4 丁晓良. 煤在瓦斯渗流作用下破坏及其持续扩展的机制: [学位论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1988
- 5 谈庆明, 俞善炳, 朱怀球等. 含瓦斯煤在突然卸压下的开裂破坏. 煤炭学报, 1997, 22 (5): 514~518
- 6 Cheng Chemin, Tan Qingming, Yu Shanbing. Damage wave theory for coal and gas outburst. In: Wang L L, Kobayashi A. Eds. Proc of Sino-Japanese Symp RADDFs. Hefei: Press of USTC, 1998. 91~97

作 者 简 介

黄弘读, 男, 博士生. 1995年毕业于上海交通大学工程力学系. 1998年获中国科学院力学研究所工程力学硕士学位, 现为浙江大学土木工程系博士研究生. 浙江省杭州市浙江大学 428 信箱, 邮政编码: 310027.

LAYERED FRACTURES OF COAL CONTAINING PRESSURIZED GAS BY SUDDEN UNLOADING

Huang Hongdu Zheng Zhemin Yu Shanbing Tan Qingming

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract Fracture in the form of layers of finite thickness is an interesting phenomenon in coal shock-tube experiments simulating coal gas burst. When the initial pressure of the gas is higher than a certain value, after sudden unloading it can be seen that the damaged coal forms several layers or slugs separated by transversal macroscopic fractures. The thickness of each layer is almost constant and the width of the fracture is on the order of millimeters. A model is presented to analyze this phenomenon. The development of successive fractures under different initial pressure is calculated. The calculation is in satisfactory agreement with experimental data.

Keywords coal containing pressurized gas, layered fracture, permeability

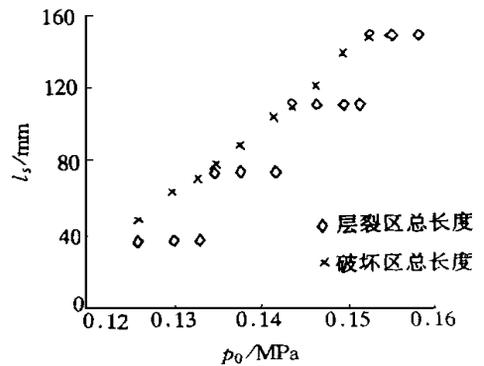


图 7 层裂区长度随初压变化的理论曲线
Fig. 7 Variation of length of layered section with initial gas pressure