

基于测井资料的 TIV 地层水平地应力计算方法

夏宏泉¹, 刘 畅¹, 李高仁², 蒋婷薇¹

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 四川成都 610500; 2. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西西安 710021)

摘要: 低孔低渗地层常具有 TIV 各向异性特征, 准确计算水平地应力对该类储层的射孔和压裂设计至关重要。为了更加准确地计算 TIV 地层的水平地应力, 针对该类地层的低压特征, 优选 Bowers 法求取地层孔隙压力, 然后利用阵列声波测井资料求取 TIV 地层的岩石力学参数(垂直与水平方向上的杨氏弹性模量和泊松比); 同时考虑层理面产状对水平地应力的影响, 改进了传统的 Sn 模型, 建立了 TIV 地层水平地应力新计算模型。用新模型计算了鄂尔多斯盆地含水地区长 6、长 7 和长 8 段 TIV 地层的水平地应力, 计算结果与实测最大、最小水平地应力的最大相对误差分别为 8.70% 和 7.86%, 低于 Sn 模型的相对误差。研究结果表明, 新模型计算的水平地应力更符合实际地应力纵向分布的变化规律, 可为致密油储层的水力压裂设计提供更可靠的参考依据。

关键词: TIV 地层; 各向异性; 水平地应力; 层理面产状; 测井资料; 数学模型

中图分类号: TE357.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2019)06-0067-06

A Logging Data-Based Calculation Method for the Horizontal TIV Formation In-Situ Stress

XIA Hongquan¹, LIU Chang¹, LI Gaoren², JIANG Tingwei¹

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi, 710021, China)

Abstract: Given the TIV anisotropy characteristics of low porosity/permeability formations, the accurate calculation of horizontal in-situ stress is essential for the perforation and fracturing designs of those reservoirs. In order to more accurately and effectively calculate the horizontal in-situ stress of a TIV formation, considering the low-pressure characteristics of such formation, the Bowers method was used to obtain the formation pore pressure. Then, the array acoustic logging data was used to obtain the anisotropic rock mechanical parameters (the vertical/ horizontal Young's modulus of elasticity and Poisson's ratio) of TIV formation. Considering the influence of bedding plane occurrence on horizontal in-situ stress, the traditional Sn model was improved and a new calculation model for the horizontal in-situ stress of TIV formation was established. The horizontal in-situ stresses of the TIV formations in the Chang 6, Chang 7 and Chang 8 sections of the Heshui area of the Ordos Basin were calculated by this new model. The maximum relative errors between the calculated and the measured maximum/minimum horizontal in-situ stresses were 8.70% and 7.86%, respectively, which were smaller than those of in-situ stresses calculated by Sn model. The results showed that the horizontal in-situ stress calculated by this new model was more in line with the variation laws of the vertical and horizontal distributions of the actual in-situ stress, which could provide a more reliable reference for the hydraulic fracturing design of tight oil reservoirs.

Key words: TIV formation; anisotropy; horizontal in-situ stress; bedding plane occurrence; logging data; mathematical model

在致密油开发中, 水平地应力的计算对于优选压裂试油时段和优化试油完井方案等具有重要意义^[1-3]。地层的各向异性可以分为极端各向异性、单斜各向异性、正交各向异性和横向各向同性等 4 大类^[4]。其中, 横向各向同性的各向异性地层, 又分为具有垂直对称轴的横向各向同性(transverse isotropy with a vertical axis of symmetry, TIV)和具有水平对称轴的横向各向同性(transverse isotropy with a

horizontal axis of symmetry, TH)2 种。TIV 地层一般

收稿日期: 2018-12-21; 改回日期: 2019-10-03。

作者简介: 夏宏泉(1965—), 男, 陕西武功人, 1988 年毕业于西南石油学院地质专业, 1997 年获西南石油学院油气田开发工程专业博士学位, 教授, 主要从事常规定测井、偶极声波测井和随钻测井资料的精细解释及应用研究工作。E-mail: hqx3427@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项“鄂尔多斯盆地大型低渗透岩性地层油气藏开发示范工程”(编号: 2016ZX05050) 资助。

是由平行排列的水平裂缝、层理面导致其水平和垂直方向上的物理性质不同而产生的。

合水地区三叠系延长组的长 6、长 7 和长 8 段低孔低渗砂岩储层是鄂尔多斯盆地的主力油层^[5]，岩心声速各向异性测定结果和岩石力学试验结果表明，该段储层具有明显的 TIV 各向异性特征（如弹性模量和泊松比在水平与垂直方向上的差异较大^[6]）。如何连续准确计算 TIV 地层的单井水平地应力剖面，是石油工程利用测井资料获得岩石力学参数亟需解决的问题。

目前广泛应用的地应力计算模型有 Eaton 模型、Anderson 模型和 Newberry 模型以及黄荣樽等人提出的“六五”模型和“七五”模型等^[7]，但这些模型没有考虑地层各向异性对水平地应力的影响。2008 年，S.M.Higgins 等人^[8]建立了针对 TIV 地层的水平地应力计算模型（简称 Sn 模型），该模型考虑了岩石的各向异性，但其假设地层层理面是水平的，而实际地层的层理面或界面往往是倾斜的，因此，利用该模型计算出的水平地应力往往偏小，层间差异不明显。为此，笔者借鉴 Sn 模型，考虑层理面产状对 TIV 地层水平地应力的影响，从阵列声波测井资料提取各向异性波速（时差或慢度），建立了 TIV 地层水平地应力新计算模型，并将该模型编程，用鄂尔多斯盆地合水地区三叠系延长组长 6、长 7 和长 8 段的测井数据进行了实例验证，结果显示其相对误差比 Sn 模型小，能更好地刻画实际地应力纵横向分布的变化规律，实用性较强。

1 上覆岩层压力和孔隙压力计算方法

水平地应力主要由构造应力、上覆岩层压力和孔隙压力等组成。其中，上覆岩层压力和孔隙压力是准确计算最大和最小水平地应力时常用的关键参数。

1.1 上覆岩层压力的计算

通常情况下，通过对密度测井曲线积分来计算上覆岩层压力（即垂向应力）。但是，实际中并非每口井的所有井段都有密度测井曲线，因此需要取无密度测井曲线井段的平均密度或者构建一条密度测井曲线求取垂向应力，并将其与有密度测井曲线井段积分求得的应力相加，计算某地层深度处的上覆岩层压力，计算公式为：

$$p_o = 0.00981 \left[\rho_{av} H_1 + \int_{H_1}^{H_2} \rho(h) dh \right] \quad (1)$$

式中： p_o 为上覆岩层压力，MPa； ρ_{av} 为无密度测井曲线井段的上覆岩层平均密度，g/cm³； ρ 为每小层岩石的密度，g/cm³； H_1 为无密度测井曲线井段最深处的垂直深度，m； H_2 为计算上覆岩层压力处的垂直深度（ H_1-H_2 井段有密度测井曲线），m； h 为测井曲线深度采样间隔所对应的地层厚度，m（常取 0.125 m）。

1.2 地层孔隙压力的计算

计算地层孔隙压力的常用方法有等效深度法（ED 法）、Eaton 法（ET 法）和 Bowers 法（BS 法）。比较上述 3 种方法发现：ED 法和 ET 法都是基于泥岩正常压实理论，以正常压实趋势线为基础建立的，适用于欠压实成因机制下的地层孔隙压力预测^[9-10]，用来计算异常低孔隙压力时，由于曲线纵向上起伏变化较大，需要通过反复试算与调整，人为附加一个压力梯度校正值（例如-0.25），才能保证计算出的孔隙压力与实测值相近。BS 法首先用纵波速度和 3 个经验参数求出垂直有效应力，再用上覆岩层压力减去垂直有效应力求得孔隙压力^[11-12]，可用来计算欠压实或由其他机理形成的异常低地层的孔隙压力。研究认为，鄂尔多斯盆地合水地区延长组地层低孔隙压力的成因类型属于卸载型，选用 BS 法计算其孔隙压力较合适^[13]，计算公式为：

$$p_p = p_o - \frac{\sigma_{max}^{1-U} \left(\frac{10^6}{\Delta t} - \frac{10^6}{\Delta t_{min}} \right)^{\frac{U}{B}}}{H_v} \quad (2)$$

$$\text{且} \quad \sigma_{max} = \left(\frac{3.281 \times 10^6}{\Delta t_{max}} - \frac{3.281 \times 10^6}{\Delta t_{min}} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (3)$$

式中： H_v 为地层垂深，m； p_p 为孔隙压力，MPa； σ_{max} 为沉积层历史最大有效应力，MPa； Δt_{min} 为与最大层速度对应的声波时差，μs/m； Δt_{max} 为与最小层速度对应的声波时差，μs/m； A 、 B 和 U 为经验参数，通过已知地层孔隙压力反算得到，对于鄂尔多斯盆地合水地区延长组长 6、长 7 和长 8 段地层， A 、 B 和 U 分别为-0.8、2.9 和-1.0。

2 TIV 地层水平地应力新计算模型的建立

建立 TIV 地层水平地应力新计算模型，关键在

于从 DS1/XMAC/WS/MPAL/DSWI 阵列声波测井资料提取或构建估算 3 个方向上的纵横波波速(时差或慢度), 利用其准确计算地层各向异性刚性系数、杨氏模量和泊松比, 并考虑地层层理面或层界面的产状等因素, 引入新的参数。

2.1 TIV 地层岩石力学参数的计算

TIV 地层应力和应变间的关系满足广义虎克定律^[14], 可表示为:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{11}-2C_{66} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{11}-2C_{66} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: \mathbf{C} 为刚性系数矩阵, GPa; ε 为应变; C_{11} 为平行层理面传播的纵波模量, GPa; C_{33} 为垂直层理面传播的纵波模量, GPa; C_{44} 为垂直层理面传播的横波模量, GPa; C_{66} 为平行层理面传播的横波模量, GPa; C_{13} 为刚性模量, GPa。

描述 TIV 地层应力应变间的关系需要确定刚性系数 C_{11} , C_{33} , C_{44} , C_{66} 和 C_{13} , 其计算公式分别为^[14]:

$$C_{11} = \rho v_{ph}^2 \quad (6)$$

$$C_{33} = \rho v_{pv}^2 \quad (7)$$

$$C_{44} = \rho v_{sv}^2 \quad (8)$$

$$C_{66} = \rho v_{sh}^2 \quad (9)$$

$$C_{13} = \left[\frac{\left(4\rho v_{p45}^2 - C_{11} - C_{33} - 2C_{44} \right)^2 - (C_{11} - C_{33})^2}{4} \right]^{\frac{1}{2}} - C_{44} \quad (10)$$

式中: v_{ph} 为平行层理面的纵波速度, km/s; v_{pv} 为垂直层理面的纵波速度, km/s; v_{sh} 为平行层理面的横波速度, km/s; v_{sv} 为垂直层理面的横波速度, km/s; v_{p45} 为与地层层理面呈 45° 的纵波速度, km/s。

$$\left\{ \begin{array}{l} S_H = \frac{\mu_v E_h}{(1-\mu_h) E_v} (p_o - \alpha p_p) \cos \beta + (p_o - \alpha p_p) \sin \beta \cos (\gamma - \Omega) + \frac{E_h \varepsilon_H}{1-\mu_h^2} + \frac{\mu_h E_h \varepsilon_h}{1-\mu_h^2} + \alpha p_p \\ S_h = \frac{\mu_v E_h}{(1-\mu_h) E_v} (p_o - \alpha p_p) \cos \beta + (p_o - \alpha p_p) \sin \beta \sin (\gamma - \Omega) + \frac{E_h \varepsilon_h}{1-\mu_h^2} + \frac{\mu_h E_h \varepsilon_H}{1-\mu_h^2} + \alpha p_p \end{array} \right. \quad (13)$$

与式(12)相比, 式(13)多了 1 项, 考虑了地层倾斜引起的上覆岩层压力(垂直应力)对水平地应力的贡献。式(13)在第一项上乘以系数 $\cos \beta$, 并增加纵

得到刚性系数后, 可计算杨氏模量和泊松比等各向异性岩石力学参数^[15-16], 计算公式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_v = C_{33} - \frac{2C_{13}^2}{C_{11} + C_{12}} \\ E_h = \frac{(C_{11} - C_{12})(C_{11}C_{33} - 2C_{13}^2 + C_{12}C_{33})}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \\ \mu_v = \frac{C_{13}}{C_{11} + C_{12}} \\ \mu_h = \frac{C_{12}C_{33} - C_{13}^2}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \end{array} \right. \quad (11)$$

式中: E_v 和 E_h 分别为垂向和水平方向的杨氏模量, GPa; μ_v 和 μ_h 分别为垂向和水平方向的泊松比。

2.2 TIV 地层地应力的计算

通常采用 Sn 模型计算 TIV 地层的水平地应力^[8], 计算公式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_H = \frac{E_h}{E_v} \frac{\mu_v}{(1-\mu_h)} (p_o - \alpha p_p) + \frac{E_h \varepsilon_H}{1-\mu_h^2} + \frac{\mu_h E_h \varepsilon_h}{1-\mu_h^2} + \alpha p_p \\ S_h = \frac{E_h}{E_v} \frac{\mu_v}{(1-\mu_h)} (p_o - \alpha p_p) + \frac{E_h \varepsilon_h}{1-\mu_h^2} + \frac{\mu_h E_h \varepsilon_H}{1-\mu_h^2} + \alpha p_p \end{array} \right. \quad (12)$$

式中: S_H 和 S_h 分别为最大、最小水平地应力, MPa; ε_h 和 ε_H 分别为最小、最大水平地应力方向上的应变; α 为 Biot 系数(长 6、长 7 和长 8 段地层取 0.5)。

Sn 模型适用于水平地层的地应力计算, 而实际地层层理面或层界面往往是倾斜的, 倾斜层理面与大地坐标角度关系如图 1 所示(图 1 中: β 和 γ 为地层倾角, (°); p_n 为法向应力, MPa; Ω 为最大水平地应力的方位角, (°))。若此时仍采用式(12)计算地应力, 计算结果会有较大误差。

多孔介质有效应力理论认为, 页岩各向异性只影响到骨架应力, 不会对孔隙压力产生影响, 结合图 1, 考虑地层倾斜对水平地应力的影响, 对 Sn 模型进行改进, 得到了适用于任意倾角地层水平地应力的新计算模型:

向有效应力、最大和最小水平地应力方向上的分应力 $(p_o - \alpha p_p) \sin \beta \cos (\gamma - \Omega)$ 、 $(p_o - \alpha p_p) \sin \beta \sin (\gamma - \Omega)$, 这样便于计算任意倾角地层的水平地应力, 拓宽

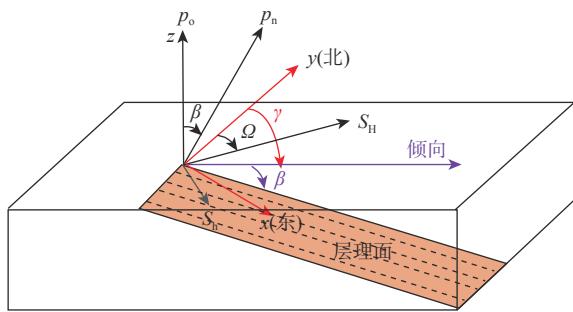


图 1 倾斜层理面或层界面发育的地层与大地坐标系、层状坐标系的关系

Fig. 1 Relationship between the strata developed with tilted bedding or layer interface and the geodetic coordinate system and layered coordinate system

了地应力计算模型的适用性。地应力分量如图 2 所示。

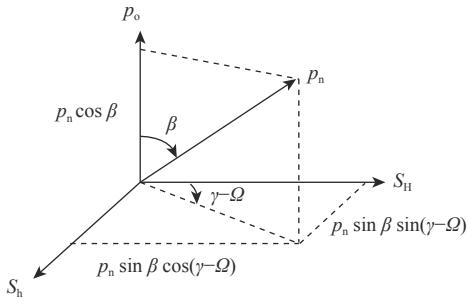


图 2 倾斜层状地层的地应力分量转换关系

Fig. 2 The conversion relationship for the in-situ stress components of tilted bedded stratum

式(13)中参数较多,且计算复杂,需要对其做进一步的简化整理。通过计算归纳分析试验数据可知, $\frac{E_h \varepsilon_h}{1 - \mu_h^2}$ 、 $\frac{\mu_h E_h \varepsilon_h}{1 - \mu_h^2}$ 和 αp_p 之和与 p_p 相差不大,最大水平地应力与最小水平地应力有较好的线性相关性(见图 3)。因此,考虑杨氏模量和侧压系数对水平地应力的影响,给出了一种较为简单实用的各向异性地层水平地应力计算公式:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_h = \frac{E_h}{E_v (1 - \mu_h)} (p_o - \alpha p_p) \cos \beta + \\ (p_o - \alpha p_p) \sin \beta \cos (\gamma - \Omega) + p_p \\ S_h = S_h / K \end{array} \right. \quad (14)$$

式中: K 为最大水平地应力与最小水平地应力的比值。

3 计算误差实例分析

为了验证 TIV 地层水平地应力新计算模型的准确性,在 Forward 平台上编程,计算了鄂尔多斯盆地

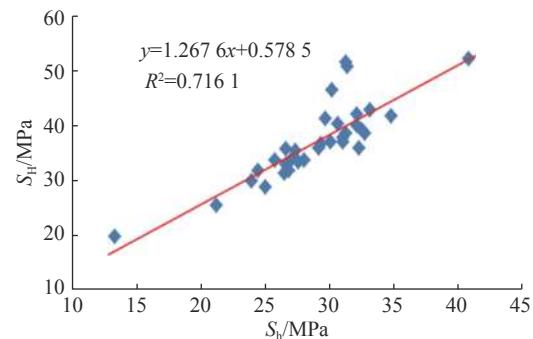


图 3 最大水平地应力与最小水平地应力的关系

Fig. 3 The relationship between the maximum and minimum horizontal in-situ stresses

合水地区 N148 井等多口井延长组 TIV 地层的水平地应力,并与实测值进行了对比。结果发现,新模型的计算结果准确,具有很高的实用价值。N148 井 1 630.00~1 790.00 m 井段属于典型的 TIV 地层,下面以该井段为例对计算结果进行分析。

合水地区延长组地层倾向为北北西向,地层倾角约为 5°。用式(1)计算上覆岩层压力,用式(2)计算孔隙压力,用式(11)计算垂直和水平方向的泊松比、杨氏模量。通过编程计算程序,实现了岩石力学参数和水平地应力的可视化处理,结果见图 4。

图 4 中:第 5 道为岩性体积剖面,可见其砂岩层水平层理发育,为典型的 TIV 介质特征;第 6 道为计算得到的地层孔隙压力和上覆岩层压力曲线;第 4 道为 3 条发育,可计算 C_{11} — C_{66} 刚性系数,进而计算垂直和水平方向上的弹性参数;在砂泥岩地层中,当 $C_{66} > C_{44}$ 时表现为各向异性;从第 7 道的 C_{44} 和 C_{66} 曲线的变化特征可以看出,多个深度段 $C_{66} > C_{44}$,说明不同井段的地层各向异性明显;此外,从第 8 和第 9 道也可以看出,不同深度的岩石力学参数(垂直和水平方向的泊松比、杨氏模量)曲线存在明显差异,表明不同井段的地层各向异性明显;第 10 和第 11 道为采用不同模型计算的水平地应力,可以看出,使用新模型计算的水平地应力较 Sn 模型的计算结果更接近实测值,说明新模型的计算精度较高,与井区地应力情况($\sigma_v > \sigma_h > \sigma_h$)相符。

将 Sn 模型、新模型计算的最大和最小水平地应力,与实验室模拟地下条件实测的最大和最小水平地应力进行了比较,结果见表 1。

由图 4 和表 1 可知,新模型的计算值与实测值比较接近,最大、最小水平地应力的最大相对误差分别为 8.70% 和 7.86%;Sn 模型的计算值与实测值差距较大,最大、最小水平地应力的相对误差分别

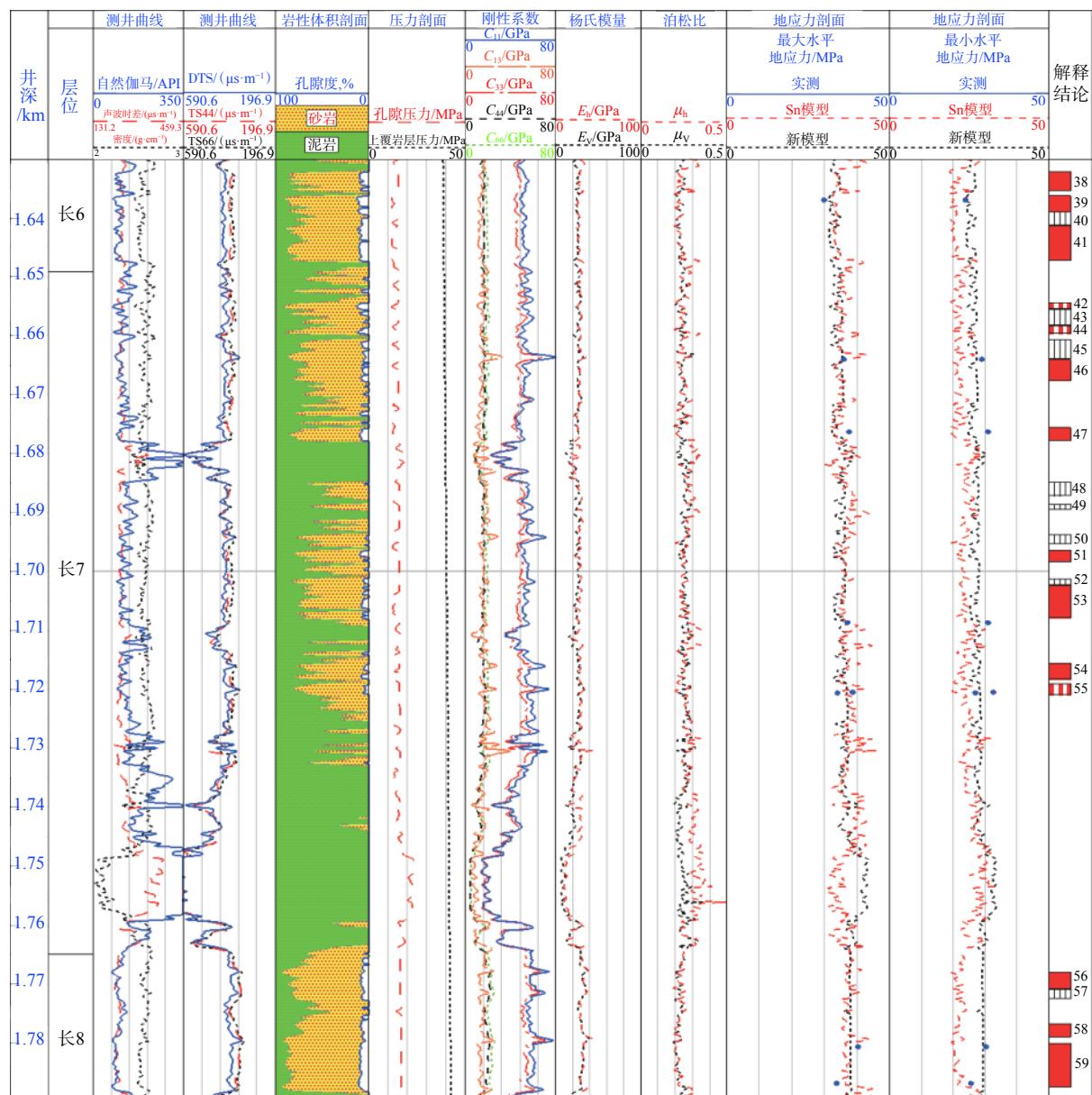


图 4 N148 井 1 630.00~1 790.00 m 井段各向异性岩石力学参数和水平地应力测井综合解释图

Fig.4 Comprehensive logging interpretation map of anisotropic rock mechanical parameters and horizontal in-situ stress at an interval of 1 630.00–1 790.00 m in Well N148

达到 18.93% 和 36.94%，且计算值比实测值偏小。在现场压裂施工过程中，水平地应力的计算误差会导致破裂压力计算结果出现偏差，从而影响压裂效果。使用新模型计算的水平地应力较符合实际情况，有利于压裂设计和施工规模的控制。

4 结 论

1) 计算各向同性和各向异性地层的最大、最小水平地应力，首先需要准确计算地层孔隙压力。对于低压地层，选用 Bowers 法计算孔隙压力较合适。

该方法不需要建立正常压实趋势线，由实测压力反算得到计算孔隙压力所需的 3 个关键经验参数，简单可靠。

2) 在计算各向异性地层的最大、最小水平地应力时，不能忽略层理面倾角和倾向的影响。利用假设地层层理面水平展布建立的 Sn 模型计算倾斜地层的地应力、破裂压力，计算结果偏小。

3) TIV 地层水平地应力新计算模型考虑了层理面和层界面产状，计算的最大、最小水平地应力更接近实测值，较传统的各向同性地应力计算模型和 Sn 模型更能突出纵向层间地应力的差异、更能真实

表 1 最大、最小水平地应力实测值与模型计算值的对比

Table 1 Comparison of the measured and calculated values of the maximum/minimum horizontal in-situ stresses

井深/m	最大水平地应力/MPa			最大水平地应力相对误差, %		最小水平地应力/MPa			最小水平地应力相对误差, %	
	实测	新模型	Sn模型	新模型	Sn模型	实测	新模型	Sn模型	新模型	Sn模型
1 637.00	30.14	32.64	32.61	8.28	9.09	23.88	25.10	20.02	5.11	16.16
1 664.00	36.04	37.06	36.20	2.84	0.44	29.12	28.51	22.31	2.09	23.39
1 676.40	37.89	38.68	32.78	2.08	13.49	31.02	29.76	19.61	4.08	36.78
1 708.90	37.23	40.17	37.87	7.91	1.72	31.01	30.90	23.75	0.35	23.41
1 719.50	38.74	41.35	35.32	6.75	8.83	32.70	33.08	20.62	1.16	36.94
1 720.60	34.10	37.06	35.78	8.70	4.93	27.10	29.23	21.54	7.86	20.52
1 780.90	40.48	41.28	36.72	1.97	9.29	30.58	31.75	20.21	3.83	33.91
1 787.00	33.89	35.78	44.78	5.55	32.13	25.72	27.52	27.49	7.00	6.88

刻画地应力纵向和横向上的变化规律,有助于优化压裂设计与施工规模。

参 考 文 献

References

- [1] 黄鑫,董秀成,肖春跃,等.非常规油气勘探开发发现状及发展前景[J].天然气与石油,2012,30(6):38~41.
HUANG Xin, DONG Xiucheng, XIAO Chunyue, et al. Present situation and development prospect of unconventional oil and gas exploration and development[J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(6): 38~41.
- [2] 王越之,李自俊.横向各向同性地层地应力的研究[J].石油学报,1999,34(1):34~37.
WANG Yuezhi, LI Zijun. A study of in-situ stress in transversely isotropic formations[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1999, 34(1): 34~37.
- [3] WATERS G A, HEINZE J R, JACKSON R, et al. Use of horizontal well image tools to optimize Barnett shale reservoir exploitation[R]. SPE103202, 2006.
- [4] 姜梦奇.横向各向同性介质克希霍夫叠前深度偏移方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2016.
JIANG Mengqi. Study on Kirchhoff pre-stack depth migration method for transversely isotropic media[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2016.
- [5] 赵向原,曾联波,王晓东,等.鄂尔多斯盆地宁县—合水地区长6、长7、长8储层裂缝差异性及开发意义[J].地质科学,2015,50(1):274~285.
ZHAO Xiangyuan, ZENG Lianbo, WANG Xiaodong, et al. Differences of natural fracture characteristics and their development significance in Chang 6, Chang 7 and Chang 8 reservoir, Ningxian-Heshui area, Ordos Basin[J]. *Scientia Geological Sinica*, 2015, 50(1): 274~285.
- [6] 刘忠华,宋连腾,王长胜,等.各向异性快地层最小水平主应力测井计算方法[J].石油勘探与开发,2017,44(5):745~752.
LIU Zhonghua, SONG Lianteng, WANG Changsheng, et al. Evaluation method of the least horizontal principal stress by logging data in anisotropic fast formations[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 745~752.
- [7] 黄荣樽,庄锦江.一种新的地层破裂压力预测方法[J].石油钻采工艺,1986,8(3):1~14.
HUANG Rongzun, ZHUANG Jinjiang. A new method for
- predicting formation fracture pressure[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1986, 8(3): 1~14.
- [8] HIGGINS S M, GOODWIN S A, DONALD A, et al. Anisotropic stress models improve completion design in the Baxter Shale[R]. SPE 115736, 2008.
- [9] 刘方,陈剑军.地质统计学反演预测地层压力的方法[J].工业技术创新,2015,2(3):366~369.
LIU Fang, CHEN Jianjun. Formation pressure prediction with geostatistical inversion[J]. Industrial Technology Innovation, 2015, 2(3): 366~369.
- [10] 杨振平,吴波,王勇. Eaton 法预测 M 油田地层孔隙压力[J].石油天然气学报,2012,34(9):181~182.
YANG Zhenping, WU Bo, WANG Yong. Application of Eaton method in predicting the formation pore pressure of M Oilfield[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(9): 181~182.
- [11] BOWERS G L. Pore pressure estimation from velocity data: accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction[J]. SPE Drilling & Completion, 1995, 10(2): 89~95.
- [12] 徐志星.西湖凹陷异常地层压力特征及其与油气成藏的关系[D].成都:成都理工大学,2015.
XU Zhixing. Abnormal formation pressure and its relationship with hydrocarbon accumulation in Xihu Sag[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [13] 夏宏泉,么勃卫,毕刚.塔里木盆地致密砂岩气层异常高压的测井计算方法[J].测井技术,2018,42(4):423~426.
XIA Hongquan, YAO Bowei, BI Gang. Logging calculate method of abnormal high pressure in tight sandstone gas reservoirs in Tarim Basin[J]. Well Logging Technology, 2018, 42(4): 423~426.
- [14] WANG Zhijing. Seismic anisotropy in sedimentary rocks, part 1: a single-plug laboratory method[J]. *Geophysics*, 2002, 67(5): 1415~1422.
- [15] SAROUT J, MOLEZ L, GUEGUEN Y, et al. Shale dynamic properties and anisotropy under triaxial loading: experimental and theoretical investigations[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2007, 32(8~14): 896~906.
- [16] SUAREZ-RIVERA R, DEENADAYALU C, YANG Y K. Unlocking the unconventional oil and gas reservoirs: the effect of laminated heterogeneity in wellbore stability and completion of light gas shale reservoirs[R]. OTC 20269, 2009.