

文章编号:2095-7386(2016)04-0061-06

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2016.04.012

水驱对地应力场影响机制的研究

王锐,何翔

(武汉轻工大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430023)

摘要:对油藏进行注水开采时,地下岩层渗流场能引起地层应力场的改变。采取从大庆油田南二区西部选取的典型井组,基于有效应力原理,研究水驱注入方式下地层的孔隙压力分布情况及其动态演化规律,地层有效应力分布情况及其动态演化规律,揭示出水驱注入方式对地层压力场和有效应力场的影响规律。研究表明,在对油藏采取注水开采时,流—固耦合的作用影响显著,能够促使地层压力场和有效应力场发生很大变化。研究结果可为后续的水驱方式下注入参数界限值、计算方法研究以及复杂地质构造下的注入参数界限提供理论性指导。

关键词:注水;渗流场;地层压力场;有效应力场;流—固耦合

中图分类号: TE 355

文献标识码: A

The study of water flooding effects on ground stress field on mechanism

WANG Rui, HE Xiang

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: The seepage field can cause the change of formation stress field when the oil reservoir is injected with water. This article takes the typical well group which is selected from the western region of the south two of the west of Daqing oil field. Based on the principle of effective stress, the distribution of pore pressure and its dynamic evolution of formation under water drive injection are studied, and reveals the effect of water flooding on formation pressure field and effective stress field is revealed. The research results show that the effect of fluid structure interaction on reservoir injection is significant, which can lead to great changes in formation pressure field and effective stress field. The results of this study can provide a reliable theoretical guidance for the further study of the boundary value of injection parameters, the calculation method and the boundary of injection parameters under the complicated geological structure.

Key words: water injection; seepage field; formation pressure field; effective stress field; fluid-structure interaction

1 引言

由于多年的开发,世界上相当多的油田都曾发生过很多油水井套损问题。套管损坏问题一直是困扰国内外油田开采的问题,且并没取得较好的解决,怎样对套损井进行预防和治理是世界各生产油田普

遍出现的技术难题。在工程和地质因素单一或共同的作用下,注水采油井套管则会出现不同程度的损害,国内专家学者针对有关套管损坏的问题所进行的相关研究,结论是套损是由于地应力的作用;国外同样也长期存在套损问题,其有关套损研究主要对于地层、流体的应力,这方面研究较成熟。现阶段,

收稿日期:2016-。

作者简介:王锐(1992-),女,硕士研究生,E-mail:1542749237@qq.com.

高压注采、压裂、大型酸化等强化措施用在油田的开采上,虽取得了不错的成果,与此同时却使套管所在的生产环境也愈加恶劣^[1]。

油藏开发过程是渗流场和应力场的流—固耦合作用的一个过程,注入水在地下产生渗流作用使地下岩层骨架的应力发生改变,改变地层岩石的物性参数,地应力场会产生应力重分布,套管周围会产生应力集中现象,反过来,这些改变又会对孔隙流体的渗流和孔隙压力的分布造成影响,这一过程则是套管发生损坏的主要原因^[2]。

笔者采用水驱注入对地应力场的影响机制进行研究。主要工作如下:本项目的研究区块位于某油田南二区西部区块,其构造处于松辽盆地的中央拗陷区朝阳沟阶地的西端,为一段向北西倾没的鼻状构造(如图1)。在油田南二区西部选取典型的井组,采用四点面积法布井方式布井。布井方式采用理想地质模型,基于有效应力原理,对水驱条件下地层压力场和有效应力场进行数值模拟,研究水驱注入方式下地层压力场和有效应力场动态演化特征,揭示注入方式水驱对地层压力场和有效应力场的影响规律。

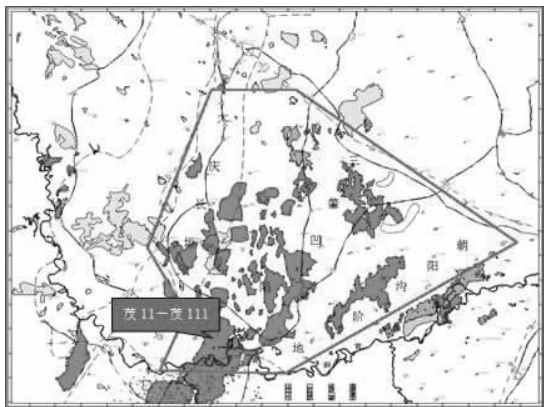


图1 研究区域构造位置图

2 油藏油水两相流—固耦合关系

目前,采用流—固耦合理论研究主要关于孔渗性能发生改变而对油层产能造成的影响,但是研究有关渗流场变化对应力场造成影响还比较少,甚至基于流固—耦合的基本理论来研究套管发生套损问题的成果少之又少。渗流—应力场的流固—耦合理论在套损的研究中主要体现在渗流对变形场所产生的影响,渗流场对应力场的影响表现在以下两方面:一方面,地层的孔隙压力作用在地层岩石上产生的力学作用,在注采过程中,流体渗流作用到岩石上导致储层地应力场重新分布继而可能导致套;其

二,流体发生渗流作用使地层岩石的物理力学性质参数改变^[3]。

2.1 有效应力原理

1941年,Biot在研究三轴压缩力学问题时,发现低渗透性多孔介质不适合应用Terzaghi原理,提出了修正后的有效应力原理,即有效应力等于上层总压力减去等效孔隙压力。由Biot有效应力原理可知,岩土体的介质骨架和岩体孔隙中水一起来承担作用于饱和岩土体的外力,即岩土体骨架的有效应力和孔隙水压力构成了岩土体内总应力^[4]。各向同性岩体的孔隙流体压力只改变介质体积而不会改变介质的形状,所以岩土体介质的剪应力和孔隙压力不相关,在任何方向上,岩土体的孔隙压力对岩体介质的正应力影响都一样,有:

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \alpha p \delta_{ij} \quad (1)$$

式中, σ_{ij} 表示岩土体介质的总应力, σ'_{ij} 表示岩土体介质的有效应力, p 表示岩土体的孔隙水压力, α 表示Biot常数, δ_{ij} 表示克罗内克 Kroneker 符号。在数学中,克罗内克函数 δ_{ij} 是一个二元函数。

平衡方程由孔隙压力与有效应力表示如下:

$$\frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x} - f_{x_i} = 0 \quad (2)$$

由位移所表示的平衡方程为:

$$G \nabla^2 u_i - (\lambda + G) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial x_i} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_{x_i} = 0, i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

$$\varepsilon_v = - \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (4)$$

式中, ε_v 表示体积变形, λ 、 G 表示拉梅常数, p 是流体的孔隙压力,表示流体渗流对应力的影响。

2.2 介质孔隙度与孔隙压力的关系

岩土体介质的孔隙度 φ 随岩土体介质的孔隙压力 p 的变化由压缩系数 C_R 来表为^[5]:

$$C_R = \frac{1}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial p} \quad (5)$$

由上式可得

$$\begin{aligned} C_R \partial p &= \frac{\partial \varphi}{\varphi} \Rightarrow \int_{p_0}^p C_R dp = \int_{\varphi_0}^{\varphi} \frac{d\varphi}{\varphi} \Rightarrow C_R (p - p_0) \\ &= \ln \frac{\varphi}{\varphi_0} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, φ_0 表示岩土体初始孔隙度,则有:

$$\varphi = \varphi_0 e^{C_R(p-p_0)} \quad (7)$$

当地层压力变化不大时,式(7)通过取用Taylor级数展开的前两项有:

$$\varphi = \varphi_0 [1 + C_R(p - p_0)] \quad (8)$$

式(5)则表示岩土体孔隙度和孔隙压力间的耦合关系。

2.3 介质渗透系数与孔隙压力和有效应力的关系

在油藏流—固耦合中,孔隙度出现变化会使得储层形变后的渗透张量出现变化,且可用孔隙度来表示。渗透系数的张量和孔隙的变形满足如下的关系式:

$$K_{ij}(\Delta\varphi) = K_{ij}^0 \exp[-\alpha\Delta\varphi]. \quad (9)$$

式中, $\Delta\varphi$ 表示孔隙介质的孔隙度增量, K 表示储层的渗透系数张量, α 表示流固耦合的耦合系数。

油藏流—固耦合中,往往进行实验研究来给出渗透张量与有效应力、孔隙压力间的关系^[6]。岩土体介质的孔隙增量、孔隙压力及单元体应力张量相互间的有关系如下:

$$\Delta\varphi = \frac{p}{R} - \frac{\sigma_{ii}}{3H}. \quad (10)$$

式中, $\Delta\varphi$ 表示介质的孔隙度增量, σ 表示单元体应力的张量, p 表示介质的孔隙压力, R 、 H 表示孔隙介质的变形性质常数。

把式(9)代入到式(10)中得到渗透系数的张量、介质孔隙的压力及应力的张量间的关系如下:

$$K_{ij}(p, \sigma_{ij}) = K_{ij}^0 \exp[-\alpha(\frac{p}{R} - \frac{\sigma_{ii}}{3H})]. \quad (11)$$

式(11)为在油田流—固耦合过程中,变形场对岩土体孔隙介质渗透系数的影响。

3 油藏流固耦合的数值模拟

3.1 布井方式

面积注水指在油田开采时,油田注采系统根据油田特定的形状均匀的分布于整个注采油田面积上(图2)。面积注水适用的油层条件:油层含油面积较小,形状不规则,含油分布较零散,渗透性能差,含有不规则断层,且也适用于行列注水开采储层。面积注水的优点是:油藏储量动用充足,油水井处于一线,油井采油效果好,速度快,且同时受到周围注水井影响,缺点是开始实施后,调整起来较困难。

面积注水又分为:①交错型排状注水(又称交错斜对式):注水井与生产呈平行四边形互相交错分布。②直线型排状注水(又称正对式):注水井与生产井排互相分错,但注水井与生产井呈形如长方形的正对式分布。③四点法面积注水:一口注水井和周围三口生产井呈形如正三角形分布,注水井则构成等边三角形的中心。油井又在该井组构成的正六边形的中心,是七点法面积注水的一个特殊情况。④七点法面积注水:一口注水井和周围六口生产井呈形如正六边形分布,生产井组呈正六边形井网,注水井布在每个正六边形的中心。⑤五点法面积注水:井网型为正方形,注水井处于每个正方形的中心,每口注水井影响四口生产井。⑥反九点法面积注水:一口注水井周围和八口生产井呈正方形分布,每一个基本单元都是正方形,是由一口注水井与八口生产井组成,注水井分布于八口油井正中央处^[7]。

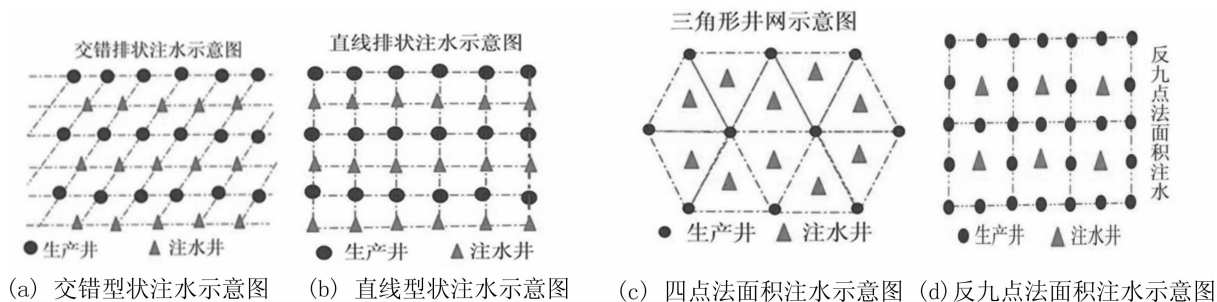


图2 布井方式示意图

3.2 计算模型

笔者选取了二区西部区块用最多的四点面积注采井组,采用数值模拟方法^[8],研究简单的地层条件下注水对地应力场的影响机制(见表1)。

四点面积法注采井组模型中,形如正三角形,一口注水井处于井组中心,周围为三口生产油井,注水井构成等边三角形的中心,而油井处在该注水井构成的正六边形中心^[9]。注水计算模型如图3所示。模型尺寸取 100 m × 100 m × 80 m,处于地下 800 m

深。模型分为3层,上下是泥岩盖层。其中上覆盖层的厚度 30 m,底层 40 m,中间层为砂岩层,砂岩厚度 10 m。

表1 模型材料的力学参数

材料	密度 ρ /(kg/m ³)	弹性模量 E /MPa	泊松比	渗透系数 /毫达西
盖层	2 400	2.1×10^4	1.344	-
砂岩层	2 300	1.8×10^4	1.344	80
底层	2 400	2.1×10^4	1.414	-

对所建模型进行约束设置,分别对四周进行水平位移约束,底面进行三个方向位移约束。

Petrel 作为基于 Windows 平台的三维可视化建模软件,集地震解释、构造建模、岩相建模、油藏属性

建模和油藏数值模拟显示及虚拟现实于一体,提高对油藏内部细节认识、精确描述透视油藏属性的空间分布、发现剩余和隐蔽油藏,极大降低开发成本。

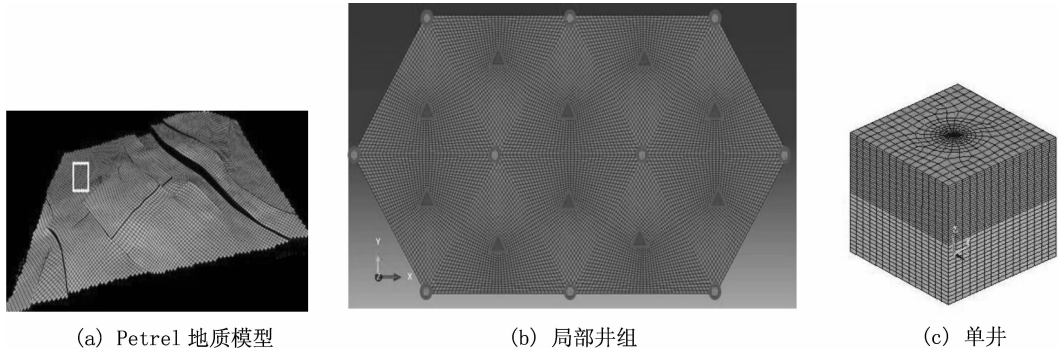


图3 计算模型

3.3 计算结果与分析

采用四点面积法水驱条件下的地层压力及有效应力分布,当注水压力为 8 MPa 时,由图 4—图 6 可知,在注水井和采油井之间形成了压力梯度,近井处压力梯度较大,等势线密集。

由图 7—图 9 可知,地层内大主应力分布不均匀,高压区沿着注水井分布并贯通成环状,最大地层

竖向应力发生在注水井处,达 0.5 MPa。

由图 10—图 12 可知,地层内小主应力分布并不均匀,最大小地层的竖向应力达 -8.0 MPa。

由图 13—图 15 可知,地层内剪切应力分布较不均匀,沿注水井和油井呈现反对称分布(绝对值相等,方向相反)。

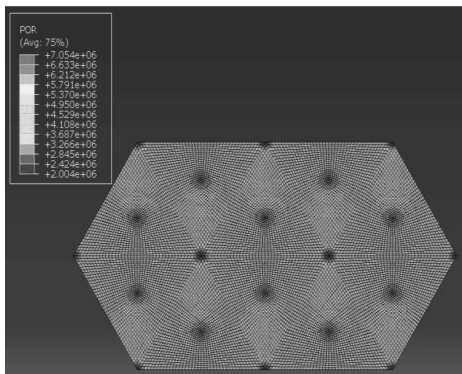


图4 注水 90 天后井组内的地层孔隙压力分布

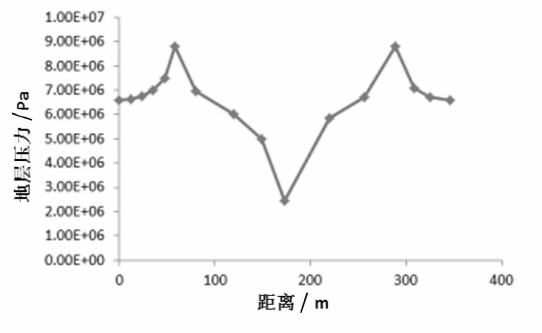


图5 1-1 断面上的地层孔隙压力分布

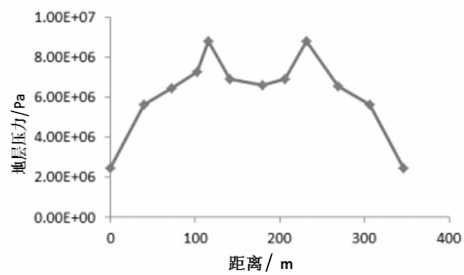


图6 2-2 断面上的地层孔隙压力分布

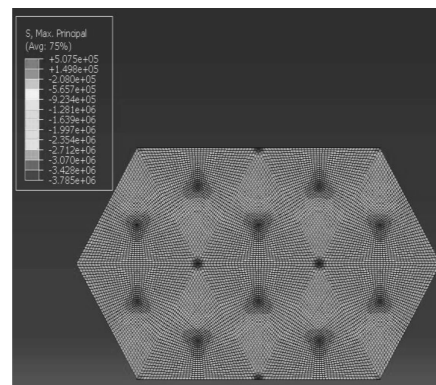


图7 井组内地层最大主压力分布

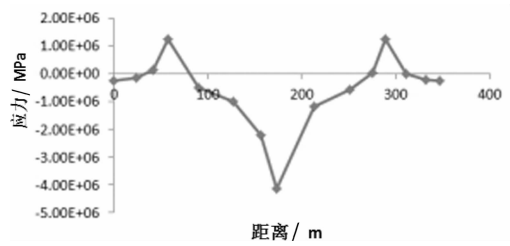


图 8 1-1 断面上的地层最大主压力分布

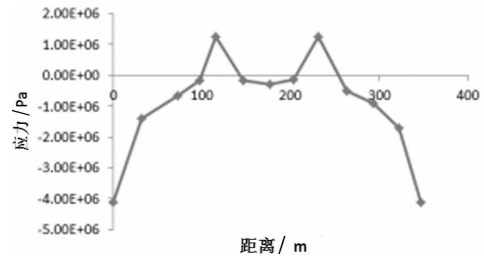


图 9 2-2 断面上的地层最大主压力分布

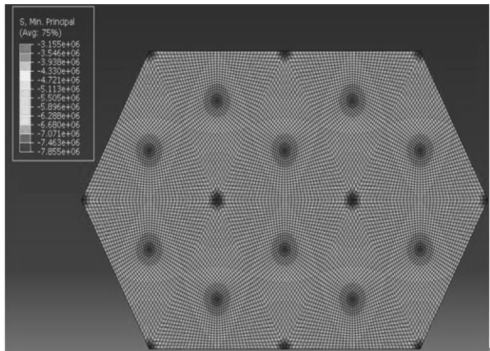


图 10 井组内地层最小主压力分布

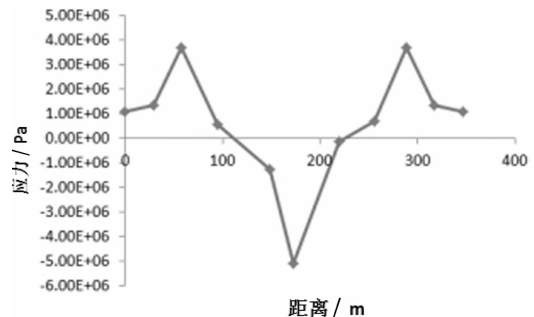


图 11 1-1 断面上的地层最小主压力分布

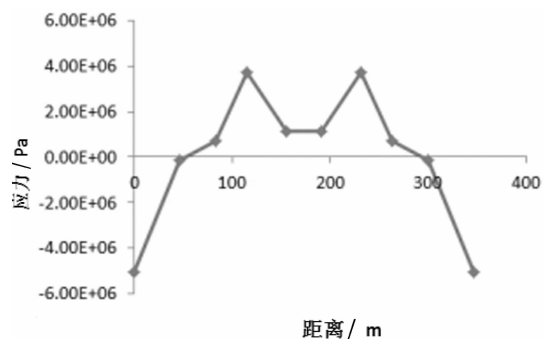


图 12 2-2 断面上的地层最小主压力分布

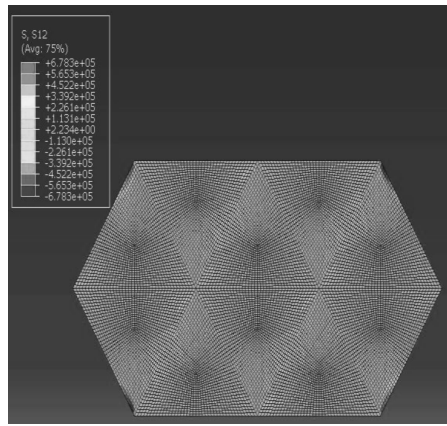


图 13 井组内地层的剪切应力分布

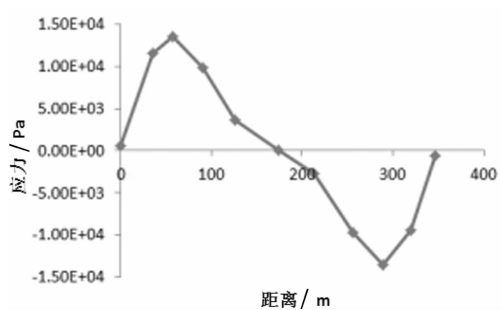


图 14 1-1 断面上的地层剪切应力分布

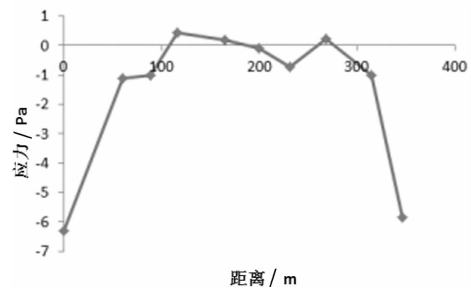


图 15 2-2 断面上的地层剪切应力分布

4 结论

(1) 笔者选取大庆油田南二区西部典型的井组,在理想的地质条件下,采用四点面积法布井方式,基于有效应力原理,对水驱条件下地层压力场及

有效应力场进行数值模拟,研究水驱注入方式下地层压力场及有效应力场的变化情况,揭示水驱对地层压力场和有效应力场的影响规律。地应力场产生变化,进而引起套管附近应力集中是造成套管损坏的重要因素,为后续注水井套损的预防措施提供可

靠指导。

(2)注水方式下,地层孔隙压力在注水采油井之间产生压力梯度,近井处压力梯度较大,等势线密集;地层内主应力分布不均匀,高压区沿着注水井分布并贯通成环状,最大地层竖向应力发生在注水井处;地层内剪切应力分布也不均匀,沿注水井和采油井呈反对称分布,由于剪切应力呈反对称分布,地层有相互错动的趋势。

参考文献:

- [1] 黄小兰,刘建军,杨春和. 注水油田剪切套损机理研究与数值模拟[J]. 武汉工业学院学报,2009,28(3):94-97.
- [2] 曲连忠,赵益忠,程远方,等. 疏松砂岩油藏脱砂压裂产能流固耦合模拟[J]. 大庆石油地质与开发,2009,28(6):187-191.
- [3] 黄小兰,刘建军,杨春和,等. 流固耦合作用下注水井井壁稳定性研究[J]. 石油钻采工艺,2008,30(6):83-87.
- [4] 孙铭新,程远方,贾江鸿,等. 低渗透复杂断块油藏套损机理及数值计算[J]. 断块油气田,2012,19(6):788-791.
- [5] 王新杰. 低渗透断块油藏水动力学场特征及注水开发方式研究[D]. 西南石油大学,2015.
- [6] 孙峰,李行船,熊廷松,等. 低渗透油藏水力压裂井应力场转向定量评价[J]. 断块油气田,2012,19(4):489-492.
- [7] 尹中民,武强,刘建军,等. 注水井泄压对井壁围岩应力场的影响[J]. 岩土力学,2004,25(3):363-368.
- [8] 薛永超. 肯基亚克盐下油田应力场模拟及裂缝预测[J]. 复杂油气藏,2012,5(1):43-46.
- [9] 易金,李自安,张露,等. 泥岩浸水对应力应变扰动的数值模拟[J]. 油气地质与采收率,2013,19(6):95-99.
-
- (上接第57页)
- [3] 张弛,黄广龙. 深基坑施工环境影响的模糊风险分析[J]. 岩土力学与工程学报,2013,32(s1):2670-2675.
- [4] 周勇,锜魏嵩,朱彦鹏. 兰州地铁车站深基坑开挖过程中降水对邻近地下管道的影响[J]. 岩土工程学报,2014,36(s2):496-499.
- [5] 俞建霖,夏霄,张伟,等. 砂性土地基深基坑工程对周边环境的影响分析. 岩土工程学报[J],2014,36(s2):312-318.
- [6] 陈昆,闫澍旺,孙立强,等. 开挖卸荷状态下深基坑变形特性研究[J]. 岩土力学,2016,37(4):1076-1082.
- [7] 望应洛. 系统工程[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [8] 胡宝清. 模糊理论基础[M]. 武汉:武汉大学出版社,2004.
- [9] GB 50911-2013,城市轨道交通工程监测技术规范[S].