

含瓦斯煤在突然卸压下的开裂破坏*

谈庆明 俞善炳 朱怀球 郑哲敏

(中国科学院力学研究所) (北京大学) (中国科学院力学研究所)

摘要 为了解炮掘引起的煤体破坏效应,用断裂间断波模型讨论含瓦斯煤在突然卸压条件下的开裂破坏,考虑了煤样的抗拉强度和瓦斯初始压力的影响,计算了断裂波的传播和断裂段的长度,断裂段的计算长度与实验值符合较好。用断裂波模型能说明较弱的一类煤和瓦斯突出,即开裂破坏的主要特征

关键词 煤与瓦斯突出 开裂 破坏 断裂波

中图分类号 TD 713

郑哲敏 (1982)^[1]曾经指出,煤和瓦斯突出现象的能量主要来自储存于煤层中的瓦斯。大型突出释放的能量很大,抛出的煤和瓦斯量也很大;小型突出中相应各量均小;当外载(主要是地压和瓦斯压力)低到一定程度,只能引起煤体表层发生开裂而抛出煤量极小,可称之为压出。煤击波管模拟实验说明,在煤层突然卸载条件下,根据卸载强度的大小,发生持续突出和短暂开裂两类现象。郑哲敏等 (1992)^[2]提出卸载断裂是以拉伸断面形式从煤的表面向内部传播的,并针对突出和开裂 2 类现象分别给出 2 种数学模型。由于缺乏煤在拉伸条件下的本构和强度的资料,文献 [2] 中没有给出有关开裂现象的具体结果

为了煤矿的安全生产,了解断裂的发生条件和规律对于突出预报来说具有十分重要的意义。为此,首先需要有煤在拉伸条件下的力学性质,我们专门设计了实验装置并进行了煤样的拉伸实验,得知:煤样的拉伸先经历弹性变形,当有效拉应力增加到某一数值即发生突然的脆性断裂,这一数值即是煤的拉断强度 σ 。

下面将对煤击波管所模拟的一维半无限长含瓦斯煤样,在一端突然暴露于大气环境下的卸载断裂现象进行理论分析,最后将计算得到的断裂区的长度随瓦斯初始压力的变化和实验结果进行比较

1 拉伸断裂阵面的传播

在煤击波管实验中观测到煤样一端突然卸载以后,只要充气初始压力 p_0 足够高,即 p_0 超过强度 σ 和环境大气压 p_a 之和,便有断裂阵面向深部传播,阵面的传播速度比煤样内弹性卸载波的波速小两个量级。可以近似地把煤样当作刚脆性材料,即弹性波几乎不需要时间向煤样纵深传得很远。弹性波所到之处,煤样内压力降至 $p_0 - \sigma$,可以假设断裂阵面的前侧压力为 $p_0 - \sigma$,而后侧则突然降至某一值 p ,下降的幅值在初始时刻应是最大的,随着阵面向深部推进,降幅逐渐减小,而 p 逐渐增大,直至降幅达到零,阵面停止传播,此时断裂区长度达到最大值。由于断裂的传播远比渗流快,可以假设破裂过

收稿日期: 1997-02-17

* 国家自然科学基金(编号: 19232041)资助项目

程中可忽略有渗流发生, 而气体的状态变化满足等温关系

初始时刻, 含瓦斯煤样占据半空间, $x < 0$, $x = 0$ 是煤与空气的界面, 煤样运动满足如下守恒方程, 即

$$(1) \text{ 气相质量守恒} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon \rho u}{\partial x} = 0,$$

式中, ϵ 为孔隙率; ρ 和 u 为气相密度和速度; t 为时间; x 为空间坐标

$$(2) \text{ 固相质量守恒} \quad \frac{\partial (1 - \epsilon) \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial (1 - \epsilon) \rho_s u_s}{\partial x} = 0,$$

式中, ρ_s 和 u_s 为固相密度和速度

(3) 气、固两相的总动量守恒

$$\epsilon \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + (1 - \epsilon) \rho_s \left(\frac{\partial u_s}{\partial t} + u_s \frac{\partial u_s}{\partial x} \right) - \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\pi}{A} = 0,$$

式中, α 是固相有效拉应力, 以拉为正; p 是气相压力; π/A 是煤样与击波管壁之间的摩擦力, 而 l 和 A 表示管子横截面的周长和截面积

对于上述方程可作简化近似 首先, 在动量方程中, 气相惯性力远比固相惯性力小, 可被忽略; 其次, 在煤样所含初始气压不高, 卸载后只发生开裂而不发生突出的情况下, 固相速度很小, 迁移加速度 u_s ($\partial u_s / \partial x$) 比局部加速度 $\partial u_s / \partial t$ 小得多, 也可被忽略; 第三, 假设可以忽略渗流, 即有 $u = u_s$; 第四, 气相等温变化意味着 $p-p$ 之间有正比关系 于是, 上述三方方程简化为

(1) 气相质量守恒

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \epsilon \rho \frac{\partial u_s}{\partial x} = 0,$$

(2) 固相质量守恒

$$\frac{\partial (1 - \epsilon)}{\partial t} + (1 - \epsilon) \frac{\partial u_s}{\partial x} = 0,$$

(3) 总动量守恒

$$\frac{\partial (1 - \epsilon) \rho_s u_s}{\partial t} - \frac{\partial (\alpha - p)}{\partial x} + \frac{\pi}{A} = 0$$

在断裂面两侧同样满足上述三方面的守恒, 分别有下面 3 个跃变关系, 即

(1) 气相质量守恒

$$- V [\ln \epsilon \rho] + [u_s] = 0,$$

(2) 固相质量守恒

$$- V [\ln (1 - \epsilon)] + [u_s] = 0,$$

(3) 总动量守恒

$$V [(1 - \epsilon) \rho_s u_s] + [\alpha - p] = 0$$

其中, v 为间断面传播速度, 符号 $[f]$ 表示物理量 f 通过间断面的跃变

2 卸载破裂波的数学模型

假设破裂波通过的煤段完全丧失强度, 煤段中的质点间不发生拉压作用, 即应变 E 和速度 u_s 间存在如下关系为

$$\partial E / \partial x = \partial u_s / \partial x.$$

可见, 每当破裂波通过某质点, 该质点的应变 E 后来不再随时间变化; 而且破裂波通过后的煤段

内部速度呈均匀分布, 煤段象刚体一样运动。总动量微分方程 (3) 描述破裂后的煤段的运动, 而煤段内的有效应力 α 为零。由于破裂波通过以后孔隙率变化不大, 假设用 $(1 - \epsilon)$ 代替 $(1 - \epsilon)$, 对方程积分, 上下限各取破裂波的后侧 (空间坐标 x) 和煤与空气的界面 (空间坐标 0), 于是得到破裂波的位置 x 和波阵面后侧的状态量 u_s 和 p 之间的关系为

$$\rho_s(1 - \epsilon)x \frac{du_s}{dt} = -p + p_a - \frac{\tau_l}{A}x.$$

这样便形成了一个常微分方程的初值问题, 初始条件是

$$t = 0: \quad x = 0, \quad p = p_a$$

此外, 破裂波的传播速度 $V (= dx/dt)$ 和波后侧的状态量 u_s , p 和 E 满足前一节中所给出的跃变关系, 即

$$u_s/V = -E, \quad u_s V = -(p_0 - \sigma_t + p)/\rho_s(1 - \epsilon),$$

其中, p , E , ϵ 之间还存在下面 2 个关系:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\epsilon(1 - \epsilon)}{\epsilon - \epsilon}, \quad E = \ln \frac{1 - \epsilon}{1 - \epsilon}$$

由此可得波速 V 和波后质点速度 u_s 的表达式为

$$V = -\sqrt{\frac{p_0 - \sigma_t - p}{\rho_s(1 - \epsilon)E}}, \quad u_s = \sqrt{\frac{(p_0 - \sigma_t - p)}{\rho_s(1 - \epsilon)}}.$$

3 破裂波的传播和破裂段的计算

针对我们所进行的煤击波管模拟实验做了计算。对击波管内的压制煤样测得初始孔隙率 ϵ_0 为 0.38, 煤样密度 ρ_s 为 $1.53 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 抗拉强度 $\sigma_t = 0.008 \text{ MPa}$, 管壁摩擦 $\tau_l/A = 0.7 \text{ MPa/m}$ 。根据上述参数, 可以求出: 能够达到的破裂波波速的最大值为 15.3 m/s , 相应的瓦斯初始压力为 0.138 MPa ; 波速最小值为 0, 相应的瓦斯初始压力为 $\sigma_t + p_a$, 即 0.109 MPa 。于是相应地取瓦斯初始压力的范围为 $0.109 \sim 0.138 \text{ MPa}$, 计算不同初始压力条件下破裂阵面的传播以及破裂段的长度。图 1 为 4 种瓦斯初始压力的破裂波阵面的传播过程, 表 1 为这 4 种情况下的阵面位置 x 和波速 dx/dt 随时间的变化。为了检验上述破裂波模型的正确性, 可以把破裂段的长度随瓦斯初始压力变化的计算结果和实验资料^[3]进行对比, 见图 2 和表 2。可以看出, 两者符合得相当好。

表 1 破裂波阵面的位置和速度随时间的变化

Table 1 Variation of position and propagation speed of fracture wave front

$p_0 = 0.121 \text{ MPa}$			$p_0 = 0.126 \text{ MPa}$			$p_0 = 0.132 \text{ MPa}$			$p_0 = 0.138 \text{ MPa}$		
t	x	dx/dt	t	x	dx/dt	t	x	dx/dt	t	x	dx/dt
/ms	/mm	/m·s ⁻¹	/ms	/mm	/m·s ⁻¹	/ms	/mm	/m·s ⁻¹	/ms	/mm	/m·s ⁻¹
0	0	-13.1	0	0	-14.1	0	0	-14.8	0	0	-15.3
0.5	-7	-12.5	0.5	-7	-13.9	1.0	-15	-14.6	1.0	-15	-15.3
1.0	-12	-11.7	1.0	-14	-13.6	2.0	-29	-14.0	2.0	-31	-15.0
1.5	-18	-10.4	2.0	-27	-12.2	2.5	-36	-13.3	3.0	-45	-14.4
2.0	-23	-8.2	2.5	-33	-10.7	3.0	-42	-12.5	4.0	-59	-12.7
2.2	-24	-6.9	3.0	-38	-8.6	3.5	-48	-11.1	5.0	-70	-8.4
2.4	-26	-5.3	3.5	-41	-4.5	4.0	-53	-8.6	5.3	-72	-5.7
2.6	-27	-3.6	3.6	-42	-3.7	4.7	-58	-2.0	5.4	-73	-4.5
2.9	-27	-0.5	3.8	-42	-1.4	4.8	-58	-0.9	5.6	-73	-2.2
3.0	-27	0	4.0	-42	0	5.0	-58	0	5.8	-73	0

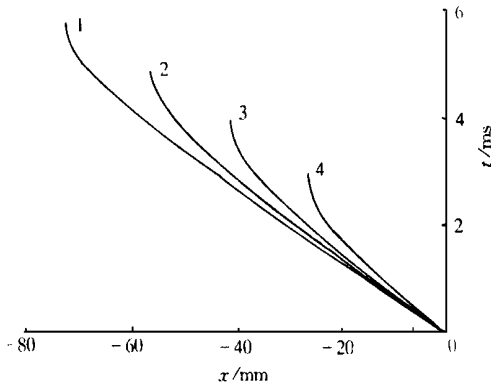


图 1 破裂波的传播过程

Fig. 1 Propagation process of fracture damage wave
1~ 4 分别为 $p_0=0.138, 0.132, 0.126, 0.121$ MPa

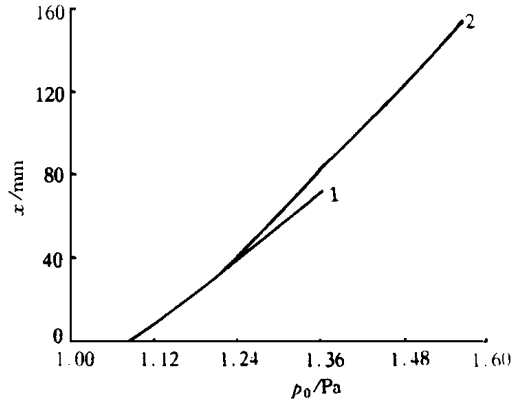


图 2 破裂段长度随瓦斯初压的变化

Fig. 2 Variation of fracture length with preliminary gas pressure

表 2 破裂段长度随瓦斯初压的变化

Table 2 Variation of fracture length with preliminary gas pressure

p_0 /MPa	x_{max}/mm 计算值	x_{max}/mm	p_0 /MPa	x_{max}/mm 计算值	x_{max}/mm
0.109	0	- - - - -	0.138	73	- - - - -
0.115	13	- - - - -	0.140	- - - - -	73
0.127	44	35	0.147	- - - - -	114
0.132	58	- - - - -	0.158	- - - - -	153

4 结 语

用破裂波模型能够说明较弱的一类突出, 即我们所称之为开裂的主要特征, 包括:

- (1) 当煤样表面突然卸载的强度超过抗拉强度与大气压之和, 煤样便发生破裂, 且以破裂波的形式向深部发展
- (2) 破裂波阵面的传播速度在突然卸载时刻达到最大值, 随时间发展逐渐减小至零
- (3) 初始充气压力越大, 破裂波的最大速度以及破裂段的长度也越大

另外, 还有一些因素的影响未能反映在我们的简化模型之中, 需要今后进一步考虑, 例如: 这里假定的破裂波阵面是一种间断面, 只能够反映间断前后的压降值, 如果需要知道这一压降的连续变化情形, 则需要考虑侧壁的剪切作用。这里假定破裂波阵面通过后所形成的破裂段内部没有相互作用而具有像刚体的性质, 也没有反映气体渗流的作用, 对破裂段内的速度分布和抛出现象的描述会有所影响。这里的一维模型没有考虑侧限压力的影响, 而在瓦斯突出中地压的作用是必需考虑的。我们认为, 地压的影响主要反映在破裂条件之中, 可以考虑对破裂强度 σ_c 作适当修正, 使之包括侧压的影响。

致谢 感谢孟祥跃同志在研究中给予的支持

参 考 文 献

- 1 郑哲敏 从数量级和量纲分析看煤和瓦斯突出的机理 力学与生产建设, ——见: 中国力学学会第二届理事会扩大会议论文汇编 北京大学出版社, 1982 128~ 137
- 2 Che M in Cheng, Chen Li, Ding Yansheng A laboratory study of coal gas outburst. Proc of the 2nd Int. Symp. on Intense Dynamic Loading and Its Effects, 1992, Chengdu, China, Sichuan University Press, China 3~ 15
- 3 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

作 者 简 介

谈庆明, 男, 62 岁, 研究员 1956 年毕业于北京大学数学力学系, 近年来从事含有流体的多孔介质的破坏和流动研究 北京市海淀区中国科学院力学研究所, 邮政编码: 100080

俞善炳, 男, 55 岁, 研究员, 1963 年毕业于复旦大学数学力学系, 近年来从事含有流体的多孔介质的破坏和流动研究 北京市海淀区中国科学院力学研究所, 邮政编码: 100080

FRACTURE OF COAL CONTAINING PRESSURIZED GAS BY SUDDEN RELIEVING

Tan Qingming Yu Shanbing Zheng Zhem in

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Zhu Huaqiu

(Department of Mechanics and Engineering Science, Beijing University 100871, China)

Abstract In order to understand the damage effect induced by blasting, a fracture wave model is presented to analyze the crack damage of coal containing pressurized gas under sudden relieving. The tensile strength of coal sample and effect of preliminary gas pressure are considered, the propagation of fracture wave and fracture length are calculated, the calculated fracture length conforms better to the experimental value. The main feature of crack damage of a weak type of coal and gas outburst can be described by this model.

Keywords Coal and gas outburst, Crack, Damage, Fracture wave