

基于有限元方法的储层地应力修正研究

王金铎¹, 孙鲁宁², 王 军³, 王 敏¹, 李 静², 刘旭亮², 刘 晨²

(1. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257015;

2. 中国石油大学(华东)地质力学与工程研究所, 山东 青岛 266580;

3. 中国石化胜利油田分公司油气勘探管理中心, 山东 东营 257200)

摘 要: 地应力是油气储层评价的基础参数, 传统常用的单井地应力求解往往只依托于测井数据及岩石力学实验, 未考虑整体力学模型中地层岩石非均质性对地应力的影响。研究以准噶尔盆地中部 4 区块董 11 井为例, 采用整体力学模型分析的方法对目的储层地应力进行修正。根据地层岩石的物理性质及岩石力学参数对井场周围地区进行划分及整体三维建模, 并用 ANSYS 有限元软件对其整体模型进行力学分析, 从而对地应力计算结果进行修正, 得出研究区目的层地应力分布情况。研究结果表明, 修正后的地应力值与修正前的地应力值在地层薄弱(坚硬)层段水平最小主应力值相差 16%~17% 左右, 水平最大主应力值相差 22%~23% 左右。修正后的地应力可以很好地体现地层在沉积过程中造成的岩石物理性质非均质性对地应力非均质性的影响, 反映了储层地应力的真实变化特征。

关键词: 地应力修正; 声波测井; 数值模拟; 油气储层

中图分类号: TE311; P554

文献标识码: A

RESEARCH ON THE GROUND STRESS CORRECTION OF RESERVOIRS BASED ON THE FINITE ELEMENT METHOD

WANG Jinduo¹, SUN Luning², WANG Jun³, WANG Min¹, LI Jing², LIU Xuliang², LIU Chen²

(1. Research Institute of Exploration and Development of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257015, Shandong, China;

2. Institute of Geological Mechanics and Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China;

3. Management Center of Oil and Gas Exploration of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257017, Shandong, China)

Abstract: Ground stress is the basic parameter for oil and gas reservoir evaluation. The traditional solution of ground stress of single well usually relies on logging data and rock mechanics experiments, without considering the effect of formation rock heterogeneity on ground stress in the whole mechanical model. Therefore, Well Dong 11 in Block 4 in the middle of the Junggar Basin is taken as an example to correct the ground stress of the target reservoir with the analysis method of global mechanics model in this study, then the division of the area around the well site and 3D modeling of the whole well were based on the physical properties of formation rocks and rock mechanics parameters, and the ground stress distribution situation of the target in the study area was obtained with the correction in calculation results

基金项目: 国家科技重大专项 (2016ZX05002-002); 国家自然科学基金 (41272141)

作者简介: 王金铎 (1967-), 男, 博士, 高级工程师, 从事油气地质勘探研究与管理工。E-mail: wangjinduo_slyt@sinopec.com

收稿日期: 2018-09-14; **修回日期:** 2019-01-04; **责任编辑:** 范二平

引用格式: 王金铎, 孙鲁宁, 王军, 等. 基于有限元方法的储层地应力修正研究 [J]. 地质力学学报, 2019, 25 (3): 349-356 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.03.032

WANG Jinduo, SUN Luning, WANG Jun, et al. Research on the ground stress correction of reservoirs based on the finite element method [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25 (3): 349-356 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.03.032

of ground stress through mechanical analysis of the integrated model by using the finite element software ANSYS. The results show that the difference value of the level interval minimum principal stress between before correction and after correction in the weak (firm) stratum is about 16% ~ 17%, and that of the maximum principal stress value is about 22% ~ 23%. The corrected ground stress can well reflect the influence of the heterogeneity of rock physical properties on the heterogeneity of ground stress, and reflect the real variation characteristics of reservoir ground stress.

Key words: ground stress correction; acoustic logging; numerical simulation; oil and gas reservoirs

0 引言

随着油气开发进程的不断深入, 油气勘探开发逐步由常规油气田转向非常规油气田^[1], 非常规油气田地质情况复杂, 获取详细的地应力数据是储层改造的重要依据^[2-3]。计算上覆岩层压力, 通常是由密度测井曲线积分来完成, 而深部地层的最大、最小水平主应力常用的计算方法有水力压裂法^[4-6]、黄氏算法^[7-9] (黄荣樽法) 和 Kasiser 效应法^[10-12]。水力压裂法是通过现场水力压裂时获得破裂压力和瞬时停泵压力, 从而求得最大和最小水平主地应力 σ_H 和 σ_h , 该法所得结果精确度高, 但实施工程量大、花费较高, 而且仅能获得压裂井深处的 σ_H 和 σ_h ; 黄氏算法是对一定数量的砂岩岩心进行室内动静三轴试验, 找出动静岩石物理参数的关系, 然后用声波测井资料等来计算地应力。该方法虽然从理论上有所创新, 但由于岩心实验结果数据分散性较大, 又经多遍数据处理, 使得使用该方法时稳定性不够; Kasiser 效应法利用岩石具有记忆原先最大应力的特性进行实验室单轴压缩试验来求得地应力, 但是求取的是古地应力而非现今地应力。随着非常规油气储层 (页岩储层、致密储层等) 改造难度增加, 传统地应力计算方法的精度已经无法满足实际工程需要。

文章在目前计算地应力方法的基础上对目的储层进行整体上的力学建模、计算与分析, 在对储层的整体力学分析计算过程中基于有限元数值模拟方法对地应力进行修正, 减小传统数据处理过程中产生误差, 得到连续剖面上的最大、最小水平主应力及地应力沿垂向非均质分布情况, 为工程实际提供一种改进的地应力准确计算方法。

1 研究区概况

准噶尔盆地中部 4 区块位于准噶尔盆地昌吉凹

陷东段, 处于昌吉凹陷东部阜东鼻凸带阜康北 1 号构造, 勘探面积 2875 km²。选取中部 4 区块董 11 井的 4880~5025 m 层段为研究对象, 该层段储层位于侏罗系头屯河组, 岩性为砂岩, 其位置如图 1 所示。

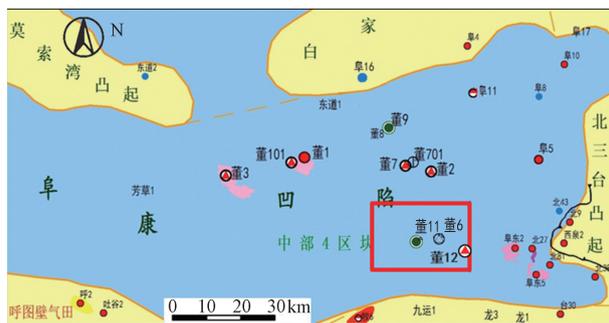


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of the research area

2 研究区地应力计算

2.1 岩石力学参数的计算

储层岩石力学参数计算主要包括动态泊松比、动态杨氏模量、静态泊松比、静态杨氏模量等^[12]。

2.1.1 横波时差获取

计算岩石力学参数必须知道横波时差, 但该井没有进行全波列声波测井, 故横波时差根据常规测井资料获取, 其转化公式如下:

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t_p}{\left[1 - 1.15 \frac{(1/\rho) + (1/\rho^3)}{e^{1/\rho}} \right]^{3/2}} \quad (1)$$

公式中, Δt_s 为地层横波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$; Δt_p 为地层纵波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$; ρ 为地层岩石密度, g/cm^3 。该公式为 Cristensen 等根据实测资料得出的纵波横波关系式, 用于求取地层中砂岩的横波时差。

2.1.2 岩石弹性参数的计算

根据声波时差与岩石弹性力学参数之间的关系^[14-16], 可得到岩石力学参数计算公式如下。

动态泊松比:

$$\mu_d = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \right) \quad (2)$$

动态弹性模量:

$$E_d = \frac{\rho(3\Delta t_s^3 - 4\Delta t_p^2)}{\Delta t_s^2(\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2)} \times 9.299 \times 10^7 \quad (3)$$

剪切模量:

$$G = \frac{\rho}{\Delta t_s^2} \times 9.299 \times 10^7 \quad (4)$$

公式 (2)、(3)、(4) 中, Δt_s 为地层横波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$; Δt_p 为地层纵波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$ 。

地下岩层的应力幅值、加载速度所引起的岩石变形等方面, 更接近岩石静态测试的条件, 在对目的储层进行整体力学模型分析时和实际工程中应采用静态的岩石物理参数。因此, 必须研究动静态参数转换关系, 以求得静态的岩石物理参数。

将岩石静态力学参数与测井资料计算得到的动态岩石力学参数进行线性拟合, 得出砂岩动静态力学参数转换公式如下:

$$\mu_s = 0.2493\mu_d + 0.1266 \quad (5)$$

$$E_s = 0.73E_d + 1.7199 \quad (6)$$

公式 (5)、(6) 中, E_s 、 E_d 为岩石静态杨氏模量和动态杨氏模量, GPa ; μ_s 、 μ_d 为岩石的静态泊松比和动态泊松比。

2.2 研究区地应力计算

2.2.1 地应力计算模型

采用黄氏地应力计算模型^[3-5]进行计算:

$$\sigma_H = \frac{\mu}{1-\mu}(P_0 - \alpha P_p) + \beta_H(P_0 - \alpha P_p) + \alpha P_p \quad (7)$$

$$\sigma_h = \frac{\mu}{1-\mu}(P_0 - \alpha P_p) + \beta_h(P_0 - \alpha P_p) + \alpha P_p \quad (8)$$

公式 (7)、(8) 中, σ_H 为最大水平应力, MPa ; σ_h 为最小水平应力, MPa ; P_0 为垂向应力, MPa ; β_H 为最大水平主应力方向上的构造应力系数; β_h 为最小水平主应力方向上的构造应力系数; P_p 为地层压力, MPa ; μ 为静态泊松比; α 为有效应力系数 (biot 系数); 构造应力系数 β_H 、 β_h 可根据测井资料 (图 2) 进行反求解。

2.2.2 地应力计算结果

根据测井资料计算得到董 11 井地层岩石基本参数如表 1、表 2 所示。

表 1 董 11 井原始测井数据

Table 1 Original logging data of the well Dong 11

层号	顶界深度/m	底界深度/m	层厚/m	纵波时差/($\mu\text{s}/\text{ft}$)	密度/(g/cm^3)	结论
1	4881.7	4883.1	1.4	62.69	2.46	干层
2	4896.5	4904.6	8.1	60.48	2.36	含油水层
3	4948.2	4950.1	1.9	60.22	2.41	干层
4	4960	4962.1	2.1	60.64	2.22	干层
5	4969.6	4970.6	1	64.28	2.13	干层
6	4980.9	4989.3	8.4	61.5	2.37	差油层
7	4993.2	5011.6	18.4	59.87	2.26	含油水层
8	5012.5	5019.2	6.7	60.66	2.39	含油水层
9	5020.9	5027.9	7	61.13	2.39	干层

表 2 董 11 井地层岩石物理参数及地应力计算结果

Table 2 Calculation results of formation rock physical parameters and ground stress of the well Dong 11

层号	横波时差/($\mu\text{s}/\text{ft}$)	泊松比	杨氏模量/ MPa	静态泊松比	静态杨氏模量/ MPa	垂向应力/ MPa	水平最大主应力/ MPa	水平最小主应力/ MPa
1	123.242209	0.325465	39925.5	0.207738	30865.54	112.2952	134.2244	103.3246
2	122.771372	0.339779	39013.7	0.211307	30199.91	112.71265	135.7413	104.0711
3	120.249713	0.332629	41307.1	0.209524	31874.06	113.83045	136.9144	104.782
4	129.550533	0.359714	33449.4	0.216277	26137.97	114.10415	138.0337	106.2004
5	142.575909	0.37244	26745.3	0.219449	21243.94	114.3123	137.7953	107.2011
6	124.423321	0.33835	38104.9	0.210951	29536.48	114.6573	137.7719	105.9069
7	125.946987	0.354034	35878	0.214861	27910.86	115.0552	139.2071	106.7745
8	121.915141	0.335491	39938.3	0.210238	30874.87	115.36455	138.7411	106.3589
9	122.859752	0.335491	39326.5	0.210238	30428.27	115.5612	138.8552	106.5873

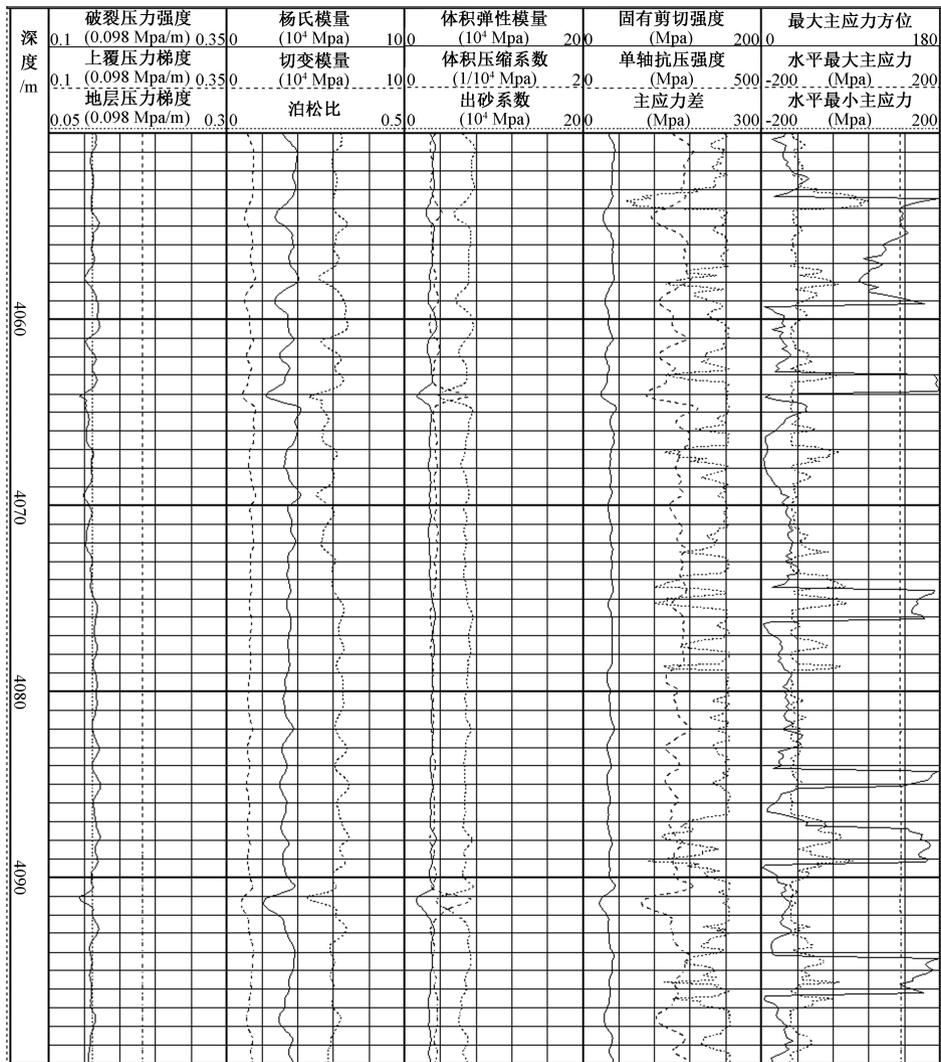


图2 董11井4050~4100 m井段的测井数据

Fig. 2 Logging data of well section at 4050 m ~ 4100 m of the well Dong 11

由表1、表2可知,地层岩石的泊松比沿垂向变化较小,杨氏模量波动较大,但水平最大、最小主应力沿垂向基本上是线性分布。通过计算结果可知由于地层在沉积过程中导致了地层岩石力学参数沿垂向的非均质性,但岩石力学参数沿垂向的非均质性并没有导致地应力沿垂向非均质的分布。说明在计算地应力的过程中只对地应力沿垂向的分布进行了大致描述,没有对地应力沿垂向非均质性进行精确表征。

3 研究区储层地应力的修正

3.1 研究区储层建模

根据董11井的地层岩性及计算的地层岩石力学参数,将4880~5025 m深度划分为16层,其中

包含两个含油层和一个差油层,对选定的目的储层以井场周围区域300 m×300 m的尺寸进行三维模型建模。

由于地层沉积过程复杂,又经历了多期地质构造,因此在建模时要进行简化处理^[17-19],设计以下假设:

(1) 地层在小范围水平面内地层倾角假设为 0° ,即地层在小范围水平面内忽略褶皱、凸起等地质因素影响;

(2) 由于模型井场水平方向区域范围较小,而地层在经历复杂地质构造之后导致了地层岩石物理性质垂向的非均质性,这与测井资料的计算结果是一致的,目的储层岩石沿垂向的非均质性是影响地应力分布的主要因素,故忽略目的储层岩石水平向的非均质性,即在小范围水平面内,

假设地层岩石水平方向各项同性;

(3) 因为要对目的储层进行力学分析, 因此储层岩石垂向的划分主要依据地层岩石的密度、杨氏模量、泊松比等力学参数;

(4) 在计算地应力时不考虑岩石的蠕变性质, 即忽略在地应力作用下岩石长期变形的影响。

3.2 模型应力边界条件确定

在真实地应力情况下, 水平地应力的大小随着深度的增大而增大, 但是由于地层岩石在垂向分布非均质性、非连续性导致了地应力非均质性。水平地应力沿垂向分布整体上呈现增大的趋势, 但在小范围内会因为目的储层岩石力学参数的变化而波动, 其边界应力分布是根据地层岩石的性质变化而变化的, 模型的实际边界应力很难确定, 为了更为真实还原模型的应力边界条件, 文章通过间接的方法确定模型的边界应力条件。具体方法如下。

模型为 300 m×300 m×145 m 的棱柱体, 选取在棱柱体中间直径为 200 m 的圆柱体为计算模型, 模型共计 183672 个单元, 采用 Solid45 单元类型, 通过 SWEEP 方式进行网格划分, 网格类型为六面体单元, 设置网格 SIZE = 5; 地层材料的属性通过测井数据计算得到, 分层后地层材料的静态弹性模量、静态泊松比参数取表 2 计算数据。棱柱体每层的地层属性与圆柱体相同。根据完井报告, 在计算模型深度内 (145 m) 水平最大、最小主应力方向没有发生变化。因此可以在棱柱体的两个侧面分别施加水平最大、最小主应力, 顶面施加地层垂向应力。经过力的传递, 在圆柱体的周围可以形成符合力学受力条件及不均匀的水平应力边界。根据上文计算得到的地应力值, 在模型顶部施加 112.29 MPa 的垂向应力, 在模型两个正交的侧面分别施加 134.22 ~ 138.85 MPa 和 103.32 ~ 106.58 MPa 倒梯形的分布水平应力。通过棱柱体边界对地应力的传递, 使得圆柱体的边界应力更加真实地还原真实应力边界条件。具体模型如图 3 所示。

3.3 研究区储层地应力的修正

经过目标井周边地区的建模、各地层材料属性的定义、网格划分、边界约束及边界应力的施加、求解计算^[20], 最后计算求得该井目的层周边地区边界应力分布云图如图 4、图 5、图 6、图 7 所示。

根据计算所得的应力云图可以得到目的储层

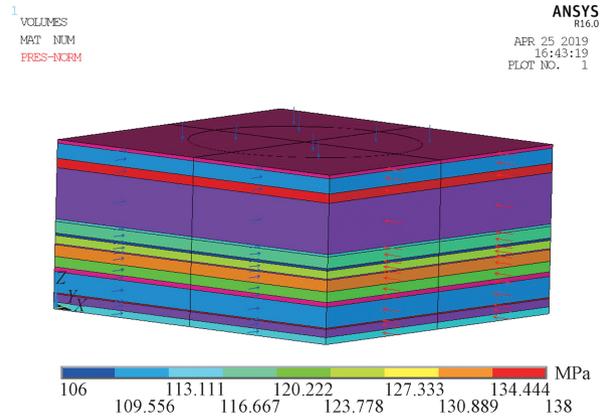


图 3 计算模型

Fig. 3 Computational model

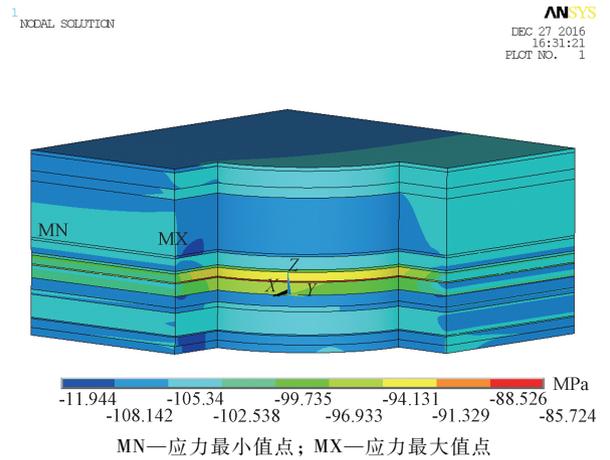


图 4 计算模型最小主应力分布云图

Fig. 4 Nephogram of minimum principal stress distribution in the computational model

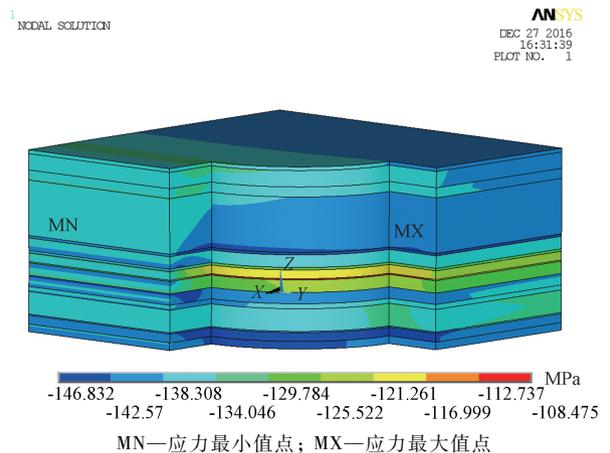


图 5 计算模型最大主应力分布云图

Fig. 5 Nephogram of maximum principal stress distribution in the computational model

井场周围区域的地应力分布情况及变化趋势, 该目的层的水平最大主应力在 130 ~ 140 MPa 左右,

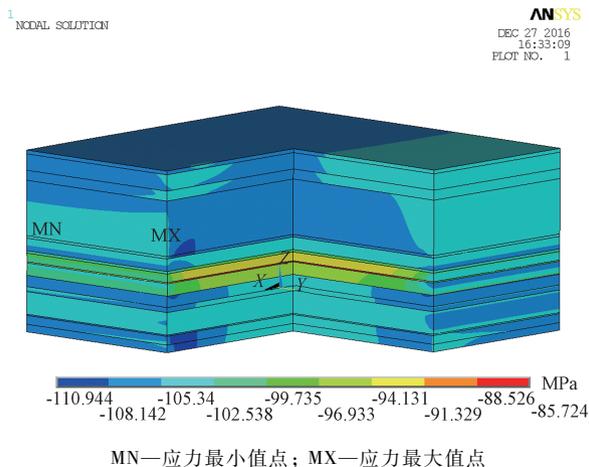


图 6 井场内部最小主应力分布云图

Fig. 6 Nephogram of minimum principal stress distribution in the well site

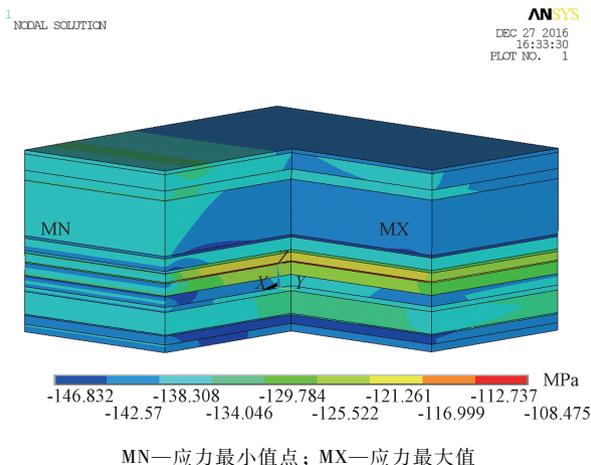


图 7 井场内部最大主应力分布云图

Fig. 7 Nephogram of maximum principal stress distribution in the well site

水平最小主应力在 109~120 MPa 左右, 最大主应力和最小主应力在 4960~4980 m 深度范围内均出现主应力值变小的现象。模拟结果清晰地显示井及周边地区目的层的应力分布状态, 为非常规油气层的开采和改造提供了有效的地应力依据, 弥补了常规测井过程中地层地应力数据的不足, 准确还原了该井场区域三维地应力分布情况。

3.4 地应力修正前后结果对比分析

经过上述计算, 对董 11 井目的储层 4880~5025 m 井段井中心位置水平最大和水平最小主应力沿深度方向进行数据提取, 可以得出井中心位置的应力随深度变化曲线图, 如图 8 所示。

由图 8 可知, 修正前后的地应力值在部分地层有较为明显的波动。在 4960~4980 m 深度处, 修

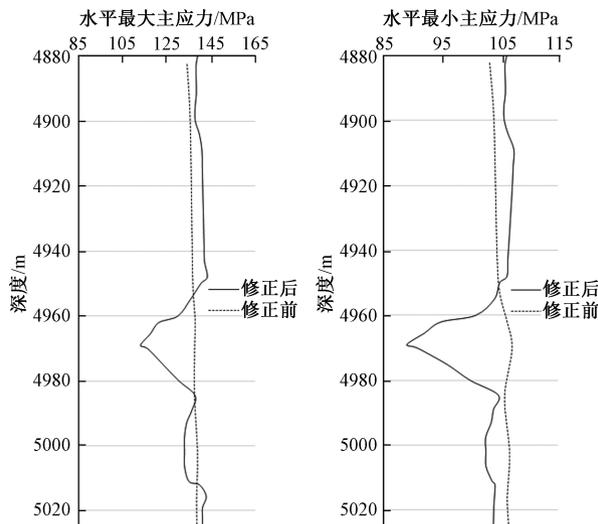


图 8 模型 4880~5025 m 深度中心轴线上修正前后的最大、最小水平主应力曲线图

Fig. 8 Maximum and minimum horizontal principal stress curves before and after correction on the center axis of the model from 4880 m to 5025 m

正后的水平最大、最小主应力均出现最小峰值, 修正前后的地应力值差值在 15 MPa 左右。分析其主要原因是由于在深度 4960~4980 m 深度处的地层岩石杨氏模量减小导致该井段的水平最大、最小地应力出现极小峰值。由此可知地层在沉积过程中导致目的储层岩石力学参数沿垂向的非均质性变化, 从而导致地应力沿垂向非均质分布。模拟结果表明, 根据实际测井资料数据计算得到的岩石力学参数对目的储层进行分层, 能够反映岩石物理性质的非均质性对储层地应力真实变化特征的影响; 分层尺寸与实际测井资料相匹配, 可以保证模型模拟结果的计算精度。对比可知以往地应力的计算方法忽略了地层岩石的物理参数对地应力的影响, 准确描述地应力垂向的非均质性, 可以对后期非常规油气储层改造方案设计提供科学依据。

4 结论

(1) 在垂向连续地层中, 地层岩石物理性质的非均质性导致地层中的薄弱(坚硬)层存在地应力突变现象, 在地层薄弱(坚硬)层段水平最小主应力值相差 16%~17%, 水平最大主应力值相差 22%~23% 左右。

(2) 根据地层岩石物理特性的分布情况, 地

层岩石杨氏模量在 4960~4980 m 深度处出现减小现象,导致目的储层的薄弱层地应力出现极小峰值;在岩石杨氏模量突增的坚硬层出现极大峰值。

(3) 模拟结果表明,根据实际测井资料数据获取地层岩石物理特性的分布情况,并以此进行井场地层划分的建模方法可以体现岩石物理性质的非均质性,修正后的地应力能够很好地反映储层地应力的真实变化特征。

(4) 在传统地应力计算方法的基础上进行了修正,得到目的储层段井场周围区域的三维地应力场分布情况,可以减小以往算法(黄荣樽算法、水力压裂法等)在反复计算过程中产生的传递误差及地应力不连续的缺点,为地应力计算提供了一种新的改进算法。

参考文献/References

- [1] JIU K, DING W L, HUANG W H, et al. Simulation of paleotectonic stress fields within Paleogene shale reservoirs and prediction of favorable zones for fracture development within the Zhanhua Depression, Bohai Bay Basin, east China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, 110: 119-131.
- [2] LIAN P Q, CHENG L S, DENG B Z. Simulation of ground stress field and fracture anticipation with effect of pore pressure [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2011, 56 (1): 34-41.
- [3] 钟城, 秦启荣, 周吉羚, 等. 现今地应力对富有机质页岩断层封闭性的研究——以川东南丁山地区龙马溪组为例 [J]. *地质力学学报*, 2018, 24 (4): 452-464.
ZHONG Cheng, QIN Qirong, ZHOU Jiling, et al. Study on fault sealing of organic-rich shale by present stress: a case study of Longmaxi Formation in Dingshan Area, Southeast Sichuan [J]., 2018, 24 (4): 452-464. (in Chinese with English abstract)
- [4] 杨红, 许亮, 何衡, 等. 利用测井、压裂资料求取储层地应力的方法 [J]. *断块油气田*, 2014, 21 (4): 509-512.
YANG Hong, XU Liang, HE Heng, et al. Method for obtaining ground stress of reservoir using logging and fracturing data [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2014, 21 (4): 509-512. (in Chinese with English abstract)
- [5] 余雄鹰, 王越之, 李自俊. 声波法计算水平主地应力值 [J]. *石油学报*, 1996, 17 (3): 59-63.
YU Xiongying, WANG Yuezhi, LI Zijun. Calculation of horizontal principal in-situ stress with acoustic wave method [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1996, 17 (3): 59-63. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李静, 查明, 刘振. 基于声波测井资料的地应力分布研究——以饶阳凹陷任北奥陶系潜山为例 [J]. *岩土力学*, 2011, 32 (9): 2765-2770.
LI Jing, ZHA Ming, LIU Zhen. Research on crustal stress distribution based on acoustic logging data——Taking North Region of Renqiu Ordovician Buried Hill of Raoyang Depression for example [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32 (9): 2765-2770. (in Chinese with English abstract)
- [7] 闫萍. 利用测井资料计算地应力及其在山前构造带的应用研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2007.
YAN Ping. The earth stress calculation using well logging data and its applied research in piedmont structure [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [8] 闫萍, 孙建孟, 苏远大, 等. 利用测井资料计算新疆迪那气田地应力 [J]. *新疆石油地质*, 2006, 27 (5): 611-614.
YAN Ping, SUN Jianmeng, SU Yuanda, et al. The earth stress calculation using well logging data in Dina gas field of Xinjiang [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27 (5): 611-614. (in Chinese with English abstract)
- [9] 冉利民. 镇泾油田地应力研究及其应用 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2014.
RAN Limin. The study of formation stress and its application in the Zhenjing Oil field [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张景和, 刘翔鄂, 刘勇谦. 利用岩石声发射 Kaiser 效应测地应力的新方法 [J]. *岩石力学与工程学报*, 1987, 6 (4): 347-356.
ZHANG Jinghe, LIU Xiange, LIU Yongqian. A new method for gauging Geostress in rock by Kaiser's effect of acoustic emission [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1987, 6 (4): 347-356. (in Chinese with English abstract)
- [11] 鲍洪志, 孙连环, 于玲玲, 等. 利用岩石声发射 Kaiser 效应求取地应力 [J]. *断块油气田*, 2009, 16 (6): 94-96.
BAO Hongzhi, SUN Lianhuan, YU Lingling, et al. Obtainment of ground stress by Kaiser effect of rock acoustic emission [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2009, 16 (6): 94-96. (in Chinese with English abstract)
- [12] 杨秀娟, 张敏, 闫相祯. 基于声波测井信息的岩石弹性力学参数研究 [J]. *石油地质与工程*, 2008, 22 (4): 39-42.
YANG Xiujuan, ZHANG Min, YAN Xiangzhen. Study on acoustic logging-based rock elasticity parameters [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2008, 22 (4): 39-42. (in Chinese with English abstract)
- [13] YIN S, ZHOU W, SHAN Y M, et al. Assessment of the geostress field of deep-thick gypsum cap rocks: A case study of Paleogene Formation in the southwestern Tarim Basin, NW China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*,

- 2017, 154: 76-90.
- [14] 秦向辉, 谭成轩, 孙进忠, 等. 地应力与岩石弹性模量关系试验研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (6): 1690-1695.
QIN Xianghui, TAN Chengxuan, SUN Jinzhong, et al. Experimental study of relation between in-situ crustal stress and rock elastic modulus [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (6): 1690-1695. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘之的, 夏宏泉, 陈平. 岩石泊松比的测井计算方法研究 [J]. 测井技术, 2004, 28 (6): 508-510.
LIU Zhidi, XIA Hongquan, CHEN Ping. On calculating method of the rock Poisson ratio using well logging data [J]. Well Logging Technology, 2004, 28 (6): 508-510. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李静, 刘震, 张媛, 等. 基于多元线性回归方法的地应力研究 [J]. 科学技术与工程, 2010, 10 (25): 6163-6165, 6171.
LI Jing, LIU Zhen, ZHANG Yuan, et al. The research of crustal stress distribution by using multivariate linear regression [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10 (25): 6163-6165, 6171. (in Chinese with English abstract)
- [17] 孙连环, 鲍洪志, 杨顺辉. 准噶尔盆地中部区块地应力求取研究 [J]. 石油钻探技术, 2007, 35 (2): 18-20.
SUN Lianhuan, BAO Hongzhi, YANG Shunhui. Investigation of terrestrial stress in middle Zhunger basin [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35 (2): 18-20. (in Chinese with English abstract)
- [18] 闫相祯, 王保辉, 杨秀娟, 等. 确定地应力场边界载荷的有限元优化方法研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32 (10): 1485-1490.
YAN Xiangzhen, WANG Baohui, YANG Xiujuan, et al. Finite element optimization method of boundary load of in-situ stress field [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (10): 1485-1490. (in Chinese with English abstract)
- [19] 侯明勋, 葛修润. 三维地应力计算模型研究 [J]. 岩土力学, 2007, 28 (10): 2017-2021.
HOU Mingxun, GE Xiurun. Study on a calculation model for 3D in-situ rock stress tensor [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (10): 2017-2021. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘爱华, 杨清, 吴均平. ANSYS 三维地应力场数值模拟方法应用研究 [J]. 地质力学学报, 2013, 19 (2): 133-142.
LIU Aihua, YANG Qing, WU Junping. A practical ANSYS 3-D numerical simulation method for in-situ stress field [J]. Journal of Geomechanics, 2013, 19 (2): 133-142. (in Chinese with English abstract)