

## 考虑湿度效应的膨胀岩流变模型

郑西贵, 季 明, 张 农

(中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:** 在西原体模型的基础上, 综合考虑湿度因素对膨胀岩的影响, 构造了含湿度因素的基本流变元件, 将湿度效应引入到模型中, 建立了膨胀岩应力和湿度耦合作用下黏弹塑性本构方程, 得到了蠕变方程、卸载方程和松弛方程。研究结果表明: 考虑湿度效应的西原体模型在应力小于屈服应力时, 模型为稳定蠕变, 其卸载曲线存在着瞬时弹性、弹性后效和由湿度效应引起的黏性流动; 当应力大于屈服应力时, 模型为不稳定的蠕变, 其卸载曲线存在着瞬时弹性、弹性后效和由应力和湿度效应共同引起的黏性流动。根据等效应变和等效应力理论, 推导了考虑湿度影响的多轴蠕变理论模型。模型较全面地反映了膨胀岩石在湿度作用下的流变特性, 适用于湿度和应力共同作用下岩石的稳定性分析。

**关键词:** 湿度效应; 膨胀岩; 流变; 蠕变; 卸载; 多轴蠕变

**中图分类号:** TU458.4

**文献标志码:** A

## Rheological model of expansion rock considering humidity effect

ZHENG Xi-gui, JI Ming, ZHANG Nong

(School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The differential viscoelastic plasticity constitutive equation with the creational rheological elements in humidity field of rock which considers the influence of humidity was finished based on the Nishihara rheological model. The model equation considering humidity effect of creep, unloading and relaxation were deduced. When the stress is less than yield stress, the model is a stable creep model; and the unloading curve contains instantaneous elasticity, elastic after-effect and viscosity flow induced by humidity. When the stress is greater than yield stress, the model is an unstable creep; and the curve of unloading includes instantaneous elasticity, elastic after-effect and the viscosity flow induces by the stress and humidity. The multi-axial creep equation was also established according to equivalent effective strain and stress theory. This model reflects the rheological properties of rock, and can be used for analysis of stability of rocks.

**Key words:** humidity effect; expansion rock; rheological; creep; unloading; mul-tiaxial creep

工程中部分岩石在水的物理化学作用下随时间的发展会产生体积增加、破碎和分解, 这一类岩石称之为膨胀岩。我国是膨胀岩分布最广的国家之一, 膨胀岩有其特殊的工程性质, 岩石膨胀特性及其工程灾害研究具有重大的工程意义。一方面, 膨胀岩有较强膨胀性能, 当膨胀岩体受到外界扰动, 尤其遇水时, 性态会发生巨大变化, 产生体积膨胀, 严重影响工程的

稳定性, 易引起地质灾害, 如: 边坡岩体吸水后膨胀失稳; 建筑物地基非均匀胀缩开裂; 隧洞围岩向洞内膨胀挤出或产生底臃而导致硐室破坏; 另一方面, 地基岩体的膨胀, 增加了地基的内部压应力, 进而提高了基础岩体的抗滑性能和隔水能力, 起到巩固基础的作用<sup>[1-3]</sup>。

岩体膨胀特性的研究, 现已取得了很多成果, 如:

Gens 一维膨胀理论模型、Wittke 的三维膨胀理论模型<sup>[1]</sup>; 缪协兴、卢爱红等<sup>[1-3]</sup>提出的湿度应力场的概念,建立了的湿度应力场理论以及湿度应力场耦合方程; 刘晓丽、季明<sup>[6-7]</sup>研究了含时间效应的膨胀岩膨胀本构关系; 文献 [8-10] 提出了测试侧限膨胀特性的试验方法并研制了相应的仪器,研究了重塑膨胀岩土试样的膨胀应力、膨胀应变和饱水量等因素之间的相互关系,对膨胀本构模型进行了相关讨论。

流变特性是岩石的重要力学性质之一,流变现象广泛存在于各种岩石工程中,岩体的流变特征与大量工程失稳密切相关。国内外学者对岩石的流变性进行了大量研究,已提出数百种岩石流变模型,如伯格模型、麦克斯维尔模型、伯明翰模型、开尔文模型、广义开尔文模型以及西原体模型<sup>[11-13]</sup>等,这些模型各具特点,适用于不同情况。而对于在湿度效应影响下膨胀性软岩的流变本构模型的研究相对甚少,本文在工程软岩的西原体流变模型基础上,根据湿度应力场理论,通过引入考虑湿度效应的流变元件,将湿度效应引入到模型中,推导了岩石类材料在应力和湿度

效应共同影响下微分形式的流变本构方程,并根据他人的试验结果验证了模型的正确性,该结论可供膨胀岩工程借鉴参考<sup>[14-17]</sup>。

# 1 流变模型

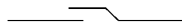
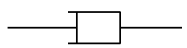
## 1.1 本构方程

文献 [1-3] 认为围岩中各点的含水率将随时间和空间发生变化,提出湿度应力场的概念,并将其和温度场类比,认为水在膨胀岩体中的扩散与含水量、吸水作用力、体积变形等都是相互耦合的,如果让膨胀岩体吸水后自由膨胀,则产生应变分量为

$$\varepsilon_{ii} = \alpha \delta_{ii} \Delta w \quad (1)$$

其中,  $\alpha$  为岩体的线膨胀系数;  $\delta_{ii}$  为 Kronecker 记号;  $\Delta w$  为湿度状态改变量。文献 [6,15] 中实验证实了膨胀应变与体积含水率以及质量含水率都呈良好的线性关系。常规的流变模型的基本元件只考虑了载荷的影响,而湿度因素对膨胀岩体的力学特性影响非常显著,综合考虑湿度因素,结合湿度应力场理论对模型的基本元件做了假设,见表 1。

表 1 湿度场下的流变元件  
Table 1 Rheological elements in humidity field

| 基本元件 | 符号                                                                                  | 说明                                                                                                                                                                                                        |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 虎克体  |  | 其中 $\sigma$ 为应力; $E, \alpha$ 分别为虎克体的弹性系数和湿度膨胀系数; $\Delta w$ 为前后两个状态的湿度差。并且假设湿度变化不影响弹性体的虎克定律                                                                                                               |
| 塑性体  |  | 当 $\sigma < \sigma_s$ 时,无应变产生;当 $\sigma > \sigma_s$ 时,塑性体屈服, $\sigma_s$ 为材料的屈服极限。应力达到屈服极限后,屈服继续,摩擦面无滑移,与时间无关。在湿度和应力的耦合作用下,材料的屈服应力是 $\sigma_s(w)$ ,屈服面是 $f(\sigma_s, w)$ ,均和湿度有关;在恒定湿度条件下,为了研究方便假设屈服应力为定常数 |
| 牛顿体  |  | 牛顿体中应力和变形服从黏滞定律,即应力和应变速率成正比关系。其表达式为 $\sigma = \eta \dot{\varepsilon}$ , $\eta$ 为黏滞系数。在湿度和应力的耦合作用下,黏滞系数用 $\eta(w)$ 表示,和湿度有关。在恒定湿度条件下,为了研究方便假定黏滞系数为定常数                                                      |

西元正夫于 1962 年提出了西原体模型,该模型由虎克体、开尔文体和理想黏塑性体三部分串联组成,Price 进一步用该模型来描述岩石的蠕变特性<sup>[11,13]</sup>。本文在西原体模型基础上,考虑湿度场影响,引入湿度效应,建立如图 1 所示的考虑湿度效应的西元体模型。

在湿度-应力耦合作用下,该模型的应力-应变关系可以表示为

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \\ \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \\ \sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 - E_1 \alpha_1 \Delta w \end{cases} \quad (2)$$

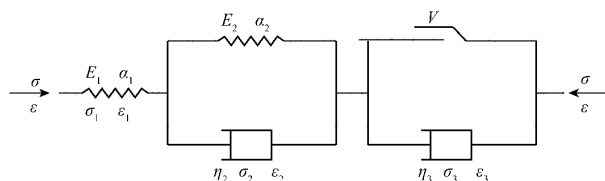


图 1 改进的考虑湿度效应的西原体模型  
Fig. 1 Nishihara model under humidity effect

$$\begin{cases} \sigma_2 = \sigma_{2E} + \sigma_{2\eta} \\ \sigma_{2E} = E_2 \varepsilon_{2E} - E_2 \alpha_2 \Delta w \\ \sigma_{2\eta} = \eta_2(w) \dot{\varepsilon}_{2\eta} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_3 = \sigma_{3P} + \sigma_{3\eta} \\ \sigma_{3P} = \begin{cases} 0 & (\sigma_{3P} < \sigma_s) \\ \sigma_s & (\sigma_{3P} \geq \sigma_s) \end{cases} \\ \sigma_{3\eta} = \eta_3(w) \dot{\varepsilon}_{3\eta} \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_{2E} = \varepsilon_{2\eta} \\ \varepsilon_{3P} = \begin{cases} 0 & (\sigma_{3P} < \sigma_s) \\ \varepsilon_3 & (\sigma_{3P} \geq \sigma_s) \end{cases} \\ \varepsilon_3 = \varepsilon_{3P} = \varepsilon_{3\eta} \end{cases}$$

式中,  $\sigma$  为模型总应力;  $\varepsilon$  为模型总应变;  $\Delta w$  为两个状态的湿度变化量;  $\sigma_2, \varepsilon_2$  分别为开尔文体的总应力和总应变;  $\sigma_3, \varepsilon_3$  分别为理想黏塑性体的总应力和总应变;  $\sigma_1, E_1, \varepsilon_1, \alpha_1$  分别为虎克体的应力、弹性模量、应变以及湿膨胀系数;  $\sigma_{2E}, E_2, \varepsilon_{2E}, \alpha_2$  分别为开尔文弹性体的应力、弹性模量、应变以及湿膨胀系数;  $\sigma_{2\eta}, \varepsilon_{2\eta}, \eta_2(w)$  分别为开尔文体的黏性体的应力、应变以及湿黏度系数;  $\sigma_{3\eta}, \varepsilon_{3\eta}, \eta_3(w)$  分别为理想黏塑性体的黏性体的应力、应变以及湿黏度系数;  $\sigma_{3P}, \varepsilon_{3P}, \sigma_{3s}$  分别为理想黏塑性体的塑性元件的应力、应变以及屈服极限。

当  $\sigma_{3P} < \sigma_s$  时, 理想黏塑性体不产生作用, 模型为广义开尔文体, 如图 2 所示。

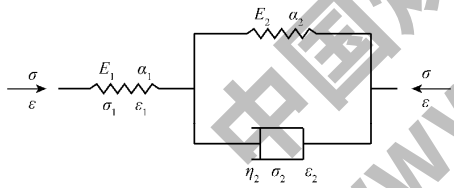


图 2 湿度效应下的广义开尔文体

Fig. 2 Generalized Kelvin model with humidity effect

则有  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma, \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \varepsilon, \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 = \dot{\varepsilon}$ ;  
对于虎克体:

$$\sigma = E_1 \varepsilon_1 - E_1 \alpha_1 \Delta w, \dot{\sigma} = E_1 \dot{\varepsilon}_1 - E_1 \alpha_1 \dot{\Delta w}$$

对于开尔文体:

$$\sigma = E_2 \varepsilon_2 - E_2 \alpha_2 \Delta w + \eta_2(w) \dot{\varepsilon}_2$$

得

$$\sigma = E_2 (\varepsilon - \varepsilon_1) - E_2 \alpha_2 \Delta w + \eta_2(w) (\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_1)$$

考虑湿度影响的本构方程为

$$\frac{\eta_2(w)}{E_1} \dot{\sigma} + \left(1 + \frac{E_2}{E_1}\right) \sigma + \eta_2(w) \alpha_1 \dot{\Delta w} + E_2 (\alpha_1 + \alpha_2) \Delta w = \eta_2(w) \dot{\varepsilon} + E_2 \varepsilon \quad (3)$$

当  $\sigma_{3P} \geq \sigma_s$  时, 模型由 3 部分组成, 如图 1 所示, 同理可推得本构方程为

$$\ddot{\sigma} + \left[ \frac{E_1}{\eta_2(w)} + \frac{E_1}{\eta_3(w)} + \frac{E_2}{\eta_2(w)} \right] \dot{\sigma} +$$

$$\frac{E_1 E_2}{\eta_2(w) \eta_3(w)} (\sigma - \sigma_s) + E_1 \alpha_1 \ddot{\Delta w} + \frac{E_1 E_2 (\alpha_1 + \alpha_2)}{\eta_2(w)} \dot{\Delta w} = E_1 \ddot{\varepsilon} + \frac{E_1 E_2}{\eta_2(w)} \dot{\varepsilon} \quad (4)$$

1.2 蠕变方程

在湿度变化均匀的情况下, 即:  $\dot{\Delta w} = 0$ 。

当  $\sigma_{3P} < \sigma_s$  且为定值时,  $\dot{\sigma} = 0$ 。此时模型为广义开尔文体。当  $\sigma = \sigma_0$  时, 对于虎克体:

$$\varepsilon_1(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \alpha_1 \Delta w$$

对于开尔文体:

$$\sigma_0 = E_2 \varepsilon_2(t) - E_2 \alpha_2 \Delta w + \eta_2(w) \frac{d\varepsilon_2(t)}{dt}$$

得

$$\varepsilon_2(t) = \frac{\sigma_0 + E_2 \alpha_2 \Delta w}{E_2} + A e^{-\frac{E_2}{\eta_2(w)} t}$$

式中,  $A$  为积分常数。

当  $t=0$  时,  $\varepsilon_2=0$ , 可求得

$$A = -\frac{\sigma_0 + E_2 \alpha_2 \Delta w}{E_2}$$

蠕变方程为

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \alpha_1 \Delta w +$$

$$\frac{\sigma_0 + E_2 \alpha_2 \Delta w}{E_2} [1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2(w)} t}] \quad (5)$$

当  $t$  趋于无穷大时,  $\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} +$

$\frac{\sigma_0}{E_2} + (\alpha_1 + \alpha_2) \Delta w$  为蠕变方程的水平渐近线, 该模型为稳定蠕变。

当  $\sigma_{3P} \geq \sigma_s$  时, 岩石产生塑性变形。对于虎克体:

$$\varepsilon_1(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \alpha_1 \Delta w$$

对于开尔文体:

$$\varepsilon_2(t) = \frac{\sigma_0 + E_2 \alpha_2 \Delta w}{E_2} [1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2(w)} t}]$$

对于理想黏塑性体

$$\varepsilon_3(t) = \frac{\sigma_0 - \sigma_s}{\eta_3(w)} t$$

蠕变方程为

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t) + \varepsilon_3(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \alpha_1 \Delta w +$$

$$\frac{\sigma_0 + E_2 \alpha_2 \Delta w}{E_2} [1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2(w)} t}] + \frac{\sigma_0 - \sigma_s}{\eta_3(w)} t \quad (6)$$

该模型随着时间变大, 应变逐渐变大, 模型为不

稳定蠕变, 最终将蠕变失稳。

### 1.3 卸载方程

当  $\sigma_{3P} < \sigma_s$  时, 在  $t_1$  时刻卸载, 应力为 0。对于虎克体:  $\varepsilon_1(t) = \alpha_1 \Delta w$ 。

对于开尔文体:  $\frac{d\varepsilon_2(t)}{dt} + \frac{E_2 \varepsilon_2(t)}{\eta_2(w)} = \frac{E_2 \alpha_2 \Delta w}{\eta_2(w)}$ , 解得

$$\varepsilon_2(t) = \alpha_2 \Delta w + B e^{-\frac{E_2}{\eta_2(w)} t}$$

式中,  $B$  为积分常数。

$t_1$  时刻:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{21} = \frac{\sigma_0 + E_2 \alpha_2 \Delta w}{E_2} [1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2(w)} t_1}]$$

可解得

$$B = (\varepsilon_{21} - \alpha_2 \Delta w) e^{\frac{E_2}{\eta_2(w)} t_1}$$

卸载方程为

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t) = (\alpha_1 + \alpha_2) \Delta w + (\varepsilon_{21} - \alpha_2 \Delta w) e^{\frac{E_2}{\eta_2(w)} (t_1 - t)} \quad (7)$$

当  $t$  趋于无穷时,  $\varepsilon(t) = (\alpha_1 + \alpha_2) \Delta w$ , 可见由于湿度的影响, 模型的变形并非恢复为 0。

当  $\sigma_{3P} \geq \sigma_s$  时, 对于虎克体:

$$\varepsilon_1(t) = \alpha_1 \Delta w$$

对于开尔文体:

$$\varepsilon_2(t) = \alpha_2 \Delta w + (\varepsilon_{21} - \alpha_2 \Delta w) e^{\frac{E_2}{\eta_2(w)} (t_1 - t)}$$

对于理想黏塑性体, 卸载后模型停留在  $t_1$  时刻, 应变为

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_0 - \sigma_s}{\eta_3(w)} t_1$$

变形为永久塑性变形。卸载方程为

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t) + \varepsilon_3(t) = (\alpha_1 + \alpha_2) \Delta w + (\varepsilon_{21} - \alpha_2 \Delta w) e^{\frac{E_2}{\eta_2(w)} (t_1 - t)} + \frac{\sigma_0 - \sigma_s}{\eta_3(w)} t_1 \quad (8)$$

当  $t$  趋于无穷时,

$$\varepsilon(t) = (\alpha_1 + \alpha_2) \Delta w + \frac{\sigma_0 - \sigma_s}{\eta_3(w)} t_1$$

模型的蠕变和卸载曲线如图 3 和图 4 所示。当应力水平低于屈服极限时, 模型最终趋于稳定蠕变, 模型的卸载曲线存在瞬时弹性变形、弹性后效和由湿度引起的黏性流动; 当应力水平高于屈服极限时, 模型为不稳定蠕变, 模型的卸载曲线也存在瞬时弹性变形、弹性后效和由应力和湿度效应共同引起的黏性流动。改进的西元体模型反映了膨胀岩石在湿度作用下稳定蠕变和不稳定蠕变的两种状态。

### 1.4 松弛方程

当  $\sigma_{3P} < \sigma_s$  时, 且  $\varepsilon = \varepsilon_0$ , 即  $\dot{\varepsilon} = 0$ 。得

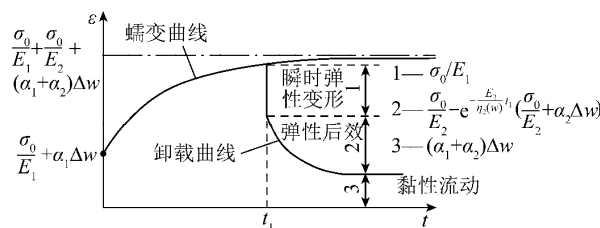


图3 应力小于屈服应力时模型的蠕变和卸载曲线

Fig. 3 Model curves of creep and unloading when stress is lower than yield stress

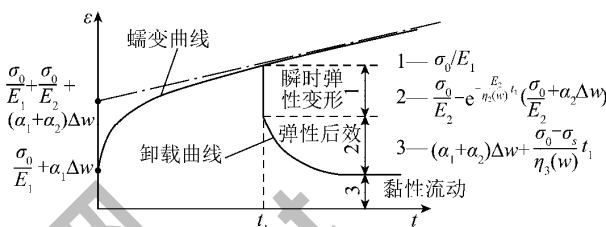


图4 当应力大于屈服应力时模型的蠕变和卸载曲线

Fig. 4 Model curves of creep and unloading when stress is higher than yield stress

$$\dot{\sigma} + \frac{E_1 + E_2}{\eta_2(w)} \sigma = \frac{E_1}{\eta_2(w)} [E_2 \varepsilon_0 - E_2 (\alpha_1 + \alpha_2) \Delta w]$$

代入  $t=0, \sigma=\sigma_0$ , 得:  $\sigma_0 = E_1 \varepsilon_0$ 。

$$\sigma = -\frac{E_1}{E_1 + E_2} [E_1 \varepsilon_0 + E_2 (\alpha_1 + \alpha_2) \Delta w] e^{-\frac{E_1 + E_2}{\eta_2(w)} t} + \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} [\varepsilon_0 - (\alpha_1 + \alpha_2) \Delta w] \quad (9)$$

当  $\sigma_{3P} \geq \sigma_s$  时, 对于理想黏塑性体松弛应变为:

$\varepsilon = \varepsilon_0$ , 即  $\dot{\varepsilon} = 0$ ,  $t=0$  时,  $\sigma = \sigma_s, \sigma' = \sigma_s$ , 则西原体模型的松弛方程为

$$\sigma = -\frac{E_1}{E_1 + E_2} [E_1 \varepsilon_0 + E_2 (\alpha_1 + \alpha_2) \Delta w] e^{-\frac{E_1 + E_2}{\eta_2(w)} t} + \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} [\varepsilon_0 - (\alpha_1 + \alpha_2) \Delta w] + \sigma_s \quad (10)$$

## 2 模型验证

为验证本文模型, 采用文献 [14] 中的  $\sigma_0 = 25$  MPa, 含水率为 1.359%, 7.240% 的压缩蠕变实验数据来验证, 数据见表 2。

该组数据最终为稳定蠕变, 选用应力水平较低时的稳定蠕变模型(式(5)), 计算得模型参数见表 3。

绘制实验数据和理论模型数据如图 5 所示, 由图可知实验数据曲线和理论曲线比较吻合, 本文模型可以反映岩石在不同含水率下的蠕变行为。

表2 文献 [14] 的实验数据

Table 2 Experiment results of reference [14]

| 时间/h | 不同含水率下的蠕变值 |           |
|------|------------|-----------|
|      | 1.359%     | 7.240%    |
| 0    | 0.015 279  | 0.018 316 |
| 4    | 0.015 768  | 0.020 084 |
| 8    | 0.016 150  | 0.021 120 |
| 12   | 0.016 455  | 0.021 997 |
| 24   | 0.017 021  | 0.023 567 |
| 28   | 0.017 143  | 0.024 032 |
| 32   | 0.017 235  | 0.024 261 |
| 38   | 0.017 341  | 0.024 642 |
| 48   | 0.017 441  | 0.025 038 |
| 52   | 0.017 471  | 0.025 099 |
| 56   | 0.017 494  | 0.025 229 |
| 72   | 0.017 540  | 0.025 412 |
| 82   | 0.017 548  | 0.025 465 |
| 96   | 0.017 555  | 0.025 518 |
| 106  | 0.017 563  | 0.025 541 |
| 120  | 0.017 571  | 0.025 556 |
| 130  | 0.017 571  | 0.025 564 |
| 144  | 0.017 571  | 0.025 564 |
| 154  | 0.017 571  | 0.025 564 |
| 168  | 0.017 571  | 0.025 564 |
| 192  | 0.017 571  | 0.025 564 |

表 3 实验参数

Table 3 Experiment parameters

| $E_1$ /MPa | $\alpha_1$ | $E_2$ /MPa | $\alpha_2$ | $\eta_2(w)$ /(MPa·h) |
|------------|------------|------------|------------|----------------------|
| 1 715      | 0.051 64   | 21 800     | 0.084 27   | 364 000              |

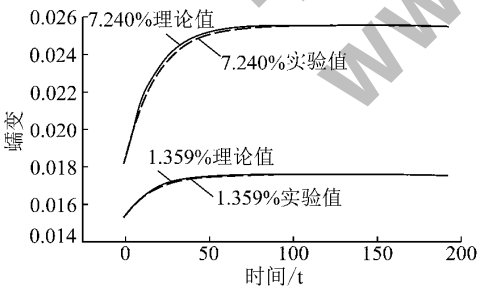


图 5 实验曲线和拟合曲线

Fig. 5 Experimental curves and fitting curves

3 考虑湿度影响的多轴蠕变理论模型

多轴蠕变理论模型应满足以下几个基本原则<sup>[15-17]</sup>：①多轴蠕变本构方程在除一个轴向外其他应力分量为 0 时能够退化为单轴蠕变本构方程；②多轴蠕变模型应符合蠕变变形中体积不变原则；③等效静应力不影响多轴蠕变本构方程；④各向同性材料中主应力和主应变方向一致。

假设应变速率张量是应力偏量的函数，即

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^c = \lambda s_{ij}, \lambda = 3 \frac{\dot{\varepsilon}^c}{2\bar{\sigma}}$$

式中， $\dot{\varepsilon}_{ij}^c$  为应变速率张量； $s_{ij}$  为应力偏量； $\lambda$  为比例因子； $\dot{\varepsilon}^c$  为等效应变速率； $\bar{\sigma}$  为等效应力。

利用等效应变和等效应力理论，蠕变方程式(5)和式(6)可推广为

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^c = \frac{3}{2\bar{\sigma}} \dot{\varepsilon}^c s_{ij} = \begin{cases} \frac{3}{2} \left[ e^{-\frac{E_2}{\eta_2(w)}t} + \frac{E_2 \alpha_2 \Delta w e^{-\frac{E_2}{\eta_2(w)}t}}{\bar{\sigma}} \right] s_{ij} & (\sigma_{3P} < \sigma_s) \\ \frac{3}{2} \left[ \frac{\eta_3(w) e^{-\frac{E_2}{\eta_2(w)}t} + \eta_2(w)}{\eta_2(w) \eta_3(w)} + \frac{\eta_3(w) E_2 \alpha_2 \Delta w e^{-\frac{E_2}{\eta_2(w)}t} - \eta_2(w) \sigma_s}{\eta_2(w) \eta_3(w) \bar{\sigma}} \right] s_{ij} & (\sigma_{3P} \geq \sigma_s) \end{cases} \quad (11)$$

4 结 论

- (1) 通过引入考虑湿度效应的流变元件，将湿度效应引入到西原体模型的中，推导了应力和湿度耦合作用下微分形式的黏弹塑性本构方程、蠕变方程、卸载方程以及松弛方程，模型能够比较全面的反映湿度场下岩石的黏弹塑性特性。
- (2) 本文的模型表明：当应力低于屈服极限时，模型趋于稳定蠕变，其卸载曲线存在着瞬时弹性、弹性后效和由湿度引起的黏性流动；当应力高于屈服极限时，模型为不稳定蠕变，最终导致蠕变失稳，其卸载曲线也存在着瞬时弹性、弹性后效和由应力和湿度效应共同引起的黏性流动。
- (3) 基于等效应力和等效应变理论，推导了考虑湿度影响的多轴蠕变理论模型。

参考文献：

[1] 缪协兴. 用湿度应力场理论分析膨胀岩巷道围岩变形 [J]. 中国矿业大学学报, 1995, 24(1): 58-63.  
Miao Xiexing. Large deformation analysis of surrounding rock of a tunnel in swelling rock mass based on the humidity stress field theory [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1995, 24(1): 58-63.  
[2] Miao Xiexing, Lu Aihong, Mao Xianbiao, et al. Numerical simulation for roadways in swelling rock under coupling function of water and ground pressure [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 12(2): 120-125.  
[3] 郁时炼, 茅献彪, 卢爱红. 湿度场对膨胀岩巷道围岩变形影响规

- 律的研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(4): 402–405.
- Yu Shilian, Mao Xianbiao, Lu Aihong. Study of deformation rule of swelling rock roadway under the humidity field [J]. Journal of Mining & Safety, 2006, 23(4): 402–405.
- [6] 许兴亮, 张 农. 富水条件下软岩巷道变形特征与过程控制研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(3): 298–302.
- Xu Xingliang, Zhang Nong. Study of control process deformation behavior and of soft rock drift under rich water condition [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(3): 298–302.
- [7] 张黎明, 王在泉, 孙 辉, 等. 岩石卸荷破坏的变形特征及本构模型 [J]. 煤炭学报, 2009, 34(12): 1626–1631.
- Zhang Liming, Wang Zaiquan, Sun Hui, et al. Failure characteristics and constitutive model of rock under unloading condition [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(12): 1626–1631.
- [8] 季 明, 高 峰, 高亚楠, 等. 灰质泥岩遇水膨胀的时间效应研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(4): 511–515.
- Ji Ming, Gao Feng, Gao Yanan, et al. Study on time-dependent effect of calcareous mudstone expansion after infiltrated with water [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(4): 511–515.
- [9] 刘晓丽, 王思敬, 王恩志, 等. 含时间效应的膨胀岩膨胀本构关系 [J]. 水利学报, 2006, 36(2): 195–199.
- Liu Xiaoli, Wang Sijing, Wang Enzhi, et al. Study on time-dependent swelling constitute relation of swelling rock [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 36(2): 195–199.
- [10] 朱训国, 杨 庆. 膨胀岩的判别与分类标准 [J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 174–177.
- Zhu Xunguo, Yang Qing. Identification and classification of swelling rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 174–177.
- [11] 杨 庆, 焦建奎, 栾茂田. 膨胀岩土侧限膨胀试验新方法 with 膨胀本构关系 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 49–52.
- Yang Qing, Jiao Jiankui, Luan Maotian. Study on a new method of confined swelling tests and swelling constitutive relationship for swelling rocks [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 49–52.
- [12] Yang Qing, Jiao Jiankui. The determination of volume expansive properties in swelling clay [A]. Proceedings of the Second International Conference on Unsaturated Soils [C]. Beijing: International Academic Publishers, 1998: 450–454.
- [13] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 198–230.
- [14] 王芝银, 艾传志, 唐明明. 不同应力状态下岩石蠕变全过程 [J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 170–174.
- Wang Zhiyin, Ai Chuanzhi, Tang Mingming. Complete process of rock creep in different stress states [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 170–174.
- [15] 李栋伟, 汪仁和, 范菊红. 软岩屈服面流变本构模型及围岩稳定性分析 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1604–1608.
- Li Dongwei, Wang Renhe, Fan Juhong. Yield surface constitutive creep model and stability analysis of soft rock roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1604–1608.
- [16] 龚选平. 泥质粉砂岩含水率对其蠕变特性影响的研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2006: 25–65.
- [17] 季 明. 湿度场下灰质泥岩的力学性质演化与蠕变特征研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009: 94–117.
- [18] 徐小丽. 温度载荷作用下花岗岩力学性质演化及其微观机制研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008: 93–123.
- [19] 张俊善. 材料的高温变形与断裂 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 145–147, 218–220.