

基于地震叠前反演的零散砂体岩体力学场建模

方媛媛^{1,2} 师永民^{1,2,†} 王磊^{1,2} 杜书恒^{1,2} 盛英帅^{1,2}

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 北京大学石油与天然气研究中心, 北京 100871;

† 通信作者, E-mail: sym@vip.163.com

摘要 针对大庆油田外围扶杨低渗透油层分布零散, 岩体力学性质变化快, 储层改造难的问题, 在大量岩体力学原位模型测定的基础上, 研究纵横波速度之间的关系。从叠前弹性参数反演得到纵横波速度体, 利用岩石物理关系式得到井间的岩体力学参数场, 运用多元回归分析方法得到井点弹性参数值。结合井点与井间弹性参数值, 采用地质统计学方法建立非均质岩体力学三维场, 为水力压裂参数优化设计提供地质依据, 达到增产的效果。

关键词 叠前弹性参数反演; 岩体力学; 低渗透油藏

中图分类号 TE348

Scattered Sand Rock Mechanics Field Modeling Based on Seismic Pre-stack Inversion

FANG Yuanyuan^{1,2}, SHI Yongmin^{1,2,†}, WANG Lei^{1,2}, DU Shuheng^{1,2}, SHENG Yingshuai^{1,2}

1. School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871; 2. Institute of Oil and Gas, Peking University, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: sym@vip.163.com

Abstract For the sake of solving the problem in Daqing Fuyang low permeability reservoirs which is scattered distribution, and changes so rapidly in the mechanical properties of rock that restricts the reservoir reconstruction, a new method was presented in this paper. On the basis of lots of rock mass mechanics model of in situ experiments, the relationship between P-wave and S-wave velocities was studied, and P-wave and S-wave velocity bodies from pre-stack elastic parameter inversion were obtained. Besides, the rock mass mechanics parameters according to rock physics equation were gotten and the multiple regression analysis method was used to get well point elastic parameter values. The well points and cross-hole elastic parameter values were combined, and geostatistics method was utilized to establish the heterogeneity of rock mass mechanics field. The geological basis was provided to optimize hydraulic fracturing parameter design to increase production.

Key words pre-stack inversion; geomechanics; low permeability reservoirs

大庆油田外围扶杨低渗透储层岩体力学性质变化快, 储层改造难度大, 因此得到精确的岩体力学场信息尤为重要。目前岩石力学参数求取方法已比较成熟, 主要是利用实验室岩石力学测定资料及测井资料统计两种方法^[1]。前者测量精度高, 但需要模拟地下岩体实际环境, 操作复杂, 且只能反映岩芯位置的岩体力学性质, 无法获得沿井连续的岩石

力学参数。后者多利用横波测井信息进行多元回归, 得到沿井连续的岩石力学参数。上述两种方法均只能得到井点信息, 无法得到井间弹性参数信息, 且对于井点较少的地区, 仅运用传统数学方法进行井间插值, 没有考虑到实际地质信息, 误差较大。

目前, 油藏的岩体力学场研究主要着眼于井筒。一方面钻井取芯, 通过岩体力学实验获取局部

的、个别的、有限的岩体力学静态参数;另一方面利用偶极子横波成像测井、多极阵列声波测井、双频随钻声波测井等特殊的横波测井资料,获得岩体力学动态参数^[2]。但是,这些技术费用昂贵,且只能得到井点而非井间的弹性参数。Aadony^[3]根据地层裂缝数据,利用反演方法研究了井眼附近岩体力学场预测,但没有研究整个区块的岩体力学场分布。孙辉等^[4]建立了稠油油藏的应力场与渗流、温度耦合关系的数学模型。国内外研究的出发点为井眼附近的稳定性问题,对远场岩体力学场变化的问题较少涉及。

叠前反演是获得远场岩体力学场变化的有效方法,因此叠前弹性参数反演技术,特别是横波数据体的求解,对于本文的研究至关重要。横波速度预测方法主要有统计经验公式法和理论计算法^[5]。Castagna 等^[6]对 Pickeet 公式进行修改,同时提出碎屑岩纵横波速度关系。Mavko 等^[7]根据 Han 等^[8]的数据,加入了未固结砂岩纵横波关系。张守伟等^[9]对济阳拗陷东营北带地区取样岩芯进行实验,测得岩石在储层条件下纵横波速度与密度的关系,得到适合于该地区的广义 Gardner 公式,指导该地区的油气勘探和储层评价。张元中等^[10]认为 Greenberg-Castagna 公式法简单实用,经过流体校正后在砂泥岩地层的应用效果较好。孙福利等^[11]采用 Biot-Gassmann 低频速度模型及 Pride 公式,建立基质弹性模量与骨架弹性模量的关系,通过迭代方式计算出合适的固结系数以得到横波速度。冯昕鹏等^[12]通过多种岩石物理模型比较,认为 Xu-White 模型拟合的纵横波速度能较好地反映苏里格气田砂泥岩地层的变化。白俊雨等^[13]在 Xu-White 模型中采用变化的孔隙纵横比(孔隙宽度与孔隙直径的比值)求取横波速度。目前,国内外学者对岩石原位状态下纵横波速度关系的研究比较少。

叠前反演的理论基础主要是 Zoeppritz 方程及其简化形式。Zoeppritz 方程 1919 年由 Zoeppritz 建立,描述弹性纵波在介质分界面上的反射和透射问题^[14]。由于该方程具有较强的非线性,人们更多地采用各种近似方程进行叠前反演^[15-16]。国内外学者在利用叠前反演获得弹性参数及其应用方面做了较多的研究。Hampson 等^[17]从 Aki-Richard 近似方程^[18]出发,改进了同步反演(simultaneous inversion)的理论基础。印兴耀等^[19]利用 Russell 等^[20]提出的多孔流体饱和弹性介质的 Zoeppritz 近似方程,推导

出以流体项、拉梅系数及密度表示的 EI 公式,实现对不同流体类型的有效区分。胡朝元^[21]应用 AVO 反演技术对已知煤与瓦斯突出位置进行研究。宗兆云等^[16]在平面波入射等假设条件下,推导了基于杨氏模量、泊松比和密度的纵波反射系数线性近似方程,为页岩气“甜点”预测提供了一种高可靠性的方法。郭媛等^[22]将叠前反演应用于 TH5 储层预测中。前人利用叠前资料直接反演岩石物性参数,并将其应用于储层预测方面已经取得较好的效果,但将叠前弹性参数反演方法应用于低渗透储层应力场建模的研究比较少。

基于上述问题和研究现状,本文通过地震信息的反演来获取井间地层岩体力学参数的变化情况,结合地质统计学方法,建立大庆油田外围扶杨油层岩体力学模型,解决井点较少情况下井间笼统的数学插值方法带来的不足。本文方法克服了利用有限元只能计算近井地带岩体力学场的局限性,将其应用于远井地带岩体力学场的计算,为压裂设计提供科学依据,对提高大庆油田外围扶杨低渗透储层开采效率具有实际意义。

1 基本原理与方法

1.1 岩体力学原位测试

本文取大庆油田外围扶杨油层致密砂岩样品,在恢复围压、油水两相饱和流体、温度等地层条件下,运用声波弹性力学实验方法,测得纵横波在样品中的传播速度(表 1)。对纵横波速度作交会图(图 1),显示纵横波速度呈线性关系,拟合结果为

$$v_s = 0.559v_p - 0.127, \quad (1)$$

其中, v_s 为横波速度, v_p 为纵波速度。拟合结果为 $R^2=0.954$, 精度较高,可以作为叠前弹性反演的约束条件。

表 1 岩体原位模型测试结果
Table 1 Rock orthotopic model test results

样品	围压/MPa	孔压/MPa	温度/°C	$v_s/(km \cdot s^{-1})$	$v_p/(km \cdot s^{-1})$
1	25	20	80	1.890	3.733
2	33	20	80	1.904	3.627
3	41	20	80	1.707	3.325
4	21	18	55	2.572	4.942
5	27	18	55	2.686	5.056
6	33	18	55	2.414	4.239

说明: 样品由中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室测试, 实验条件: 40%水, 60%油。

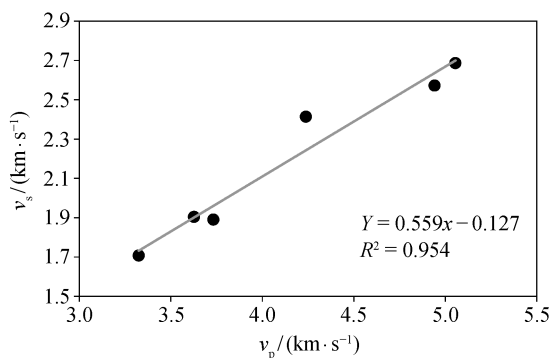


图 1 岩体原位模型测试纵横波交会图
Fig. 1 Crossplot of P-wave and S-wave from *in-situ* geomechanical test

1.2 岩体力学场建模

岩石力学参数的求取方法较多, 但只能得到井点信息, 无法得到井间弹性参数信息。运用传统数学方法进行井间插值, 没有考虑到实际的地质信息, 插值结果与实际地质背景有偏差。本文利用基于 Aki-Richard 简化式^[18]的叠前弹性参数反演方法, 解决井间笼统的数学插值方法带来的不足。实现流程见图 2。

叠前弹性反演得到的 v_p 和 v_s 是时间域数据体, 需要将其转换成深度域数据体后, 方能与测井数据相结合建立岩石力学场。本研究利用精细构造解释的 F11 顶面得到 v_p 和 v_s 深度域数据体, 利用岩石力学计算公式, 计算得到泊松比(σ)及杨氏模量(E)数据体, 最终根据非均质各向异性函数关系, 将测井与叠前反演数据体相结合, 建立三维岩体力学场数据体。

1.3 Aki-Richard 简化式

式(2)是入射角为 θ 时的 Zoeppritz 方程简化形式

(Aki-Richard 简化式)^[18], 是在微扰理论和界面两侧介质参数弱变化近似条件下, 推导得到的基于纵横波速度和密度的纵波反射系数近似方程。

$$R(\theta) = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta v_p}{v_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) + \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta v_p}{v_p} - 4 \frac{\Delta v_s^2}{v_s^2} - 2 \frac{\Delta v_s^2}{\Delta v_p^2} \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta v_p}{v_p} (\tan^2 \theta - \sin^2 \theta), \quad (2)$$

$v_p = (v_{p1} + v_{p2})/2$ 为平均纵波速度, $v_s = (v_{s1} + v_{s2})/2$ 为平均横波速度, $\rho = (\rho_1 + \rho_2)/2$ 为平均密度, $\Delta v_p = v_{p2} - v_{p1}$ 为纵波速度差, $\Delta v_s = v_{s2} - v_{s1}$ 为横波速度差, $\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1$ 为密度差, $\theta = (\theta_1 + \theta_2)/2$ 为反射角和透射角的平均值, $\theta_t = \arcsin \left(\frac{v_{p2}}{v_{p1}} \sin \theta_1 \right)$ 。

2 叠前弹性参数反演

2.1 纵横波反演数据体求取

传统的地质建模是在三维空间对地质体的几何形态及各种地质特征的定量描述, 并实现可视化^[23]。与传统地质建模不同, 本文利用地震信息来获取高精度井间地层岩体力学参数的变化情况。

进行叠前弹性参数反演前, 需要做反演分析, 这是应用井位反演信息验证反演参数和优化地震标定的过程。本文对已有 X-mac 测井信息的井 3 进行纵横波速度交会分析(图 3), 得到 v_s/v_p 平均值为 0.514, 并应用岩体原位模型测试得到的纵横波关系(式(1))来控制联合反演的多解性。

为了减少反演的多解性, 假设以下关系式成立:

$$\ln(Z_s) = k \ln(Z_p) + k_c + \Delta L_s, \quad (3)$$

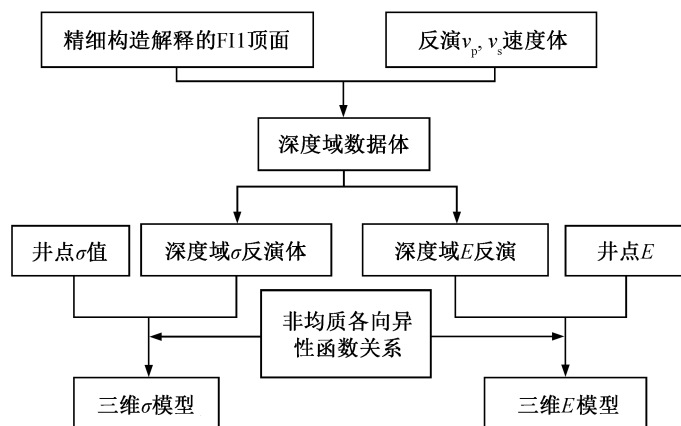


图 2 岩石力学建模基本路线
Fig. 2 Basic line of rock mechanics modeling

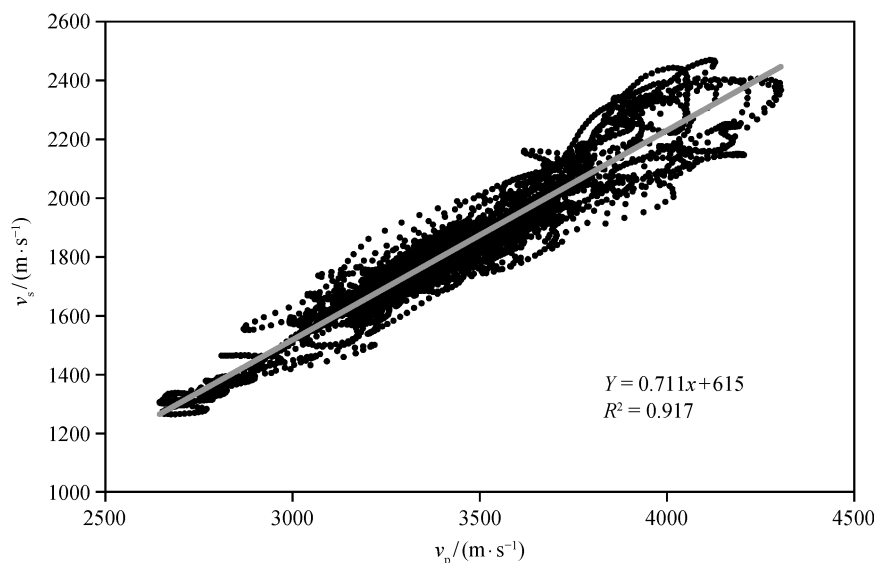


图3 井3纵横波速度交会图
Fig. 3 Intersection of S-wave velocities about well 3

$$\ln(\rho) = m \ln(Z_p) + m_c + \Delta L_D, \quad (4)$$

其中, Z_p 和 Z_s 分别代表纵横波阻抗。通过分析测井曲线得到系数 k , k_c , m 和 m_c , ΔL_S 和 ΔL_D 表示异常点偏离正常值的大小。

由整段参加反演的井计算得到用于拟合的点, 通过控制所用数据的深度范围进行改进。拟合直线代表大部分点的分布范围, 因此指示湿岩背景场信息, 用于给定反演时的岩性背景场值, 叠前弹性参数反演则用来解决那些与背景场值存在偏差的区域。不断更改拟合曲线, 尽可能得到真实的背景场信息, 反演得到与真实测井曲线最接近的单井反演结果, 达到控制后期反演质量的目的。

选择该区域3口井资料, 得到 Z_p , Z_s 和 ρ , 拟合得到岩性背景场曲线, 参数值见表2, 最终得到纵横波速度反演数据体(图4)。

目的层位于 1.35~1.5 s 附近, 反演结果显示目的层连续性较差, 零散分布的高速区指示砂岩, 宏观上与实际地质背景相符。

表2 估计反演岩性背景场值的线性关系系数值
Table 2 Linear relationship coefficients of lithological background values for inversion

参数	参数值
k	1.444330
k_c	-4.697760
m	0.493744
m_c	-3.530100

2.2 反演结果验证

对反演结果进行交互验证(即对反演质量做检验), 以确定是否可以进一步利用纵横波速度反演体计算泊松比(σ)及杨氏模量(E)数据体。本文采取在初始模型中抽去井1重新反演的方法, 将该位置纵横波速度的反演结果与实际资料进行比较(图5)。对比图5中实测值与反演值发现, 横波反演结果吻合度达70%以上, 纵波反演结果吻合度达80%以上, 精度达到预期要求。利用岩石物理公式计算得到泊松比(σ)及杨氏模量(E)数据体(图6)。

目的层杨氏模量(E)变化范围为 15~27 GPa, 泊松比(σ)变化范围为 0.29~0.35, 说明大庆油田外围扶杨低渗透储层井间岩石力学参数变化大, 储层分布复杂。储层岩体力学参数(特别是杨氏模量(E))纵向上呈层性分布, 与地质分层有紧密关系, 但不是一一对应, 可根据油藏储层弹性参数场对储层细分, 进行分层改造。

3 岩体力学场建模

地震叠前反演结果为岩体力学场建模提供了井间力学场信息。对于井点测井值, 本文采用逐步回归法, 挑选若干个与因变量关系较密切的自变量, 建立较为理想的杨氏模量(E)和泊松比(σ)多元回归方程(式(5)和(6))^[1], 得到井点岩石力学参数值(图7)。结合大庆油田外围致密储层的叠前反演结果, 建立该地区的岩石力学场模型(图8和9)。

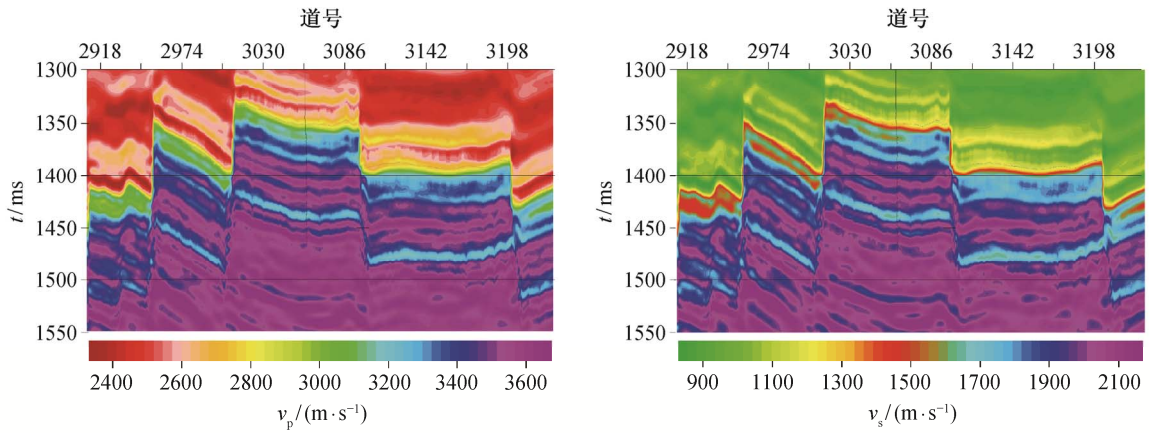


图 4 v_p 和 v_s 反演数据体
Fig. 4 v_p and v_s inversional data volume

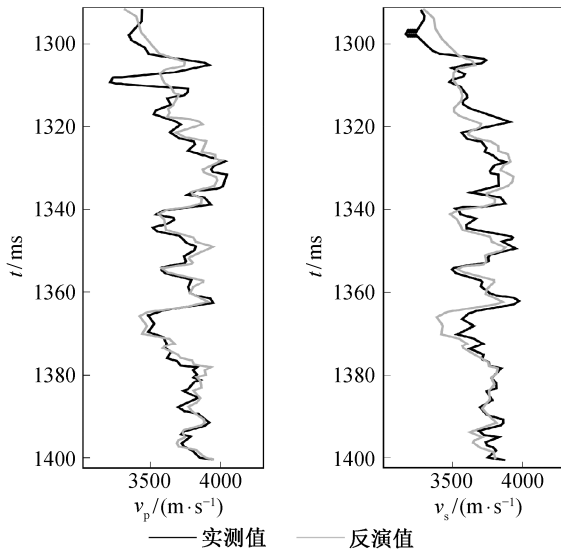


图 5 反演纵横波速度结果与 X-mac 测井曲线对比
Fig. 5 Estimated v_p and v_s compared with the well data

$$\sigma = 0.357(0.185 + 0.0011GR) + 0.778(0.427LLD - 0.1647) - 0.462\left(0.546 - \frac{19.11}{DT}\right) + 0.105, \quad (5)$$

相关系数 $R^2=0.561$ 。经 F 检验, 相关性明显。

$$E = 0.168(56.816 - 0.254GR) + 0.299\left(40.971 - \frac{92.717}{LLD}\right) - 0.453(515778.1DT - 2.249) + 1.949, \quad (6)$$

相关系数 $R^2=0.857$ 。经 F 检验, 相关性明显。

式(5)和(6)中, E 为杨氏模量(GPa), σ 为泊松比(无量纲), DT 为声波时差($\mu\text{s}/\text{m}$), GR 为自然伽马(API), LLD 为电阻率($\Omega \cdot \text{m}$)。

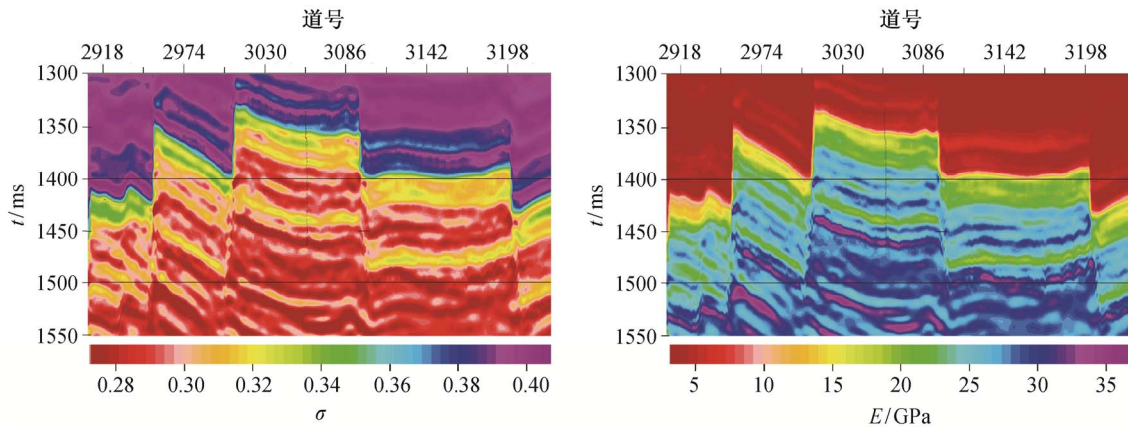


图 6 地震泊松比(σ)与杨氏模量(E)反演数据体
Fig. 6 Poisson's ratio and Young's modulus values from pre-stack inversion

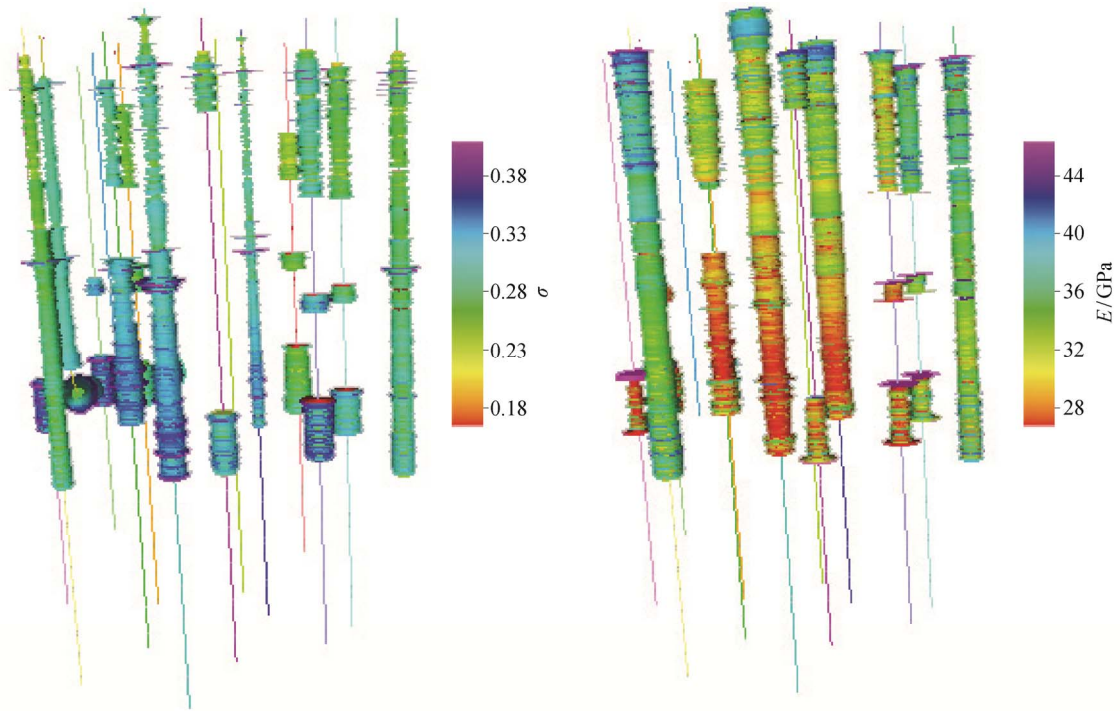


图7 泊松比(σ)与杨氏模量(E)井点值
Fig. 7 Poisson's ratio and Young's modulus values of well points

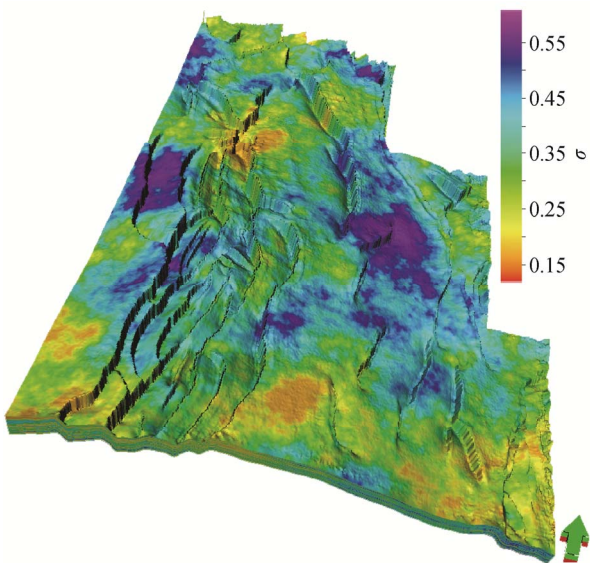


图8 泊松比(σ)模型
Fig. 8 Poisson's ratio model

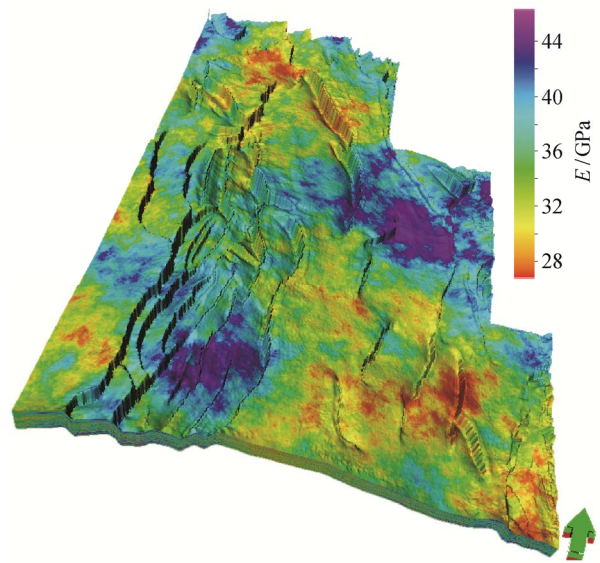


图9 杨氏模量(E)模型
Fig. 9 Young's modulus model

4 结论

1) 本文运用岩体原位模型实验来控制叠前弹性反演, 在恢复地层条件下(即恢复地下围压、孔隙压力、温度及饱和 60%油与40%水等条件下), 运用声波弹性力学实验方法, 发现大庆油田外围致密砂

岩纵横波速度呈现线性关系, 并且将其作为反演的约束条件, 控制反演的多解性, 使反演精度得到提高。

2) 在储层改造过程中, 对比岩体力学参数场横向及纵向的变化, 对于压裂模拟非常重要。本文利用叠前地震信息, 获取高精度井间地层岩体力学

参数的变化情况,发现大庆油田外围扶杨低渗透储层的岩体力学参数纵向上呈层性分布,其分层现象与地质分层有密切关系,但不是一一对应。本文研究结果可为水力压裂参数优化设计提供地质依据,从而提高大庆油田扶杨油层的产量。

参考文献

- [1] 李光泉,秦小双,师永民,等. 苏里格气田岩石力学场建模研究. 北京大学学报: 自然科学版, 2013, 49(4): 716-720
- [2] 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
- [3] Adnoy B S. Inversion technique to determine the *in-situ*, stress field from fracturing data. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 1988, 4: 127-141
- [4] 孙辉,李兆敏,焦玉勇. 稠油油藏热-流体-力学耦合模型研究及应用. 岩土力学, 2007, 28(12): 2560-2564
- [5] Hudson J A, Pointer T, Liu E. Effective-medium theories for fluid-saturated materials with aligned cracks. *Geophysical Prospecting*, 2001, 49(5): 509-522
- [6] Castagna J P, Batzle M L, Eastwood R L. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. *Geophysics*, 1985, 50(4): 571-581
- [7] Mavko G, Mukerji T. Bounds on low-frequency seismic velocities in partially saturated rocks. *Geophysics*, 1998, 63(3): 918-924
- [8] Han D H, Nur A, Morgan D. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. *Geophysics*, 1986, 51(11): 2093-2107
- [9] 张守伟,孙建孟,苏俊磊. 东营北带砂砾岩密度与纵横波速度的规律研究. 石油天然气学报, 2010, 32(4): 251-253
- [10] 张元中,周开金,赵建斌,等. 砂泥岩地层横波测井曲线预测方法研究. 石油物探, 2012, 51(5): 508-514
- [11] 孙福利,杨长春,麻三怀,等. 横波速度预测方法. 地球物理学进展, 2008, 23(2): 470-474
- [12] 冯昕鹏,李金付,聂建委,等. 横波速度拟合技术在苏里格气田的应用. 岩性油气藏, 2012, 24(6): 106-109
- [13] 白俊雨,宋志翔,苏凌,等. 基于 Xu-White 模型横波速度预测的误差分析. 地球物理学报, 2012, 55(2): 589-595
- [14] 陆基孟,王永刚. 地震勘探原理. 3 版. 山东东营: 中国石油大学出版社, 2011: 315-385
- [15] 陈建江,印兴耀. 基于贝叶斯理论的 AVO 三参数波形反演. 地球物理学报, 2007, 50(4): 1251-1260
- [16] 宗兆云,印兴耀,张峰,等. 杨氏模量和泊松比反射系数近似方程及叠前地震反演. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3786-3794
- [17] Hampson D, Russell B, Bankhead B. Simultaneous inversion of pre-stack seismic data // SEG Technical Program Expanded Abstracts. Kolkata, 2005: 1633-1637
- [18] Aki K, Richards P G. Quantitative seismology. San Francisco: W H Freeman, 1980: 158-164
- [19] 印兴耀,张世鑫,张繁昌,等. 利用基于 Russell 近似的弹性波阻抗反演进行储层描述和流体识别. 石油地球物理勘探, 2010, 45(3): 373-380
- [20] Russell B H, Gray D, Hampson D P, et al. Linearized AVO and poroelasticity. CR EWES Research Report, 2006, 18: 1-25
- [21] 胡朝元. 薄煤层三维地震勘探技术[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2011
- [22] 郭媛,陆自清. 叠前同时反演在 TH5 区储层预测中的应用. 地球物理学进展, 2014, 29(1): 229-233
- [23] 穆龙新,陈亮. 随机建模和地质统计学. 北京: 石油工业出版社, 2000: 10-15