

三维有限元数值模拟在玛 18 井区地应力建模中的应用

Application of Three-dimensional Finite Element Numerical Simulation in in-situ Stress Modeling of Ma 18 Well Area

侯力虎 徐声驰 张智慧 甘新科 刘志 邹先锋

Lihu Hou Shengchi Xu Zhihui Zhang Xinke Gan Zhi Liu Xianfeng Zou

西部钻探地质研究院 中国·新疆 克拉玛依 627250

Western Drilling Geological Institute, Karamay, Xinjiang, 627250, China

摘要: 准噶尔盆地玛湖凹陷下三叠统百口泉组为一套扇三角洲前缘砂砾岩沉积, 其储层致密、胶结性差, 非均质性强, 具有明显的非层状、地层地应力状态不明确的特点, 针对该区块的储层油藏特征和开发现状, 在岩石力学参数以及地应力测试的基础上, 应用三维有限元数值模拟方法, 对该区块储层进行了三维地应力建模, 从而建立了该区块的地应力连续剖面。

Abstract: The Lower Triassic Baikouquan Formation in Mahu Sag, Junggar Basin is a fan delta front glutenite deposit, characterized by dense reservoir, poor cementation, strong heterogeneity, obvious non-bedded and unclear ground stress state. According to the reservoir characteristics and development status of this block, based on the rock mechanics parameters and ground stress test, the three-dimensional finite element numerical simulation method was used to model the reservoir in this block, and the continuous ground stress profile of this block was established.

关键词: 石油勘探开发; 地质油藏; 三维有限元数值; 地应力

Keywords: oil exploration and development; geological reservoir; three-dimensional finite element numerical value; crustal stress

DOI: 10.12346/etr.v4i3.5823

1 引言

准噶尔盆地玛湖凹陷诞生了世界上迄今规模最大的整装砾岩油田, 石油资源量 $15.6 \times 10^9 \text{t}$, 其中探明石油储量 $6.8 \times 10^9 \text{t}$, 是近年新疆油田原油上产最具潜力区域。

玛湖凹陷百口泉组砾岩储集层致密且非均质性强^[1], 开发初期, 由于区域地应力状态尚未得到充分认识, 给钻井过程中井壁稳定性及后期的压裂施工优化带来了巨大的挑战, 通过对岩心的力学参数及地应力测试, 确定了百口泉组地应力的大小和方向^[2]。而后通过有限元三维地应力建模, 建立了该区块的地质力学模型, 对该区块钻井施工安全和后期压裂具有重要意义。

由于影响地应力的因素很多, 首先是区域应力环境的控制, 区域应力环境与某个地区地质构造作用历史有关; 其次是构造特征, 特别是断层对地应力方向的影响明显, 造成层

内应力方向复杂化, 应力大小不均匀。此外, 还有其他因素诸如岩性、岩石力学性质等, 地应力场的分布受区域应力场整体控制并受局部构造和其他干扰因素^[3], 由于常规地应力测试获得的有效测点数据有限, 实测应力值不能满足全面反映区域地应力场的应力状态, 三维数据模拟成为区域地应力场定量分析和评价不可或缺的手段之一, 论文借助三维有限元数值模拟对玛湖凹陷单井地应力分布状况进行了深入研究, 进而为该区块的钻井施工和后期的压裂改造提供技术支持。

2 区域地质特征

玛湖凹陷位于准噶尔盆地西北部, 凹陷西北斜坡自北向南邻近乌夏断裂带、克百断裂带和中拐凸起, 凹陷西南部自北向南邻近石英滩凸起、英西凹陷、三个泉凸起、夏盐凸起

【作者简介】侯力虎(1980-), 男, 中国河南人, 本科, 工程师, 从事油气解释评价研究。

和达巴松凸起(见图1)。

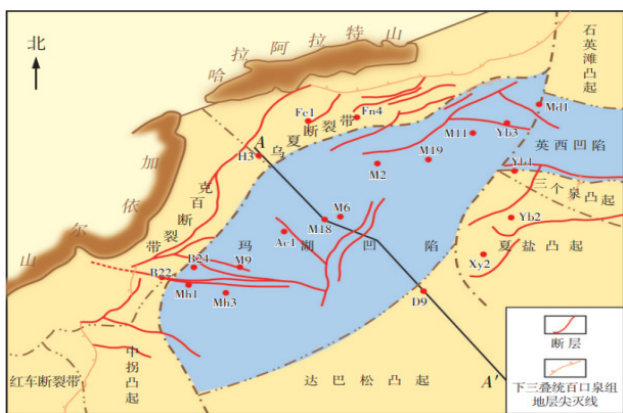


图1 玛湖凹陷构造位置图

石炭系以上地层由下至上为:二叠系的佳木禾组(P_{1j})、风城组(P_{1f})、夏子街组(P_{2x})和乌尔禾组(P_{2w}),三叠系的百口泉组(T_{1b})、克拉玛依组(T_{2k})和白碱滩组(T_{3b}),以及上覆的侏罗系和白垩系。由北西向东南、由北向南,玛湖凹陷及邻区二叠系和三叠系沉积相类型为冲积扇或扇三角洲—滨浅湖—半深湖。其中,风城组和乌尔禾组的湖相泥岩有机质丰度高,为凹陷的主力烃源岩;分布稳定的白碱滩组湖相泥岩为凹陷的区域性盖层。各地层前缘相砂砾岩孔渗性相对较好,可以作为储集层。

3 百口泉组储层岩性特征

玛湖下三叠统百口泉组为一套三角洲前缘砂砾岩沉积,储层岩性致密、低渗、非均质强,自下而上分为三段,整体发育一套湖侵—退积沉积体系。百一段(T_{1b_1})主要发育中高阻灰色、褐灰色砾岩和褐色泥岩,百二段(T_{1b_2})中下部为一套相对低阻的褐色、杂色块状砾岩,岩性致密,上部发育一套相对高阻的灰色块状砾岩,百三段(T_{1b_3})下部为一套中高阻灰色块状砾岩夹泥岩,中、上部为一套相对高阻灰色砾岩与褐色泥岩。

4 三维地应力建模

4.1 建立三维地质模型

确定地质模型是数值模拟的基础,进行三维地应力场模拟,首先依据研究区域构造演化、三维地震资料解释成果及实钻资料,将目的层连同上下盖层和底层作为一个岩石块体隔离出来,将复杂的地质构造用合理的地质模型来加以表达,作为计算模拟的研究对象。论文根据该区域单井地震时间剖面图、地震反射层海波高度与地层分层数据等相关资料来建立该区块地质构造模型(见图2)。

4.2 计算区域的选择

计算区域的确定应遵循一下原则:几何范围宜适当增大,以减少计算域边界对目标区域的影响;边界处条件易于确定。本次计算以玛15井为研究区块中心,将平面几何区域

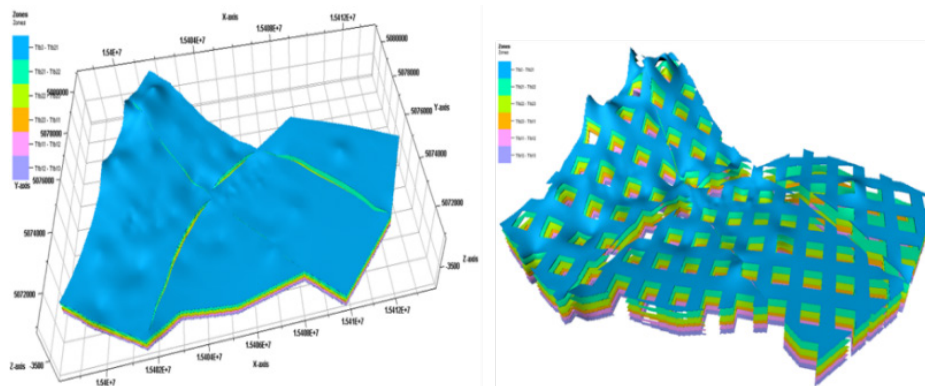


图2 玛18研究区构造模型

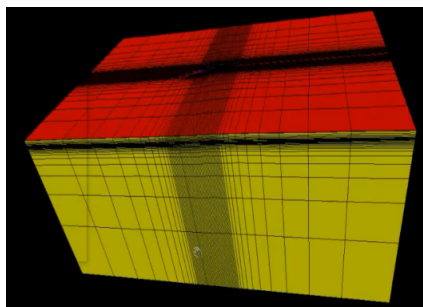


图3 玛湖地应力模型网格设置

范围扩大为原来的3倍，深度方向为水平井钻井及压裂目的层段为中心，按照宽深比小于3进行设置，建立计算模型的网格划分。

玛湖地应力模型网格设置见图3。

4.3 反演标准

根据前人的经验，可将反演标准归纳为：岩心实测水平主应力与模拟结果的相对误差控制在20%，实测主应力方向值与模拟结果的绝对误差控制在10°以内，其结果是可信的。

4.4 反演目标约束条件

目标层位地应力实测结果如表1所示，以关键层位的实测地应力为反演约束条件，采用有限元约束优化反演方法，

使得模拟计算结果与约束条件达到最优化拟合，从而得到研究区域实际地应力场的分布规律。

5 玛湖区块的三维地应力长模拟结果

基于对玛18研究区中对地质力学属性参数的分析，建立了玛18研究区杨氏模量、泊松比、抗拉、抗压、主应力、脆性模型（见图4~图7）。

根据模拟计算得出：玛18研究区在北部杨氏模量数值较高，泊松比与杨氏模量数值相反，泊松比较低。北部研究区脆性较好。通过模型的最大最小主应力模型（见图6），对其进行最大最小主应力差异值计算（见图8~图11），两相应力差值越小越容易形成复杂性缝网，玛18研究区在东

表1 反演约束条件

层位	井段	岩性	上覆岩石压力 (MPa)	最大水平主应力 (MPa)	最小水平主应力 (MPa)
T ₁ b ₃	3032.17-3042.25	泥岩	69.57	69.84	55.33
T ₁ b ₃	3048.32-3056.76	砂砾岩	69.94	70.19	50.63
T ₁ b ₃	3059.30-3064.01	砂砾岩	70.16	70.41	51.16
T ₁ b ₃	3070.85-3072.48	砂砾岩	70.41	70.66	51.87
T ₁ b ₃	3072.70-3081.2	泥岩	70.54	70.76	57.30
T ₁ b ₂	3082.60-3088.90	砂砾岩	70.75	71.00	51.63
T ₁ b ₂	3089.91-3090.97	砂砾岩	70.87	71.12	52.31
T ₁ b ₂	3091.59-3094.00	砂砾岩	70.93	71.18	52.19
T ₁ b ₁	3124.00-3126.00	泥岩	71.74	71.94	58.04
T ₁ b ₁	3134.35-3139.35	砂砾岩	72.03	72.28	52.77

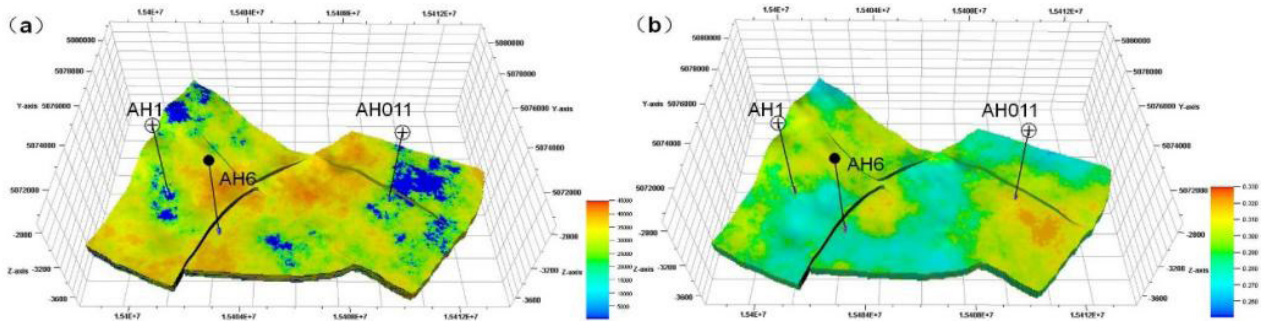


图4 玛18研究区杨氏模量模型 (a) 玛18研究区泊松比模型 (b)

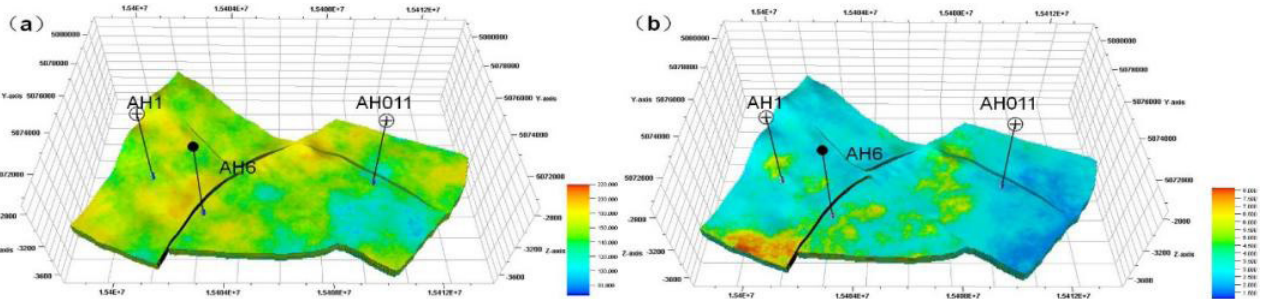


图5 玛18研究区抗压模型 (a) 玛18研究区抗压模型 (b)

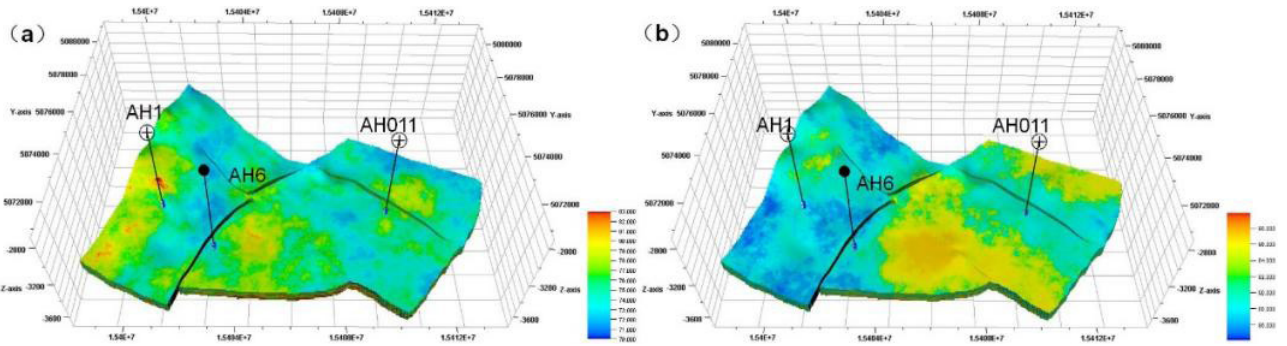


图 6 玛 18 研究区最小主应力模型 (a) 玛 18 研究区最大主应力模型 (b)

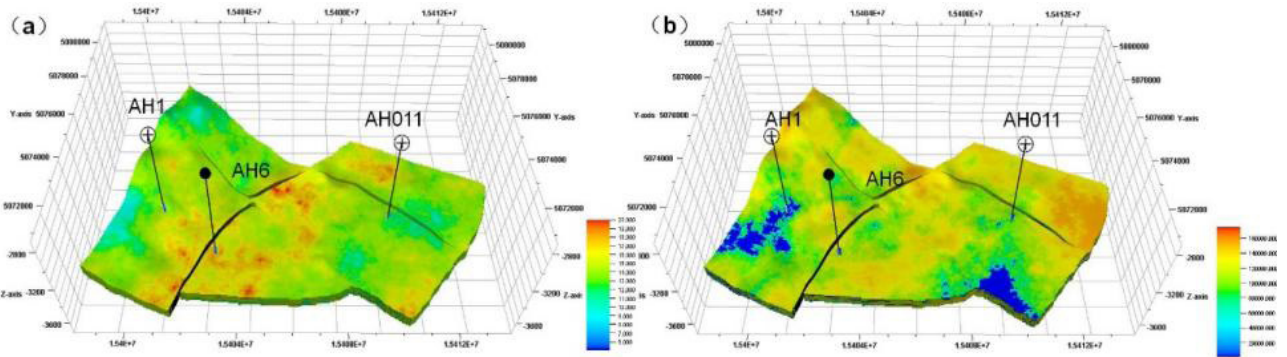


图 7 玛 18 研究区最大最小主应力差值模型 (a) 玛 18 研究区脆性指数模型 (b)

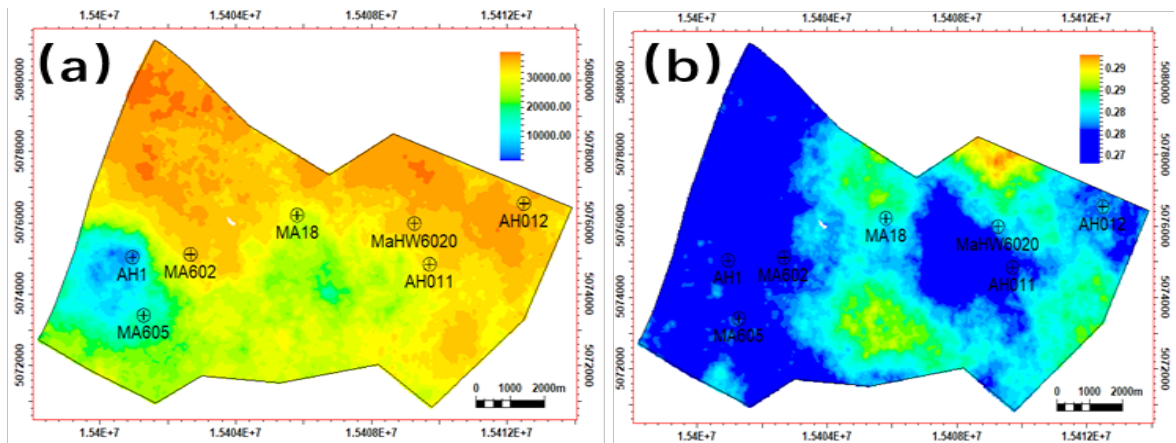


图 8 玛 18 研究区 T1b11 层杨氏模量和 (a) 玛 18 研究区 T1b11 层泊松比 (b)

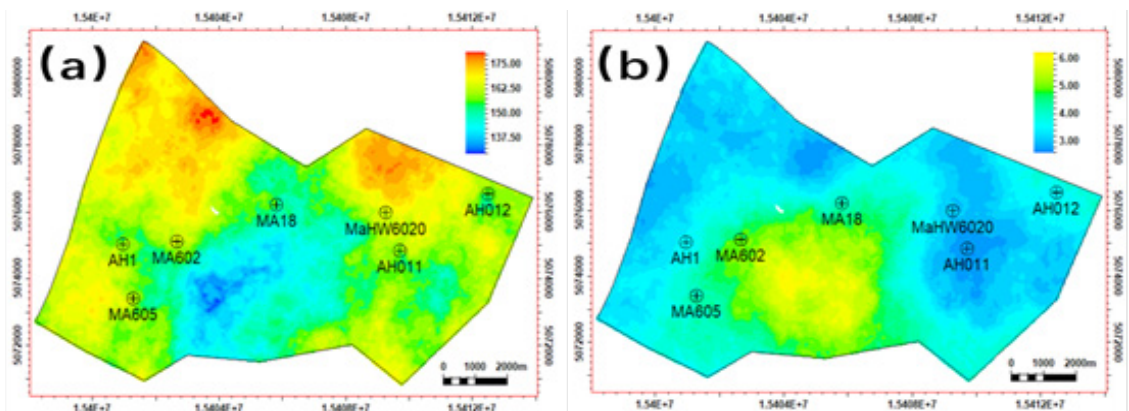


图 9 玛 18 研究区 T1b11 层抗拉性 (a) 和玛 18 研究区 T1b11 层抗压性 (b)

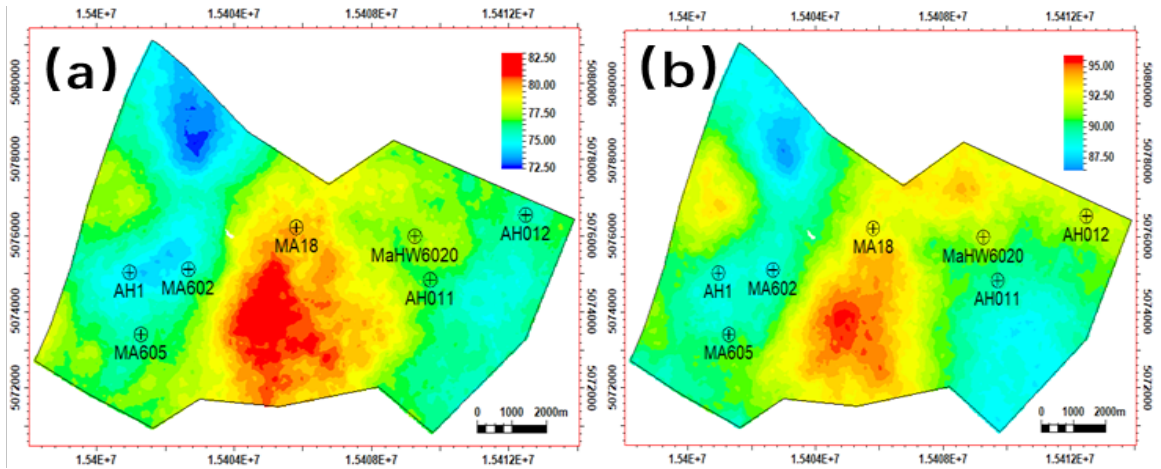


图 10 玛 18 T1b11 层最小水平主应力 (a) 和玛 18 T1b11 层最大水平主应力 (b)

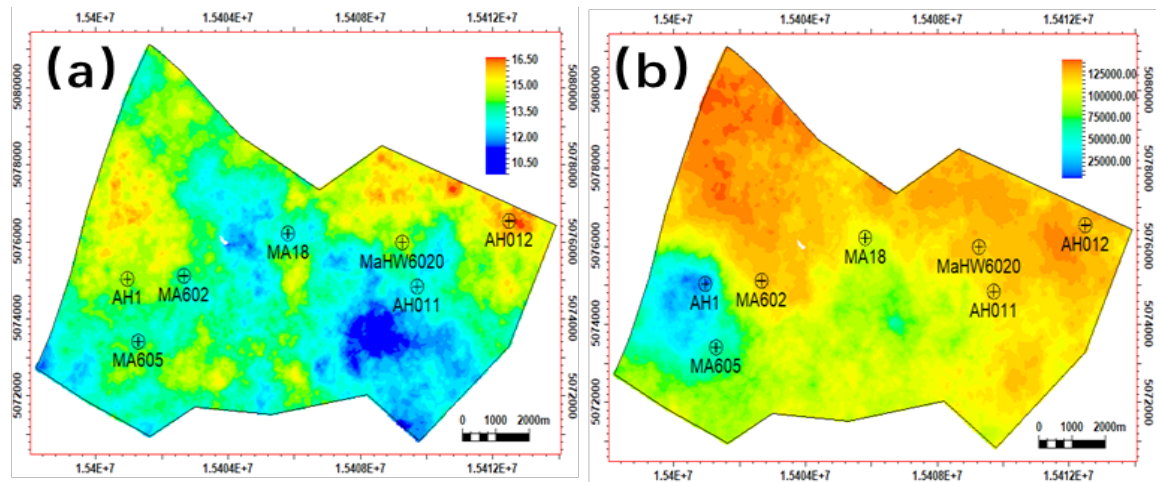


图 11 玛 18 T1b11 层最大最小主应力差值 (a) 和玛 18 T1b11 层脆性指数 (b)

北部易形成复杂性缝网。

6 结论及建议

通过三维地应力场有限元约束优化反演，得到了玛湖凹陷目标区块主应力的方向和大小，形成了以下认识：玛 18 研究区在北部杨氏模量数值较高，泊松比与杨氏模量数值相反，泊松比较低。北部研究区脆性较好。通过模型的最大最小主应力模型（见图 6），对其进行最大最小主应力差异值计算（见图 8~ 图 11），两相应力差值越小越容易形成复杂

性缝网，玛 18 研究区在东北部易形成复杂性缝网。

参考文献

- [1] 陈超峰,王佳,俞天喜,等.玛湖凹陷乌尔禾组砾岩储集层裂缝支撑剂运移规律[J].新疆石油地质,2021,42(5):560-564.
- [2] 何小东,马俊修,刘刚,等.玛湖油田砾岩储集层岩石力学分析及缝网评价[J].新疆石油地质,2019,40(6):701-707.
- [3] 陈勉,金衍,张广清,等.石油工程岩石力学[M].北京:科学出版社,2008.