

有侧压作用的含瓦斯煤在突然卸载下的临界破坏^{*}

孟祥跃 俞善炳 龚俊 谈庆明

(中国科学院力学研究所)

摘要 在轴对称的实验装置上, 对上下施加侧压的中心开孔的含瓦斯煤饼, 将孔内压力突然降至大气压, 求得煤样在侧压和瓦斯压力联合作用下的临界破坏条件。结果表明, 临界破坏条件下侧压与瓦斯压力之间呈近似线性的变化规律, 并且是侧压越大, 发生临界破坏所需的瓦斯压力越小。

关键词 煤与瓦斯突出 围压 孔隙压 临界破坏条件
中图分类号 TD 713

决定煤与瓦斯突出的主要因素有地应力、瓦斯压力和煤的力学性质等。为了防治突出, 需要了解突出和破坏的临界条件。研究含瓦斯煤在突然卸载条件下的临界破坏对瓦斯突出监测预报具有直接的意义。根据文献 [1] 的分析可知, 瓦斯是突出所需能量的主要提供者, 而地应力、瓦斯压力和煤的强度的综合作用决定了瓦斯突出的启动。为此设计了一套用侧压模拟地应力的实验装置, 来研究有侧压和瓦斯压力联合作用下煤的临界破坏条件。

1 实验方案和实验技术

实验装置如图 1 (a) 所示。主要由缸体、上盖板、活塞及油压千斤顶组成。上盖板与缸体周边用螺栓紧固在一起; 油压千斤顶通过传力环对活塞加力, 活塞的向上运动即可将放在它上面的煤粉压制成各种密度的煤饼, 煤饼为 $\phi 380$ mm, 厚度在一定范围内可调, 在煤饼中心有一 $\phi 20$ mm 的喷煤孔, 用

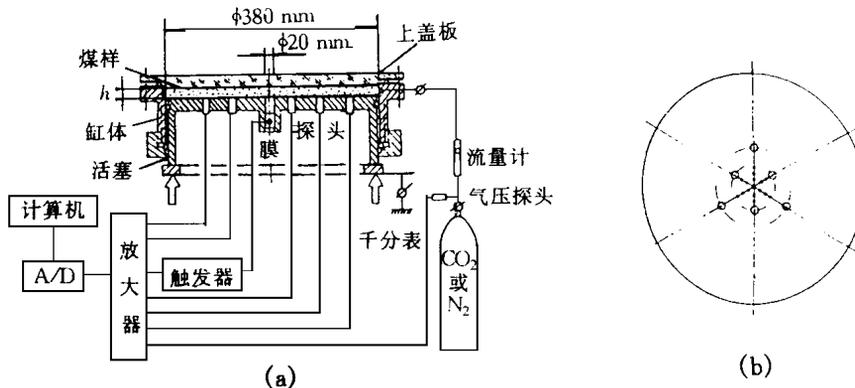


图 1 实验装置

Fig. 1 The test set-up

收稿日期: 1997-09-30

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 19232041) 重点资助项目

千斤顶施加的压力来模拟侧压, 以 CO_2 代替瓦斯对煤饼充 CO_2 , 在喷煤孔口设置铝膜使充压煤饼中心孔与大气环境分隔。

实验的目的是研究有侧压作用的含瓦斯煤的临界破坏条件, 侧重点是观测中心孔周围很小范围内的煤样破坏情况, 因此, 在喷煤孔附近 $\phi 80 \text{ mm}$ 的范围内布置了 10 个自制的小型压力传感器, 测压传感器在煤饼上的分布如图 1 (b) 所示。这样就可以通过突出孔附近的压力传感器监测突出孔周围煤样的破坏情况, 为临界破坏准则的研究提供依据。实验中煤饼的突然卸载是通过引爆喷煤孔处的点火头和枪药, 使喷煤孔口的铝膜突然破坏而实现的。

判断是否发生临界破坏由两方面的因素来定。根据压力传感器信号的变化情况, 在一定侧压条件下, 当充气瓦斯压力小于某一临界值 p_{0cr} 时, 突然卸载后喷煤孔周围的煤样边缘部分未发生任何破坏, 只出现气体的渗流, 因此喷煤孔内壁附近的 3 个传感器所显示的压降很慢, 表示气体的渗流过程, 如图 2 (a) 所示。其外侧的几圈传感器压降曲线则表示类似的更慢的渗流过程。当瓦斯压力在 p_{0cr} 附近很小范围内变化时, 喷煤孔周围的煤样边缘部分发生了临界破坏, 此时突出孔附近的 3 个传感器显示出较大的压降信号, 但并未下降到大气压力, 如图 2 (b) 所示, 而外侧几圈的压力传感器的压降信号类似于图 2 (a), 表示较慢的渗流过程。但当瓦斯压力大于 p_{0cr} 时, 喷煤孔附近以及较远处的传感器都会显示出更大的压降信号, 并且内圈的 3 个传感器所显示的压力信号几乎下降到大气压力, 如图 2 (c) 所示, 表示煤样

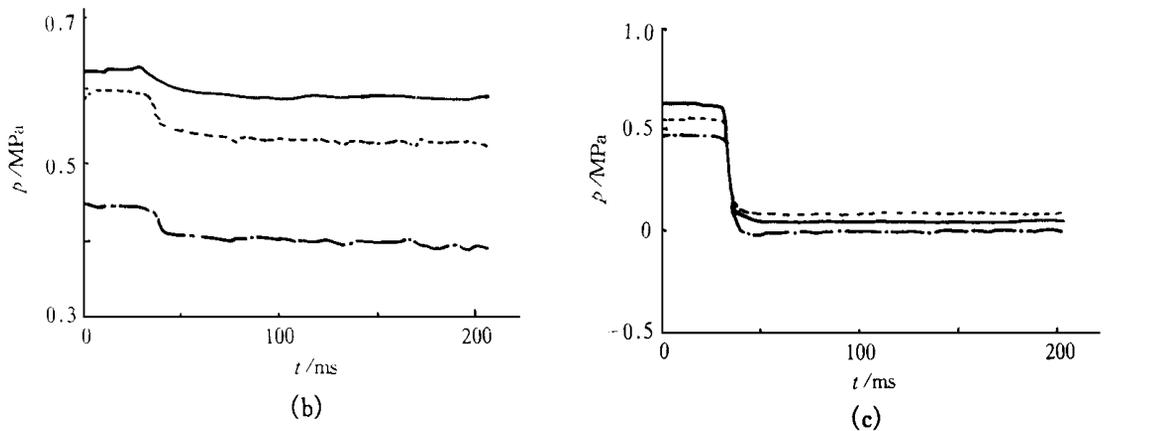


图 2 压力随时间的变化曲线

Fig. 2 Pressure profiles as function of time

已超出临界破坏而成为“低压开裂”^[2]的情况, 煤样内发生较大范围的破坏。图 2 中纵坐标压力 p 为超压。在突然卸载后打开上盖板, 直观地观察中心孔附近煤样的破坏情况。如果煤样中心孔的内壁有 2 mm 左右的裂片剥落, 则认为是发生了临界破坏, 如图 3 所示。如果内壁未发生任何破坏或达到“低压开裂”的破坏范围, 则不属于临界开裂破坏。

2 量纲分析与临界破坏条件

影响临界破坏的物理量有很多, 主要的物理量大致分为以下几类:

(1) 煤的物理性质: 密度 ρ_0 和孔隙率 ϵ_0 , 代表煤的惯性; 杨氏模量 E 、泊松比 ν 和抗拉强度 σ_t ,

代表弹性和强度。

(2) 煤的几何形状：煤厚 s 和孔径 d 。

(3) 瓦斯的物理性质：初始瓦斯压力 p_0 和密度 ρ_g ，渗流特性 μ/k ，其中 μ 和 k 分别是粘性系数和渗流系数。

(4) 边界条件：煤层顶底板上的侧压 p_c 和摩擦因数 f ，作用于孔壁的空气压力 p_a 。将它们的量纲以及由其组成的无量纲量列于表 1。

表 1 控制参数及其量纲

Table 1 Controlling parameters and their dimensions

序号	物理量	量纲	无量纲量
1	煤的密度 ρ_s	ML^{-3}	1
2	煤的孔隙率 ρ_0	$M^0L^0T^0$	ρ_0
3	煤的弹性模量 E	$ML^{-1}T^{-2}$	E/p_a
4	煤的泊松比	$M^0L^0T^0$	
5	煤的抗拉强度 σ_t	$ML^{-1}T^{-2}$	σ_t/p_a
6	瓦斯压力 p_0	$ML^{-1}T^{-2}$	p_0/p_a
7	瓦斯密度 ρ_g	ML^{-3}	ρ_g/ρ_s
8	渗流 $\rho_0\mu/k$	$ML^{-3}T^{-1}$	$\rho_0\mu / (k \sqrt{p_a \rho_s})$
9	侧壁压力 p_c	$ML^{-1}T^{-2}$	p_c/p_a
10	侧壁摩擦因数	$M^0L^0T^0$	
11	煤厚	L	1
12	喷煤孔径 d	L	d/s
13	空气边界压力 p_a	$ML^{-1}T^{-2}$	1

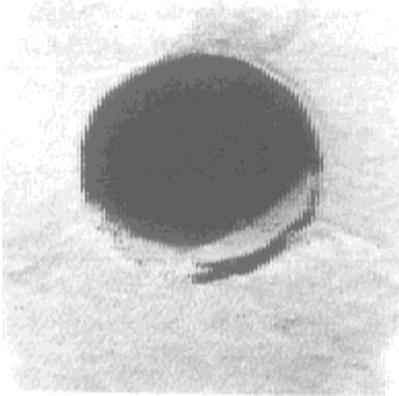


图 3 临界破坏照片

Fig. 3 Photo of critical failure

由上述物理量决定的临界破坏条件可以写为

$$f(\rho_s, \rho_0, E, \nu, \sigma_t, p_0, \rho_g, \frac{\rho_0\mu}{k}, p_c, f, d, p_a) = 0, \quad (1)$$

取 p_a, ρ_s 为基本量，无量纲化后的临界破坏条件为

$$F(\frac{E}{p_a}, \frac{\nu}{p_a}, \frac{\sigma_t}{p_a}, \frac{p_0}{p_a}, \frac{\rho_g}{\rho_s}, \frac{\rho_0\mu}{k \sqrt{p_a \rho_s}}, \frac{p_c}{p_a}, \frac{d}{s}) = 0. \quad (2)$$

在实验中保持试样（材料、尺寸）、空气边界条件不变，则临界破坏条件可以简化为 ⁴³

$$F(\frac{p_0}{p_a}, \frac{p_c}{p_a}) = 0. \quad (3)$$

即在保持试样不变时，临界破坏判据由地应力 p_c 和瓦斯压力 p_0 这两个因素来决定。为此进行了一系列的改变这两个因素的实验，寻找造成和不造成破坏的界线，在 p_0-p_c 的二维平面上得到了一条表征临界破坏判据的曲线，曲线之上代表破坏区，之下则是非破坏区。这里，每一个临界点都需要作很多次实验才能确定，工作量较大。找临界破坏点的具体做法是：在固定某一侧压的条件下，逐渐变化每次实验的瓦斯压力，直至找到临界破坏条件下的瓦斯压力 p_{0cr} ，从而找到临界破坏时的侧压与瓦斯压力之间的对应关系。

3 模拟实验结果

为了能够模拟现场的条件，在模拟实验中所采用的无量纲物理量的数值应力求接近现场条件下的数值。实验所用煤样的制作条件是：粒径 0.1 ~ 0.2 mm 的煤粉，掺入 8.1 % 的水分，用 (1.15 ± 0.02) MPa 的压制力制作煤样，做出煤样的密度为 1 130 kg/m³，孔隙率为 0.26。模拟实验中瓦斯压力的取值范围

是 50 ~ 100 kPa; 侧压取值范围是 500 ~ 900 kPa. 表 2 给出了实验所用的几个主要的无量纲物理量的数值及现场值对比.

由表 2 看出, 实验室模拟与现场情况相比, 无量纲参数有些在同一量级上变化, 而另一些差一个量级. 因此实验室模拟实验中, 临界破坏条件下, 侧压与瓦斯压力之间的变化规律在一定程度上可以反映

表 2 实验室与现场几个无量纲值的比较

现场实际情况, 可以为瓦斯突出的预报工作提供参考.

Table 2 Values of some main dimensionless parameters for artificial sample in laboratory and raw coal in the site

序 号	无量纲参数	模拟实验值	现场值
1	p_0/p_a	0.6 ~ 1	5 ~ 36
2	σ/p_a	5 ~ 9	50 ~ 120
3	σ/p_a	0.4	1 ~ 4
4	g/s	13×10^{-4}	4.5×10^{-4}
5	σ	0.26	0.08 ~ 0.15
6	d/s	1	1

注: 现场地应力取值按 gH 估算, 其中 ρ 为岩石密度, g 为重力加速度, H 为煤层埋深; 瓦斯压力为 0.5 ~ 3.6 MPa 量级; 煤厚特征值 2 m, 开挖断面 2 m x 2 m. 模拟实验中煤样的抗拉强度由煤环拉伸实验确定^[3].

把临界破坏情况下的侧压与瓦斯压力的实验点画在图 4 中, 图中的虚线表示实验点的误差带. 实验采用了 3 种不同的煤厚, 分别是 12, 20, 25 mm, 以考察煤样顶底壁面摩擦的影响.

可以看出, 在煤厚为 12 mm 时, 侧壁摩擦的影响不能忽略. 对于煤厚为 20, 25 mm 的两种煤样, 当侧压为 0.7 MPa 时, 达到临界破坏的瓦斯压力基本一致, 因此可以认为在煤厚大于 20 mm 时, 侧壁摩擦已对临界破坏的结果没有影响了. 从图 4 可知, 在临界破坏条件下, 侧压与瓦斯压力之间基本上是线性关系, 并且是侧压越大, 临界破坏时所需的瓦斯压力越小, 说明两者在破裂条件中起着互补的作用.

4 结 语

利用自行设计的实验装置, 进行了有侧压作用下含瓦斯煤的卸载临界破坏实验, 得到反映侧压与瓦斯压力联合作用下的临界破坏条件. 结果表明, 在煤厚较小时 (12 mm), 侧壁摩擦对临界瓦斯压力影响较大; 但当煤厚大于 20 mm 时, 可认为煤样已足够厚, 侧壁摩擦影响可以忽略, 由此得到了临界破坏条件下侧压与瓦斯压力呈线性变化的规律, 并且是侧压越大, 发生临界破坏时的瓦斯压力越小. 说明侧压的作用主要体现在煤的破坏准则中, 侧压和瓦斯压力对临界破坏起着互补的作用. 这些规律对于现场的瓦斯突出预报工作是有参考意义的.

临界破坏条件下的实验结果见表 3 所示.

表 3 侧压与孔隙压力在临界破坏条件下的关系

Table 3 Relationship between the confining pressure and the pore pressure under critical condition of failure

σ_c / kPa	导致临界破坏的瓦斯压力 p_0 / kPa	
	煤厚 (12.0 ± 0.5) mm	煤厚 (20.0 ± 1.0) mm
500	99 ± 4	98 ± 3
700	94 ± 2	81 ± 4
900	75 ± 3	63 ± 4

注: 煤厚 25.3 mm, 侧压为 700 kPa 时的导致临界破坏的瓦斯压力为 80 kPa, 与煤厚 20 mm 的试样基本一致.

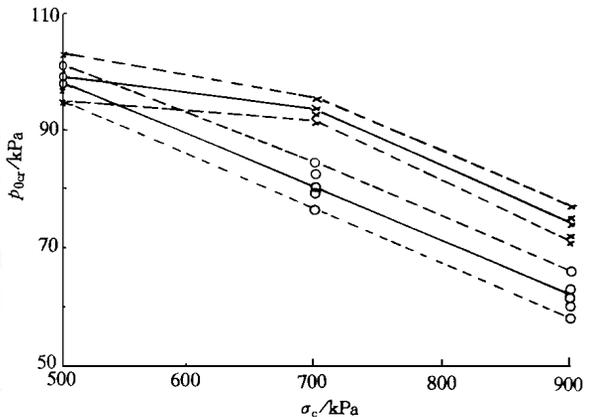


图 4 临界破坏条件下侧压与孔隙压之间的对应关系

Fig. 4 Pore pressure versus confining pressure in critical condition of failure

煤厚 20 mm 试样实验点; × 煤厚 12 mm 试样实验点

* 煤炭工业部煤炭科学研究院重庆研究所. 全国特大型煤与瓦斯突出资料汇编. 1981

参 考 文 献

- 1 郑哲敏. 从数量级和量纲分析看煤和瓦斯突出. 见: 力学与生产建设. 北京: 北京大学出版社, 1982. 128~137
- 2 孟祥跃, 丁雁生, 陈力等. 煤与瓦斯突出的二维模拟实验研究. 煤炭学报, 1996, 21(1): 57~62
- 3 孟祥跃, 丁雁生, 朱怀球等. 软煤拉伸应力-应变关系的实验研究. 力学学报, 1997, 29(5): 582~589

作 者 简 介

孟祥跃, 男, 副研究员. 1988年毕业于中国矿业大学建筑系, 获工学硕士学位. 现从事冲击载荷作用下饱和砂土密实排水方面的研究工作. 1993年获国家教委科技进步二等奖. 发表“煤与瓦斯突出的二维模拟实验研究”等论文多篇. 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, 研究员. 1963年毕业于复旦大学数学力学系. 现从事冲击载荷作用下饱和砂土密实排水方面的研究工作. 1993年获国家自然科学基金二等奖. 发表“煤与瓦斯突出的一维流动模型和启动判据”等论文多篇, 北京市海淀区中国科学院力学研究所, 邮政编码: 100080.

FAILURE WITH GASSY COAL SAMPLE UNDER CONFINING PRESSURE AND PORE PRESSURE IN A CRITICAL CONDITION OF SUDDEN UNLOADING

Meng Xiangyue Yu Shanbing Gong Jun Tan Qingming

(*Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences*)

Abstract A cake-like coal sample with a central hole was tested under confining pressure in an axisymmetric set-up. The pressure was then suddenly released in order to find out the critical condition of failure under the combined effect of confining pressure and pore pressure. The test results show that under the critical condition the relationship between the confining pressure and pore pressure is close to a linear relation. The greater the confining pressure is, the less the pore pressure is required to reach a critical condition of failure.

Key words coal and gas outburst, confining pressure, pore pressure, critical condition of failure