

# 软煤拉伸应力-应变关系的实验研究<sup>1)</sup>

孟祥跃 丁雁生 朱怀球 俞善炳 谈庆明

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 提供一种用于测量软煤或土的抗拉强度、拉伸应力-应变关系等拉伸特性的实验装置。利用模具压制出均匀的煤环试件,对煤环内壁施加均匀径向水压力使其拉伸变形和破坏。根据实验结果,提出了弹脆性拉断破坏的理论模型,并据此对煤的抗拉强度、弹性常数以及等效孔隙压力系数等进行了分析和讨论。实验数据稳定可靠,散布小,重复性好,说明所提供的实验装置和实验方法简单而有效。

**关键词** 煤环,弹脆性材料,抗拉强度,拉伸应力-应变关系,等效孔隙压力系数

## 引 言

在瓦斯突出的过程中,煤体的破坏是以拉伸间断的形式向内部传播的。因此,要搞清瓦斯突出的机理,就必须深入研究煤的拉伸力学特性,即煤的抗拉强度以及拉伸应力-应变关系等。郑哲敏<sup>[1]</sup>,俞善炳<sup>[2]</sup>等人在论述瓦斯突出的机理时,对煤的拉伸应力-应变关系作了相应的假设,但这些假设是否合理,则有待实验验证。但从目前的文献调研情况看,有关煤的拉伸应力-应变关系研究方面的资料还几乎是空白。另外,在土工中,有时土体出现拉裂,而有关土的拉伸特性的试验资料却很少。上述情况都促使我们对软煤或土这类抗拉强度很小的材料的拉伸应力-应变关系进行实验研究。

一般说来,煤或土的拉伸实验有两大类,一类是直接测定方法,也就是单轴拉伸实验<sup>[3,4]</sup>;另一类是间接测定方法,包括弯曲梁实验<sup>[5]</sup>、圆柱形试样的径向压裂实验<sup>[6]</sup>以及圆柱形试样的轴向挤裂实验<sup>[7]</sup>等。在间接实验中,试样中的拉应力是通过理论方法计算的。由于软煤或土的拉伸强度很低,直接试验难度较大,而间接实验则比较简单,如果理论分析正确,给出的抗拉强度和拉伸应力-应变关系还是相当可靠的。

我们设计加工了一套测量煤或土的抗拉强度和拉伸应力-应变关系等拉伸特性的实验装置。试样做成环状,在煤或土环内壁施加径向压应力,试样在环向方向则产生拉应力。实验时测量环的内壁径向压力和内腔容积变化;当内壁压力大到一定值后,试样沿环向拉断;对实验数据进行一定的分析,即可得到试样的抗拉强度和拉伸应力-应变关系。由于实验过程中,环的每个断面上的受力变形情况都相同,因此实验结果非常稳定,与其它实验方法相比具有明显的优越性。

## 1 实验装置与方法

### 1.1 试样的制备

1) 国家自然科学基金委重点基金资助项目。  
1996-11-28 收到第一稿,1997-05-13 收到修改稿。

实验所用煤粉取自突出现场——北票的一个矿井的突出煤,用粒径为 0.1~0.2mm 的煤粉制作成试样.首先在煤粉中均匀地掺入一定量的水,再按土力学实验规程压实成形.设计加工了一套压制煤环的模具,压制出的煤环相当均匀.采用不同的压制力,即可得到各种不同密度的煤环试样.

### 1.2 实验装置

实验装置如图 1 所示.在有机玻璃缸体和盖板组成的容器中放置煤环,煤环内腔有一乳胶膜;调控孔隙压或围压时,煤环外壁也有一乳胶膜;煤环与乳胶膜之间设置“O”型圈.通过压紧螺母把“O”型圈压紧,从而使内腔乳胶膜内的液体不会向煤样渗漏,并使外侧气压不干扰孔隙气压.为了保证测量精度,必须使每个接头处没有渗漏,并且使水里不含气泡.

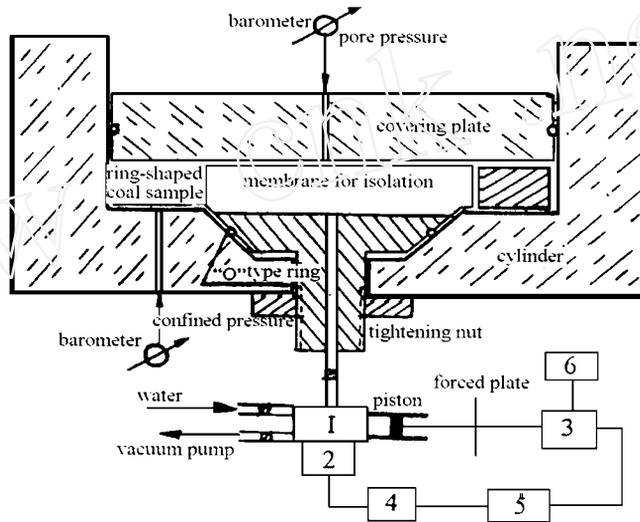


图 1 实验装置与测量系统示意图

- 1—多通接头, 2—压力传感器, 3—位移传感器,
- 4—放大器, 5—瞬态 A/D 变换器, 6—直流稳压电源

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

- 1. connector, 2. pressure sensor, 3. displacement sensor,
- 4. amplifier, 5. transient A/D converter, 6. direct current power

### 1.3 测量系统

测量系统如图 1 所示,由应变式压力传感器、位移传感器、直流放大器和瞬态 A/D 变换器等组成.实验过程中煤环试样内壁的径向应力和内腔体积变化分别由压力传感器和位移传感器测量,并由瞬态 A/D 变换器记录下来.

## 2 实验内容和数据处理

### 2.1 实验内容

从煤环试样条件来分,主要做了以下几种不同煤样的实验:(1)试样含水量 8.1%;这部分实验较多,也比较系统,是实验的重点;(2)试样含水量 9.6%;(3)含水量 8.1%的试样在 110 下烘干;(4)含水量 9.6%的试样在 110 下烘干.目的是考察含水量和一定含水量的煤样作烘干处理后对煤的抗拉强度和拉伸应力-应变关系的影响.

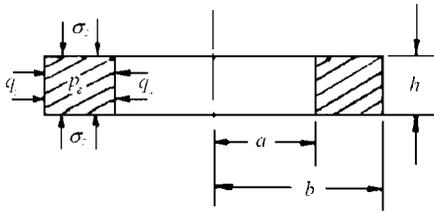


图 2 煤环受力示意图  
 $q_a$ —内壁径向压应力,  $q_b$ —外壁径向压应力,  
 $z$ —上、下侧面压应力,  $p$ —孔隙压力,  
 $a$ —内半径,  $b$ —外半径,  $h$ —煤环高度  
 Fig. 2 Loading sketch of coal ring  
 $q_a$ —inner radial pressure,  
 $q_b$ —external radial pressure,  
 $z$ —pressures of both upside and downside,  
 $p$ —pore pressure,  $a$ —inner radius,  
 $b$ —external radius,  $h$ —height of coal ring

内外半径分别为  $a$  和  $b$ , 高为  $h$  的煤环试样受到轴向压力  $z$ , 内侧和外侧径向压力  $q_a$  和  $q_b$  以及孔隙压力  $p$  的作用, 如图 2 所示. 从煤环受力状态不同来分, 主要作了下面几种实验: (1)  $q_b = z = p = p_0$ , 其中  $p_0$  等于标准大气压  $p_a$  或大于  $p_a$  的某一压力; 这里又分两种情况 (i) 打开加围压的孔洞, 即煤环外侧空腔体积  $V_0$  与大气相通, 因此实验过程中  $q_b, z, p$  保持不变; (ii) 关闭加围压的孔洞,  $V_0$  与煤环内侧空腔体积变化  $v_a$  可比, 因此实验过程中  $q_b, z$  逐渐增加; (2) 关闭加围压的孔洞,  $q_b = z = p_0, p = p_a$ . 在这几种受力条件下, 对于每一次实验逐渐增加内压力  $q_a$  直至煤样发生破坏. 实验的目的是考察不同受力条件对应力-应变关系曲线的影响.

### 2.2 数据处理

应力-应变关系中的应力和应变不能从实验中直接测量到, 而是分别由压力传感器和位移传感器测量的值换算而来. 假设图 1 中位移传感器测量到的位移量为  $l$ , 活塞面积为  $s$ , 因为水的压缩变形非常小, 可被近似看作不可压缩的流体, 从而可换算得到煤环内侧环向应变为  $\epsilon_a = \frac{l \cdot s}{2 a^2 \cdot h}$ . 煤环内侧环向应力  $\sigma_a$  则是根据下一节的理论分析, 由压力传感器测量到的内侧压应力  $q_a$  和由气压表测到的外侧压应力  $q_b$  换算而来, 换算关系式为  $\sigma_a = \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} q_a - \frac{2 b^2}{b^2 - a^2} q_b$ . 具体推导过程见下一节.

## 3 实验结果和分析

### 3.1 变形和破坏的总体特征

实验作了 70 多个, 获得了相当多的数据, 为简明起见, 这里只显示几种实验条件下的典型曲线, 如图 3~5 所示.

对于实验中涉及的每一种试样和各种受力条件, 煤环的破坏都具有图 3 所示的特征. 由图 3 可以看出, 当煤环内侧压力增加到最大值时, 试样突然发生脆性拉断, 试样破坏后, 受压的水卸压并与胶膜一起自由振荡. 如果把试样刚刚发生脆断以及脆断后胶膜与水的自由振荡这段曲线展开来看, 则可以看到煤环试样的断裂过程大约为 4ms, 由此可估计出试样断裂破坏的平均速度大约为 5m/s 量级, 自由振荡的频率为 12.5Hz.

由图 4 和图 5 中的曲线 1 和 2 可以看出, 对于实验中考察的四种试样, 虽然烘干的试样其破坏时的内压力  $q_{a \max}$  和应变  $\epsilon_{a \max}$  都有很大提高, 但在破坏之前, 煤环内壁径向压应力  $q_a$  与环向拉应变  $\epsilon_a$  之间的关系都是线性的 (即  $dq_a/d\epsilon_a = \text{常数}$ ), 其线性相关系数接近于 1. 另外, 由图 4 中的曲线 3 可知, 在试样内施加孔隙压后, 在破坏之前,  $q_a$  与  $\epsilon_a$  仍为线性关系. 对于其它一些材料 (例如岩石等), 在有围压的条件下, 其塑性特性会有所增强, 但在我们的实验中, 在所加的围压范围内未观察到塑性软化现象,  $q_a$  与  $\epsilon_a$  仍为线性关系. 由此可以推断, 对于几种不同的试样,

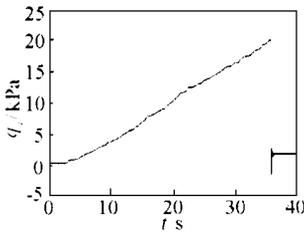


图 3 水压力 - 时间实验曲线  
Fig. 3 Experimental curve of water pressure vs time

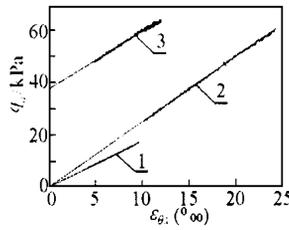


图 4 煤环内压力 - 煤环内壁环向应变实验曲线  
曲线 1—水分 8.1%, 密度 1 160kg/m<sup>3</sup>  
曲线 2—水分 8.1% 烘干, 密度 1 140kg/m<sup>3</sup>  
曲线 3—水分 8.1%, 密度 1 190kg/m<sup>3</sup>, 孔隙压 37.5kPa

Fig. 4 Experimental curves of pressure at inner wall of coal ring vs circumferential strain  
curve 1—water content 8.1%, density 1 160kg/m<sup>3</sup>,  
curve 2—water content 8.1%, drying treatment, density 1 140kg/m<sup>3</sup>,  
curve 3—water content 8.1%, density 1 190kg/m<sup>3</sup>, pore pressure 37.5kPa

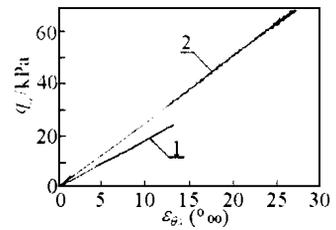


图 5 煤环内压力-煤环内壁环向应变实验曲线  
曲线 1—水分 9.6%, 密度 1 190kg/m<sup>3</sup>  
曲线 2—水分 9.6%, 烘干, 密度 1 130kg/m<sup>3</sup>

Fig. 5 Experimental curves of inner pressure of coal ring vs circumferential strain  
curve 1—water content 9.6%, density 1 190kg/m<sup>3</sup>,  
curve 2—water content 9.6%, drying treatment, density 1 130kg/m<sup>3</sup>

在几种不同的受力条件下,拉伸应力与拉伸应变之间的关系都是线弹性的,并且破坏为脆性拉伸破坏。

根据上述实验结果,可以提出如下假设: (1)煤样均质且各向同性;(2)破坏前试样处于小变形状态;(3)应力与应变之间的关系为线弹性;(4)煤样的破坏为弹脆性拉伸破坏;(5)试件与有机玻璃之间的摩擦力可以忽略;(6)在关闭加压孔洞的条件下,煤环外侧气体等温压缩;(7)渗流相对于实验过程为慢过程,即忽略渗流的影响;(8)实验过程中试样内孔隙体积的变化可被忽略;(9)乳胶膜的膨胀应力与煤的拉伸强度相比可以忽略。

由假设(1)~(3)以及煤环试样的受力状况可以把问题当作弹性力学轴对称条件下的平面应力问题来考虑。根据平衡方程、几何方程和物理方程,可以推导出内、外半径分别为  $a$  和  $b$  的煤环试样在内、外侧压力  $q_a$  和  $q_b$  作用下其内各点的径向应力  $r_r$  和环向应力  $r_θ$  的表达式<sup>[8]</sup>

$$r_r = - \frac{a^2(b^2 - r^2)}{r^2(b^2 - a^2)} q_a - \frac{b^2(r^2 - a^2)}{r^2(b^2 - a^2)} q_b \tag{1}$$

$$= \frac{a^2(b^2 + r^2)}{r^2(b^2 - a^2)} q_a - \frac{b^2(r^2 + a^2)}{r^2(b^2 - a^2)} q_b \tag{2}$$

式中,  $q_a, q_b$  以压为正,  $r_r, r_θ$  以拉为正。

### 3.2 拉伸破坏强度准则

由于试样的拉伸破坏是以脆断作为破坏标志的,因此符合第一类强度理论,即最大拉应力理论和最大拉应变理论。从实验结果看,应力和应变都可以作为煤样破坏的强度准则;但材料破坏时的最大拉应力的数值比最大拉应变的数值更为稳定,这是由于实验过程中应力测量的误差要小于应变测量的误差。因此,我们采用最大拉应力强度准则。当然也可采用最大拉应变准则,处

理方法类似。

由(1), (2)两式可知,如果煤环试样只有内压力  $q_a$  的作用,即  $q_b = 0$ ,则上面  $r$  和  $\sigma_r$  的表达式可简化为

$$\sigma_r = - \frac{a^2(b^2 - r^2)}{r^2(b^2 - a^2)} q_a, \quad \sigma_{\theta} = \frac{a^2(b^2 + r^2)}{r^2(b^2 - a^2)} q_a$$

由此可见,  $\sigma_r$  总是压应力,而  $\sigma_{\theta}$  总是拉应力,而且拉应力在煤环内壁最大。由于  $|\sigma_{\theta}| > |\sigma_r|$ ,而煤的抗拉强度远小于其抗压强度,因此煤环的破坏只可能是首先出现在内壁的拉伸破坏。当  $q_a$  足够大时,煤环内壁拉应力  $\sigma_{\theta}$  达到煤的抗拉强度  $\sigma_t$ ,内壁出现裂纹;由于裂纹尖端的应力集中,裂纹迅速扩展而使试样拉断破坏。因此我们可以认为,煤环拉断破坏时的最大内压力  $q_{a \max}$  所对应的内壁环向拉应力  $\sigma_{\theta \max}$  就是试样的拉伸破坏强度  $\sigma_t$ 。把煤环的尺寸  $a = 40\text{mm}$ ,  $b = 60\text{mm}$ ,  $r = 40\text{mm}$  代入  $\sigma_{\theta}$  的表达式,即可得到煤的抗拉强度的表达式,则有

$$\sigma_t = 2.6 q_{a \max} \tag{3}$$

把实验中各种不同密度的煤样在破坏时所对应的内压力  $q_{a \max}$  代入(3)式,即可得到其对应的抗拉强度  $\sigma_t$ 。

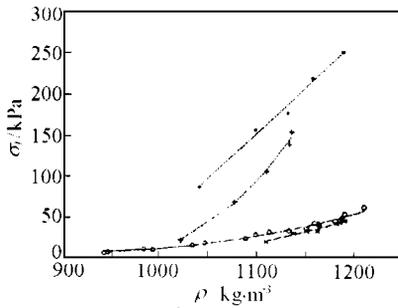


图6 抗拉强度与试样密度之间关系的拟合曲线

- 1.  $\circ$ —水分8.1%, 2.  $\times$ —水分9.6%,
- 3.  $+$ —水分8.1%, 烘干, 4.  $*$ —水分9.6%, 烘干

Fig. 6 Fitted curves of tensile strength vs coal density

- $\circ$ —water content 8.1%,  $\times$ —water content 9.6%,
- $+$ —water content 8.1%, drying treatment,
- $*$ —water content 9.6%, drying treatment

烘干处理的煤样,抗拉强度也是随密度增加呈二次曲线形式上升的。从图6中含水量9.6%但作烘干处理的煤样的拟合线4看到,在实验所作的密度范围内,抗拉强度与密度之间基本上是线性关系。

另外从图6中四条曲线的对比可以看出,烘干煤样与相应的未烘干煤样相比,抗拉强度会有很大的提高。对含水量8.1%和9.6%的煤样,在实验所作的密度范围内,烘干后的煤样其抗拉强度都是相应未烘干煤样强度的1~4倍。从四条曲线的变化趋势可以看出,在试样密度较低时,是否烘干对强度的影响不大,而当密度较高时,烘干可使其抗拉强度提高数倍;并且煤样水分越高,烘干使强度提高得越多。

### 3.3 有效应力原理的讨论

在土力学中,太沙基早在1923年就提出了有效应力的概念,并给出了有效应力原理的表 n

图6显示煤样的抗拉强度与密度之间的关系,图中实线1~4分别为四种煤样的破坏强度与密度之间的二次拟合曲线。由曲线1(含水量8.1%的煤样)可知,抗拉强度与密度之间的关系可用二次曲线进行拟合,拟合曲线的无量纲表达式为

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_{t0}} = 41.2 - 86.7 \left[ \frac{\rho}{\rho_0} \right] + 46.5 \left[ \frac{\rho}{\rho_0} \right]^2$$

$$0.942 \leq \frac{\rho}{\rho_0} \leq 1.21$$

式中  $\rho_0 = 1000\text{kg/m}^3$  为标准煤样密度,  $\sigma_{t0} = 15.0\text{kPa}$  为标准煤样的抗拉强度。此式即为含水量8.1%的煤样的抗拉强度  $\sigma_t$  与密度  $\rho$  之间的无量纲拟合关系式,相关系数为0.993。

含水量9.6%比含水量8.1%的煤样的抗拉强度略低,但变化趋势一致。含水量8.1%但作

达式  $e = \sigma - p$ , 它奠定了土力学的基础<sup>[9]</sup>. 这一原理较好地符合了土体在孔隙水压作用下的变形形态. 后来,在对岩石在孔隙流体作用下的变形观测与研究中发现,太沙基的有效应力原理并不完全适用于这类材料, Nur 等<sup>[10]</sup>提出了修正的太沙基公式

$$e = \sigma - p \quad (0 \leq \sigma \leq 1)$$

式中:  $e$  为有效应力,  $\sigma$  为总应力,  $p$  为孔隙压力,  $\sigma$  为等效孔隙压力系数,  $\sigma = 1 - (K / K_s)$ ,  $K$ ,  $K_s$  分别为骨架与骨架材料的体弹性模量. 最近,赵阳升等<sup>[11]</sup>对煤体在孔隙瓦斯作用下的有效应力规律的实验研究也说明了这一点. 下面给出如何由实验来确定等效孔隙压力系数  $\sigma$  值的方法.

对于同一种孔隙率的煤样,使其受力条件为  $q_b = \sigma_z = p$ , 并且  $V_0$  与大气相通;作一组两种孔隙压  $p_1$  和  $p_2$  的实验,由此得到煤样破坏时的内压力  $q_{a1max}$  和  $q_{a2max}$ ,而此时作用于煤环内、外侧的有效应力分别为  $q_{a1max} - p_1, (1 - \sigma)p_1$  和  $q_{a2max} - p_2, (1 - \sigma)p_2$ ,把它们分别代入(2)式即可得到煤环试样破坏时内壁环向有效拉应力分别为

$$e_1 = \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} \cdot (q_{a1max} - p_1) - \frac{2b^2}{b^2 - a^2} \cdot (1 - \sigma)p_1$$

$$e_2 = \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} \cdot (q_{a2max} - p_2) - \frac{2b^2}{b^2 - a^2} \cdot (1 - \sigma)p_2$$

由于抗拉强度取决于有效拉应力,因此同一煤样破坏时的有效拉应力应当相等,即  $e_1 = e_2$ . 由此可以解得

$$\sigma = \frac{2b^2}{b^2 - a^2} - \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} \cdot \frac{q_{a2max} - q_{a1max}}{p_2 - p_1} \quad (4)$$

将两次实验的孔隙压  $p_1, p_2$  所对应的煤环破坏时的内压力  $q_{a1max}, q_{a2max}$  以及煤环内、外半径  $a$  和  $b$  的值代入上式,即可得到该孔隙率下的煤的等效孔隙压力系数  $\sigma$ . 为了使实验简单,其中一次的孔隙压取为标准大气压  $p_a$ .

对含水量 8.1% 的煤样在各种孔隙率下进行破坏实验,即可得到其对应的等效孔隙压力系数  $\sigma$ . 实验结果表明,当孔隙率在 0.19 ~ 0.41 之间变化时,等效孔隙压力系数  $\sigma$  在 0.85 ~ 1 之间变化. 特别是,当试样孔隙率比较高时(大于 0.37),  $\sigma$  值近似为 1,太沙基的有效应力表达式仍然适用;但当孔隙率比较低(小于 0.37)时,则应采用修正的太沙基公式.

### 3.4 材料弹性常数 $E, \nu$ 的确定

由图 2 所示的煤环受力示意图,便可以得到内、外压和侧压的有效应力表达式分别为  $\sigma_{ea} = q_a - p, \sigma_{eb} = q_b - p, \sigma_z = q_b - p$ ,把  $\sigma_{ea}$  和  $\sigma_{eb}$  分别代替(1), (2)两式中的  $q_a$  和  $q_b$ ,并把由此得到的  $\sigma_r, \sigma_z$  表达式与  $\sigma_z$  的表达式一起代入物理方程  $\sigma_r = \frac{1}{E} [ \sigma_r - (\sigma_r + \sigma_z) ]$ ,即可得到煤环内壁环向拉应变为

$$\epsilon_a = \frac{1}{E} \left[ \left( \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \sigma \right) (q_a - p) - \frac{2b^2}{b^2 - a^2} (1 - \sigma) p \right] \quad (5)$$

实验过程中使  $\nu = \nu_a$ , 因此  $p, q_b$  为常数,由此可得

$$E = \left[ \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \sigma \right] \cdot \frac{dq_a}{d\epsilon_a} \quad \text{第 2(6)}$$

由(6)式可知,要想从实验直接确定  $E$  和  $\nu$ , 必须对同一种密度的试样作两种不同尺寸的煤环实验. 实验时做了三种不同尺寸的煤环,每两种尺寸的煤环实验都可以求出  $E$  和  $\nu$ , 实验结果表

明,不同煤环尺寸的组合所求出的  $E$  和  $\nu$  值是一致的,这说明煤环尺寸大小对实验结果没有影响.

对各种相同密度的试样,做了一系列变煤环尺寸的实验. 根据实验数据,得到的各种密度煤样的泊松比基本相同,其值为  $\nu = 0.3$  左右;并且密度大的煤样的  $E$  值略大,密度小的煤样  $E$  值略小. 有了泊松比  $\nu$  值,就可以求出各种不同密度煤样的弹性模量  $E$ .

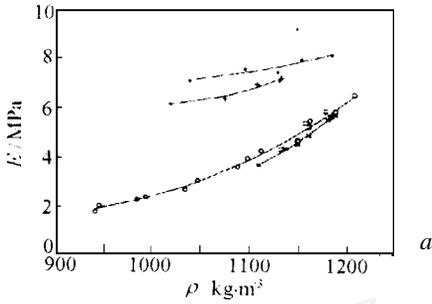


图7 弹性模量与试样密度之间关系的拟合曲线  
 1.  $\circ$ —水分 8.1%, 2.  $\times$ —水分 9.6%,  
 3.  $+$ —水分 8.1%, 烘干, 4.  $*$ —水分 9.6%, 烘干  
 Fig. 7 Fitted curves of elastic modulus vs coal density  
 $\circ$ —water content 8.1%,  $\times$ —water content 9.6%,  
 $+$ —water content 8.1%, drying treatment,  
 $*$ —water content 9.6%, drying treatment

图7为煤样的弹性模量与密度之间的拟合关系曲线. 在曲线1(含水量8.1%的煤样)中,弹性模量  $E$  随密度  $\rho$  的增加呈二次曲线的形式上升. 用二次曲线拟合  $E$ — $\rho$  关系,拟合曲线的无量纲表达式为

$$\frac{E}{E^*} = 14.2 - 30.9 \left[ \frac{\rho}{\rho^*} \right] + 17.7 \left[ \frac{\rho}{\rho^*} \right]^2$$

$$0.942 \leq \frac{\rho}{\rho^*} \leq 1.21$$

式中  $\rho^* = 1000, \text{kg/m}^3$  为标准煤样的密度,  $E^* = 2.30 \text{MPa}$  为标准煤样的弹性模量. 此式即为含水量8.1%的煤样的弹性模量  $E$  与密度  $\rho$  之间的无量纲拟合关系式,相关系数为 0.994.

含水量9.6%比含水量8.1%的煤样的弹性模量略低,但变化趋势一致;作烘干处理的煤样与相应未烘干的煤样相比,弹性模量提高一倍左右,并且是在密度较低的区域提高得多,在密度较高的区域提高得少,但是作烘干处理的煤样,其弹性模量的上升变缓.

### 4 结 论

1) 实验结果表明,我们设计的在环的内壁施加压力测量煤或土样的抗拉强度、拉伸应力-应变关系等拉伸特性的实验装置具有结构简单、实验数据稳定可靠、散布小、重复性好等特点.

2) 实验结果说明,实验中所涉及的四中煤样的拉伸应力-应变关系都是线弹性的,其破坏类型都属于脆性拉断破坏,并且裂纹扩展的平均速度为  $5 \text{m/s}$  量级.

3) 对含水量8.1%的试样,其抗拉强度随密度的增加呈二次曲线的形式上升,它们之间的无量纲拟合关系式为

$$\frac{E}{E^*} = 41.2 - 86.7 \left[ \frac{\rho}{\rho^*} \right] + 46.5 \left[ \frac{\rho}{\rho^*} \right]^2, \quad 0.942 \leq \frac{\rho}{\rho^*} \leq 1.21$$

烘干后的煤样其抗拉强度和破坏应变都有很大的提高,约为相应的未烘干煤样的 1~4 倍.

4) 四种煤样的泊松比基本相同(约为 0.3),弹性模量都是随密度的增加呈二次曲线的形式上升;对含水量8.1%的试样,弹性模量与密度之间的无量纲拟合关系式为

的拟合值  $\frac{E}{E^*} = 14.2 - 30.9 \left[ \frac{\rho}{\rho^*} \right] + 17.7 \left[ \frac{\rho}{\rho^*} \right]^2, \quad 0.942 \leq \frac{\rho}{\rho^*} \leq 1.21$

两种作烘干处理的煤样比相应未烘干煤样的弹性模量提高一倍左右。

5) 当试样的孔隙率在 0.19 ~ 0.41 之间变化时,等效孔隙压力系数在 0.85 ~ 1 之间变化;当孔隙率较高时,值接近于 1,太沙基的有效应力表达式仍然适用,但当孔隙率较低时,则应采用修正后的太沙基公式。

## 参 考 文 献

- 1 Che-Min Cheng, Chen Li, Ding Yansheng. A laboratory study of coal gas outburst. Proc. 2nd Int. Symp. Intense Dynamic Loading and Its Effects, Chengdu, China, June 1992. 3 ~ 15
- 2 俞善炳,郑哲敏等. 含气多孔介质的卸压破坏及突出的极强断裂准则. 爆炸与冲击, 1995(增刊): 1 ~ 2
- 3 Bishop AW, Garga VK. Drained tension test on London clays. *Geotechnique*, 1969, 19(2): 310 ~ 313
- 4 Ajaz A, Parry RHG. Stress - strain behaviour of two compacted clays in tension and compression. *Geotechnique*, 1975, 25(3): 497 ~ 512
- 5 Ajaz A, Parry RHG. Analysis of bending stresses in soil beams. *Geotechnique*, 1975, 25(3): 586 ~ 591
- 6 Gopala Krishnayya AV et al. Behaviour of compacted soil in tension. Proc. ASCE, JGED, 1975, 100(GT9): 371 ~ 378
- 7 Fang HY, Chen WF. Further study of double-punch test for tensile strength of soils, Proc. 3rd Southeast Asian Conf. on Soil Engineering, 1972. 236 ~ 242
- 8 徐芝纶. 弹性力学简明教程. 北京:人民教育出版社, 1983
- 9 Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics. New York: John Wiley and Sons Inc., 1943
- 10 Nur A, Byerlee JD. An exact effective stress law for elastic deformation of rock with fluids. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(26): 6414 ~ 6419
- 11 赵阳升,胡耀青. 孔隙瓦斯作用下煤体有效应力规律的实验研究. 岩土工程学报, 1995(3): 26 ~ 31

## EXPERIMENTAL STUDIES ON TENSILE STRESS-STRAIN RELATION OF SOFT COAL

Meng Xiangyue Ding Yansheng Zhu Huaiqiu Yu Shanbing Tan Qingming

( Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, Chinarm )

**Abstract** A test set-up for measuring tensile stress-strain relation and tensile strength of soft coal or soil is proposed. A ring-shaped coal sample pressed from coal powder is lined with a pressurized water bag. When the water pressure increases to a certain value, the coal sample in circumferential tension breaks down. Systematic experiments have been done to show the tensile stress-strain relation of the pressed coal sample with various sample density and pore pressure. The stress-strain relation is linear-elastic until brittle fracture takes place. The variation of the modified factor, the ratio of bulk moduli for modifying Terzaghi's expression for the effective stress, with porosity is also examined and analysed. The experimental data are reproducible and reliable, so that the proposed set-up is practicable.

**Key words** ring-shaped coal sample, elastic-brittle material, tensile strength, tensile stress-strain relation, ratio of bulk moduli