

# ANSYS 软件在注水井套损预测中的应用

黄小兰<sup>1</sup>, 冒海军<sup>1</sup>, 刘建军<sup>1,2</sup>, 杨春和<sup>1</sup>, 熊俊<sup>1</sup>, 周辉<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉工业学院 多孔介质力学研究所, 湖北 武汉 430023)

**摘要:** 注水井泄压过程中的套损问题是油田开发中遇到的棘手难题。通过对基本方程及定解条件的比较, 将 ANSYS 软件中温度场和应力场的直接耦合分析方法应用于注水井泄压中地层-套管-水泥环系统的渗流-应力耦合分析中。通过数值模拟, 研究了不同条件下地层渗流场、应力场及套管挤压力变化规律, 给出了套管挤压力的计算模板。

**关键词:** 石油工程; 套损; 渗流-应力耦合; 数值模拟; 注水井; ANSYS

**中图分类号:** TE 95

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)增 1-5146-05

## APPLICATION OF ANSYS IN FORECASTING OF WATER INJECTION WELL CASING DAMAGE

HUANG Xiao-lan<sup>1</sup>, MAO Hai-jun<sup>1</sup>, LIU Jian-jun<sup>1,2</sup>, YANG Chun-he<sup>1</sup>, XIONG Jun<sup>1</sup>, ZHOU Hui<sup>1</sup>

(1. *Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;*

2. *Institute of Porous Media Mechanics, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China*)

**Abstract:** Casing damage during water injection well blowout is general in petroleum engineering, and it is difficult to resolve in many oil fields of China. In order to study the mechanism of the problem, fluid-solid coupled model is set up. According to the fundamental equations and boundary conditions, the ANSYS function of temperature field analysis is similar to that of seepage flow field. Based on the similarity of the formulas between the temperature field and fluid field, the coupling element between temperature and stress—Solid 5 Module in ANSYS program is employed to analyze the fluid and pressure coupling in the strata-casing-cement system. The method can solve the seepage flow problem of complex boundaries and mediums. By means of numerical simulation, the fluid field in the strata and the relation between casing extrusion stress and pressure releasing rate are studied. The simulation results show that, the bigger permeability, the bigger extrusion pressure of casing damage as the same relief discharge.

**Key words:** petroleum engineering; casing damage; hydro-mechanical aspect coupling; numerical simulation; water injection well; ANSYS

## 1 引言

注水井泄压过程中的套管损坏(以下简称“套

损”)问题是油田开发中遇到的棘手难题。大庆、胜利、吉林等油田在放喷作业的过程中都发生过不同程度的套损<sup>[1]</sup>。其不仅影响原油生产,而且给油田开采带来了巨大经济损失。由于泄压过程中的套损

**收稿日期:** 2004-10-20; **修回日期:** 2004-12-03

**基金项目:** 中国石油天然气集团公司石油科技中青年创新基金资助项目(C110301)

**作者简介:** 黄小兰(1980-),女,2003年毕业于武汉工业学院土木工程专业,现为硕士研究生,主要从事石油工程中渗流问题方面的研究工作。E-mail: hxl\_huang0226@sina.com。

往往比较迅速,且影响因素较多,因此,有关泄压过程中套损问题的研究成果很少。

注水井泄压过程中的套损是地应力和流体巨大压差联合作用的结果,故应该从油藏流体渗流场与应力场耦合角度来研究泄压过程中的套损问题<sup>[2]</sup>。鉴于达西渗流方程和傅立叶热传导方程形式完全一致,数值分析中可以用温度场来比拟渗流场<sup>[3]</sup>,而 ANSYS 软件提供了温度场和应力场的直接耦合分析模块,因此,可以利用其对注水井泄压中地层-套管-水泥环系统进行渗流-应力耦合分析。

## 2 油藏流固耦合数学模型

当储油层为各向同性的水平层时,在注水过程中,根据渗流力学及质量守恒定律,考虑到井筒、套管及水泥环直径与地层尺寸相比差几个量级,进行渗流分析时可以忽略,故得出地层中渗流场连续性数学模型为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) + q = \mu_s \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

式中:  $K_x, K_y, K_z$  分别为  $x, y, z$  方向渗透系数;  $p$  为总水头压力;  $\mu_s$  为贮水率;  $q$  为源汇项<sup>[4]</sup>。

将油藏中地层骨架视为弹性介质,岩石变形视为小变形,根据弹性力学的有关理论,可以得到储油层中变形场的数学方程。应力场与变形场方程包括以下3组<sup>[5, 6]</sup>:

### (1) 平衡方程

根据有效应力原理,可得用有效应力表示的平衡方程:

$$\sigma'_{ij,j} + (\alpha p \delta_{ij})_{,j} + f_i = 0 \quad (2)$$

式中:  $\sigma'_{ij}$  为有效应力张量,  $\alpha$  为 0~1 的系数,  $p$  为油藏孔隙压力,  $\delta_{ij}$  为 Kronecker 函数,  $f_i$  为外载荷。

### (2) 几何方程

根据变形连续性条件,得几何方程为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_{ij}$  为应变张量,  $u_i$  为位移。

### (3) 本构方程

变形场本构方程采用弹性本构方程,其形式为

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_v \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  为拉梅常数,  $\varepsilon_v$  为体积应变,  $G$  为剪切弹性模量。

用矩阵形式表示为

$$\{\sigma\} = \mathbf{DB}\{U\} + \{p_0\} \quad (5)$$

式中:  $\{\sigma\}$  为岩体的应力列阵,  $\mathbf{D}$  为岩体的弹性矩阵,  $\mathbf{B}$  为岩体的几何矩阵,  $\{U\}$  为岩体的位移列阵,  $\{p_0\}$  为流体的渗透压力列阵。

以上方程构成了低渗透储层流固耦合渗流的数学模型。对于特定问题的求解还必须补充渗流-变形计算的定解条件,主要包括岩土变形场的初始条件和边界条件及流体渗流的初始条件和边界条件。

渗流场计算的边界条件包括定压边界和定流量边界2种。

定压边界条件是给定未知量的边界值,即油藏边界的未知量已知,或井底压力已知,则

$$p_G = f_p(x, y, z, t) \quad (6)$$

式(6)表示外边界  $G$  上一点  $(x, y, z)$  在时间  $t$  时压力  $p$  的给定函数  $f_p(x, y, z, t)$ 。

定流量边界是给定未知量导数的边界值,即油藏边界未知量的导数已知,或井产量已知,则

$$\left. \frac{\partial p}{\partial n} \right|_G = f_q(x, y, z, t) \quad (7)$$

式中:  $n$  为法线方向,  $f_q(x, y, z, t)$  为已知函数。

油藏岩土计算多为第一类边界条件,即岩土体骨架的表面力已知,该力可以根据地应力测试结果和储层岩性、深度等给出<sup>[7]</sup>:

$$\sigma_{ij} L_j = F_i(x, y, z) \quad (8)$$

式中:  $L_j$  为边界的方向导数,  $F_i$  为面力分布函数。

地层在注水及泄压过程中,渗流场对应力场的影响主要体现为渗流孔隙压力以体积力载荷的形式施加于固体骨架。

## 3 计算原理分析

ANSYS 软件中 SOLID 5 模块单元提供了温度场和应力场的数值模拟分析方法,考虑到渗流场的公式与温度场的公式完全相同,可以将温度场的参数用渗流场的参数替换,利用 ANSYS 进行注水井放喷泄压过程的应力场与渗流场耦合计算研究。

ANSYS 软件中对于三维瞬态温度场的场变量

$\Theta(x, y, z, t)$  在直角坐标中应满足的微分方程为<sup>[8]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right) + \rho Q = \rho c \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (9)$$

式中： $\rho$  为材料密度； $c$  为材料比热； $k_x, k_y, k_z$  分别为材料沿  $x, y, z$  方向的热传导系数； $Q$  为物体内部的热源密度；考虑给定温度的第一类边界问题，边界条件为  $\Theta = \bar{\Theta}$  (在  $\Gamma_1$  边界上)。

比较式(1)，(9)，以渗流总水头压力函数  $p$  代替式(9)中  $\Theta$ ；三向渗透系数  $K_x, K_y, K_z$  代替热传导系数；贮水率  $\mu_s$  代替  $\rho c$ ； $q$  代替  $\rho Q$ ，则式(9)即为式(1)。

在温度 - 应力场的耦合作用中，温度场是靠线膨胀系数来影响应力场的，仿照温度线膨胀系数的概念，定义单位渗流水头作用下岩体的体应变  $\theta_0$  为渗透膨胀系数<sup>[9]</sup>。

## 4 计算实例

### 4.1 计算模型

计算时选用 ANSYS 软件中 SOLID5 模块单元，建立套管、水泥环及周围岩石的计算模型(图 1)，取边长为 100 m 的立方体，分 3 层，中间为 5 m 厚的油层，上下为不透水岩层，在该立方体的中心打下井眼。模型顶部距地面 1 000 m，模型的材料参数见表 1。

### 4.2 参数选取

由前述计算原理分析可知，注水井泄压过程中的渗流 - 应力耦合作用问题是温度 - 应力耦合问题的等价形式，只需将热传导系数换成渗透系数，温

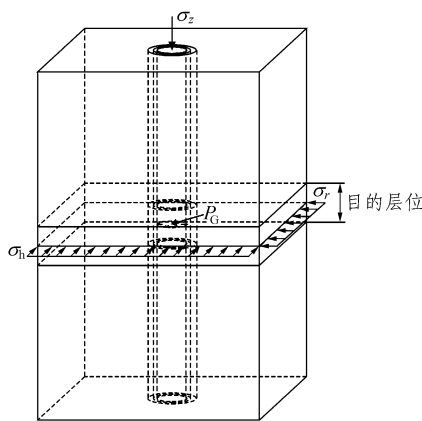


图 1 套管变形计算力学模型

Fig.1 Simulation model of casing deformation

表 1 模型力学参数

Table 1 Mechanical parameters of model

组成部分	弹性模量 $E$ / $10^4$ MPa	泊松比 $\nu$	渗透膨胀系数 $\theta_0$ / $10^{-5}$ MPa $^{-1}$
套管	21.1	0.26	2.23
水泥环	3.0	0.15	22.87
岩石	2.0	0.23	26.46

度换成渗流水头，热流速度换成渗流速度，材料密度与比热的乘积换成贮水率，热流密度换为源汇项，温度线膨胀系数换成渗透膨胀系数，边界条件相应地变为已知水头分布，就可以用 ANSYS 软件中温度 - 应力耦合分析<sup>[10]</sup>功能进行渗流 - 应力耦合的分析计算了。计算时取渗透系数为  $5.0 \times 10^{-7}$  m/s，孔隙度为 24%，贮水率为 0.005。

### 4.3 网格划分

网格划分包括 2 项重要的工作，即单元形状选择和单元大小控制。具体选择哪种形状的单元取决于结构的几何形状、计算精度要求及描述该问题所必需的独立空间坐标的数目。当结构外形比较规则时，采用六面体单元比较合理<sup>[11]</sup>。

在 ANSYS 程序中，单元大小的控制有 2 个层次：全局控制(GLOBE)和局部控制(LOCAL)。就整体来说，单元的大小(即网格的疏密)要根据精度要求和计算机的速度及容量来决定。单元的划分，一方面要考虑计算精度的要求，另一方面要根据计算机的条件，在保证必要的计算精度的条件下，使单元的划分尽量少些。在本文的计算模型中，要求出套管承受的压力，由于套管附近应力集中、应力梯度变化大，所以在划分网格的时候将套管附近划分的比较密，而对于外层的岩体其网格划分就相对稀疏一些。

### 4.4 荷载及边界条件

根据油田测试结果，计算时垂直、水平两向地应力分别取为 20, 30 MPa。设定边界条件为第 1 类边界条件，即岩土体骨架的表面力已知。在进行数值模拟时，首先按给定压差，确定模拟区域内的流体压力分布，然后将水井井底压力设为地层井口压力加上井筒液柱压力，在自由放喷情况下，即为液柱压力，该项研究中自由放喷时井底压力统一设为 10 MPa。井底附近与井底压差分别按 12, 20 MPa 2 种情况分别进行计算。

### 4.5 计算结果与分析

计算时分 2 个荷载步加载：第 1 步计算放喷前

的储层孔隙压力分布，按稳态温度 - 应力耦合的原理进行计算；第 2 步计算放喷过程中井眼附近流体压力的重新分布，按瞬态温度 - 应力耦合的原理计算。

放喷前储层孔隙压力分布见图 2, 3 所示。从图 2, 3 可以看出，靠近井眼附近的压力很高，并且，压力随着距井眼距离的增加而急剧降低。

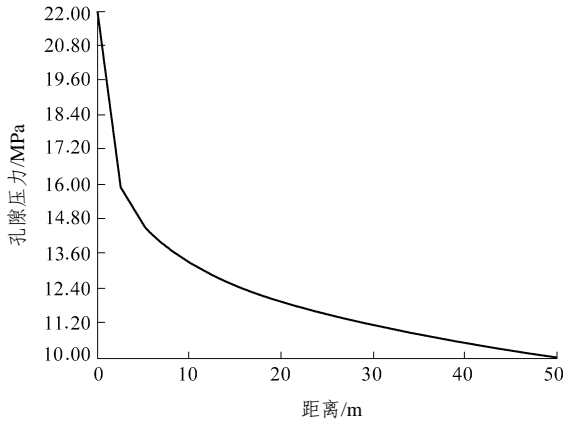


图 2 压差为 12 MPa 下油层孔隙压力分布图

Fig.2 Pore pressure distribution under pressure difference of 12 MPa

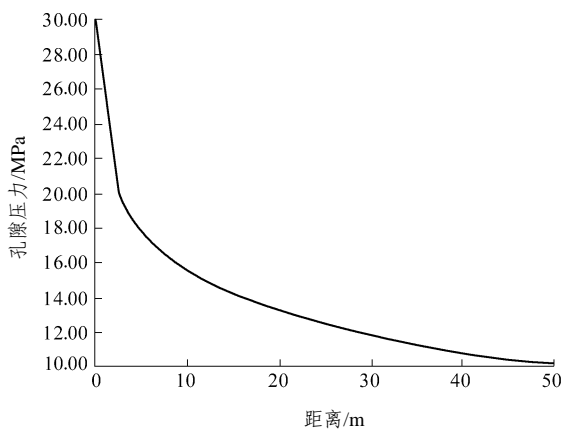


图 3 压差为 20 MPa 下油层孔隙压力分布图

Fig.3 Pore pressure distribution under pressure difference of 20 MPa

放喷过程中，井眼附近流体压力急剧降低，压差为 12 MPa 的情形下，自由放喷后各时段油层内压力的变化关系曲线见图 4~7 所示。从计算结果可以看出，放喷后前几个小时内井眼附近压力降落速度很快，随着时间的推移，压力将会逐渐趋于稳定。

放喷过程中，初始瞬间流量很大，以后迅速减少。通过数值模拟发现，压差分别为 12, 20 MPa 时承受套管挤压力随时间变化的关系如图 8 所示。

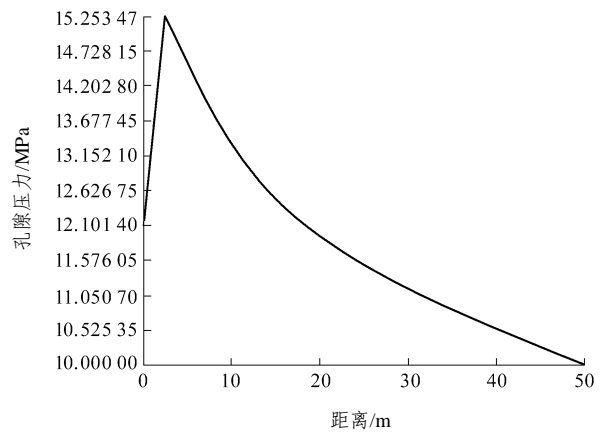


图 4 放喷 9 h 井眼附近压力变化曲线

Fig.4 Pressure curve near borehole after 9 hours' relief of the water injection well

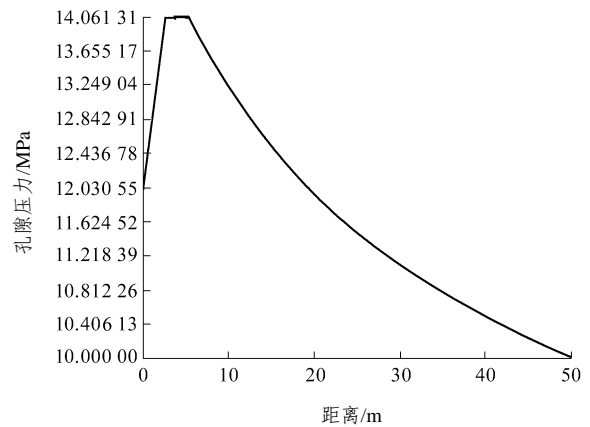


图 5 放喷 27 h 井眼附近压力变化曲线

Fig.5 Pressure curve near borehole after 27 hours' relief of the water injection well

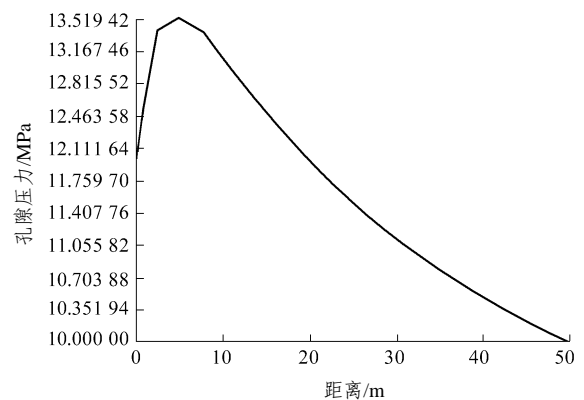


图 6 放喷 54 h 井眼附近压力变化曲线

Fig.6 Pressure curve near borehole after 54 hours' relief of the water injection well

比较 2 条曲线可知，压差为 20 MPa 时套管放喷瞬时承受的挤压力大于压差为 12 MPa 时承受的挤压力。

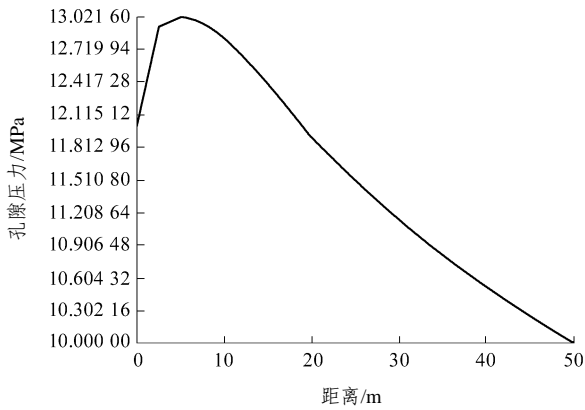


图 7 放喷 99 h 井眼附近压力变化曲线

Fig.7 Pressure curve near borehole after 99 hours' relief of the water injection well

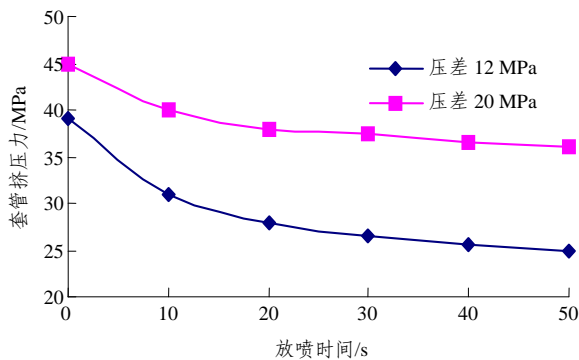


图 8 不同压差下套管挤压力变化曲线

Fig.8 Curves of extrusion pressure changes under different pressure difference

## 5 结 语

上述计算实例表明, 采用 ANSYS 软件中温度场和应力场的直接耦合分析方法, 可以对注水井泄压中地层 - 套管 - 水泥环系统进行渗流 - 应力耦合分析。通过数值模拟, 研究了不同压差下地层渗流场、应力场及套管挤压力变化规律, 给出了套管挤压力的计算模板。模拟结果表明, 套管承受的最大挤压力发生在放喷初始时刻, 从而为油田现场预防该类型套损的发生提供了理论依据。

本文利用 ANSYS 软件对注水井套损进行了预测, 为 ANSYS 软件在渗流 - 应力耦合中的应用提供了有效的解决方案。

### 参考文献(References):

[1] 孟祥羽, 滕新兴, 孙铭新. 胜利油田套管损坏的现状与建议[J]. 石油钻采工艺, 1994, 16(2): 10 - 15.(Meng Xiangyu, Teng Xinxing, Sun Mingxin. Present situation and suggestion about the casing failure in Shengli oilfield[J]. Oil Drilling and Production Technology, 1994,

16(2): 10 - 15.(in Chinese))

[2] 尹中民, 武 强, 刘建军, 等. 注水井泄压对套管挤压力影响的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2 390 - 2 395.(Yin Zhongmin, Wu Qiang, Liu Jianjun, et al. Numerical simulation on effect of pressure relief water injection well on casing squeeze pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2 390 - 2 395.(in Chinese))

[3] 刘建军, 宋义敏, 刘先贵. 三元复合体系乳状液在岩石介质中渗流的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 2): 2 439 - 2 442.(Liu Jianjun, Song Yimin, Liu Xiangui. Numerical simulation of oil-alkaline-surfactant-polymer emulsion flow through rock media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp.2): 2 439 - 2 442.(in Chinese))

[4] 张远君, 王 平. 流体力学大全[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991.(Zhang Yuanjun, Wang Ping. Fluid Mechanics[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1991.(in Chinese))

[5] 刘建中, 刘小立, 李正平. 套管变形的复合力学模型[J]. 石油学报, 2001, 22(3): 75 - 80.(Liu Jianzhong, Liu Xiaoli, Li Zhengping. Petroleum engineering coupling mechanics model of casing deformation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(3): 75 - 80.(in Chinese))

[6] 刘建军, 刘先贵, 胡雅初. 低渗透储层流固耦合渗流规律研究[J]. 低渗透油气田, 2000, 5(2): 37 - 41.(Liu Jianjun, Liu Xiangui, Hu Yareng. Study on fluid-solid coupling flow in low permeable oil reservoir[J]. Journal of Low Permeable Oil and Gas Reservoir, 2000, 5(2): 37 - 41.(in Chinese))

[7] 王越之, 李自俊, 余雄鹰. 按地应力确定套管外挤压力的探讨[J]. 石油机械, 1997, 25(1): 42 - 46.(Wang Yuezhi, Li Zijun, Yu Xiongying. Determing external extrusion force on casing terrestrial stress[J]. CAM, 1997, 25(1): 42 - 46.(in Chinese))

[8] 许玉景, 孙克刚, 黄福才. AYSYS 软件在土坝渗流稳定计算中的应用[J]. 水力发电, 2003, 29(4): 69 - 71.(Xu Yujing, Sun Keli, Huang Fucai. Application of ANSYS in the earth dam seepage flow stability computation[J]. Water Power, 2003, 29(4): 69 - 71.(in Chinese))

[9] 张立翔, 王成武. 小湾电站坝址区渗流与应力场耦合分析[J]. 云南水力发电, 2000, 16(1): 81 - 86.(Zhang Lixiang, Wang Chengwu, Coupling analysis of stress and seepage field sat Xiaowan hydropower project dam site[J]. Yunan Water Power, 2000, 16(1): 81 - 86.(in Chinese))

[10] 谭建国. 使用 ANSYS 6.0 进行有限元分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.(Tan Jianguo. FEA with ANSYS 6.0[M]. Beijing: Peking University Press, 2002.(in Chinese))

[11] 肖亚飞, 杨晓刚. 利用 AYSYS 程序对导管架典型局部构造进行有限元分析的方法探讨[J]. 中国海上油气(工程), 2002, 14(4): 16 - 21.(Xiao Yafei, Yang Xiaogang. Method research of using ANSYS program to analyze local construction on jacket[J]. China Offshore Oil and Gas(Engineering), 2002, 14(4): 16 - 22.(in Chinese))