

地下储库岩体施工过程及套管与 岩石相互作用数值模拟

沈新普¹, 沈国晓²

(1. 沈阳工业大学 建筑工程学院, 辽宁 沈阳 110023; 2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030)

摘要: 采用 ABAQUS 有限元分析软件, 对某天然气储藏基地的一个储藏库进行三维黏弹塑性有限元模拟, 分析了整个围岩体系在岩石溶解开挖阶段的应力与变形, 以及套管相应的变形。主要内容包括: (1) 给出施工引起的溶腔上部岩体的应力场和位移场, 并给出套管周围岩体随深度的变化曲线; (2) 结合 ABAQUS 软件要求的形式, 给出一条合理实用的岩石蠕变曲线; (3) 结合应力分析数值结果, 确定岩石和套管中可能存在的塑性区, 并对施工完成后岩体的稳定性做出评价。数值结果表明, 经过 3 a 的溶解开挖施工后, 围岩能够形成以“压力拱”为特征的稳定的上覆岩体自承体系, 说明储藏洞室的设计是合理可行的。但是有必要采取特殊措施, 增强套管下端的强度。同时还应采取措措施削减管段受到的来自围岩的向下牵拉作用。

关键词: 岩石力学; 数值模拟; 地下储库; 套管; 黏弹塑性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 2 - 4245 - 06

NUMERICAL SIMULATION OF CONSTRUCTION PROCESS OF ROCK MASS OF AN UNDERGROUND STORAGE AND INTERACTION OF ROCK-CASING

SHEN Xinpu¹, SHEN Guoxiao²

(1. College of Architectural Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110023; 2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract: With finite element software ABAQUS, a three-dimensional viscoelasto-plastic finite element analysis was performed for the excavation of rock mass of a natural gas underground storage. The stress variation and deformation during the excavation process were calculated and analyzed. The deformation of the casing with which water is pumped in and out was calculated. The main researchs include: (1) the stress field and displacement distribution of rockmass caused by solution mining were presented, as well as a curve of rock mass displacement versus z -direction for the rock around casing; (2) a practical curve of viscoplastic constitutive model of rock mass with reference to the form requirements of software ABAQUS was given out; (3) the possible plastic area was predicted, and the estimation of the stability of the storage rock mass structure was given out. The numerical results indicate that the self-bearing system which is characterized by “compressive arch” has been formed around the storage space after 3 years solution mining construction. The design of the underground storage is reasonable and practical. However, it is necessary to adopt reasonable measure to enhance the lower section of casing as well

收稿日期: 2006 - 09 - 13; **修回日期:** 2006 - 11 - 15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10472072); 教育部春晖计划资助项目(Z2005 - 1 - 21004)

作者简介: 沈新普(1963 -), 博士, 1985 年毕业于北方工业大学机械工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事固体损伤塑性本构关系和 ABAQUS 有限元数值计算方面的教学与研究工作。E-mail: xinpushen@vip.sina.com

as to reduce the pulling effect of rock mass acting on the casing.

Key words: rock mechanics; numerical simulation; underground storage; casing; viscoelasto-plasticity

1 引言

天然气目前在现代社会能源消耗中占的比重日益增多,在北美地区达到40%左右^[1~3]。地下储藏天然气比地面储藏安全性高、经济性好。所谓地下储藏天然气就是在具有良好蠕变特性的岩盐层中,使用溶解开采手段,“溶化”出一个巨大的储藏室,之后注入高压的液体天然气,储存起来^[3]。这个技术自20世纪60年代开始出现以来发展迅速,目前国内国外有很多处天然气地下储藏基地。每一个基地有几十至上百个相邻的、相互独立的储藏洞室。

我国学者早在20世纪90年代就开始了相关的数值研究,但是都比较初级。随着计算技术的发展,最近几年来的研究相关文献报道尤其多。刘新荣等^[4, 5]对岩盐溶腔围岩地应力场进行了有限元分析,但是没有给出量化的具体计算结果。赵顺柳^[6]研究了岩盐溶腔扩展中岩盐溶解的过程机制,并开发了响应的软件,但对溶解的开挖引起的岩石应力变化及位移状况叙述不多。伍国军和陈卫忠^[7]给出了用ABAQUS软件得到的岩盐溶解开采力学分析的二维蠕变塑性数值分析结果,但是文中对开挖过程及随时间变化的内腔表面面积和液压的施加方法均未见提及。

一般而言,蠕变性能良好的岩盐经过若干年的时间之后,围岩中的各种缝隙会自然闭合,从而使整个围岩体系具有良好的密封性,保证不会发生天然气泄漏。但是另一方面,岩盐的蠕变有时会给输送/导出天然气的套管造成损坏^[8~12],从而影响正常的系统运作。

本研究受某工程单位委托,对某天然气储藏基地的一个储藏库进行三维黏弹塑性有限元模拟,分析整个围岩体系在岩石开挖阶段的应力与变形,以及套管相应的变形,找出可能的破坏区和相应的破坏时间,并对施工完成后岩体的稳定性做出评价。

由于岩石的流变特性影响,与时间有关的岩土工程施工过程模拟比较复杂^[13]。本研究涉及到的非线性主要是材料的非线性^[14]。由于问题的复杂性,本研究采用了大型有限元分析软件ABAQUS进行求解^[15]。

2 几何模型、网格及边界条件

图1所示为来自工程单位的模型示意图。由于结构有 xoz 和 $yo z$ 两个对称面,计算中只取了1/4结构进行离散。结构整体网格如图,总共采用了13 916个节点,11 828个八节点长方体单元对结构进行离散。整个结构从上到下全长1 188 m,含有6个不同的岩层构造分别为:(1)上部弹性层厚1 025 m;(2)凝灰岩层厚30 m;(3)页岩层厚5 m;(4)钾盐层厚40 m;(5)含磷岩层厚12 m;(6)钾盐层厚76 m。结构的长和宽分别为140和105 m。储藏洞室选在1 100 m深度处的蠕变性能良好的含磷岩层,图2给出了施工结束时储藏洞室的结构形状示意,两端呈半圆形、中间矩形、高为12 m。洞室

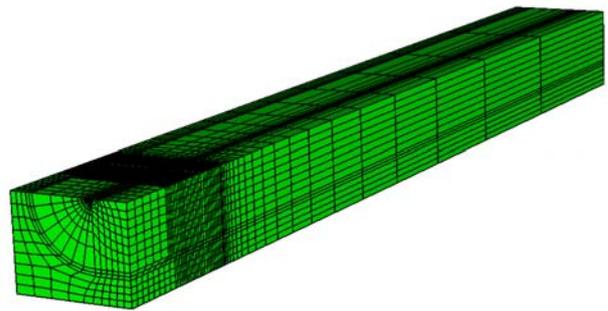


图1 模型网格图

Fig.1 Model meshes

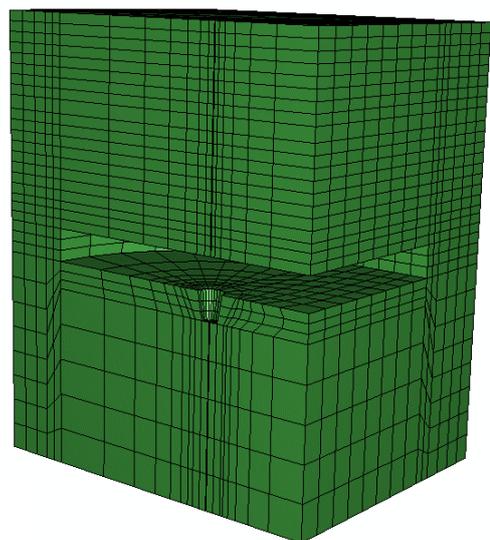


图2 模型内部结构形状示意图

Fig.2 Internal structure shape of model

的中间线上有一个初始融化产生的深 10 m、直径 10 m 的凹坑。为了清楚起见，图中隐去了上部的弹性层，只显示下部的岩层构造。

模型中用于输水的套管尺寸为外径 0.194 m、内径 0.172 m，套管与岩石之间有摩擦接触关系。上水管和注水管相距 80 m。图中只给出了注水管的位置，上水管在被对称性简化去掉的那一部分上。在溶化开采施工时，围岩融腔表面的液体压力为注入的高压水压力 13 MPa，施工结束时这个压力变为储存的液体天然气的压力。由于施工表面上始终作用着常量液压，这个问题的数值模拟相当于一个计算力学中的移动边界问题，数值计算时与一般的洞室开挖如隧道施工等相比有较高的难度。本文结合 ABAQUS 的 *Internal Surface 模型来施加这个水压力。这个水压力的作用有两个：一是溶解岩层，二是支护岩层。计算时在开挖步施加之前，提前在预计开挖到的表面上施加了水压力。图中还给出了边界条件，对 4 个侧面施加了各面法向的单向位移约束，下底面施加了 z 向约束，上表面自由。施工的具体模拟步骤为：(1) 施加地应力；(2) 在给定的施工面(内腔面)上施加液体载荷；(3) 移出融化开挖掉的单元。整个融化开挖采用了 20 个开挖步模拟融化开挖过程。

初始地应力的构造采用了结合实测结果(施工层竖向地应力分量实测为 25 MPa)、预加沿竖向分段线性的 z 向应力分量 σ_z 、分层取侧应力系数，然后施加 z 向体积力的方法，采用 *Geostatic stress 构造平衡的初始地应力场。岩盐层的侧压力系数取为 0.99，其他岩层的侧压力系数取为 0.85。这样构造的初始应力场比采用重力法构造的应力场所对应的位移场和应变场要好得多。

3 材料模型

计算采用的本构模型为：(1) 上部弹性层取为线弹性模型；(2) 凝灰岩；(3) 页岩取为遵守 Mohr-Coulomb 条件的摩擦塑性材料；(4) 钾盐层和含磷岩层取为遵守 Druck-Prager 条件的黏弹塑性材料。它们的应变率形式的幂硬化蠕变本构方程为

$$\dot{\epsilon}^{cr} = A \bar{\sigma}_{eq}^n t^m \quad (1)$$

式中： $\dot{\epsilon}^{cr} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}^{cr} : \dot{\epsilon}^{cr}}$ 为等效蠕变应变率， $\dot{\epsilon}^{cr}$ 为蠕

变应变率张量； $\bar{\sigma}_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} \sigma' : \sigma'}$ 为 Mises 等效应力， σ' 为偏应力张量； t 为时间； A ， n 和 m 均为模型参数，取值为：钾盐岩层 $A = 1 \times 10^{-20}$ ， $n = 2.667$ ， $m = -0.2$ ；磷岩岩层 $A = 1 \times 10^{-20}$ ， $n = 2.609$ ， $m = -0.2$ 。

上述蠕变特性曲线如图 3 所示。

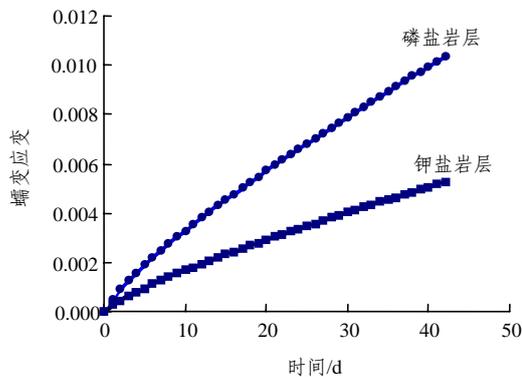


图 3 岩盐蠕变模型曲线

Fig.3 Curves of creep model of salt rocks

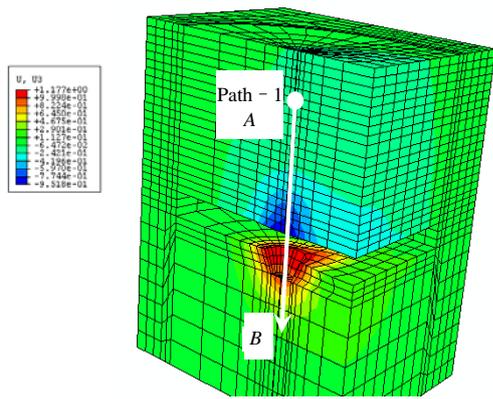
模型中套管材料高强结构钢的模型为理想弹塑性^[16]，初始屈服极限取为 800 MPa。

4 ABAQUS 计算结果

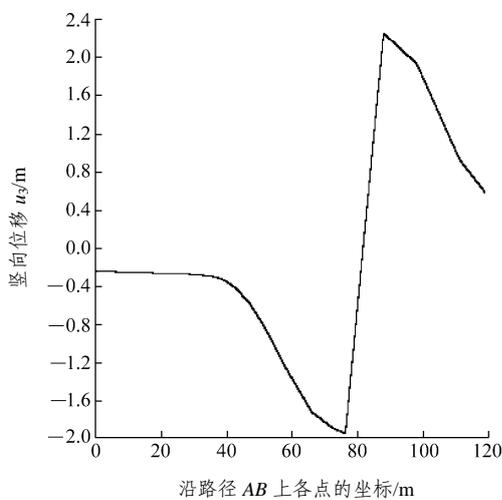
采用上述力学模型，利用 ABAQUS6.5 - 1 程序建立计算模型，在微机上运行约 10 h，得到如下计算结果：

(1) 洞室围岩变形。图 4(a)给出了计算得到的岩石中的竖向位移分量分布图。施工层的顶板有一定程度的下沉变形，而地板则在地应力的作用下有一定程度的鼓起。经过约 3 a 的时间，位移场趋于稳定。这表明整个围岩体系是稳定的。图 4(b)给出了计算得到的岩石中沿 PathA-B 路径的竖向位移分量 u_3 随深度而变化的情况。上部弹性岩层及灰岩、页岩层的变形不大，而在钾盐层 u_3 变形迅速增加。这个变形增加能够使岩盐层形成很好的封闭。

(2) 岩石应力。图 5 给出了计算得到的岩石中的竖向应力分量分布图。由图 5 可知，在靠近工作面的顶板和底板岩层中出现了一定的拉应力区。拉应力区之外为拱形的压应力区。这个“压力拱”内的所有裂纹将会闭合，从而将保证围岩的密封性。因此这一“压力拱”对整个围岩结构的力学性能有重要作用。



(a) 沿竖向的位移分量 u_3 场(单位: m)



(b) u_3 随深度的变化曲线

图 4 竖向的位移分量场及其随深度的变化

Fig.4 Vertical displacement component and its variation with depth

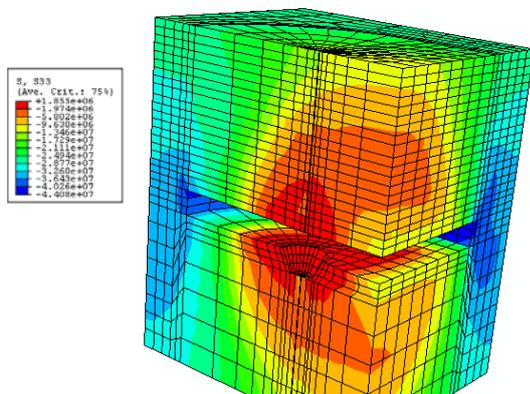


图 5 竖向的应力分量场(单位: MPa)

Fig.5 Vertical stress component field(unit: MPa)

(3) 岩石塑性区。图 6 给出了计算得到的岩石中的最大非弹性应变的分布图。这里的最大非弹性

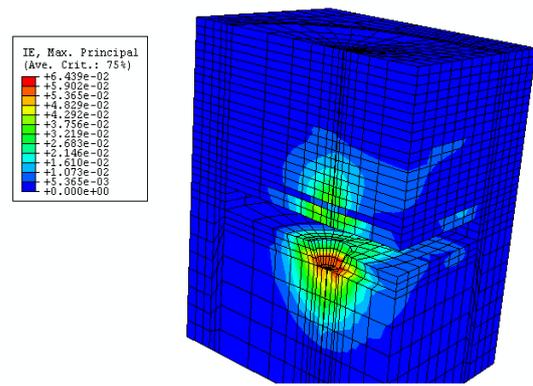


图 6 竖向的最大非弹性应变场分布

Fig.6 Distribution of maximum vertical component of inelastic strain

应变实际上是相应的第一主塑性应变和第一主蠕变的和, 即 $\epsilon_{max}^{ie} = \epsilon_{max}^p + \epsilon_{max}^{creep}$ 。由图 6 可知, 在工作面中心处、与表面一定距离处最大非弹性应变 ϵ_{max}^{ie} 达到极大值。

(4) 套管竖向应力。图 7 所示为计算得到的套管中下部 80 m 套管段的竖向应力分量分布图。套管全长 1 100 m。为了突出重点, 这里仅取下部 80 m 进行分析、显示。由图 7 可知, 80 m 的管段大部分单元的应力达到或接近塑性初始屈服极限 800 MPa。

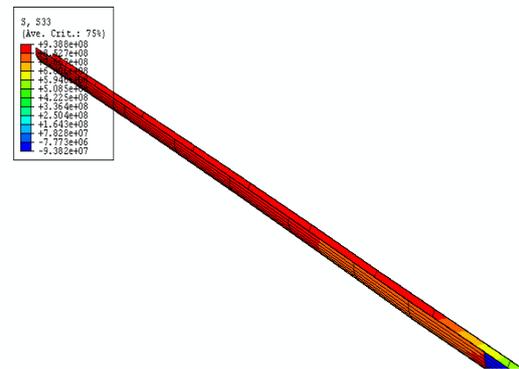


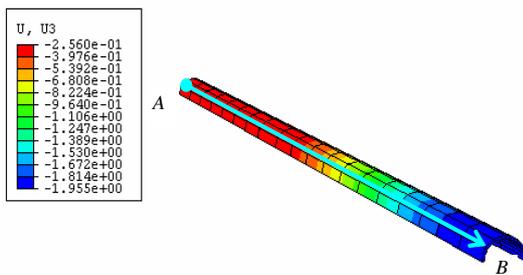
图 7 套管竖向的应力分量场(单位: MPa)

Fig.7 Vertical component of stress within casing(unit: MPa)

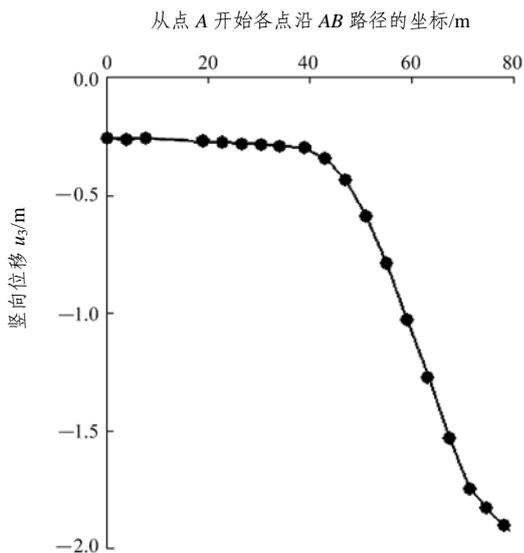
(5) 套管下端竖向位移。图 8(a)给出了计算得到的套管中下部 80 m 套管段的竖向应力分量分布图。图 8(b)给出了套管下端 80 m 管段上各点的 u_3 随深度变化的情况。

由图 8 可知, 套管下端由于岩石的挤压和下沉的联合作用, 产生了较大的竖向位移。这个位移是由岩盐的蠕变和向下牵拉联合作用引起的。

(6) 套管下端 80 m 的塑性应变。图 9 给出了套



(a) 沿套管竖向的 AB 路径上的位移分量 u_3 场(单位: m)



(b) u_3 随深度的变化

图 8 套管下端 80 m 管段各点的竖向位移场

Fig.8 Vertical displacement u_3 within 80 m-long section of lower casing

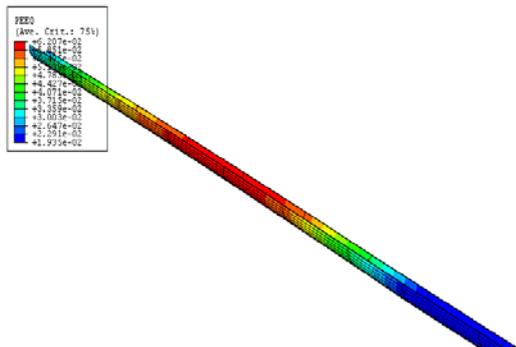


图 9 套管下部 80 m 管段上等效应塑性应变场

Fig.9 Equivalent plastic strain within a 80 m-long section of lower casing

管下部 80 m 管段上各单元的等效塑性应变的分布情况。从图 9 中看出, 在经过约 3 a 的时间后, 由于岩石的挤压和下沉牵拉的联合作用, 原设计套管下部管段全部进入了塑性应力状态。

5 结 论

本研究对某天然气储藏基地的一个储藏库进行了三维黏弹塑性 ABAQUS 有限元模拟, 分析了围岩体系在岩石开挖阶段的应力与变形, 以及套管相应的变形。数值结果表明, 经过 3 a 的开挖施工后, 围岩能够形成以“压力拱”为特征的稳定的上覆岩体自承体系, 说明储藏洞室的设计是合理可行的。另外, 原有设计的输水套管的下部管段在 3 a 的岩石洞室溶解开挖施工后发生了较大的塑性变形。这一点与实际工程中观察到的现象相吻合。因此有必要采取特殊措施, 增强该管段的强度。同时还应采取措措施削减管段受到的来自围岩的挤压和向下牵拉作用。

参考文献(References):

[1] HAN G, BRUNO M, LAO K, et al. Gas storage and operations in single bedded salt caverns: stability analyses[C]// Proceedings of the 2006 SPE Gas Technology Symposium. Calgary, Alberta, Canada: [s. n.], 2006: 1 - 10.

[2] BRUNO M, DORFMANN L, HAN G, et al. 3D Geomechanical analysis of multiple caverns in bedded salt[C]// SMRI - 2005 Technical Meeting. Nancy, France: [s. n.], 2005: 1 - 26.

[3] 高德利. 油气钻井技术展望[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(1): 29 - 32.(GAO Deli. Review on the drilling technology of oil and gas[J]. Journal of Petroleum University(Natural Science), 2003, 27(1): 29 - 32.(in Chinese))

[4] 刘新荣, 许江, 姜德义, 等. 岩盐溶腔围岩地应力场有限元分析——计算模型与分析方法[J]. 化工矿物与加工, 2000, 10(1): 11 - 14.(LIU Xinrong, XU Jiang, JIANG Deyi, et al. The FEM numerical analysis of stress field distribution in the rocksalt cavity's surrounding rock[J]. Chemical Industry Minerals and Processing, 2000, 10(1): 11 - 14.(in Chinese))

[5] 任松, 姜德义, 刘新荣, 等. 用 3D-Sigma 分析岩盐溶腔围岩地应力场[J]. 地下空间, 2003, 23(4): 414 - 416.(REN Song, JIANG Deyi, LIU Xinrong, et al. Analysis of ground stress of rock salt cavern's surrounding rock with 3D-Sigma[J]. Underground Space, 2003, 23(4): 414 - 416.(in Chinese))

[6] 赵顺柳. 岩盐溶腔扩展的数值模拟及三维显示[硕士学位论文][D]. 成都: 四川大学, 2003.(ZHAO Shunliu. Numerical simulation and 3D

- visualization of salt cavern development[M. S Thesis][D]. Chengdu: Sichuan University, 2003.(in Chinese))
- [7] 伍国军, 陈卫忠. 废弃盐穴地下储气库可行性研究[C]// 2006 - ABAQUS 中国用户论文集. 三亚: ABAQUS Inc., 2006: 331 - 338.(WU Guojun, CHEN Weizhong. Feasibility investigation on underground gas storage of an abolished salt cavern[C]// Proceedings of 2006 ABAQUS China User Conference. Sanya: ABAQUS Inc., 2006: 331 - 338.(in Chinese))
- [8] GAO D L. On instability of wellbore and its trajectory[C]// MAIER G ed. Progress in Safety Science and Technology. Vol. II, Part A. Beijing: Chemical Industry Press, 2000: 179 - 184.
- [9] GAO D L, GAO B K. A method for calculating tubing behavior in HPHT wells[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 41(2): 183 - 188.
- [10] 高德利, 张武攀, 李文勇. 南海西江大位移井钻完井工艺分析研究[J]. 石油钻采工艺, 2004, 26(3): 1 - 6.(GAO Deli, ZHANG Wunian, LI Wenyong. Investigation on the construction of large deformation well at Xijiang in South China Sea[J]. Oil Drilling Technology, 2004, 26(3): 1 - 6.(in Chinese))
- [11] 张效羽, 徐秉业, 赵国珍. 模糊识别及预测在役套管的变形破坏[J]. 天然气工业, 1999, 19(2): 71 - 74.(ZHANG Xiaoyu, XU Bingye, ZHAO Guozhen. Fuzzy identification and prediction on the deformation and failure of casing under service[J]. Natural Gas Industry, 1999, 19(2): 71 - 74.(in Chinese))
- [12] 张效羽. 套管有限元计算的若干问题分析[J]. 天然气工业, 2001, 21(1): 62 - 65.(ZHANG Xiaoyu. Some problems of finite element analysis of casing[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(1): 62 - 65.(in Chinese))
- [13] 郑宏, 李焯芬, 谭国焕, 等. 有限元分析的位移控制法及其应用[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 81 - 85.(ZHENG Hong, LEE C F, THAM L G, et al. Displacement controlled method in finite element analysis and its applications[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 81 - 85.(in Chinese))
- [14] ZHENG H, LIU D F, LEE C F, et al. A sophisticated node-pair model for interface problems[J]. Computers and Geotechnics, 2004, 31(1): 137 - 153.
- [15] 庄茁, 张帆, 岑松, 等. ABAQUS 非线性有限元分析与实例[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 165 - 198.(ZHUANG Zhuo, ZHANG Fan, CEN Song, et al. Examples and analysis of ABAQUS nonlinear finite element method[J]. Beijing: Science Press, 2005: 165 - 198.(in Chinese))
- [16] 沈新普. 超深油井套管三维弹塑性 ABAQUS 有限元分析[J]. 天然气工业, 2007, 27(2): 54 - 56.(SHEN Xinpu. Elastoplastic finite element analysis on casing of super-deep oilwell with ABAQUS[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(2): 54 - 56.(in Chinese))