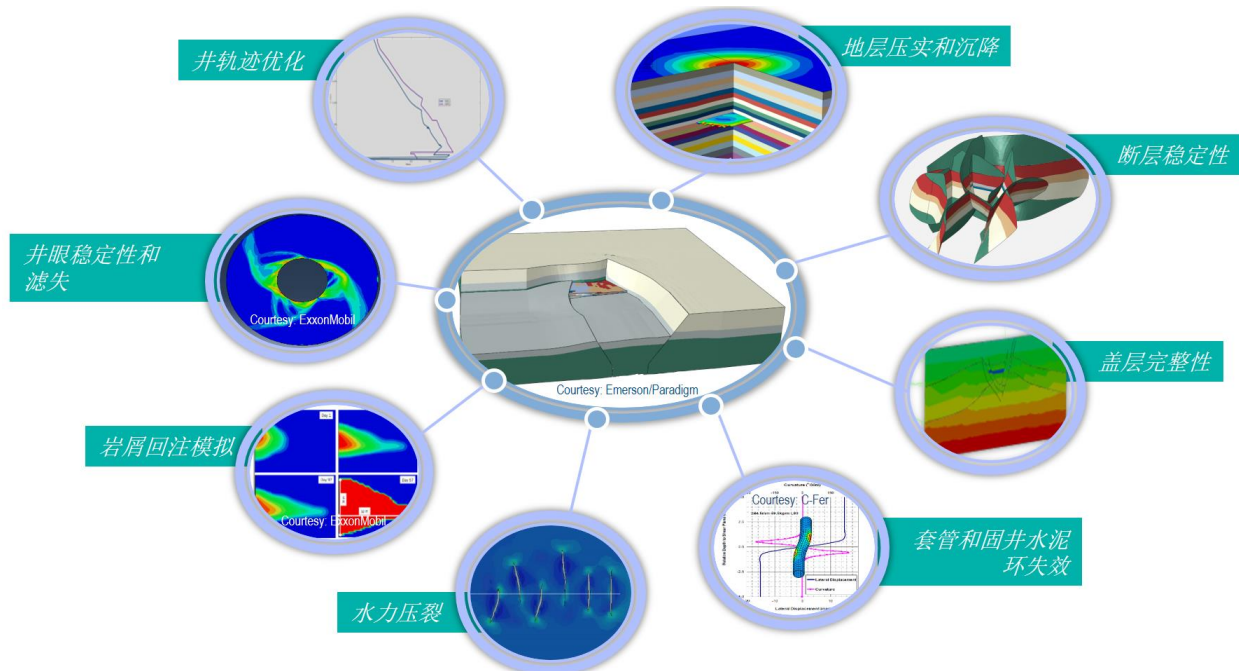


达索 SIMULIA 油气行业应用系列之三

——Abaqus助力油气开发

简介：

Abaqus是最为优秀的非线性有限元软件，全球油气行业多个知名公司都将其作为最核心的有限元求解器，其中在埃克森美孚已有40年的应用历史。在油气开发过程中，地层的应力状态和井壁稳定性、井轨迹优化、水力压裂裂缝的扩展、套管损毁等密切相关，因此构建以地应力分析为核心的地质——工程一体化数值模型意义重大。



沈新普教授是国内最早将Abaqus软件引入油气行业的专家之一，利用Abaqus完成了多个国内外有影响力的课题项目，在油气数值仿真领域积累了丰富的经验，这里简要介绍他的部分代表性工作。

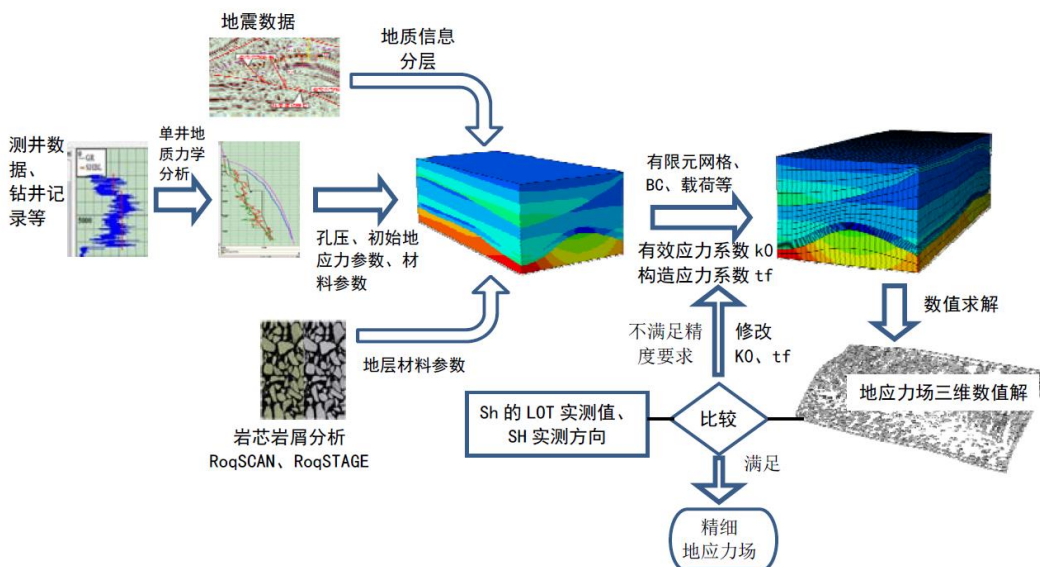
1. 西部某油田区块复杂地应力场三维有限元精细建模与分析

我国西部某油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

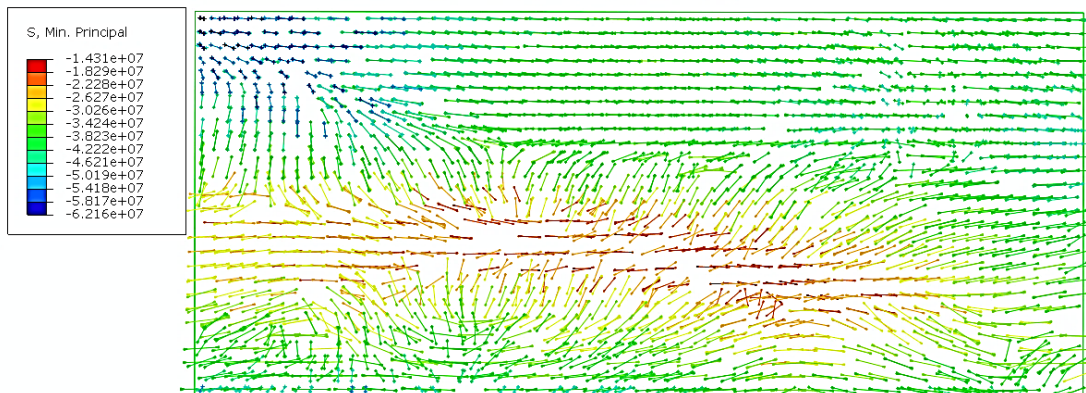
不同而变化，在同一区块内的不同井位上，最大水平主应力的方向差别最大超过45度。

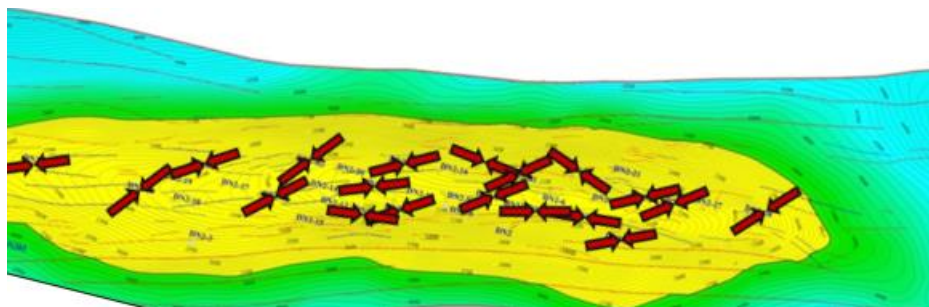
地应力场的精准构建是油气藏分析尤其是产量预测分析的基础，对该油气田复杂应力场进行精细建模具有十分重要的工程意义。多年来若干研究者进行里不同的尝试，得到的地应力场各有特点。准确建立三维地应力场主要的难点在于：1）主应力数值结果的大小、方向与相应的实测值的大小、方向不能同时满足：大小一致则方向不一致，方向一致则大小不一致。若干报道的文献中的主应力结果与实测值的大小和方向均存在差别。2）岩盐特性比较复杂，实验数据缺乏。

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，并把三维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、以及最大水平主应力的方向。沈新普教授提出的三维精细地应力场有限元建模与分析的流程图：



下面是利用上述方法得到的最大水平主压应力方向的三维有限元数值解和实际观测结果。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。



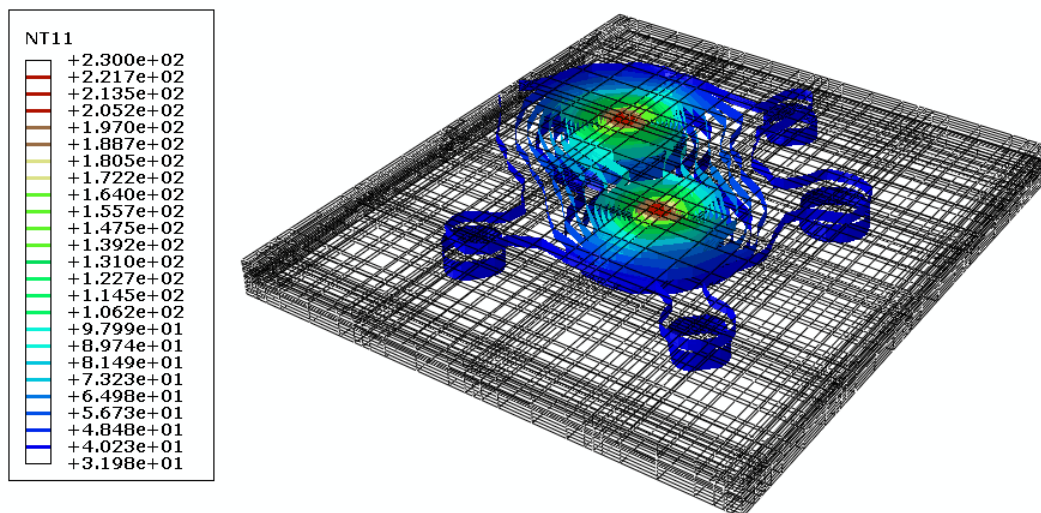


2. 稠油热采

稠油与常规石油不同，具有胶质沥青质含量高、粘度和凝固点高等特点，因此利用传统的采油技术很难将其开采出来，目前普遍采用热采技术进行开发利用。

基于耦合场的三维数值模拟稠油热采优化设计技术是将热—变形—渗流场全耦合，模型能够有效模拟稠油热采的温度场分布，充分考虑温度对稠油黏度的影响、温度引起的变形及微裂纹的张开对渗流的影响。基于给定注入参数，得到的温度场和孔隙压力场数值解能够进行一系列的优化设计工作。如优化注汽压力、注汽速度及注汽量等，为充分解决汽窜、注汽困难及注汽不到位或者过量等工程实际问题提供翔实的预测结果，显著改善生产效率、保证注入蒸汽的成功实施。

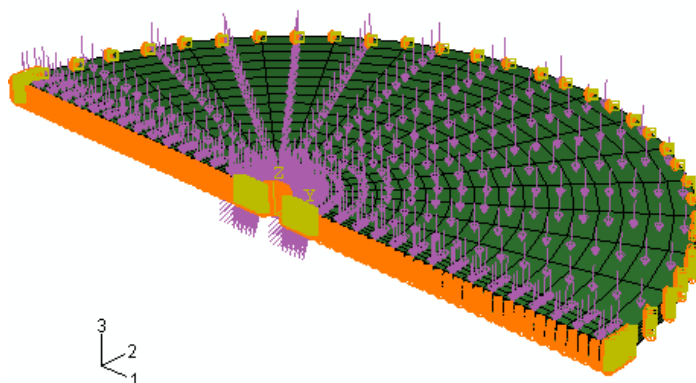
下图为利用Abaqus计算的某区块蒸汽注入20天时的温度分布图：



3. 油井射孔三维弹塑性固结分析与优化设计

射孔的弹塑性行为是油井产砂分析的基础。沈新普教授使用Abaqus软件，对油藏岩石的射孔变形进行了3维弹塑性有限元固结数值模拟。结合井孔和射孔的开挖过程，岩石的变形固结过程被视为一个流体—固体两场耦合的弹塑性问题，采用Mohr-Coulomb模型作为岩石的屈服条件。对每英尺4个和8个射孔的不同设

计形式进行了数值模拟，同时研究了水平面内不同的主应力方向对射孔稳定性的影响。



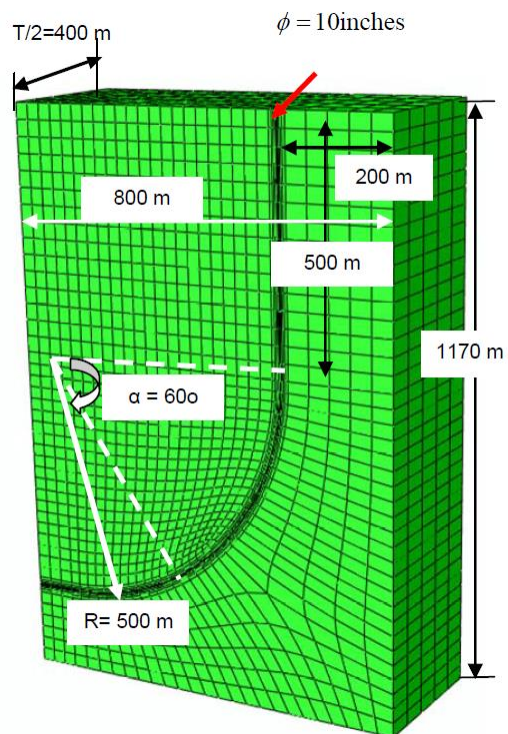
4. 泥浆窗口下限值计算

护壁和压井是钻井过程中泥浆的两个主要功能。泥浆是由水和水泥等添加物一起形成的混合物，对井壁有支撑保护作用。泥浆窗口是指泥浆密度选取时的上限和下限之间的间隔。其上限一般采用地应力的最小水平主应力的值，不需要进行另外的计算。它的下限则根据井壁围岩剪切屈服行为确定，需用通过地应力的几个分量，结合塑性屈服条件、材料强度等诸多因素来共同计算。当泥浆密度值选择窗口中的上下限之间时，钻井是安全的。

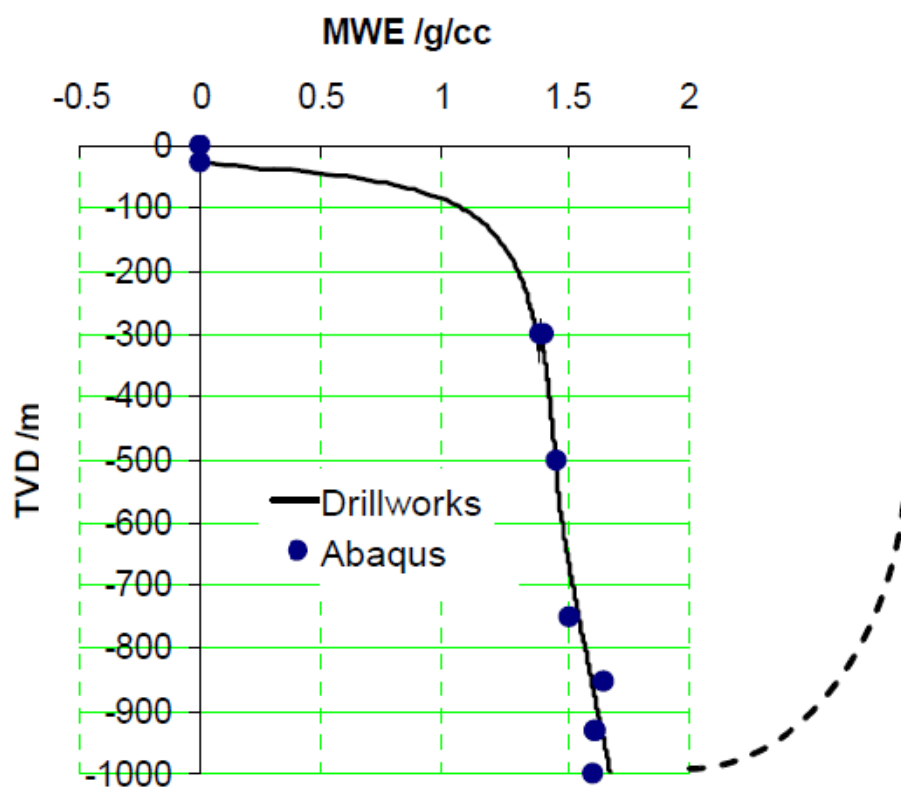
已有的泥浆窗口计算一般使用解析解进行。解析解的优点是方法简单、计算效率高，但缺点是其求解过程所用的地应力参数准确度较低。这主要是由于地应力计算时一般引入了较多简化与假设，而且不考虑向斜和背斜等地质结构引起的局部应力变化等因素。因此，传统的泥浆窗口解析解被称为一维解。

基于Abaqus软件，首先计算包含井孔轨迹全长的油田区块整体模型的应力场，然后利用子模型技术，逐点计算井孔轨迹上关键点的泥浆窗口下限值。在数值求解过程中，采用“先施加足够泥浆压力保持井孔围岩处于弹性状态、然后施加反向载荷形成实际卸载”的方法，逐步试算求出这个泥浆窗口下限。利用一个包括直井段和90度转角圆弧段的井孔轨迹的简单井孔模型，计算了沿井轴全长各处不同井孔倾角对应的泥浆窗口下限值数值解。

整体模型及井孔轨迹示意图如下图：



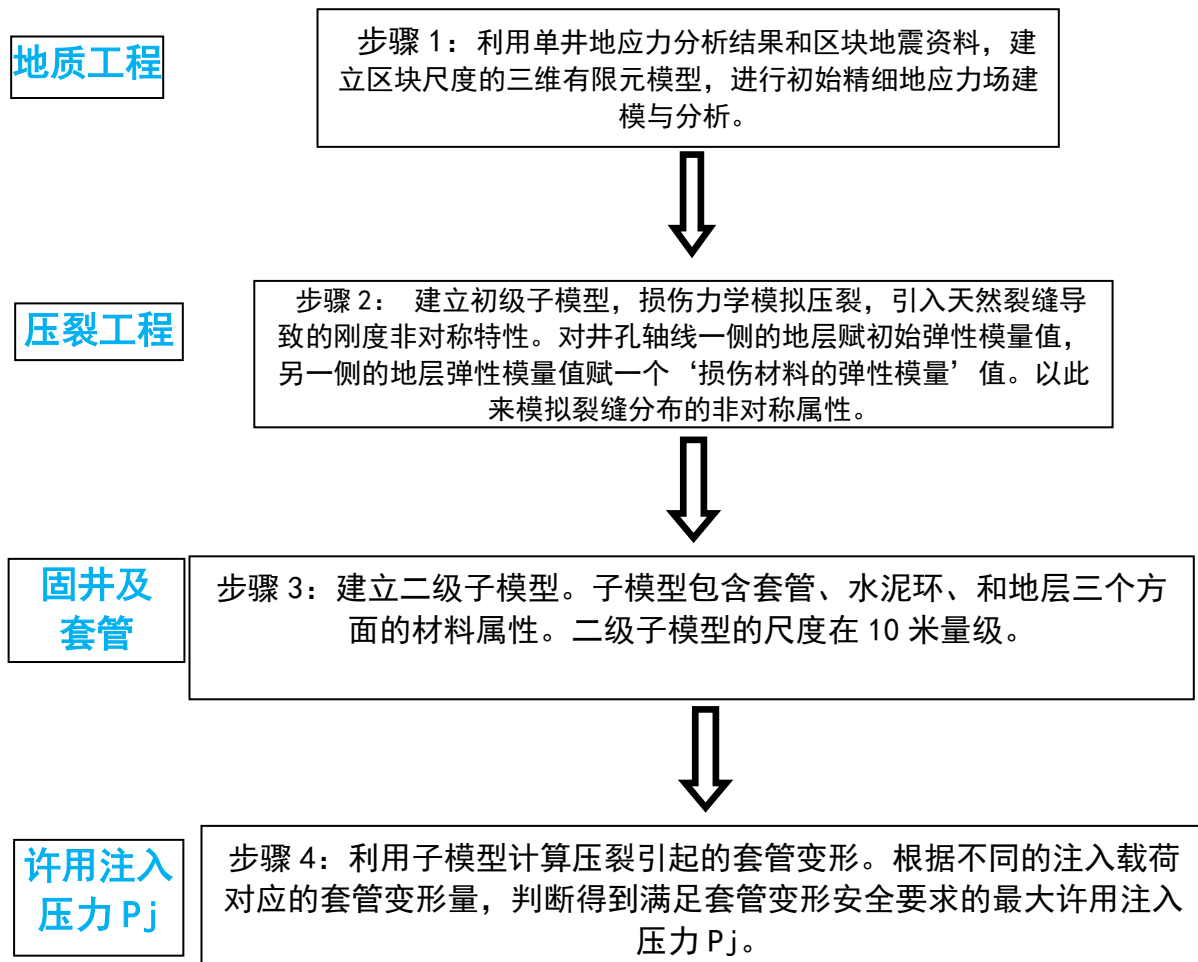
坍塌压力Abaqus数值解和解析解的比较 (右侧为井轨迹线):



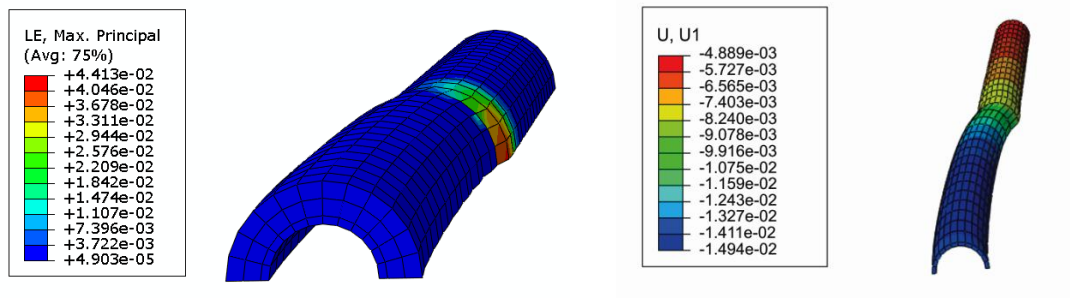
5. 压裂引起套管变形及最大许用注入压力

套管是油井设备的核心部件之一，对井壁及井孔内部的其它设备提供支撑和保护作用。由于某些特殊地层载荷因素、固井质量因素、以及套管的设计等诸多因素的影响，按照常规设计的套管有时候会发生严重的塑性变形而导致相关施工及生产不能正常进行。而对于页岩气储层改造工程中，水力压裂注入载荷作用下引起的套管变形则是近10年来出现的新问题。

沈新普教授建立了压裂载荷下套管变形模拟的套管—地质—工程一体化数值分析模型和计算流程：



针对西南某区块，利用上述方法计算了得到了压裂施工过程中固井水泥环的应变和套管变形：



致谢

感谢沈新普教授对引用其相关论文、分析报告等资料的许可。