



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402230

引用格式: 项明, 张喆, 李梦博, 等. 盐岩岩芯制备方法及其蠕变特性[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(3): 1018-1027.

Xiang Ming, Zhang Zhe, Li Mengbo, et al. Artificial preparation method and creep characteristics of salt rock core[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(3): 1018-1027.

盐岩岩芯制备方法及其蠕变特性

项明¹, 张喆², 李梦博³, 王名春³, 闫传梁²

(1. 中国海洋石油国际有限公司, 北京 100000; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 青岛 266000;
3. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100029)

摘要 世界范围内分布着大量的盐下油气田, 由于盐层取芯作业造价昂贵, 因此难以针对具体区块的盐岩岩芯进行蠕变实验。针对以上难题, 创建了一种人造盐岩岩芯压制方法, 通过调整制备温度和压力来控制重结晶程度。通过测试在不同制备条件下的盐岩岩芯的声波速度、密度、单轴峰值强度, 优选出了最佳的制备条件, 并通过蠕变实验验证了人造盐岩岩芯与天然盐岩岩芯具有相似的蠕变特性, 通过人造盐岩岩芯代替天然岩芯的方案是可行的; 基于室内蠕变实验构建了盐岩的黏弹性本构模型, 研究发现, 盐岩的减速蠕变阶段的流变特征符合 Kelvin 模型, 稳态蠕变阶段符合 Heard 模型, 编译 UMAT 子程序描述其减速、稳态阶段蠕变特征, 具有较好的拟合度, 表明本研究中构建的黏弹性模型的适用性; 对不同含量硬石膏的复合盐岩进行了蠕变实验, 结果表明硬石膏的存在对盐岩的蠕变具有一定的抑制作用, 盐岩中硬石膏含量越高, 岩石的蠕变速率越低, 因此在含有硬石膏的盐岩层中, 可适当降低钻井时所使用的钻井液的密度。

关键词 人造岩芯; 盐岩; 蠕变; 岩石力学

中图分类号 TE142 O345; 文献标志码 A

Artificial Preparation Method and Creep Characteristics of Salt Rock Core

XIANG Ming¹, ZHANG Zhe², LI Meng-bo³, WANG Ming-chun³, YAN Chuan-liang²

(1. CNOOC International Corporation, Beijing 100000, China; 2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266000, China;
3. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100029, China)

[Abstract] A significant number of subsalt oil and gas fields are distributed worldwide. Due to the high costs associated with coring operations in salt formations, conducting creep experiments on specific salt rock cores is challenging. To address this issue, a method for creating artificial salt rock cores was developed wherein the degree of recrystallization was controlled by adjusting the preparation temperature and pressure. By testing the acoustic velocity, density, and uniaxial peak strength of salt rock cores under different preparation conditions, the optimal preparation conditions were identified. Creep experiments verified that the artificial salt rock cores exhibit similar creep characteristics to natural salt rock cores, indicating the feasibility of using artificial cores as substitutes for natural ones. Based on indoor creep experiments, a viscoelastic constitutive model of salt rock was constructed. The result showed that the rheological characteristics of the decelerating creep stage conform to the Kelvin model, while the steady-state creep stage aligns with the Heard model. A UMAT subroutine was compiled to describe the creep characteristics of the decelerating and steady-state stages, demonstrating a good fit and indicating the applicability of the viscoelastic model constructed in this study. Creep experiments on composite salt rocks with different contents of anhydrite showed that the presence of anhydrite inhibits the creep of salt rock. The higher the anhydrite content in the salt rock, the lower the creep rate of the rock. Therefore, in salt layers containing anhydrite, the density of drilling fluid used during drilling can be appropriately reduced.

[Keywords] manufacturing rock core; salt rock; creep; rock mechanics

在油气资源钻探过程中, 盐岩地层是一种常见地层。由于盐岩地层渗透率极低, 因此在盐下容易形成油气藏。但盐岩具有较强的蠕变特性, 会给钻完井作业带来很大的不利影响, 在钻井液密度选

取、套管强度设计等施工环节, 了解盐岩地层的蠕变特性、掌握其流变本构方程是十分重要的。由于取芯作业费用昂贵, 且盐岩地层不是储层, 因此现场往往不进行取芯作业, 这给盐岩地层蠕变特性的

收稿日期: 2024-03-28 修订日期: 2024-06-05

基金项目: 国家自然科学基金基础科学中心项目(52288101); 山东省高等学校青年创新团队项目(2022KJ072)

第一作者: 项明(1980—), 男, 汉族, 湖北黄冈人, 高级工程师。研究方向: 海洋石油钻完井。E-mail: xiangming@cnooc.com.cn。

投稿网址: www.stae.com.cn

认识带来很大挑战,导致不能准确掌握深部盐岩地层的蠕变特性,给后续的钻井设计带来很大困难。若能人工制备与天然盐岩力学特性相近的人造岩芯,使用人造盐岩岩芯代替天然岩芯进行研究,便解决了盐层取芯困难的问题。

历年来,为制备出与天然盐岩在力学性能上更为接近的人造岩芯,国内外学者进行了一些探索。Yan 等^[1]使用纯净的氯化钠粉末冷压处理得到纯净的氯化钠盐岩样品,相较于天然盐岩,具有更高的纯度、更低的孔隙度。能排除杂质对盐岩性能的影响。杨春和等^[2]将纯盐晶体进行熔融,通过探索冷却条件,获得了在晶体结构、粒度及晶间关系等方面与天然盐岩相近的盐岩岩芯。但渗透率却比天然盐岩高出至少 2 个数量级。赵珊等^[3]采用盐水蒸发沉积系统来制备盐岩样品,不断蒸发饱和盐水最终获得盐岩晶体。但由于制备过程未考虑沉积压实作用,因此通过此方法制备出的盐岩相较于天然盐岩具有较高的孔隙度,且制样过程超过一周,时间过于漫长。

从模拟天然沉积环境的角度出发,结合上述学者所研究的制备方法的优点,通过对潮湿的天然喜马拉雅盐岩颗粒施加一定的温度和压力来模拟沉积压实过程中的地层温度和地应力作用,以此来控制盐晶体的重结晶程度和压实程度,拟制备出与天然盐岩岩芯在力学特性上相近的人造盐岩岩芯;基于室内蠕变实验,构建能表征盐岩蠕变特征的黏弹性本构模型,并研究硬石膏对蠕变速率的影响规律。

1 人造盐岩岩芯的制备

1.1 盐岩岩芯制备方法

以喜马拉雅盐岩岩屑为基础来进行人造岩芯的制备。约 2 亿 8 千万年前,喜马拉雅山脉地区曾经是一片海洋^[4-5],后经过板块漂移、地壳运动,这片地区耸立起喜马拉雅山脉,残存的海水则被深埋在地下 600~1 000 m。经过地层挤压与高温,海水中的水分逐渐被蒸发排出,盐与地下的矿物相结合形成高纯度的橘红色盐晶体。由于制备的人造岩样的条件会影响其蠕变试验的结果,所以在制备岩芯的过程中考虑到以下几点因素的影响。

(1)矿物成分。以天然喜马拉雅盐岩岩芯作为对照组,保证了人造盐岩岩芯和天然盐岩岩芯在成分、配比上保持一致。

(2)单轴抗压强度。峰值强度作为人造盐岩岩芯的重要力学参数之一,反映了岩石的弹性模量、内聚力、内摩擦角、胶结程度等力学性质。

(3)岩芯的密度。盐岩的密度反映了岩芯的压实程度,因此盐岩的密度对于蠕变性能有着很大的影响。

(4)声波速度。岩芯的岩石的声波速度反映了岩石的密度、压实程度、孔隙度、胶结情况弹性模量^[6-7]等。

制备人造岩芯的目的是用其代替天然岩芯,以便进行钻井工程中遇到盐岩的蠕变试验,盐岩岩性本身属性决定着其较低的孔隙度和渗透率,国内外尚未见关于这两者对蠕变性质影响的报道。所以,在人造岩芯的制作方法上不考虑其孔隙度和渗透率对蠕变特性的影响。设计了如表 1 所示的实验条件,并对 11 组人造盐岩岩芯进行了单轴抗压强度、密度、声波速度的测定。

表 1 人造盐岩岩芯制备条件

Table 1 Preparation conditions of artificial salt rock core

岩芯编号	制备温度/℃	制备压力/kN
A-1	300	50
A-2	100	50
A-3	500	50
A-4	100	30
A-5	500	50
A-6	100	40
A-7	300	50
A-8	200	50
A-9	200	40
A-10	300	40
A-11	300	40

1.2 盐岩岩芯制备流程

(1)模具制备。为了模拟喜马拉雅山脉的沉积压实环境,压制岩芯需要较高的压力和温度,以及潮湿的环境。由于模具内表面和岩芯结合紧密,因此,为了方便岩芯脱模,研制可拆卸模具,如图 1 所示。本装置由套筒和内部模具组成,套筒为两瓣式,通过螺纹连接。内部模具内径为 25 mm,为了便于拆卸,设计为三瓣式。

(2)装模。将按照一定比例配好的盐岩碎屑和其他矿物粉末混合均匀并装入模具,通入饱和盐水,并不断用冲模压实。重复以上步骤直到填满模具,并在模具上下放置两个压头,且留有一定空隙可上下活动,保证压制过程中内部受力均匀。

(3)压制。将装配好的模具安装到三轴压缩机上,外部装配如图 2 所示的加热装置,装配完成后如图 3 所示。加热模具并缓慢加压至目标载荷并稳压一段时间。

(4)拆模。压制结束后,使用扳手卸下螺丝拆除外部套筒,待内部模具、岩芯自然冷却后,轻轻敲动三瓣式模具,即可拆卸下来。

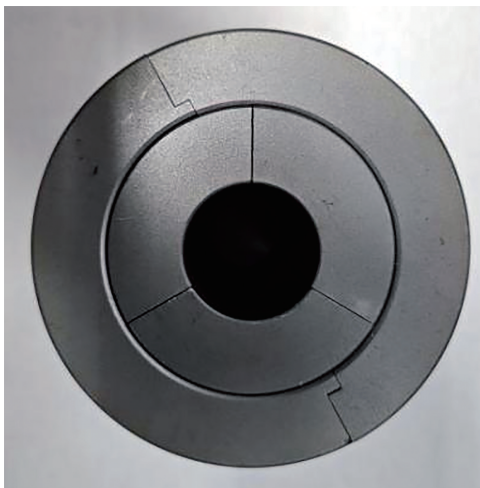


图1 模具
Fig.1 Mould

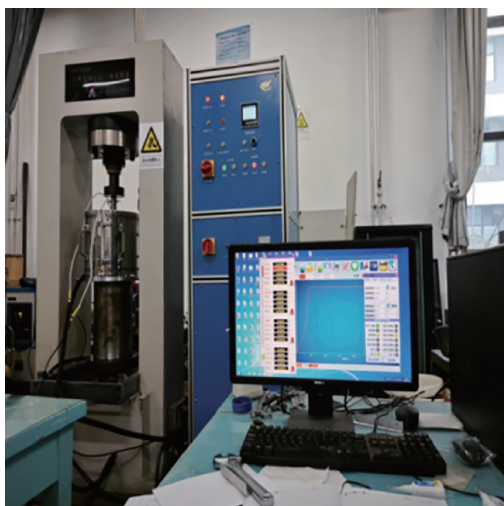


图2 三轴压缩机
Fig.2 Triaxial testing machine

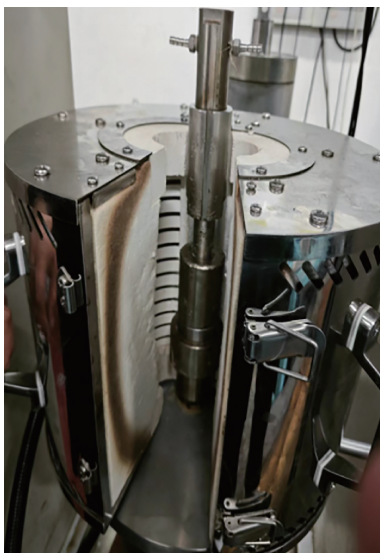


图3 加热装置
Fig.3 Heating system

1.3 盐岩岩芯力学性能试验

将压制出的 11 组人造盐岩岩芯与天然喜马拉雅盐岩岩芯(图 4)进行力学性能测试,从而优化出最佳的制备条件。

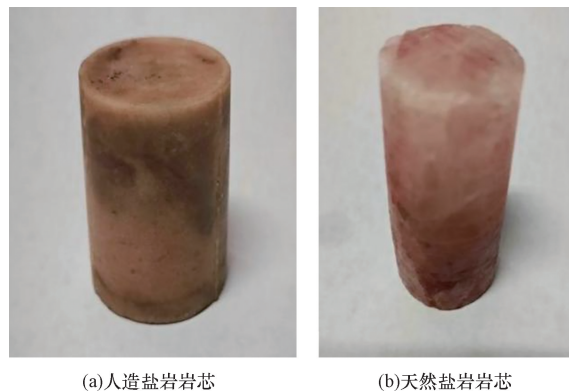


图4 人造岩芯和天然岩芯对比图
Fig.4 Comparison of artificial and natural cores

1.3.1 声波速度测试

岩石的声波速度反映了岩石的密度、压实程度、孔隙度、胶结情况等。密度较高的岩石通常具有较高的声速^[8-11],岩石的弹性模量描述了岩石对应力响应能力,它反映了岩石的刚度和变形性质。弹性模量越大,岩石越刚硬,声波传播速度也会相应增加,此外,裂缝的存在也会使声波速度降低。因此,保证人造岩芯与天然岩芯的声波速度相近,才能保证天然岩芯与人造岩芯具有相似力学特性,本实验通过 HKN-B 型智能超声纵横波自动测试仪(图 5)来测定人造岩芯和天然岩芯的纵横波速度。

在岩芯两端分别布置发射探头和接收探头,如图 6 所示。由于岩芯上下两个端面是粗糙的,为了降低空气对测试结果的影响,在岩芯上下端面涂抹



图5 HKN-B 型智能超声纵横波自动测试仪
Fig.5 HKN-B intelligent ultrasonic crosswave automatic tester

凡士林。

岩芯的纵、横波速度测试公式为

$$v_p = \frac{L}{t_0 - t_1} \tag{1}$$

式(1)中: v_p 为声波在岩芯中的速度, m/s ; L 为发射探头和接收探头之间的距离, m ; t_0 为发射探头发送声波信号的时间, s ; t_1 为接收探头接收声波信号的时间, s 。

测得各岩芯的声波速度如图 7 所示。

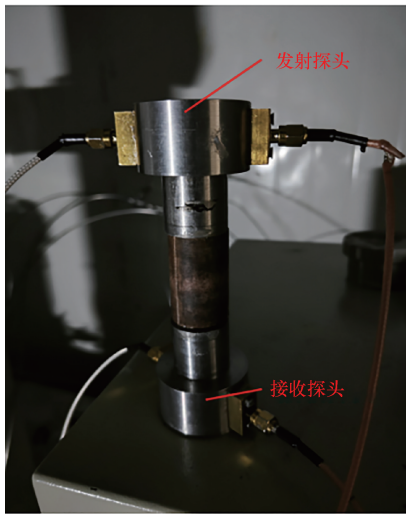


图 6 探头布置方式
Fig. 6 Probe placement

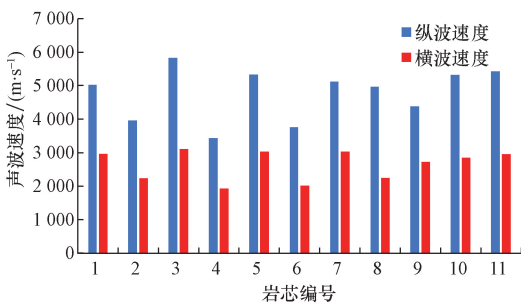


图 7 盐岩岩芯声波速度测试结果

Fig. 7 Acoustic velocity measurement result of salt rock core

1.3.2 单轴抗压强度测试

岩石单轴抗压强度是试件在无围压条件下受轴向力作用破坏时单位面积上所承受的荷载^[9-12]。本试验采用直接压坏试件的方法来确定岩石单轴抗压强度。如图 8 为单轴压缩实验装置示意图,压头与岩芯的上下端面相接触,本实验使用计算机控制压头的位移,缓慢压缩岩芯试样直至破坏,记录岩样破坏时的应力。

单轴抗压强度计算公式^[13-14]为

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \tag{2}$$

式(2)中: σ_c 为岩芯的单轴抗压强度, MPa ; P 为加载

过程中的破坏载荷, N ; A 为垂直于加载方向的横截面积, mm^2 。

测得各岩芯的单轴抗压强度如图 9 所示。

据图 10 所示,人造盐岩岩芯的单轴抗压强度随着制备温度和压力的增加而增加。以天然喜马拉雅盐岩岩芯作为对照组,三组天然盐岩岩芯的单轴抗压强度分别为 21.61、26.48、27.17 MPa ,平均单轴抗压强度为 25.09 MPa 。其中 9 号人造盐岩岩芯的单轴抗压强度为 25.16 MPa ,因此可判断控制制

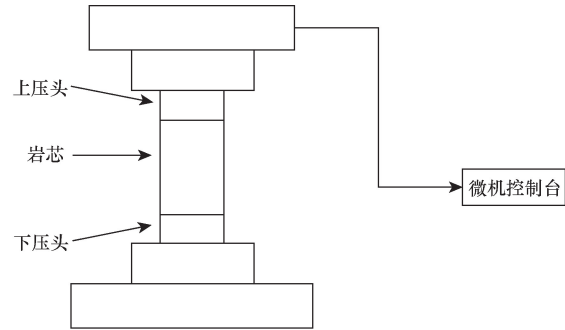


图 8 单轴压缩实验装置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of uniaxial compression experimental device

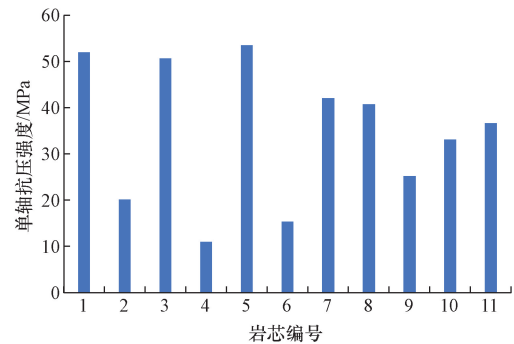


图 9 人造盐岩岩芯单轴抗压强度测试结果

Fig. 9 Uniaxial compressive strength test result of artificial rock core

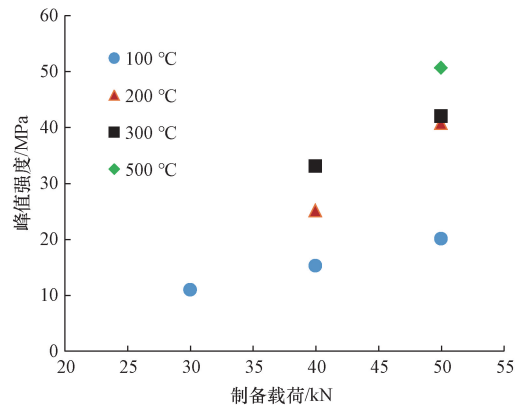


图 10 载荷、温度对单轴抗压强度影响

Fig. 10 Effect of load and temperature on uniaxial compressive strength

备温度 200 ℃、压制载荷 40 kN 时压制出的盐岩岩芯具有与天然岩芯相近的单轴抗压强度。

1.3.3 密度测试

岩芯为圆柱体,其密度计算公式^[13,15]为

$$\rho = \frac{4M}{\pi d^2 H} \quad (3)$$

式(3)中: M 为岩芯的质量,g; d 为横截面的直径,cm; H 为岩芯高度,cm。

1.4 盐岩岩芯制备条件优选

根据上面提到的岩石物理力学性质测试方法,可得到 11 组人造盐岩岩芯的物理力学参数,并与天然喜马拉雅盐岩岩芯进行比较,从而优选出最佳的人造盐岩岩芯的制备条件。表 2 所示为 11 组人造盐岩岩芯的制备条件、力学性质。表 3 所示为 3 组作为对照组的天然盐岩岩芯的力学性质。

表 2 人造盐岩岩芯力学性质

Table 2 Mechanical properties of artificial salt rock

岩芯编号	制备温度/℃	制备压力/kN	纵波速度/(m·s ⁻¹)	横波速度/(m·s ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)	单轴抗压强度/MPa
A-1	300	50	5 021.65	2 965.25	2.093	51.93
A-2	100	50	3 952.25	2 236.25	2.026	20.14
A-3	500	50	5 826.77	3 109.24	2.136	50.67
A-4	100	30	3 425.36	1 935.25	2.034	10.99
A-5	500	50	5 325.25	3 025.78	2.141	53.50
A-6	100	40	3 750.00	2 016.81	2.046	15.33
A-7	300	50	5 125.36	3 025.36	2.141	42.05
A-8	200	50	4 961.24	2 237.76	2.161	40.76
A-9	200	40	4 374.52	2 713.18	2.112	25.16
A-10	300	40	5 312.50	2 845.19	2.113	33.10
A-11	300	40	5 425.30	2 953.25	2.111	36.69

表 3 天然盐岩岩芯力学性质

Table 3 Mechanical properties of natural salt rock

岩芯编号	纵波速度/(m·s ⁻¹)	横波速度/(m·s ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)	单轴抗压强度/MPa
N-1	4 353.74	2 480.62	2.194	27.17
N-2	4 321.78	2 356.25	2.054	21.61
N-3	4 525.54	2 556.26	2.121	26.48
平均值	4 400.35	2 464.38	2.123	25.09

盐岩是一种纯化学成因的岩石,由蒸发海水或湖泊作用沉淀而成,温度是影响盐岩颗粒之间水分蒸发速度的主要因素,而压力则影响岩芯中的压实程度,将各人造岩芯与天然岩芯力学性质的差异绘制成柱状图如图 11 所示。

编号为 A-9 的人造盐岩岩芯在声波速度、密度以及单轴抗压强度上与天然盐岩具有相似的性质,因此当制备载荷为 40 kN,温度为 200 ℃时,使用喜马拉雅盐岩颗粒压制出的岩芯与天然喜马拉雅盐岩具有相似的物理性质。

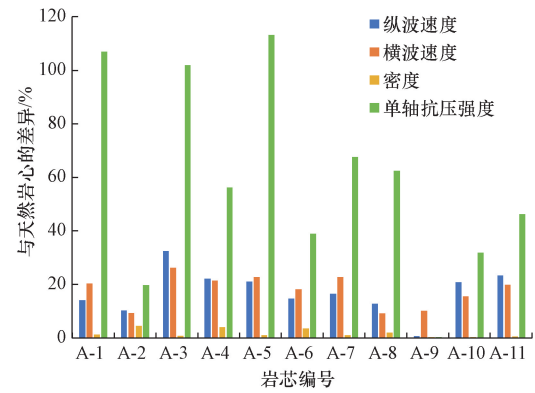


图 11 天然岩芯与人工岩芯力学性质差异

Fig. 11 Difference of mechanical properties between natural core and artificial core

1.5 人造盐岩岩芯蠕变本构模型

制备人造盐岩的目的是为了替代天然盐岩进行研究,因此需要对人工压制的盐岩式样和天然盐岩式样进行蠕变实验,进而分析蠕变规律。岩石蠕变是指在一恒定蠕变差应力作用下,岩芯的应变随着时间不断发展的过程。基于室内三轴蠕变实验,构建适用于盐岩岩芯的黏弹性本构模型来描述盐岩膏层的蠕变特征。试样的蠕变过程一般会经历 3 个阶段^[16]:初始蠕变阶段、稳态蠕变阶段、加速蠕变阶段(图 12)。

其总应变等于弹性应变与蠕变应变之和^[17]。由于深部地层岩石所受围压较大,盐岩的蠕变一般不会进入加速蠕变阶段从而导致发生损伤破坏,因此考虑减速蠕变阶段和稳态蠕变阶段的特征对于工程问题更有意义。总应变表达式为

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e + \varepsilon_c \quad (4)$$

式(4)中: $\varepsilon(t)$ 为总应变; ε_e 为弹性应变; ε_c 为蠕变应变,是温度 T 、时间 t 以及应力 σ 的函数,表达式为

$$\varepsilon_c = f(\sigma, t, T) = f_1(\sigma)f_2(t)f_3(T) \quad (5)$$

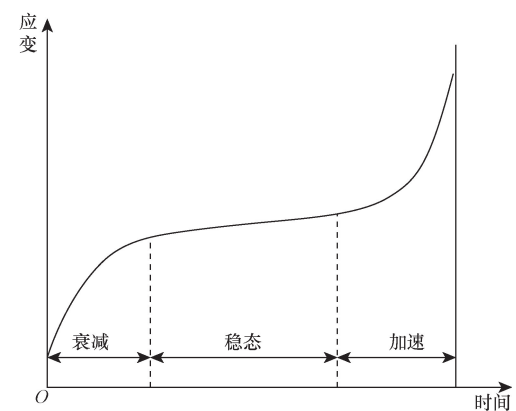


图 12 典型蠕变曲线

Fig. 12 Typical creep curve

蠕变实验通过伺服控制岩石三轴力学实验系统来进行盐岩岩芯的规律测试,该仪器由中国石油大学(华东)岩石力学实验室研制。该系统包括轴压控制单元、围压控制单元、水压控制单元等^[18],采用TAW-100微机控制三轴实验机,在轴向加载上采用滚珠丝杠传动,实现了低温伺服控制轴向加载。实验系统如图13所示,性能参数如表4所示。

使用喜马拉雅盐岩颗粒,在40 kN、200 ℃的条件下压制出盐岩岩芯,并与天然盐岩岩芯进行对比,由于蠕变差应力和温度的变化均会导致蠕变速率的变化,因此控制人造盐岩试样与天然盐岩试样在相同的蠕变差应力与温度下进行蠕变实验。控制蠕变差应力为10 MPa(围压5 MPa,轴压15 MPa)、温度25 ℃,人造盐岩岩芯和天然盐岩岩芯的蠕变曲线如图14所示。

人造盐岩岩芯与天然岩芯在相同的蠕变差应力和温度时的蠕变曲线基本重合,在瞬时变形阶段,

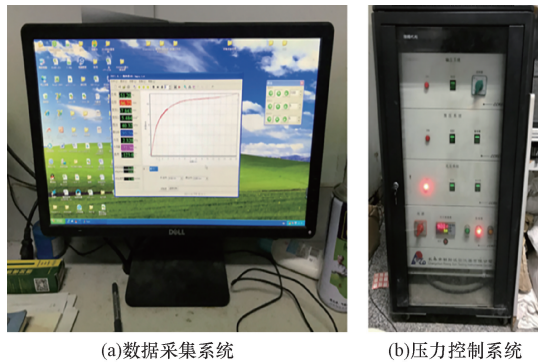


图13 蠕变实验系统
Fig. 13 Creep test system

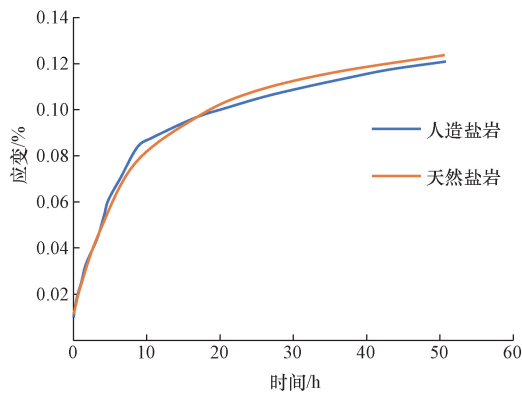


图14 蠕变差应力为10 MPa时的蠕变曲线
Fig. 14 Creep curve when the deviating stress is 10 MPa

均会产生近似0.01%的瞬时应变,表明人造盐岩和天然盐岩具有相同的弹性模量^[19-21]。随后进入初始蠕变阶段。在应力加载20 h后,试样进入稳态蠕变阶段。人造盐岩岩芯的稳态蠕变率为 $7.36 \times 10^{-4}/h$,天然盐岩岩芯的稳态蠕变率为 $8.16 \times 10^{-4}/h$,相差9.8%,蠕变趋势基本相同,因此可认为两者具有相同的蠕变特性,使用人造盐岩岩芯代替天然盐岩岩芯进行蠕变特性的研究是可行的。

调整人造盐岩岩芯的蠕变差应力为5 MPa,得到蠕变曲线如图15所示。

将线性元件和非线性元件进行组合,基于广义Kelvin模型来描述盐岩的线性蠕变阶段、Heard模型来描述盐岩的非线性蠕变阶段,并将Kelvin模型与Heard模型进行串联,构建新的黏弹性模型来表征盐岩的蠕变特征,新的蠕变本构模型如图16所示。

胡克体和非定常Kelvin体所组成的广义Kelvin体的黏弹性方程为

$$\sigma = E_1 \varepsilon + \eta_1(t) \dot{\varepsilon} \tag{6}$$

分离变量后对应变求取定积分,可得广义Kelvin体的本构模型^[21-23],表达式为

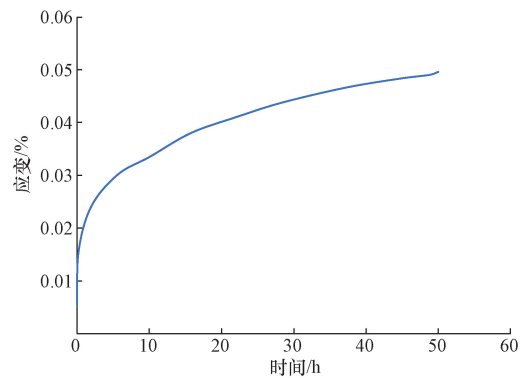
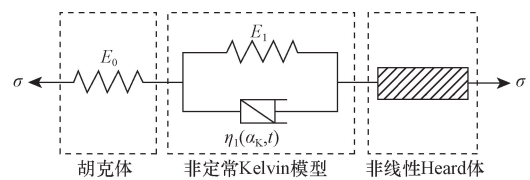


图15 蠕变差应力为5 MPa时的蠕变曲线
Fig. 15 Creep curve when the deviating stress is 5 MPa



E_0 为胡克体弹性模量, E_1 为Kelvin体弹性模量, η_1 为Kelvin体黏性系数, α_k 为随时间 t 变化的系数

图16 蠕变本构模型
Fig. 16 Creep model

表4 力学实验系统性能参数

Table 4 Mechanical experimental system performance parameters

类别	轴向力		围压		孔压		传感器变形/mm		分辨率
	峰值	精度	峰值	精度	峰值	精度	轴向变形	径向变形	
参数	100 kN	±1%	50 MPa	±2%	30 MPa	±2%	<4 mm	<2 mm	10^{-5}

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1} \left(1 - \exp \left\{ -\frac{E_1}{\alpha_k \eta_1} [\exp(\alpha_k t) - 1] \right\} \right) \quad (7)$$

当温度低于 300 °C 时,氯化钠晶体的蠕变形式是晶格间的位错滑移^[24-26]。一般认为,使用 Heard 模型来描述低温下(低于 300 °C)的盐岩稳态蠕变阶段的行为具有较高的契合度,Heard 模型表述稳态蠕变速率的计算公式为

$$\dot{\varepsilon} = A_H \exp \left(\frac{-Q}{RT} \right) \sinh(B_H \sigma) \quad (8)$$

式(8)中: R 为摩尔气体常数; T 为热力学温度,K; Q 为盐岩的蠕变激活能^[27-29]; A_H 、 B_H 为盐岩的 Heard 蠕变参数。根据蠕变差应力为 5、10 MPa 时的蠕变曲线进行非线性拟合,得到喜马拉雅盐岩的蠕变参数及蠕变激活能,如表 5、表 6 所示。

表 5 Heard 体参数

Table 5 Heard model parameters

A_H	B_H	$Q/(kJ \cdot mol^{-1})$
0.059	0.14	43.13

表 6 Kelvin 体参数

Table 6 Kelvin model parameters

E_1/MPa	$\eta_1/(MPa \cdot h)$	α_k
80	2×10^6	0.03

将表 5、表 6 中参数代入到式(7)、式(8)中,即可得到喜马拉雅盐岩稳态蠕变阶段的 Heard 蠕变模型本构方程。将非线性 Heard 体与广义 Kelvin 体进行串联,即可得到表征盐岩初始蠕变阶段和稳态蠕变阶段的蠕变本构方程,即

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1} \left(1 - \exp \left\{ -\frac{E_1}{\alpha_k \eta_1} [\exp(\alpha_k t) - 1] \right\} \right) + A_H \exp \left(\frac{-Q}{RT} \right) \sinh(B_H \sigma) \quad (9)$$

1.6 人造盐岩岩芯蠕变本构模型验证

基于 Fortran 语言,使用有限元分析软件 Abaqus 将图 16 中的喜马拉雅盐岩的蠕变本构模型数据编译到 creep.for 文件中,基于 UMAT 子程序进行二次开发。为了验证所开发子程序的准确性,建立了如图 17 所示 $\phi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的圆柱体模型,并对圆柱体施加 15 MPa 的蠕变差应力,岩芯模型如图 17 所示。

由于盐岩是典型的黏弹性材料,且有限元模型中的岩芯形状是规则的圆柱体,无应力集中现象,因此每个单元尽量保持相同形状和尺寸,以确保精度和计算效率,因此在模型存在对称性的情况下,不需要对网格进行局部加密。

图 18 即为 Abaqus 软件数值模拟中的盐岩岩芯位移云图。提取云图上的位移最大单元的应变曲线,即得到拟合蠕变曲线。对盐岩岩芯施加 15 MPa 的蠕变差应力,蠕变实验进行 50 h,将盐岩岩芯的拟合蠕变曲线与 Abaqus 软件数值模拟中试样的试验蠕变曲线进行对比,结果如图 19 所示。

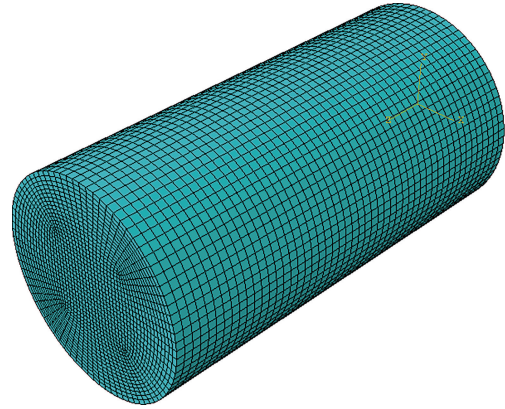


图 17 盐岩岩芯有限元数值分析试样

Fig. 17 Sample for numerical analysis of salt rock core

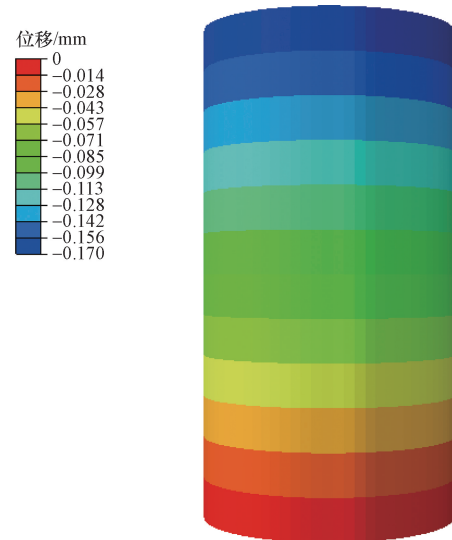


图 18 50 h 后岩芯位移云图

Fig. 18 Cloud map of core displacement after 50 hours

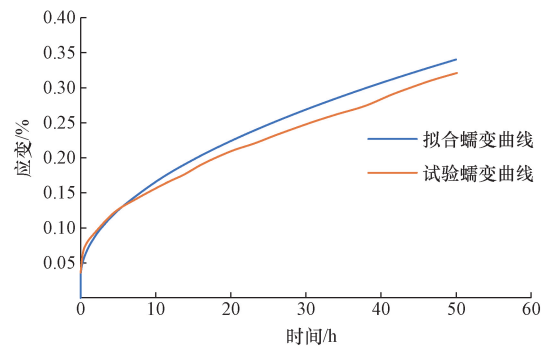


图 19 蠕变曲线对比

Fig. 19 Comparison of creep curves

由图 19 可知,使用 UMAT 子程序编译的黏弹性本构模型与盐岩岩芯室内蠕变实验结果基本上相吻合,区别在于有限元软件模拟出的蠕变曲线较室内实验的蠕变曲线更平滑,这是由于盐岩岩芯内部含有其他杂质,导致盐岩的不均匀性增加而导致的。证明使用基于 Kelvin 和 Heard 模型来表征喜马拉雅盐岩的蠕变特征是准确的^[30-32]。

2 硬石膏对盐岩蠕变特性的影响

盐岩层中含有多种矿物成分^[33],并非单一的氯化钠。对于复合盐岩,氯化钠和硬石膏为其中主要的矿物成分。试验表明,硬石膏在一定的温度和蠕变差应力作用下,同样具有一定的蠕变特性^[34-36]。因此有必要探究不同硬石膏含量对盐岩蠕变特性的影响。

2.1 试验方案

以 40 kN、200 °C 的温压条件制备含有硬石膏的盐岩岩芯,各盐岩岩芯矿物组分含量如表 7 所示。

蠕变实验在伺服控制岩石三轴力学实验系统上进行,分别对 3 组岩芯施加 5 MPa 围压,10 MPa 轴压。为保证所有岩芯的蠕变实验曲线都能达到稳态蠕变阶段,每块岩芯设计的蠕变实验时间至少达到 48 h^[37-43]。

将硬石膏含量为 10%、30%、50% 的盐岩岩芯蠕变曲线绘制到图 20 中。

计算在蠕变差应力 5 MPa、25 °C 下含有硬石膏的盐岩的稳态蠕变速率,如图 21 所示。

表 7 复合盐岩硬石膏含量

Table 7 Content of anhydrite in composite salt rock

岩芯编号	硬石膏含量/%
B1	10
B3	30
B5	50

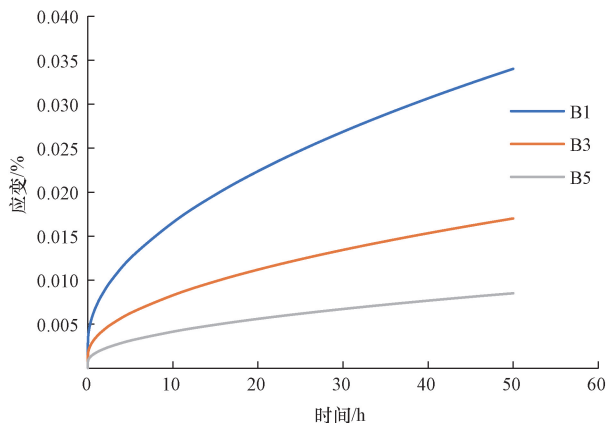


图 20 蠕变差应力为 5 MPa 时的蠕变曲线

Fig. 20 Creep curve when the deviating stress is 5 MPa

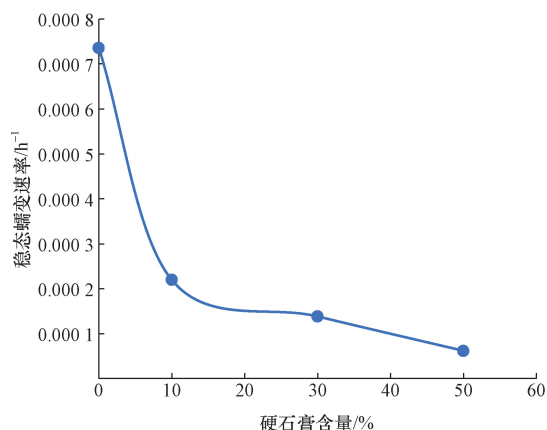


图 21 5 MPa、25 °C 时含硬石膏的复合盐岩稳态蠕变速率

Fig. 21 Steady creep rate of composite salt rock containing anhydrite at 5 MPa and 25 °C

2.2 试验结果分析

对于不同硬石膏含量的复合盐岩,其蠕变曲线差异很大。

(1)硬石膏含量越高,瞬时变形阶段的应变越小,这是因为硬石膏的弹性模量小于氯化钠的弹性模量,因此复合盐岩的初始变形阶段的应变要小于纯盐初始变形阶段的应变。

(2)硬石膏含量越高的复合盐岩,其稳态蠕变速率越低,对于氯化钠和硬石膏合成的复合盐岩,其蠕变性能主要由氯化钠所决定,硬石膏对复合盐岩的蠕变具有一定的抑制作用^[39-43]。

3 结论

(1)研制了一种人造盐岩岩芯的制备方法,对于取芯困难的盐层,可根据盐层矿物组分,施加一定的温度、压力,人工压制盐岩岩芯来进行蠕变特性研究;

(2)使用喜马拉雅盐岩颗粒,在温度为 200 °C、压力为 40 kN(压强 80 MPa)时,压制 2 h 后能得到在单轴抗压强度、声波速度、密度等物理特性方面与天然喜马拉雅盐岩相似的人造岩芯;人造盐岩岩芯与天然盐岩岩芯的蠕变特性基本相同,在相同的蠕变差应力与温度下,两者的蠕变曲线趋势基本相同,使用人造盐岩岩芯代替天然盐岩岩芯进行蠕变特性研究是可行的。

(3)在室内盐岩蠕变实验的基础上,基于广义 Kelvin 模型与 Heard 体模型,构建了盐岩岩芯的蠕变本构模型,并基于 Fortran 语言编译了此模型的 UMAT 子程序,并通过不同蠕变差应力的蠕变实验验证了此本构模型的准确性。

(4)由硬石膏和氯化钠组成的复合盐岩,在相同的蠕变差应力条件下,稳态蠕变速率随着硬石膏

含量的增加而降低,复合盐岩的蠕变特性主要由氯化钠决定,硬石膏的存在会抑制其蠕变速率。

参 考 文 献

- [1] Yan C, Li Y, Yan X, et al. Wellbore shrinkage during drilling in methane hydrate reservoirs [J]. *Energy Science & Engineering*, 2019, 7(3): 930-942.
- [2] 杨春和, 王贵宾, 施锡林, 等. 中国大规模盐穴储氢需求与挑战 [J]. *岩土力学*, 2024, 45(1): 1-19.
Yang Chunhe, Wang Guibin, Shi Xilin, et al. Demand and challenges of hydrogen storage in salt caverns in China [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(1): 1-19.
- [3] 赵珊, 刘华, 杨宪章, 等. 温-压耦合作用下深层盐岩盖层封闭能力演化特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(5): 1321-1332.
Zhao Shan, Liu Hua, Yang Xianzhang, et al. Evolution characteristics of sealing capacity of deep salt rock cap under thermal-pressure coupling [J]. *Petroleum and Natural Gas Geology*, 2023, 44(5): 1321-1332.
- [4] 俞天喜, 王雷, 陈蓓蓓, 等. 基于盐溶和蠕变作用的含盐储层裂缝导流能力变化规律研究与应用 [J]. *特种油气藏*, 2023, 30(6): 157-164.
Yu Tianxi, Wang Lei, Chen Beibei, et al. Research and application of variation patterns of fracture conductivity in salt-bearing reservoirs based on salt dissolution and creep effects [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2023, 30(6): 157-164.
- [5] 李浩然, 徐壮, 魏群. 盐岩高温三轴蠕变损伤破裂机制试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(12): 2945-2956.
Li Haoran, Xu Zhuang, Wei Qun. Experimental study on creep damage and fracture mechanism of salt rock under high-temperature triaxial conditions [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(12): 2945-2956.
- [6] 陈鹤, 陈结, 吴斐, 等. 层状盐岩能源储库泥岩夹层蠕变特性研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2023, 19(4): 1196-1205.
Chen He, Chen Jie, Wu Fei, et al. Study on creep characteristics of mudstone interlayers in layered salt rock energy storage reservoirs [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2023, 19(4): 1196-1205.
- [7] 韩伟民, 闫怡飞. 基于广义 Kelvin 模型的非正常盐岩蠕变模型 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(5): 1337-1349.
Han Weimin, Yan Yifei. Unsteady creep model of salt rock based on generalized kelvin model [J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2020, 51(5): 1337-1349.
- [8] 杨俊涛, 宋彦琦, 马宏发, 等. 考虑硬化和损伤效应的盐岩蠕变本构模型研究 [J]. *岩土力学*, 2023, 44(10): 2953-2966.
Yang Juntao, Song Yanqi, Ma Hongfa, et al. Study on creep constitutive model of salt rock considering hardening and damage effects [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(10): 2953-2966.
- [9] Lei L, Seol Y. Pore-scale investigation of methane hydrate-bearing sediments under triaxial condition [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(5): e2019GL086448.
- [10] Li Y, Cheng Y, Yan C, et al. Influence of drilling fluid temperature on borehole shrinkage during drilling operation in cold regions [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 190: 107050.
- [11] Singh D N. Formation & dissociation of methane gas hydrates in sediments; a critical review [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 65: 168-184.
- [12] Zhang Q, Song Z, Wang J, et al. Creep properties and constitutive model of salt rock [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 1-29.
- [13] Taheri S R, Pak A. Casing failure in salt rock; numerical investigation of its causes [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53: 3903-3918.
- [14] Liang W G, Xu S G, Zhao Y S. Experimental study of temperature effects on physical and mechanical characteristics of salt rock [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2006, 39: 469-482.
- [15] Imseeh W H, Ma R, Truster T, et al. 3D dislocation density-based crystal plasticity model for rock salt under different temperatures and strain rates [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2022, 148(3): 2085.
- [16] Yin H W, Ma H L, Chen X S, et al. Synthetic rock analogue for permeability studies of rock salt with mudstone [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(9): 946.
- [17] Yuan Q, Sun C, Yang X, et al. Gas production from methane-hydrate-bearing sands by ethylene glycol injection using a three-dimensional reactor [J]. *Energy & Fuels*, 2011, 25(7): 3108-3115.
- [18] Konno Y, Masuda Y, Akamine K, et al. Sustainable gas production from methane hydrate reservoirs by the cyclic depressurization method [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 108: 439-445.
- [19] 王天琦, 张昌锁. 考虑温度效应的板岩隧道围岩蠕变变形规律研究 [J]. *河北科技大学学报*, 2022, 43(1): 90-98.
Wang Tianqi, Zhang Changsuo. Study on creep deformation patterns of slate tunnel surrounding rock considering temperature effects [J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2022, 43(1): 90-98.
- [20] Lu J, Xiong Y, Li D, et al. Experimental investigation of characteristics of sand production in wellbore during hydrate exploitation by the depressurization method [J]. *Energies*, 2018, 11(7): 1673.
- [21] Ranjith P G, Perera M S A, Perera W, et al. Effective parameters for sand production in unconsolidated formations: an experimental study [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, 105: 34-42.
- [22] Li Y, Wu N, Ning F, et al. Hydrate-induced clogging of sand-control screen and its implication on hydrate production operation [J]. *Energy*, 2020, 206: 118030.
- [23] 刘凯, 余宏波, 王炎, 等. 热-力耦合作用下花岗岩蠕变损伤模型 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(22): 9526-9532.
Liu Kai, Yu Hongbo, Wang Yan, et al. Creep damage model of granite under thermal-mechanical coupling [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(22): 9526-9532.
- [24] Li Y, Wu P, Sun X, et al. Creep behaviors of methane hydrate-bearing frozen sediments [J]. *Energies*, 2019, 12(2): 251.
- [25] Yan C, Li Y, Yan X, et al. Wellbore shrinkage during drilling in methane hydrate reservoirs [J]. *Energy Science & Engineering*, 2019, 7(3): 930-942.
- [26] Wang J, Zhang Q, Song Z, et al. Microstructural variations and damage evolution of salt rock under cyclic loading [J]. *Interna-*

- tional Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 152: 105078.
- [27] 韩伟民. 复杂气井盐岩蠕变地层厚壁套管变形规律及损坏机理研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
Han Weimin. Study on deformation patterns and damage mechanism of thick-walled casings in complex gas wells with salt rock creep formations [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [28] Song Y, Song R, Liu J. Hydrogen tightness evaluation in bedded salt rock cavern: a case study of Jintan, China[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(78): 30489-30506.
- [29] Wang J, Wang T, Song Z, et al. Improved maxwell model describing the whole creep process of salt rock and its programming[J]. International Journal of Applied Mechanics, 2021, 13(10): 2150113.
- [30] Yu S, Oguchi C T. Complex relationships between salt type and rock properties in a durability experiment of multiple salt-rock treatments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009, 34(15): 2096-2110.
- [31] Song R. Experimental investigation of the fatigue properties of salt rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 64: 68-72.
- [32] Dusseault M B. Saltrock behavior as an analogue to the behavior of rock at great depth[C]//ISRM International Symposium. Beijing: ISRM, 1989: ISRM-IS-1989-002.
- [33] 范金洋, 唐璐宣, 陈结, 等. 基于硬化参量的盐岩蠕变疲劳本构模型[J]. 岩土力学, 2023, 44(5): 1271-1282.
Fan Jinyang, Tang Luxuan, Chen Jie, et al. Creep-fatigue constitutive model of salt rock based on hardening parameters [J]. Rock Soil Mechanics, 2023, 44(5): 1271-1282.
- [34] Liang W, Yang C, Zhao Y, et al. Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(3): 400-411.
- [35] Hu M, Steefel C I, Rutqvist J, et al. Microscale THMC modeling of pressure solution in salt rock: impacts of geometry and temperature[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(10): 7071-7089.
- [36] Zhang Q, Song Z, Wang J, et al. Creep properties and constitutive model of salt rock[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 1-29.
- [37] 马欣年. 认知负荷模型下的新手译员汉英交传笔记问题及其应对策略分析[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018.
Ma Xinnian. Analysis of note-taking problems and coping strategies of novice interpreters in Chinese-English consecutive interpretation under the cognitive load model [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2018.
- [38] 王军保, 刘新荣, 张倩倩, 等. 芒硝蠕变特性及本构模型研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(5): 78-85.
Wang Junbao, Liu Xinrong, Zhang Qianqian, et al. Study on the creep characteristics and constitutive model of glauberite [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(5): 78-85.
- [39] 罗攀登, 张士诚, 李永寿, 等. 碳酸盐岩储层闭合酸化模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(7): 2690-2698.
Luo Pandeng, Zhang Shicheng, Li Yongshou, et al. Simulation study of carbonate reservoir closure acidizing [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(7): 2690-2698.
- [40] 宗师, 刘世奇, 徐辉, 等. 苏北盆地层状盐穴储气库二氧化碳封存数值模拟研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(3): 27-36.
Zong Shi, Liu Shiqi, Xu Hui, et al. Numerical simulation study on CO₂ sequestration in layered salt cavern gas storage in the Subei basin [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(3): 27-36.
- [41] 赵幸悦子, 肖攀, 宋文龙, 等. 赣南红层地区地下水水化学特征及成因分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(33): 14112-14122.
Zhao Xingyuezi, Xiao Pan, Song Wenlong, et al. Hydrochemical characteristics and genesis analysis of groundwater in the red beds area of southern Jiangxi [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(33): 14112-14122.
- [42] 康建云, 缪祥禧, 何传亮, 等. 流动单元在潮坪相碳酸盐岩储层中的应用: 以川西气田雷四~3亚段为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(28): 12020-12030.
Kang Jianyun, Miao Xiangxi, He Chuanliang, et al. Application of flow units in tidal flat carbonate reservoirs: a case study of the Lei Si-3 submember in the western Sichuan gas field [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(28): 12020-12030.
- [43] 刘凯, 余宏波, 王焱, 等. 热-力耦合作用下花岗岩蠕变损伤模型[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(22): 9526-9532.
Liu Kai, Yu Hongbo, Wang Yan, et al. Creep damage model of granite under thermal-mechanical coupling [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(22): 9526-9532.