

15-22

第17卷 第1期  
1997年1月爆炸与冲击  
EXPLOSION AND SHOCK WAVESVol. 17, No. 1  
Jan., 1997

# 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<sup>\*</sup>

孟祥跃 丁雁生<sup>N</sup> 俞善炳 谈庆明

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

**A** 摘要 利用煤激波管进行了一维含气多孔介质在突然卸载条件下的破坏实验,并对破坏的形态(层裂和层松)以及破坏前后气体渗流特性的变化进行了实验研究。实验结果表明:试样的破坏存在层裂和层松两种典型的破坏形式,破坏后煤样渗透率的变化本质上是由层松引起的;渗透率的分布与破坏应变直接相关,而充气压力是决定总体变化的参数;试样开裂破坏后的渗透率是原始渗透率的1~2倍;随充气压力增加,破坏深度按某一特征厚度的倍数增加。

关键词 煤激波管 层裂 层松 渗流 渗透率

中图分类号 O357.3

## 1 引言

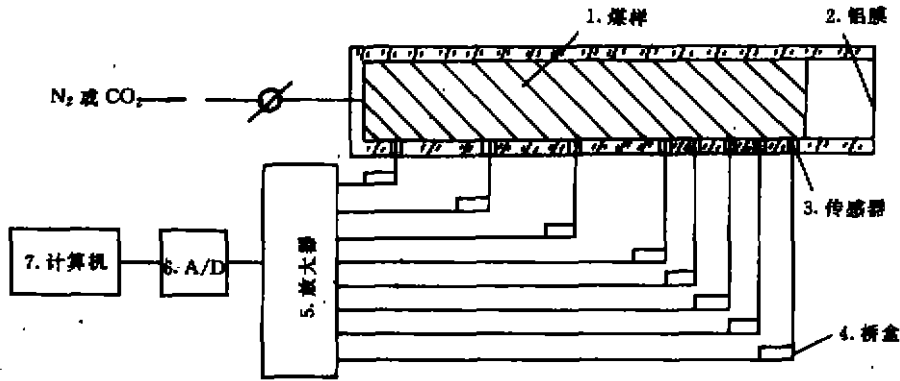
在突然开挖或突然卸载条件下,含有足够高压流体的多孔材料会发生破坏。材料破坏后的渗流特性也随之发生变化。例如,在瓦斯突出矿井,为防止瓦斯突出的发生,有时采用放炮震动或者其它动载破坏方法,以增加煤层的渗透率,使大量高压瓦斯气体预先释放一部分,从而大大降低瓦斯突出的危险性。另外,当发生煤与瓦斯突出以后,由于瓦斯突出的动态卸载作用,破坏了原始煤层,从而使渗透率有很大提高,并有大量瓦斯从未塌落的煤层中渗流出来<sup>[1]</sup>。又例如在石油开采的初期,由于地压的作用石油可以直接喷出。但是,随着石油的不断开采,采油率越来越低;为了提高采油率,就必须提高含油岩层的渗透特性<sup>[2,3]</sup>。这可通过对含油岩层的振动或其它动载破坏方法,使含油岩层中形成更多更大的裂隙,增加岩层的渗透率,提高采油率。总之,多孔介质的破坏会引起渗流的强化,因此研究材料在动载作用后渗流特性的变化是十分有意义的。这里,我们以充有高压气体的一维煤样在突然卸载条件下发生破坏为例,来研究煤样破坏后,气体渗流特性的变化。

## 2 实验装置与实验技术

### 2.1 实验装置

实验采用一维煤激波管实验装置,煤样内充有高压气体,右端与大气相通,如图1所示。激波管由透明有机玻璃筒制成,内径60mm,壁厚10mm,管长410mm,一组测压传感器布置于管壁。

\* 中国科学院渗流力学基金项目。  
1996-05-15收到原稿。



1. Coal sample; 2. Aluminium diaphragm; 3. Pressure sensor;  
4. Bridge box; 5. Amplifier; 6. A/D converter; 7. Computer

图1 实验装置及测量系统示意图

Fig. 1 Sketch of experimental set-up and measuring system

## 2.2 气压测量系统

压力测量系统如图1。传感器受压产生的电信号,经过两级16通道直流放大器组放大,然后用16通道A/D变换器把放大的电信号由模拟量转变为数字量,存在计算机里。

## 2.3 煤样制备与煤性参数

实验用煤粉经过筛选,粒度为0.1~0.2mm,均匀地掺入质量占8.1%的水,至少闷24h。将煤分段压制于圆筒内,压制后每段煤长度与圆筒内径相当;若煤段太长,则煤样难以压制均匀。每段煤的压制应保压5min,并将煤段间的压制面划碎,使煤段均匀相接。

实验煤样直接在有机玻璃筒内压制,并选用两种压制力压制煤样,其压制力分别为0.42MPa和0.7MPa,相应煤样的抗拉强度分别为0.008MPa和0.013MPa。每次做实验前称量压制煤样的实际质量和长度,从而计算出煤样的密度和孔隙率。

## 2.4 实验方法

渗流实验包括三个阶段。第一阶段是测量原始煤样的定常渗流;第二阶段是做煤样的开裂破坏实验;第三阶段是测量开裂破坏后煤样的定常渗流。

在第一阶段中,把压制好的煤样安装好,在上游加气压,待达到定常渗流后,计算机对各测点压力采样,同时记下此时的上游压力和流量。由于此时煤样未破坏,可以认为整个煤样长度上的渗透性都是一样的,因此可根据上游压力、下游大气压力、流量、以及煤样长度等计算煤样的渗透率。

在第二阶段中,先把在第一阶段做过渗流实验煤样的右端用铝膜封上(见图1),然后向煤样中充一定压力的气体(此处为CO<sub>2</sub>),待整个煤样中充有的高压气体达到平衡后,用刀子把铝膜突然划破。铝膜下游部分与大气相通,破膜以后煤被突然卸压而煤样下游端部发生开裂破坏,并向煤样深处传播。记录最后的煤样总长 $L$ 、开裂段长度 $L_k$ 、未裂段长度 $L_{nk}$ 以及裂片数量和厚度。

在第三阶段的实验中,把在第二阶段做过开裂实验的煤样右端的铝膜完全打开,然后在煤样左端加气压,待达到定常渗流后,用计算机存下各测点处气体压力,并记下此时流

量计的读数。由于煤样右端已发生开裂破坏,其渗透性要比原始煤样的大,因此可根据各测点气体压力变化情况,计算出煤样中渗透系数  $k$  在各测点处的变化情况。这一阶段的工作是实验工作的重点。

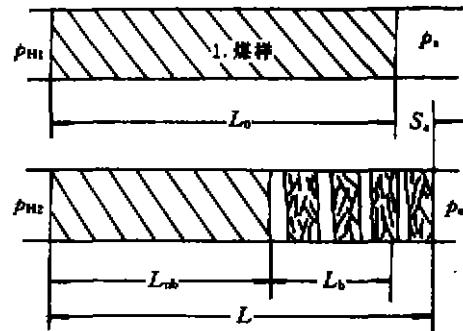
### 3 实验结果及其处理分析

我们对压制力分别为 0.42MPa 和 0.7MPa 的两种煤样,都做了一系列不同的上游充气压力的开裂破坏实验,并对其渗流进行测量,得到了一系列的实验结果。下面以 0.42MPa 压制力煤样为例,对破坏前后渗流规律的变化进行整理分析。

#### 3.1 实验结果

煤样开裂破坏情况如图 2 所示。 $L_0$  为煤样原长, $L$  为开裂破坏后的总长, $L_{nb}$  为未裂部分长度, $\epsilon_0$  为原始煤样孔隙率, $T_1$  为原始煤样渗流时的气体温度, $T_2$  为开裂后煤样渗流时的气体温度, $p_{H1}$  和  $Q_{H1}$  为原始煤样渗流时高压端的气压和流量, $p_{H2}$  和  $Q_{H2}$  为开裂后煤样渗流时高压端的气压和流量, $p_0$  为开裂实验的充气压力, $p_{nb}$  为开裂后煤样渗流时开裂与未裂煤样分界点处气体压力。

对原始煤样和开裂破坏后的煤样进行定常渗流实验,实测各量值如表 1 所示。



1. Coal sample

图 2 煤样开裂破坏示意图

Fig. 2 Damage sketch of coal sample

表 1 渗流实验各参数测量值(\* 慢破膜)

Table 1 Measured data in filtration experiments(\* breaking diaphragm slowly)

No.	开 裂 前					开 裂 后						
	$L_0$ / mm	$\epsilon_0$	$T_1$ / C	$p_{H1}$ / kPa	$Q_{H1}$ / ( $m^3/h$ )	$p_0$ / kPa	$L$ / mm	$L_{nb}$ / mm	$T_2$ / C	$p_{H2}$ / kPa	$Q_{H2}$ / ( $m^3/h$ )	$p_{nb}$ / kPa
1	329.0	0.379	13.8	56.5	0.106	26.8	332.0	294.0	13.8	51.8	0.099	8.0
2	327.0	0.375	9.6	49.4	0.090	31.8	331.0	289.0	9.8	46.1	0.095	8.0
3	328.0	0.377	13.2	38.1	0.070	33.2	335.0	294.0	14.0	38.5	0.077	5.0
4	327.0	0.375	11.8	50.0	0.097	39.0	336.0	254.0	12.0	51.0	0.106	12.0
5	329.0	0.379	14.3	40.7	0.074	45.3	351.0	215.0	14.2	42.0	0.091	14.0
6	328.0	0.377	12.5	58.3	0.116	50.0	349.0	214.0	13.0	31.0	0.069	11.0
7*	326.0	0.373	11.8	49.4	0.090	50.0	337.0	287.0	11.8	49.4	0.102	7.0
8	326.0	0.375	12.2	36.0	0.066	54.8	353.0	214.0	13.0	37.0	0.068	12.5
9	330.0	0.380	12.5	52.3	0.098	57.1	361.2	177.0	12.7	39.0	0.093	9.0
10	327.0	0.375	12.0	50.0	0.096	60.0	386.0	177.0	12.0	31.3	0.081	12.0
11*	327.5	0.376	11.0	49.0	0.094	60.4	338.0	288.0	12.8	49.1	0.095	8.0

#### 3.2 渗流数据的处理方法

根据达西定律

$$u = -kd p / \mu dx$$

式中： $u$ 、 $p$  分别为孔隙气体渗流速度和压力， $k$  为渗透率， $\mu$  为气体的粘性系数， $x$  为渗流气体流动方向的坐标。气体定常流动时的质量流量为

$$Q_m = \rho Au = - \frac{\rho A d p}{\mu dx}$$

式中： $\rho$  为孔隙气体的密度； $A$  为煤样的横截面积。假设测量渗流的过程是等温的，即  $p = \rho a^2$  成立（ $a$  为等温声速），则

$$Q_m = - (Ak/2a^2\mu) dp^2/dx$$

对于均匀材料， $k$  为常数，由此积分得

$$k = 2\mu L Q_{H1} p_0 / [A(p^2 - p_0^2)]$$

此处  $Q$  为将  $Q_m$  折算到标准大气压下的体积流量； $L$  为煤样长度； $p$  为上游气体的绝对压力； $p_0$  为标准大气压。

### 3.3 实验数据的处理

在实验方法的第一和第三阶段中，我们分别测出了原始煤样和开裂破坏后煤样中定常渗流条件下的气体压力分布曲线。例如图 3 为 9 号实验煤样在破坏前后定常渗流条件下的气体压力分布曲线（实线为原始煤样中压力分布曲线，虚线为煤样开裂破坏后压力分布曲线）。对于原始煤样，由于其内各点渗透率相同，所以只须利用  $p_{H1}$ 、 $Q_{H1}$  即可计算出原始煤样渗透率  $k_0$

$$k_0 = 2\mu L_0 Q_{H1} p_0 / [A(p_{H1}^2 - p_0^2)]$$

对于开裂破坏后的煤样，开裂区内各点渗透率不同，利用各测点气体压力，可以计算出开裂区内各测点之间煤样的等效渗透率（测点之间煤样均匀化）的变化情况。为了便于分析比较，我们除了计算原始煤样中渗透率  $k_0$  之外，又考虑了另外三个等效渗透率  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ ，以便更好地分析煤样开裂破坏后渗流特性的变化。

未开裂段煤样渗透率  $k_1$

$$k_1 = 2\mu L_{nb} Q_{H2} p_0 / [A(p_{H2}^2 - p_{nb}^2)]$$

开裂区段煤样 ( $L_b$ ) 等效渗透率  $k_2$

$$k_2 = 2\mu(L - L_{nb}) Q_{H2} p_0 / [A(p_{nb}^2 - p_0^2)]$$

开裂区段煤样 ( $L_b + L_n$ ) 等效渗透率  $k_3$

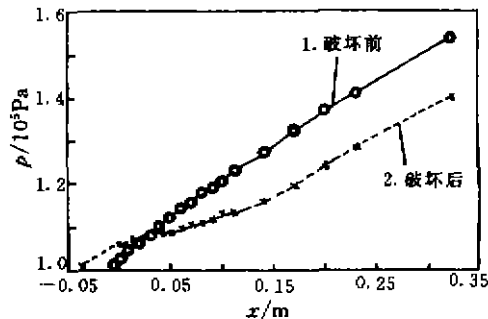
$$k_3 = 2\mu L_n Q_{H2} p_0 / [A(p_{nb}^2 - p_0^2)]$$

根据上面渗透率  $k_0$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  的计算公式，可以计算出每次实验的各渗透率值。

另外，煤样发生开裂破坏时出现了变形，为了描述开裂破坏的变形，我们考虑了开裂区段的平均应变  $E_b$ 。

$$E_b = \frac{S_b}{L_b}$$

各次实验的渗透率和应变计算值如表 2 所示。



1. Before damage; 2. After damage

图 3 煤样破坏前后定常渗流下压力分布曲线  
Fig. 3 Pressure distributions under steady filtration before and after damage

表 2 渗透率与应变计算值表 (\* 慢破膜)

Table 2 Calculated ratio of permeability and strain (\* breaking diaphragm slowly)

No.	$k_0$ / $10^{-13}\text{m}^2$	$k_1$ / $10^{-13}\text{m}^2$	$k_2$ / $10^{-13}\text{m}^2$	$k_3$ / $10^{-13}\text{m}^2$	$p_0$ /kPa	$E_b$
1	10.8	10.9	12.8	11.8	26.8	0.086
2	10.5	11.6	16.6	15.0	31.8	0.105
3	10.6	11.4	16.5	13.7	33.2	0.206
4	11.1	11.3	16.3	14.5	39.0	0.123
5	10.5	11.1	19.8	16.6	45.3	0.193
6	11.4	11.7	19.1	16.1	50.0	0.184
7*	11.2	11.2	24.5	19.1	50.0	0.256
8	9.4	10.6	17.3	13.9	54.8	0.241
9	10.8	11.6	21.8	18.1	57.1	0.204
10	11.0	11.9	30.6	21.9	60.0	0.393
11*	11.0	11.0	14.9	11.8	60.4	0.266

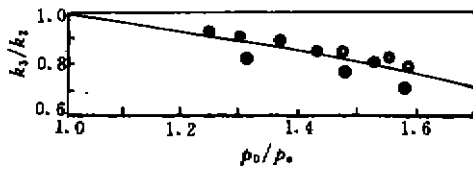
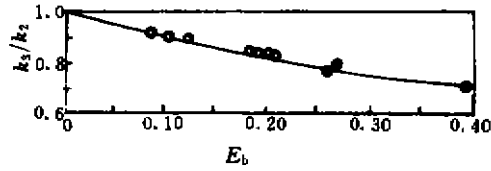
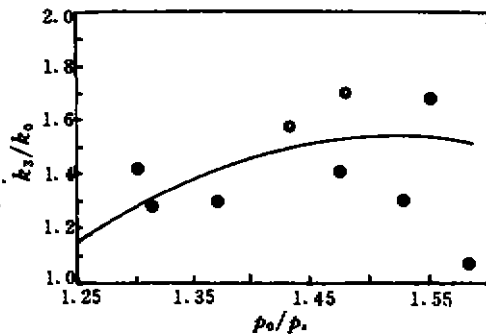
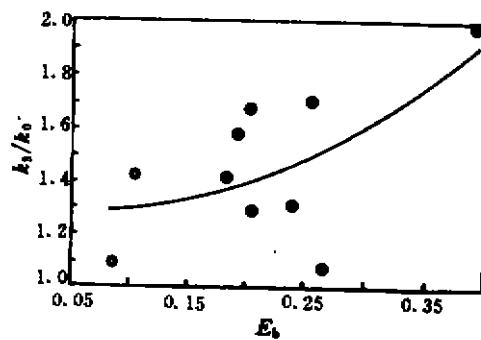
### 3.4 实验结果的分析 and 讨论

(1) 在煤样的开裂破坏实验中, 可以将破坏形式分为两种, 即层裂和层松(图 2 所示)。层裂是煤样破坏区内, 煤样开裂为片状, 片与片之间有一定的间隙, 间隙是贯通的。所谓层松, 就是每一个破坏开裂片内有许多各个方向相互交错的微小裂纹, 但在整个断面上并不贯通。因为层裂是横向裂隙, 对轴向流动的渗流并无影响, 但层松使破坏区出现各个方向的微裂纹, 会使渗流有所增强。

(2) 根据对  $k_2$  和  $k_3$  的定义可知,  $k_2$  与  $k_3$  之间的差别是由层裂引起的, 由两式相比可以得到  $k_2 = (1 + E_b)k_3$ , 其中  $E_b$  为破坏区煤样的应变。图 4 和图 5 分别为各次实验  $k_3/k_2$  与  $p_0/p_1$  以及  $k_3/k_2$  与应变  $E_b$  之间的关系曲线。从图中可以看出,  $k_3/k_2$  都是随  $p_0/p_1$  以及  $E_b$  的增加而下降, 但  $k_3/k_2$  与  $p_0/p_1$  关系的拟合系数  $r=0.85$ , 而  $k_3/k_2$  与  $E_b$  关系的拟合系数增至  $r=0.95$ 。这是因为渗流与开裂破坏结果的关系更直接, 而与  $p_0$  的关系却受破膜速度及煤样因素的影响, 是一种间接关系, 特别是破膜速度对开裂破坏效果的影响最大。例如 6 号实验与 7 号实验相比, 虽然充气压力相同(50kPa), 但由于破膜速度不同, 6 号实验的开裂深度(114mm)几乎是 7 号实验(39mm)的 3 倍; 即在充气压力相同的条件下, 随着破膜速度降低, 开裂深度就会减小, 直至不发生任何破坏。这是由于降低破膜速度实质上就是降低渗流速度, 减小渗流力, 从而减小对煤样的破坏。因此开裂破坏的应变能更直接地反映渗透率的变化。另外, 由图 4 和图 5 可知, 在现有实验条件下, 层裂对计算渗透率的影响小于 30%。

(3)  $k_2$  与  $k_3$  之间的差别仅仅是由层裂裂隙存在一定的宽度, 而此类裂隙不会对渗流提供阻力。煤样开裂破坏后渗透率的增加, 本质上是由层松引起的; 反映开裂破坏区内层松引起的渗流增加, 可以用  $k_3/k_0$  值来描述。图 6 和图 7 分别为各次实验  $k_3/k_0$  与  $p_0/p_1$  以及  $k_3/k_0$  与  $E_b$  之间关系的拟合曲线。从图中可以看出, 层松引起的渗流的变化趋势都是随  $p_0$  或  $E_b$  的增加而增加。这里, 同样是  $k_3/k_0$  与  $E_b$  之间的关系, 拟合曲线更好一些。

从实验数据以及图 6 和图 7 都可以看出, 开裂破坏后煤样的渗透率为原始煤样渗透

图4  $k_3/k_2$  与  $p_0/p_1$  之间关系的拟合曲线Fig. 4 Fitted curve of  $k_3/k_2$  vs  $p_0/p_1$ .图5  $k_3/k_2$  与  $E_b$  之间关系的拟合曲线Fig. 5 Fitted curve of  $k_3/k_2$  vs  $E_b$ .图6  $k_3/k_0$  与  $p_0/p_1$  之间关系的拟合曲线Fig. 6 Fitted curve of  $k_3/k_0$  vs  $p_0/p_1$ .图7  $k_3/k_0$  与  $E_b$  之间关系的拟合曲线Fig. 7 Fitted curve of  $k_3/k_0$  vs  $E_b$ .

率的1~2倍,在同一量级上变化。而在现场发生瓦斯突出的煤层里,突出破坏后煤的渗透特性会有量级上的变化。这是由于未突出原始煤孔隙率特别小,透气性差,而发生瓦斯突出后,煤层破坏得很厉害,其渗透性会有明显的提高,因此其渗透率会有量级上的变化。

(4)煤样开裂破坏后产生的肉眼可见裂纹使渗透率增加,而同时产生的肉眼不可见裂纹也会使煤样渗透率增加。这一点可由表2中的 $k_0$ 与 $k_1$ 之间的比较看出。由表中数据可知, $k_1$ 基本上都大于 $k_0$ 。 $k_0$ 与 $k_1$ 之间差别较小,这是由于在计算 $k_1$ 时,是按整个未裂段煤样计算的等效渗透率,实际上在煤样裂与未裂分界点左侧的小范围内,虽然未看到裂纹,但在其内部存在肉眼不可见裂纹,渗透性增强;如果只计算这一小范围内的渗透率,其值会比原始煤样中的渗透率 $k_0$ 有明显的提高。

(5)另外,我们在开裂破坏实验中发现一个有趣的实验现象,就是煤样的开裂破坏深度按一定长度的整数倍增加,即煤样的破坏具有特征厚度。在我们实验中的煤样强度及管径等条件下,此长度特征值为37~40mm。图8为煤样开裂破坏深度与充气压力之间关系的分布图,由此图很容易看到煤样的开裂深度呈台阶状上升。由图8还可以看出,对应于每一个特征开裂深度,都存在一个使煤样达到最大破坏的最小充气压力,即临界充气压力,而这一临界充气压力是在破膜速度非常快的条件下找出的。例如,对应于第一个特征开裂深度(37~40mm)的临界充气压力约为标准大气压力 $p_1$ 的1.23倍,小于此临界值则不发生任何层裂形式的破坏,而只可能在自由表面附近出现层松。同样对于第二个特征开裂深度,当气压小于此特征开裂深度对应的临界压力时,煤样的开裂深度只可能是37~40mm,或者不发生层裂破坏而只出现层松。由于实验中破膜速度不可能达到理想的无限

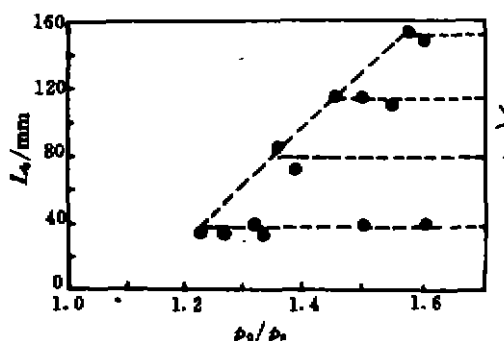


图8 开裂深度与充气压力分布图

Fig. 8 Distribution of split depth vs gas pressure

快,因此在破膜无限快的条件下,临界充气压力还会有所降低。另外,由于各特征开裂深度对应的充气压力临界值的实验点分布在一条直线上,因此在现有实验范围内,由图8可以看出,充气压力每增加0.10~0.13倍的 $p_a$ ,在快速破膜的条件,开裂深度就会增加一个长度特征值37~40mm。根据我们的分析,估计特征厚度与试样所受的阻尼有关,例如压制力、管径、摩擦力、渗流、试样等因素都有关系,而且在理论上有更重要的意义,这需要作进一步的实验工作,即改变一系列的阻尼影响因素,寻找特征厚度与它们之间的关系,

并作进一步的理论分析。

#### 4 结论

1. 充有高压气体的煤样在突然卸载条件下,会发生开裂破坏,层裂和层松是典型的两种破坏形式。煤样开裂破坏后,其渗流特性的变化,本质是层松引起的,层裂只能反映渗透率 $k_2$ 与 $k_1$ 的区别,而与煤样破坏后的轴向渗流无关。

2. 煤样开裂破坏引起的渗透率的变化与煤样破坏后的应变直接相关,而与充气压力 $p_0$ 的关系则受破膜速度及煤性参数等因素的影响,是一种间接的关系。在分析煤样开裂破坏后渗流特性的变化时,要寻找其与煤样破坏应变之间的关系。

3. 煤样开裂破坏后,破坏区煤样渗透率是原始煤样的1~2倍。

4. 煤样的开裂破坏深度按一定的数值增加,即煤样的破坏具有特征厚度。

#### 参 考 文 献

- 1 郑哲敏. 力学与生产建设. 北京, 北京大学出版社, 1982. 128~137
- 2 钱汝鼎主编. 工程流体力学. 北京, 北京航空航天大学出版社, 1989
- 3 葛家理. 油气层渗流力学. 北京, 石油工业出版社, 1985

## EXPERIMENTAL STUDY OF GAS PERMEABILITY VARIATION DUE TO SUDDEN UNLOADING

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

**ABSTRACT** Seepage experiments of one-dimensional gas-containing porous media under sudden unloading were carry out, permeability variation and damage were examined in the experiment before and after damage. Experimental results show that there exist two kinds of typical damage patterns (layer split and layer looseness) in damaged samples, and percolation variation of damaged samples is caused by layer looseness essential-

ly. In damaged samples, percolation variation is directly interrelated to damage strain, but it has an indirect relevance to porous pressure. In addition, damaged sample has 1~2 times of the original sample percolation coefficient, and the damage depth of the sample increases by a fixed numerical value, namely there exists a characteristic thickness in damaged samples.

**KEY WORDS** coal shock tube, layer split, layer looseness, seepage flow, ratio of permeability