



套筒致裂岩体应力量测的模型试验研究

刘万禧 魏善斌

(淮南矿业学院 淮南 232001)

提 要

本文阐明了套筒致裂岩体应力量测的基本原理、套筒致裂技术,介绍了用石膏-砂子模型模拟岩体的套筒致裂试验结果和试验结果的分析,证明了套筒致裂岩体应力量测理论的正确性,揭示了裂缝的扩展规律,明确了利用压力-体积变化曲线的拐点确定关闭压力值,从而求出最小主应力和最大主应力,是合理的。

一、前 言

套筒致裂技术有似于水压致裂技术,已经逐步发展成一种岩体应力量测方法,用套筒致裂法量测岩体应力的优点就在于不需要套取岩芯,不需要用精致的钻孔装置去量测一个点的应变。

美国和瑞典在岩体应力量测中最早使用套筒致裂技术,该技术得到了其他国家的关注,1987年,淮南矿业学院地应力研究组着手进行套筒致裂技术的开发工作,进行了岩石试件和模型的套筒致裂试验研究;自1988至1989年,分别在淮南潘集二矿和孔集矿进行了巷道周围岩体应力的套筒致裂量测,取得了关于巷道周围岩体应力及弹性模量方面的实测数据,为判断围岩稳定性提供了科学依据,也为今后在我国开展岩体应力的套筒致裂量测积累了经验。

所进行的岩体应力套筒致裂量测模型试验的目的是,再现实际岩体的受力状态,检验所研制的套筒致裂装置的可靠性,摸索岩体应力量测的经验,验证套筒致裂理论的正确性。

二、基本理论

套筒致裂法的实质是,利用带耐高压橡皮套筒的应力计,向测试钻孔中某一段逐步施加压力,直至钻孔周围岩体出现张性裂缝时为止,钻孔周围岩体被假定为均质的、线弹性和各

向同性的。如果钻孔平行于3个主应力之一, 则垂直于钻孔平面上的最大主应力 $\sigma_{m,x}$ 和最小主应力 $\sigma_{m,i}$ 是作用于钻孔周围岩体的原岩应力。套筒致裂及水压致裂的实践表明, 钻孔周围岩体在钻孔受内压作用而出现的裂缝总是垂直于最小主应力。这些应力在孔壁出现裂缝处引起的切向应力 σ_t , 按照弹性理论应等于 $3\sigma_{m,i} - \sigma_{m,x}$ 。当钻孔周围岩体的抗拉强度 T 为已知时, 钻孔孔壁出现裂缝的必要条件是, 套筒致裂装置所产生的作用于孔壁上的破裂压力 P_0 应当满足如下条件, 即:

$$P_0 = T + 3\sigma_{m,i} - \sigma_{m,x} \quad (1)$$

式(1)的物理意义是, 钻孔内压在孔壁所产生的切向应力, 只有超过钻孔周围岩体的原岩应力 $\sigma_{m,x}$ 和 $\sigma_{m,i}$ 在钻孔内缘所产生的切向应力值 $3\sigma_{m,i} - \sigma_{m,x}$, 并能克服岩体的抗拉强度 T , 钻孔孔壁才会出现张性裂缝。

应当指出的是, 式(1)中的破裂压力 P_0 是表示套筒致裂装置作用于孔壁上的径向压力, 而不是套筒的内压。事实上, 套筒致裂装置作用于孔壁上的压力要低于套筒的内压, 它们之间的关系, 应针对套筒的材料性能、几何尺寸, 按照弹性理论加以计算或根据室内的钢管中加压试验方能确定。

在水压致裂岩体应力量测过程中, 最小主应力 $\sigma_{m,i}$ 是根据关闭压力值确定的。所谓关闭压力, 就是使裂缝重新张开, 并使液体等速流入裂缝时的液体压力。而在套筒致裂岩体应力量测过程中, 钻孔裂缝重新张开所需要的压力值决定于套筒致裂试验所得的压力—体积变化曲线的拐点。其依据是, 裂缝张开前和张开后套筒内部的体积变化速度发生了突变。式(1)中的 T 值可根据试件的套筒致裂试验所得的破裂压力 P_0 , 按照张性理论公式计算出来。因此, 由压力—体积变化曲线确定出关闭压力值, 该值等于最小主应力 $\sigma_{m,i}$, 则按式(1)可计算出最大主应力 $\sigma_{m,x}$ 。

为了量测岩体的弹性模量, 可在测试钻孔周围设置位移量测基点, 以便在套筒致裂试验过程中, 用带千分表的卡规量测基点之间的位移变化量。

如果以 P 表示钻孔的内压, 以 δ_0 表示基点间的位移增量, γ 表示基点至钻孔中心的距离, μ 为岩体的波松系数, E 为岩体的弹性模量, 则位移增量 δ_0 可以表述为

$$\delta_0 = \frac{2(1+\mu)a^2p}{Er} \quad (2)$$

$$\text{或 } E = \frac{2(1+\mu)a^2p}{\delta_0 r} \quad (3)$$

三、试验设备及试验方法

模型试验所需要的设备有: 容积为 $450 \times 450 \times 450\text{mm}$, 用34mm厚的钢板焊接而成的有底的立方框架; 用1.2mm厚的紫铜板焊接而成, 面积为 $400 \times 400\text{mm}$, 厚度为10mm, 并带有1快速接头进油管的平板千斤顶; 加压用的SYB-2型手动油泵、SY-480型手动试压泵和YU-600型活塞式压力计; 带千分表的位移量测卡; 加压用的套筒致裂装置(见图1)。

模拟岩体的模型是用石蜡和砂子浇铸而成的, 石蜡和砂子的配比为1:3。模型的抗拉强度为2.86MPa, 弹性模量为 $2.5 \times 10^3\text{MPa}$, 波松系数为0.28。采用石蜡、砂子模型基于以下几个原因: ①套筒致裂时的破裂压力与弹性模量无关; ②仅考虑受力状态的相似, 不需要考

考虑模型材料的相似；③石腊砂子材料可反复使用，而且试验周期短。

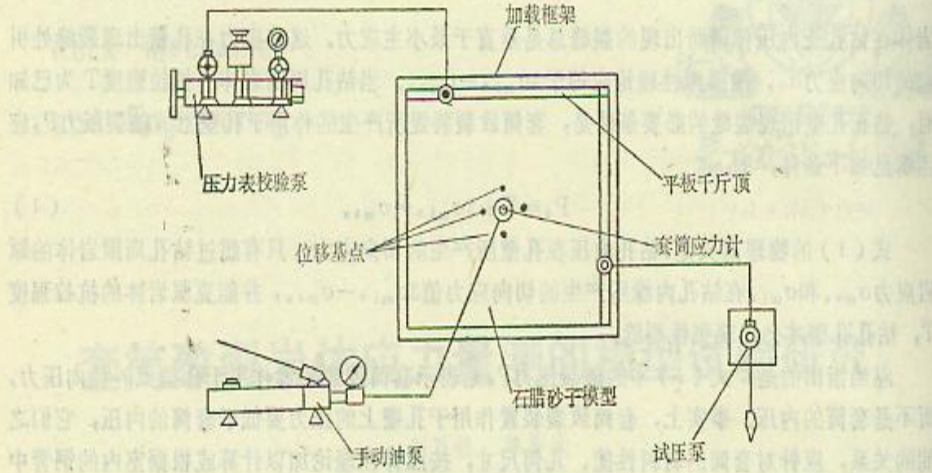


图1 套筒致裂模型试验装置

Fig.1 The equipment used in modelling for sleeve fracturing

模型致裂试验步骤如下：

1. 紧贴加载框架内表面安放2个相互垂直的平板千斤顶，在模型空间的中心位置垂直安放1根直径为60mm的钢管。
2. 把待熔化的石腊放入金属容器内并用电炉进行加温，使其变成液体后倒入加载框架里，然后按规定的配比掺入砂子并不断进行搅拌，直至石腊开始凝固时为止。
3. 待模型冷却24小时后，将埋于模型中心的钢管拔出，以便形成1个钻孔。
4. 在钻孔周围设置位移量测基点。
5. 将套筒致裂装置放入钻孔，套筒与孔壁之间以石腊和砂子的混合液充填。
6. 用高压橡胶管将平板千斤顶与SY-480型试压泵和YU-600 活塞式试压泵相连，将SYB-2型手动油泵与套筒装置相连。
7. 先使2个平板千斤顶增压至预定大小，以模拟原岩应力。
8. 再让套筒致裂装置增压至0.1MPa，然后卸压，以排除套筒内的空气，最后进行套筒致裂试验，用手动油泵每加一次压，记录一下压力表的读数，并用带千分表的卡规量一下各个方向的基点距离，直至孔壁出现响声而破裂为止，每个钻孔应重复加压1~2次，使裂缝重新张开和闭合。

四、试验结果及其分析

共进行了4次套筒致裂模型试验，其中的第一次和第二次试验的2个水平应力分别为 $\sigma_1 = 2\text{MPa}$ ， $\sigma_2 = 1\text{MPa}$ ，而第三次和第四次试验的2个水平应力为 $\sigma_1 = \sigma_2 = 2\text{MPa}$ 。4次模型试验的压力—体积（加压次数）变化曲线示于图2~图5，各次试验的加压数据、受力情况、破裂压力值及裂缝的扩展方向见表1~2。图6表示模型试验全貌，图7表示模型致裂后裂缝扩展情况。现将各次套筒致裂模型试验情况介绍如下：

第一次模型试验情况是：沿钻孔轴向方向出现纵向张性裂缝，裂缝方向与 σ_2 的应力方向仅偏 6° 左右，而且裂缝基本上是贯穿的，见图7。破裂压力达到了3.5MPa。

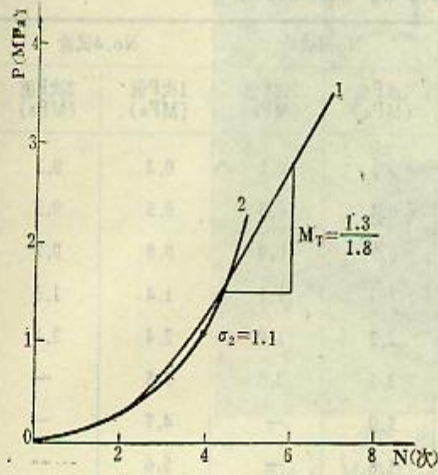


图2 第一次试验的压力-体积曲线
 Fig.2 Pressure-volume curves for modelling No.1

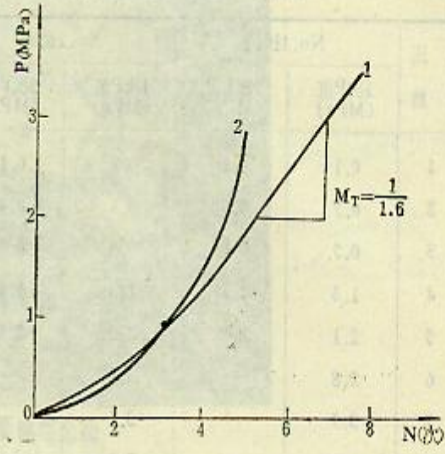


图3 第二次试验的压力-体积曲线
 Fig.3 Pressure-volume curves for modelling No.2

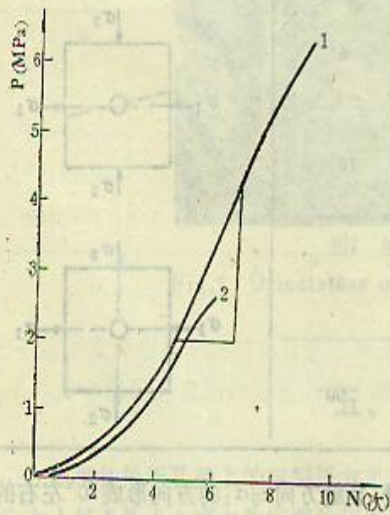


图4 第三次试验的压力-体积曲线
 Fig.4 Pressure-volume curves for modelling No.3

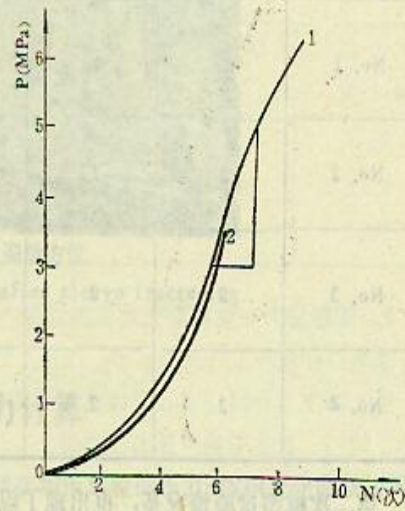


图5 第四次模型试验的压力-体积曲线
 Fig.5 Pressure-volume curves for modelling No.4

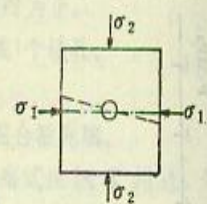
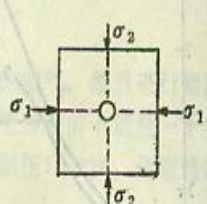
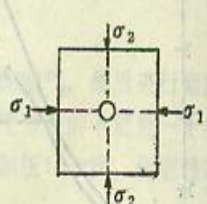
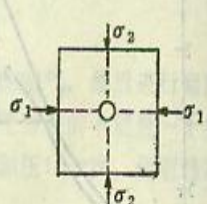
表 1 模型套筒致裂试验结果

Tab.1 Test results for sleeve fracturing with models

加 压 次 数	No.1试验		No.2试验		No.3试验		No.4试验	
	1次P值 (MPa)	2次P值 (MPa)	1次P值 (MPa)	2次P值 (MPa)	1次P值 (MPa)	2次P值 (MPa)	1次P值 (MPa)	2次P值 (MPa)
1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1
2	0.3	0.3	0.5	0.4	0.4	0.3	0.5	0.3
3	0.7	0.6	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7
4	1.3	1.1	1.3	1.4	1.3	1.1	1.4	1.3
5	2.1	2.3	2.0	2.9	2.2	1.9	2.4	2.1
6	2.8	—	2.6	—	3.5	3.5	3.5	—
7	3.5	—	3.1	—	5.0	—	4.7	—
8	—	—	3.6	—	5.8	—	5.6	—
9	—	—	—	—	6.6	—	6.5	—

表 2 模型的套筒致裂

Tab.2 Fractures in models by sleeve fracturing

模 型 试 验 编 号	主 应 力 值		破裂压力 P_0 (MPa)	裂缝与 σ_1 的夹角 (度)	破 坏 形 态
	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)			
No. 1	2	1	3.5	6°	
No. 2	2	1	3.6	10°	
No. 3	2	2	6.6	0°	
No. 4	2	2	6.5	90°	

第二次模型试验情况是：也出现了纵向张性裂缝，裂缝方向与 σ_1 的方向形成10°左右的夹角，裂缝向钻孔2侧延伸的距离为2倍的钻孔半径，破裂压力达到了3.6MPa。

第三次模型试验情况是：出现了纵向张性裂缝，裂缝方向与 σ_1 方向平行。本次试验是在2向等压情况下进行的，裂缝方向应当是随机的。但由于 σ_2 方向的阻力偏小，才出现了上述情况。破裂压力达到了6.6MPa。

第四次模型试验情况是：模型外表面未有出现很明显的张性裂缝，在套筒压力达到6.5MPa后，钻孔2侧出现纵向裂缝，裂缝方向基本上平行于 σ_2 。这说明 σ_1 方向的阻力小于 σ_2 方向。

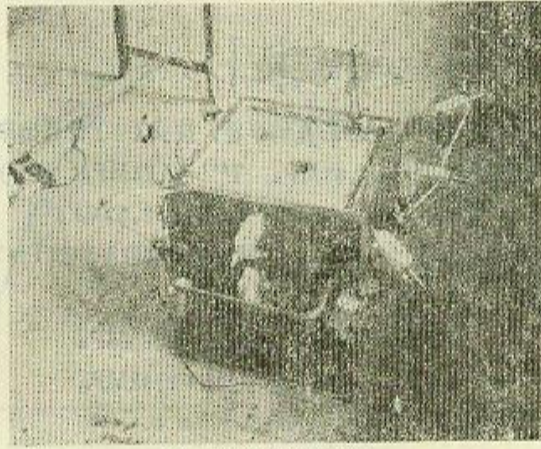


图6 套筒致裂模型全貌

Fig.6 Modelling for sleeve fracturing

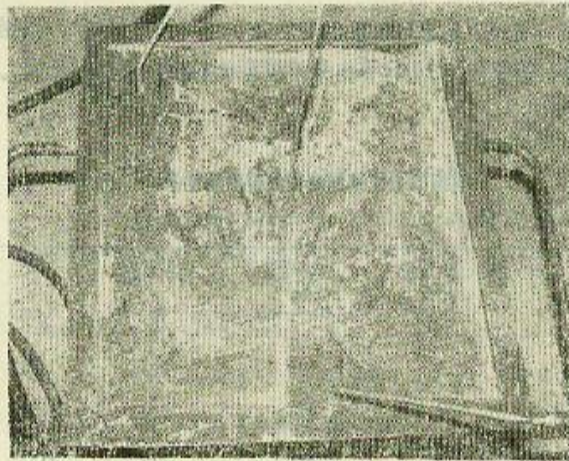


图7 模型致裂后的裂缝方位

Fig.7 Orientation of fracture after sleeve fracturing

五、岩体应力计算

在测得作用于孔壁上的破裂压力之后, 根据第2次加压试验的压力-体积变化曲线的拐点确定大小等于最小主应力的所谓关闭压力, 再求出模型材料的抗拉强度, 即可按理论公式计算出最大主应力来。

各次模型试验的二次加压的压力-体积变化曲线表明, 各次试验的关闭压力-拐点压力值为 $\sigma_{m1}^{(1)} = 1.1\text{MPa}$, $\sigma_{m1}^{(2)} = 0.9\text{MPa}$, $\sigma_{m1}^{(3)} = 1.9\text{MPa}$, $\sigma_{m1}^{(4)} = 2.1\text{MPa}$ 。

为了确定石膏砂子模型的抗拉强度 T , 曾浇筑了3个圆柱模型试件, 圆柱试件中心予留直径为8mm的钻孔, 圆柱外径为50mm。3个试件的套筒致裂试验结果是: 3次试验的破裂压力分别为 $P_0^{(1)} = 2.1\text{MPa}$, $P_0^{(2)} = 2.5\text{MPa}$, $P_0^{(3)} = 2.6\text{MPa}$ 。

按照厚壁计算公式, 试件中心孔在破裂压力 P_0 的作用下, 孔壁的切向应力 σ_c 应等于模型

的抗拉强度 T ，也即：

$$\sigma_t = T = \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} p_0 \quad (4)$$

式中 r_2 —圆柱试件的外半径； r_1 —中心孔的半径。按式(4)计算出来的各次试验的抗拉强度分别为 $T^{(1)}=2.21\text{MPa}$ ， $T^{(2)}=2.63\text{MPa}$ ， $T^{(3)}=2.74\text{MPa}$ ，取 T 的平均值，得

$$\bar{T} = \frac{1}{3} (2.21 + 2.63 + 2.74) = 2.53\text{MPa}$$

若将各次试验的关闭压力值代入式(1)，式中的 T 值取平均值 $\bar{T}=2.53\text{MPa}$ ，则各次试验的最大主应力为：

$$\sigma_{m1x}^{(1)} = 2.13\text{MPa}, \sigma_{m1x}^{(2)} = 1.83\text{MPa}$$

$$\sigma_{m2x}^{(2)} = 1.93\text{MPa}, \sigma_{m2x}^{(3)} = 2.33\text{MPa}$$

六、模型的弹性模量计算

1. 根据压力—位移曲线的计算

根据第一次和第二次模型试验数据绘制的压力—位移曲线见图8。根据各曲线的直线段压力增量和位移增量，按照式(3)计算出来的模型体的弹性模量列于表3。模型体的平均弹性模量为 $1.03 \times 10^3 \text{MPa}$ 。

表3 模型体弹性模量套筒致裂量测结果
Tab.3 Model modulus by sleeve fracturing

试 验 编 号	方 向	压力增量 ΔP (MPa)	位移增量 ΔU (10^{-3}mm)	波松系数 μ	$\frac{a^2}{R}$ (cm)	弹性模量 E (MPa)
No.1	σ_1	3	70	0.3	1.042	1.16×10^3
No.2	σ_1	4	118	0.3	1.042	9.2×10^2
No.3	σ_2	4	107	0.3	1.042	1.01×10^3

2. 根据压力—体积变化曲线的计算

胡斯特鲁利得 (Hustrulid, 1975) 曾发表了用套筒应力计测定岩石弹性模量的数学推导。用套筒应力计测定岩石弹性模量的第一步是确定整个加压系统的刚度，包括手动油泵、液体、阀门、橡皮套筒及压力传感器。

加压系统的刚度可按如下公式计算，即：

$$M_s = \frac{M_c \cdot M_m}{M_c - M_m} \quad (5)$$

式中 M_c —率定钢管的计算刚度 (MPa/n)； M_m —加压系统和率定钢管的实测刚度 (MPa/n)； M_s —加压系统的刚度 (MPa/n)。

如果将套应力计放入模型中央的钻孔进行加压试验，则加压系统和模型的压力—体积变化曲线的斜率 M_r 可以被确定。而模型体本身的压力—体积曲线的斜率可表述为

$$M_r = \frac{M_s \cdot M_\tau}{M_s - M_\tau} \quad (6)$$

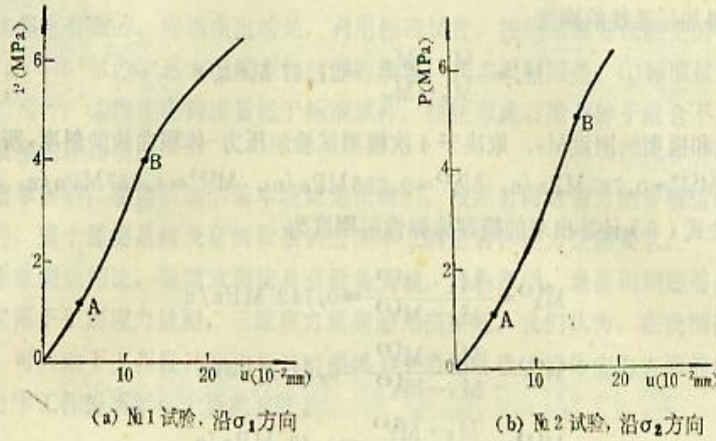


图8 第一次和第二次试验的压力一位移曲线

Fig.8 Pressure-displacement curves for modelling No.1 and No.2

式中 M_T -加压系统和模型的刚度 (MPa/n)； M_s -加压系统的刚度 (MPa/n)； M_R -模型的刚度 (MPa/n)。

当钻孔直径远小于模型平面尺寸时，模型的刚性模量可按如下公式计算，即：

$$G_R = \frac{M_R \pi L r^2}{V} \quad (7)$$

式中 L -套筒应力计的长度； r -钻孔的半径； V -手动油泵每加压一次被排出的液体体积。

根据套筒应力计在钢管里的加压试验绘制的压力-体积曲线，加压系统和率定钢管的实测刚度为

$$M_m = \frac{33}{2} = 16.2 \text{ MPa/n}$$

根据弹性理论，钢管的计算刚度

$$M_c = 42.01 \text{ MPa/n}$$

由式(5)可得加压系统的刚度

$$M_s = \frac{M_c \cdot M_m}{M_c - M_m} = 27.17 \text{ MPa/n}$$

加压系统和模型的刚度 M_T , 取决于4次模型试验的压力-体积曲线的斜率, 所得到的 M_T 值分别为: $M_T^{(1)} = 0.722 \text{ MPa/n}$, $M_T^{(2)} = 0.625 \text{ MPa/n}$, $M_T^{(3)} = 1.357 \text{ MPa/n}$, $M_T^{(4)} = 1.1 \text{ MPa/n}$. 再按式(6)计算出来的模型体弹性的刚度为

$$M_k^{(1)} = \frac{M_s \cdot M_T^{(1)}}{M_s - M_T^{(1)}} = 0.742 \text{ MPa/n}$$

$$M_k^{(2)} = \frac{M_s \cdot M_T^{(2)}}{M_s - M_T^{(2)}} = 0.64 \text{ MPa/n}$$

$$M_k^{(3)} = \frac{M_s \cdot M_T^{(3)}}{M_s - M_T^{(3)}} = 1.42 \text{ MPa/n}$$

$$M_k^{(4)} = \frac{M_s \cdot M_T^{(4)}}{M_s - M_T^{(4)}} = 1.14 \text{ MPa/n}$$

而各次模型试验的模型刚性模量, 在已知钻孔半径 $r = 3 \text{ cm}$, 套筒长度 $L = 37 \text{ cm}$, 每打一次压手动油泵排出的液体体积 $V = 2.3 \text{ cm}^3/\text{n}$ 的情况, 按照式(7)可写为

$$G_k^{(1)} = \frac{M_k^{(1)} \pi L r^2}{V} = 337.3 \text{ MPa}$$

$$G_k^{(2)} = \frac{M_k^{(2)} \pi L r^2}{V} = 290.96 \text{ MPa}$$

$$G_k^{(3)} = \frac{M_k^{(3)} \pi L r^2}{V} = 649.19 \text{ MPa}$$

$$G_k^{(4)} = \frac{M_k^{(4)} \pi L r^2}{V} = 519.54 \text{ MPa}$$

模型体的弹性模量与刚性模量之间有如下关系, 即:

$$E_k = 2(1 + \mu_k) G_k \quad (8)$$

取波松系数 $\mu_k = 0.28$, 由式(8)可得各次模型试验的模型体弹性模量

$$E_k^{(1)} = 2(1 + \mu_k) G_k^{(1)} = 0.864 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$$E_k^{(2)} = 2(1 + \mu_k) G_k^{(2)} = 0.745 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$$E_k^{(3)} = 2(1 + \mu_k) G_k^{(3)} = 1.66 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$$E_k^{(4)} = 2(1 + \mu_k) G_k^{(4)} = 1.33 \times 10^3 \text{ MPa}$$

七、讨论与展望

根据实测的破裂压力, 按照理论公式计算出来的各次模型试验的最大主应力和最小主应力值, 与实际的千斤顶压力 σ_1 和 σ_2 相比较, 相差不大, 最大主应力 $\sigma_{m \cdot x}$ 的最大误差为10%, 而最小主应力 $\sigma_{m \cdot n}$ 的最大误差为16%. 最大主应力 $\sigma_{m \cdot x}$ 和最小主应力 $\sigma_{m \cdot n}$ 与实际的主应力 σ_1 和 σ_2 的方向的最大误差为10°.

根据压力-位移曲线确定的模型体弹性模量为 $0.9 \times 10^3 \sim 1.16 \times 10^3 \text{ MPa}$, 而根据压力

一曲线确定的弹性模量为 $0.8 \times 10^3 \sim 1.66 \times 10^3$ MPa, 相差不算大。因此, 2种弹性模量的确定方法都是有效的。应当指出的是, 利用标准试件, 按照常规方法测定的模型材料的弹性模量为 2.5×10^3 MPa, 远大于模型体的弹性模量。其主要原因是: ①标准试件的尺寸远小于模型体的尺寸; ②模型浇铸质量低于标准试件, 往往形成石腊与砂子混合不均匀的情况, 从而造成模型的不均质。

试验结果表明, 套筒致裂的基本理论是正确的, 按照套筒致裂量测步骤进行岩体应力量测是可行的, 整个量测系统及套筒致裂装置基本上满足岩体应力量测要求。

与水压致裂法相比, 套筒致裂法具有设备简单, 容易掌握, 量测周期短等优点。其缺点是, 目前仅限于平面应力量测, 三维应力量测还无法实现。我们认为, 在我国推广使用套筒致裂技术, 可为地下工程设计和施工及时提供关于岩体性质及岩体应力方面的信息, 会使我们的岩石力学工作提高到一个新的水平。

参 考 文 献

- (1) 刘万禧, 水压致裂的实验研究, 中国矿业学院学报, 1983, 1, 39—45.
- (2) Hustrulid, W. and Hustrulid, A., The CSM cell—a borehole device for determining the modulus of rigidity of rock, Application of Rock Mechanics, New York: American Society of Civil Engineers, 1973, 181—225.
- (3) Dean, A. H. and Beatty, R. A., Rock stress measurements using cylindrical jacks and flat jacks at North Broken Hill Limited, Proc. Annual Conf. A. I. M. M., Broken Hill, 1968, 1—8.
- (4) Hooker, V. E., A borehole device to determine in-situ elastic constants of coal measure rocks, Rock Mechanics Instrumentation for Mine Design, U. S. Bureau of Mines Information Circular IC8585, 1973, 57—67.

Modelling Experiment of Sleeve Fracturing Technique for Rock Stress Measurements

Chou Wanxi Wei Shanbin

(Huainan Mining Institute, Huainan, 232001)

Abstract

Sleeve fracturing technique has been developed as a method for in-situ rock stress measurement. By the sleeve fracturing technique, rock deformability and rock stresses can be determined. As compared with other methods in common use, this technique can determine directly the average stress over a large area rather than measure the strain at a point using sophisticated instruments in boreholes. The authors have carried out laboratory experiments on models simulating the situation of sleeve fracturing in order to confirm the theory. The technique of using sleeve fracturing to determine principal stresses is briefly discussed. A brief description of the equipment used in modelling is also included. Some results obtained from sleeve fracturing are presented.