

文章编号: 1006-6616 (2007) 03-0233-06

基于 MSC MARC 的三维构造应力场数值 模拟与裂缝预测 ——以宝浪油田宝北区块为例

李志勇^{1,2}, 曾佐勋^{1,2}, 黄 郑³, 刘立林^{1,2}, 魏忠元⁴ 张 鲲¹

(1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北 武汉 430074;

2. 华中构造力学研究中心, 湖北 武汉 430074;

3. 河南石油勘探开发研究院, 河南 南阳 473132;

4. 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: MSC MARC 的高度非线性有限元分析能力与强大的二次开发接口为复杂三维地质数值模型的建立与三维构造应力模拟与非线性分析提供了有力工具; 并可以通过二次开放子程序建立复杂的岩石本构与破裂准则。本文基于 MSC MARC 建立了新疆焉耆盆地宝浪油田宝北区块背斜构造三维有限元模型并进行了构造应力模拟分析和裂缝预测。裂缝预测结果与实际动态资料十分吻合。

关键词: MSC MARC; 构造应力场; 数值模拟; 裂缝预测

中图分类号: TU452

文献标识码: A

地壳岩体的变形和裂隙系统的发育主要是构造运动的产物, 裂隙的分布直接受构造应力场特点制约, 又依赖于变形岩石的物性特征^[1]。在含油气系统内油气的生成、运移、聚集和成藏的过程中, 构造应力一方面为油气的运移提供驱动力, 另一方面使岩层发生破裂, 形成断层和裂缝, 为油气的运移和聚集提供通道和圈闭。

对于裂缝性油气藏, 裂缝综合分布规律的研究需要综合应用多学科, 尤其是数学和力学方法。构造应力场及储层构造裂缝的三维数值模拟是数学、力学和地学相互渗透、有机结合的系统, 全过程是地质模型、力学模型和数学模型相互制约的过程^[2,3]。

建立复杂三维地质有限元模型, 进行三维构造应力场数值模拟, 可避免二维分析中构造模型过于简化的不足, 能够施加更符合实际情况的边界条件, 更好地考虑不同层位之间的相互影响、各层厚度变化、岩层产状变化、断裂产状变化等, 模拟结果能够最大程度的逼近实际地质现象。

本文使用高级非线性有限元软件 MSC MARC 建立宝北背斜构造复杂三维有限元数值模型, 进行三维构造应力场的分析, 并进行裂缝预测。

收稿日期: 2007-05-08

基金项目: 国家自然科学基金 (49972068); 中国石化股份有限公司河南油田分公司委托项目; 国家理科基地创建名牌课程项目。

作者简介: 李志勇, 男 (1979-), 博士研究生, 主要从事计算构造学及数值模拟研究。E-mail: lizhye@126.com。

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.

1 MARC 有限元软件简介

MARC 公司始创于 1967 年, 是全球首家非线性有限元软件公司, 创始人是美国著名布朗大学应用力学系教授、有限元分析的先驱 Pedro Marcel。经过三十余年的不懈努力, MARC 软件得到学术界和工业界的大力推崇和广泛应用, 建立了它在全球非线性有限元软件行业的领导地位。

MARC 软件是功能齐全的高级非线性有限元软件, 在国内外众多的有限元软件中, 以其强大的非线性计算功能和良好的二次开发接口著称。MARC 具有极强的结构分析能力, 可以处理各种非线性结构分析。分析采用高数值稳定性、高精度和快速收敛的高度非线性问题求解技术, 可以处理各种线性和非线性结构分析: 包括线性/非线性静力分析、模态分析、简谐响应分析、频谱分析、随机振动分析、动力响应分析、自动的静/动力接触、屈曲/失稳、失效和破坏分析等。为满足工业界和学术界的各种需求, 提供了层次丰富、适应性强、能够在多种硬件平台上运行的系列产品。

随着 MARC 软件功能的不断扩展, 应用领域已迅速扩展到核电、航空、航天、汽车、造船、铁道、石油化工、能源、电子元件、机械制造、材料工程、土木建筑、医疗器材、冶金工艺和家用电器等领域。

MSC. MARC 主要模块为 MSC. MARC MENTAT。MSC. MARC 是高级非线性有限元分析模块, MENTAT 是 MARC 的前后处理图形对话界面。两者严密整合的 MSC. MARC MENTAT 成为解决复杂工程问题, 完成学术研究的高级通用有限元软件。

MSC. MARC 是功能齐全的高级非线性有限元软件的求解器, 体现了 30 年来有限元分析的理论方法和软件实践的完美结合。它具有极强的结构分析能力。它提供了丰富的结构单元、连续单元和特殊单元的单元库, 几乎每种单元都具有处理大变形几何非线性、材料非线性和包括接触在内的边界条件非线性以及组合的高度非线性的超强能力。MARC 的结构分析材料库提供了模拟金属、非金属、聚合物、岩土、复合材料等多种线性和非线性复杂材料行为的材料模型。分析采用具有高数值稳定性、高精度和快速收敛的高度非线性问题求解技术。为了进一步提高计算精度和分析效率, MARC 软件提供了多种功能强大的加载步长自适应控制技术, 自动确定分析屈服、蠕变、热弹塑性和动力响应的加载步长。MARC 卓越的网格自适应技术, 以多种误差准则自动调节网格疏密, 不仅可提高大型线性结构分析精度, 而且能对局部非线性应变集中、移动边界或接触分析提供优化的网格密度, 既保证计算精度, 同时也使非线性分析的计算效率大大提高。此外, MARC 支持全自动二维网格和三维网格重划, 用以纠正过渡变形后产生的网格畸变, 确保大变形分析的继续进行。对非结构的场问题如包含对流、辐射、相变潜热等复杂边界条件的非线性传热问题的温度场, 以及流场、电场、磁场, 也提供了相应的分析求解能力; 并具有模拟流-热-固、土壤渗流、声-结构、耦合电-磁、电-热、电-热-结构以及热-结构等多种耦合场的分析能力。为了满足高级用户的特殊需要和进行二次开发, MSC. MARC 提供了方便的开放式用户环境。这些用户子程序入口几乎覆盖了 MARC 有限元分析的所有环节, 从几何建模、网格划分、边界定义、材料选择到分析求解、结果输出, 用户都能够访问并修改程序的缺省设置。在 MSC. MARC 软件的原有功能的框架下, 用户能够极大地扩展 MARC 有限元软件的分析能力。

MARC 高度非线性能力与强大的二次开发子程序功为地质学研究提供了有力的工具和研

究手段。

2 有限元模型建立

2.1 地质概况

宝浪油田宝北区块位于新疆焉耆盆地博湖拗陷北部凹陷中部的宝浪苏木构造带西北端, 是一个两翼非对称的、呈北西南东动向展布、中部向东突出的弯曲长条状断-背斜构造^[4] (图1)。

宝北区块断层十分发育, 不但使宝北背斜更加复杂, 而且对油-气-水的分布规律等有一定控制作用。断层主要发育在背斜构造的轴部呈雁列式展布, 总体上呈北西走向。以宝北构造核部为中心, 两侧断层相向倾斜, 大体呈背冲对称式几何形态, 是挤压为主的逆冲断层组合。

构造变形机制为力源来自于 NNE—SSW 向的挤压作用。来自北东—南西方向的挤压作用是不均匀的, 背斜轴线的弧形形态显示了中部受到更强烈挤压; 南东段的右阶断层组合显示出南东段具有较强的右行剪切作用; 北西向构造的右行剪切作用与宝北区块局部的横弯双向剪切作用联合, 起主导变形作用的为压扭作用。

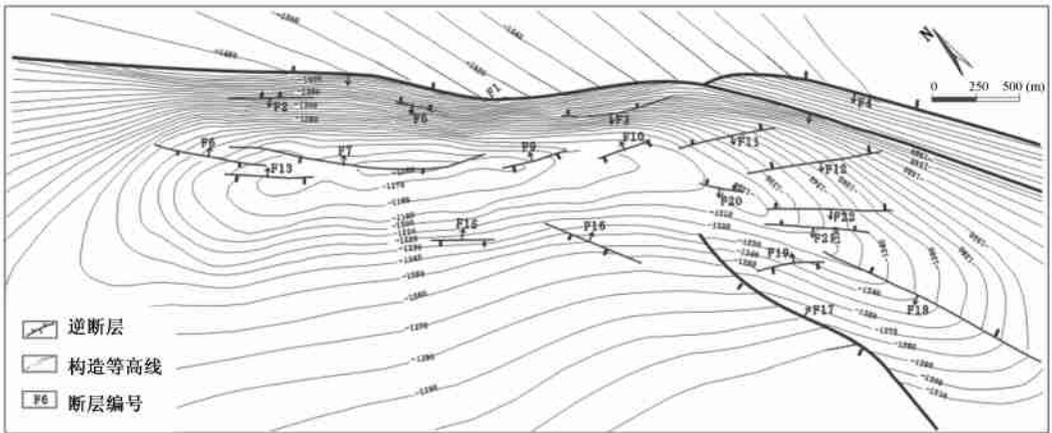


图1 宝北背斜构造形态与断层组合简图

Fig. 1 Combination of faults and shape of the Baobei anticline

2.2 三维有限元模型建立

三维有限元模型的建立以宝北背斜构造地质资料为基础, 考虑油组层位, 断裂分布、构造变形与构造应力场背景。三维模型的建立以褶皱轴迹方向, 即南偏东 50 度, 为 X 轴正向, 垂直褶皱轴迹方向为 Y 向, 垂直水平面方向为 Z 向。模型为 6000 米×2400 米的区域。

通过 MSC MARC 前处理软件 Mentat 以及用户子程序二次开发, 建立宝北背斜构造的三维精确数学模型。目的层细分为三个油组 6 个小层, 以及三个油组之间的两个煤层。三维有限元模型网格共由 15636 个单元和 14564 节点组成, 如图 2 所示。

3 力学参数与边界条件

3.1 力学参数

依据岩石实验所得的岩石力学参数^[9]如表 1。

3.2 边界条件

(1) 位移约束条件: 基底单元底部节点施加 Z 向约束。模型 F1 断层一侧施加 Y 向位移约束。
(2) 边界载荷: 在褶皱西南边界, 即模型南边界的变化梯度面压力载荷。(3) 体力载荷: 单元总体施加垂向重力加速度 G, 模拟岩石静岩压力。

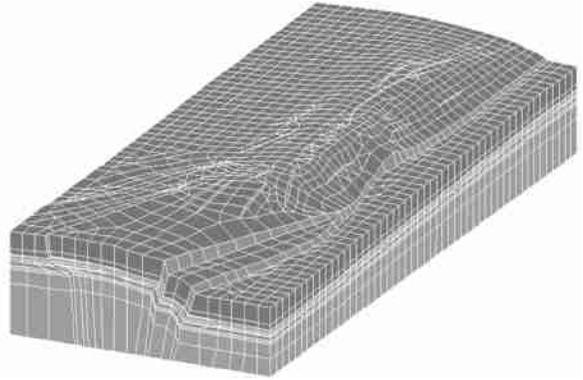


图 2 宝北背斜构造三维有限元网格模型

Fig. 2 3D finite element mesh model of the Baobei anticline

表 1 数值模拟模型分层力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the numerical simulation model

岩性	密度 × 10 ³ kg/m ³	抗张强度 (MPa)	抗压强度 (MPa)	泊松比 (μ)	弹性模量 10 ⁴ MPa
砾岩	2.47	3.73	50.35	0.186	0.758
细砂岩	2.62	3.37	87.75	0.149	1.790
变质岩	2.71	7.89	152.35	0.152	5.070

4 模拟结果与裂缝预测

4.1 岩石破裂准则

修正的三维 Griffith 准则^[6]

为:

当 $\sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0$ 时,

$$\sigma_t = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{8(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}$$

若 $\sigma_t > [\sigma_t]$ 产生张裂缝。

其临界破裂方位由破裂面与最大主压应力之间的夹角 α 来确定。

当 $\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0$ 时,

$$\sigma_t = -\sigma_3$$

此时破裂方向沿最大主压应力 σ_1 的方向。

4.2 模拟结果

模拟得到的目的层三维构造应力场等值云图与切片分别如图 3、4 所示。从应力场模拟结果分析, 在北西段褶皱轴部部位, 主要受到垂直于褶皱轴的 NE—SW 向不均匀挤压, 在褶皱轴部发生脆性破坏和应力释放, 产生与该断层系相伴生的裂缝系统。裂缝走向优势方位与断层走向与褶皱轴迹一致并具有张性性质, 与褶皱作用的纵裂作用有关。在北西向区域, 断裂构造发生右行剪切走滑作用, 导致宝北背斜向东段发生右旋压扭, 构造形态变形强烈。由于南东段发生较强的右旋作用, 裂缝系统具有剪切性质。

宝北背斜构造裂缝发育具有较好的规律性。通过模拟结果的后处理分析, 得到宝北背斜构造裂缝等密度分布图, 如图 5 所示。裂缝主要有两大发育区域:

(1) 北西段条带状裂缝发育区

位于北西段褶皱轴部部位, 发育与断层系相伴生的张性裂缝系统。由于两翼断层为逆冲压性断层, 为裂缝系统提供封闭作用, 因而成为非常好的储油构造。在注水压力达到一定值时, 裂缝很容易扩展并发生连通。沿褶皱轴迹方向成为油水的最佳运移通道。

(2) 南东段扇状裂缝发育区

位于褶皱构造南东端部, 裂缝系统具有剪切性质, 并位于褶皱轴部部位。该区域也成为较好的储油构造区域。

4.3 裂缝预测与动态一致

通过与实际动态注采情况对比, 裂缝发育区与动态具有非常好的一致性。

(1) 地层压力与裂缝发育区一致

裂缝发育区地层压力较高。在有裂缝发育的地区, 地层压力保持水平较高, 采液指数较高; 裂缝不发育的地区产能低, 采油井的地层压力保持水平差^①。

(2) 水淹程度与裂缝发育区一致

裂缝发育区水淹程度大。在背斜轴部部位和背斜端部的断层和裂缝发育区, 水淹程度大, 油井多数发生暴性水淹。而翼部断层和裂缝不发育, 采油指数不高, 水淹程度不大^①。

5 结论

通过宝北区块背斜构造三维构造应力的模拟分析, 对裂缝发育进行了分析和预测。裂缝预测结果与实际动态资料十分吻合。MSC MARC 的高度非线性有限元分析能力与强大的二次

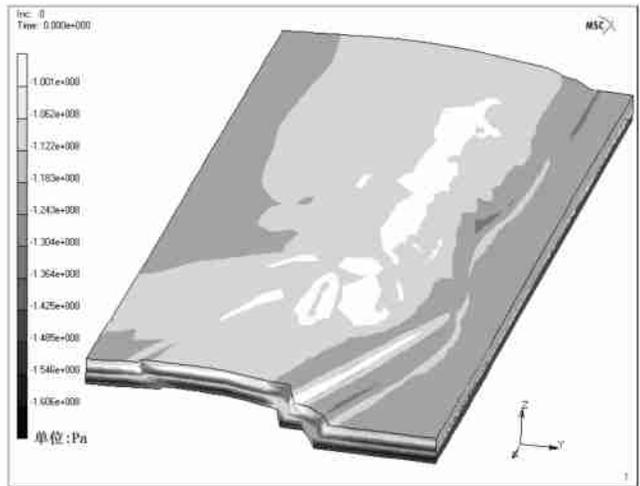


图3 目的层三维构造应力场三维等值云图
Fig. 3 3D contour of the tectonic stress field of the target horizon

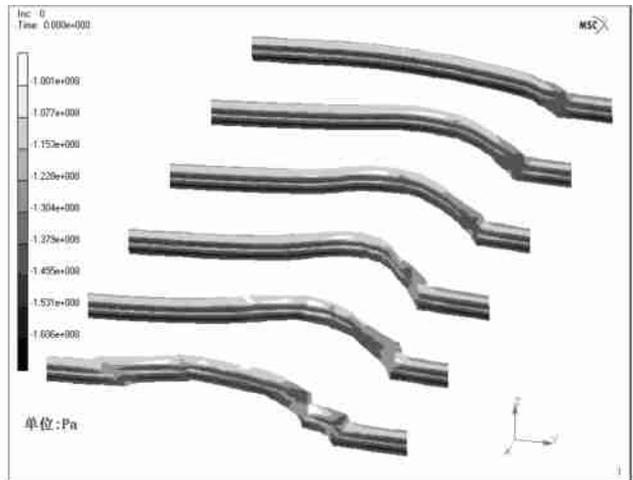


图4 三维构造应力场切片等值云图
Fig. 4 3D slice cloud contour of the tectonic stress field of the target horizon

① 姚光庆. 宝北区块流动单元与水淹规律研究 [R]. 武汉, 中国地质大学 (武汉), 2005

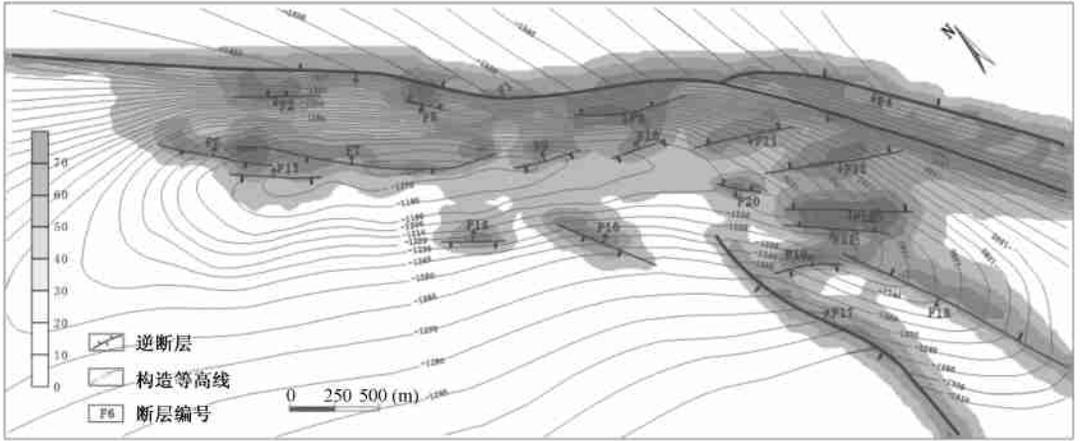


图 5 目的层预测裂缝密度等值线图

Fig. 5 Contours of fracture density of the target horizon

开发接口为复杂三维地质数值模型的建立, 岩石本构与破裂准则, 三维构造应力分析提供了有力工具, 也使得三维构造应力场分析成为油气裂缝分析与预测的有效方法。

参 考 文 献

- [1] 张帆, 贺振华, 黄德济. 预测裂隙发育带的构造应力场数值模拟技术 [J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35 (2): 154 ~ 163.
- [2] 李红南, 黄石岩, 首浩, 等. 低级序复杂断块构造应力场定量模型与油气分布 [J]. 地质力学学报, 2006, 12 (3): 371 ~ 377.
- [3] 孙叶, 谭成轩. 构造应力场研究与实践 [J]. 地质力学学报, 2001, 7 (3): 254 ~ 258.
- [4] 黄郑, 孙尚茹, 刘斌, 等. 宝北背斜三级断层识别及对油田开发的影响 [J]. 河南石油, 2001, 15 (4): 24 ~ 27.
- [5] 陶良军, 冯兴武, 黄青松, 等. 宝浪油田地应力和裂缝特征研究与应用 [J]. 钻采工艺, 2001, 24 (2): 25 ~ 27.
- [6] 周维垣. 高等岩石力学 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.

NUMERICAL SIMULATION OF THE TECTONIC STRESS FIELD AND FORECASTING OF FRACTURES BASED ON MSC MARC

LI Zhi-yong^{1,2}, ZENG Zuo-xun^{1,2}, HUANG Zheng³, LIU Li-lin^{1,2}, WEI Zhong-yuan⁴, ZHANG Kun¹

(1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Huazhong Tectonomechanical Research Center, Wuhan 430074, Hubei, China;

3. Henan Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Nanyang 473132, Henan, China;

4. School of Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: MSC MARC is a nonlinear FEA program. Its ability of highly nonlinear finite element analysis and good secondary development interface enable us to construct a complicated 3D geological numerical

(下转第 232 页)

- [8] 周志华, 曹存根. 神经网络及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [9] 罗四维. 大规模人工神经网络基础 [M]. 北京: 北方交通大学出版社, 2004.
- [10] McCulloch WS, Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity [J]. Bulletin of Mathematical Biophysics, 1943, 5: 115~133.
- [11] 张永双, 曲永新, 等. 硬土—软岩工程地质信息管理分析系统及其应用 [J]. 地球学报, 2001, vol. 22: 277~282.
- [12] Rumelhart D, Ninton G, Williams J. Learning Internal Representation by Error Propagation [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1986.

PREDICTION OF CRUSTAL STRESS OF DEEP-BURIED TUNNELS BASED ON BP ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

SUN Wei-feng¹, TAN Cheng-xuan¹, WANG Zhi-ming², ZHANG Chun-shan¹, WU Shu-ren¹

(1. Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081;

2 No. 1. Water and Electricity Construction Company of Zhejiang Province, Hangzhou 310051, Zhejiang)

Abstract: The measurement of the crustal stress at depth is a difficult problem in geological engineering projects. The crustal stress is hard to determine or measuring data are not ideal because of the limitation of unduly simple research means and measuring techniques. On the other hand, satisfying results can be achieved by artificial neural network (ANN) even though the data have deficiencies such as data noise, partial absence, lack of cognition because of the native advantages: self-learning, self-adaptability, robust, error tolerance and generalization. Based on the BP artificial neural network method, this paper provides a prediction model for the crustal stress values using 6 factors: depth, field density, elastic modulus, triaxial compressive strength (10 MPa confining pressure), acoustic emission stress measurements and fissure density. The authors made hydrofracturing stress measurements in the Qinling deep-buried long tunnel by using the BP artificial neural network model, performed a fitting analysis of the measured data and predicted the crustal stress at depth. The main conclusion is that the BP artificial neural network model is feasible in the prediction of the crustal stress value of deep-buried tunnels.

Key words: deep-buried tunnel; prediction of the crustal stress value; artificial neural network

(上接第 238 页)

model and perform 3D tectonic stress modeling and nonlinear analysis, and complex constitutive equations and fracture criteria of rocks can be established by secondary open subroutines. Based on the finite element analysis software MSC MARC, a 3D finite element model of the Baobei anticline the Yanqi basin, Xinjiang, is established, and the simulation analysis of the tectonic stress field and fracture forecasting are performed. The predicted regions with high-density fractures are in agreement to the real case.

Key words: MSC MARC; tectonic stress field; numerical simulation; forecasting of fractures