

DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2017.10.015

# 煤矿深部流变岩体中压力传感器的 应力分布规律

郭建伟<sup>1</sup>, 杨战标<sup>1</sup>, 罗慈友<sup>2</sup>, 蒋景东<sup>3</sup>

(1. 中国平煤神马集团, 河南 平顶山 467000; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;  
3. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 流变应力恢复法是针对煤矿深部软岩而提出的一种地应力测量新方法, 该方法基于煤矿深部软岩的强流变力学行为, 采用在围岩钻孔中埋设压力传感器的方法来获取实测应力, 进而根据压力传感器的实测应力来分析岩体的初始应力。为了解压力传感器在煤矿深部流变岩体中的测量特性, 对流变岩体中埋设压力传感器并注浆回填的二维平面应变问题进行理论分析, 推导岩体为黏弹性三参量固体模型和 Burgers 模型时压力传感器实测应力的解析解; 通过参数分析, 揭示浆液凝固时间、浆液力学性质及岩体黏弹性参数对压力传感器实测应力的影响规律。  
**关键词:** 煤矿; 深部围岩; 流变应力恢复法; 地应力测试; 黏弹性

中图分类号: TD311

文献标志码: A

文章编号: 1003-496X(2017)10-0055-06

## Stress Distribution of Sensor Embedded in Deep Rheological Rock Mass of Coal Mine

GUO Jianwei<sup>1</sup>, YANG Zhanbiao<sup>1</sup>, LUO Ciyou<sup>2</sup>, JIANG Jingdong<sup>3</sup>

(1. China Pingmei Shenma Group, Pingdingshan 467000, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The rheological stress recovery method is a new geostress measurement method especially appropriate for deep soft rock. According to this method, the pressure transducers are embedded into the boreholes of surrounding rock. The geostress of surrounding rock can be obtained by analyzing the measured pressure. In order to know the measuring properties of transducers in deep rheological rock mass, the two-dimensional plane strain problem of transducer embedded in rock mass is discussed. The analytical solutions of stress distribution of transducer are deduced by assuming rock mass satisfying three-parameter solid model and Burgers model. Then, the influence of setting time of slurry, the mechanical property of slurry and the viscoelastic parameters of rock mass on the measured stress of transducer is investigated by parameters analysis.

**Key words:** coal mine; deep surrounding rock; rheological stress recovery method; geostress measurement; viscoelasticity

目前, 煤矿中常用的地应力测试方法主要是水压致裂法<sup>[1-3]</sup>和应力解除法<sup>[4-5]</sup>, 由于它们对钻孔质量要求较高, 一般适用于完整围岩。然而, 受沉积环境以及构造运动的影响, 煤矿深部巷道围岩大多岩质软弱、节理裂隙发育。在这种岩性条件下, 上述 2 种方法很难实施, 成功率低。为此, 刘泉声等<sup>[6-8]</sup>提出了 1 种专门针对深部软弱围岩地应力测量的新方法——流变应力恢复法, 其地应力测量示意图如图 1。该方法在深部巷道围岩钻孔中埋设压力传感器, 并采用匹配的注浆材料充填密实。由于深部软岩在高应力作用下的强流变行为, 传感器周围的应力将逐

渐上升并最终趋于稳定, 进而利用压力传感器获得的 6 个方向的正应力来解算围岩的初始应力状态。

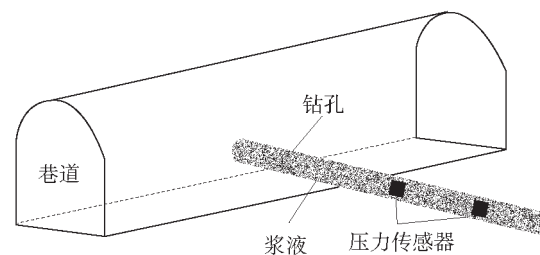


图 1 流变应力恢复法地应力测量示意图

由于压力传感器、回填浆体及岩体之间力学性质的巨大差异,压力传感器埋入后必然会引起钻孔围岩应力场的重新分布,导致压力传感器实测应力的重大不确定性。为此,需要对压力传感器在黏弹性岩体中的应力分布进行理论分析,将假设岩体为均质、线黏弹性、各向同性,分别采用 Burgers 模型及三参数固体模型对岩体黏弹性行为进行描述,分析压力传感器实测应力的影响因素及规律。

### 1 求解模型

二维平面应变问题求解模型如图 2,假定煤矿深部围岩为均匀、连续、各向同性的黏弹性材料,在其中开挖 1 个半径为  $r_0$  的钻孔,假设传感器及浆体均为圆形弹性体,传感器外半径为  $a$ 、内半径  $b$ ,钻孔、浆体和传感器共圆心( $r_0 > a > b$ )。 $p$  为作用于无穷远处的竖向地应力,侧压力系数为  $\lambda$ ,假设钻孔、浆体以及传感器之间接触光滑。

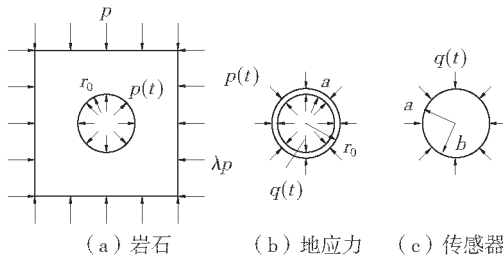


图 2 二维平面应变问题求解模型示意图

根据流变应力恢复法地应力测量过程,分析分为 2 个阶段:第 1 阶段是从钻孔开挖( $t=0$ )开始到传感器埋设且浆液发生凝固为止( $t=t_1$ ),这一阶段由于钻孔开挖作用围岩将发生应力释放,浆体及传感器均没有作用力;第 2 阶段从浆液凝固( $t=t_1$ )到任意时刻  $t$ ,此时浆体、传感器、围岩将要发生相互作用。假设围岩与浆体的作用力为  $p(t)$ ,浆体与传感器之间的作用力为  $q(t)$ 。

对于上述的平面应变问题,可以采用极坐标系( $r, \theta, z$ )进行解答,从而无穷远处的地应力可以表示为:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= p(1+\lambda+(1-\lambda)\cos 2\theta)/2 \\ \sigma_\theta &= p(1+\lambda-(1-\lambda)\cos 2\theta)/2 \\ \tau_{r\theta} &= p(\lambda-1)\sin 2\theta/2 \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ 、 $\tau_{r\theta}$  分别是岩体的径向、环向和剪切应力。

根据式(1),可以将应力边界可分为 2 部分:均匀压应力  $p(1+\lambda)/2$  和非均匀外部压力  $-p(1-\lambda)\cos 2\theta/$

2 及剪应力  $-p(1-\lambda)\sin 2\theta/2$ 。因此,围岩与浆体、浆体与压力传感器之间的相互接触压力可假设分为均布与非均布压力 2 部分,即:

$$p(t) = p_0(t) + p_1(t)\cos 2\theta \quad (2)$$

$$q(t) = q_0(t) + q_1(t)\cos 2\theta \quad (3)$$

式中:  $p_0(t)$ 、 $q_0(t)$  分别为均布应力场下围岩与浆体、浆体与传感器之间的接触压力,  $p_1(t)\cos 2\theta$ 、 $q_1(t)\cos 2\theta$  分别为偏差应力场下围岩与浆体、浆体与压力传感器之间的接触压力。

当浆液凝固后  $t > t_1$  (或  $t > 0$ ),此黏弹性分析的位移边界条件为:

$$u_{rg}(r, t) = u_r(r, t), \quad u_{ng}(a, t) = u_n(a, t) \quad (4)$$

式中:  $u_{rn}$ 、 $u_{rg}$ 、 $u_{ng}$  分别为岩体、浆体、传感器的位移。

### 2 应力求解

#### 2.1 均布应力场作用下的黏弹性分析

根据黏弹性理论中的对应原理<sup>[9-10]</sup>,岩体在均布应力场( $p(1+\lambda)/2$ )作用下在钻孔边界的黏弹性位移为:

$$u_n(r, t) = \frac{pr(1+\lambda)}{4} J_r(t) \quad (5)$$

式中:  $J_r(t)$  表示剪切蠕变柔量。

由于在浆液凝固后  $t_1 > t_2$  (或  $t > 0$ ),岩体与浆体之间将存在接触压力,因此岩体在钻孔边界处的总位移为:

$$u_n(r_0, t) = \frac{(1+\lambda)pr_0}{4} \Delta J_r - \frac{p_0(t)r_0}{2G_r}(t) \quad (6)$$

式中:  $G_r$  是岩体的剪切模量;  $\Delta J_r = J_r(t+t_2) - J_r(t_2)$ 。

考虑岩体为线黏弹性材料,将式(6)进行拉普拉斯变化,结果如下:

$$\bar{u}_n(r, s) = \frac{(1+\lambda)pr}{4} \Delta \bar{J} - \frac{\bar{p}_0(s)r}{2\bar{G}(s)} \quad (7)$$

由于浆体为线弹性材料,在接触压力  $p_0$  及  $q_0$  作用下的,其径向位移在拉氏空间可以表示为:

$$\begin{aligned} \bar{u}_{ng}(r_0, s) &= \frac{\bar{p}_0(s)r_0}{2G_g} X_{g1} - \frac{\bar{q}_0(s)r_0}{2G_g} Y_{g1} \\ \bar{u}_{ng}(a, s) &= \frac{\bar{p}_0(s)a}{2G_g} X'_{g1} - \frac{\bar{q}_0(s)a}{2G_g} Y'_{g1} \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $X_{g1} = \frac{a^2+r_0^2(1-2\mu_g)}{r_0^2-a^2}$ ,  $Y_{g1} = \frac{a^2(2-2\mu_g)}{r_0^2-a^2}$ ,  $X'_{g1} = \frac{r_0^2(2-2\mu_g)}{r_0^2-a^2}$ ,  $Y'_{g1} = \frac{r_0^2+a^2(1-2\mu_g)}{r_0^2-a^2}$ ;  $G_g$ 、 $\mu_g$  分别为浆体剪切模量和泊松比。

传感器与浆体接触面( $r=a$ )上的位移在拉氏空

间的表达式为：

$$\bar{u}_n(a, s) = \frac{\bar{q}_0(s)a}{2G_1} X_{11}$$

式中： $G_1, \mu_1$  分别表示为传感器的弹性模量和泊松比； $X_{11} = (b^2 + (1 - 2\mu_1)a^2) / (a^2 - b^2)$ 。

### 2.2 非均布应力场作用下的黏弹性分析

根据叠加原理，结合岩体在非均布地应力作用下的位移表达式，岩体在非均布应力场作用下在钻孔边界处的总位移在拉氏空间可以表示为：

$$\bar{u}_n(r_0, s) = \frac{(1-\lambda)(3-4\mu_r)}{4} p r_0 \Delta \bar{J}_r - \frac{5-6\mu_r}{6G_1(s)} \bar{p}_1(s) r_0 \cos 2\theta \quad (9)$$

浆体在非均布压力作用下的径向位移在拉氏空间上可以表示为：

$$\bar{u}_{rg}(r_0, s) = \left( \frac{\bar{p}(s)r_0}{2G_g} X_{g2} - \frac{\bar{q}_1(s)r_0}{2G_g} Y_{g2} \right) \cos 2\theta$$

$$\bar{u}_{rg}(a, s) = \left( \frac{\bar{p}_1(s)a}{2G_g} X_{g2}' - \frac{\bar{q}_1(s)a}{2G_g} Y_{g2}' \right) \cos 2\theta \quad (10)$$

各分量式为：

$$X_{g2} = y_{c1} - y_{c3} r_0^{-4} + 2\mu_g y_{c3} r_0^{-2} - 2(1-\mu_g) y_{c7} r_0^{-2}$$

$$Y_{g2} = y_{c2} - y_{c3} r_0^{-4} + 2\mu_g y_{c3} r_0^{-2} - 2(1-\mu_g) y_{c8} r_0^{-2}$$

$$X'_{g2} = y_{c1} - y_{c3} a^{-4} + 2\mu_g y_{c3} a^{-2} - 2(1-\mu_g) y_{c7} a^{-2}$$

$$Y'_{g2} = y_{c1} - y_{c3} a^{-4} + 2\mu_g y_{c3} a^{-2} - 2(1-\mu_g) y_{c7} a^{-2}$$

$$y_{c1} = \frac{r_0^6 + r_0^4 a^2 + 2r_0^2 a^4}{(r_0^2 - a^2)^3} \quad y'_{c2} = \frac{2r_0^4 a^2 + r_0^2 a^4 + a^6}{(r_0^2 - a^2)^3}$$

$$y_{c3} = -\frac{r_0^4 + 3r_0^2 a^2}{3(r_0^2 - a^2)^3} \quad y'_{c4} = -\frac{3r_0^2 a^2 + a^4}{3(r_0^2 - a^2)^3}$$

$$y_{c5} = \frac{3r_0^6 a^4 + r_0^4 a^6}{3(r_0^2 - a^2)^3} \quad y'_{c6} = \frac{r_0^6 a^4 + 3r_0^4 a^6}{3(r_0^2 - a^2)^3}$$

$$y_{c7} = -\frac{2r_0^6 a^2 + r_0^4 a^4 + r_0^2 a^6}{(r_0^2 - a^2)^3} \quad y'_{c8} = -\frac{r_0^6 a^2 + r_0^4 a^4 + 2r_0^2 a^6}{(r_0^2 - a^2)^3} \quad (11)$$

传感器在非均布接触压力作用下在接触面( $r=a$ )上的径向位移在拉氏空间上可以表示为：

$$\bar{u}_{11}(a, s) = \frac{\bar{q}_1(s)a}{2G_1} X_{12} \cos 2\theta \quad (12)$$

式中： $X_{12} = y_{11} - y_{13} a^{-4} + 2\mu_1 y_{13} a^{-2} - 2(1-\mu_1) \mu_1 y_{13} a^{-2}$ 。  
并且各分量式为：

$$y_{11} = \frac{a^6 + a^4 b^2 + 2a^2 b^4}{(a^2 - b^2)^3} \quad y'_{12} = -\frac{a^4 + 3a^2 b^2}{3(a^2 - b^2)^3}$$

$$y_{13} = \frac{3a^6 b^4 + a^4 b^6}{3(a^2 - b^2)^3} \quad y'_{14} = -\frac{2a^6 b^2 + a^4 b^4 + a^2 b^6}{(a^2 - b^2)^3} \quad (13)$$

根据式(4)，边界条件在拉氏空间可以表示为：

$$\bar{u}_n(r_0, s) = \bar{u}_{rg}(r_0, s) - \bar{u}_{11}(a, s) = \bar{u}_n(a, s) \quad (14)$$

将式(8)~式(10)及式(12)代入式(14)可求解得到接触面的应力：

$$\bar{p}_0(s) = \frac{(1+\lambda)p \Delta \bar{J}_r / 2}{\frac{1}{G_1(s)} + \frac{G_1 X_{g1} Y_{g1}' - G_1 Y_{g1} X_{g1}' + G_g X_{11} X_{g1}}{(G_1 Y_{g1}' + G_g X_{11}) G_g}} \quad (15)$$

$$\bar{p}_1(s) = \frac{(1+\lambda)(3-4\mu_r)p \Delta \bar{J}_r / 2}{\frac{5-6\mu_r}{3G_1(s)} + \frac{G_1 X_{g2} Y_{g2}' - G_1 Y_{g2} X_{g2}' + G_g X_{12} X_{g2}}{(G_1 Y_{g2}' + G_g X_{12}) G_g}} \quad (16)$$

$$\bar{q}_0(s) = \frac{(1+\lambda)p \Delta \bar{J}_r / 2}{\frac{G_1 G_g Y_{g1}' + G_g^2 X_{11}}{G_1 G_g X_{g1}'} \cdot \frac{1}{G_1(s)} + \frac{G_1 X_{g1} Y_{g1}' - G_1 Y_{g1} X_{g1}' + G_g X_{11} X_{g1}}{G_1 G_g X_{g1}'}} \quad (17)$$

$$\bar{q}_1(s) = \frac{(1+\lambda)(3-4\mu_r)p \Delta \bar{J}_r / 2}{\frac{G_1 Y_{g2}' + G_g X_{12}}{G_1 X_{g2}'} \cdot \frac{5-6\mu_r}{3G_1(s)} + \frac{G_1 X_{g2} Y_{g2}' - G_1 Y_{g2} X_{g2}' + G_g X_{12} X_{g2}}{G_1 G_g X_{g2}'}} \quad (18)$$

### 2.3 岩体为 Burgers 流变模型

煤矿深部破碎软弱岩体在高地应力作用下显示出强烈的与时间因素相关的黏弹性力学行为，在这种情况下，可以用 Burgers 模型来描述岩体的应力-应变关系<sup>[11]</sup>表述，Burgers 流变模型如图 3。

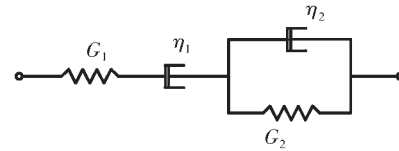


图 3 Burgers 流变模型

相应的剪切微分本构关系可以表示为：

$$\tau + p_1 \dot{\tau} + p_2 \ddot{\tau} = Q_1 \dot{\gamma} + Q_2 \ddot{\gamma} \quad (19)$$

式中： $p_1 = \frac{\eta_2}{G_2} + \frac{\eta_1}{G_1} + \frac{\eta_1}{G_2}$ ， $p_2 = \frac{\eta_1 \eta_2}{G_1 G_2}$ ； $Q_1 = \eta_1$ ， $Q_2 =$

$\frac{\eta_1 \eta_2}{G_2}$ 。 $\eta_1, \eta_2$  为串联和并联位置的黏滞系数； $G_1, G_2$  为串联和并联位置的剪切模量。

将上述本构关系代入式(16)和式(18)，再进行拉普拉斯逆变换，即可得到传感器与浆体接触面上的接触压力：

$$q(t) = q_0(t) + q_1(t) \cos 2\theta = \frac{1+\lambda}{2} \frac{G_1 X_{g1}' p}{G_1 Y_{g1}' + G_g X_{11}} \cdot (1 + \frac{x_2 - A_0}{x_1 - x_2} \exp(-x_1 t) + \frac{x_1 - A_1}{x_2 - x_1} \exp(-x_2 t)) + \frac{3(1-\lambda)(3-4\mu_0)}{2(5-6\mu_0)} \cdot \frac{G_1 X_{g2}' p}{G_1 Y_{g2}' + G_g X_{12}} \times (1 + \frac{x_4 - x_2}{x_3 - x_4} \exp(-x_3 t) + \frac{x_3 - A_2}{x_4 - x_3} \exp(-x_4 t)) \cos 2\theta \quad (20)$$

$$A_0 = \frac{\eta_2 + \eta_1 \exp(-G_2 t_0 / \eta_2)}{\eta_1 \eta_2 \left( \frac{1}{G_1} + \frac{G_1 X_{g1} Y_{g1}' - G_1 Y_{g1} X_{g1}' + G_g X_{11} X_{g1}}{(G_1 Y_{g1}' + G_g X_{11}) G_g} \right)}$$

$$A_1 = \frac{\eta_2 + \eta_1 \exp(-G_2 t_0 / \eta_2)}{\eta_1 \eta_2 \left( \frac{1}{G_1} + \frac{G_1 X_{g1} Y_{g1}' - G_1 Y_{g1} X_{g1}' + G_g X_{11} X_{g1}}{G_1 G_g Y_{g1}' + G_g^2 X_{11}} \right)}$$

$$A_2 = \frac{\eta_2 + \eta_1 \exp(-G_2 t_0 / \eta_2)}{\eta_1 \eta_2 \left( \frac{1}{G_1} + \frac{3(G_1 X_{g2} Y_{g2}' - G_1 Y_{g2} X_{g2}' + G_g X_{12} X_{g2})}{(G_1 G_g Y_{g2}' + G_g^2 X_{12})(5 - 6\mu_0)} \right)}$$

( $x_1, x_2$ ) 和 ( $x_3, x_4$ ) 分别为下列方程  $x_2 + (mp_1 + nQ_1) / (mp_2 + nQ_2)x + m / (mp_2 + nQ_2) = 0$  和  $x^2 + (m'p_1 + n'Q_1) / (m'p_2 + n'Q_2)x + m' / (m'p_2 + n'Q_2) = 0$  的 2 个根的反数, 其中:

$$m = \frac{G_1 G_g Y_{g1}' + G_g^2 X_{11}}{G_1 G_g X_{g1}'}$$

$$n = \frac{G_1 X_{g1} Y_{g1}' - G_1 Y_{g1} X_{g1}' + G_g X_{11} Y_{g1}}{G_1 G_g X_{g1}'}$$

$$m' = \frac{G_1 G_g Y_{g2}' + G_g^2 X_{12}}{G_1 G_g X_{g2}'}$$

$$n' = \frac{G_1 X_{g2} Y_{g2}' - G_1 Y_{g2} X_{g2}' + G_g X_{12} Y_{g2}}{G_1 G_g X_{g2}'}$$

#### 2.4 岩体为三参数固体流变模型

煤矿深部围岩完整性较好或者地应力水平较低的情况下, 其变形随时间增长而逐渐趋于稳定状态, 因而其黏弹性特性可用三参数固体模型表示, 三参数固体流变模型如图 4。

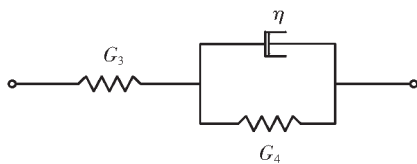


图 4 三参数固体流变模型

其剪切微分本构方程为:

$$1 + p_3 \dot{\tau} = Q_3 \gamma + Q_4 \dot{\gamma} \quad (21)$$

式中  $p_3 = \frac{\eta}{G_3 + G_4}$ ;  $Q_3 = \frac{G_3 G_4}{G_3 + G_4}$ ;  $Q_4 = \frac{\eta G_3}{G_3 + G_4}$   $\eta$  为

三参数模型黏滞系数;  $G_3, G_4$  为三参数模型串联和并联位置的剪切模量。

同样地, 压力传感器与浆体上的接触压力, 即压力传感器所测得的恢复应力可以表示为:

$$q(t) = q_0(t) + q_1(t) \cos 2\theta = \frac{1+\lambda}{2} p \left( 1 - \frac{G_\infty}{G_{ini}} \right) \frac{\exp(-G_2 t_0 / \eta)}{x_5 + G_\infty x_6} \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{x_5 + Q_3 x_6}{p_3 x_5 + Q_4 x_6} t\right) \right) + \frac{1-\lambda}{2} p (3 - 4\mu_r) \left( 1 - \frac{G_\infty}{G_{ini}} \right) \cdot \frac{\exp(-G_2 t_0 / \eta)}{x_7 + G_\infty x_8} \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{x_7 + Q_3 x_8}{p_3 x_7 + Q_4 x_8} t\right) \right) \cos 2\theta \quad (22)$$

式中  $G_\infty = G_3 G_4 / (G_3 + G_4)$  为长期剪切模量;  $G_{ini} = G_3$  是初始剪切模量。

$$x_5 = \frac{G_1 Y_{g1}' + G_g X_{11}}{G_1 X_{g1}'}$$

$$x_6 = \frac{G_1 Y_{g2}' + G_g X_{12}}{G_1 X_{g2}'}$$

$$x_7 = \frac{G_1 X_{g1} Y_{g1}' - G_1 Y_{g1} X_{g1}' + G_g X_{11} X_{g1}}{G_1 G_g X_{g1}'}$$

$$x_8 = \frac{G_1 X_{g2} Y_{g2}' - G_1 Y_{g2} X_{g2}' + G_g X_{12} Y_{g2}}{G_1 G_g X_{g2}'}$$

### 3 压力传感器实测应力影响因素分析

假设  $r_0 = 65 \text{ mm}$ 、 $a = 55 \text{ mm}$ 、 $b = 50 \text{ mm}$ , 岩体垂直方向的应力为  $10 \text{ MPa}$ , 侧压力系数  $\lambda = 1.2$ , 压力传感器及浆体的参数为:  $G_g = 4 \text{ GPa}$ ,  $\mu_g = 0.35$ ,  $G_1 = 80 \text{ GPa}$ ,  $\mu_1 = 0.25$ 。Burgers 流变模型参数<sup>[10]</sup>:  $G_1 = 2\ 576 \text{ MPa}$ ,  $G_2 = 1\ 903 \text{ MPa}$ ,  $\eta_1 = 167 \times 10^5 \text{ MPa} \cdot \text{h}$ ,  $\eta_2 = 1.688 \times 10^5 \text{ MPa} \cdot \text{h}$ , 三参数固体流变模型参数:  $G_3 = 2\ 576 \text{ MPa}$ ,  $G_4 = 1\ 903 \text{ MPa}$ ,  $\eta = 167 \times 10^5 \text{ MPa} \cdot \text{h}$ 。

#### 3.1 浆液凝固时间对恢复应力的影响

浆液的凝固时间假设为 7 个不同的值: 0、10、20、50、100、200、500 h, 其他参数与上述相同, 取  $\theta = 0^\circ$  处的传感器所测得的恢复应力进行分析, 岩体黏弹性模型取 Burgers 及三参数固体模型的浆液凝固时间对恢复应力的影响结果如图 5 和图 6。

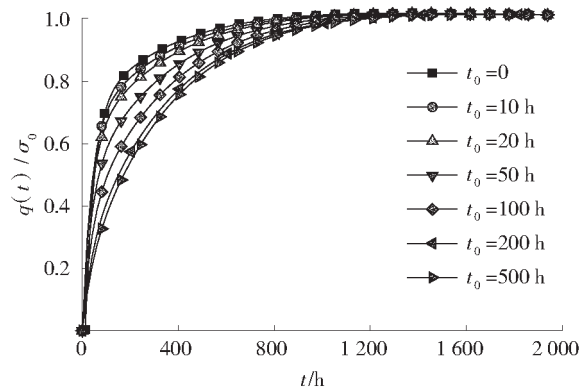


图 5 浆液凝固时间对恢复应力的影响(Burgers 模型)

从图 5 和图 6 都可以看出, 随着时间的增加, 传感器所测得的恢复应力逐渐增大并经过一定的时间后趋于稳定。围岩黏弹性模型采用 Burgers 模型时, 随着浆液凝固时间增加, 传感器测得的最终恢复应力(即恢复应力的稳定值)相同, 与初始应力之比接近于 1, 只是达到最终恢复应力所需时间增加; 围岩黏弹性模型采用三参数固体模型时, 随着浆液凝固时间的增大, 最终恢复应力的大小从约为初始应力

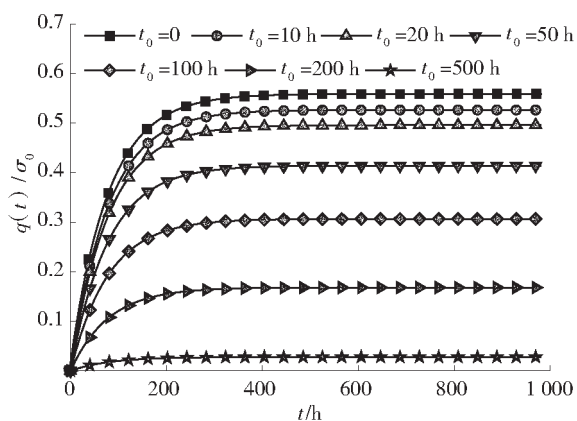


图 6 浆液凝固时间对恢复应力的影响(三参数固体模型)

的 60% 左右逐渐降低至接近于 0。因此可以看出,对于岩体不论是黏弹性固体模型或是流体模型,在钻孔开挖完成后到传感器埋设完成、浆液完全凝固之间的时间越短,越有利于传感器所测应力的恢复。从而在进行流变应力恢复法地应力实测时,必须在钻孔完成后尽快进行传感器的埋设及注浆,并选用凝固较快的注浆材料。

### 3.2 浆体模量对恢复应力的影响

考虑不同浆体模量对传感器所测恢复应力的影响,注浆材料与传感器模量(传感器的剪切模量固定为 80 GPa)之比分别为 1:1, 1:2, 1:5, 1:10, 1:25, 1:50, 1:100, 1:200, 1:500。假设浆体材料凝固时间为  $t_0=10$  h,其余参数与前述相同,取  $\theta=0^\circ$  处的传感器所测得的恢复应力进行分析,岩体黏弹性模型取 Burgers 模型及三参数固体模型的浆体模量对恢复应力的影响结果分别如图 7 和图 8。

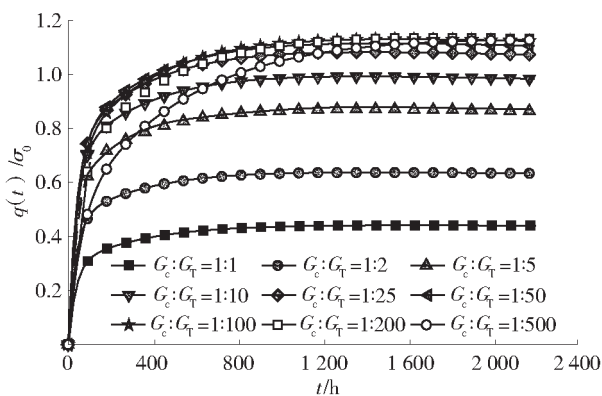


图 7 浆体模量对恢复应力的影响(Burgers 模型)

岩体采用 Burgers 模型,随着传感器与注浆材料模量之比增大,传感器最终恢复应力逐渐增大,在

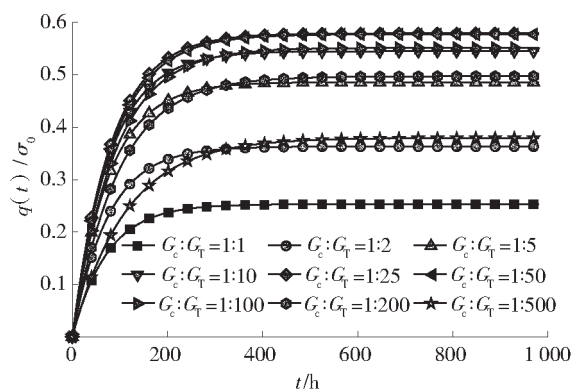


图 8 浆体模量对恢复应力的影响(三参数固体模型)

传感器与注浆材料模量之比大于 50 以后,最终恢复应力基本保持不变,与初始应力之比接近于 1,只是随着模量比的增大,应力稳定所需时间增长。而采用三参数固体模型,随着传感器与注浆材料模量之比增大,传感器最终恢复应力先增大后减小,当传感器与注浆材料模量比在 20~50 之间,最终恢复应力最大,达到初始应力的 60% 左右,之后随着模量比的增大,恢复应力逐渐减小。因此,在传感器及围岩参数一定的情况下,需要选取合适的注浆材料,从而使传感器所测恢复应力与初始应力接近。

### 3.3 岩体黏弹性参数对恢复应力的影响

考虑不同的岩体黏弹性参数对于传感器所测恢复应力的影响,对于 Burgers 模型来说,假设在围岩力学参数中,  $G_2$  保持不变,改变围岩剪切模量  $G_1$  大小,使  $G_1/G_2$  分别为 1:5, 1:2, 1:1, 2:1, 4:1, 10:1, 20:1, 50:1;对于三参数固体模型,假设  $G_3$  保持不变,改变  $G_4$  的大小,使  $G_3/G_4$  分别为 1:5, 1:2, 1:1, 2:1, 4:1, 10:1, 20:1, 50:1,即岩体初始模量  $G_{mi}$  与长期模量  $G_\infty$  之比为 1:2, 1.5, 2, 3, 5, 11, 21, 51。其余参数与上述相同,取  $\theta=0^\circ$  处的传感器所测得的恢复应力进行分析,岩体粘弹性模型取 Burgers 模型及三参数固体模型的岩体参数对恢复应力的影响结果分别如图 9 和图 10。

从图 9 可以看出,围岩模型采用 Burgers 模型,随着时间的增大,传感器所测恢复应力逐渐增大并趋于稳定,并且不论围岩参数如何变化,最终稳定的恢复应力大小都相差不大,与初始应力之比接近于 1,因此,可以认为,当围岩黏弹性模型采用 Burgers 模型描述时,传感器测得的最终恢复应力与围岩的参数无关;从图 10 可以发现,当围岩模型采用三参数固体模型,随着时间的增加,传感器所测得的应

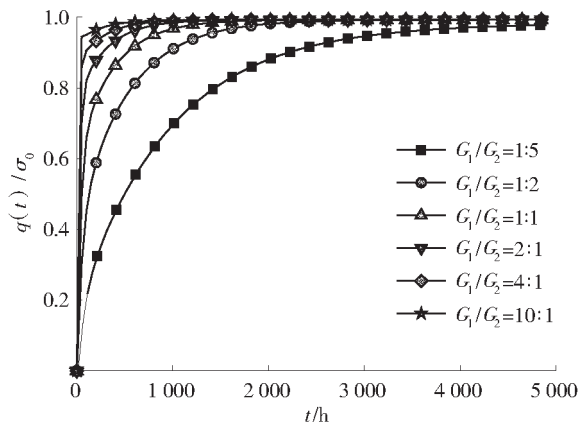


图9 岩体参数对恢复应力的影响(Burgers模型)

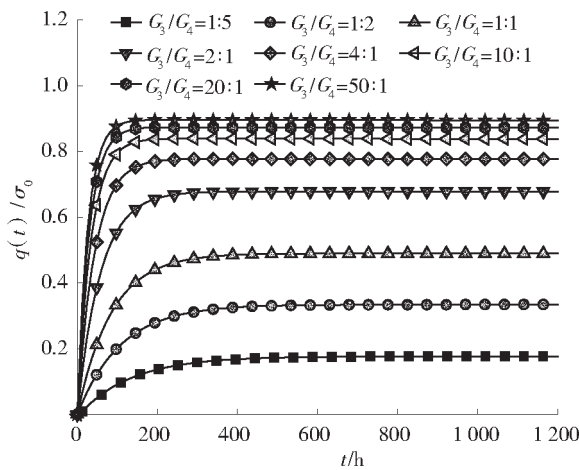


图10 岩体参数对恢复应力的影响(三参数固体模型)

力也慢慢增大并趋于稳定,并且随着  $G_3/G_4$  的逐渐增大,即长期模量与初始模量之比逐渐减小,传感器测得的最终稳定恢复应力逐渐增大,最大约为初始应力的90%左右。由于 Burgers 模型是用来描述软岩的粘弹性特性的,而对于三参数固体模型,当长期模量与初始模量之比较小时,可以说明材料性质也比较软弱。根据上述参数计算分析,可以认为流变应力恢复法比较适用于软岩的地应力测量。当岩石性质较好时,可以通过对岩石流变特性的分析,利用传感器所测稳定恢复应力估计原岩应力的大小。

#### 4 结论

1)围岩采用Burgers模型,在注浆材料较合适、传感器尺寸及钻孔大小较合理的情况下,传感器测得的最终恢复应力大小不受围岩力学性质影响,与初始应力之比接近于1,误差在5%以内。

2)围岩采用三参数固体模型,最终恢复应力大

小主要受到围岩长期模量与初始模量比的影响,围岩长期模量越小,最终恢复应力越大,对于不同的围岩,其最终恢复应力也不相同。

3)注浆材料需与围岩及传感器相匹配,从而使传感器所测恢复应力尽可能接近初始应力水平。注浆材料能否快速凝固对最终恢复应力影响较大,为使恢复应力尽快稳定或使恢复应力达到较高的水平,需尽量缩短注浆材料凝固达到预期强度的时间。

#### 参考文献:

[1] 蔡美峰.地应力测量原理及方法的评述[J].岩石力学与工程学报,1993,12(3):275-283.

[2] 罗超文,李海波,刘亚群.煤矿深部岩体地应力特征及开挖扰动后围岩塑性区变化规律[J].岩石力学与工程学报,2011,30(8):1613-1618.

[3] 安其美,丁立丰,王海忠.福建周宁水电站水压致裂地应力测量及其应用[J].岩土力学,2004,25(10):1672.

[4] 葛修润,侯明勋.三维地应力BWSRM测量新方法及其测井机器人在重大工程中的应用[J].岩石力学与工程学报,2011,30(11):2161-2180.

[5] 刘允芳,尹健民,刘元坤.深钻孔套芯应力解除法的测量技术和实例[J].长江科学院院报,2008,25(5):1.

[6] 张芳,刘泉声,张程远,等.流变应力恢复法地应力测试及装置[J].岩土力学,2014,35(5):3273-3279.

[7] 朱元广,刘泉声,蒋景东,等.三向压力盒的嵌入效应及其应力测量特性模拟[J].岩土力学,2015,36(9):2728-2736.

[8] 朱元广,刘泉声,蒋景东,等.水泥砂浆体中三向压力传感器的测量特性[J].岩石力学与工程学报,2015,34(9):1877-1885.

[9] Fahimifar Tehrani F, M Hedayat, A Vakilzadeh. Analytical solution for the excavation of circular tunnels in a visco-elastic Burger's material under hydrostatic stress field[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2010,25(4):297-304.

[10] Goodman R E. Introduction to rock mechanics[M]. New York: Wiley Press, 1989: 137-170.

[11] Wang H N, Utili S, Jiang M J. An analytical approach for the sequential excavation of axisymmetric lined tunnels in viscoelastic rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014(68): 85.

作者简介:郭建伟(1964—),男,教授级高级工程师,博士,2012年毕业于中国矿业大学,现任中国平煤神马集团研究院开采所所长,从事煤矿开采安全方面的研究工作。

(收稿日期:2017-03-10;责任编辑:朱蕾)