

DOI : 10.16285/j.rsm.2015.01.016

基于细观变形理论的盐岩塑性本构模型研究

陈剑文¹, 杨春和²

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要:唯象学本构模型不能很好解决诸如夹杂含量、温度、应变速率等对盐岩力学性质的影响, 更难以解释盐岩变形机制。盐岩为石岩晶体组成, 其变形机制主要由多晶结构所控制, 故基于固体位错理论研究方法建立的盐岩塑性本构模型更能反映盐岩的变形机制。研究表明, 盐岩的塑性-蠕变交互作用机制是(亚)晶粒内部位错的滑移与(亚)晶界及其干涉面内位错的攀移运动之间的耦合。基于此, 可确定亚晶(或晶粒)平均尺寸与流动应力之间的关系、(亚)晶内的位错平均密度; 建立微观参量(位错、亚晶直径、亚晶界宽度等)演化模式; 根据 Orowan 定律建立盐岩微观-宏观变形联系, 从而导出盐岩塑性本构方程。导出的本构方程体现了盐岩塑性-蠕变变形的物理机制, 相对于传统的塑性本构方程具有更好的物理意义。

关键词:盐岩本构方程; 细观机制; 固体位错理论

中图分类号: P 642.3

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2015) 01 - 0117 - 07

Mesoscopic deformation based plastic constitutive model of salt rock

CHEN Jian-wen¹, YANG Chun-he²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The existing phenomenological constitutive model is hard to describe how the impurity content, temperature and strain rate affect the mechanical behavior of the salt rock. It is more difficult to explain its deformation mechanism. Salt rock mainly consists of halite crystal. The deformation mechanism of salt rock is controlled by the polycrystalline structure. Therefore, it is more appropriate to build the plastic constitutive model using solid dislocation theory for the description of the deformation of the rock salt. The mesoscopic mechanism of the plastic-creep is the coupling of dislocation sliding of inner crystal grains and dislocation climbing-sliding of boundaries and their interference surfaces of inner crystal grains. According to the above hypothesis, the relationship between the average scale of the subgrain (or grain) and flow stress, the mean density of dislocation of inner grains and evolution model of microscopic parameters (including dislocation, subgrain diameter and boundary width between subgrains) are obtained sequentially. Finally the meso-macroscopic deformation and then plastic constitutive equation of salt rock are established using Orowan's law. The obtained equation can reflect the physical mechanism of plastic-creep deformation of salt rock and has an improved physical significance, comparing with traditional plastic constitutive model. This constitutive model could only be obtained through observation and research on mesoscopic structure of rock salt.

Key words: constitutive equation of salt rock; mesoscopic mechanism; solid dislocation theory

1 引 言

由于具有渗透率低、损伤自愈等优点, 盐岩在能源储备和核废料储存方面被广泛应用。近年来, 随着盐岩地下储气库以及核废料处置库的建设, 盐岩的力学性质研究也得到系统的开展, 并取得了丰硕的成果。尽管如此, 目前国内外众多学者还主要

以唯象学方法研究盐岩本构模型, 例如 WIPP 本构模型, 但这类本构模型并不能解决诸如夹杂含量、温度、应变速率等对盐岩力学性质影响, 也不能很好地解释盐岩蠕变变形的深层次机制, 要解决这些问题, 应当结合细观力学方面的研究成果。

细观力学研究的对象是一种介于宏观物体与微观原子之间的微元, 如微裂纹、微空洞、夹杂、晶

收稿日期: 2013-08-14

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(No. 51004087); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(No. CUG090104)。

第一作者简介: 陈剑文, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: jwchencug@163.com

界、亚晶结构,以及某些微观的位错运动等。它忽略浩繁的微观物理过程,研究材料在不同条件下的微观几何特征。

Munson^[1]、Langer^[2]较早开展了盐岩在变形过程中的微观特征研究,在此基础上,一些学者^[3-5]经过研究认为,盐岩的变形机制主要由多晶结构所致,如:位错运动、多晶化、晶界滑移以及在低围压下的晶界微破裂等。Groves 等^[6]对盐岩的单晶性质进行了定性研究,为盐岩多晶体的微观-宏观研究提供了丰富的基础资料。Pouya 等^[7-9]根据盐岩的微观力学性质推导多晶体的宏观力学性质,建立了盐岩的弹塑性本构关系。Pouya^[10]和 Hunsche^[11]等从微观的角度,采用统计方法建立了考虑(固体)夹杂对盐岩蠕变特性参数影响的本构模型。Hunsche 等^[12]基于晶体缺陷理论,借鉴固体位错理论,建立了以物理的、微观机制的观点来讨论盐岩的变形规律的盐岩蠕变模型。

盐岩的变形机制研究一般从微观、细观和宏观 3 个层面出发^[13-18],尤其是从微观、细观角度,并借鉴固体位错理论研究盐岩变形机制,建立细观-宏观本构方程,不失为盐岩力学研究的有益探讨。

2 基于固体位错理论的盐岩本构方程

试验研究表明,滑移位错密度随荷载的增加具有瞬时性。由于受热激活扩散控制,亚晶结构的形成通常是一个渐进过程。在变形过程中,亚晶界(或晶界)的位错密度比亚晶内(或晶粒内)的密度大一个数量级以上(如图 1 所示)。

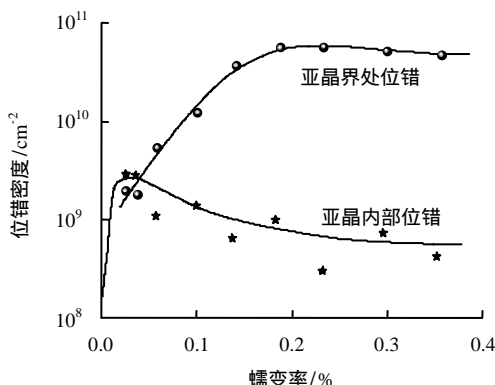


图 1 金属亚晶位错(据 Orlova 等)^[17]

Fig.1 Metal subgrain dislocation (according to Orlova et al.)^[17]

塑性-蠕变交互作用的微观机制是(亚)晶粒内部位错的滑移运动与(亚)晶界及其干涉面内位错的攀移运动之间的耦合,因此,可以根据固体位错理论建立盐岩的塑性本构模型,其步骤如下:

(1) 根据试验观测结果,确定亚晶(或晶粒)平均尺寸与流动应力之间的关系。

(2) 确定(亚)晶内的位错平均密度,进而确定位错平均间距。

(3) 给出微观参量的演化模式(位错、亚晶直径、亚晶界等)。在整个建模过程中,位错墙以及位错的滑移距离如何影响位错的滑移与湮灭是一个关键,不同的假设可能得到不同的表达式。

(4) 根据 Orowan 定律,建立微观-宏观变形联系。

2.1 本构方程的建立

根据复合合金理论,假设(亚)晶界(cell wall)为硬区,其宽度为 w ;晶内(cell)为软区,宽度为 d ,定义微结构参数 x 、 f_c 和 f_w 分别为

$$x = \frac{w}{d}, f_c = (1-x)^3, f_w = 1 - (1-x)^3 \quad (1)$$

式中: x 、 f_c 和 f_w 均为微结构参数。

盐岩在高温变形时发生动态重结晶,通过大角晶界的移动、吞噬,从而导致晶粒长大。在此过程中,部分晶粒逐渐长大,另一部分晶粒逐渐缩小而消失,但平均晶粒尺寸降低。形成亚晶时,亚晶的尺寸只依赖于外加应力,与温度无关,且反比作用于应力。故设 x 的演化方程为

$$\frac{dx}{dt} = \frac{c_{x2}\sigma^2}{c_{x1}} - c_{x2}\sigma x \quad (2)$$

式中: c_{x1} 为稳态时的结构参数; t 为时间; c_{x2} 为 t 时刻结构参数; σ 为施加在晶体上的应力。

也有许多学者认为,微结构的演化和塑性应变有关,建议的经验公式为^[8]

$$f = f_0 - (f_0 - f_\infty)[1 - \exp(-c_f \dot{\epsilon} t)] \quad (3)$$

式中:下标 0 表示初态; ∞ 表示稳态; $f = f_w$ 随应变的增大而减小; c_f 为晶界演化参数; $\dot{\epsilon}$ 为塑性应变率。

变形初期滑移位错密度迅速增加,然后滑移位错通过攀升进入亚晶界或者形成亚晶界,从而造成滑移阻力的松弛。但因局部应力松弛将诱发更多的位错滑移,因而变形过程中是加工硬化和回复软化的动态竞争过程。因此,构造晶粒内的位错演化方程非常重要。本文采用 Picu 等^[18]构造的方程形式为

$$\frac{d\rho}{dt} = a_1 \sqrt{\rho} \left| \frac{d\epsilon}{dt} \right| - a_2 \rho \exp\left(-\frac{Q}{k_B T}\right) \quad (4)$$

式中: ϵ 为宏观塑性应变; ρ 为可动位错密度; Q 为回复激活能; T 为温度(K); k_B 为 Boltzmann 常数;

a_1 和 a_2 均为材料参数。

式 (4) 第 1 项反映加工硬化对晶内位错的影响，第 2 项反映回复软化的影响。

该方程表述了硬化和动态回复过程中位错的演化，并没有具体反映晶粒内部的位错如何和晶界的位错耦合，但由于形式简洁明了，在预测晶体材料高温力学性能中使用较多。

Toth 等^[19]通过试验观测和理论分析，提出在静水压作用下晶界、晶内的位错演化方程（即 EMTB 模型）为

$$\frac{d\rho_w}{dt} = \frac{6\beta^*\dot{\gamma}_c(1-f)^{2/3}}{bdf} + \frac{\sqrt{3}\beta^*\dot{\gamma}_c(1-f)\sqrt{\rho_w}}{bf} - k_0\left(\frac{\dot{\gamma}_w}{\dot{\gamma}_0}\right)^{-1/n}\dot{\gamma}_w\rho_w \quad (5)$$

$$\frac{d\rho_c}{dt} = \frac{\alpha^*\dot{\gamma}_w\sqrt{\rho_w}}{\sqrt{3}b} - \frac{6\beta^*\dot{\gamma}_c}{bd(1-f)^{1/3}} - k_0\left(\frac{\dot{\gamma}_c}{\dot{\gamma}_0}\right)^{-1/n}\dot{\gamma}_c\rho_c \quad (6)$$

式中： f 为晶界所占体积比； ρ_w 为亚晶界位错密度； b 为 Burgers 矢量； ρ_c 为亚晶内部位错密度；下标 c 表示晶内； w 表示晶界； α^* 和 β^* 可作为材料常数； $\dot{\gamma}_w$ 为亚晶界剪应变速率； $\dot{\gamma}_c$ 为亚晶内部剪应变速率； $\dot{\gamma}_0$ 为参考剪应变速率，可取值 1 s^{-1} ； k_0 和 n 为动态恢复参数。

式 (5) 右边第 1 项代表晶内位错攀升到晶界，导致晶界位错增加，而晶内位错减少（式 (6) 中的第 2 项），第 2 项以及式 (6) 中的第 1 项则是因 Frank-Read 源激活导致的位错增加。

式 (5) (6) 中的负项代表了在非常大的累计应变时动态回复 (dynamic recovery) 导致的位错湮灭，该过程可能由螺旋位错的交错滑移 (cross-slip) 或者刃型位错的攀升所控制。

Mckenzie 等^[20]考虑到背静水压的影响，将式 (5) (6) 修改为

$$\frac{d\rho_w}{dt} = \frac{6\beta^*\dot{\gamma}_c(1-f)^{2/3}}{bdf} + \frac{\sqrt{3}\beta^*\dot{\gamma}_c(1-f)\sqrt{\rho_w}}{bf} - k_0\exp\left(-\frac{p\Omega}{n_1k_B T}\right)\left(\frac{\dot{\gamma}_w}{\dot{\gamma}_0}\right)^{-1/n_1}\dot{\gamma}_w\rho_w \quad (7)$$

$$\frac{d\rho_c}{dt} = \frac{\alpha^*\dot{\gamma}_w\sqrt{\rho_w}}{\sqrt{3}b} - \frac{6\beta^*\dot{\gamma}_c}{bd(1-f)^{1/3}} - k_0\left(\frac{\dot{\gamma}_c}{\dot{\gamma}_0}\right)^{-1/n_2}\dot{\gamma}_c\rho_c \quad (8)$$

式中： Ω 为原子体积； k_0 和 n_1 均为动态恢复参数； n_2 为晶体热激活参数； p 为背静水压力。

式 (5) (6) 的动态回复没设计入温度的影响，故可修正为

$$\frac{d\rho_w}{dt} = \frac{6\beta^*\dot{\gamma}_c(1-f)^{2/3}}{bdf} + \frac{\sqrt{3}\beta^*\dot{\gamma}_c(1-f)\sqrt{\rho_w}}{bf} - k_0\left(\frac{\dot{\gamma}_w}{\dot{\gamma}_0}\right)^{-1/n_1}\dot{\gamma}_w\rho_w \quad (9)$$

$$\frac{d\rho_c}{dt} = \frac{\alpha^*\dot{\gamma}_w\sqrt{\rho_w}}{\sqrt{3}b} - \frac{6\beta^*\dot{\gamma}_c}{bd(1-f)^{1/3}} - k_0\exp\left(-\frac{Q_c}{n_2k_B T}\right)\left(\frac{\dot{\gamma}_c}{\dot{\gamma}_0}\right)^{-1/n_1}\dot{\gamma}_c\rho_c \quad (10)$$

式中： Q_c 为位错的攀升激活能 (eV)

式 (10) 中的剪应变通常可以认为相等，即

$$\dot{\gamma}_w = \dot{\gamma}_c = \dot{\gamma} = M\varepsilon^P \quad (M=3.06) \quad (11)$$

由流动应力与位错密度的关系公式，有

$$\begin{aligned} \sigma_c &= Ma_c Gb\sqrt{\rho_c} \\ \sigma_w &= Ma_w Gb\sqrt{\rho_w} \end{aligned} \quad (12)$$

式中： σ_c 为流动应力。

Frost 和 Ashby 给出剪切模量 G 随温度的变化为^[15]

$$G = 15\,000 \left[1 - 0.73 \left(\frac{T - 300}{1\,070} \right) \right] \quad (13)$$

式中： G 为剪切模量 (MPa)； T 为温度 (K)

内应力 (阻力) 包括晶内的阻力和晶界的阻力按照体积比分配：

$$\sigma_i = f_c\sigma_c + f_w\sigma_w \quad (14)$$

式中： σ_i 为内应力。

根据 Orowan 方程，有

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{M} b\rho_m v \quad (15)$$

式中： ρ_m 为可动位错密度； v 可动位错平均滑移速度。

位错的平均滑移速度为

$$\begin{aligned} v &= \lambda\omega_0 \exp\left(-\frac{Q}{k_B T}\right) \sinh\left(\frac{\sigma_{\text{eff}}bA^*}{Mk_B T}\right) = \\ v_0 \exp\left(-\frac{Q}{k_B T}\right) \sinh\left(\frac{\sigma_{\text{eff}}bA^*}{Mk_B T}\right) \end{aligned} \quad (16)$$

式中： λ 为位错迁跃宽度 (即非可动林位错的平均

间距); ω_0 为位错交割频率; Q 为位错等效激活滑移活能 (用电子伏特表示, $1\text{eV}=1.602\times 10^{-19}\text{J}$); A^* 为激活面积对于面心晶体 (如 NaCl 晶体) 与应变平方根成反比, 可以将其看作为位错间距与 Burgers 矢量的乘积; σ_{eff} 为有效应力。

代入式 (15) 中, 有

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{dt} &= \dot{\varepsilon}_0 \exp\left(-\frac{Q}{k_B T}\right) \sinh\left(\frac{\sigma_{\text{eff}} b A^*}{M k_B T}\right) \\ \dot{\varepsilon}_0 &= \frac{1}{M} b \rho_m v_0 \\ \sigma_{\text{eff}} &= \sigma - \sigma_i = \sigma - (f_c \sigma_c + f_w \sigma_w) \\ A^* &= \frac{b}{1/d_p + \sqrt{\rho_s}} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: ε 为塑性应变; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考塑性应变率; d_p 为夹杂影响半径, 不考虑夹杂时该项忽略。

3 本构方程的讨论及求解

考虑一般常应变率压缩过程, 塑性应变率 $\dot{\varepsilon}$ 为常数, 微结构 (晶界体积比) 演化方程为

$$f = f_0 + (f_0 - f_\infty)[1 - \exp(-c_f \dot{\varepsilon} t)] \quad (18)$$

位错演化方程如式 (9) 和式 (10) 所示, 外加

应力方程为

$$\sigma = \sigma_{\text{eff}} + (f_c \sigma_c + f_w \sigma_w) \quad (19)$$

应变方程为

$$\varepsilon = \int \dot{\varepsilon} dt \quad (20)$$

由本构方程组 (9) (10) (18)~(20) 可知, 基于细观变形理论推导的本构方程不同于常规的塑性本构方程, 它反映了塑性的本质就是位错的运动, 而且在塑性变形过程中, 材料的细观结构 (晶粒或亚晶) 也是不断变化的。因高温变形过程中, 位错的滑移时间主要由位错的攀升速率所控制, 因而表现为材料的变形与温度、应变速率相关。从外加应力为有效应力与内应力之和揭示了屈服应力, 其实就是材料的内应力。

本文建议的盐岩塑性变形本构方程的参数说明如表 1 所示, 其中位错密度、亚晶和晶界尺寸等参数与岩盐的产地、埋深等有关, 可根据细观试验观测获取, 而诸如 Burgers 矢量等参数为常量, 直接代入方程。细观参数来源于国外一些学者对盐岩的细观观测数据^[21], 见表 2, α^* 、 β^* 、 k_0 、 n_1 、 n_2 可根据盐岩位错演化趋势拟合得到。

表 1 模型参数 (1)

Table 1 Model parameters (1)

材料几何参数		施加应变率	塑性应变率	参考剪应变	Burgers 矢量	初始晶内位错	初始晶界位错密	亚晶内宽度	晶界初始体积比
α^*	β^*	$\dot{\gamma} / \text{s}^{-1}$	$\dot{\varepsilon} / \text{s}^{-1}$	率 $\dot{\gamma}_0 / \text{s}^{-1}$	b / m	密度 $\rho_{c0} / \text{m}^{-2}$	度 $\rho_{w0} / \text{m}^{-2}$	d / m	f_0
0.002 2	0.000 29	1.0×10^{-5}	3.268×10^{-6}	1.0	3.99×10^{-10}	1.0×10^{10}	1.0×10^{11}	0.13×10^{-3}	0.10

表 2 模型参数 (2)

Table 2 Model parameters (2)

动态回复参数		晶粒热激活	晶界演化	参考塑性应变率	温度	晶界稳态体	Boltzmann 常数	Taylor	攀升激活能	滑移激活能
k_0	n_1	参数 n_2	参数 c_f	$\dot{\varepsilon}_0 / \text{s}^{-1}$	T / K	积比 f_∞	$k_B / (\text{J/K})$	因子 M	/eV	/eV
9.8	67	120	112	1.0×10^9	293	0.07	1.380×10^{23}	3.06	1.12	0.65

针对位错演化微分方程组的特点, 可以采用 Runge-Kutta-Fehlberg 方法进行数值求解。该方法的主要思路为^[22]:

(1) 先确定步长 $H=h$, 按照 $p=5$ 阶和 $p=4$ 阶的 Runge-Kutta 法计算出 y_{n+1} 和 \hat{y}_{n+1} :

$$y_{n+1} = y_n + h \left(\frac{16}{135} K_1 + \frac{6}{12} \frac{656}{825} K_3 + \frac{28}{56} \frac{561}{430} K_4 - \frac{9}{50} K_5 + \frac{2}{55} K_6 \right) \quad (21)$$

$$\hat{y}_{n+1} = y_n + h \left(\frac{25}{216} K_1 + \frac{1}{2} \frac{408}{565} K_3 + \frac{2}{4} \frac{197}{104} K_4 - \frac{1}{5} K_5 \right) \quad (22)$$

(2) 计算出 d_{n+1}^* :

$$d_{n+1}^* = h \left(\frac{1}{360} K_1 - \frac{128}{4} \frac{275}{275} K_3 - \frac{2}{75} \frac{197}{240} K_4 + \frac{1}{50} K_5 + \frac{2}{55} K_6 \right) \quad (23)$$

(3) 计算出 θ 值:

$$\theta = 0.84 \left[\frac{\tilde{\varepsilon} H}{d_{n+1}^*} \right]^{0.25} \quad (24)$$

式中: $\tilde{\varepsilon}$ 为所能接受的单位长度一步误差。

(4) 检验: 若 $\theta > 1$, 则接受步长 $H=h$, $y_{n+1} = \hat{y}_{n+1}$; 若 $\theta < 1$, 则步长取 $h = \theta H$, 重新计算, 直至

$\theta > 1$ 。

本文根据以上思路采用 C++ 程序编程来求解晶内、晶界位错的演化方程组。

有效应力 σ_{eff} 求解可以根据应变率式 (17) 计算，令

$$\left. \begin{aligned} A_\sigma &= \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0 \exp(-Q/k_B T)} \\ B_\sigma &= \frac{1}{Mk_B T} \frac{b^2}{\sqrt{\rho_c}} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

则有效应力为

$$\sigma_{eff} = \frac{\ln(A_\sigma + \sqrt{A_\sigma^2 + 1})}{B_\sigma} \quad (26)$$

得到有效应力后，便可得到外加应力随应变的关系曲线。显然，有效应力与晶内和位错平均密度、温度以及应变速率相关。

4 模型算例分析

算例中的各参数如表 1、2 所示。计算出室温下的晶界位错和晶内位错随施加的正应变率演化如图 2 所示。计算结果表明，初始时期位错随应变快速增加，但很快达到饱和。其中晶界位错的演化和试验结果观察一致，但晶内位错的动态重结晶作用反映并不是非常明显，因此，EMTB 模型还有待在试验及理论分析的基础上予以改进。

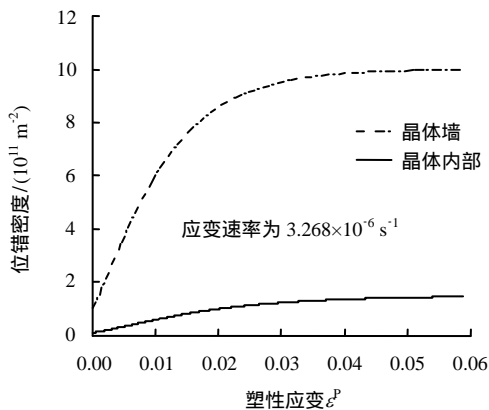


图 2 晶界位错和晶内位错随塑性应变演化

Fig.2 Grain boundary dislocation and intragranular dislocation evolution with strain

本文模拟的晶界体积比随正应变演化如图 3 所示。大量的试验表明，亚晶界体积比初始时一般为 0.10 左右，达到稳态时为 0.07 左右，它随应变增加而快速衰减，当到达稳态时，亚晶格的演化也就达到稳定状态。

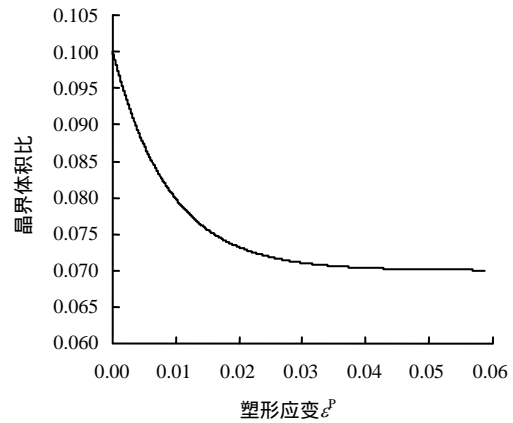


图 3 晶界体积比随塑性应变演化

Fig.3 Volume evolution of grain boundary with strain

根据表 1、2 中的数据模拟了纯盐岩单轴压缩如图 4 所示。图中实线为两个试验者分别在 MTS 和 RMT 上进行的应城盐岩单轴压缩曲线，点划线为模拟结果。从图中可以看出，本文所提出的本构方程可以很好地反映屈服强度、应变硬化过程以及后续的稳态流动情况，较完整地模拟了盐岩塑性变形的整个过程。

当外加应力达到内应力（由初始存在的位错产生，不考虑夹杂）时，材料开始进入屈服状态，并且在外力的作用下，不断有新的位错产生，从而需要更大的外力才能使材料进一步变形；因位错的滑移与攀升形成林位错，同时在（亚）晶界也沉积了许多位错，导致位错密度非常高的位错网络逐渐形成；盐岩的变形非常大时，动态重结晶发生，当加工硬化和动态重结晶达到动态平衡时，盐岩也就进入稳态流动状态。

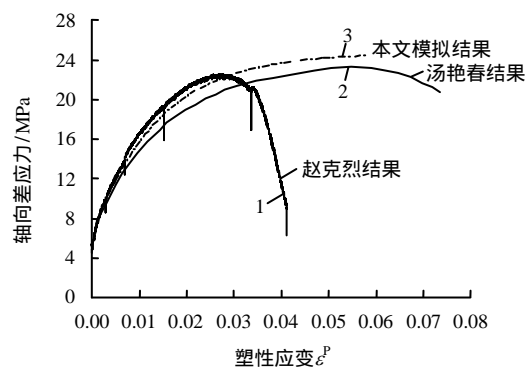


图 4 盐岩单轴压缩模拟曲线

Fig.4 Uniaxial compression simulation of salt rock

需要指出的是，本文的本构方程只是对盐岩的塑性变形进行模拟，因而无法反映出盐岩在压缩过程中因微裂纹萌生、演化所导致的破裂过程，这也是该本构模型存在主要的缺点，但该模型可以考虑

温度、加载速率、夹杂以及岩盐晶体结构等因素对岩盐变形影响,从而可为岩盐储气库稳定性分析提供更深刻的力学基础。

5 结 论

(1) 盐岩为多晶材料,其晶体为面心立方结构,因而它的变形细观机制可以借鉴固体位错理论予以分析。低温时,盐岩的塑性变形主要由位错的滑移引起;温度升高时,位错攀升逐渐占主要作用,因位错的相互纠结从而逐渐形成亚晶结构。

(2) 根据复合固体位错理论建立的盐岩本构方程,体现了盐岩塑性蠕变变形的物理机制,相对于传统的塑性本构方程具有更广的适用性。虽然该模型不能反映岩盐受压初始段以及峰后段,适用性有限,但对于岩盐储气库的长期稳定性分析还是有所裨益。

(3) 本文所提的本构模型依赖于对盐岩细观结构的观察和研究,而这方面的工作目前国内基本没有开展,希望本文工作能起到抛砖引玉的作用。

参 考 文 献

- [1] MUNSON D E. Preliminary deformation-mechanisms maps for salt (with application to WIPP), Report SAND-79-00776[R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1979: 34 - 56.
- [2] LANGER M. The rheological behavior of rock salt[C]// Proceedings of the First Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Clausthal: Trans. Tech. Publications, 1984: 201 - 231.
- [3] ZHANG HUABIN, WANG ZHIYIN, ZHENG YALI, et al. Study on triaxial creep experiment and constitutive relation of different rock salts[J]. *Safety Science*, 2012, 50(4): 801 - 805.
- [4] 张华宾, 王芝银, 赵艳杰, 等. 盐岩全过程蠕变试验及模型参数辨识[J]. *石油学报*, 2012, 33(5): 904 - 908.
ZHANG Hua-bin, WANG Zhi-yin, ZHAO Yan-jie, et al. The whole process experiment of salt rocks creep and identification of model parameters[J]. *Acta Petroleol Sinica*, 2012, 33(5): 904 - 908.
- [5] KETTEL D. The dynamics of gas flow through rock salt in the scope of time[J]. *Norwegian Petroleum Society Special Publications*, 1997, 7: 175 - 185.
- [6] GROVES G, KELLY A. Independent slip systems in crystals[J]. *Philosophical Magazine*, 1963, 8: 877 - 887.
- [7] POUYA A. Approche micro-macro de l'initiation de la fissuration du sel gemme[C]//7th International Congress on Rock Mechanics. Rotterdam: A. A. Balkema, 1991: 231 - 245.
- [8] POUYA A. Correlation between mechanical behaviour and petrologic properties of rock salt[C]//32nd U.S. Symposium on Rock Mechanics. Rotterdam: A. A. Balkema, 1991: 385 - 392.
- [9] POUYA A, ZAOUI A, NABOULI M. A micro-macro model for polycrystalline halite[C]//The third Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Clausthal: Trans. Tech. Publication, 1996: 129 - 141.
- [10] POUYA AHMAD. Micro-macro approach for the rock salt behavior[J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2000, 19: 1015 - 1028.
- [11] HUNSCHE U, Albrecht H. The influence of testural parameters and mineralogical composition on the creep behaviour of rock salt[C]//The 4th Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Clausthal: Trans. Tech. Publication, 1996: 144 - 151.
- [12] HUNSCHE UDO, HAMPEL ANDREAS. Rock salt-the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository[J]. *Engineering Geology*, 1999, 52(52): 271 - 291.
- [13] SZEZEPANIK S D. Time-dependent acoustic emission on potash[C]//Rock Mechanics as A Multidisciplinary Science. Rotterdam: A. A. Balkema, 1991: 471 - 479.
- [14] KACHANOV M. Effective elastic properties of cracked solids: Critical review of some basic concepts[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1992, 45(3): 304 - 335.
- [15] 唐继平, 王书琪, 陈勉. 盐膏层钻井技术[M]. 北京: 中国石油大学, 2001: 46 - 47.
- [16] 刘雄. 岩石流变学概论[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [17] ORLOVA A, CADEK J. Some substructural aspects of high-temperature creep in metals[J]. *Philosophical Magazine*, 1973, 28: 891 - 899.
- [18] PICU R C, MAJORELL A. Mechanical behavior of Ti-6Al-4V at high and moderate temperature—Part : Constitutive modeling[J]. *Materials Science and Engineering*, 2002, 32(2): 306 - 316.
- [19] TOTH L S, MOLINARI A, ESTRIN Y. Strain hardening at large strains as predicted by dislocation based polycrystal plasticity model[J]. *Journal of Engineering Material Technology*, 2002, 124(1): 71 - 77.

- 2013, 38(4): 535 - 541.
- YIN Guang-zhi, LI Ming-hui, LI Sheng-zhou, et al. 3D numerical simulation of gas drainage from boreholes based on solid-gas coupling model of coal containing gas[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 38(4): 535 - 541.
- [8] 周晓军, 马心校. 煤体钻孔周围应力应变分布规律的试验研究[J]. **煤炭工程师**, 1995, (2): 16 - 20.
- ZHOU Xiao-jun, MA Xin-xiao. Experimental study on stress and strain distributions around drilling hole[J]. **Coal Engineers**, 1995, (2): 16 - 20.
- [9] 王振, 梁运培, 金洪伟. 防突钻孔失稳的力学条件分析[J]. **采矿与安全工程学报**, 2008, 25(4): 444 - 448.
- WANG Zhen, LIANG Yun-pei, JIN Hong-wei. Analysis on the mechanical conditions of outburst prevention drilling[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering**, 2008, 25(4): 444 - 448.
- [10] 姚向荣, 程功林, 石必明. 深部围岩遇弱结构瓦斯抽采钻孔失稳分析与成孔方法[J]. **煤炭学报**, 2010, 35(12): 2073 - 2081.
- YAO Xiang-rong, CHENG Gong-lin, SHI Bi-ming. Analysis on gas extraction drilling instability and control method of pore-forming in deep surrounding-rock with weak structure[J]. **Journal of China Coal Society**, 2010, 35(12): 2073 - 2081.
- [11] 易恩兵, 牟宗龙, 龚林名, 等. 软及硬煤层钻孔卸压效果对比分析研究[J]. **煤炭科学技术**, 2011, 39(6): 1 - 6.
- YI En-bing, MOU Zong-long, DOU Lin-ming, et al. Study on comparison and analysis on pressure releasing effect of boreholes in soft and hard seam[J]. **Coal Science and Technology**, 2011, 39(6): 1 - 6.
- [12] 杜春志, 刘卫群. 煤层钻孔卸压效果影响因素分析[J]. **河北理工大学学报**, 2009, 31(4): 6 - 9.
- DU Chun-zhi, LIU Wei-qun. Analysis of accessible factors on effect of pressure relief by drills in coal-bed[J]. **Journal of Hebei Polytechnic University**, 2011, 30(2): 137 - 144.
- [13] 蔺海晓, 杨志龙, 范毅伟. 煤层钻孔周围应力场的分析与模拟[J]. **河南理工大学学报**, 2011, 30(2): 137 - 144.
- LIAN Hai-xiao, YANG Zhi-long, FAN Yi-wei. Analysis and simulation on the stress field of the borehole surrounding in coal seam[J]. **Journal of Henan Polytechnic University**, 2011, 30(2): 137 - 144.
- [14] VARDOULAKIS I, BESKOS D E. Dynamic behavior of nearly saturated porous media[J]. **Mechanics of Materials**, 1986, (5): 87 - 108.
- [15] BIOT M A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous medium[J]. **Journal of Applied Physics**, 1962, 33(4): 1482 - 1498.
- [16] THIRUVENKATACHAR V R, VISWANATHAN K. Dynamic response of an elastic half space with cylindrical cavity to time-dependent surface tractions over the boundary of the cavity[J]. **Journal of Mathematics and Mechanics**, 1965, 14(4): 541 - 572.
- [17] KUMAR R, MIGLANI A, DEBNATH L. Radial displacements of an infinite liquid saturated porous medium with cylindrical cavity[J]. **Computers and Mathematics with Applications**, 1999, 37(7): 117 - 123.
- [18] 周新民, 夏唐代, 彭建兵. 准饱和黄土中暗穴水动力扩展响应的研究[J]. **工程地质学报**, 2007, 15(1): 56 - 61.
- ZHOU Xin-min, XIA Tang-dai, PENG Jian-bing. Hydrodynamic response of the underground cylindrical cavity in nearly saturated loess[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2007, 15(1): 56 - 61.
- [19] DURBIN F. Numerical inversion of Laplace transforms: An efficient improvement to Dubner and Abate's method[J]. **The Computer Journal**, 1974, 17(4): 371 - 376.
- [20] MCKENZIE P W J, LAPOVOK R, ESTRIN Y. The influence of back pressure on ECAP processed AA 6016: Modeling and experiment[J]. **Acta Materialia**, 2007, 55: 2985 - 2993.
- [21] FRIEDMAN M, DULA W F, GANGI A F, et al. Structural petrology of experimentally deformed synthetic rock salt[C]//Proceedings of the First Conference on The Mechanical Behavior of salt. Clausthal: Trans. Tech. Publications, 1984: 19 - 36.
- [22] 关治, 陈景良. 数值计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [23] 汤艳春, 房敬年, 周辉. 三轴应力作用下盐岩溶蚀特性试验研究[J]. **岩土力学**, 2012, 33(6): 1601 - 1607.
- TANG Yan-chun, FANG Jing-nian, ZHOU Hui. Experimental study of rock salt dissolving characteristics under triaxial stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(6): 1601 - 1607.
- [24] 赵克烈. 注采气过程中地下盐岩储气库可用性研究[博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.

上接第 122 页