

◆钻井与完井◆

优化反分析方法在地应力与裂隙研究中的应用

刘钦节¹ 闫相祯² 杨秀娟²

(1. 中国石油大学(华东) 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 东营 257061)

摘要:应用优化反分析方法建立了基于常规测井资料的地应力及裂隙分析模型,该模型可以利用声波、密度和自然伽马等资料求取井筒附近的岩石力学参数、地应力及裂隙参数的连续剖面,为钻井过程中保持井眼稳定、压裂设计等提供参考。以胜利油田净化油区几十口井的实际资料为例进行计算分析,获取了相应的地应力及裂隙分布规律,并首次回归拟合了该油区三向地应力随深度变化的关系曲线。大量试验结果和现场应用情况表明,该方法准确可靠,成本较低,适应性强。

关键词:优化反分析;岩石应力;测井数据;裂隙

中图分类号:P631.8⁺¹ **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2009)02-0026-06

在油气勘探开发中进行油藏地应力场和裂隙分布规律的分析和应用研究,是石油地质领域的重要课题之一。目前已经发展了多种地应力和裂隙的测试技术^[1],但这些技术往往由于操作费用昂贵、实施难度大及数据离散性较强等原因,使各油田现场对它们的分布情况及变化规律的认识仍然存在一定的模糊性和局限性,用其指导油田实际生产更是十分困难。为此,笔者针对常规测井资料解释及岩石力学研究中的热点和难点问题,在研究分析大量测井资料的基础上,提出了基于优化反分析技术的地应力场及储层裂隙分布规律的模型方法,该方法通过分析声波、密度和自然伽马等常规测井资料确定井筒附近岩石力学参数及地应力分布规律,并在此基础上利用岩石破裂准则等手段分析井筒附近岩石裂隙相对发育程度及其分布情况,为致密低渗透油藏压裂施工及压后裂隙描述等提供参考。

1 基于测井资料的地应力及裂隙参数分析方法

1.1 测井资料的选取及预处理

近年来,利用测井资料分析油藏地应力的新技术新方法不断涌现,但囿于昂贵的测井作业费用和繁琐复杂的数据处理程序,该类方法并未能得到普及。而笔者提出的模型方法,是基于成本较低且易于获取的常规测井数据(如声波、密度和自然伽马等)进行的。

通过分析胜利油田大量常规测井资料发现,影响测井资料的因素非常多^[2],其中主要的有:1)钻井过程中滤饼及侵入环带的影响;2)钻井液与泥岩发生蚀变作用的影响;3)地层厚度及岩性变化的影响;4)井径变化的影响;5)在钻井液气侵井段、疏松含气砂岩及裂隙发育地层的影响等。在这些因素影响下,声波能量衰减严重、变化复杂,经常出现测井曲线尖峰和周波跳跃等现象,致使声波时差读取不准,岩石参数及地应力计算结果误差较大。因此,需要对测井资料进行预处理。

研究过程中,主要进行了以下预处理:

1)将不同时间的测井数据按深度进行了衔接,并去掉了不合理的数据;

2)将采样间隔调整为1 m,并对测井声波数据进行了多点平均;

3)为了消除随机噪声和偶然误差的影响,对各测井数据进行了小波滤波^[3];

4)为了尽量降低储层岩性的影响,同时考虑到自然伽马曲线与泥质含量等都有良好的对应关系,对声波测井曲线利用自然伽马曲线进行了重构处

收稿日期:2008-03-27; **改回日期:**2008-11-27

基金项目:中国石油化工集团公司提高采收率先导项目“梁家楼油田梁112块特低渗透油藏裂缝检测技术研究与应用”(编号:2006023)部分研究成果

作者简介:刘钦节(1980—),男,山东沂南人,2004年毕业于石油大学(华东)土木工程专业,在读博士研究生,主要从事油藏地应力及岩石力学分析方面的研究。

联系电话:(0546)8391820

理。

1.2 岩石弹性参数的计算

声波是物质运动的一种形式,它是由物质的机械运动而产生并通过质点间的相互作用而传播的。由于声波测井发射的能量较小,作用时间短,岩石不会产生塑性变形,可近似看作弹性介质在声振动作用下产生弹性小形变。假定岩石为均质、各向同性的线弹性体,则岩石的纵横波速度与岩石弹性参数之间的关系可以从牛顿运动定律结合线弹性理论导出^[4-7]。

设 x, y, z 方向的位移分别为 μ, v, u ,于是按位移表示的运动方程为:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left(K + \frac{G}{3} \right) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + G \nabla^2 u + \rho X \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \left(K + \frac{G}{3} \right) \frac{\partial \Delta}{\partial y} + G \nabla^2 v + \rho Y \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \left(K + \frac{G}{3} \right) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + G \nabla^2 w + \rho Z \end{cases} \quad (1)$$

式中, X, Y, Z 分别表示体积力在 x, y, z 方向的分力, kN; t 为声波在岩石中的传播时间 μs ; ρ 为地层岩石密度, kg/L; G, K 分别为岩石的剪切模量和体积模量, MPa; μ_d 为岩石的动态泊松比, 无量纲; E_d 为岩石的动态弹性模量, MPa; Δ 为微分算子, $\Delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$; ∇^2 为拉普拉斯算子, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 。

通过繁琐的推演,最终可以得出利用纵横波速度求取岩石弹性参数的公式为:

$$\begin{cases} E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \\ \mu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \end{cases} \quad (2)$$

式中, V_p 和 V_s 分别为纵波速度和横波速度, m/ μs ; V_p, V_s 与时差的关系分别为: $V_p = \frac{1}{\Delta t_p}$ 和 $V_s = \frac{1}{\Delta t_s}$ 。

可见,纵波、横波时差是计算地层弹性力学参数必需的。其中,纵波时差可从常规测井资料中直接提取,而横波时差虽然可从全波列测井中提取,但由于多数井并没有进行全波列测井,所以笔者主要采用拟合修正经验公式法的途径利用常规纵波时差 Δt_p 、岩石体积密度和自然伽马等参数计算横波时差。其中被广泛应用的一个经验公式是^[8]:

$$\Delta t_s = \frac{\rho_b \Delta t_p^2}{A \Delta t_p + B \rho_b + C} \quad (3)$$

式中, Δt_p 和 Δt_s 分别为地层纵波时差和横波时差, $\mu s/m$; ρ_b 为密度测井资料得到的地层密度, kg/L; A, B, C 为与油田区域有关的系数,可通过最优化反分析方法得出。

1.3 地应力计算模式

假设岩石为线性多孔弹性体,远场孔隙压力为恒定值且在埋藏过程中其横向应变为零,考虑到地层深处的地应力分布规律的诸多因素,借用参考文献[1]中建立的应力计算模式,然后利用多目标约束的最优化反分析技术对注水压裂数据等资料进行分析计算,确定应力模式中的各参数,进而获取地层应力数据,得到沿深度连续分布的地应力剖面。参考文献[1]中采用的应力计算公式为:

$$\begin{cases} \sigma_v = \int_0^H \rho(h) g dh + \Delta \sigma_v \\ \sigma_h = \frac{\mu}{1-\mu} (\sigma_v - \alpha p_p) + k_h \frac{EH}{1+\mu} + \frac{\alpha_T E \Delta T}{1-\mu} + \alpha p_p + \Delta \sigma_h \\ \sigma_H = \frac{\mu}{1-\mu} (\sigma_v - \alpha p_p) + k_H \frac{EH}{1+\mu} + \frac{\alpha_T E \Delta T}{1-\mu} + \alpha p_p + \Delta \sigma_H \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\sigma_v, \sigma_h, \sigma_H$ 分别为垂向应力、最小水平主应力和最大水平主应力, MPa; μ, E, α, α_T 分别为储层岩石的泊松比、弹性模量、有效应力系数和线膨胀系数; ΔT 为分析时段地层温度变化, $^{\circ}C$; p_p 为分析深度的地层孔隙压力, 可由 $p = \lambda H$ 确定, 其中 λ 称为孔隙压力梯度 (MPa/m), 可视为与油田区域有关的系数, 由优化反分析给出; k_h, k_H 分别为研究区块最小和最大水平主应力方向的构造应力系数, 同一区块内可视为常数, 由优化反分析方法求出; $\Delta \sigma_h, \Delta \sigma_H, \Delta \sigma_v$ 分别为考虑地层剥蚀的三个主应力附加量, 同一区块亦可视为常数, MPa。

1.4 裂缝参数计算分析

在岩石参数及地应力计算的基础上,可利用岩石破裂准则对井筒附近岩石的裂缝发育程度及其方位进行评价。根据岩石破裂理论,经常利用 Griffith 张破裂准则和 Coulomb-Navier 剪破裂准则分别计算不同深度井眼附近的岩石破裂率和张、剪破裂方位,通过绘制破裂率及破裂方位随深度变化的关系曲线,即可获得连续的裂缝发育情况。计算公式分别见式(5)、(6)。Griffith 张破裂准则:

$$\begin{cases} I_t = \frac{\sigma_t}{[\sigma_t]} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{24(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)[\sigma_t]} \\ \cos 2\beta = -\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2(\sigma_1 + \sigma_3)} \end{cases} \quad (5)$$

Coulomb-Navier 剪破裂准则:

$$\begin{cases} I_n = \left| \frac{\tau_n}{[\tau_n]} \right| = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta}{2[\tau_n]} \\ \tan 2\theta = 1/\mu \end{cases} \quad (6)$$

式中, I_t 、 I_n 分别为储层岩石的张破裂率和剪破裂率; σ_1 、 σ_3 分别为储层岩石所承受的最大、最小主应力, MPa; σ_t 为有效张拉应力, MPa; $[\sigma_t]$ 为储层岩石的抗拉强度, MPa; τ_n 为有效剪切应力, MPa; $[\tau_n]$ 为储层岩石的抗剪强度, MPa; β 、 θ 分别为 Griffith 准则和 Coulomb-Navier 准则中的破裂方位与最大主应力方向的夹角, ($^\circ$)。

2 优化反分析算法

优化反分析技术是随着力学、数学等多种学科体系及计算机应用技术而迅速发展起来的, 已成为研究复杂问题模型与参数的一个重要手段和工具。该方法能够充分利用现有的实测资料和监测信息, 通过建立一定的正反分析计算模型, 确定合理的目标函数, 借助多种数学手段, 以寻求目标函数的全局最小值, 从而获得相应参数。优化反分析方法作为一个独特而新颖的研究思路, 具有很强的理论性和实践性, 是联系理论与实际的桥梁。然而, 该方法的分析效果强烈地依赖于工程地质实际分析和现场测量或实时监测信息。

对于一般的最优化反分析问题, 通常将欲求解的变量作为设计变量, 写成向量为:

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^T \\ \underline{x}_i &\leqslant x_i \leqslant \bar{x}_i \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \quad (7)$$

式中, \underline{x}_i 、 \bar{x}_i 分别为第 i 个设计变量 x_i 的上、下限值; n 为设计变量的个数。

通过对拟求解的问题进行研究分析, 确定目标函数, 同时对某个或某些设计变量及中间状态变量进行约束设置。典型的最优化反分析问题可表示为:

$$\begin{cases} \min & f = f(\mathbf{X}) \\ \text{s. t.} & g_i(\mathbf{X}) \leqslant \bar{g}_i \quad i=1, 2, 3, \dots, m_1 \\ & h_i \leqslant h_i(\mathbf{X}), \quad i=1, 2, 3, \dots, m_2 \\ & \underline{w}_i \leqslant w_i(\mathbf{X}) \leqslant \bar{w}_i, \quad i=1, 2, 3, \dots, m_3 \end{cases} \quad (8)$$

式中, f 是目标函数; g_i 、 h_i 、 w_i 是状态变量; $m = m_1 + m_2 + m_3$ 是状态变量总数。

对式(8)进行最优化处理, 若存在 $\mathbf{X}^* = (x_1^*,$

$x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*)^T$ 满足以下条件:

$$\begin{cases} g_i^* = g_i(\mathbf{X}^*) \leqslant \bar{g}_i + \alpha_i & i=1, 2, 3, \dots, m_1 \\ \bar{h}_i - \beta_i \leqslant h_i^* = h_i(\mathbf{X}^*) & i=1, 2, 3, \dots, m_2 \\ \underline{w}_i - \gamma_i \leqslant w_i^* = w_i(\mathbf{X}^*) \leqslant \bar{w}_i + \gamma_i & i=1, 2, 3, \dots, m_3 \end{cases} \quad (9)$$

式中, α_i 、 β_i 、 γ_i 分别为状态变量的误差精度。

则称 \mathbf{X}^* 为式(8)的最优解。

通常, 首先对约束问题进行无约束演绎, 然后利用数学算法求得目标函数的最小值。无约束目标函数为^[9]:

$$Q(x, q) = \frac{F_1}{F_0} + \sum_{i=1}^m P_x(x_i) + q \left(\sum_{i=1}^{m_1} P_g(g_i) + \sum_{i=1}^{m_2} P_h(h_i) \right) \quad (10)$$

式中, Q 为无因次的无约束目标函数; P_x 和 P_g 、 P_h 分别为约束设计变量和状态变量的惩罚项; F_0 为统一单位而引入的参考目标函数值; q 为惩罚因子。

无约束目标函数 Q 的设计变量优化迭代公式为:

$$\mathbf{X}^{(j+1)} = \mathbf{X}^{(j)} + S_j \mathbf{d}^{(j)} \quad (11)$$

调节 $\mathbf{X}^{(j)}$ 和线搜索参数 S_j , 在方向 $\mathbf{d}^{(j)}$ 上寻求符合目标函数 Q 的极小值。

3 计算实例及结果分析

基于上述模型方法, 笔者利用 Visual Basic 编制了相关计算程序, 并以胜利油田某区块的薄互层低渗油藏为例进行计算分析, 结果表明该方法具有快速实效、简便易行、资料利用率高等优点, 而且精度完全能够满足实际工程需求。

3.1 模型建立

试验研究目标油藏位于胜利油田纯化油区, 该区地质构造位于鼻状构造带中部, 主力含油层系为沙河街组 4 段上部, 油层埋藏较深($2810 \sim 3100$ m)。研究工区储层发育, 油气藏类型丰富多样, 储集层多而薄, 特低渗透, 油水关系复杂, 直接导致了油井自然产能低、油层改造难度大、注水难、产量递减快等难题。故通过优化反分析技术利用测井资料和压裂井资料等数据研究分析油藏地应力剖面和储层裂缝发育情况, 是十分必要的。考虑实际数据资料的可利用情况, 主要利用声波、密度和自然伽马等测井数据、压裂井相应层段数据和取心井岩心测试数据等资料进行分析计算。

1) 将优化反分析目标函数选定为组合后的地应力大小,即:

$$f = \sum_{i=1}^n \sqrt{(\sigma_{hi} - \sigma_{hi}^0)^2 + (\sigma_{Hi} - \sigma_{Hi}^0)^2} \quad (12)$$

式中, σ_{hi} 、 σ_{Hi}^0 分别为最小主应力的计算值和实测值, MPa; σ_{Hi} 、 σ_{Hi}^0 分别为最大主应力的计算值和实测值, MPa; n 为具有实测资料的井数。

2) 选定岩石弹性参数及地应力计算模型中的未知参数作为设计变量,即:

$$\mathbf{X} = (A, B, C, \lambda, k_h, k_H, \Delta\sigma_h, \Delta\sigma_H, \Delta\sigma_v)^T \quad (13)$$

3) 通过分析计算不同压裂井的数据资料和取心井岩心测试结果获取相应深度的地应力大小,并将其作为多目标约束条件(见表 1)。

表 1 最优化反分析算法中的多目标约束条件

井点	测量方法	水平最小主压		水平最大主压	
		应力 σ_h /MPa	应力 σ_H /MPa	应力 σ_h /MPa	应力 σ_H /MPa
C1	水力压裂	-49.60		-85.98	
C2	水力压裂	-47.19		-84.37	
C3	岩心测试	-53.85		-82.50	
C4	岩心测试	-50.05		-84.51	
C5	水力压裂	-49.43		-81.16	
C6	岩心测试	-55.18		-88.15	

4) 设定计算条件。根据经验数值,对设计变量中各参数的变化范围进行约束(见表 2),同时将目标函数允差(迭代终止精度)选定为 $\tau = 10^{-6}$ 。

表 2 设计变量中各参数的变化范围

参数	A	B	C	λ	k_h	k_H	$\Delta\sigma_h$	$\Delta\sigma_H$	$\Delta\sigma_v$
约束最小值	1.0	30	-200	0.008	0.1	0.1	-10	-10	-10
约束最大值	5.0	60	200	0.020	1.5	1.5	10	10	10

5) 利用编制的程序包进行求解计算,最终完成目标区块油藏地应力和裂缝分布规律研究。

3.2 优化结果分析

基于以上模型和初始设定条件,反演得到各测点处相应深度的计算值,并将其与相应井的实测值及相对误差绘制成误差分析图,如图 1 所示。

从图 1 可以看出,在 6 个观测点的 12 个约束条件、目标函数允差 τ 为 10^{-6} 的情况下,除 C3 井水平最大主压应力的相对误差为 8.036% 外,其余井点所反演出的应力值都达到或非常接近测试值,相对误差基本控制在 5% 以内,反演结果精度基本能够满足工程实际要求。此时,优化反分析得出的设计变量中各参数的最优值分别为 $A = 2.2357$ 、 $B = 37.4289$ 、 $C = -115.1143$ 、 $\lambda = 0.00976$ MPa/m、 k_h

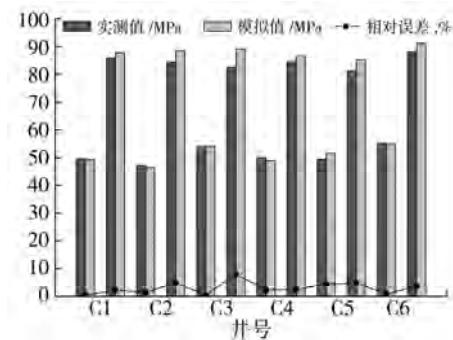


图 1 各约束井处水平主应力大小计算值与实测值比较

$= 0.556$ 、 $k_H = 1.087$ 、 $\Delta\sigma_h = 2.512$ MPa、 $\Delta\sigma_H = 4.450$ MPa 和 $\Delta\sigma_v = -1.005$ MPa。将这些最优值代入应力求解模型,即可利用声波、密度和自然伽马等测井资料分析确定研究工区内沿井筒纵深分布的应力剖面。

3.3 计算结果及其分析

利用前述模型和自行编制的相关程序包,通过对胜利油田纯化油区 C1 井测井资料的处理和分析,主要得出以下几点成果:

1) 沿井筒不同深度处的岩石动态弹性参数及其随深度变化的曲线(见图 2)。根据笔者提出的模型方法,利用声波、密度等常规测井资料可以较为准确地得出解释井附近不同深度处的岩石剪切模量、弹性模量、体积模量及泊松比等岩石性能的参数,而这些参数在油藏勘探开采中的各阶段都具有重要的作用。从图 2 可以看出,不同深度处的储层岩石是不均匀的,不同层段之间存在较大的物性差异。储层岩石弹性参数连续剖面图,可为油田注水压裂设计及其他研究提供必不可少的数据资料。

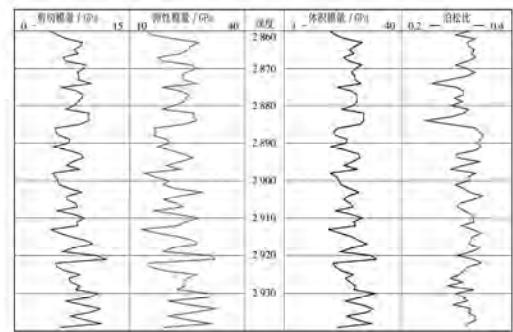


图 2 储层岩石动态弹性参数随深度变化的曲线

2) 储层岩石的三向主应力及 Mises 有效应力的连续剖面图见图 3。该图为利用优化反分析方法解释得到的油藏地应力连续剖面图(图中“油层”一栏中的灰色方块表示利用试油、采油和电测等技术解释得出的油层)。从图 3 可以看出,解释井附近岩层

所承受的各种地应力总体上是随深度的增加而逐渐增大的,但在油层附近的各种地应力都有一定程度的降低,即使薄互油层附近的地应力值也较中间隔层要低一些。

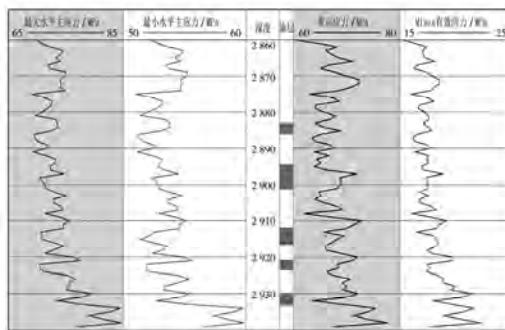


图 3 油藏地应力连续剖面

根据低渗油藏注水设计原理,地面施工泵压可采用下式计算:

$$p = \sigma_h - p_w + p_m + p_k + p_i \quad (14)$$

式中, p 为地面施工泵压, MPa; p_w 、 p_m 、 p_k 、 p_i 分别为液柱压力、沿程管路摩擦阻力、孔眼摩擦阻力及裂缝延伸压力, MPa; σ_h 为压裂层段最小水平主应力, MPa。

由式(14)可以看出,对于一口特定的压裂井而言,地面的施工压力与压裂层段处的最小水平主应力密切相关,即在相同的注水压力下,最小水平主应力 σ_h 低的层段裂缝延伸压力 p_i 较高,裂缝容易延伸扩展。故在薄互层低渗透油藏压裂过程中,可以根据油藏地应力连续剖面图通过调整井口注水压力来达到单层压裂或是多层压通的效果。

3)井筒附近储层岩石裂缝相对发育程度及其方位分布规律。根据断裂力学原理,当来自周围环境的压力超过岩石自身强度时,会引起较大的应变,从而出现裂缝^[10-11]。因此,在储层岩石三向主应力分析计算的基础上,可以利用岩石破裂准则对不同深度的岩石裂缝发育规律进行研究。图 4 为测井资料解释得到的井筒附近岩石裂缝发育规律分布图,图中分别给出了储层岩石的破裂压力、岩石破裂率及裂缝相对方位角随深度的变化曲线。从图 4 可以看出,研究范围内油层附近地层的破裂压力相对较低,同时岩石的破裂率则相对较高,这说明了油层附近岩层具有较好的油气成藏条件。图 4 中还给出了储层岩石所发育的微裂缝相对于最大主应力方位的分布情况(空间上看近似平行于中间主应力的方位),据此可以为压裂设计和套管射孔提供理论参考。

4)胜利油田纯化油区三向主应力随深度的变化

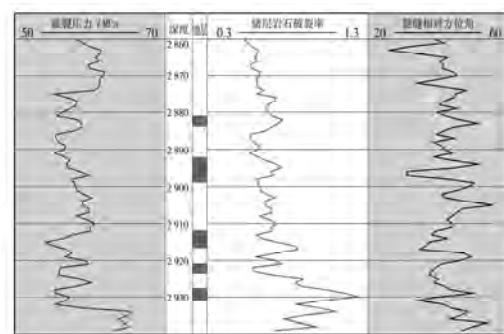


图 4 测井资料解释得到井筒附近岩石裂缝发育规律分布

规律。根据上述方法原理,对胜利油田纯化油区的几十口测井资料进行计算分析,获取了该油区不同深度的三向主应力,据此绘制了其随深度变化的关系曲线(见图 5),对各数据点进行回归拟合可以得到胜利油田纯化油区三向地应力大小随地层深度变化的数学表达式。

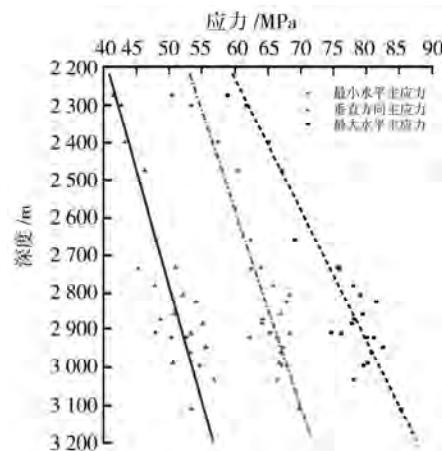


图 5 胜利油田纯化油区三向主应力随深度变化曲线

1)水平最小主应力随地层深度变化的数学表达式为:

$$\begin{cases} \sigma_h = 0.01616H + 5.0084 \\ R = 0.94552 \\ S_d = 2.15991 \end{cases} \quad (15)$$

2)垂直主应力随地层深度变化的数学表达式为:

$$\begin{cases} \sigma_v = 0.01902H + 10.93744 \\ R = 0.89564 \\ S_d = 2.19164 \end{cases} \quad (16)$$

3)水平最大主应力随地层深度变化的数学表达式为:

$$\begin{cases} \sigma_h = 0.02365H + 1.98168 \\ R = 0.89111 \\ S_d = 1.38544 \end{cases} \quad (17)$$

式(15)~(17)中, H 为地层深度, m; R 为相关系数, 无量纲; S_d 为标准偏差, MPa。

4 结论与建议

1) 声波、密度和自然伽马等常规测井资料是油气勘探开发中最基础的资料之一, 笔者利用优化反分析方法建立了利用其分析储层岩石力学参数、地应力及储层裂缝分布规律的模型, 并编制了相关分析程序。实例计算表明, 该方法较传统方法具有明显优势, 适用性强。但优化目标的选取和约束条件的确定需要依靠一定的实际经验, 且分析效果强烈依赖于关键点处测量信息的可靠程度。

2) 通过对胜利油田净化油区大量数据资料进行计算分析, 分别获取了该油区几十口井的动态弹性参数、地应力和裂缝分布规律。并在此基础上通过回归拟合的方式, 首次得到了该油区油藏三向地应力随深度变化的规律曲线和数学表达式, 对该油区的后续开采工作具有重要的参考价值。

参 考 文 献

[1] 李志明, 张金珠. 地应力与油气勘探开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.

- [2] 洪有密. 测井原理与综合解释[M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1993.
- [3] 张佃昌. 小波技术在信号重构及去噪中的应用研究[D]. 山东济南: 山东大学计算机科学与技术学院, 2007.
- [4] 王敏生, 李祖奎. 测井声波预测岩石力学特性的研究与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(1): 74~78, 83.
- [5] Walsh J, Sinha B, Donald A. Formation anisotropy parameters using borehole sonic data: society of professional well logging analysts: 47th Annual Logging Symposium, Veracruz, Mexico, June 4~7, 2006[C].
- [6] 张筠, 林邵文. 利用测井进行地层弹性特征及应力场分析[J]. 测井技术, 2001, 25(6): 467~472.
- [7] Tutuncu A N, Sharma M M. Relating static and ultrasonic laboratory measurement to acoustic log measurement in tight gas sands[R]. SPE 24689, 1993.
- [8] 刘高波, 冯文光, 陶晓红, 等. 常规测井资料与 FMI 相结合计算地应力[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(3): 200~204.
- [9] 闫相祯, 杨秀娟, 王建军, 等. 基于多井约束优化方法的低渗油藏应力场反演与裂缝预测技术及应用[C]//何庆华, 张煜, 张占峰, 等. 中国石油学会第一届油气田开发技术大会论文集. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- [10] Klimentos T, Ghosh A, Sagar R, et al. Cased-hole sonic technique for stress determination and optimization of oriented hydraulic fracturing operations[R]. SPE 113573, 2008.
- [11] 阎树汶, 常贵钊, 张永敏, 等. 岩石破裂压力和力学特性参数的计算[J]. 西安石油学院学报, 1994, 9(4): 7~12.

〔审稿 葛洪魁〕

Application of Optimization Back-Analysis Method in Reservoir Stress and Fracture Study

Liu Qinjie¹ Yan Xiangzhen² Yang Xiujuan²

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying, Shandong, 257061, China; 2. College of Architecture & Storage Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying, Shandong, 257061, China)

Abstract: A model is developed to analyze formation stress and fracture development using based on optimization back analysis method using conventional logging data. This model can used to obtain successive profile map of the near wellbore rock mechanics parameters, formation stress, and fracture parameters using acoustic logging, density logging, and gamma, etc, through which provide references to wellbore stability and fracturing design. Actual drilling data obtained from wells in Chunhua block, Shengli Oilfield have been studied. The profile of stresses and fracture were acquired. The relationship between the reservoir stresses and depth was back calculated for the first time. A lot of experimental data and the field applications indicate that this method is simple and reliable.

Key words: optimizing back-analysis; rock stress; log data; fracture

“教授专家专栏”征文启事

为推动我国石油工程技术的不断发展, 促进国内石油工程界科研人员间的不断交流, 本刊自 2001 年第 3 期开始, 开辟了“教授专家专栏”栏目。该栏目主要刊登国内外石油工程界知名教授、专家的文稿, 以期能对我国石油工程技术的发展起到一定的导向作用。为此, 本刊向社会征稿, 只要具有一定的理论高度或一定的导向性, 石油钻井、完井、钻井液、采油、机械方面的稿件均可。所有稿件一经采用, 稿费从优。来稿请注明“教授专家专栏”栏目征文。

《石油钻探技术》编辑部