

达索 SIMULIA 油气行业应用系列之二

——西部某油田区块复杂地应力场三维有限元精细建模与分析

沈新普^{1, 2}; 张少波¹; 沈国阳²

1, 北方工业大学, 北京; 2, Guoyang Technology and Services LLC, 休斯敦

摘要:

本文介绍了使用 Abaqus 有限元软件并结合单井分析对我国西部某油气田进行复杂地应力场精细建模的例子。主要内容包括: 1) 使用 3 维 Abaqus 有限元软件, 建立了 3 维数值模型, 得到了迪那-2 区块储层的主应力方向的 3 维分布; 2) 数值结果中, 最大水平主应力 SH 方向与实测的方向基本一致; 3) 将初始地应力场 3 维数值解与单井应力分析结果进行了比较。储层中的最小水平主压应力的数值解与单井分析结果很接近, 最大差别 7%; 4) 对结果的分析解释了地应力 3 维数值结果与单井分析结果的差异。

地应力场精细建模分析的数值结果表明, 决定储层主应力方向的主要因素有下列 3 点: 1) 上部岩层的压力载荷; 2) 储层的几何形状; 3) 侧压力系数。它包括储层内部的侧压力系数和上覆岩层的侧压力系数。其中岩膏层侧压力系数较高, 对储层地应力场数值结果的准确度影响很大。

1 引言

我国西部某油气田区块因为地质条件复杂, 断层交汇, 经历过两次以上造山运动, 而且油气藏上部有巨厚盐膏层覆盖, 地应力场十分复杂: 局部地应力场与区域应力场差别大, 局部主应力方向随着平面位置不同而变化, 在同一区块内的不同井位上, 最大水平主应力的方向差别最大超过 45 度。

地应力场的精准构建是油气藏分析尤其是产量预测分析的基础。对该油气田复杂应力场进行精细建模具有十分重要的工程意义。多年来若干研究者进行里不同的尝试[1][2][3], 得到的地应力场各有特点。准确建立三维地应力场主要的难点在于: 1) 主应力数值结果的大小与相应的实测值大小和方向实测值不能同时满足: 大小一致则方向不一致, 方向一致则大小不一致。若干报道的文献中的主应力结果与实测值的大小和方向均存在差别。2) 岩盐特性比较复杂, 实验数据缺乏。

三维有限元精细建模的内容是结合单井地质力学分析结果来建立三维有限元模型, 并把三位有限元结果与单井实测结果相比较。单井实测结果包括用 LOT 方法得到的最小水

平主应力的值、以及影响测井得到的最大水平主应力的方向。下面图 1 给出了三维精细地应力场的有限元建模与分析的流程图。

本文的任务是根据已有资料，对该区块的地应力场进行三维 Abaqus 有限元精细建模[4]。重点是油气储层的地应力场。

2 输入数据

首先根据测井数据计算得到储层的密度，为 2650 kg/m^3 。上部岩层密度取平均值，为 2450 kg/m^3 。下表是区块内某口井测得的地层顶深和底深范围。

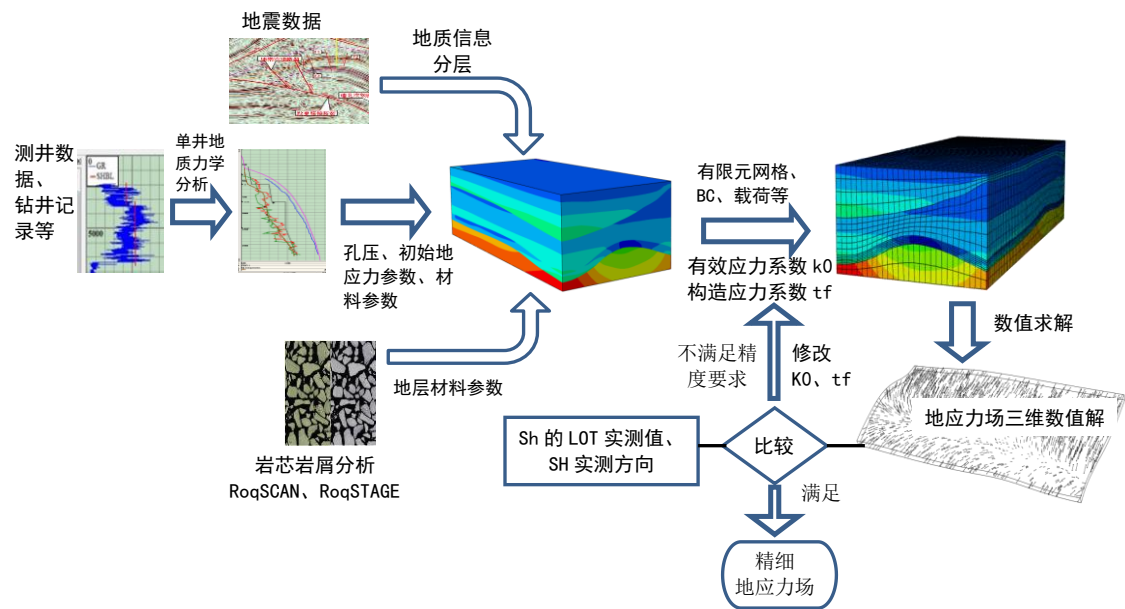


图 1、三维精细地应力场的有限元建模流程图。

表 1、区块内某口井测得的地层顶深和底深范围

地层	顶深范围/m		底深范围/m	
基迪克组	3,620.00	3,619.72	4,784.50	4,783.60
苏维一组	4,784.50	4,783.60	4,976.50	4,974.34
库姆格列木群	4,976.50	4,974.34	5,181.00	5,176.12
白垩系	5,181.00	5,176.12	5,195.00	5,189.92

本次分析中认为下述地应力数据是确定的：1）地漏试验结果 LOT: 作为最小水平主应力 Sh , 2）最大主应力方向。这是通过单井影响测井数据得到的。3）孔隙压力。这是经过钻井证实了的。

本次分析中认为下述材料参数数据是确定的: E, ν, ρ 。

本次分析中下列参数没有确切的取值，其单井分析结果仅供参考：1) 最大水平应力 SH ；2) 竖向应力 S_v ；

本次分析的区块地层中含有巨厚盐膏层，此为岩盐和石膏的混合物。盐膏层的力学行为因为其蠕变特性而相当复杂，一般地说，岩盐的蠕变可以用粘弹塑性模型来模拟。由于蠕变特性的影响，岩盐几乎不能承受剪应力。这样，岩盐地层中的侧压力系数很高，应力趋向各向同性。但是，我国西部这个区块的盐膏层因为成分复杂，其侧压力系数不象纯岩盐那么高，而是居于普通岩石和纯岩盐之间的一个值。

在准备输入数据时，关于岩盐和上覆岩层的压力的初值、以及储层最大水平地应力的初值，都需要采用‘试错的方法’来拟合现象、之后确定初值选取。使结果符合现象的初值即使该取的值。

所谓现象就是实测相关的数值，包括：1) 地漏压力 $LOT: Sh$ ，根据单井分析结果，为 105-125 MPa；2) 孔隙压力 $PP=105$ MPa。

采用下列材料参数: $E = 20$ GPa, $\nu = 0.2$ 。

关于在三维数值分析中使用单井分析结果作为初始条件的几点说明：

1) 单井分析的结果一般是: 竖向应力 S_v , 侧压力系数 k_0 , 以及构造应力系数 tf , 且有 $S_v = \rho gh$, $Sh = k_0 * S_v$, $SH = Sh + tf * (S_v - Sh)$ 。

2) Abaqus 三维分析需要输入竖向应力 S_v 和侧压力系数 k_1 与 k_2 。单井分析竖向应力结果 S_v 只用于三维分析初始输入条件。水平应力分量大小则取决于结构的细节、依据弹性力学平衡方程，在有限元计算中求解得到。

3. ABAQUS 有限元模型

如图 2 所示，本次计算的模型几何尺寸为：长：26 km 宽：11 km。顶部的深度：6 km。深度 6km 是从海平面算起，上面的岩层重力被简化为压力施加在模型上。储层厚度：300 至 400 m (下表的绿色格子)。

Abaqus 模型采用了 4 种材料，分别为：1) 储层；2) 岩盐层；3) 顶层；4) 底层。

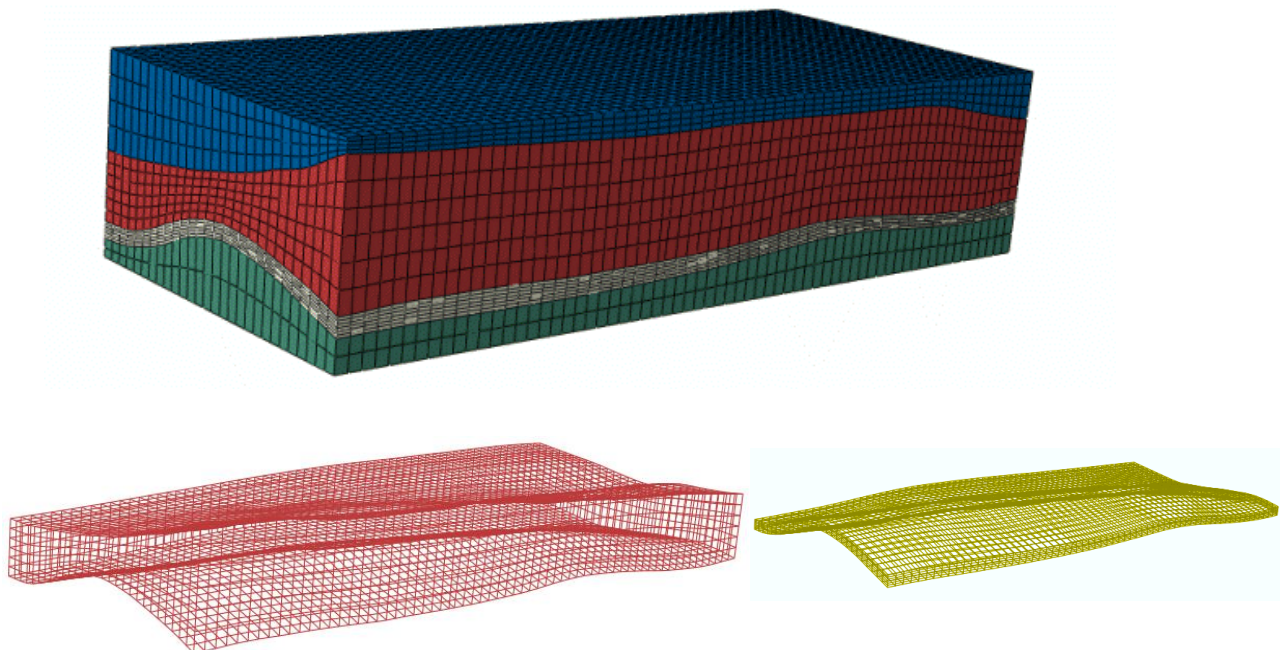


图 2、几何模型及有限元网格

模型的载荷包括：1) 重力；2) 顶层的上覆岩层重量。考虑了北面-南面的斜坡导致的压力差别。

4. ABAQUS 数值结果

4.1. 最大水平主压应力的方向

采用上述模型参数得到的数值结果如图 3-10 所示。其中图 3 为最小主应力及最大压应力的三维空间矢量分布图。

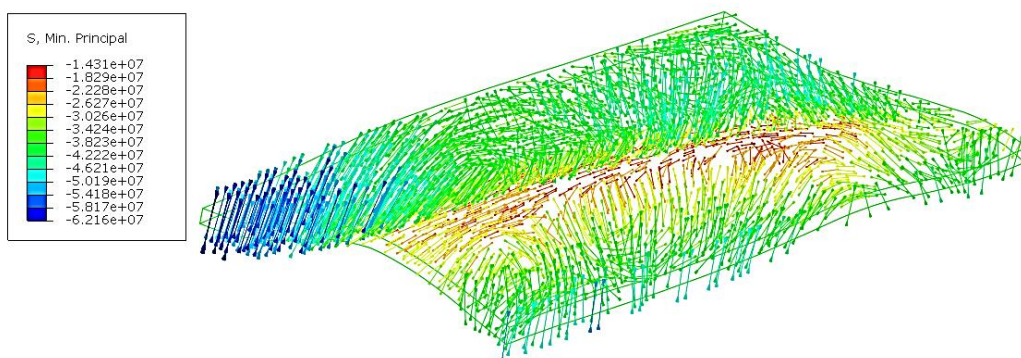


图 3、最小主应力即最大压应力的三维空间矢量分布图。

最大主压应力方向，有时候是水平的，有时候不是。其实最大水平主应力是个 1 维分析概念. 最大主应力是 3 维概念。对三个主应力取其水平投影，得下面的图 4。图 4 中的应力方向就是最大和最小水平主应力的方向。

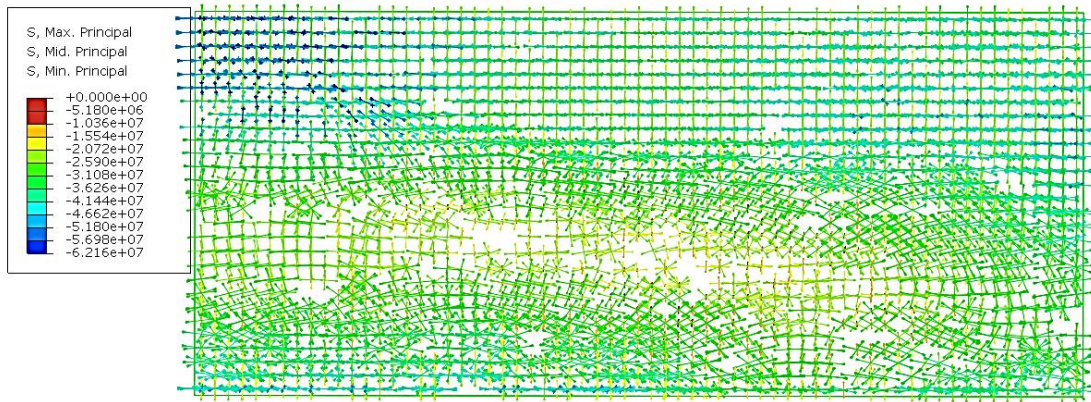


图 4、三个主应力分量的水平投影分布图。

下面的图 5 给出了最大水平主压应力方向的三维有限元数值结果（5a）与观测结果（5b）的比较。可以看出两者大致相符合，在左右两侧各自局部的应力方向偏转现象得到较好地再现。

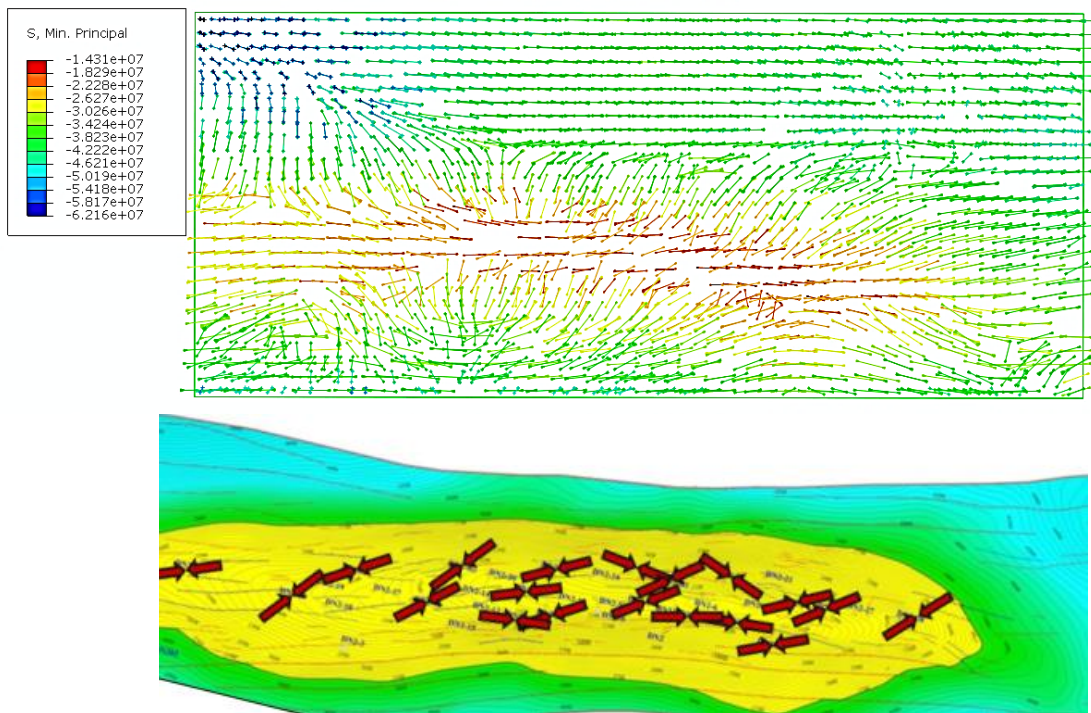


图 5、最大水平主压应力方向数值结果与观测结果对比。

4.2. 最小水平主压应力的数值

图 6, 7, 8, 分别给出了地应力场中水平正应力分量 S11, S22, S33 的分布图。分别对应 x, y, z 三个方向的分量。鉴于实测井都对应着模型顶部的位置, 因此选取应力值的显示时只选取模型顶部的区域。表 2 给出了三个正应力分量的数值大小的比较。

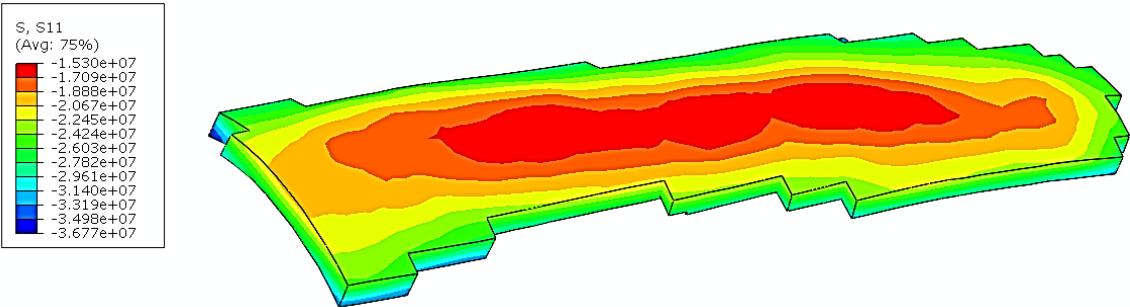


图 6、X 方向水平正应力数值结果。

经过比较, 发现 S22 即 y 方向的正应力为最小水平压应力。因此, 在表 2 中, 被标为绿色的 Syy 的数值解结果与单井分析结果进行了比较。结果显示, 两者在顶部和底部的值都很接近。

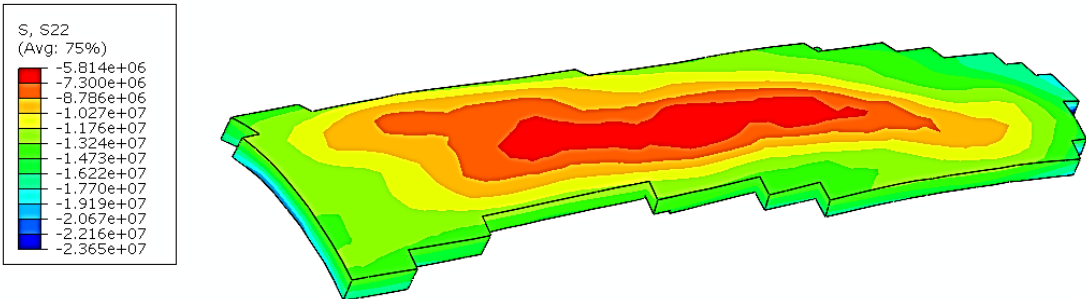


图 7、Y 方向水平正应力数值结果。

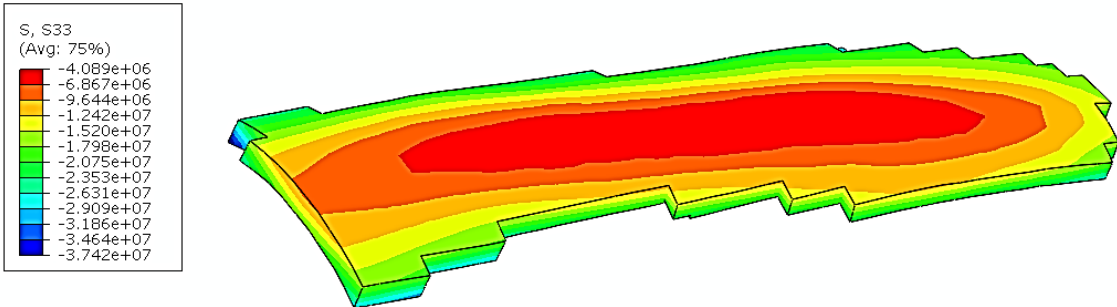


图 8、Z 方向水平正应力数值结果。

表 2、三个方向的正应力比较

三维应力数值结果					单井应力结果	
	总应力 /MPa		有效应力 /MPa		总应力 /MPa (表 3 两口井的平均值)	
	储层顶部	储层底部	储层顶部	储层底部	顶部(4784 m)	底部(5195 m)
Sx	120.3	141.77	15.3	36.77	110.0	119.47
Sy	110.81	128.65	5.81	23.65		
Sz	109.08	142.42	4.08	37.42	114.8	124.86
孔隙压力	105 MPa					
Smax	119.42	143.76	14.42	38.76		

进一步的比较表明, 储层上部最小水平应力 S_h , 单井: 110. MPa; 三维: 110.81 MPa, 几乎相同。储层底部最小水平应力 S_h : 单井: 119.47 MPa; 三维: 128.65 MPa, 很接近 (相差 7.136%)。最小水平应力 S_h 单井结果经过了 LOT 检验, 认为是可靠的, 因此作比较。其它应力分量没有直接试验依据, 因此这里不比较其值。

对于三维应力数值和单井分析结果差别的解释。三维应力数值显示: 1) 储层上部 S_v 小于其它两个应力分量, 因此该处应力格式是逆断层应力格式。2) 储层底部 S_v 大于其它两个应力分量, 因此该处是正断层应力格式。3) 在中部, S_v 介于两个水平主应力之间, 因此该处是走滑断层应力格式。

单井应力分析时假设了走滑断层应力格式, 并用于整个储层模型高度。而三维数值结果显示, 应力格式上下不同。这可能是两种方法得到的结果有差别的原因。这就意味着, 如果单井分析中采用顶底不同的应力格式, 也能得到类似于三维数值结果的应力解。表 2 给出了单井分析的最小水平主应力解, 为 D1 井和 D2 井的结果。

表 3、单井分析的 S_h 应力解

		D1 (深度和 S_h)		D2 (深度和 S_h)	
S_h	顶深	4784	110.82	4784.06	109.25
	底深	5195	119.84	5195.06	119.09
S_v	顶深	4784	113.98	4784.06	115.69
	底深	5195	124.00	5195.06	125.72

5. 结束语

使用 3 维 Abaqus 有限元软件, 建立三维数值模型, 得到了目标区块的地应力场精细模型, 并进一步得到了储层的主应力方向的 3 维分布。

数值结果中, 最大水平主应力 S_H 方向与实测的方向基本一致。三维应力数值解与单井应力分析结果进行了比较。储层中最小水平主应力的数值解与单井分析结果很接近, 最大差别 7%。对结果的分析解释了三维应力结果与单井分析结果的差异。

数值结果表明:

- 1) 储层上部 S_v 小于其它两个应力分量, 因此该处应力格式是逆断层应力格式.
- 2) 储层底部 S_v 大于其它两个应力分量, 因此该处是正断层应力格式.
- 3) 在中部, S_v 介于两个水平主应力之间, 因此该处是走滑断层应力格式.

数值计算经验表明, 决定储层主应力方向的因素有下列几点:

- 1) 上部岩层的压力载荷
- 2) 储层的几何形状
- 3) 侧压力系数。包括储层内部的侧压力系数和上覆岩层的侧压力系数。岩膏层侧压力系数较高, 影响很大。

断层对局部应力分布有较大影响。这体现在逆断层时侧压力系数 >1 等数值方面。当结构给定后, 断层对主应力方向的改变影响不是很大。

弹性模量等参数的非均匀分布对主应力方向没有关键影响。

在后续的研究中, 断层及其活化以及相关影响是作为一个主要内容研究的。那里我们将对断层进行详细的模拟。

弹性模量等材料参数的空间变化虽然对初始主应力方向没有关键影响, 但是对沉降压实有显著影响。在后面的相关模型计算中, 将详细考虑弹性模量的大小随空间位置的变化。

致谢;

感谢国家自然科学基金(项目号 11272216)的资助。

参考文献

- [1]. 李峰, 姜振学, 李卓, 杜忠明. 库车坳陷迪那 2 气藏成因类型及成藏机制. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46 (4): 1345-1352.
- [2]. 汪必峰, 戴俊生, 成荣红, 闫萍, 王云鹤. 迪那气田现今地应力研究. 新疆石油地质. 2007, 28 (4): 471-472, 479.
- [3]. 张凤奇, 王震亮, 赵雪娇, 宋玉斌. 库车坳陷迪那2气田异常高压成因机制及其与油气成藏的关系. 石油学报, 2012, 年05期, 73-78.
- [4]. Dassault Systèmes Simulia Corp.: *Abaqus user's manual, Vol. 2: Analysis, Version 6.10*. Dassault Systems: Vélizy-Villacoublay, France, 2010, 10.2.1-1 – 10.2.3-10.