

海上低渗砂砾岩气藏岩石力学参数建模

江 锚¹ 彭成勇^{1,2} 周东红³ 牛 涛¹ 幸雪松^{1,2} 李 飞³

1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028;

2. 海洋油气高效开发全国重点实验室, 北京 102209;

3. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459

摘 要:海上低渗砂砾岩气藏需要储层改造才能获得工业气流,杨氏模量、泊松比、水平主应力及脆性指数是模拟和优化砂砾岩储层高效改造的基础参数。针对海上砂砾岩储层岩性、物性参数横纵向变化大,岩石力学及地应力参数准确表征难度大的问题,以海上低渗砂砾岩气藏开发层位为研究对象,在岩心实验数据的基础上,进行岩石力学参数标定,得到岩石力学参数与声波、密度测井参数解释模型,实现动态及静态参数的互换,进而计算弹性力学参数。利用弹性波动理论结合常规测井资料计算岩石力学参数,在三维地质模型基础上,建立三维泊松比、弹性模量和地应力场等岩石力学参数模型,为海上低渗砂砾岩储层可压裂性评价和精细化裂缝形态模拟提供了必要的基础。

关键词:孔店组;砂砾岩;岩石力学参数;可压裂性指数;地质建模

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2024.04.010

Modeling of rock mechanics parameters of offshore low-permeability sandstone conglomerate gas reservoir

JIANG Mao¹, PENG Chengyong^{1,2}, ZHOU Donghong³, NIU Tao¹, XING Xuesong^{1,2}, LI Fei³

1. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing, 100028, China;

2. State Key Laboratory of Offshore Oil and Gas Exploitation, Beijing, 102209, China;

3. CNOOC China Ltd., Tianjin Branch, Tianjin, 300459, China

Abstract: In order to obtain industrial gas flow, the low-permeability sandstone conglomerate gas reservoir requires reservoir reconstruction. Young's modulus, Poisson's ratio, horizontal principal stress and brittleness index are the basic parameters to simulate and optimize the efficient the reconstruction of sandstone conglomerate gas reservoir. In view of the significant horizontal and longitudinal variations in lithology and physical property parameters of offshore sandstone conglomerate reservoir, and the challenges in accurately characterizing rock mechanics and in-situ stress parameters, this paper focuses on the development horizon of offshore low-permeability sandstone conglomerate gas reservoir. Based on core experimental data, rock mechanics parameter calibration is performed, leading to the development of an interpretation model that correlates rock mechanics parameters with acoustic wave and density logging parameters. This model facilitates the interchange of dynamic and static parameters to calculate the elastic

收稿日期:2023-11-12

基金项目:国家自然科学基金面上项目“致密砂岩脆性影响因素及多参量—多尺度脆性综合评价研究”(42274140)

作者简介:江 锚(1994-),男,湖北潜江人,工程师,硕士,主要从事低渗透油气藏压裂增产相关的工作。E-mail:jiangmao@cnooc.com.cn

parameters. Utilizing elastic wave theory in conjunction with conventional logging data, rock mechanics parameters such as Poisson's ratio, elastic modulus and geostress field are established on a three-dimensional geological model. This provides a necessary basis for the evaluation of fracturing property and the simulation of fine fracture morphology in offshore low-permeability sandstone conglomerate reservoirs.

Keywords: Kongdian Formation; Sandstone conglomerate; Rock mechanics parameters; Fracability index; Geological modeling

0 前言

海上低渗砂砾岩区块二期开发区域位于气田主体区域南部,包含沙河街组、孔店组和太古界^[1],其中沙河街组至孔店组主要发育砂砾岩及砂岩。与太古界相比,沙河街下部至孔店组中部小层孔渗特性更强,单井无阻流量更高,为该区主力气藏。对于海上低渗砂砾岩区块,岩石基本性质及天然微裂缝分布规律决定着地质甜点的分布趋势,前期研究已开展中等分辨率地震解释并识别出部分区域的岩性,但并未进行精细刻画与表征,导致直井及水平井产量差异大。为了降本增效,实现“少井高产”,后期继续采用水平井来优化开发井网。

岩石力学参数建模在海上低渗储层三维地应力模拟、工程及综合甜点反演、裂缝与井筒夹角优化、裂缝形态及射孔施工参数优化等研究工作中起到较关键的作用。表征岩石力学性质的常用参数主要有杨氏模量、泊松比等。运用相关统计算法,可以从单井一维测井解释基础参数扩展到单井地质力学属性参数,2010 年之前国内外学者以一维地应力解释、断层及中等尺度裂缝预测为重点^[2-9]。近年来,由于亟需大规模动用致密储层储量,常规压裂工艺无法满足增储上产的迫切需求。为了准确识别地质工程综合甜点及评价直井、定向井、水平井的压裂效果,需要运用三轴实验评价杨氏模量、泊松比及抗压强度,运用 Kaiser 实验获取三向地应力,但是一维岩石力学及地应力模型远不能满足实际要求。一维地应力及可压性模型的不足之处在于:仅针对某一探井泄流半径范围内进行了岩石力学及地应力参数评价,平面上评价参数忽略了受地质构造及地震属性影响导致的岩石力学及地应力参数的非均质性,难以指导井间甚至远井尺度的工程甜点评价,进而难以形成准确可行的压裂层位优选及布井开发方案设计。针对上述问题,需要打破地球物理、油气藏数值模拟、岩石力学等多专业间的壁垒,充分利用三维地质模型才能精细化解从平面到三维尺度的岩石力学及地应力参数。因此,基于岩相及裂缝性地层条件约束下的岩石力学三维建模技术及地应力三维反演技术得到快速发展。对于 BZ 气田,海上低渗砂砾岩气藏占比超过 80%,该类气藏是增储上产的关键,因此需要逐步形成一套适合海上低渗砂砾岩

储层岩石力学和地应力参数建模的技术方法,来指导不同类型储层综合可压裂性评价、裂缝参数及施工参数优化等工作。

1 目标区块地质建模

1.1 基本地质模型

研究区拟钻遇地层受多期构造活动影响,长期活动断层及其派生断层发育,长期活动断层沟通油源,并与不整合面和砂体组成复式油气疏导体系,油气运移通畅,具备油气规模成藏的基本条件。研究区共钻遇 6 条断层,海拔高度总体呈现从西南向东北方向逐渐递减的趋势。运用地震解释结果和已钻井资料,重新落实孔店组到太古界的构造基本属性,并对地震解释结果获取的断层产状、位置进行有效排列组合,进而建立海上砂砾岩储层三维断层模型^[10],见图 1。

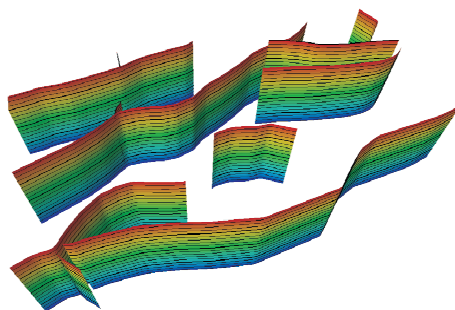


图 1 海上砂砾岩储层三维断层模型图

Fig. 1 Three-dimensional fault model of offshore sandstone conglomerate reservoir

1.2 地层结构模型

在建立三维断层模型的基础上,利用不同小层平面构造图,开展了三维构造面尺度上的精细刻画,目标层位断层总体较为连续,海上砂砾岩储层三维地层结构模型见图 2。

海上低渗砂砾岩储层三维建模单小层厚度 2 ~ 45 m,平均 9.7 m。为了真实地展现出孔店组不同小层砂体在三维空间上的变化情况,孔店组含气层位纵向网格细分的厚度调整为 3 ~ 6 m,泥岩隔层调整为 15 m 等比例剖分;太古界上部层位网格厚度为 8 m,下部层位以灰岩、泥岩为主,因此下部层位网格厚度 25 m。

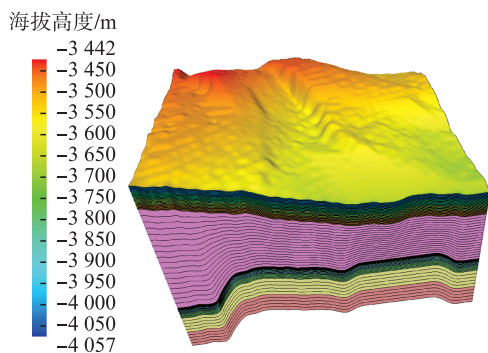


图2 海上砂砾岩储层三维地层结构模型图

Fig. 2 Three-dimensional stratigraphic structure model of offshore sandstone conglomerate reservoir

1.3 小层岩性模型

目标区块砂砾岩钻遇厚度整体向构造高部位逐渐减薄,局部低洼处厚度大;砂砾岩纵向差异大,沙河街组上段以辫流带沉积为主,层理发育、物性较好;沙河街组下段至孔店组以残积、坡积及冲积扇为主,块状致密、物性差。

岩性属性模型离不开精细化小层模型。以地震解释结果速度场为中间媒介,将时间域层位转变为深度域层位;在考虑探井分层数据的前提下,修正各层位若干个气组的上下构造面,进而形成精细化小层模型。

在精细化小层模型的基础上,结合区域沉积储层研究、探井实际钻探结果分析,将目标储层岩性划分为砂岩、砾岩、泥岩和灰岩。结合地质建模的理论知识,采用序贯指示模拟算法,拟合变差函数,进行3次等概率模拟,进而完成小层岩性模型的建立^[11],见图3。

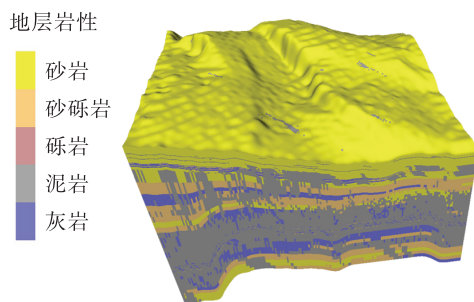


图3 海上砂砾岩储层三维地层岩性模型图

Fig. 3 Three-dimensional stratigraphic lithology model of offshore conglomerate reservoir

2 单井岩石力学及地应力参数

2.1 横波时差计算

地层的横波时差是岩石力学参数求取中的必要数据。通常情况下,常规测井中一般不进行横波测井,因此需要建立横波时差与纵波时差关系式才能得到横波时差,计算公式见式(1),声波时差相关性见图4。

$$\Delta t_s = 2.1788 \Delta t_p - 100.79 \quad (1)$$

式中: Δt_s 为横波时差, $\mu s/m$; Δt_p 为纵波时差, $\mu s/m$ 。

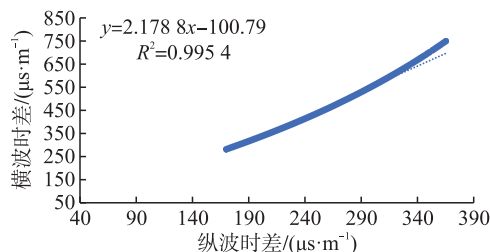


图4 目标区块纵波时差与横波时差关系图

Fig. 4 The relation between longitudinal wave time difference and transverse wave time difference of target block

2.2 杨氏模量、泊松比计算

结合岩石密度、纵波时差、横波时差3个属性,得出海上砂砾岩地层动态杨氏模量及泊松比计算公式,见式(2)~(3)^[12]。

$$E = \frac{\rho}{\Delta t_s^2} \times \left(\frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \right) \quad (2)$$

$$\mu = \frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2}{2\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2} \quad (3)$$

式中: E 为杨氏模量, GPa; μ 为岩石泊松比; ρ 为岩石密度, g/cm^3 。

利用岩心实验数据获取的静态岩石力学参数与动态参数的相关性见图5。相比测井资料计算的动态杨氏模量及泊松比,静态杨氏模量、泊松比更趋近砂砾岩地层的准确状态。因此,通过区块岩心实验数据建立相关参数线性函数关系,开展岩石力学参数动静态的转化,可以增加单井杨氏模量、泊松比参数的准确性^[13-14]。

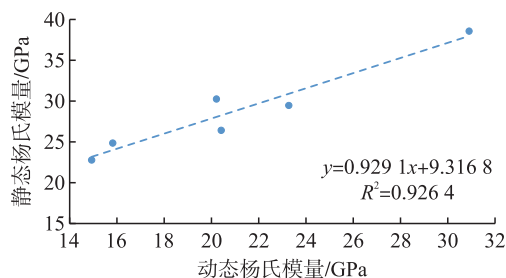


图5 砂砾岩储层动、静态杨氏模量相关关系图

Fig. 5 Correlation between dynamic and static Young's modulus of sandstone conglomerate reservoir

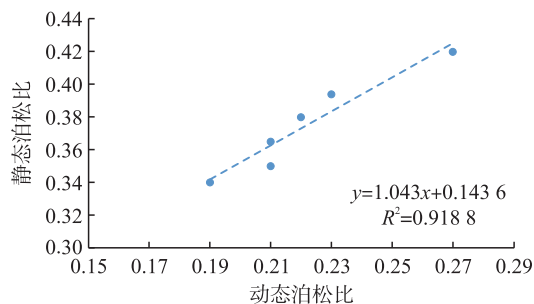


图6 砂砾岩储层动、静态泊松比相关关系图

Fig. 6 Correlation between dynamic and static Poisson's ratio of sandstone conglomerate reservoir

结合图5~6,砂砾岩岩石力学参数动静态转换公式见式(4)。

$$\begin{cases} E_s = 0.929 1E_d + 9.316 8 \\ \mu_s = 1.043\mu_d + 0.143 6 \end{cases} \quad (4)$$

式中: E_d 为岩石动态杨氏模量, GPa; E_s 为岩石静态杨氏模量, GPa; μ_d 为岩石动态泊松比; μ_s 为岩石静态泊松比。

2.3 垂向主应力、水平主应力计算

结合岩石密度、静态泊松比、地层孔隙压力、构造系数等属性,岩石垂向主应力计算公式见式(5)^[15]。

$$\sigma_z = \int_0^H \rho(z) dz \quad (5)$$

式中: σ_z 为岩石垂向主应力, MPa; H 为地层测定垂直深度, m。

最大水平主应力、最小水平主应力计算公式见式(6)~(7)。

$$\sigma_H = \frac{E}{1-\mu^2}\varepsilon_1 + \frac{\mu E}{1-\mu^2}\varepsilon_2 + \frac{\mu}{1-\mu}(\sigma_z - \alpha P_p) + \alpha P_p \quad (6)$$

$$\sigma_h = \frac{\mu E}{1-\mu^2}\varepsilon_1 + \frac{E}{1-\mu^2}\varepsilon_2 + \frac{\mu}{1-\mu}(\sigma_z - \alpha P_p) + \alpha P_p \quad (7)$$

式中: σ_H 为最大水平主应力, MPa; σ_h 为最小水平主应力, MPa; ε_1 为地应力构造系数1; ε_2 为地应力构造系数2; α 为Biot系数; P_p 为地层孔隙压力, MPa。

根据目标区块矿场实践认识,砂岩地层 $\alpha=0.9$,灰岩隔层 $\alpha=0.92$,泥岩隔层 $\alpha=0.97$ 。根据岩心实验结果,在求取对应深度的孔隙压力后代入式(6)、(7),拟合 ε_1 为5.48, ε_2 为4.4。

2.4 抗压强度、抗拉强度、断裂韧性计算

根据岩石力学经典理论及岩心实验数据,利用式(8)~(11)拟合公式预测全井段抗压强度、抗拉强度及断裂韧性^[16]。

$$\sigma_c = K[0.004 5(1 - V_{sh}) + 0.008V_{sh}] \times E_d \quad (8)$$

$$\sigma_t = \sigma_c / C \quad (9)$$

$$K_{IC} = a + b\sigma_t \quad (10)$$

$$K_{IIC} = c + dE_s \quad (11)$$

式中: V_{sh} 为岩石泥质含量; σ_c 为岩石抗压强度, MPa; σ_t 为岩石抗拉强度, MPa; K_{IC} 为I型断裂韧性, MPa·m^{0.5}, K_{IIC} 为II型断裂韧性, MPa·m^{0.5}; K 、 C 、 a 、 b 、 c 、 d 为拟合公式的重要系数。

根据岩心抗压强度、抗拉强度、断裂韧性实验结果,代入式(8)~(11)后拟合出 $K=180$, $C=10$, $a=0.271$,

$b=0.107$, $c=0.313$, $d=0.003 8$ 。

2.5 可压裂性指数计算

结合目标区块压裂矿场试验实际情况,岩石脆性及地应力差异系数决定了岩石可压裂性。其中,岩石脆性采用包含静态杨氏模量和静态泊松比的公式来表征,岩石脆性指数计算公式见式(12)。

$$B_n = \frac{\frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} + \frac{\mu - \mu_{\min}}{\mu_{\max} - \mu_{\min}}}{2} \quad (12)$$

式中: B_n 为脆性指数; $E_{\max}$ 为杨氏模量最大值, GPa; $E_{\min}$ 为杨氏模量最小值, GPa; $\mu_{\max}$ 为泊松比最大值; $\mu_{\min}$ 为泊松比最小值。

脆性指数计算公式只考虑了岩石力学基本属性,忽略了储层应力条件,不能准确反映目标地层的压裂品质。因此需要结合岩石压裂基因和裂缝生长环境建立致密气藏地层压裂品质评价模型^[12],并融合弹性模量、泊松比、断裂韧性、最大水平主应力、最小水平主应力建立了可压裂性评价模型,可压裂性指数计算公式见式(13)~(14)^[17]。

$$F_i^{(n)} = B_n \times \frac{1}{(0.5 \times K_{IC} + 0.5 \times K_{IIC}) \times \sigma_h} \times \left(1 - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{\sigma_h}\right) \quad (13)$$

$$F_n = \frac{F_i^{(n)} - F_{i\min}^{(n)}}{F_{i\max}^{(n)} - F_{i\min}^{(n)}} \quad (14)$$

式中: $F_i^{(n)}$ 为岩石可压裂性指数; F_n 为归一化可压裂性指数。

通过上述公式计算出 $F_i^{(n)}$, F_n 变化范围为0~1,结合目标区块相邻地区的单井生产情况,划分如下可压裂性指数界限值: $F_n > 0.65$ 的砂砾岩地层是水力压裂的最佳选择, $F_n < 0.35$ 的地层最不适合砂砾岩地层水力压裂。

3 三维岩石力学及地应力模型

3.1 建模方法及步骤

结合单井声波时差及密度求取单井动态岩石力学参数,利用单井动态岩石力学参数及式(4)开展单井动态岩石力学参数与静态岩石力学参数的转化,接着利用式(5)~(7)计算单井最小水平主应力、最大水平主应力、上覆岩层压力、水平应力差,并利用式(8)~(11)预测单井岩石抗压强度、抗拉强度、断裂韧性。在海上低渗砂砾岩储层地质模型基础上,采用序贯高斯算法可以较为准确处理岩石力学参数离散数据,并完成相关参数三维模拟,并建立海上低渗砂砾岩区块的三维岩石力学参数及地应力模型。根据归一化后的杨氏模量与泊松

比,得到岩石脆性指数计算式(12);以水平地应力、断裂韧性与脆性指数为基础,采用式(13)计算得到目标区块可压裂性指数模型,归一化后可压裂性指数可通过式(14)计算得到。建立的可压裂性指数评价三维模型既能充分表达岩石力学参数分布的三维空间不均匀性及三维应力场的具体参数变化规律,又可直接用于沿井压裂品质分析和已钻新井的压裂施工设计,减少压裂参数与地质工程条件不匹配导致的施工排量及压力异常和压后低产的风险,降低海上低渗砂砾岩储层开发风险。

3.2 三维岩石力学模型

以单井尺度纵向静态杨氏模量、静态泊松比为基础,在构造模型及岩相属性模型的约束控制下,建立海上低渗砂砾岩气层三维杨氏模量模型、三维泊松比模型,见图7~8。目标区块孔店组杨氏模量18~54 GPa,平均28.2 GPa;孔店组泊松比0.22~0.38,平均0.28。目标区块杨氏模量及泊松比变化范围较大,反映出目标储层岩石力学参数非均质性强。将BZ19-6-3井及1A井纵向岩石力学参数属性建模数据与实验测试点进行对比,见图9。由图9可分析出岩石力学三维属性与实验测试点吻合度高,侧面说明目标区块岩石力学参数三维

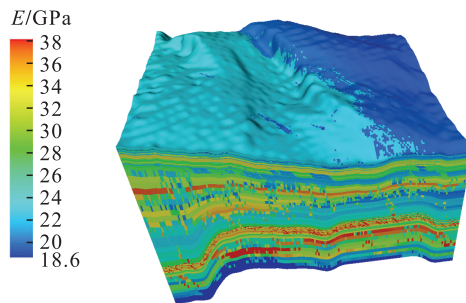


图7 海上砂砾岩储层三维杨氏模量模型图

Fig. 7 Three-dimensional Young's modulus model of offshore conglomerate reservoir

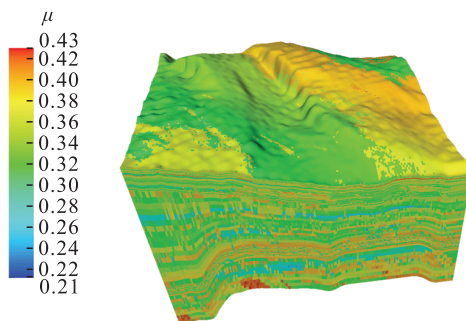


图8 海上砂砾岩储层三维泊松比模型图

Fig. 8 Three-dimensional Poisson's ratio model of offshore conglomerate reservoir

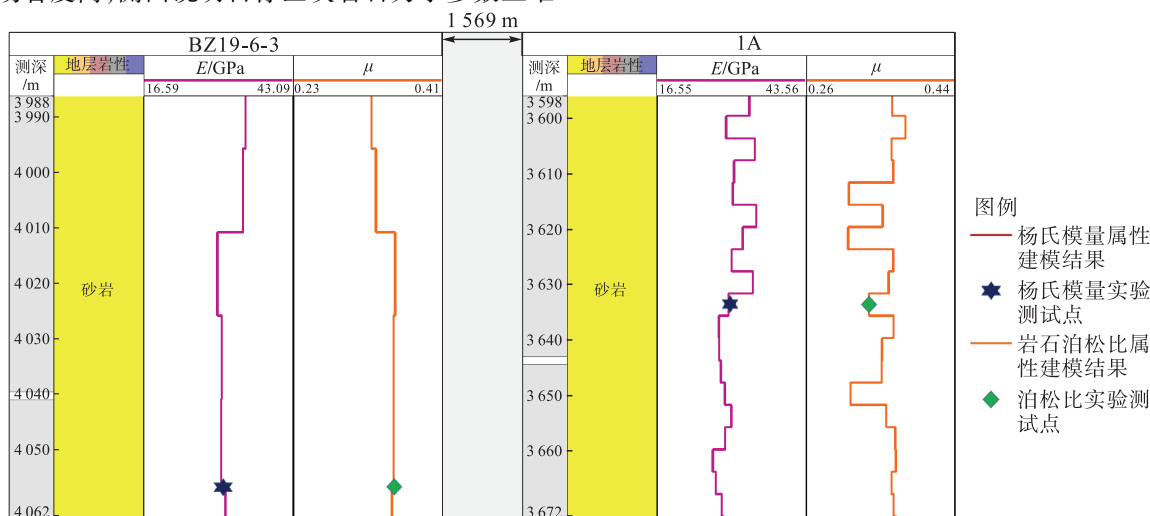


图9 岩石力学三维属性与实验测试点的校对图

Fig. 9 Proofreading of three-dimensional properties of rock mechanics and experimental test points

模型准确度较高,可以反映出海上低渗砂砾岩储层岩石力学性质,为后续可压裂性模型建立及工程甜点评价提供了必要的基础,具有推广应用的价值。

将岩石力学归一化处理后可以获取岩石脆性指数,其中泥岩层位脆性指数0.06~0.35,砂砾岩层位脆性指数0.26~0.72,泥岩层位脆性指数平均值0.15,砂砾岩层位脆性指数平均值0.42。当杨氏模量越高且泊松比越低时,岩石脆性指数越高。海上低渗砂砾岩储层三维脆性指数模型见图10。

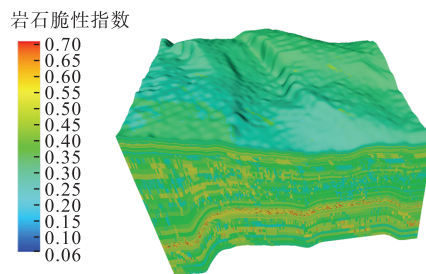


图10 海上砂砾岩储层三维脆性指数模型图

Fig. 10 Three-dimensional brittleness index model of offshore conglomerate reservoir

3.3 三维地应力模型

在计算岩石力学参数的基础上,利用有限元三维地应力模拟软件 Visage 完成目标区块地应力参数的模拟,包括三向主应力、最大水平主应力夹角。其中最小水平主应力及水平应力差的三维地应力模型见图 11。最小

水平主应力变化范围 56 ~ 103 MPa,最大水平主应力变化范围 64 ~ 109 MPa,上覆岩层压力 70 ~ 116 MPa,远离断层的较平缓区域水平应力差 7 ~ 14 MPa,离断层近的区域水平应力差 3 ~ 22 MPa。根据地应力变化范围,判定三向地应力 $\sigma_z > \sigma_H > \sigma_h$,位于正断层应力状态。

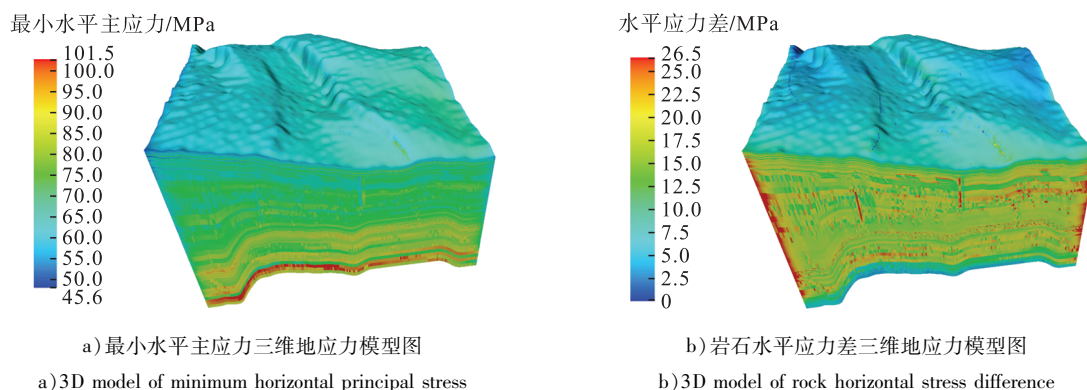


图 11 海上砂砾岩储层三维地应力模型图

Fig. 11 3D model of ground stress in offshore sandstone conglomerate reservoir

利用有限元三维地应力模拟软件 Visage 反演出三向地应力的同时,也获取到了地应力的夹角,最大水平主应力夹角见图 12。

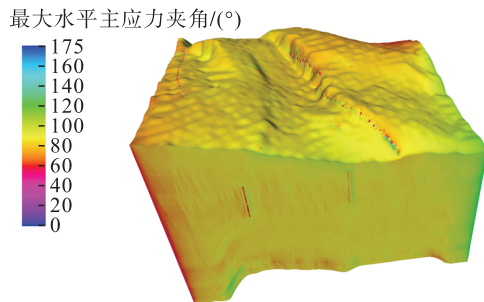


图 12 海上砂砾岩储层三维最大水平主应力夹角模型图

Fig. 12 3D model of maximum horizontal principal stress angle in offshore sandstone conglomerate reservoir

由图 12 可以看出,断层附近的最大水平地应力方向偏转变化较大,无断层影响的平缓带最大水平主应力夹角 $70^\circ \sim 88^\circ$ 。

3.4 三维可压裂性模型

将岩石力学及地应力三维模型、断裂韧性属性参数代入式(13),可以计算海上低渗储层三维可压裂性指数,变化范围 0.17 ~ 1.73。由于计算的可压裂性指数最大值 > 1 ,因此需要将可压裂性指数归一化处理。海上砂砾岩储层可压裂性指数原始结果及归一化结果见图 13^[18]。其中砂砾岩层位归一化后的可压裂性指数变化范围 0.32 ~ 1,泥岩层位归一化后可压裂性指数变化范围 0 ~ 0.34,灰岩层位归一化后可压裂性指数变化范围 0 ~ 0.48。

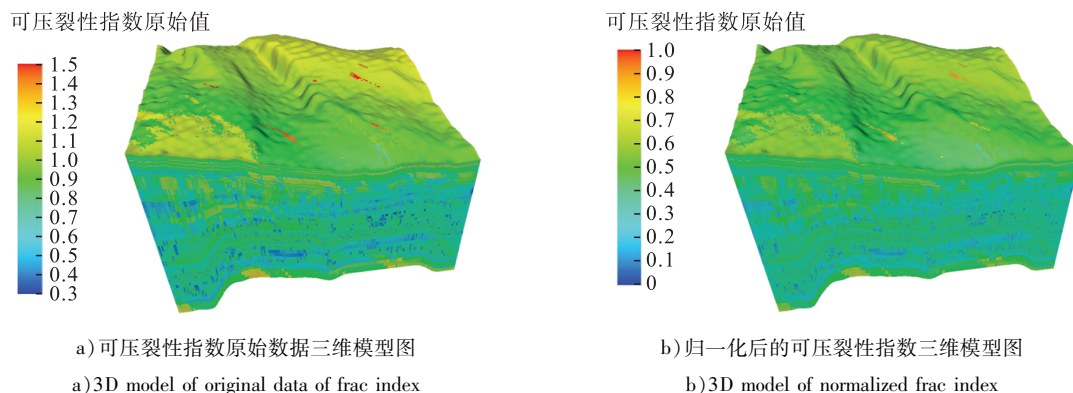


图 13 海上砂砾岩储层三维可压裂性指数模型图

Fig. 13 3D model of frac index in sandstone conglomerate reservoir

4 岩石力学及地应力参数模型应用

4.1 新钻水平井 F23H 可压裂性分析

距离新钻水平井 150 m 的定向井 3D 井开展了小型压裂测试,根据该测试解释的平均裂缝闭合压力 66.64 MPa,在相同深度下地应力三维模型的最小水平主应力为 65.35 MPa,三维模型的最小水平主应力与小型压裂测试解释结果误差在 1.18% ~ 3.37% 范围内(平均误差 1.97%),误差满足压裂工程设计要求,海上砂砾岩储层小型压裂测试闭合压力解释结果见表 1。

基于已获取的岩石力学参数三维模型,对钻遇孔店组的 F23H 井进行可压性分析,岩石力学参数、地应力参数、脆性指数及可压裂性指数沿井眼轨迹的分布情况见图 14。

表 1 海上砂砾岩储层小型压裂测试闭合压力解释结果表

Tab. 1 Closure pressure interpretation results of small fracturing test for wells in offshore sandstone conglomerate reservoir

分析方法	闭合压力 /MPa	闭合压力梯度 /(MPa·m ⁻¹)	闭合压力与三维模型误差
Nolte G 时间曲线	67.55	0.017 8	3.37%
Nolte G 时间差曲线	66.12	0.017 4	1.18%
时间差平方根曲线	66.23	0.017 4	1.35%
Nolte 时间平方根曲线	67.15	0.017 7	2.75%
时间差曲线	66.15	0.017 4	1.22%
平均	66.64	0.017 5	1.97%

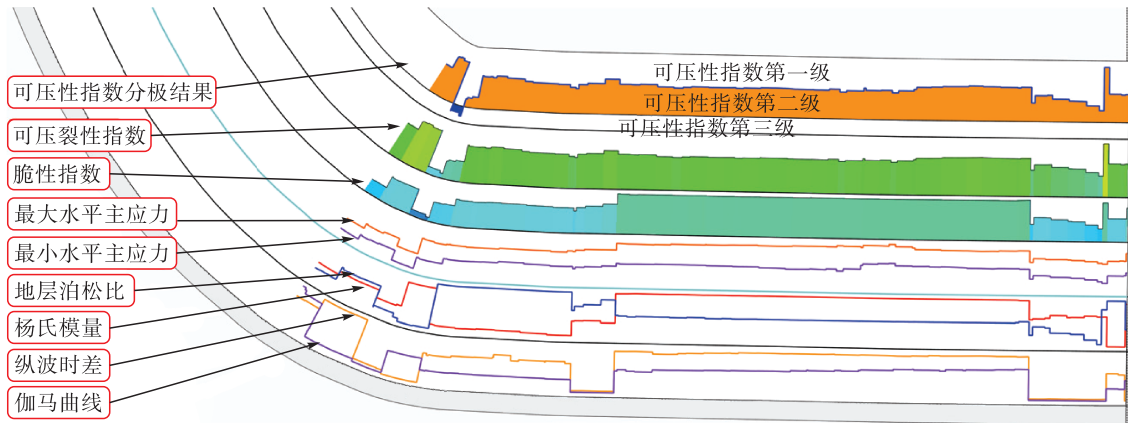


图 14 F23H 岩石力学参数、地应力参数、脆性指数及可压裂性指数沿轨迹剖面图

Fig. 14 Rock mechanics parameters, ground stress parameters, brittleness index and fracability index along trajectories along the track profile in F23H horizontal well

可压裂性指数评价模型融合了岩石压裂基因和裂缝生长环境。F23H 水平井归一化后可压裂性指数变化范围 0.4 ~ 0.62, 设定归一化后可压裂性指数 < 0.43 的水平段为三类可压储层, 占比 3.5%, 设定归一化后可压裂性指数大于 0.65 的水平段为一类可压储层, 其余均为二类可压储层, 占比 96.5%。F23H 水平段长度 1 100 m, 完钻井深 5 152 m, 该井钻遇的小层砂岩厚度 9.5 m, 砾岩厚度 5 m, 泥岩厚度 4 m, 通过可压裂性评价模型分析, 水平段以二类可压储层为主, 常规的水平井单段压裂规模无法满足增储上产的需要。针对上述突出问题, 结合裂缝模拟软件开展加砂量、液量及排量优化, 该井优化结果为二类可压储层加砂量每段 120 m³, 每段压裂液体积 1 100 m³, 排量 11 m³/min; 结合录井解释结果, 三类可压储层属于泥岩段, 凝析气储集空间极小, 暂不考虑压裂。

4.2 新钻水平井 F24H 可压裂性分析

基于已获取的岩石力学参数三维模型,对钻遇孔店组的 F24H 井进行可压性分析,岩石力学参数、地应力参数、脆性指数及可压裂性指数沿井眼轨迹的分布情况见图 15。

F24H 水平井归一化后可压裂性指数变化范围

0.29 ~ 0.78, 设定归一化后可压裂性指数 < 0.4 的水平段为三类可压储层, 占比 7.1%; 设定归一化后可压裂性指数 > 0.65 的水平段为一类可压储层, 占比 22.7%; 其余均为二类可压储层, 占比 70.2%。F23H 水平段长度 951.4 m, 完钻井深 4 951.35 m, 该井钻遇的小层砂岩厚度 12.2 m, 砾岩厚度 3 m, 泥岩厚度 2 m, 通过可压裂性评价模型分析, 水平段存在一类可压储层且该类储层脆性指数 > 0.5, 有形成复杂缝的潜力^[19]。针对上述参数变化规律, 结合裂缝模拟软件开展加砂量、液量及排量优化。该井优化结果为一类可压储层加砂量每段 110 m³, 每段压裂液体积 1 000 m³, 排量 10 ~ 12 m³/min; 二类可压储层采用密切割工艺, 每段设计 4 ~ 5 簇, 加砂量平均每段 125 m³, 平均每段压裂液体积 1 400 m³; 三类可压储层由于距离含水饱和度较高的小层不足 10 m, 需要采用控制缝高的压裂策略^[20], 每段设计 3 簇, 每段加砂量平均值优化到 90 m³, 每段压裂液体积平均值优化到 880 m³。上述压裂工艺及优化结果为此类砂砾岩储层精细化压裂改造奠定了重要的基础。

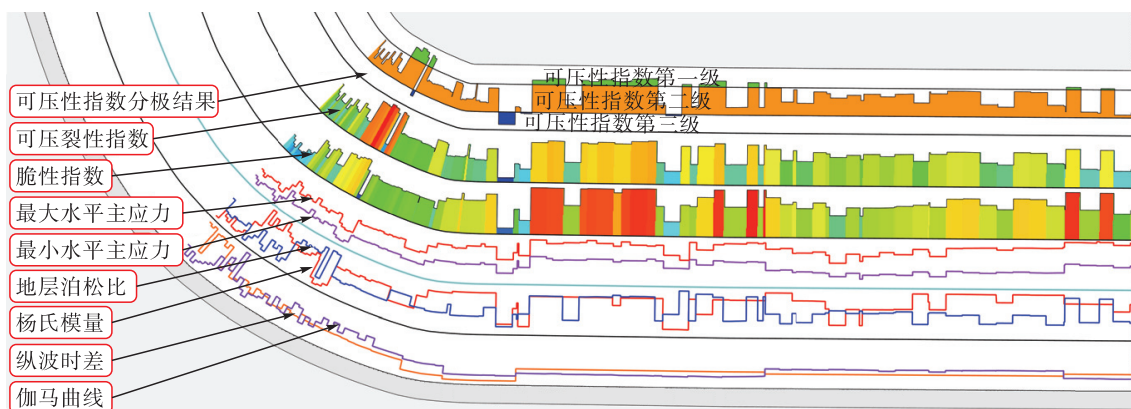


图 15 F24H 岩石力学参数、脆性指数及可压裂性指数沿轨迹剖面图

Fig. 15 Rock mechanics parameters, ground stress parameters, brittleness index and fracability index along the track profile in F24H horizontal well

5 结论及建议

1) 结合单井测井资料,计算出单井动态岩石力学参数,在此基础上开展了岩石力学参数动静态转换研究,计算出单井岩石力学参数;在三维构造及岩相模型约束下,建立海上低渗砂砾岩凝析气藏三维岩石力学参数网格模型。将2口直井纵向岩石力学参数属性建模数据与实验测试点进行对比分析,验证了三维岩石力学参数模型的准确性。在此基础上,将岩石力学参数归一化计算出脆性知识,进而形成三维脆性指数网格模型。

2) 目标区块孔店组杨氏模量平均值 32.3 GPa,孔店组泊松比平均值 0.26,泥岩层位脆性指数平均值 0.15,砂砾层位脆性指数平均值 0.42;在岩石力学三维网格模型的基础上,运用有限元方法模拟出目标区块三向地应力。最小水平主应力变化范围 56 ~ 103 MPa,最大水平主应力变化范围 64 ~ 109 MPa,上覆岩层压力 70 ~ 116 MPa,远离断层的较平缓区域水平应力差 7 ~ 14 MPa,离断层近的区域水平应力差 3 ~ 22 MPa。

3) 结合三维岩石力学参数、地应力参数及脆性指数,建立了融合了岩石压裂基因和裂缝生长环境的可压裂性指数评价模型,目标区块可压裂性指数非均质性较强,砂砾岩层位归一化后的可压裂性指数变化范围 0.32 ~ 1,泥岩层位归一化后可压裂性指数变化范围 0 ~ 0.34,灰岩层位归一化后可压裂性指数变化范围 0 ~ 0.48,建立了可压裂性指数分级评价标准。

4) 结合目标区块可压裂性指数评价模型、岩石力学和地应力模型,针对 F23H 及 F24H 新钻水平井开展了单井可压裂性精细化评价,划分出一类可压到三类可压储层,针对不同级别的可压裂性,开展了储层改造策略差异化设计,并对压裂施工参数进行了精细优化设计。储层改造策略差异化设计为海上低渗砂砾岩气藏增储上产和经济开发提供了必要的指导。

参考文献:

- [1] 王德英,刘晓健,邓辉,等.渤海湾盆地渤中 19-6 区中—新生代构造转换特征及其对太古宇潜山大规模储层形成的控制作用[J].石油与天然气地质,2022(6):1334-1346.
WANG Deying, LIU Xiaojian, DENG Hui, et al. Characteristics of meso-Cenozoic tectonic transformation in Bozhong 19-6 area, Bohai Bay Basin and its controlling effect on the formation of large-scale reservoirs in Archaean buried hills [J]. Oil & Gas Geology, 2022 (6): 1334-1346.
- [2] 归榕,万永平.基于常规测井数据计算储层岩石力学参数——以鄂尔多斯盆地上古生界为例[J].地质力学学报,2012,18(4):418-424.
GUI Rong, WAN Yongping. Calculation of reservoir rock mechanics parameters based on conventional logging data: A case study of the Upper Paleozoic in Ordos Basin [J]. Chinese Journal of Geomechanics, 2012, 18 (4): 418-424.
- [3] 杨秀娟,张敏,闫相祯.基于声波测井信息的岩石弹性力学参数研究[J].石油地质与工程,2008,22(4):39-42.
YANG Xiujuan, ZHANG Min, YAN Xiangzhen. Study on rock elastic mechanical parameters based on acoustic logging information [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008, 22 (4): 39-42.
- [4] 吕俊丰,刘鹏,林庆祥,等.地应力分析解释技术在压裂中的应用[J].大庆石油地质与开发,2005(2):64-66.
LYU Junfeng, LIU Peng, LIN Qingxiang, et al. Application of in-situ stress analysis and interpretation technology in fracturing [J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 2005 (2): 64-66.
- [5] 刘振,吴耕宇,潘懋,等.岩石力学参数标定系统关键技术研究[J].地学前缘,2017,24(3):301-308.
LIU Zhen, WU Gengyu, PAN Mao, et al. Key technology research on calibration system of rock mechanics parameters

- [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24 (3): 301-308.
- [6] 康利伟. 应用阵列声波测井资料计算大北克深地区岩石力学参数[J]. 石油地质与工程, 2018, 32(5): 113-115.
- KANG Liwei. Calculation of rock mechanics parameters in the deep area of Dabeike using array acoustic logging data [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2018, 32 (5): 113-115.
- [7] 邱莎莎, 夏宏泉. LD 地区砂泥岩地层岩石力学参数计算方法研究[J]. 国外测井技术, 2016, 37(6): 40-42.
- QIU Shasha, XIA Hongquan. LD in sand shale formation rock mechanics parameter calculation method research [J]. Journal of Logging Technology Abroad, 2016, 37 (6): 40-42.
- [8] 钟自强, 刘向君, 刘诗琼, 等. 砾岩地层岩石力学参数测井预测模型构建与应用[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(8): 181-186.
- ZHONG Ziqiang, LIU Xiangjun, LIU Shiqiong, et al. Construction and application of logging prediction model for rock mechanics parameters of conglomerate formation [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18 (8): 181-186.
- [9] 潘继平. 非常规天然气资源开发政策困境及对策建议[J]. 石油科技论坛, 2019, 38(1): 1-7.
- PAN Jiping. Policy dilemmas and countermeasures for unconventional natural gas resources development [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2019, 38 (1): 1-7.
- [10] 兰雪梅, 张连进, 徐伟, 等. 基于非结构化网格的复杂构造建模方法研究——以四川双鱼石地区为例[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(12): 158-164.
- LAN Xuemei, ZHANG Lianjin, XU Wei, et al. Research on complex structure modeling method based on unstructured grid: A case study of Shuangyushi Area, Sichuan Province [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(12): 158-164.
- [11] 李海涛, 魏波. 应用 Petrel 进行多点统计地质建模的实践[J]. 石化技术, 2015, 22(11): 1.
- LI Haitao, WEI Bo. Application of Petrel in multi-point statistical geological modeling [J]. Petrochemical Industry Technology, 2015, 22 (11): 1.
- [12] 刘文俊, 刘伟, 邓九涛, 等. 低渗致密储层三维地质力学建模与压裂工程甜点优选方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(25): 10985-10991.
- LIU Wenjun, LIU Wei, DENG Jiutao, et al. 3D geomechanical modeling of low permeability tight reservoir and sweet spot optimization method in fracturing engineering [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22 (25): 10985-10991.
- [13] 边会媛, 王飞, 张永浩, 等. 储层条件下致密砂岩动静态弹性力学参数实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊1): 3045-3054.
- BIAN Huiyuan, WANG Fei, ZHANG Yonghao, et al. Experimental study on dynamic and static elastic parameters of tight sandstone under reservoir conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (Suppl 1): 3045-3054.
- [14] 郭思强. 大庆油田 T30 井区扶余油层致密储层岩石力学参数建模[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(5): 169-174.
- GUO Siqiang. Modeling of rock mechanics parameters of tight reservoir in Fuyu Reservoir in well T30 area of Daqing Oilfield [J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 2020, 39 (5): 169-174.
- [15] 王金铎, 孙鲁宁, 王军, 等. 基于有限元方法的储层地应力修正研究[J]. 地质力学学报, 2019, 25(3): 349-356.
- WANG Jinduo, SUN Luning, WANG Jun, et al. Study on reservoir in-situ stress correction based on finite element method [J]. Chinese Journal of Geomechanics, 2019, 25 (3): 349-356.
- [16] 陈治喜, 陈勉, 金衍. 岩石断裂韧性与声波速度相关性的试验研究[J]. 石油钻采工艺, 1997(5): 56-60.
- CHEN Zhixi, CHEN Mian, JIN Yan. Experimental study on the correlation between rock fracture toughness and acoustic velocity [J]. Oil Drilling and Production Technology, 1997 (5): 56-60.
- [17] WANG Paobing, GE Hongkui, WANG Xiaoqiong, et al. A novel experimental approach for fracability evaluation in tight-gas reservoirs [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 23: 239-249.
- [18] 周磊, 王永诗, 于雯泉, 等. 基于物性上、下限计算的致密砂岩储层分级评价——以苏北盆地高邮凹陷阜宁组一段致密砂岩为例[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1308-1316.
- ZHOU Lei, WANG Yongshi, YU Wenquan, et al. Grading evaluation of tight sandstone reservoirs based on upper and lower limits of physical properties: A case study of tight sandstone of Member 1 of Funing Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40 (6): 1308-1316.
- [19] 许建国, 刘光玉, 王艳玲. 致密储层缝内暂堵转向压裂工艺技术[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(3): 374-378.
- XU Jianguo, LIU Guangyu, WANG Yanling. Technology of temporary plugging and turning fracturing in tight reservoir [J]. Oil Drilling and Production Technology, 2021, 43 (3): 374-378.
- [20] 杨帆, 梅文博, 李亮, 等. 薄互层致密砂岩水力压裂裂缝扩展特征研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(7): 61-71.
- YANG Fan, MEI Wenbo, LI Liang, et al. Research on fracture propagation characteristics of thin interbedded tight sandstone by hydraulic fracturing [J]. Coal Geology and Exploration, 2023, 51 (7): 61-71.