

含气多孔介质的卸压破坏及突出的极强破坏准则¹⁾

俞善炳 郑哲敏 谈庆明 丁雁生
(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 用简单的一维刚骨架破坏失效模型描述受压含气多孔介质在界面突然卸压下的拉伸破坏, 这类破坏具有不散发传播的特性, 可用稀疏间断波来表示, 即破坏波. 存在有极强破坏波, 它由类似于定常爆燃的 C-J 条件确定. 提出了临界突出的极强破坏准则.

关键词 突出, 破坏波, 含气多孔介质, 极强破坏波

引 言

煤与瓦斯突出是煤矿井下生产所遇到的威胁生命财产安全的一类灾害, 从力学的观点来看, 是在地应力下处于受压状态的含瓦斯煤在开采的卸压扰动下有可能引发的动力现象, 现象的主题是材料破坏, 且发展到流动. 材料属于含气多孔介质, 载荷特征则是受压状态下卸压. 因此, 突出基本机理研究的核心问题是含气多孔介质的卸压破坏. 我们通过最简单的一维情况来进行研究, 以便于实验观测和理论分析, 作定性和定量的探讨.

1 一维实验

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, 密封充气使其具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 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 . 实验情况和结果的详细叙述可见文 [1] 和 [2]. 这里把实验结果择要作一概述.

变 p_0 系列实验表明, 两个临界初始孔压 p_{cr_1} 和 p_{cr_2} 区分了三个现象模式 (在所做的变 p_0 系列实验条件下, $p_{cr_1} = 0.15 \text{ MPa}$, $p_{cr_2} = 0.20 \text{ MPa}$):

$p_0 < p_{cr_1}$, 为无破坏模式 (无破坏-渗流). 测点的 $p-t$ 曲线 (压力历史) 为缓降型, 对应于气体的渗出;

$p_{cr_1} < p_0 < p_{cr_2}$, 为层裂模式 (破坏-渗流). 界面附近一段煤被破坏层裂, 破坏区长度随 p_0 而增加. 在破坏区内, $p-t$ 曲线先有一段陡降, 对应于破坏, 随后是缓降. 随着破坏区前沿向内传播, 陡降 (破坏) 明显衰减, 在破坏区终端仍有最小陡降. 在未破坏区, $p-t$ 曲线为无陡降的缓降型;

$p_0 > p_{cr_2}$, 为突出模式 (流化-两相流). 破坏发展到流化, 形成煤粉和瓦斯的两相流. $p-t$ 曲线有极大陡降, 随着向内传播, 各点的 $p-t$ 曲线的形状变化不大, 可作准恒稳描述.

¹⁾ 国家自然科学基金资助项目.

1996 - 12 - 18 收到第一稿, 1997 - 07 - 07 收到修改稿.

郑哲敏^[1]提出了一个简单的理论模型，以稀疏间断及其传播来近似描述这类卸压破坏。本文作进一步分析探讨。

2 破坏失效的应力应变模型

决定多孔介质变形和破坏的有效应力用线性近似可一般地表示为

$$T_e = (1 - \alpha) p - \beta p \tag{1}$$

其中 T_e 为有效拉应力， p 为孔隙气压， β 为总压应力， α 是骨架参数，可取为骨架与骨架材料的体弹性模量之比^[3] ($0 \leq \alpha \leq 1$)。式 (1) 可理解为：孔隙压力对骨架的作用相当于给骨架张力 $(1 - \alpha) p$ ， $(1 - \alpha)$ 即为等效张力系数。若 $\alpha \ll 1$ ，便是土力学中的 Terzaghi 公式。

考虑总应力卸压。当卸到小于张力时，骨架受拉 ($\beta < (1 - \alpha) p$, $T_e > 0$)。当卸压使有效拉应力增大到其极大值时，骨架拉伸失稳而破坏。失稳破坏过程是骨架的损伤弱化过程，拉应变迅速变大而有效拉应力迅速变小。计及侧压 s 的影响，这一失稳破坏准则可线性近似表示为

$$(1 - \alpha) p - \beta p = T_M - 2 [s - (1 - \alpha) p] \tag{2}$$

其中 T_M 为骨架的抗拉强度 ($p=0$ 和 $s=0$ 时)， $[s - (1 - \alpha) p]$ 是有效侧压， β 为侧压对强度的影响系数。

假定失稳破坏过程是如此快，以致于不必顾及气体在骨架中的相对运动^[1]，即忽略渗流的影响，把含气多孔介质作为气固两相耦合的混相介质处理；又不计骨架材料的体积变化，因而总体积变化就是孔隙体积即气体体积的变化；用等温关系来描述气体则有孔隙气压 p 和一维拉应变 E 之间的关系

$$p(\alpha_0 + E) = p_0 \alpha_0 \tag{3}$$

α_0 为初始孔隙率。

我们讨论的主题是骨架的破坏，忽略破坏前的应变而将破坏前的骨架近似当作刚性骨架^[1]

$$E = 0 \quad (p = p_0) \tag{4}$$

失稳破坏准则 (2) 可以重写成

$$\beta = D, \quad D = p_0 - T_s \tag{5}$$

其中

$$D = (1 - 2\alpha)(1 - \alpha), \quad T_s = T_M - 2s \tag{6}$$

D 为卸压的失稳破坏应力， β 是孔压对失稳破坏应力的影响系数， α 是骨架参数； T_s 是纯骨架 ($p_0=0$) 计及侧压影响的抗拉强度。

如果失稳破坏过程发展到骨架在拉伸方向失效，即 $T_e \rightarrow 0$ ， $\beta \rightarrow 0$ ，因而拉伸失效状态应满足

$$\beta = p = \frac{\alpha_0 p_0}{\alpha_0 + E} \tag{7}$$

这样，我们给出了一个简单的理想应力应变模型，用以描述含气多孔介质的卸压破坏。看图 1，从 σ 轴上某一未破坏状态出发，沿轴卸压 ($E = 0$)；到达 $(\sigma_D, 0)$ 则失稳破坏，这是破坏过程的起始状态；破坏后的失效状态 (σ_t, E_t) 应在曲线 $\sigma = p = p_0 p_0' / (\sigma_0 + E)$ 上。这里，对从破坏的起始状态 $(\sigma_D, 0)$ 到失效状态 (σ_t, E_t) 之间的中间路径并未作具体描述。

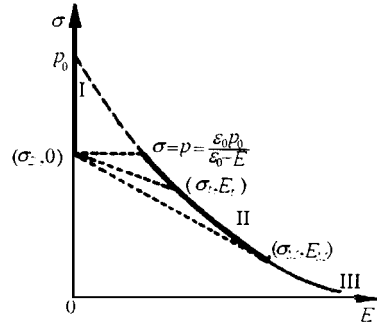


图 1

Fig. 1

3 破坏波

考虑处于受压的一维半无限长含气多孔介质的情况，扰动前状况完全均匀。界面压力从原来的受压压力 $p_0 (> p_D)$ 突然卸压到 p_a ，我们可以基于上节所给的应力应变模型用类似于爆燃波的一维波理论来讨论界面突然卸压引起的破坏层的传播。

显然，由破坏准则 (5)，骨架有无破坏的临界条件是

$$p_D(p_0) = p_a \quad \text{或写成} \quad p_0 = p_{CD} \quad (8)$$

其中

$$p_{CD} = \frac{p_a + T_s}{\epsilon_0} \quad (9)$$

p_{CD} 是临界破坏孔压。若 $p_0 < p_{CD}$ 即 $p_D < p_a$ ，界面压力降到 p_a 并未到达破坏应力 p_D ，骨架无破坏。若 $p_0 > p_{CD}$ 即 $p_D > p_a$ ，压降中 p_D 以上部分未引起破坏，成弹性稀疏波极快地向内传播，在刚性模化下则理想地当作瞬时传播；而 p_D 以下部分压降则维持间断形式向内传播（这有别于纯气体中稀疏间断不稳定而分化成一族发散的连续稀疏波）。这一稀疏间断波描写了破坏及其传播^[1]，称之为破坏波。在快的弹性前驱波之后，跟随着一个慢得多的破坏波（在弹塑性动力学中，弹性前驱波后则是慢的塑性波）。始、终态为 $(\sigma_D, 0)$ ， (σ_t, E_t) 的破坏间断的波速 D 为

$$D = \sqrt{\frac{1}{c} \frac{\sigma_t - \sigma_D}{E_t - 0}} = \sqrt{\frac{D - \sigma_D}{c E_t}} \quad (10)$$

其中 c 为波前的混相密度。

4 极强破坏波

显然，存在有极强破坏波，它的总压降 $p_D - p_M$ ，孔压降 $p_0 - p_M$ ，破坏应变 E_M 和波速 D_M 均达极大值，其确定条件类似于定常爆燃的 C-J 条件

$$u \quad D_M = w_M, \quad w_M = \sqrt{\frac{1}{c} \frac{dp}{dE_M}} = \frac{M}{\sqrt{c_0 p_0}} \quad (11)$$

w_M 为波后的扰动传播速度。在图 1 中，从 $(\sigma_D, 0)$ 向失效曲线作切线，切点就是极强破坏波的波后失效状态 (σ_M, E_M) 。由 (7)，条件 (11) 可写成

$$(p - p_M)^2 = p_0(p_0 - p_D) \tag{12}$$

即

$$p_M = p_0 - \sqrt{p_0(p_0 - p_D)} = p_0 - \sqrt{p_0[(1 - \alpha)p_0 + T_s]} \tag{13}$$

及

$$D_M = \frac{\sqrt{p_0} - \sqrt{p_0 - p_D}}{\sqrt{0.5c}} = \frac{\sqrt{p_0} - \sqrt{(1 - \alpha)p_0 + T_s}}{\sqrt{0.5c}} \tag{14}$$

这样，我们得到了极强破坏应力 p_M 和极大波速 D_M ，由此就有极强破坏的临界条件

$$p_M(p_0) = p_a \quad \text{或写成} \quad p_0 = p_{CM} \tag{15}$$

其中

$$p_{CM} = \frac{2p_a + T_s + \sqrt{(2p_a + T_s)^2 - 4p_a^2}}{2} \tag{16}$$

p_{CM} 是临界极强破坏孔压。

因此，对于理想无阻尼破坏的一维传播，存在三种情况（见图1）：

$p_0 < p_{CD}$ 即 $p_D < p_a$ ，无破坏；

$p_{CD} < p_0 < p_{CM}$ 即 $p_M < p_a < p_D$ ，非极强破坏波；

$p_{CM} < p_0$ 即 $p_a < p_M$ ，极强破坏波后紧随连续稀疏波。压降中 p_D 到 p_M 之间部分成极强破坏波传播，而 p_M 以下部分则以极强破坏波为前沿成一族连续稀疏波紧随其后，描写破坏后散体的继续稀疏。

5 临界突出的极强破坏准则

实际上，破坏是有阻尼的，例如实验条件下就存在侧壁阻尼，这也是介质内摩擦的表现。阻尼不仅存在于破坏波所描写的破坏层内，而且在波后的失效状态，一般仍能承受摩擦。失效后的散体只有稀疏到足够松散，才不再承受摩擦，可以称之为流化。我们可以假定，极强破坏后的失效状态点 (p_M, E_M) 就是失效曲线上的流化点，也就是极强破坏后失效即已流化。“突出”应该是破坏、流化而流动的现象，因而临界极强破坏（无后随稀疏波）也就是突出的临界条件，这就是临界突出的极强破坏准则。

类似于爆燃波，将有限厚的阻尼破坏层仍处理成间断波（实质上是准恒稳处理），但压降中要扣除阻尼损耗才是动量变化部分，因此波速公式中应计及阻尼损耗。在变 p_0 系列实验条件下，考虑 $(p_D, 0)$ 至 (p_a, E_a) 这一特征破坏层的阻尼损耗，它随 p_0 的变化规律也用线性近似表示成 $(p_D) = T - p_0$ ，其中 T 和 p_0 是系统参数。定义特征破坏应力 p_D^*

$$p_D^* = p_D - \text{损耗} = (p_0 - T_s) - (T - p_0) = p_0 - T_s^* \tag{5^*}$$

p_D^* 被表示成和 p_D 对应的相同形式，当然，计及阻尼损耗的影响修正后的两个等效参数，孔压的特征影响系数 p_D^* 和特征强度 T_s^* 只能认为是系统参数。这样，计及阻尼损耗后，临界破坏条件和临界极强破坏条件可由 (9) 和 (16) 对应写出

$$p_{CD}^* = \frac{p_a + T_s^*}{2} \tag{9^*}$$

$$p_{CM}^* = \frac{2p_a + T_s^* + \sqrt{(2p_a + T_s^*)^2 - 4p_a^2}}{2} \quad (16^*)$$

两个临界条件区分了三种情况，分别对应于实验的三个现象模式：

$p_0 < p_{CD}^*$ ，无破坏模式；

$p_{CD}^* < p_0 < p_{CM}^*$ ，界面压降成非极强破坏波，波后未流化，仍有摩阻，使破坏波随着向内传播而衰减（波后已破坏区的介质减速），最后终止。这对应于层裂模式；

$p_{CM}^* < p_0$ ，界面压降成极强破坏波及紧随的连续稀疏波向内传播，极强破坏波后即已流化而无摩阻，形成持续的破坏波传播及波后流动。这对应于突出模式。

如果极强破坏波后的稀疏流仍作混相平衡（两相无相对运动）处理，那么这应是中心波相似解。不计弹性前驱波，前沿的极强破坏波波速为

$$D_M^* = \frac{\sqrt{p_0} - \sqrt{(1 - \theta^*)p_0 + T_s^*}}{\sqrt{\theta^*} c} \quad (14^*)$$

但是稀疏流是两相非平衡流（两相可有不同速度），非平衡效应会影响波的传播。可以想象，经过一段非恒稳传播过程会逐渐趋向恒稳，形成一个恒稳推进的非平衡变化区，它包含前面的破坏层和后面的两相流弛豫区，区末为终压 p_a ，与区后的稳定平衡流衔接。临界突出则始终是单一极强破坏波恒稳推进。恒稳推进速度 D_s^* 为

$$D_s^* = \sqrt{\frac{p_a - p_a}{c E_a}} = \sqrt{\frac{p_a(\theta^* p_0 - T_s^* - p_a)}{\theta^* c (p_0 - p_a)}} \quad (10^*)$$

取变 p_0 系列实验得到的两个临界孔压值，即令 $p_{CD}^* = P_{cr_1} = 0.15 \text{ MPa}$ 和 $p_{CM}^* = p_{cr_2} = 0.20 \text{ MPa}$ 及 $p_a = 0.1 \text{ MPa}$ ，由 (9^{*}) 和 (16^{*}) 可得到 $\theta^* = 1$ 和 $T_s^* = 0.05 \text{ MPa}$ ，然

后就可由 (14^{*}) 和 (10^{*}) 分别计算得到突出的初始推进速度（极强破坏波波速度） $D_M^*(p_0)$ 和后期恒稳推进速度 $D_s^*(p_0)$ 两条理论曲线，计算中 $\theta = 0.4$ ， $c = (1 - \theta) s$ ， $s = 1.6 \text{ t/m}^3$ 为煤的真密度。实验时测得有一维空间各测点的 $p-t$ 曲线，对它们进行数值处理得到破坏间断推进速度的实验数据^[1]。理论曲线和实验数据均表示在图 2 上。实验数据随 p_0 增大而愈益发散的程度，显然不只是实验（包括数值处理）误差所致，而是反映了非平衡效应所引起的前期非恒稳推进。两条理论曲线很好地界定了实验数据。由于实验测量段所限，在 p_0 较大的实验中，非恒稳传播的后期未能反映出来。

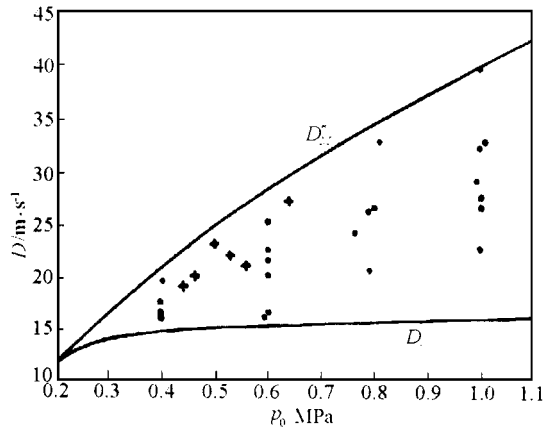


图 2
Fig. 2

6 结 语

1) 受压含气多孔介质在卸压下的拉伸破坏，因气固两相的耦合作用，具有不发散传播的特性，可用稀疏间断波来表示，即破坏波。

- 2) 存在有极强破坏波, 它由 $C-J$ 条件确定.
- 3) 临界极强破坏波 (无后随稀疏波) 对应于临界突出, 这就是临界突出的极强破坏准则.
- 4) 突出现象开始以极强破坏波为前沿向内推进, 由于其后继续稀疏引起两相非平衡效应, 破坏波会有一段非恒稳推进期, 逐渐趋向恒稳.
- 5) 如果侧压 s 很大, 以致于破坏应力 d^* 大于 p_0 , 则引起其它类型的破坏. 这相应于地应力很大而在卸压时被侧压压坏.

参 考 文 献

- 1 Cheng Che-Min, Chen Li, Ding Yansheng. A laboratory study of coal gas outburst, Proc. of the 2nd Int. Symp. on Intense Dynamic Loading and Its Effects, June 1992, Chengdu, China, Sichuan University Press, China, 3 ~ 15
- 2 Chen Li, Ding Yansheng, Cheng Chemin. Experimental study of steady state propagation of fracture front in one-dimensional coal gas outburst, Proc. of the 2nd Int. Symp. on Intense Dynamic Loading and Its Effects, June 1992, Chengdu, China, Sichuan University Press, China, 154 ~ 157
- 3 Nur A, Byerlee JD. An exact effective stress law for elastic deformation of rock with fluids, Journal of Geophysical Research, 1971, 76: 6414 ~ 6419

DAMAGE OF POROUS MEDIA CONTAINING PRESSURIZED GAS BY UNLOADING AND THE MAXIMUM DAMAGE PRINCIPLE FOR CRITICAL OUTBURST

Yu Shanbing Cheng Chemin Tan Qingming Ding Yansheng

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080, China)

Abstract Damage of porous media containing pressurized gas by unloading is formulated using a simple failure model and neglecting percolation. The damage can be shown to be caused by a discontinuous rarefaction wave —— a “damage wave”. Also, there exists a maximum damage wave, which satisfies $C-J$ condition as in the case of steady deflegration. A maximum damage principle for critical outburst is proposed.

Key words outburst, damage wave, porous medium, maximum damage wave