

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.03.015

基于能量守恒定律对西原模型的改进与验证

张千贵^{1,2}, 梁永昌¹, 范翔宇¹, 李广治², 李纬韬¹, 杨博仲³, 童 盟⁴

(1.西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,成都 610500;2.重庆大学
煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400030;3.中石油川庆钻探公司 广汉钻采院,
四川 广汉 618300;4.武汉三江航天远方科技有限公司,武汉 430030)

摘 要:在油气钻井工程中,由岩石蠕变引起的井眼缩径或井壁坍塌时有发生,本文基于能量守恒定律分析岩石蠕变的 3 个阶段,阐述传统的蠕变模型难以研究岩石加速蠕变阶段的原因。为此,在西原模型的基础上串联了一个绕组元件,建立改进西原模型及相应的本构方程。根据油气开发过程中所钻遇地层部分岩心的蠕变实验数据,对建立的改进西原模型进行验证,表明该模型能够很好地反映出岩石的蠕变特性,尤其是在岩石所受荷载大于长期强度的情况下,对凸显岩石加速蠕变阶段效果明显。该改进西原模型的提出可为进一步揭示岩石蠕变的客观规律提供理论依据。

关键词:能量转换;岩石蠕变;西原模型;实验研究;模型验证

中图分类号:TE34

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2016)03-117-08

A modified Nishihara model based on the law of the conservation of energy and experimental verification

ZHANG Qiangui^{1,2}, LIANG Yongchang¹, FAN Xiangyu¹, LI Guangzhi²,
LI Weitao¹, YANG Bozhong³, TONG Meng⁴

(1.State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P.R.China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, P.R.China; 3. Drilling Engineering Academy of Technology, Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd. of CNPC, Guanghan 618300, Sichuan, P.R.China; 4. Wuhan Sanjiang Hangtian Yuanfang Technology Co., Ltd., Wuhan 430030, P.R.China)

Abstract: During the process of oil-gas drilling, the problems of wellbore instability, such as the shrinkage and the sloughing of borehole, usually happen because of rock creep. We first analyzed the three stages of rock creep based on the law of the conservation of energy and explained the reason why the traditional rock creep model cannot well describe the accelerating stage of rock creep. Then, we modified the Nishihara model and relevant constitutive equations by increasing a winding device. Some experimental results of

收稿日期:2016-02-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51474185);煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室资助项目(2011DA105287—FW201203)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51474185); Scientific Research Foundation of State Key Laboratory Coal Mine Disaster Dynamics and Control(2011DA105287—FW201203).

作者简介:张千贵(1982-),男,重庆大学博士,主要从事油气井工程岩石力学,地应力评价方法与技术,非常规天然气井壁稳定性等方向研究,(E-mail)qgzhang@swpu.edu.cn。

联系作者:李广治(联系人),男,重庆大学助理研究员,主要从事采矿工程、安全工程、岩土力学及岩土工程稳定性等方面的研究,(E-mail)lgz@cqu.edu.cn。

several kinds of rocks forming different formations were used to validate the modified Nishihara model. The verification results indicate that this model can describe the creep characteristic of rock effectively. Especially the accelerating creep stage of rock can be simulated very well when the stress exceeds the long-term strength. This modified Nishihara model provides a theoretical foundation for revealing the objective law of the rock creep.

Keywords: energy conversion; rock creep; Nishihara model; experimental study; model validation

蠕变作为岩石的一项重要力学性质与许多工程质量息息相关^[1-2],在油气钻井工程中,由岩石蠕变导致井眼缩径及井壁坍塌所造成的经济损失不可小觑。

国内外学者对岩石的蠕变特性做了大量的理论及实验研究^[3-7]。Yang 等^[8]对高温—高含冰量冻结沙土蠕变行为进行了实验及理论研究;范翔宇等^[9]对煤岩储气层岩石蠕变特性与本构模型进行了研究,建立了饱依丁—汤姆逊体与宾汉姆体串联模型;杨逾等^[10]建立了西原加速模型;Kang J 等^[11]建立了考虑损伤效应的煤岩非线性本构蠕变模型;李金和等^[12]通过单轴压缩蠕变实验研究了大理岩本构蠕变模型参数;陈绍杰等^[13]采用 LS-DYNA 数值方法分析了深部煤柱的蠕变支撑效应;周长冰等^[14]建立了高温三轴应力条件下的煤岩本构蠕变模型;赵斌等^[15]对不同应力水平条件下煤岩蠕变破坏特征进行了研究;刘钦等^[16]对灰质页岩蠕变特性进行了试验研究;杨红伟等^[17]对三轴压缩条件下岩石孔隙水压力分级加载蠕变试验进行了研究;Gao 等^[18]建立了在温度和湿度影响下岩石的粘弹塑性本构蠕变模型;Zhou 等^[19]通过分数阶导数建立了岩盐本构蠕变模型。

以上理论和方法是纯力学的角度研究了岩石的蠕变特性。拟从能量角度对油气钻井工程中钻遇岩石蠕变特性进行详细研究与分析,并且对西原模型进行改进,建立能够明显反映岩石加速蠕变阶段的岩石蠕变模型。

1 理论分析

岩石蠕变通常分为 2 种形式,即衰减蠕变^[20]和非衰减蠕变^[21]。当岩石所受荷载小于长期强度时,岩石发生衰减蠕变;在岩石所受荷载大于长期强度时,岩石发生非衰减蠕变。

在油气井钻井过程中,很多井眼缩径或井壁坍塌是由岩石的非衰减蠕变引起的。从能量角度分析岩石非衰减蠕变的 3 个阶段为:1)减速蠕变阶段。该阶段主要以弹性形变为主。其原因是岩石要破裂,首先要破坏各基元的价键。而岩石基元粒子之间是通过各种化学键相结合的,这些价键的结合力是吸引力和排斥力共同作用的结果。在此阶段,外力功主要转变为弹性势能(由于岩石先天性的缺陷,因此该阶段并非表现理想弹性体的特点)^[22]。2)稳定蠕变阶段。主要以塑性形变为主。其原因是岩石弹性势能达到一定程度,价键开始断裂,岩石的不同组元内开始大量产生各种缺陷,使得岩石所受的外力功主要转化为塑性变形能,故该阶段主要表现出塑性变形的特点^[22]。3)加速蠕变阶段。该阶段发展迅速,并且在短时间内发生破坏。主要是因为岩石在外力功的作用下,岩石内部积蓄的塑性变形能已经达到极限,岩石产生宏观裂纹并迅速扩展。在此阶段,外力功主要转化为动能,导致应变迅速增大,直至岩石破坏。

2 模型建立

2.1 西原模型

西原模型是由胡克体、开尔文体和理想粘塑性体串联而成,其力学模型见图 1,能够较全面反映岩石的弹—粘弹—粘塑性特征^[23]。

模型中,当岩石所受荷载(σ)小于岩石的长期强度(σ_s)时,只有胡克体和开尔文体发生形变;当岩石所受荷载大于岩石长期强度时,将引起理想粘塑性体发生形变。

图 1 中 E_1 、 E_2 分别为胡克体和开尔文体中的弹性模量; η_1 、 η_2 分别为开尔文体和理想粘塑性体中的黏性系数。

该模型对应的蠕变方程为

1)当 $\sigma_0 < \sigma_s$ 时,蠕变方程

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_1}\right) \right]. \quad (1)$$

2)当 $\sigma_0 \geq \sigma_s$ 时,蠕变方程

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_1}\right) \right] + \frac{1}{\eta_2} (\sigma_0 - \sigma_s) t, \quad (2)$$

式中: ϵ 为岩石应变,%; σ_0 为岩石所受荷载,MPa; t 为时间,h。

2.2 改进西原模型

从上述理论分析可知,在岩石的蠕变模型中,西原模型能够较好地研究大部分岩石的衰减蠕变过程,但是对于研究非衰减蠕变具有局限性。主要原因是西原模型的元件组成只能解释出岩石在外力功的情况下转变为弹性势能,塑性势能 2 个阶段,对于第 3 阶段,即外力功转换为动能阶段无法诠释。基于此,从能量角度改进西原模型来研究岩石的蠕变特性。

在不考虑岩石内部热交换的情况下,由能量守恒定律重点研究岩石蠕变的第 3 阶段,令 M 为岩石试件的质量(kg), L 为试件的高度(mm), ϵ 为轴向应变(%), v 为轴向变形速率(m/s), t 为时间(s), σ 为轴向荷载(MPa), S 为岩石试件端部面积(mm^2), ρ 为试件密度(g/cm^3), λ 为修正系数,无量纲($\lambda > 1$,其意义为外力功不可能完全转换为动能)。

取岩石试件在单位时间内的微元应变为 $\Delta\epsilon$ (%),应变速率为 Δv (m/s),根据功能关系推导出如下公式

$$\left. \begin{aligned} \sigma \cdot S \cdot L \cdot \Delta\epsilon &= \frac{1}{2} \lambda \cdot M (\Delta v)^2 \\ \Delta v &= \alpha t \\ \alpha &= \frac{\sigma \cdot S}{\rho \cdot S \cdot L} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta\epsilon = \frac{1}{2} \lambda \frac{\sigma}{\rho L^2} (\Delta t^2), \quad (3)$$

对式(3)进行积分可得

$$\epsilon = \int \frac{1}{2} \lambda \frac{\sigma}{\rho L^2} dt^2 \Rightarrow \epsilon = \frac{1}{2} \lambda \frac{\sigma}{\rho L^2} t^3. \quad (4)$$

因此,在岩石的第 3 蠕变阶段,应力、应变及时间关系因遵循公式(4)。故可在西原模型的基础上串联一个绕组 δ 元件,该元件的特点是在外力情况下应变与时间呈 t^3 关系,以此建立改进西原模型,其力学模型见图 2,并且得出相应的本构方程和蠕变方程。

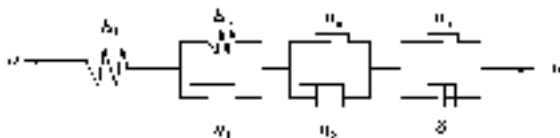


图 2 改进西原体力学模型

Fig.2 Modified Nishihara Model

1)本构方程

$$\left(A + \frac{1}{E} \right) \ddot{\sigma} + \left(\frac{1}{\eta_2} - 3At^2 + \frac{1}{\eta_1} + \frac{E_2}{\eta_1 E_1} + A \frac{E_2}{\eta_1} \right) \dot{\sigma} + \frac{E_2}{\eta_1} \frac{(\sigma - \sigma_s)}{\eta_2} - \left(6At + 3A \frac{E_2 t^2}{\eta_1} \right) \sigma = \ddot{\epsilon} + \frac{E_2}{\eta_1} \dot{\epsilon} \quad (5)$$

$$A = \frac{\lambda}{2\rho L^2},$$

2)蠕变方程

当 $\sigma < \sigma_s$ 时,只有广义开尔文体发生形变。

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2 t}{\eta_1}\right) \right], \quad (6)$$

当 $\sigma \geq \sigma_s$ 时,除了广义开尔文体发生形变外,理想粘塑性体及绕组也将发生形变。

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_1} t\right) \right] + \frac{1}{\eta_2} (\sigma_0 - \sigma_s) t + A (\sigma_0 - \sigma_s) t^3, \quad (7)$$

从以上分析可知,改进西原模型从能量角度阐明了岩石蠕变的整个过程。在弹性势能阶段,岩石主要以弹性变形为主,蠕变表现形式为应变速率随时间增加而减小,即减速蠕变阶段;在塑性势能阶段,岩石主要以塑性变形为主,蠕变表现形式为应变速率基本保持不变,是岩石发生变形相对稳定的阶段,即等速蠕变阶段;在动能阶段,岩石主要以复杂变形为主,蠕变表现形式为应变速率迅速增大,岩石在极短的时间内发生破坏,即加速蠕变阶段。

3 模型验证

从上述分析可知,理论上改进西原模型用于研究岩石的蠕变特性是恰当的,且在岩石所受荷载小于长期强度时,2种模型研究岩石的蠕变特性所取得的效果是相同的,为此不做冗述。但岩石所受荷载大于长期强度时,2种模型研究岩石的蠕变特性有着明显的区别。

3.1 实验方案

采用 WDW-200 微机控制电子万能试验机(如图 3)对制作好的岩石试件进行蠕变力学实验,分析出不同轴向荷载条件下岩石的应变与时间关系。

3.2 实验步骤

- 1)将岩石试件安放在加载台上,调节横梁,使上承压板与试件上端接触(如图 4);
- 2)以 0.03 mm/min 的加载速率施加轴向荷载至设定的荷载值;
- 3)保持轴向荷载不变,进行岩石蠕变实验,并记录实验过程中岩石试件的轴向应变与时间。



图 3 WDW-200 微机控制电子万能试验机
Fig.3 WDW-200 universal testing machine



图 4 岩石试件安放图
Fig.4 Rock sample installation

3.3 改进西原模型蠕变力学实验验证

3.3.1 煤岩蠕变实验验证

为了验证 2 种模型研究煤岩蠕变特性的适用性,实验采用山西晋城地区的煤岩进行蠕变力学实验研究。运用 matlab 软件对实验数据进行拟合,得到各拟合参数(见表 1)及拟合结果(见图 5)。从表 1 中可以看出:在相同的荷载条件下,改进西原模型对实际结果的拟合度(R^2)要高于西原模型。图 5 是 2 种模型在不同荷载条件下拟合值与实际值的比较。从图中容易发现:1)煤岩所受荷载由 8 MPa 增加到 12 MPa 时,在减速蠕变阶段,煤岩的蠕变速率由 0.05%/h 增加到 0.23%/h;在稳定蠕变阶段,其蠕变速率由 0.007%/h 增加到 0.042%/h;在加速蠕变阶段,其蠕变速率由 0.027%/h 增加到 0.112%/h。2)随着轴向荷载的增加,煤岩发生蠕变破坏的时间越来越短,轴线荷载为 8 MPa 时,蠕变时间为 58 h;轴线荷载为 10 MPa 时,蠕变时间为 27 h;轴线荷载为 12 MPa 时,蠕变时间为 19 h。3)随着轴向荷载的增加,减速蠕变阶段和稳定蠕变阶段越来越不明显,而加速蠕变阶段越来越明显。4)西原模型和改进西原模型所拟合出的曲线都能很好的反映煤岩减速蠕变阶段,而对于稳定蠕变阶段和加速蠕变阶段,改进西原模型拟合效果相对更好。5)对于加速蠕变阶段,改进西原模型的拟合效果较西原模型具有明显的优越性。

表 1 岩石蠕变实验拟合参数

Table 1 Fitting parameters of rock creep experiment

岩石类型	模型类型	模型参数							
		σ_0/MPa	E_1/MPa	E_2/MPa	$\eta_1/\text{MPa}\cdot\text{h}$	$\eta_2/\text{MPa}\cdot\text{h}$	σ_s/MPa	$A/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	R^2
煤岩	改进西原模型	8	217.27	24.504	61.83	347.09	7.0	1.546×10^{-7}	0.989
		10	7.19×10^{24}	15.86	23.51	543.97	7.0	7.12×10^{-6}	0.990
		12	3 156.29	19.29	19.56	139.06	7.0	2.89×10^{-6}	0.998
	西原模型	8	81.15	32.22	43.78	151.21	7.0	—	0.924
		10	4.68×10^{24}	20.12	21.45	137.04	7.0	—	0.924
		12	2.87×10^{21}	20.22	18.83	120.52	7.0	—	0.979
橄榄岩	改进西原模型	38.83	0.026	0.057	1.59	79.89	35.4	1.32	0.968
	西原模型	38.83	0.035	0.042	0.64	7.69	35.4	—	0.935
红砂岩	改进西原模型	50.45	1 483.21	324.98	13.87	4.07	50.3	6.31	0.993
	西原模型	50.45	1 430.96	466.27	13.88	0.45	50.3	—	0.962
盐膏岩	改进西原模型	21.5	3.53×10^{17}	15.75	139.83	1.158×10^{22}	21.4	0.013	0.994
	西原模型	21.5	409.95	398.41	0.17	0.006 3	21.4	—	0.982

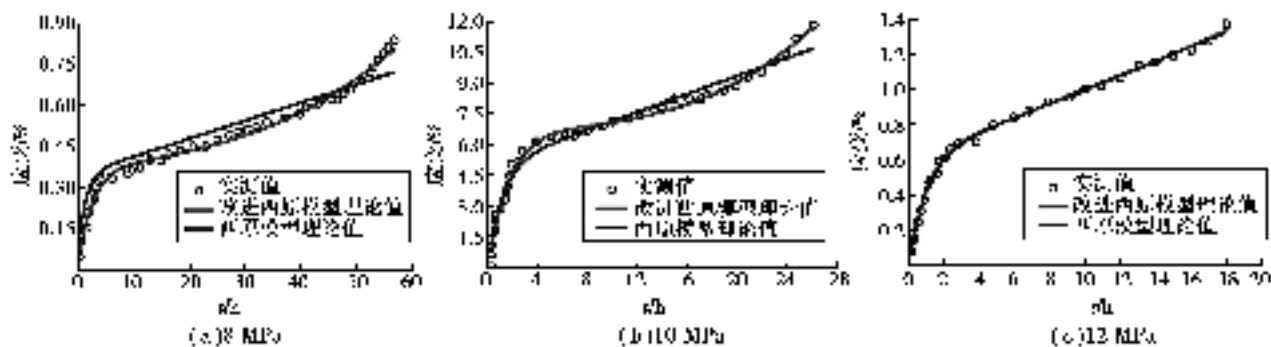


图 5 不同轴向荷载煤岩蠕变力学实验实测值与理论值比较

Fig.5 Comparison between experimental and theoretical values of coal rock creep under different axial loads

综上所述可知,改进西原模型所拟合的曲线与实测曲线更加吻合,尤其更能准确的反映煤岩的加速蠕变阶段。

3.3.2 橄榄岩蠕变实验验证

本实验岩石试件取自金川集团股份有限公司某矿区的橄榄岩试样。运用 matlab 软件对该岩石试件蠕变实验结果进行拟合,得到各拟合参数(见表 1)及拟合结果(见图 6)。

从表 1 可以看出:在相同荷载条件下,改进西原模型对实测值的拟合程度高于西原模型。图 6 直观的反映了 2 种模型对研究橄榄岩蠕变特性所取得的效果。从图中不难看出:1)在轴向荷载为 38.83 MPa 的情况下,橄榄岩减速蠕变阶段所经历的时间为 2.1 h;稳定蠕变阶段所经历的时间为 12.4 h;加速蠕变阶段所经历的时间为 1.7 h。2)橄榄岩蠕变的 3 个阶段中,减速蠕变速率 0.065%/h;稳定蠕变速率为 0.004%/h;加速蠕变速率为 0.051%/h。3)无论是在减速、稳定及加速蠕变阶段,改进西原模型的拟合曲线与实测曲线更加

吻合。

结合上述分析可知:改进西原模型能更好研究橄榄岩的蠕变特性。

3.3.3 红砂岩蠕变实验验证

本实验岩石试样取自重庆地区的红砂岩,运用 matlab 软件对实验结果进行拟合,得到了各拟合参数(见表 1)及拟合结果(见图 7)。

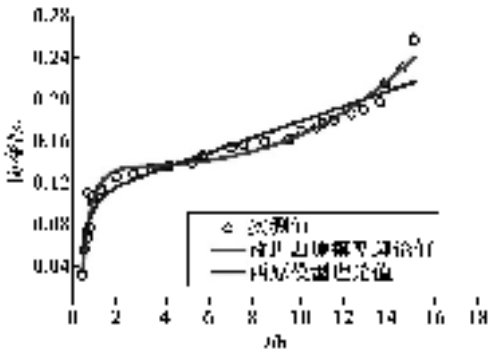


图 6 38.83 MPa 橄榄岩蠕变实验实测值与理论值比较
Fig.6 Comparison between experiment and theoretical values of peridotite creeping experiment under 38.83 MPa

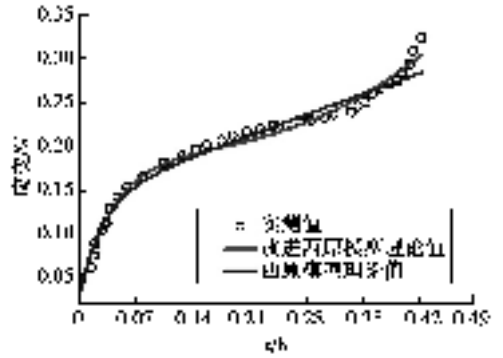


图 7 50.45 MPa 红砂岩蠕变实验实测值与理论值比较
Fig.7 Comparison between experiment and theoretical values of red sandstone creeping experiment under 50.54 MPa

从表 1 可以看出:在相同荷载条件下,改进西原模型对实测值的拟合程度在西原模型的基础上有所提高。

图 7 直观反映了 2 种模型对红砂岩单轴压缩蠕变特性的研究效果,从图中可以看出:1)在轴向荷载为 50.45 MPa 时,红砂岩在减速蠕变阶段的蠕变速率为 1.78%/h,经历时间为 1.1 h;在稳定蠕变阶段,其蠕变速率为 0.26%/h,经历时间为 0.24 h;在加速蠕变阶段,蠕变速率为 1.12%/h,经历时间为 0.09 h。2)在红砂岩蠕变的 3 个过程中,在减速蠕变阶段,西原模型与改进西原模型对于实测值的拟合效果都比较好,而当蠕变进入到稳定蠕变和加速蠕变阶段后,西原模型对于实测值的拟合效果逐渐变差,且进入加速蠕变阶段后,这种劣势更加突出。

综上所述,改进西原模型能更好地表现红砂岩的蠕变特性,特别是能够恰当的反映出加速蠕变阶段的特性。

3.3.4 盐膏岩蠕变实验验证

本次实验的岩芯取自新疆塔里木盆地的盐膏岩地层,通过单轴压缩蠕变力学实验,确定出该区域的盐膏岩长期强度为 20.0~21.5 MPa。

运用 Matlab 软件对实验结果进行参数拟合,得到拟合参数(见表 1 及拟合结果(见图 8))。

从表 1 可以看出:在轴向荷载相同的情况下,改进西原模型对实测值的拟合程度高于西原模型。从图 8 中可以看出:1)盐膏岩在轴向荷载条件下,应变—时间基本呈线性关系,蠕变过程中 3 个阶段的过渡不明显,在经历 28 h,应变达到 2.76%后,盐膏岩发生蠕变破坏。2)改进西原模型对整个蠕变过程的拟合程度较西原模型好。

综上所述:改进西原模型所研究的盐膏岩蠕变曲线与实际蠕变曲线吻合程度较高,对加速蠕变阶段曲线也有很好

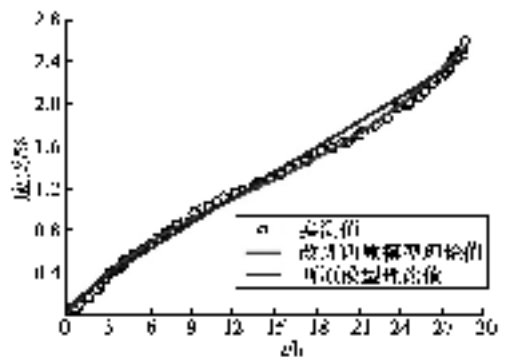


图 8 21.5 盐膏岩蠕变实验实测值与理论值比较
Fig.8 Comparison between experiment and theoretical values of salt-gypsum rock creeping experiment under 21.5 MPa

的反映。而西原模型对于加速蠕变阶段曲线的反映不明显。

4 结 论

通过以上对改进西原模型的理论分析及实验验证,得出了以下结论:

1)在油气井工程中,从能量角度出发,运用外力功与岩石内部能量的转换关系来研究岩石的蠕变特性,并且建立相应的蠕变模型是可行的。

2)在岩石所受荷载大于长期强度的情况下,建立的改进西原模型对煤岩、橄榄岩、红砂岩和盐膏岩4种岩石的蠕变特性具有明显的优越性。

3)改进西原模型较原西元模型能够更好地研究岩石的加速蠕变阶段。从能量角度分析是因为该阶段岩石内部储存能量的能力已经达到极限,外力功主要转换为动能,故表现出加速蠕变的特征。

研究主要从能量的角度研究了煤岩、橄榄岩、红砂岩、盐膏岩4种岩石的蠕变特性,揭示了它们在蠕变过程中的能量转换关系,并且通过蠕变力学实验验证表明:改进西元模型适于研究上述岩石的蠕变规律,而对于其他岩石是否适用需要进一步的考证。

参考文献:

- [1] 尹光志,何兵,王浩,等.深部采动影响下覆岩蠕变损伤破坏规律[J].煤炭学报,2015,40(6):1390-1395.
YIN Guangzhi, HE Bing, WANG Hao, et al. Damage law of overlying rock induced by mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1390-1395. (in Chinese)
- [2] 范翔宇.复杂钻井地质环境描述[M].北京:石油工业出版社,2012.
FAN Xiangyu. Complex drilling geological environment description [M]. Beijing: China Petroleum Industry Press, 2012.(in Chinese)
- [3] Falaleev G N. Rock creep degree assessment[J]. Journal of Mining Science, 2010, 46(1): 34-37.
- [4] 何峰,王来贵,王振伟,等.煤岩蠕变-渗流耦合规律实验研究[J].煤炭学报,2011,36(6):930-933.
HE Feng, WANG Laigui, WANG Zhenwei, et al. Experimental study on creep-seepage coupling law of coal(rock)[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(6): 930-933. (in Chinese)
- [5] Zhu Y B, Yu H M. Unsaturated creep behaviors of weak intercalated soils in soft rock of badong formation[J]. Journal of Mountain Science, 2015, 12(6): 1460-1470.
- [6] Xu W Y, Wang R B, Wang W, et al. Creep properties and permeability evolution in triaxial rheological tests of hard rock in dam foundation[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(1):252-261.
- [7] 徐鹏,杨圣奇.循环加卸载下煤的黏弹塑性蠕变本构关系研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(3):537-545.
XU Peng, YANG Shengqi. Study of visco-elasto-plastic constitutive model of coal under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3):537-545. (in Chinese)
- [8] Yang Y, Lai Y, Chang X. Experimental and theoretical studies on the creep behavior of warm ice-rich frozen sand[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 63(1-2): 61-67.
- [9] 范翔宇,张千贵,艾巍,等.煤岩储气层岩石蠕变特性与本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2013(S2):3732-3739.
FAN Xiangyu, ZHANG Qianguai, AI Wei, et al. Research on creep property and constitutive model of coal in coal bed gas reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, (S2): 3732-3739. (in Chinese)
- [10] 杨逾,李盈,周小科.基于西原加速模型的煤岩蠕变试验研究[J].煤炭学报,2014,39(11):2190-2194.
YANG Yu, LI Ying, ZHOU Xiaoke. Study on the coal creep test based on the improved Nishihara model [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11): 2190-2194. (in Chinese)
- [11] Kang J H, Zhou F B, Liu C, et al. A fractional nonlinear creep model for coal considering damage effect and experimental validation[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2015, 76: 20-28.
- [12] 李金和,陈文玲,王洪旭.大理岩单轴蠕变模型参数[J].世界地质,2014,33(2):488-493.
LI Jinhe, CHEN Wenling, WANG Hongxu. Uniaxial creep modal parameters of marble[J]. Global Geology, 2014,

- 33(2): 488-493. (in Chinese)
- [13] 陈绍杰,郭惟嘉,程国强,等.深部条带煤柱蠕变支撑效应研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(1):48-53.
CHEN Shaojie, GUO Weijia, CHENG Guoqiang, et al. Research on creep supporting effect of deep strip pillar[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012, 29(1): 48-53. (in Chinese)
- [14] 周长冰,万志军,张源,等.高温三轴应力下气煤蠕变特征及本构模型[J].煤炭学报,2012,37(12):2020-2025.
ZHOU Changbing, WAN Zhijun, ZHANG Yuan, et al. Creep characteristics and constitutive model of gas coal mass under high temperature and triaxial stress[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12):2020-2025. (in Chinese)
- [15] 赵斌,王芝银,伍锦鹏.煤岩不同应力水平的蠕变及破坏特性[J].中国石油大学学报:自然科学版,2013,37(4):140-144.
ZHAO Bin, WANG Zhiyin, WU Jinpeng. Creep and damage characteristics of coal rock under different stresses[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2013, 37(4): 140-144. (in Chinese)
- [16] 刘钦,李术才,李利平,等.软弱破碎围岩隧道炭质页岩蠕变特性试验研究[J].岩土力学,2012(S2):21-28.
LIU Qin, LI Shucan, LI Liping, et al. Experimental study of carbonaceous shale creep characters of weak broken surrounding rock tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, (S2): 21-28. (in Chinese)
- [17] 杨红伟,许江,彭守建,等.孔隙水压力分级加载砂岩蠕变特性研究[J].岩土力学,2015(S2):365-370.
YANG Hongwei, XU Jiang, PENG Shoujian, et al. Study of sandstone creep characteristics under stepwise loading pore water pressures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, (S2): 365-370. (in Chinese)
- [18] Gao Y, Gao F, Zhang Z Z, et al. visco-elastic-plastic model of deep underground rock affected by temperature and humidity[J]. Mining Science & Technology, 2010, 20(2): 183-187.
- [19] Zhou H W, Wang C P, Han B B, et al. A creep constitutive model for salt rock based on fractional derivatives[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(1):116-121.
- [20] Cristescu N D. A general constitutive equation for transient and stationary creep of rock salt[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1993, 30(2): 125-140.
- [21] 张新民,庄军,张遂安.中国煤层气地质与资源评价[M].北京:科学出版社,2002:12-30.
ZHANG Xinmin, ZHUANG Jun, ZHANG Suian. The geological and resources evaluation of coal bed gas in China [M]. Beijing: Science Press, 2002: 12-30.(in Chinese)
- [22] 彭瑞东,谢和平,周宏伟.岩石变形破坏过程的热力学分析[J].金属矿山,2008(3): 61-64+132.
PENG Ruidong, XIE Heping, ZHOU Hongwei. Thermodynamic analysis of rock deformation and failure process[J]. Metal Mine, 2008(3): 61-64.(in Chinese)
- [23] 蔡美峰,何满潮,刘东燕.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002:199-200.
CAI Meifeng, HE Manchao, Liu Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 199-200.(in Chinese)

(编辑 侯 湘)