

# 海拉尔盆地复杂岩性储层三维地应力模拟研究

张永平<sup>1,2</sup>, 王磊<sup>1,2</sup>, 张浩<sup>1,2</sup>, 刘宇<sup>1,2</sup>, 任伟<sup>1,2</sup>, 高天硕<sup>1,2</sup>

1. 中国石油大庆油田有限责任公司采油工程研究院 黑龙江大庆 163458

2. 黑龙江省油气藏增产增注重点实验室 黑龙江大庆 163458

通讯作者:Email:wl1164667919@163.com

项目支持:中国石油天然气股份有限公司“十三五”重大科技专项“大庆油气持续有效发展关键技术研究与应用”(2016E-0211)

引用:张永平,王磊,张浩,等. 海拉尔盆地复杂岩性储层三维地应力模拟研究[J]. 油气井测试,2020,29(4):1-7.

Cite: ZHANG Yongping, WANG Lei, ZHANG Hao, et al. 3D geostress simulation to complex lithologic reservoirs in Hailar basin [J]. Well Testing, 2020,29(4):1-7.

**摘要** 海拉尔盆地呼南次凹南一段储层岩性复杂,开发难度大。为明确地应力分布情况,以区块地质、构造、沉积特征为基础,结合室内实验结果,采用非均质连续介质力学模型处理断层,建立了基于有限元的复杂岩性储层三维地应力模型,模拟了该区块地应力分布情况,分析了区块地应力场空间分布规律。研究结果表明,深度、断层是影响地层水平主应力分布的重要因素,深度增加,地层水平主应力增加;断层附近存在应力集中区域,极大影响水平主应力。应用三维地应力数值模型计算不同井相应深度处的地应力大小,与实例井测试压裂解释应力结果符合率90%以上。该研究可为海拉尔盆地复杂岩性储层压裂设计提供指导,为区块高效开发奠定基础。

**关键词** 海拉尔盆地;复杂岩性;压裂设计;有限元;三维地应力模拟;地应力分布**中图分类号**:TE353 **文献标识码**:A **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.04.001

## 3D geostress simulation to complex lithologic reservoirs in Hailar basin

ZHANG Yongping<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>1,2</sup>, ZHANG Hao<sup>1,2</sup>, LIU Yu<sup>1,2</sup>, REN Wei<sup>1,2</sup>, GAO Tianshuo<sup>1,2</sup>

1. Oil Production Engineering Institute, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163458, China

2. Heilongjiang Provincial Key Laboratory for Increasing Production and Injection of Oil and Gas Reservoirs, Daqing, Heilongjiang 163458, China

**Abstract:** Reservoirs in the southern member 1 in the Hunan secondary sag in the Hailar Basin are complex and difficult to be developed. Based on the regional geology, structure and sedimentation and laboratory experimental results, and using a mechanical model of heterogeneous continuous media to deal with faults, a 3D geostress model was established to simulate the geostress and analyze its spatial distribution in the complex lithologic reservoirs. The results show that depth and faults are important factors that affect the distribution of the horizontal principal stress; as the depth increases, the horizontal principal stress increases; the stress is concentrated near the faults, and greatly affects the horizontal principal stress. The geostresses modeled by the 3D numerical model at different depths in different wells are consistent with the geostresses from fracturing interpretation by over 90%. This study is helpful to designing reservoir fracturing stimulation for complex lithologic reservoirs in Hailar Basin. It lays a foundation for efficient regional development.

**Keywords:** Hailar basin; complex lithology; fracturing design; finite element; 3D geostress simulation; geostress distribution

呼和湖凹陷为海拉尔盆地中的一个重要凹陷,大致沿北东向展布,构造上属于海拉尔盆地东南部呼和湖拗陷西北的次一级负向构造单元,并获得低产油流,具有非常丰富的勘探潜力<sup>[1-4]</sup>。对于低产储层,其有效开发手段是进行水力压裂改造,而地应力场的大小和方向控制着人工裂缝的形成和展布<sup>[5-8]</sup>,是压裂设计考虑的重要因素,地应力状态的准确性直接影响水力压裂的最终效果。

国外对于地应力的研究开展的较早。1978年, Brown E. T. 等<sup>[9]</sup>对大量地应力测量数据统计分析,得出了地应力与深度的规律。近年来,地应力模拟成为水力压裂领域关注的焦点之一。2011年,张广明等<sup>[10]</sup>采用专业地质建模软件 Petrel 建立地质模型,采用自编程序把地质模型转换为有限元模型,导入到有限元软件 Abaqus 中,进行有限元数值模拟,得到了模拟区域的三维应力场分布。地应力模

拟在页岩储层中开展的较多<sup>[11-13]</sup>。2016年,丁文龙等<sup>[14]</sup>针对页岩储集层的特点和裂缝发育特征,从地质成因的角度,明确了页岩储层构造应力场模拟数值模拟与裂缝分布预测的方法。2017年,胡耀方等<sup>[15]</sup>利用多元线性回归方法求解页岩气储层地应力场,并在传统方法上增加三角分布载荷,模拟了储层非均质地应力,以提高地应力场的计算精度,但回归需要大量的实测点数据。2019年,李卓沛等<sup>[16]</sup>提出了一种新的页岩气三维地应力建模方法——以单井地应力模型为基础,综合考虑密度积分、欠压实作用、有效应力比及地质统计学等相关理论和方法,获取描述地应力各个要素的三维模型。

目前,地应力分布规律研究对于断层发育、结构多样,非均质性强的复杂岩性储层缺少有效的方法,其地应力场分布描述研究较少,尚处于探索阶段。在地应力场的数值模拟方面,有限元法是目前应用最广泛的方法之一<sup>[17-19]</sup>。本文采用非均质连续介质力学模型处理断层,应用有限元法建立了断层发育的呼南次凹南一段三维地应力模型,明确了储层地应力分布规律,分析了地应力的影响因素,并与实例井进行了对比,验证了模型的准确性,为区块高效开发奠定基础。

## 1 储层地应力数学模型

地下的岩层是处于三轴应力状态下的,通常用垂向应力( $\sigma_v$ )、最大水平主应力( $\sigma_H$ )、最小水平主应力( $\sigma_h$ )等三个法向应力来表示地层岩石的应力环境(图1)。一般情况下,三轴应力是不等的。按照岩石力学的规定,压应力为正、拉张力为负。

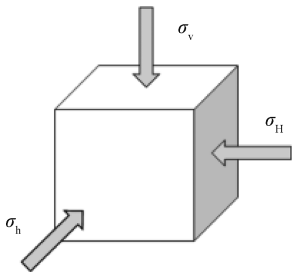


图1 地应力表示方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of geostress representation

地应力的来源比较复杂,但其主要是由上覆岩层压力、构造应力等产生的应力构成。

### 1.1 垂向应力

由地层上覆岩层的重量产生的应力为垂向应力( $\sigma_v$ ),主要取决于埋深和岩石的体积密度。垂向应力的大小可通过密度测井曲线的积分来计算,即

$$\sigma_v = \rho_{\text{平均}} h_0 g + \int_{h_0}^h \rho g dh \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为上覆岩层密度, $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $h_0, h$ 分别为研究层位起止深度, $\text{m}$ ;  $g$ 为重力加速度, $\text{m}/\text{s}^2$ 。

假设上覆岩层重量产生的水平分量在各个方向上是相等的,那么其任意方向的正交应力可以由下式确定,即

$$\sigma_h = \sigma_v \left( \frac{v}{1-v} \right)^{1/n} - p_b \quad (2)$$

式中: $v$ 为储层岩石泊松比; $n$ 为经验常数; $p_b$ 为孔隙流体压力,MPa。

假设有效应力系数 $a$ 在水平方向上相等,那么上覆岩层在各个方向上产生的应力可表示为

$$\begin{cases} \sigma_v = \int_0^h \rho(h) dh \\ \sigma_H = \frac{v}{1-v} (\sigma_v - ap_b) + ap_b \\ \sigma_h = \frac{v}{1-v} (\sigma_v - ap_b) + ap_b \end{cases} \quad (3)$$

### 1.2 构造应力

因为构造应力的影响,使得水平方向的应力不再相等。在油田的应用研究中,构造应力通常指由于构造运动引起的地应力的增量。构造应力在水平方向上的分量可以用上覆岩层的压力来进行计算,计算公式如下,即

$$\begin{cases} \sigma_x = \xi_x (\sigma_v - ap_b) + ap_b \\ \sigma_y = \xi_y (\sigma_v - ap_b) + ap_b \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\sigma_x, \sigma_y$ 分别为构造运动在水平方向 $x, y$ 方向上引起的构造应力,MPa; $\xi_x, \xi_y$ 分别为水平 $x, y$ 方向的构造应力系数。

### 1.3 总地应力

处于三轴应力作用下的地层,其垂向应力就是由上覆岩层重量产生,而水平方向的主应力则是上述应力在水平方向的产生的应力之和,地层总的地应力的大小为

$$\begin{cases} \sigma_v = \sigma_v \\ \sigma_H = \sigma_H + \sigma_x \\ \sigma_h = \sigma_h + \sigma_y \end{cases} \quad (5)$$

## 2 呼南次凹南一段三维地应力模型的建立

根据呼南次凹南一段构造特征、三维地震资料解释成果及实钻资料等,建立能够反映区块复杂的地质构造的地质模型。

2.1 地质模型的建立

根据南一段顶部构造图、厚度构造图、地震反射层海拔高度与实钻资料,以及地层分层数据等相关资料建立该区块地质构造模型。以研究区块地质特征及断层为主要参数,通过模拟进行数据体参数化,得到目的层的曲面图,结合顶面构造图的外轮廓描绘,成形目的层的三维模型。

对构造图提取断层带数据,主要考虑对构造起控制作用的大断层和井周边的断层,并对断层进行简化和合并处理,如图 2 所示。将三维立体模型和断层模型进行空间组合,得到地质模型立体图,如图 3 所示。可以看出目的层地层的起伏形态,南一段的地层整体上近似为西北高东南低的近楔形体,符合区块的构造特征。

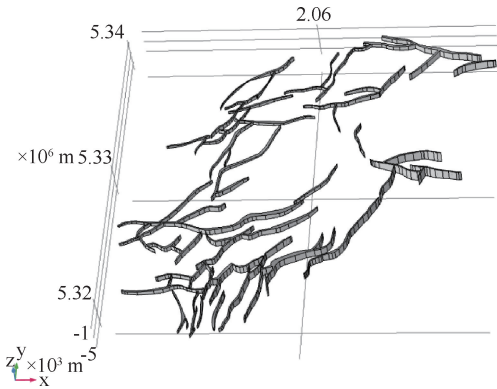


图 2 南一段断层模型图  
Fig. 2 Faults model of N\_1

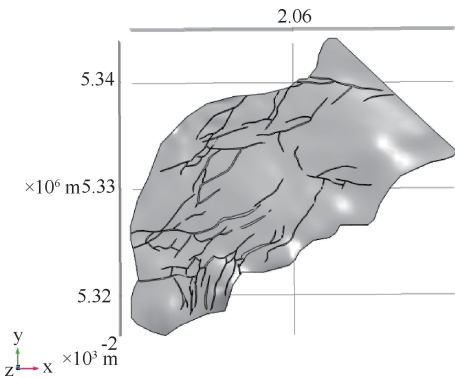


图 3 南一段三维地质模型图  
Fig. 3 3D geological model of N\_1

2.2 有限元模型的建立

将地质模型转化为有限元数学模型,南一段模型采用四面体单元对模型进行剖分,为精确表征断层附近应力分布,并对断层及其附近区域的单元网格加密,共划分为  $81.41 \times 10^4$  个单元,平均质量为 0.633 5,该模型的具体网格分布如图 4 所示,基本上反映了该区块主体部分的地质构造特征。

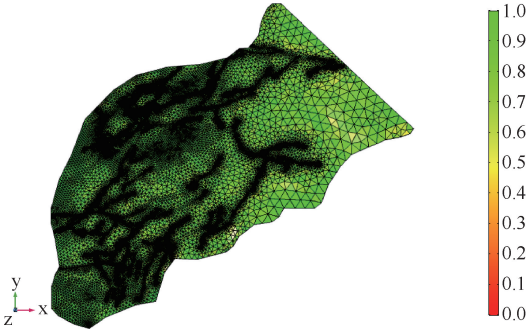


图 4 南一段网格质量图  
Fig. 4 Grid quality diagram of N\_1

2.3 岩石力学参数的确定

离散后的地质体是由断层及不同性质的围岩组成,以岩石力学实验及岩石力学参数测井解释结果为基础,采用断层连续介质力学模型,在区域应力场条件下确定断层介质力学参数,岩石力学参数见表 1。

| Table 1 Rock mechanical parameter of the model |            |       |            |       |
|--|------------|-------|------------|-------|
| 层位   | 地层杨氏模量/GPa | 地层泊松比 | 断层杨氏模量/GPa | 断层泊松比 |
| 南一段  | 19.6       | 0.287 | 7.84       | 0.31  |

根据研究区域现今构造应力场最大主压应力方向为近东西向,水平构造作用力作用通过对地质隔离体进行加载实现,模型深度方向为 z 轴,z 轴铅直向上为正,x 方向指向东,y 方向指向北,模型无移动,不可压缩,模型 x、y 施加水平构造应力,z 方向施加为上覆岩石压力。加载方式如图 5 所示。

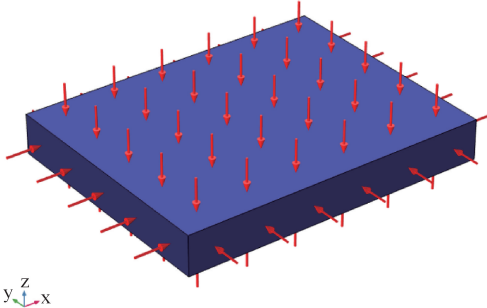


图 5 边界力加载方式示意图  
Fig. 5 Boundary force loading mode

3 呼南次凹南一段三维地应力场的模拟

根据建立的地应力模型对呼南次凹南一段进行三维地应力模拟,分析地应力分布规律和影响因素。

3.1 地应力分布规律

地质构造及断层影响应力分布,地下情况复



杂,只能通过测井获取井点资料,通过三维地质模型可以直观分析最大水平主应力场及最小水平主应力场分布。

### 3.1.1 最大水平主应力大小分布

南一段最大水平主应力方向三维示意图,如图6所示,最大水平主应力方向总体呈西东向。南一段最大水平主应力等值线大小分布图如图7所示,南一段地层的最大水平主应力呈现为东区及西南区较高的现象,整体最大水平主应力集中分布在38~50 MPa之间,由于断层发育带处,应力出现扩散,最大主应力出现低值,故应力低值区域主要分布在断层内,大小集中在27~35 MPa之间。

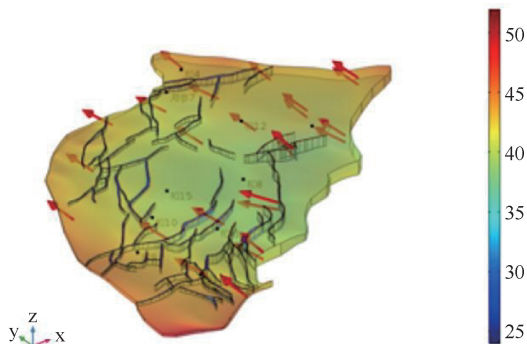


图8 最小水平主应力方向三维示意图  
Fig. 8 3D schematic direction of minimum horizontal principal stresses

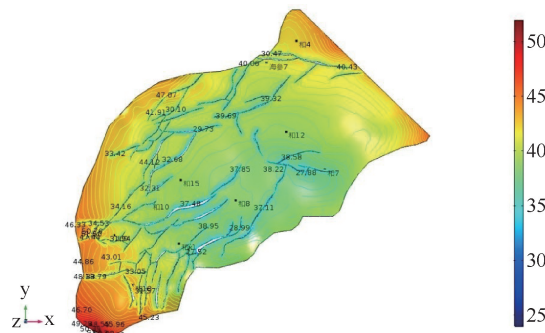


图9 最小水平主应力等值线大小分布图  
Fig. 9 Contours distribution of minimum horizontal principal stresses

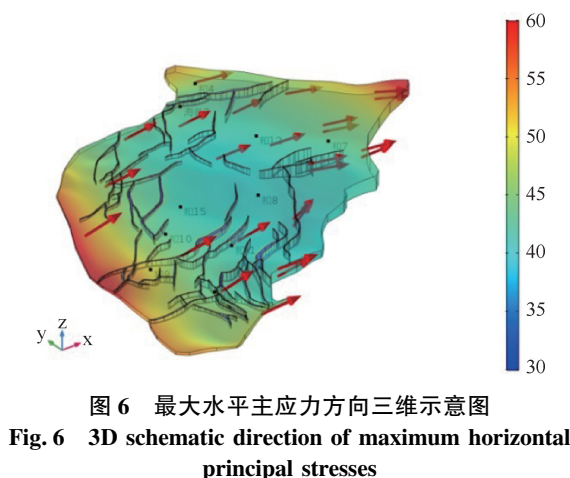


图6 最大水平主应力方向三维示意图  
Fig. 6 3D schematic direction of maximum horizontal principal stresses

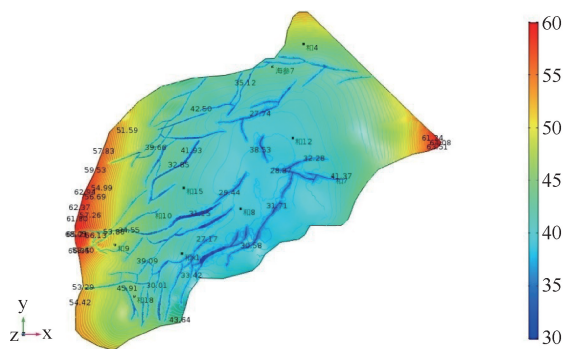


图7 最大水平主应力等值线大小分布图  
Fig. 7 Contours distribution of maximum horizontal principal stresses

### 3.1.2 最小水平主应力大小分布

南一段最小水平主应力方向三维示意图和最小水平主应力大小分布和等值线大小分布图,如图8和9所示。最小水平主应力方向总体为南北向,南一段地层的最小水平主应力呈现为东区及西南区较高的现象,整体最小水平主应力集中分布在33~45 MPa之间,由于断层发育带处,应力出现扩散,最小主应力出现低值,故应力低值区域主要分布在断层内,大小集中在22~30 MPa之间。

## 3.2 地应力分布影响因素分析

南一段的三维地质模型考虑了构造控制作用的大断层、西北高东南低的近楔形体空间展布形态,西北区和东南区平均高度差约1 200 m,深度、断层是影响地层水平主应力分布的重要因素。

### 3.2.1 深度对地应力分布的影响

深度是影响地应力分布的重要因素。南一段某位置处三维截线如图10所示,选取远离断层,均质性较强的区域,分析了深度对应力场分布的影响,同时分析了深度增加对各向主应力增加速度变化规律的影响。

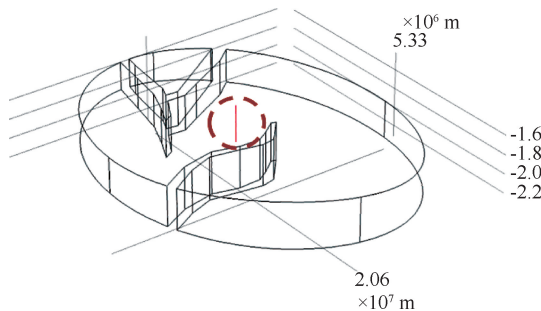


图10 南一段某位置处三维截线图  
Fig. 10 3D cross-sectional view at a location in N<sub>1</sub>



根据三维模型,绘制不同深度最大水平主应力与最小水平主应力分布情况,并进行线性拟合。如图 11 和 12 所示,水平各向地应力值都是随着深度的增加而逐渐变大,最大水平主应力分布与深度相关性达到 0.89,最小水平主应力分布与深度相关性达到 0.92,相关性较好。

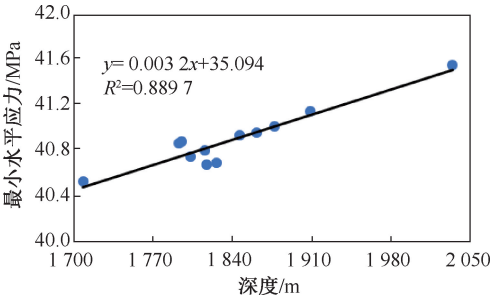


图 11 某位置最大水平主应力与深度关系  
Fig. 11 Relationship between maximum horizontal principal stress and depth at a point

3.2.2 断层对地应力分布的影响

断层是存在断裂面的一种结构面,会导致储层复杂的应力状态<sup>[20]</sup>。根据三维地应力模型,分析南

一段断层附近应力分布情况,如图 13、图 14 所示,应力主要集中分布于断层附近区域,这些区域等值线密集,应力集中现象十分明显,尤其是断层交叉、分支、拐点等处,最大水平主应力达到 47.16 MPa,最小水平主应力达到 39.02 MPa。且最大水平主应力方向和最小水平主应力方向在断层处出现变向现象,说明断层对水平主应力方向及大小均有重要影响,在压裂时影响裂缝扩展方向,设计时要着重考虑。

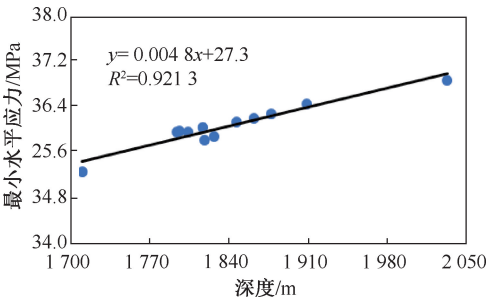


图 12 某位置最小水平主应力与深度关系  
Fig. 12 Relationship between minimum horizontal principal stress and depth at a point

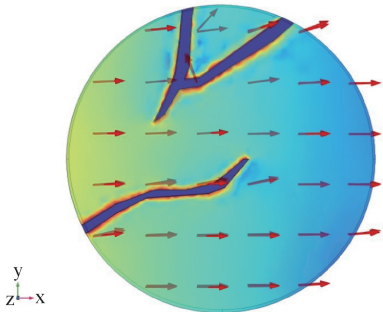


图 13 南一段最大水平主应力局部图  
Fig. 13 Local diagram of maximum horizontal principal stress in N\_1

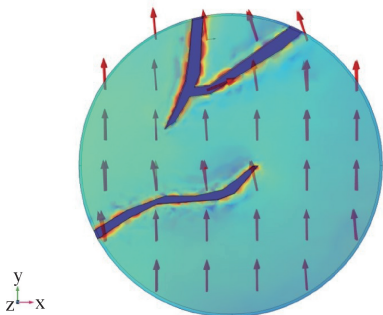
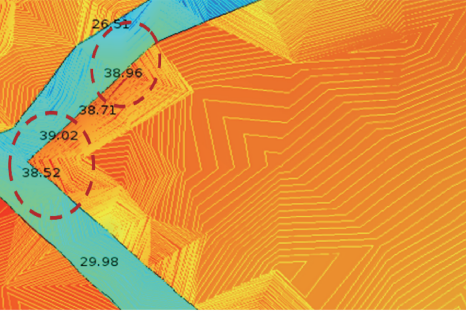
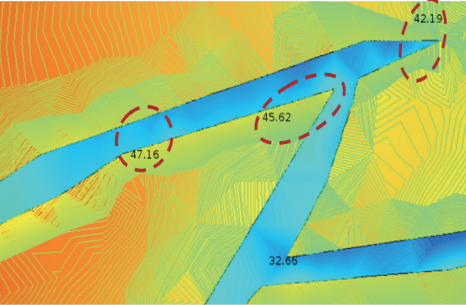


图 14 南一段最小水平主应力局部图  
Fig. 14 Local diagram of minimum horizontal principal stress in N\_1

由于断层内力学参数与地层参数的差异性和断层的交互影响,断层本身应力场的分布出现扩散和重分布的过程。由图 13、图 14 可以看出,断层内为应力低值区域,局部最大水平主应力大小集中在 27~35 MPa 之间,局部最小水平主应力大小集中在



22~30 MPa 之间。

4 实例分析

根据 H10、H17、HX1、H8、H12、H9 和 H18 各井测井资料分析,将南一段模型中各井的最小水平主

应力与测井的数据进行对比分析,判定模型的准确性。

以 H10 井为例。H10 井位于海拉尔盆地呼和湖拗陷呼和湖凹陷将军庙构造带希林构造群希-29 号圈闭上。希-29 号构造是一个早期发育的构造,在 T2-3 和 T3 两个反射层上均有显示。本井附近的 JJ28 号断层为正断层,断穿 T5、T3、T2-3 和 T2-2 四个反射层,其中 T2-3 反射层区内延伸长度最大达 7.1 km,走向 NE45°,倾向 315°,最大断距 100 m,一般断距 50 m。

对 H10 井进行压裂施工。首先以低排量替井筒,坐封封隔器,进行停泵测试,液体类型为基液,主压裂排量 2.5~3.5~4.0 m<sup>3</sup>/min,28%前置液,加砂顺利,并完成顶替,压裂施工压力变化如图 15 所示。

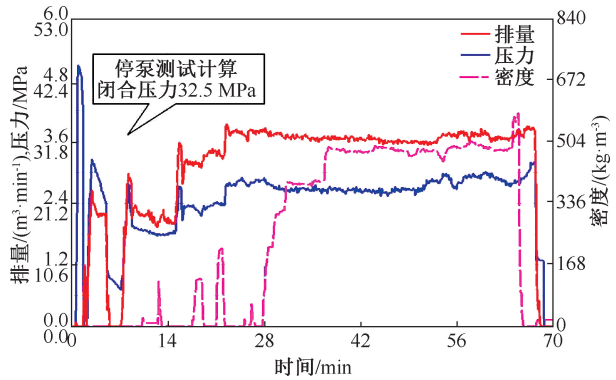


图 15 H10 井压力变化曲线  
Fig. 15 Pressure changes in Well H10

应用呼南次凹南屯组三维地应力数值模型,计算得到 H10 井相应深度处的地应力大小,与测试压裂解释应力对比,符合率为 97.60%,证明了模型的准确性。应用相同方法计算该区块其他井地应力大小,并与测试压裂解释应力进行对比,计算结果见表 2,符合率均在 90%以上,能够满足模拟精度。

表 2 数值模拟值与测试压裂解释应力大小结果分析  
Table 2 Stresses from numerical simulation and fracturing interpretation

| 井号  | 深度/<br>m | 最小水平主应力/MPa |           | 符合率/<br>% |
|-----|----------|-------------|-----------|-----------|
|     |          | 测试压裂<br>解释  | 数值<br>模拟值 |           |
| H10 | 1 940    | 32.5        | 33.28     | 97.60     |
| H17 | 2 045    | 33.5        | 34.28     | 97.67     |
| HX1 | 2 277    | 35.0        | 34.45     | 98.42     |
| H8  | 2 524    | 44.2        | 41.84     | 94.66     |
| H12 | 2 230    | 36.5        | 36.16     | 99.08     |
| H9  | 2 130    | 33.7        | 36.61     | 91.38     |
| H18 | 2 535    | 42.5        | 39.33     | 92.55     |

5 结论

(1)建立了基于有限元的复杂岩性储层三维地应力模型,考虑了断层影响,对呼南次凹南一段进行了地应力模拟。结果表明,区块最大水平主应力方向总体呈西东向,集中分布在 38~50 MPa 之间;最小水平主应力方向总体为南北向,集中分布在 33~45 MPa 之间。

(2)分析了深度和断层对呼南次凹南一段地应力场的影响,结果表明,深度与各向应力分布呈正线性相关,且水平各向地应力值都是随着深度的增加而逐渐变大;断层附近应力集中现象明显,并且应力出现变向现象,影响裂缝扩展方向,在压裂设计过程中是需要着重考虑的因素。

(3)选取研究区块 7 口实例井对三维地应力模型进行了验证,符合率均在 90%以上,证明了模型的可靠性。

致谢:感谢大庆油田采油工程研究院领导和相关部门对论文发表给予的支持和帮助。

参考文献

[1] 刘志文. 海拉尔盆地呼和湖凹陷南屯组油气成藏期次分析[J]. 西部探矿工程,2019,31(8):73-76.  
LIU Zhiwen. Study on hydrocarbon accumulation stages in Nantun formation, Huhehu depression, Halaer basin [J]. West-China Exploration Engineering, 2019,31(8):73-76.

[2] 孔凡顺. 海拉尔盆地复杂断块油藏采收率类比序列的建立[J]. 大庆石油地质与开发,2018,37(6):67-71.  
KONG Fanshun. Establishment of the recovery analogical sequence for the complex fault-block oil reservoir in Hailar basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018,37(6):67-71.

[3] 徐丽颖. 海拉尔盆地乌北地区复杂岩性储层测井解释评价方法研究[D]. 长春:吉林大学,2018.  
XU Liying. Log Interpretation and evaluation methods for complex lithologic reservoirs in North of Wuernun area, Hailaer basin [D]. Changchun: Jilin University, 2018.

[4] 王正来,姜洪福,关琳琳,等. 海拉尔盆地复杂断块油藏优势储层形成机理探讨[J]. 岩性油气藏,2015,27(1):26-31,114.  
WANG Zhenglai, JIANG Hongfu, GUAN Linlin, et al. Formation mechanism of favorable reservoir of complex fault block reservoir in Hailaer basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2015,27(1):26-31,114.

[5] 孙健,刘伟,惠徐宁,等. 煤层气储层地应力特征及其对压裂效果的影响[J]. 钻采工艺,2017,40(6):45-48,55.  
SUN Jian, LIU Wei, HUI Xuning, et al. Characteristics of in-situ stress at coalbed methane reservoir and its effects on

- fracturing results [J]. *Drilling & Production Technology*, 2017, 40(6): 45-48, 55.
- [6] 卜向前, 周大伟, 李向平, 等. 地应力改变对水力裂缝扩展的模拟实验研究[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(35): 24-28.
- BU Xiangqian, ZHOU Dawei, LI Xiangping, et al. Experiment research on hydraulic fracture propagation under insuit sltered-stress [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(35): 24-28.
- [7] 褚春波, 郭权, 黄小云, 等. 有限元分析径向水力压裂裂缝扩展影响因素[J]. *油气井测试*, 2018, 27(2): 59-66.
- CHU Chunbo, GUO Quan, HUANG Xiaoyun, et al. Finite-element analysis on influencing factors for propagation of fractures induced in radial jet hydraulic fracturing [J]. *Well Testing*, 2018, 27(2): 59-66.
- [8] 陈庚, 徐涛, 唐春安, 等. 地应力对水压致裂裂纹扩展影响的数值模拟[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2013, 32(1): 115-118.
- CHEN Geng, XU Tao, TANG Chun'an, et al. Numerical simulation on crack propagation of hydraulic fracturing process under different in-situ stress [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2013, 32(1): 115-118.
- [9] BROWN E T, HOEK E. Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1978, 15(4): 211-215.
- [10] 张广明, 熊春明, 刘合, 等. 复杂断块地应力场数值模拟方法研究[J]. *断块油气田*, 2011, 18(6): 710-713.
- ZHANG Guangming, XIONG Chunming, LIU He, et al. Numerical simulation method for in-situ stress field in complex fault block [J]. *Fault Block Oil & Gas Field*, 2011, 18(6): 710-713.
- [11] 林长城, 丁文龙, 王兴华, 等. 页岩储层地应力研究进展[J]. *科技通报*, 2018, 34(7): 1-8, 20.
- LIN Changcheng, DING Wenlong, WANG Xinghua, et al. Research progress of geostress in shale reservoir [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2018, 34(7): 1-8, 20.
- [12] 张广明, 刘勇, 刘建东, 等. 页岩储层体积压裂的地应力变化研究[J]. *力学学报*, 2015, 47(6): 965-972.
- ZHANG Guangming, LIU Yong, LIU Jiandong, et al. Research on the geostress change of shale reservoir volume fracturing [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(6): 965-972.
- [13] 秦雨樵, 汤华, 吴振君, 等. 基于钻孔局部壁面应力解除法的深部页岩三维地应力计算方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(6): 1468-1480.
- QIN Yuyao, TANG Hua, WU Zhenjun, et al. A calculation model for 3D in-situ stress tensor of deep shale based on borehole wall stress relief method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(6): 1468-1480.
- [14] 丁文龙, 曾维特, 王濡岳, 等. 页岩储层构造应力场模拟与裂缝分布预测方法及应用[J]. *地学前缘*, 2016, 23(2): 63-74.
- DING Wenlong, ZENG Weite, WANG Ruyue, et al. Method and application of tectonic stress field simulation and fracture distribution prediction in shale reservoir [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(2): 63-74.
- [15] 胡耀方, 田中兰, 杨恒林, 等. 昭通页岩储层非均质地应力场数值模拟[J]. *天然气勘探与开发*, 2017, 40(4): 44-51.
- HU Yaofang, TIAN Zhonglan, YANG Henglin, et al. Numerical simulation on the heterogeneous earth stress field of shale reservoir in Zhaotong [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2017, 40(4): 44-51.
- [16] 李卓沛, 聂舟, 井翠, 等. 三维地应力建模新技术在长宁深层页岩气区块的应用[J]. *钻采工艺*, 2019, 42(6): 5-8.
- LI Zhuopei, NIE Zhou, JING Cui, et al. Application of a new 3D geostress modeling technology in Changning deep shale gas block [J]. *Drilling & Production Technology*, 2019, 42(06): 5-8.
- [17] 郑江波. 西秦岭地块断裂带地应力场三维有限元模拟分析[J]. *天津城建大学学报*, 2017, 23(2): 106-110.
- ZHENG Jiangbo. Analysis of geostress field simulation in the fault zone of the West Qinling plot with 3D finite element method [J]. *Journal of Tianjin Chengjian University*, 2017, 23(2): 106-110.
- [18] 刘钰洋, 刘诗琦, 潘懋, 等. 基于三维角点网格模型的现今地应力有限元模拟[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(4): 643-653.
- LIU Yuyang, LIU Shiqi, PAN Mao, et al. Research of crustal stress simulation using finite element analysis based on corner point grid [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(4): 643-653.
- [19] 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.
- 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.
- [20] 许永猛. 不同地质构造地应力特性研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
- XU Yongmeng. Research of in-situ stress in different geological structure [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.

编辑 刘振庆

第一作者简介: 张永平, 男, 1964 年出生, 博士研究生, 教授级高工, 2007 年获得中国石油大学(北京)油气田开采专业博士研究生学位, 现在主要从事油气藏压裂改造方面的研究工作。电话: 04595960602; Email: zhangyongping@petrochina.com.cn。通信地址: 黑龙江省大庆市让胡路区西宾路 9 号, 邮政编码: 163458。