

# 鄂尔多斯盆地靖安地区延长组储层有效开发的应力判据

路向伟<sup>1</sup> 杜书恒<sup>2,3,†</sup> 郑奎<sup>1</sup> 张换果<sup>1</sup> 汪贺<sup>2,3</sup> 孙彤<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六采油厂, 西安 710299; 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; † 通信作者, E-mail: dushuheng@pku.edu.cn

**摘要** 通过铸体薄片观察、三维地质建模、特殊测井系列和微地震监测分析, 研究靖安地区延长组储层的应力特征。结果显示: 1) 研究区储层微观孔喉的方向性展布在一定程度上导致应力各向异性; 2) 长4+5<sub>2</sub>砂岩组各小层砂岩分布存在较大差异, 多期河道侧向叠加特点显著, 对应力分布产生较重要的影响; 3) 研究区应力差总体上不大, 在3~6 MPa之间, 随着注水开发的进行, 两水平主应力的变化幅度在油藏中存在分布不均的现象, 造成重复压裂过程中裂缝的多向性发展。研究结果可为低渗储层开发中后期提高油田采收率提供科学依据。

**关键词** 鄂尔多斯盆地; 应力; 水力压裂缝; 原油采收率

**中图分类号** TE348

## Stress Criterion of Effective Development on Yanchang Formation Reservoir in Jing'an Area, Ordos Basin

LU Xiangwei<sup>1</sup>, DU Shuheng<sup>2,3,†</sup>, ZHENG Kui<sup>1</sup>, ZHANG Huanguo<sup>1</sup>, WANG He<sup>2,3</sup>, SUN Tong<sup>2,3</sup>

1. The 6th Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, 710299; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 3. Oil and Gas Institute, Peking University, Beijing 100871;

† Corresponding author, E-mail: dushuheng@pku.edu.cn

**Abstract** Through the analysis of casting thin sections, 3D geological modeling, special logging series and micro seismic monitoring, reservoir stress characteristics of Jing'an area were studied. The results show that: 1) the distribution of the direction of micro pore and throat would cause the stress anisotropy; 2) differences in each layer of Chang 4+5<sub>2</sub> sandstone are big, the lateral superposition characteristics of multi-periods channels have the major influence on stress distribution; 3) the stress difference in the study area is generally not large with the value of 3~6 MPa, with the development of water flooding development, the variation of the two main stress varies in the reservoir, resulting in the multi-directional development of fractures in the process of repeated fracturing. The results can provide a scientific basis for improving oil recovery in the middle and late development of low permeability reservoirs.

**Key words** Ordos Basin; stress; hydraulic fracture; oil recovery

根据弹性理论, 地下应力的作用主要由较硬的岩石承受, 由于沉积岩的刚性一般不如火成岩大, 因此沉积盆地内的差应力强度一般不及花岗岩中大。例如, 井眼崩落往往出现于硬质地层中, 说明

硬质地层中水平两个方向的主应力差值较大<sup>[1-4]</sup>。

地应力形成的过程也是地质体能量积累和集聚的过程, 地质体积聚的弹性能越大, 说明地应力越大。同时, 地应力会对地质体的变形特性产生影响,

地质体的弹性模量随应力增大而增大。因此,在构造载荷比较大的地区,弹性模量高的坚硬地层会累积较大的地应力<sup>[5-7]</sup>。

预测应力发育特征及压裂缝,对开发选层以及提高采收率有重要意义<sup>[8-12]</sup>。目前,国内外对地应力的研究集中于理论推算(有限元模拟<sup>[13-15]</sup>和数理方程推导<sup>[16-18]</sup>)以及矿场及室内试验<sup>[19-21]</sup>(声发射法、井筒崩落法和水压致裂法)两方面,结合地质建模技术的地应力研究相对缺乏。本文融合三维地质建模技术与特殊测井分析手段,研究靖安地区延长组储层应力特征,剖析其发育机制,以期对低渗透层开发提供科学指导。

## 1 地质概况

研究区位置如图 1 所示。鄂尔多斯盆地靖安地区位于陕北地区三角洲前缘亚相带内,主要沉积微相为水下分流河道与分流间湾相沉积。砂层主体呈条带状展布,河道宽度约为 5~8 km,砂层厚度为 10~35 m,呈条带状展布。该区延长组储层宏观裂缝和微细裂缝均发育,物性差异较大,应力场变化复杂,天然裂缝、压裂缝及注水过程中产生的动态缝分布非常复杂,方向性不明确,裂缝发育是油井见水快且高含水井较多的主要原因,导致含水量普遍较高,水淹、水窜方向及裂缝产生的机理不明确。

## 2 沉积微相精细解剖

据薄片观察、统计及测井识别结果,将该区储层岩性划分为泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、粉细砂岩和细砂岩 6 种,总体上为一套中-细粒岩屑长石砂岩,属于低孔隙度、低渗透型。砂岩碎屑物以细砂级为主(平均含量为 79.65%),中砂级次之(平均含量为 15.68%),再次为粉砂级(平均含量为 4.67%)。碎屑物中值粒径为 0.17 mm,分选程度为中等至好。

岩石薄片观察显示,该区储层微观孔喉展布具有一定的方向性,颗粒脆性明显增加,粒内孔隙发育(图 2),降低了岩石的强度,且发育潜在缝,据此可以推测该区长 4+5 油层应力各向异性部分受控于微观孔喉的方向性展布。

利用自然电位(SP)和自然伽马(GR)曲线,可以计算沉积物中的泥质含量,从而识别其岩性。采用 SP 和 GR 曲线组合法,将靖安地区长 4+5 油层组划分为长 4+5<sub>1</sub> 和长 4+5<sub>2</sub> 两个砂岩组,同时将长

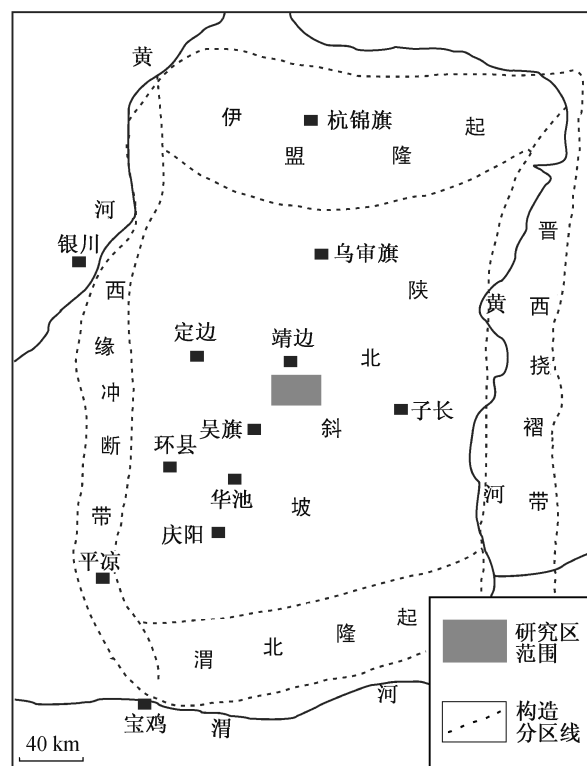


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the study area

4+5<sub>2</sub> 砂岩组划分为 3 个小层: 长 4+5<sub>2</sub><sup>1</sup>, 长 4+5<sub>2</sub><sup>2</sup> 和长 4+5<sub>2</sub><sup>3</sup>。

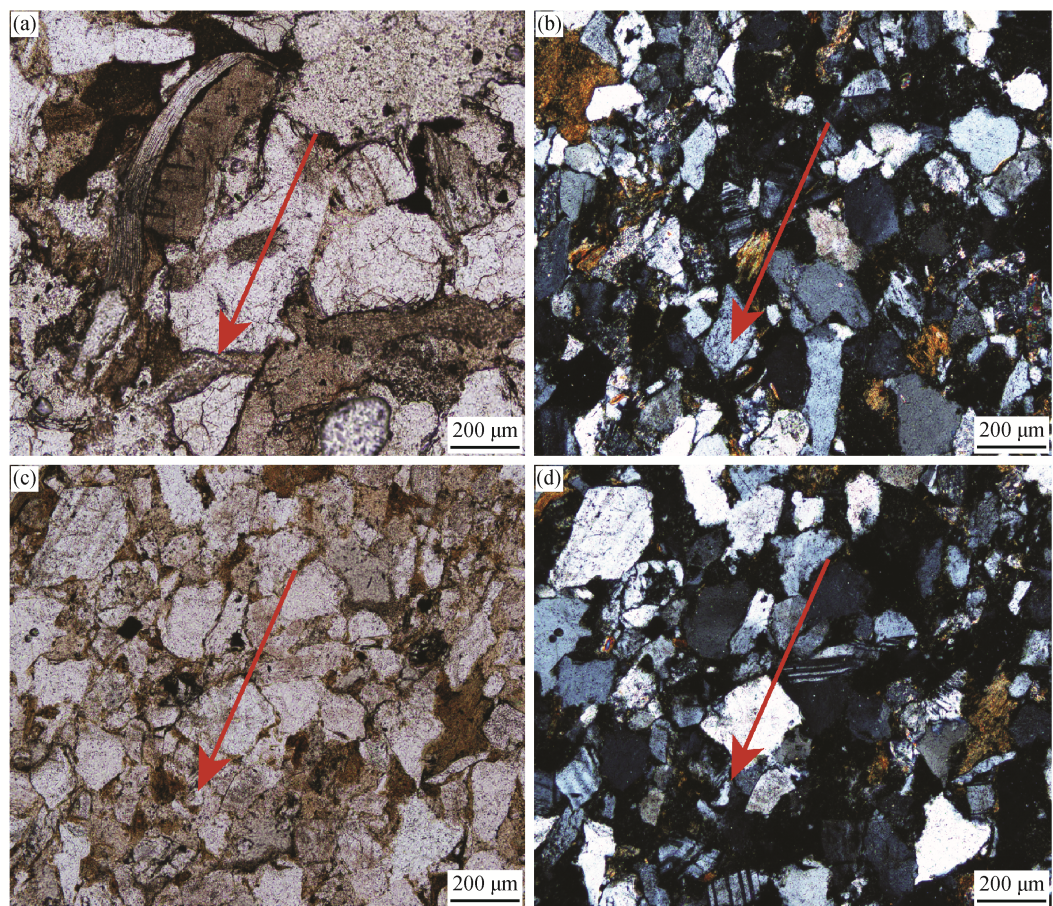
根据单井砂岩识别结果,绘制 4 个小层的砂岩分布图(图 3)。图 3 显示,长 4+5<sub>2</sub> 砂岩组各小层砂岩分布存在较大差异,多期河道侧向叠加特点显著,对应力分布产生较重要的影响。

根据砂岩分布图,将该区沉积微相划分为水下分流主河道、水下分流浅河道、水下分流浅滩及水下分流间湾 4 种类型(图 4)。

## 3 水平地应力建模

杨氏模量、泊松比和抗压强度是反映岩层弹性和破裂性能的重要指标,测定砂岩和泥岩的岩石力学参数,对预测砂岩与泥岩的应力差异、研究裂缝形态以及优化压裂裂缝设计有重要意义<sup>[22-24]</sup>。

根据弹性力学原理,应用三轴应力试验装置,对白于山长 4+5 储层岩芯进行岩石力学参数测定(表 1)。结果显示,该区砂岩的平均杨氏模量为 17.7 GPa,泊松比为 0.21;泥岩的平均杨氏模量为 27.7 GPa,泊松比为 0.20。泥岩的杨氏模量比砂岩高,说明当受力状态相同时,砂岩的弹性变形量



(a) 于检 42-24 井 1710.26 m; (b) 于检 42-24 井 1710.26 m; (c) 于检 42-24 井 1680.34 m; (d) 于检 42-24 井 1680.34 m。红色箭头表示颗粒排布优势方向

图 2 长 4+5 油层储层典型薄片微观孔喉特征

Fig. 2 Characteristics of pore-throat in typical thin sections of Chang 4+5 reservoir

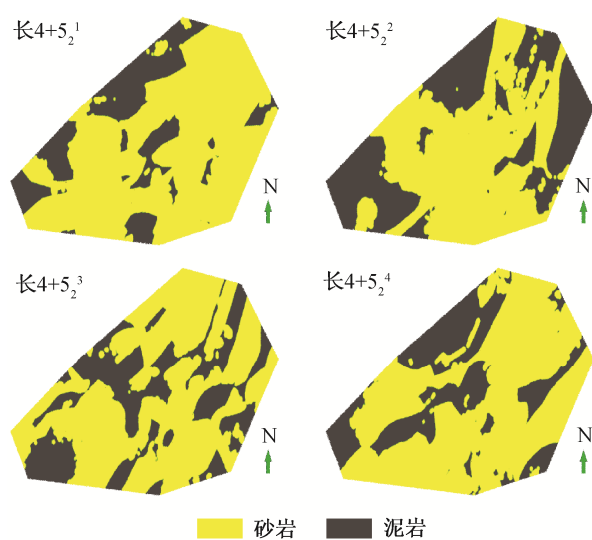


图 3 长 4+5 油层组 4 个小层的砂岩分布  
Fig. 3 Sandstone distribution of four groups of layers in Chang 4+5 reservoirs

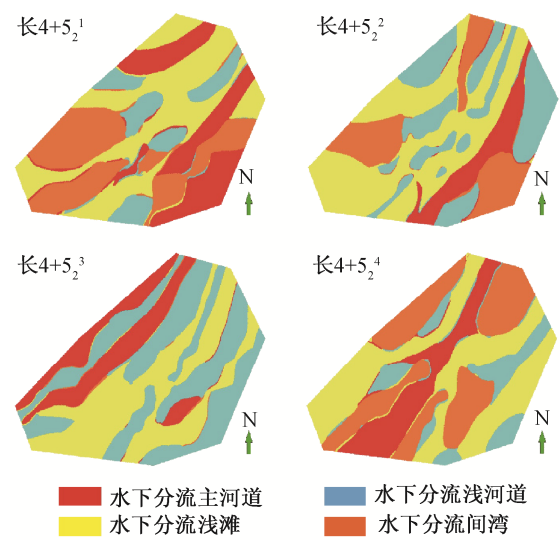


图 4 长 4+5 油层组 4 个小层沉积微相划分结果  
Fig. 4 Sedimentary micro-facies of the sandstone distribution of four groups of layers in Chang 4+5 reservoirs



表 1 靖安地区长 4+5 储层岩样模拟地层岩石力学实验结果

Table 1 Rock mechanics experiment of Chang 4+5 reservoir in Jing'an area

岩性	围压/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	体积压缩系数/ $10^4\text{MPa}^{-1}$
砂岩	25	16.44	0.18	1.77
泥岩	25	41.23	0.23	0.74
砂岩	25	14.11	0.21	1.57
砂岩	24	23.53	0.19	2.79
泥岩	24	21.82	0.21	3.06
砂岩	27	18.25	0.21	3.25
泥岩	27	20.06	0.16	2.21
砂岩	28	16.21	0.24	4.51

小。泥岩的泊松比与砂岩相近,因此要控制裂缝在垂向上的延伸,泥岩隔层应达到一定的厚度。

将岩芯测试数据与相应深度的测井值(包括 AC (声波时差)、GR (自然伽马)和 Rt (地层真电阻率))相匹配,进行相关性和多元线性回归分析,得出杨氏模量  $E$  和泊松比  $\sigma$  的常规测井计算式:

$$E = 0.131158 \times AC + 0.113233 \times Rt - 0.008163 \times GR, \quad (1)$$

$$\sigma = 0.000951 \times AC + 0.000191 \times Rt + 0.000444 \times GR. \quad (2)$$

根据应力叠加原理,将地下油藏任一网格节点的岩石自重应力、构造应力和流体压力累加,通过三维地质建模,得到最大/最小水平主应力三维模型(图 5)。

$$\sigma_v = D_{tv} \gamma_{ob}, \quad (3)$$

$$\sigma_{h,H} = \mu (\sigma_v - \alpha D_{tv} \gamma_p) / (1 - \mu) + \alpha D_{tv} \gamma_p + \varepsilon_x E + \sigma_t, \quad (4)$$

式(3)和(4)中,  $\sigma_v$  表示上覆应力(MPa),  $\sigma_{h,H}$  表示水平最小/最大主应力(MPa),  $\mu$  表示泊松比,  $D_{tv}$  表示垂直深度(m),  $\gamma_{ob}$  表示上覆岩层的应力梯度(MPa/m),  $\gamma_p$  表示孔隙压力梯度(MPa/m),  $\alpha$  表示比奥特系数,  $D_{tv} \gamma_p$  表示孔隙压力,  $\varepsilon_x$  表示水平最大/最小地应力方向的应变,  $E$  表示杨氏模量( $10^4\text{MPa}$ ),  $\sigma_t$  表示水平最大/最小地应力方向的构造应力附加量。

图 5 显示,研究区应力差总体上不大,在 3~6 MPa 之间,注水井附近两水平主应力差值较大,采油井附近差值较小。随着注水开发的进行,油藏孔隙压力分布情况发生变化,导致油藏储层地应力发

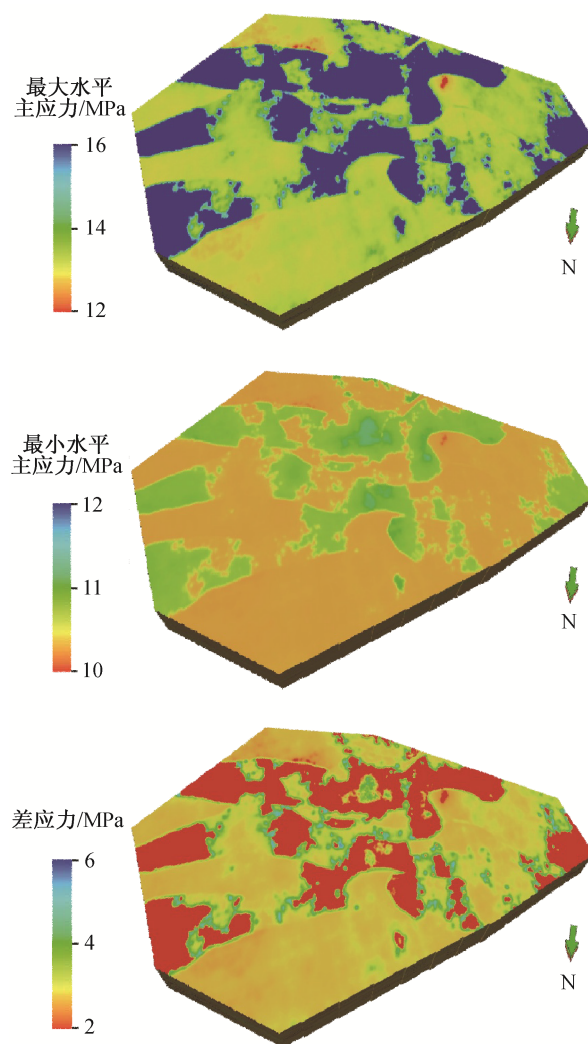


图 5 靖安地区长 4+5 油层组三维地应力及应力差模型  
Fig. 5 Model of three-dimensional stress and stress difference of Chang 4+5 reservoir in Jing'an area

生变化,水平最大/最小主应力的变化幅度不一致。当初始水平最大主应力值降低的幅度大于初始水平最小主应力值降低的幅度时,即最大/最小水平主应力方向发生偏转时,重复压裂的裂缝将沿新的水平最大主应力方向延伸并扩展。两水平主应力的变化幅度在油藏中存在分布不均的现象,由此造成重复压裂过程中裂缝的多向性发展,这是研究区内人工裂缝分布规律性不强的主要原因,也是研究区内注水后发生不规则水淹、水窜的根本原因。

## 4 模型验证

在压裂施工过程中,通过地面微地震技术,对裂缝延伸进行实时监测,获得人工裂缝走向。监测



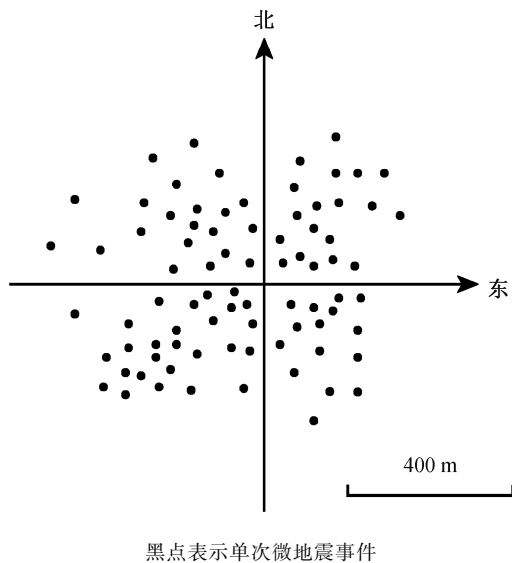


图6 靖安地区长4+5储层压裂微地震检测结果  
Fig. 6 Results of micro seismic detection of Chang 4+5 reservoir fracturing in Jing'an area

结果表明,人工裂缝走向不一致,东北—西南、西北—东南走向裂缝都存在(图6)。理论上,天然裂缝与人工裂缝的走向应与最大主应力方向一致。根据微地震监测结果推断,靖安地区长4+5储层人工裂缝多向性的可能性较大。

微地震监测结果(图6)显示压裂缝呈现以下特征:1)缝长接近;2)缝高接近;3)左右相近;4)微地震事件检测结果为方位各异;5)总是以某一个方位为主,但这个方位不一定是北东向。微地震监测结果与应力差模型(图5)匹配性较好。

## 5 结论

本文从地应力的角度出发,对鄂尔多斯盆地靖安地区长4+5储层在实际开发中显示的产能效果不一、开发规律不明显等特征进行剖析,得出以下结论。

1)铸体薄片观察显示,鄂尔多斯盆地靖安地区延长组储层微观岩石结构和孔喉展布具有一定的方向性,颗粒脆性较大,粒内孔隙发育,降低了岩石的强度,且发育潜在缝,可以据此推测该区区长4+5油层的应力各向异性部分受控于微观孔喉的方向性展布。

2)研究区水平应力差总体上不大,在3~6 MPa之间,注水井附近两水平主应力差值较大,采油井附近差值较小。随着注水开发的进行,油藏孔隙压

力分布情况发生变化,当最大/最小水平主应力方向发生偏转时,重复压裂的裂缝将沿新的水平最大主应力方向延伸并扩展。两水平主应力的变化幅度在油藏中存在分布不均的现象,造成重复压裂过程中裂缝的多向性发展,这是研究区内人工裂缝分布规律性不强的主要原因,也是注水后发生不规则水淹、水窜的根本原因。

3)微地震监测结果显示压裂缝缝长接近,缝高接近,左右相近,方位各异,且总是以某个方位为主,但不一定是北东向。

## 参考文献

- [1] 赵振峰,樊凤玲,蒋建方,等. 致密油藏混合水压裂实例. 石油钻采工艺, 2014, 36(6): 74-78
- [2] 邹爱清,朱杰兵. 深部岩石工程力学特性及地应力测试研究综述. 长江科学院院报, 2014, 31(10): 43-50
- [3] 宋杰. 砂岩油藏地应力及岩石力学参数与套管损坏相关性. 地质力学学报, 2014, 20(3): 324-330
- [4] Rutqvist J, Leung C, Hoch A, et al. Linked multi-continuum and crack tensor approach for modeling of coupled geomechanics, fluid flow and transport in fractured rock. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 5(1): 18-31
- [5] 陈朋刚,史鹏涛,王青青,等. 西峰地区岩石力学参数及地应力研究. 吐哈油气, 2012, 17(3): 244-246
- [6] 徐晓春. 水力压裂中地应力及岩石强度参数的研究[D]. 荆州: 长江大学, 2012
- [7] 万有余,张玉香,王国庆,等. 昆北油田岩石力学参数及地应力研究. 青海石油, 2012, 30(1): 112-116
- [8] 张玉广. 基于叠前弹性参数反演的三维应力场及全缝长整体压裂技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011
- [9] 张旭东,薛承瑾,张烨. 塔河油田托甫台地区岩石力学参数和地应力试验研究及其应用. 石油天然气学报, 2011, 33(6): 132-134
- [10] 刘钦节. 低渗油藏储层裂缝的参数反分析优化方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2009
- [11] 王素玲. 低渗透油层水力压裂三维裂缝数值模拟研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2008
- [12] 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
- [13] 颜凡全. 应用弹塑性流固耦合理论研究套损的影响因素地应力及流体压力[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2005
- [14] 邓燕. 重复压裂压新缝力学机理研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2005
- [15] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展. 力学进展, 2005, 35(1): 91-99
- [16] Aadnoy B S. Geomechanics in the oil industry — what have we learned and where do we go? // Proceedings of the Sixth World Congress on Computational Mechanics in Conjunction with the Second Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics. Beijing: 2004: 168-170
- [17] Settari A. A fully coupled reservoir-geomechanics model to address sand production and wellbore instability problem using stabilized finite element // Abstracts of the Papers Presented at the Minisymposia Sessions of the Sixth World Congress on Computational Mechanics in Conjunction with the Second Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics. Beijing: 2004: 281
- [18] 张保平, 方竞, 田国荣, 等. 就地应力条件下岩石静动态力学性质的研究. 岩土力学, 2004, 25(3): 396-398
- [19] 刘建军. 裂缝性低渗透油藏流-固耦合理论及应用. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 614
- [20] 苏生瑞, 朱合华, 王士天, 等. 岩石物理力学性质对断裂附近地应力场的影响. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 370-377
- [21] 何湘清, 刘向君, 罗平亚, 等. 地应力和油藏压力对弱胶结砂岩油藏出砂的影响. 西南石油学院学报, 2002, 24(2): 41-43
- [22] 张政辉, 蔡美峰. 岩石的卸载力学特性及其对地应力测量的影响. 矿冶, 2001, 10(3): 6-10
- [23] 刘建军, 刘先贵. 开发过程中三场耦合的数学模型. 特种油气藏, 2001, 8(2): 31-33
- [24] 范学平, 徐向荣, 张士诚. 用流固耦合方法研究油藏压裂后应力应变和孔渗特性变化. 岩土力学, 2001, 22(1): 47-50