

岩石材料力学相似性定量评价方法研究

任旭虎¹, 张卓², 单亦先¹

(1. 中国石油大学信息与控制工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中海油山东化学工程有限责任公司, 山东济南 250101)

摘要:材料的相似度是物理模拟实验的关键因素,分析两种量化评价方法。提出一种基于应力-应变曲线的岩石材料力学相似性定量评价法,由应力-应变曲线评价、基于应力-应变曲线的 π 值评价和综合评价3部分组成。通过综合评价指标描述相似程度。结果表明:评价内容应包含材料参数两个方面的特性,即相似材料参数理论值与实际值的近似度和相似材料参数满足无量纲数的情况。验证了所提出的方法在构造变形与烃类充注一体化物理模拟中的准确性和实用性。

关键词:相似性评价;相似材料;岩石力学;应力-应变曲线

中图分类号:TE 12 **文献标志码:**A

引用格式:任旭虎,张卓,单亦先.岩石材料力学相似性定量评价方法研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(5):137-143.

REN Xuhu, ZHANG Zhuo, SHAN Yixian. Research of quantitative assessment methods on mechanical similarity of rock similar material[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(5):137-143.

Research of quantitative assessment methods on mechanical similarity of rock similar material

REN Xuhu¹, ZHANG Zhuo², SHAN Yixian¹

(1. College of Information and Control Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. CNOOC Shandong Chemical Engineering Company Limited, Jinan 250101, China)

Abstract: Similar material is one of the key factors in physical model experiment. Two quantitative assessment methods were analyzed. A quantitative assessment method for the mechanical similarity of rock similar material was proposed based on stress-strain curve, which is composed of stress-strain curve assessment, stress-strain curve based π assessment and comprehensive assessment. The comprehensive assessment value indicates the level of similarity. The analysis results show that the assessment should contain two aspects. One is the evaluation of discrepancy between theoretical parameters and practical parameters of similar materials, the other is the measurement of the difference in non-dimensional number. The application of this method in integrated physical simulation of tectonic deformation and hydrocarbon charging shows its practicability.

Keywords: similarity assessment; similar material; rock mechanics; stress-strain curve

地质力学物理模拟实验是根据相似性理论在实验室环境中进行的一种尺缩实验,在地质构造变形、边坡稳定、地下结构稳定、水坝稳定等领域均有重要应用,是论证设计方案或提供设计参数的必要手段^[1-2]。相似材料是按照相似比尺人工制备的实验材料,根据不同的实验目的需要满足力学相似、分形

相似等不同方面的相似要求,其与原型材料的相似度是决定物理模拟实验成功与否的关键^[3]。Indraratna^[4]研制了一种复合相似材料模拟软沉积岩。在金属成型领域中, Pertence等^[5]研制了一种新的模型相似材料,并将其与多种传统材料一起进行应力-应变测试、分析。Burgert等^[6]通过定性观察模

收稿日期:2014-03-22

基金项目:“十二五”国家科技重大专项(2011ZX05006-003)

作者简介:任旭虎(1973-),男,副教授,博士,研究方向为油气田生产过程的智能监控技术、石油专用试验设备研制、石油装备检测技术与故障诊断。E-mail:rxh@upc.edu.cn.

拟岩爆过程中材料的表现,对其进行评价。Zadeh^[7]提出了模糊集和模糊评价的概念。程圣国等^[8-9]在研究千将坪滑坡相似材料过程中运用模糊综合评判法确定相似材料的最佳配比。Sobol^[10]与Mckay等^[11]提出了敏感性分析的方法。白玉湖等^[12]对水驱油局部相似模型的无量纲数 π 进行了敏感性分析。目前相似性评价方法有:①相似材料理论参数与实际参数对比分析;②原岩与相似材料应力-应变曲线分析;③原岩与相似材料损伤破坏过程对比分析;④理论与实际相似判据对比分析;⑤模糊综合评判法;⑥ π 值评价法。笔者提出一种岩石材料力学相似性定量综合评价方法。

1 典型定量相似性评价方法

1.1 模糊综合评价法

假设须考察材料的 N 个力学参数,共有 M 种配比方案,则这 M 种相似材料的 N 个力学参数可以表达为 $M \times N$ 矩阵 \mathbf{x} ,元素 x_{ij} 表示第 i 种相似材料的第 j 个力学参数。相似材料与原型材料的相似度可以通过隶属函数 z_i 来表达。

$$z_i = \sum_{j=1}^N w_j u_{ij}, i = 1, 2, \dots, M. \quad (1)$$

其中

$$u_{ij} = 1 - \left| \frac{x_j - C_j x_{ij}}{x_j} \right|.$$

式中, x_j 为原型材料的第 j 个力学参数; C_j 为第 j 个力学参数的相似比尺。

式(1)代表了相似材料理论与实际力学参数的差异。 $u_{ij} \in (-\infty, 1]$,其值越接近1则表示理论参数与实际参数差距越小;若等于1则两者完全相似。

w_j 为第 j 个力学参数的权重,向量形式为

$$\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_N). \quad (2)$$

须满足归一化条件

$$\sum_{j=1}^N w_j = 1, w_j \in [0, 1]. \quad (3)$$

由 w_j 与 u_{ij} 的意义及取值范围可知

$$z_i \in (-\infty, 1], i = 1, 2, \dots, M. \quad (4)$$

其值越接近1,表示相似材料与原型材料越相似;若等于1,则表示两者完全符合相似性要求。

具体应用中权值分配对最终相似性评价指标具有很大的影响^[9],程圣国等^[8]使用材料含水率作为权重对土质滑坡相似材料进行了定量评价。

1.2 π 值评价法

物理模拟实验过程中对无量纲数 π 的放松引

入了相似误差,由于不同无量纲数引入的误差不同,有必要对放松的无量纲数进行敏感性分析,以确定其影响程度^[13],因此定义了描述目标函数对无量纲数依赖程度的敏感因子 S_i ,假设有 N 个无量纲数

$$S_i = \frac{\partial [f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N) / f_p]}{\partial (\pi_i / \pi_{pi})}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

式(5)表示 π_i 改变时目标函数的变化程度,其绝对值越大表明 π_i 的影响程度越大。下标 p 表示原型, π_{pi} 为原型的无量纲数,目标函数 $f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N)$ 为物理模拟实验评价函数的无量纲形式, f_p 为原型的无量纲评价函数。例如在石油开采模拟实验中最关心采收率^[14],因此定义

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N) = \int_0^{T_D} \eta(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N, t_D) dt_D. \quad (6)$$

式中, η 为原油的采出程度; t_D 为无量纲开发时间; T_D 为无量纲的物理模拟实验时长。

白玉湖等^[12]为评价同一原型的不同相似模型,提出了影响系数 α ,即相似性评价指标:

$$\alpha = \sum_i S_i R_i, i = 1, 2, \dots, N. \quad (7)$$

其中

$$R_i = \left| \frac{\pi_i - \pi_{pi}}{\pi_{pi}} \right|. \quad (8)$$

被称为畸变系数,表征无量纲数的放松程度。

影响系数 α 是以敏感因子为权重的畸变系数加权求和。对一个相似模型而言,只须求出所有的畸变系数和相应的敏感因子,即可得到影响系数,从而可对模型相似度进行评价。

常见的6种相似性评价方法分为3类:(a)对参数值、变量值进行对比评价;(b)对参数之间的比例关系进行评价;(c)对实验现象进行观察评价。其中,①、②、⑤属于a类评价方法,它们通过对比相似过程与原过程的参数、变量进行评价,本质是比较相似参数、相似变量实际值与理论值间的差异,利用二者的近似度表达相似度。④、⑥属于b类评价方法,对相似判据、无量纲数,即各参数之间的比例关系进行考察。这是由于岩石所具有的某种力学特性主要表现在各参数间的比例关系上^[15]。另外,根据相似性定律要求,非独立量纲的相似比尺受到一定约束,不能任意选取,因此各相似参数之间须满足某种特定的比例关系,即相似判据或无量纲数。

综上所述,相似参数理论值与实际值的近似度和相似参数满足无量纲数的情况是相似性定量评价的两个重要方面。为了更好地评价岩石材料力学相

似性,提出了一种基于应力-应变曲线的相似性定量评价方法。

2 基于应力-应变曲线的定量评价法

岩石力学性质分为变形性质和强度性质,变形性质通过本构关系反映,强度性质通过强度准则反映。本文中的应力-应变曲线是指全应力-应变曲线,它包含以上两个方面,能够全面显示岩石在受压破坏过程中的应力、变形特性及破坏后的强度与力学性质变化规律^[16]。以应力-应变曲线为目标函数,提出一种岩石材料力学相似性的定量评价方法,由两部分组成:①应力-应变曲线评价法;②基于应力-应变曲线的 π 值评价法。其中,作为目标函数的应力-应变曲线可通过试验实测获取,也可以通过数值模拟软件仿真。

2.1 应力-应变曲线评价法

模糊综合评判法对相似材料与原岩的力学参数进行对比分析,并借助隶属函数表达两者的近似程度,其权值分配越符合材料变形规律的内在要求,则评价结果越准确。应力-应变曲线可以描述材料的宏观力学性质,因此考虑将材料的力学参数转化为应力-应变曲线,计算相似度并进行评价。相似材料经应力比尺变换后的应力-应变曲线与原岩的应力-应变曲线如图1所示。

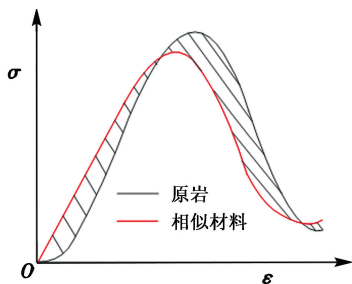


图1 原岩及经应力比尺变换后相似材料的应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of similar material after similar scale transformation and raw rock

则可定义相似评价指标 S_1 为

$$S_1 = \frac{\int |C_\sigma \sigma_{sm} - \sigma_{pm}| d\varepsilon}{\min\left(C_\sigma \int \sigma_{sm} d\varepsilon, \int \sigma_{pm} d\varepsilon\right)} \quad (9)$$

式中, σ_{sm} 为相似材料的应力; σ_{pm} 为原岩应力; C_σ 为应力比尺。

式(9)的分子即为图1中阴影部分面积,表示相似材料与原岩应力-应变曲线的绝对差异。取两条曲线与坐标轴所围面积的较小者作为分母,使 S_1

成为无量纲数,表示相似材料与原岩应力-应变曲线的相对差异。

S_1 描述了相似材料理论与实际应力-应变曲线的畸变程度,其值越小则畸变越少,若等于0则表示二者完全相似。

2.2 基于应力-应变曲线的 π 值评价法

(1) 首先以应力-应变曲线为目标函数,对力学参数进行敏感性分析,定义敏感因子为

$$\alpha_i = \left| \frac{\partial \left[\int f(a_1, a_2, \dots, a_N) d\varepsilon \right]}{\partial a_i} \right|, i = 1, 2, \dots, N. \quad (10)$$

式中, a_i 为相似材料的 i 个力学参数; f 为目标函数。

α_i 描述了第 i 个力学参数 a_i 发生微小变化且其他参数保持不变时,目标函数与应变轴所围面积的变化程度,即参数 a_i 的敏感性。在实际计算中,敏感因子可写成

$$\alpha_i = \frac{\int |\Delta f| d\varepsilon}{|\Delta a_i|} = \frac{\int |f' - f| d\varepsilon}{|a'_i - a_i|}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (11)$$

式中, a_i, a'_i 分别为相似材料参数理论值和实际值; $|\Delta a_i|$ 表示第 i 个参数的畸变程度; f 为相似材料理论应力-应变曲线; f' 为某参数为实际值其余参数为理论值时的应力-应变曲线; $|\Delta f|$ 表示参数畸变后应力-应变曲线与理想应力-应变曲线的偏离程度。

图2为相似材料理想应力-应变曲线与第 i 个参数为实际值时的应力-应变曲线。

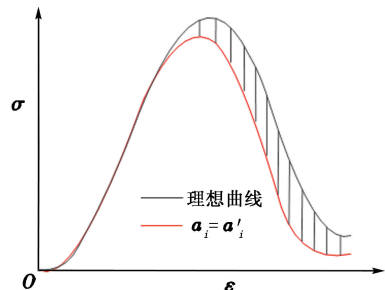


图2 相似材料理想应力-应变曲线与第 i 个参数为实际值时的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of theoretical similar material and material whose i -th parameter being actual value

通过计算比较各敏感因子,可以得到各力学参数对材料特性的影响程度。

(2) 根据相似原理,由力学参数计算无量纲数为

$$\pi_i = \prod_{j=1}^N a_j^{\alpha_j}, i = 1, 2, \dots, M. \quad (12)$$

式中, π_i 为由 N 个力学参数形成的 M 个无量纲数; x_{ij} 为指数。

为了获取无量纲数的权重, 定义系数 β

$$\beta_i = \prod_{j=1}^N \alpha_j^{x_{ij}}, i = 1, 2, \dots, M. \quad (13)$$

式中, α_i 为力学参数对应的敏感因子。为了进行后续 π 值评价, 须将系数 β 进行归一化为

$$\beta'_i = \beta_i / \sum_{i=1}^M \beta_i. \quad (14)$$

(3) 将相似材料的无量纲数 π' 与原岩无量纲数 π 进行比较, 并使用归一化系数 β' 作为权重求和, 可得到相似性评价指标 S_2 为

$$S_2 = \sum_{i=1}^M \beta'_i \left| \frac{\pi'_i - \pi_i}{\min(\pi_i, \pi'_i)} \right|. \quad (15)$$

S_2 描述了相似材料无量纲数与原岩无量纲数的差异, 其值越小代表差异越小, 若等于 0 则表明二者完全相同。

2.3 综合评价公式

为了兼顾参数与无量纲数两方面的评价, 提出相似性综合评价指标 S

$$S = \sqrt{S_1^2 + S_2^2}. \quad (16)$$

若 S_1 与 S_2 为两个正交向量, 其模分别为 S_1 与 S_2 , S 为 S_1 与 S_2 向量和, 则 S 可看作向量 S 的模。若以向量 S_1 与 S_2 为正方向建立坐标系, 则向量 S

可以用坐标表示为 (S_1, S_2) , 向量 S 的模即点 (S_1, S_2) 与原点间的距离等于综合评价指标 S , 如图 3 所示。

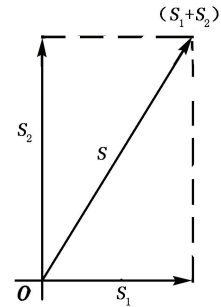


图 3 相似性评价指标的向量表示

Fig. 3 Vector expression of similarity assessment index

S 表示在特定相似比尺下相似材料与原岩的相似水平, 其值越小即点 (S_1, S_2) 离原点越近则两者越相似。当 S 等于 0, 点 (S_1, S_2) 与原点重合时, 两者完全相似。

3 评价实例

任松等^[17]对盐岩蠕变相似模型进行研究并开展了材料配比试验, 现从中选取两种配比, 用基于应力-应变曲线的定量评价法对其部分力学性质进行评价。金坛盐岩与其相似材料的常规力学参数如表 1 所示, 模型应力比尺取为 50。

表 1 金坛盐岩与其相似材料的常规力学参数

Table 1 Mechanical parameters of salt rock in Jintan and its similar materials

材料	弹性模量 E/MPa	内聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	泊松比 μ	抗压强度 σ_c/MPa	抗拉强度 σ_t/MPa
盐岩	18 000	1	45	0.30	20.0	1.00
理论参数	360	0.02	45	0.30	0.4	0.02
1# 试样	371	0.023 1	44.5	0.31	0.462	0.021 7
2# 试样	242	0.017 5	43.2	0.26	0.317	0.013 3

注: 1# 试样的砂胶比为 1 : 0.04, 粗盐颗粒与细盐粉末的砂胶比为 6 : 4; 2# 试样的砂胶比为 1 : 0.02, 粗盐颗粒与细盐粉末的砂胶比为 2 : 8。

用岩土分析有限元软件 Plaxis 对表 1 中的材料进行数值仿真得到应力-应变曲线。Plaxis 可以实现变形、渗流、固结、施工等方面的分析^[18]。软件中的土工试验室模块可以在已知材料模型及其参数的情况下测试材料性质^[19], 步骤如下:

- ①在材料模块中设置材料模型及参数;
- ②在土工试验室中选择三轴压缩试验并设置试验类型、初始条件和运行步长等仿真参数;
- ③选择需要测试的材料进行试验, 输出试验结果;
- ④将试验数据导入其他软件(本文中使用的 Mat-

lab) 进行绘图、计算等后处理。

为简化评价过程, 使用基本的摩尔-库伦本构方程作为材料的数学模型。在 Plaxis 软件中最少需要 4 个参数以确定摩尔-库伦模型, 分别为弹性模量、内聚力、内摩擦角和泊松比。

3.1 应力-应变曲线评价

通过 Plaxis 软件获取的应力-应变曲线如图 4 所示。

利用式(5)可得到试样的相似性评价指标 S_1 , 1#、2# 试样的 S_1 分别为 0.0196 和 0.2216。

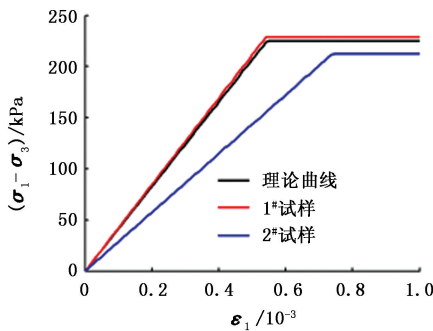


图 4 相似材料的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of similar materials

3.2 基于应力-应变曲线的 π 值评价

(1) 首先应用式(11)求取 4 个力学参数的敏感因子 α , 结果如表 2 所示。

表 2 试样各参数敏感因子

Table 2 Sensitivity factors of samples

材料	弹性模量 E	内聚力 c	内摩擦角 φ	泊松比 μ
1#试样	16.727	88.710	192.078	5.832
2#试样	25.274	89.796	187.802	5.281

(2) 内摩擦角与泊松比为无量纲参数, 弹性模量与内聚力量纲相同, 根据相似原理可知能够形成 3 个无量纲数, 现定义并计算力学参数的无量纲数如表 3 所示。

表 3 原岩及相似材料的无量纲数

Table 3 Non-dimensional numbers of raw rock and its similar materials

材料	π_1	π_2	π_3
	弹性模量 E /内聚力 c	内摩擦角 φ	泊松比 μ
盐岩	18000	45	0.30
1#试样	16060	44.5	0.31
2#试样	13829	43.2	0.26

根据表 3, 由式(13)可计算出试样各无量纲数的系数 β , 结果如表 4 所示。

表 4 试样各无量纲系数 β

Table 4 Coefficients β of non-dimensional numbers

材料	β_1	β_2	β_3
1#试样	0.00018856	192.078	5.832
2#试样	0.00028146	187.802	5.281

按照式(14)对系数 β 进行归一化, 可得 β' 如表 5 所示。

表 5 归一化系数 β'

Table 5 Normalized coefficients β'

材料	β_1'	β_2'	β_3'
1#试样	3.13×10^{-8}	0.03189	0.968
2#试样	5.15×10^{-8}	0.0343	0.966

(3) 将表 4、5 中数据代入式(15), 得到相似性评价指标 S_2 , 试样 1、2 的 S_2 分别为 0.03262876 和 0.14999385。

3.3 综合评价

按照式(16)计算相似性综合评价指标 S , 结果如表 6 所示。

表 6 相似性综合评价指标 S

Table 6 Comprehensive similarity assessment index S

材料	S_1	S_2	S
1#试样	0.0196	0.0326	0.0380
2#试样	0.2216	0.1500	0.2680

其向量表示见图 5。

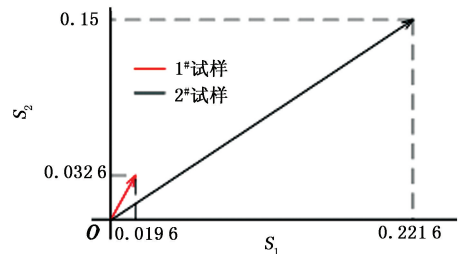


图 5 试样相似性评价指标的向量表示

Fig. 5 Vector expression of similarity assessment index of samples

由表 6 中数据可知, 1#试样在应力-应变曲线近似程度及力学参数比例关系方面均优于 2#试样, 因而其相似性综合评价指标 S 较小。在图 5 中可以更加直观地看出, 1#试样的 S_1 轴坐标、 S_2 轴坐标及模均小于 2#试样的, 反映其相似度较好, 因此应选择 1#试样作为盐岩相似材料。

本评价实例仅对材料的部分力学参数进行了评价, 这是由于使用的最简摩尔-库伦模型仅包含 4 个力学参数。若要全面评价材料, 须选择包含全部参数的本构模型或通过实际力学测试获取应力-应变曲线。在构造变形与烃类充注一体化物理模拟实验中^[20-21], 运用所提出的方法对试样进行评价优选, 取得了良好的效果^[22-24]。

4 结论

(1) 评价包含材料参数两方面的特性, 即相似材料参数理论值与实际值的近似度和相似材料参数满足无量纲数的情况。

(2) 验证了所提出的方法在构造变形与烃类充注一体化物理模拟中的准确性和实用性。

参考文献:

[1] 王炯明. 建筑结构实验[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988:94-117.

- [2] KLINE S J. Similitude and approximation theory [M]. New York: Springer-Verlag, 1986:8-24.
- [3] 李晓红, 卢义正, 康永, 等. 岩石力学实验模拟技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007:9-33.
- [4] INDRARATNA B. Development and applications of a synthetic material to simulate soft sedimentary rocks [J]. Geotechnique, 1990, 40(2):189-200.
- [5] PERTENCE A E M, CETLIN P R. Analysis of a new model material for the physical simulation of metal forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 84(1):261-267.
- [6] BURGERT W, LIPPMANN H. Models of translator rock bursting in coal [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1981, 18(4):285-294
- [7] ZADEH L A. Fuzzy sets [J]. Information and Control, 1965, 8(3):338-353.
- [8] 程圣国, 方坤河. 土质滑坡相似材料试验设计理论及评价方法研究 [J]. 水力发电, 2002(4):21-22.
CHENG Shengguo, FANG Kunhe. The test and design theory of the similar materials of soil-type landslide and the study on its assessment method [J]. Water Power, 2002(4):21-22.
- [9] 曹玲, 罗先启, 程圣国. 千将坪滑坡物理模型试验相似材料研究 [J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2007, 29(1):37-39.
CAO Ling, LUO Xianqi, CHENG Shengguo. Research on similar material of physical model for Qianjiangping landslide [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2007, 29(1):37-39.
- [10] SOBOL I M. On sensitivity estimation for nonlinear mathematical models [J]. Matematicheskoe Modelirovanie, 1990, 2(1):112-118.
- [11] MCKAY M D, BECKMAN R J, CONOVER W J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code [J]. Technometrics, 2000, 42(1):55
- [12] 白玉湖, 周济福. 水驱油局部相似模型的设计及定量评价方法 [J]. 力学与实践, 2009, 31(2):27-30.
BAI Yuhu, ZHOU Jifu. Design of partial similarity models and their evaluation method in water flooding physical simulation [J]. Mechanics in Engineering, 2009, 31(2):27-30.
- [13] 白玉湖, 李家春, 周济福. 水驱油两相流物理模拟相似参数的敏感性分析 [J]. 中国科学 E 辑: 工程科学材料科学, 2005, 48(4):441-453.
BAI Yuhu, LI Jiachun, ZHOU Jifu. Sensitivity analysis of dimensionless parameters for physical simulation of water-flooding reservoir [J]. Science in China Ser E Engineering & Materials Science, 2005, 48(4):441-453.
- [14] 白玉湖, 周济福. 油藏复杂驱动体系物理模拟相似准则研究进展 [J]. 力学进展, 2009, 39(1):58-68.
BAI Yuhu, ZHOU Jifu. The advance in the scaling criteria of physical simulation for the complex flows system in reservoir [J]. Advance in Mechanics, 2009, 39(1):58-68.
- [15] 刘铁雄, 彭振斌, 韩金田. 灰岩岩性模拟试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2006, 1(6):878-881.
LIU Tiexiong, PENG Zhenbin, HAN Jintian. Research of simulation testing of limestone's lithology [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 1(6):878-881.
- [16] 蔡美峰. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002:50-55.
- [17] 任松, 郭松涛, 姜德义, 等. 盐岩蠕变相似模型及相似材料研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(s1):106-110.
REN Song, GUO Songtao, JIANG Deyi, et al. Study of creep similar model and creep equivalent material of salt rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(s1):106-110.
- [18] BRINKGREVE R B J. Plaxis: finite element code for soil and rock analyses: 2D-version 8 [M]. Rotterdam: Balkema, 2002:2-7.
- [19] 北京金土木软件技术有限公司. Plaxis 岩土工程软件使用指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2010:37-48.
- [20] 王学军, 单亦先, 劳海港, 等. 构造变形与烃类充注一体化物理模拟的难点及解决策略 [J]. 石油实验地质, 2013, 35(4):453-456.
WANG Xuejun, SHAN Yixian, LAO Haigang, et al. Difficulties and solving strategies for integrated physical simulation of tectonic deformation and hydrocarbon charging [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(4):453-456.
- [21] 杨磊, 任旭虎, 綦耀光, 等. 多功能构造物理模拟装置的设计及应用 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(5):152-158.
YANG Lei, REN Xuhu, QI Yaoguang, et al. Design and application of multifunction tectophysics simulating apparatus [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(5):152-158.
- [22] 郝雪峰, 单亦先, 劳海港. 渤海湾盆地济阳坳陷车镇凹陷西部深层油气倒灌的物理模拟实验 [J]. 石油实验地质, 2013, 35(1):87-91.
HAO Xuefeng, SHAN Yixian, LAO Haigang. Physical

- modeling of petroleum downward migration: a case study of western Chezhen Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(1):87-91.
- [23] 劳海港,陈清华,刘岩,等. 东营凹陷中央背斜变换带演化特征及其控油规律[J]. *高校地质学报*, 2013, 19(1):133-140.
- LAO Haigang, CHEN Qinghua, LIU Yan, et al. Evolution and control of oil distribution of the transition zone in the central anticline transformation belt, Dongying Sag [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2013, 19(1):133-140.
- [24] 王永诗,单亦先,劳海港. 油气“倒灌”的物理模拟及其石油地质意义[J]. *西南石油大学学报:自然科学版*, 2014, 36(2):45-50.
- WANG Yongshi, SHAN Yixian, LAO Haigang. Physical simulation of oil and gas backflow and its geological significance[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2014, 36(2):45-50.

(编辑 沈玉英)