

# 基于应力隔夹层划分的特低渗储层剩余油挖潜 ——以鄂尔多斯盆地白于山地区延长组储层为例

靳文奇<sup>1</sup> 杜书恒<sup>2,3</sup> 路向伟<sup>4</sup> 吴志宇<sup>1</sup> 师永民<sup>2,3,†</sup>

1. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第一采油厂, 延安 716000; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;  
3. 北京大学石油与天然气研究中心, 北京 100871; 4. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第六采油厂, 西安 710299;

† 通信作者, E-mail: sym@vip.163.com

**摘要** 基于鄂尔多斯盆地白于山地区延长组长 4+5 特低渗储层压裂缝分布规律性不强、预测难度大的问题, 采用传统工程地质方法与特殊测井、常规测井、沉积微相研究相结合的方法, 通过建立油藏三维空间展布的地层岩石力学模型, 开展随井间储层和应力场变化的全缝长压裂数值模拟, 得到较精确的压裂缝全缝长几何形态参数, 据此认为应力隔夹层将作为一种新的开发地质属性对压裂缝纵向延伸和水驱波及范围起主导控制作用, 并提出开发调整措施。研究结果可为提高低渗储层的开发决策效率、提高剩余油采出程度提供科学依据。

**关键词** 鄂尔多斯盆地; 隔夹层; 压裂缝; 地质建模

**中图分类号** TE348

## Revelation on Remaining Oil Excavation from Stress Interlayer Division in Special Low Permeability Reservoir: Take Yanchang Formation of Baiyushan Reservoir in Ordos Basin as an Example

JIN Wenqi<sup>1</sup>, DU Shuheng<sup>2,3</sup>, LU Xiangwei<sup>4</sup>, WU Zhiyu<sup>1</sup>, SHI Yongmin<sup>2,3,†</sup>

1. The First Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Yan'an 716000; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 3. Oil and Gas Institute, Peking University, Beijing 100871; 4. The Sixth Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710299; † Corresponding author, E-mail: sym@vip.163.com

**Abstract** As to Chang 4+5 formation of special low-permeability Baiyushan reservoir in Ordos Basin reservoir, the hydraulic fracture distribution is not regular and difficult to predict. The method of traditional engineering geology and special logging, conventional well logging, micro facies research were combined. Through the establishment of three-dimensional rock mass mechanics model of reservoir, the full length fracturing numerical simulation was carried out with the change of stress field. More accurate geometry parameters of fractures were got, stress interlayer insulation could be regarded as a kind of new development of geological property which would play an important role in fracture extension, then the development adjustment measures are put forward. The conclusion would provide an important scientific basis on decision-making efficiency in low permeability reservoir development and improve the residual oil recovery degree.

**Key words** Ordos Basin; interlayer insulation; pressure fracture; geological modeling

压裂缝展布预测对提高低渗透储层的产能意义重大, 国内外学者针对全球不同油田储层的压裂缝分布规律提出一系列预测理论和方法。部分学者运

用新一代网格技术(PEBI网格)模拟压裂裂缝, 可以真实地还原压裂裂缝形态<sup>[1-3]</sup>。有学者将裂缝参数转化为三维可视图像, 展示的仍是由经典模型得到

国家科技重大专项(2016ZX05013005-009)资助

收稿日期: 2015-08-27; 修回日期: 2016-03-12; 网络出版日期: 2016-11-07

的、由裂缝参数转化而来的、井筒两翼对称分布的裂缝<sup>[4-7]</sup>。少数学者通过力学分析,依据流-固耦合效应、岩石材料的非线性效应以及裂缝扩展的动态效应,建立低渗透油层水力压裂三维裂缝的动态扩展力学模型,运用有限元方法求解,实现低渗透油层三维裂缝形成过程的动态描述<sup>[8-9]</sup>。

有关鄂尔多斯盆地特低渗储层压裂缝的预测,目前缺乏适用的方法。文献[10-14]采用理想模型,对井筒周围的岩石力学参数进行理想化处理,即井筒周围的参数是均质的,主要目的是研究各个参数对裂缝最终形态的影响。

本研究侧重于建立井筒附近及井间岩石力学参数三维模型和应力三维模型,通过精确地描述地质现象,使压裂设计时的地质基础更加真实,从而取得地下裂缝的分布情况,并在此基础上研究基于应力隔夹层划分的特低渗储层剩余油挖潜。

鄂尔多斯盆地白于山地区延长组储层物性差,原始含水饱和度高(约 53.5%),应力状态复杂,应力方向不稳定,压裂缝分布随机性较大,注水开发过程中易发生多方向水窜、水淹,开发决策难度大、效率低,亟须厘清储层压裂缝全方位展布规律,为开发选层提供依据。本文选取该类储层的典型区块,提出一种新的压裂缝预测方法。

## 1 单井砂岩组划分

白于山位于陕北地区长 4+5 期的三角洲前缘亚相带内,主要的沉积微相为水下分流河道与分流间湾相沉积。

结合研究区目的层特征,大量搜集野外及室内资料,通过取芯井详细的岩芯描述和室内测井沉积相的划分,并结合岩芯分析资料,适当考虑接触关系和次级关系,对这些测井曲线的形态、幅度以及它们之间的组合形态进行研究。

考虑到声波时差和自然伽马曲线受岩层的物性、流体等多种因素影响,本研究选用二者组合来区别岩性,给出研究区砂层划分标准(图 1),总结研究区长 4+5 油层组测井相特征。

具体思路为:画出纵横连井沉积剖面图,建立研究区沉积相序演化格架,再根据上述测井曲线相模式,结合单砂体厚度平面变化趋势,进行平面微相组合,确定相带边界,对该区沉积微相开展精细剖析。

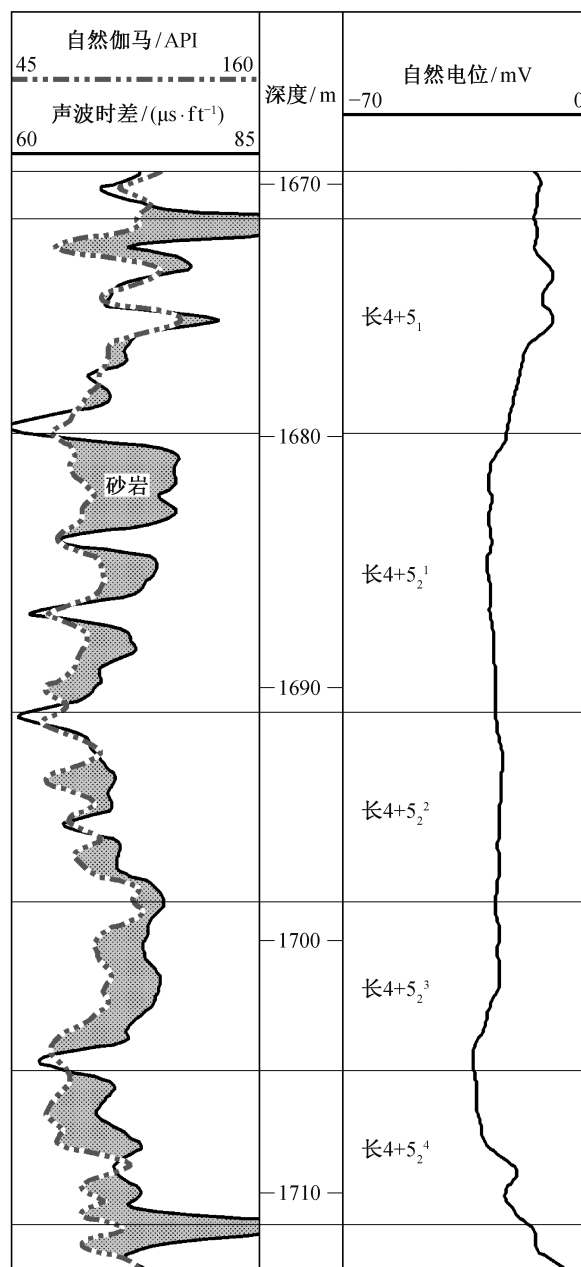


图 1 白于山砂层划分标准

Fig. 1 Sand layer division drawing standard of Baiyushan

## 2 连井砂岩组对比

岩相单元细分与对比是油气藏开发的基础,直接决定判断剩余油分布规律的准确程度<sup>[15-18]</sup>。鄂尔多斯盆地白于山地区低渗透油藏储层属于典型的三角洲前缘相沉积,古地貌平缓,水流稳定,砂体展布方向性明显,呈北东-南西向展布。油层组内部由两个三级正旋回组成,对应长 4+5<sub>1</sub>和长 4+5<sub>2</sub>两个砂岩组。砂岩组内部又由若干个多期形成的单

砂体相互切叠, 形成侧向复合砂体, 导致层内及平面上非均质性增强。

对单砂体构型结果进行剖析(图 2), 发现白于山地区小层内钙质夹层发育, 且分布不稳定。另外, 由于一个单砂体反映一个结构单元, 图 2 反映出长 4+5 油藏岩体存在较多的结构面。由于结构面与结构体结合部位的岩体力学性质差异大, 预计将对应力及压裂缝扩展起到一定的控制作用。

### 3 特殊声波测井与岩体力学性质

为进一步揭示储层内部的非均质性, 建立较精确的三维空间展布的油藏岩体力学模型, 我们采用侧向复合砂体单一河道识别技术, 进行厚层块状非均质油藏解剖, 将研究的主力油层长  $4+5_2$  进一步分为长  $4+5_2^1$  小层、长  $4+5_2^2$  小层、长  $4+5_2^3$  小层和长  $4+5_2^4$  小层(图 3)。

选取 Y40-251 井开展交叉偶极子阵列声波测井, 对测井资料进行解释和各种岩体力学性质计算。处理结果(图 3)显示, 最大水平主应力方向约为 NE45°, 纵向剖面上顶/底部应力隔层厚度大, 分布稳定, 增加了长 4+5 油层结构体的完整性; 油层和小层内部单砂体之间应力夹层非常发育, 分布不稳定, 增加了岩体内部应力分布的非均质性。

综合该井纵向应力分布情况, 选取该单井目的层段实测平均破裂压力 35 MPa 为界, 高于 35 MPa 部分识别为应力隔夹层, 其指示意义为: 超过平均破裂压力后岩石不易发生破裂, 且压裂过程中裂缝的纵向延伸会因为应力隔夹层的存在而受到严格限制。研究区其余各单井均存在相应的平均破裂压力, 可依据其实测值划分出应力隔夹层。棕色填充的面积表示应力隔夹层发育的相对程度(即该应力隔夹层对裂缝纵向延伸阻挡的相对程度), 造成纵向水淹程度的不同, 为剩余油挖潜指明方向。

以 Y40-251 井(图 3)为例, 可看出应力隔夹层的分布与自然伽马曲线、密度曲线以及比奥特系数曲线对应良好, 基本上呈正相关关系。从机理上剖析, 归一化后的自然伽马值可反映泥质的相对含量, 数值越大, 指示泥质含量越高; 成岩作用过程将导致泥岩或钙质岩类压实程度远远高于砂岩, 因此泥岩或含钙质夹层的泥岩密度常常显示异常高值; 比奥特系数是反映孔隙大小与分布对岩石可压缩性影响程度的物理量, 数值越大, 代表孔隙刚度越大, 岩石越不容易压缩及破裂。同时, 由于泥岩或者含

钙质夹层的泥岩能干性小于砂岩, 易发生塑性流动或变形而不易发生脆性破裂, 因此, 如果泥岩在储层中呈稳定条带状分布, 将导致形成压裂的“隔夹层”, 其隔挡作用的实质在于与相邻砂岩储层段的应力差较大, 因而限制了裂缝在纵向上的延伸。

### 4 三维精细储层模型建立

基于常规测井数据, 结合交叉偶极子阵列声波测井资料, 设置模型的 X, Y, Z 网格精度分别为 5 m, 5 m 和 0.5 m, 借鉴文献[19-22]中的建模方法, 建立三维精细储层地质及岩体力学模型(图 4)。

白于山地区生产井、注水井均为直井, 沿最大水平主应力方向穿过井筒, 切出截面属性模型, 将属性模型中的值输入压裂计算软件, 得到各属性在网格化界面上的分布图。根据储层地质模型  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$  的网格精度, 导入压裂模拟软件中的网格精度为横向 5 m, 纵向 0.5 m。以上模型将用于开展全缝长压裂缝模拟, 得到压裂缝较为真实的展布形态<sup>[23-27]</sup>, 并最终揭示应力隔夹层对于剩余油挖潜的意义。

### 5 应力隔夹层划分意义剖析

以 Y40-251 井延长组储层为例。由于应力隔夹层对裂缝的延伸构成限制, 因此针对综合柱状图(图 3)显示的中间存在隔夹层的储层段设计两处压裂层段: 1650.0~1655.0 m (中部存在厚度为 0.5 m 的隔夹层)和 1660.5~1668.0 m (中部存在厚度为 0.4 m 的隔夹层)。有充分的理由认为, 当两层段分别压裂时, 由于应力隔夹层的存在, 会导致隔夹层上下储层压裂规模不均, 因而造成上下储层动用程度产生较大差异, 剩余油赋存位置将集中于储层改造程度较低的层段, 可为下一步挖潜指明方向。

首先对需要模拟的储层单元进行拆分, 然后进行压裂缝预测, 再结合现场生态动态, 检验预测结果的可靠性。按照隔夹层分布位置, 将每个层段分别剖分为两个层段: 层段 1650.0~1655.0 m 剖分成 1650.0~1652.5 m (层段 A)和 1653.0~1655.0 m (层段 B)(中部隔夹层厚 0.5 m); 层段 1660.5~1668.0 m 剖分为 1660.5~1664.5 m (层段 C)和 1664.9~1668.0 m (层段 D)(中部隔夹层厚 0.4 m)。将截切出的相应单井的剖面模型数据导入相同网格化精度的压裂模拟程序中, 设计混砂比、排量等参数, 预测压裂缝全缝长展布情况<sup>[28-29]</sup>(图 5)。

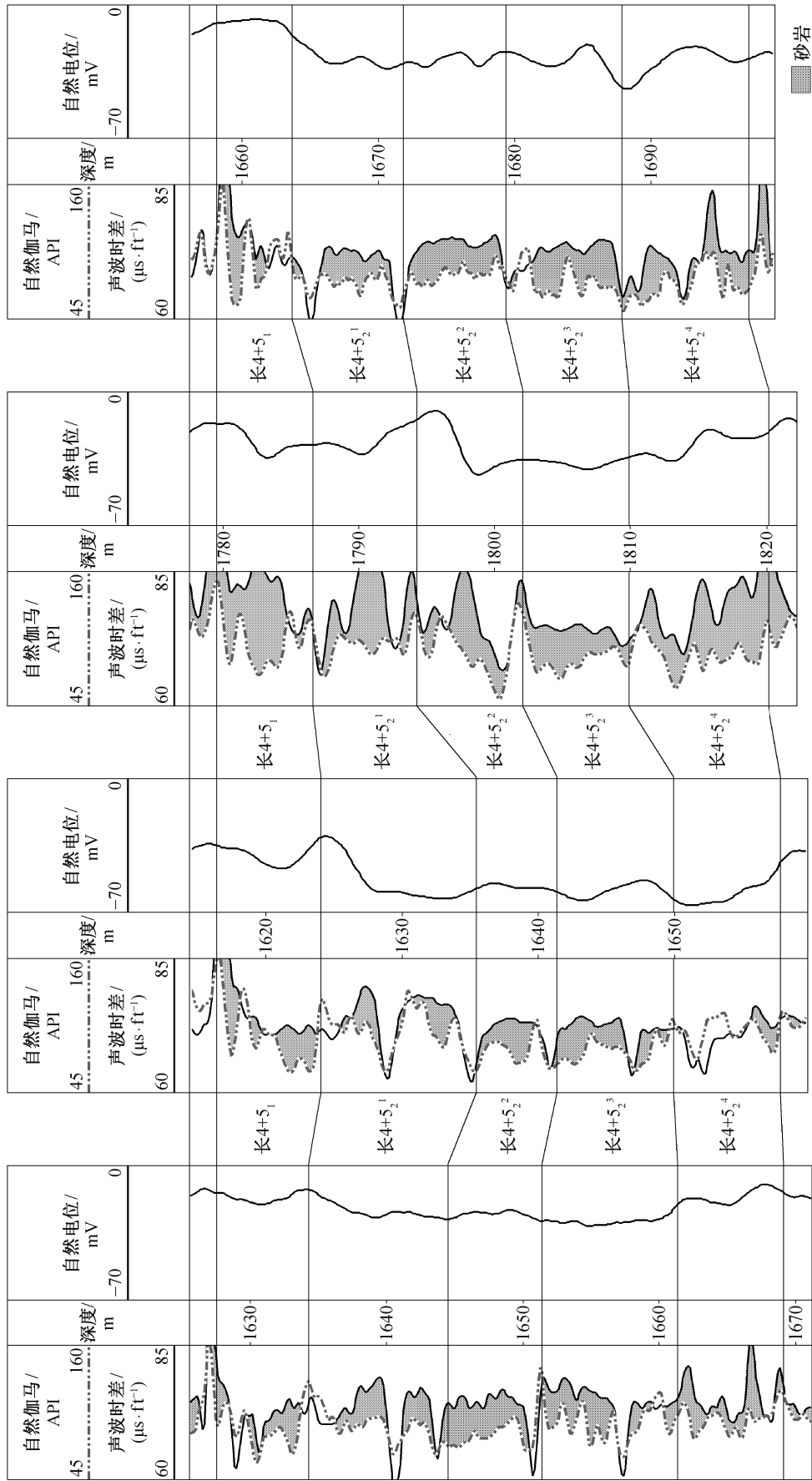


图 2 白于山加密区长 4+5 南北向砂体连通剖面  
Fig. 2 Encryption district of Baiyushan sand body connecting section

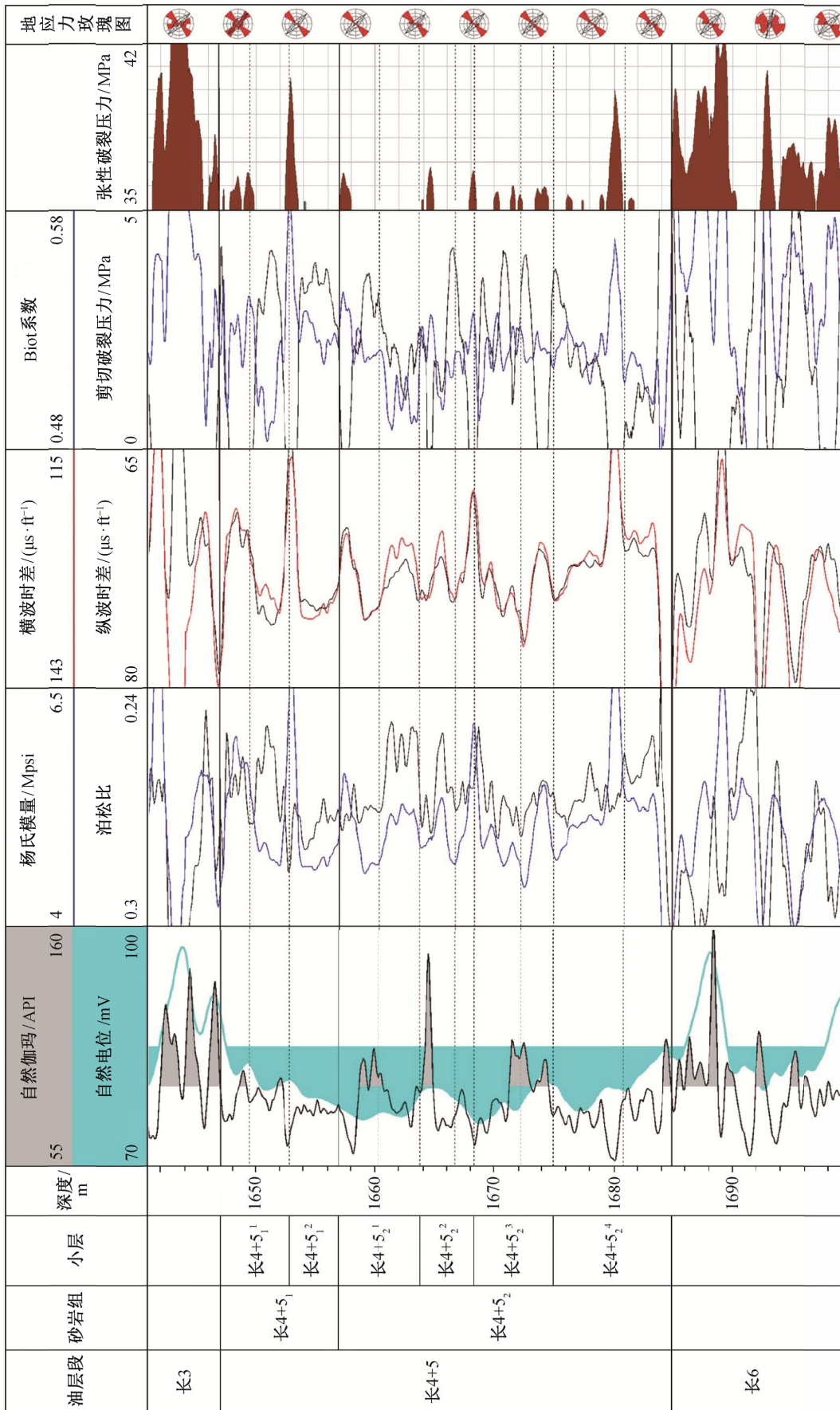


图 3 Y40-251 井交叉偶极子阵列声波测井岩石力学综合柱状图  
Fig. 3 Rock mechanics comprehensive figure of X-MAC logging of Well Y40-251

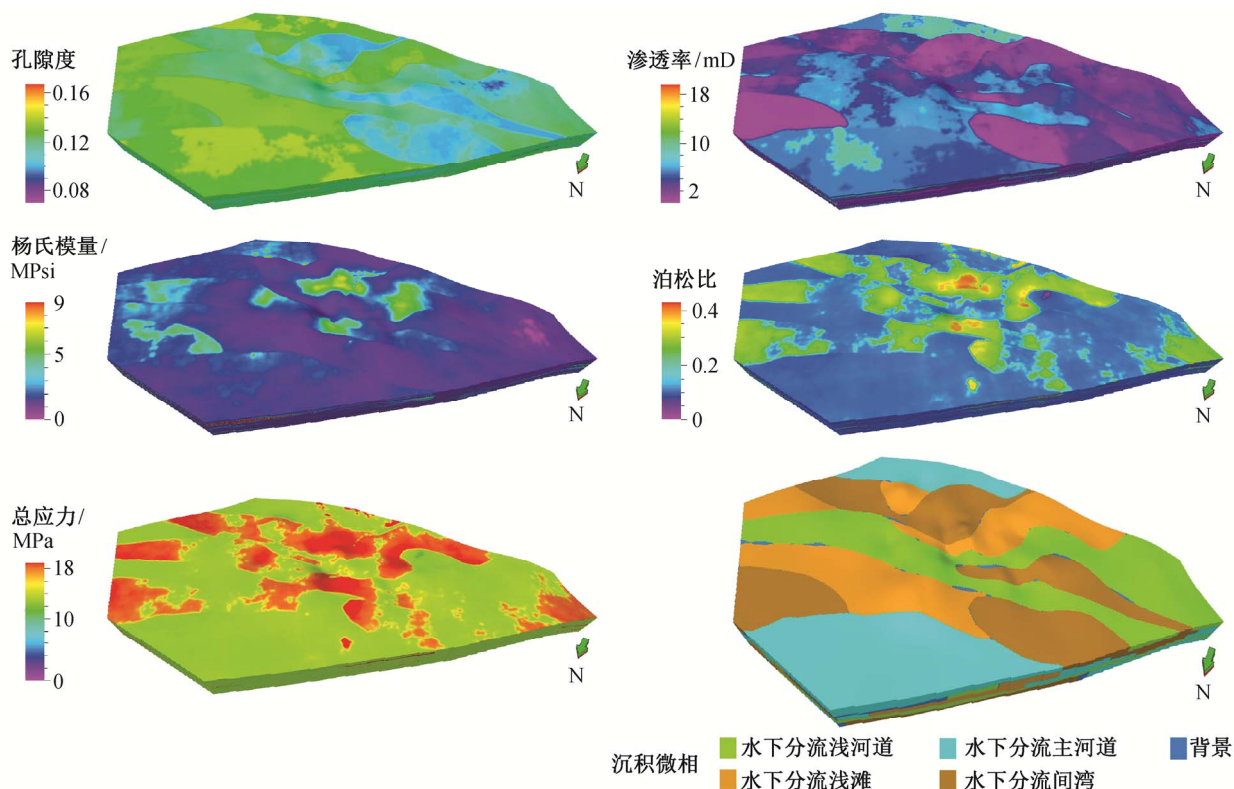
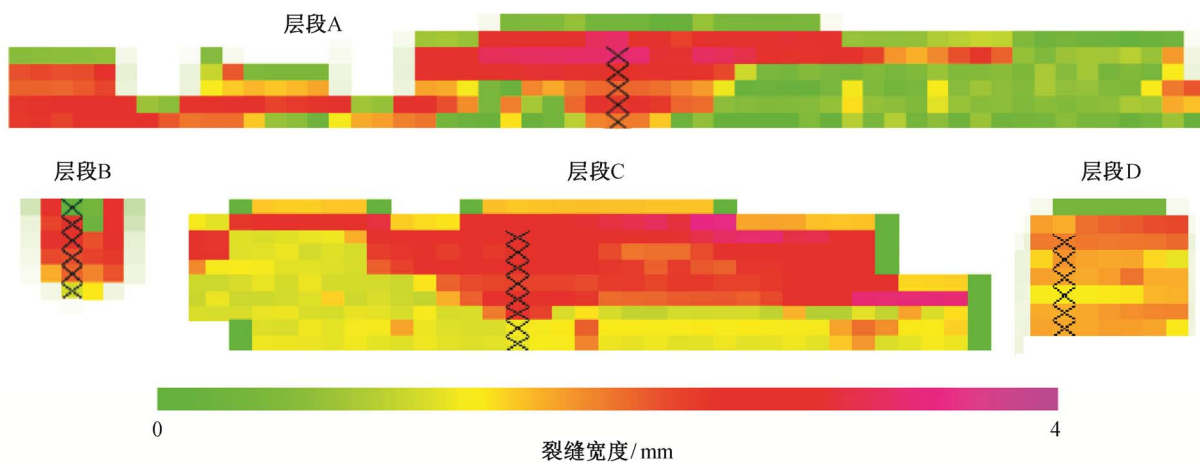


图 4 白于山地区长 4+5 目的层三维精细储层地质及岩石力学模型

Fig. 4 Model of the fine reservoir geology and rock mechanics of Chang 4+5 layer in Baiyushan district



井筒在网格的最中间列，“x”号表示射孔段；随着压裂的实施，裂缝向左右两端推进；左右长度为全缝长，上下长度为裂缝高度，颜色表示裂缝宽度

图 5 Y40-251 井储层拆分方法压裂缝模拟结果

Fig. 5 Fracture simulation results by the method of reservoir split of Well Y40-251

从图 5 可以看出，由于隔夹层上下物性及岩石力学性质的差异，造成两层段压裂时，隔夹层上方储层压裂缝的长度和开度较大，储层改造程度较大；下方裂缝长度和开度较小，储层动用程度较低。

为进一步验证模拟结果的可靠性，将 A 和 C 两层段分别采取桥塞隔开，先后对 B 和 D 层段采取重复压裂。经矿场实际生产状况及产液剖面测井结果验证，生产状况良好。

## 6 结论

1) 传统压裂缝预测方法不能满足中国陆相低渗、特低渗储层的预测精度要求,测井、地质模型与生产动态相结合的全缝长压裂数值模拟方法将大大提高预测精度。

2) 应力隔夹层作为一种新的开发地质属性,将对压裂缝纵向延伸和水驱波及范围起主导控制作用,可据此提出开发调整措施。

3) 与传统物性隔夹层相比,应力隔夹层划分应与产能分析、油藏数值模拟等常规方法相结合,才能达到提高剩余油挖潜精度的目的。

### 参考文献

- [1] 谭文才. 低渗储层裂缝预测方法研究[D]. 荆州: 长江大学, 2012
- [2] 胡南. 苏里格气田二叠系储层水力压裂缝长宽高的测井预测[D]. 成都: 西南石油大学, 2012
- [3] 刘浩. 高煤级煤储层水力压裂的裂缝预测模型及效果评价[D]. 焦作: 河南理工大学, 2010
- [4] 王立军, 张晓红, 马宁, 等. 压裂水平井裂缝与井筒成任意角度时的产能预测模型. 油气地质与采收率, 2008, 15(6): 73-75
- [5] 陈冀崑, 徐乐. 考虑裂缝壁面蚓孔区影响的酸压井产能预测. 天然气工业, 2008, 28(7): 81-84
- [6] 张乐, 王雪峰, 李旭. 水力压裂施工中压裂缝高度预测方法研究. 西部探矿工程, 2009, 21(1): 60-62
- [7] 易新民, 唐雪萍, 梁涛, 等. 利用测井资料预测判断水力压裂裂缝高度. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(5): 21-24
- [8] 陈汉军. 致密碎屑岩储层特征与裂缝发育带预测[D]. 成都: 成都理工大学, 2011
- [9] 黄利平. 低渗透气藏压裂水平井产能预测与裂缝参数优化研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2011
- [10] 杨克文, 史成恩, 万晓龙, 等. 鄂尔多斯盆地长 8、长 6 天然裂缝差异性研究及其对开发的影响. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(6): 37-41
- [11] 李元昊. 鄂尔多斯盆地西部中区延长组下部石油成藏机理及主控因素[D]. 西安: 西北大学, 2008
- [12] 李宪文, 张矿生, 樊凤玲, 等. 鄂尔多斯盆地低压致密油层体积压裂探索研究及试验. 石油天然气学报, 2013, 35(3): 142-146
- [13] 王晓东, 祖克威, 李向平, 等. 宁合地区长 7 致密储集层天然裂缝发育特征. 新疆石油地质, 2013, 34(4): 394-397
- [14] 万晓龙, 高春宁, 王永康, 等. 人工裂缝与天然裂缝耦合关系及其开发意义. 地质力学学报, 2009, 15(3): 245-252
- [15] 高永进, 田美荣, 贾光华. 砂体物性对岩性油藏成藏控制作用物理模拟. 地球科学: 中国地质大学学报, 2007, 32(2): 273-278
- [16] 张俊, 庞雄奇, 陈冬霞, 等. 牛庄洼陷砂岩透镜体成藏特征及主控因素剖析. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 233-237
- [17] 徐兆辉, 胡素云, 汪泽成, 等. 四川盆地须家河组大型砂岩储集体发育特征与形成机理. 天然气地球科学, 2014, 25(12): 1962-1974
- [18] 渠芳, 陈清华, 连承波. 河流相储层细分对比方法探讨. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(1): 17-21
- [19] 欧阳明华, 谢丛姣. 精细油藏描述中的储层建模. 新疆石油学院学报, 2004, 16(1): 47-51
- [20] 程钰. 兴隆台太古界潜山油藏三维构造建模研究[D]. 荆州: 长江大学, 2012
- [21] 解伟. 低渗透油藏精细地质建模研究[D]. 东营: 中国石油大学, 2010
- [22] 王家华, 夏吉庄. 三维地震约束多点建模降低井间砂体预测的不确定性. 沉积学报, 2013, 31(5): 878-888
- [23] 杜书恒, 师永民. 低渗透砂岩储层可压裂性新判据. 地学前缘(出版中)
- [24] 杜书恒, 师永民. 低渗油气藏水力压裂理想水驱波及范围预测新方法. 天然气地球科学, 2015, 26(10): 1956-1962
- [25] 杜书恒, 师永民, 徐启, 等. 井震联合非均质储层改造规模的非线性表征方法. 北京大学学报: 自然科学版, 2016, 52(2): 241-248
- [26] Du Shuheng, Shi Yongmin, Guan Ping, et al. New inspiration on effective development of tight reservoir in secondary exploitation by using rock mechanics method. Energy Exploration & Exploitation, 2016, 34(1): 3-18
- [27] Du Shuheng, Shi Yongmin, Bu Xiangqian, et al. New expression of the changing stress field in low-permeability reservoir and its application in secondary exploitation. Energy Exploration & Exploitation, 2015, 33(4): 491-514
- [28] 杜书恒, 师永民. 松辽盆地扶余低渗储层压裂缝定量预测. 地学前缘(出版中)
- [29] 杜书恒, 师永民. 储层微观特征对压裂目的层段岩石微观观裂的影响. 天然气地球科学, 2017(出版中)