

横观各向同性地层破裂压力测井计算方法

桂俊川^{1,*}, 夏宏泉², 桑宇³, 曾波¹,
吴建⁴, 宋毅¹, 黄浩勇¹, 徐尔斯¹

- (1. 中国石油西南油气田分公司页岩气研究院, 成都 610051;
2. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500;
3. 中国石油西南油气田分公司, 成都 646000; 4. 中国石油西南油气田分公司蜀南气矿, 泸州 646000)

摘要:破裂压力是钻井工程、完井工程和水力压裂改造技术的关键参数之一,利用测井资料计算连续的地层破裂压力是最常用的方法,但常规计算方法忽略了地层各向异性的影响。为此,将地层视为横向各向同性介质,通过计算弹性刚度矩阵得到垂向和横向的杨氏模量及泊松比;考虑垂向应力与水平应变的关系,推导出基于深度—应变关系计算地层破裂压力的新公式;最后,将其优化编程并应用于L区块地层破裂压力的计算。地层破裂压力的现场实测结果和测井预测结果对比表明,L1井4266m处水力压裂实测地层破裂压力为90.5MPa,传统方法计算的破裂压力为93.5MPa(与实测结果相对误差为5.4%)、横观各向同性方法计算的破裂压力为95.4MPa(与实测结果相对误差为3.3%),新方法计算的地层破裂压力精度优于传统方法计算的地层破裂压力精度,有良好的适用性和可比性。

关键词:钻井工程;水力压裂;破裂压力;横向各向同性;测井资料;刚度矩阵

DOI:10.48014/cpngr.20220801001

引用格式:桂俊川,夏宏泉,桑宇,等.横观各向同性地层破裂压力测井计算方法[J].中国石油天然气研究,2022,1(2):15-22.

0 引言

地层破裂压力是油气勘探开发的关键参数之一。在钻井过程中,地层破裂压力是井眼轨迹设计、泥浆密度窗口优化的基础数据和参考依据^[1-4]。井漏是钻井过程中需要面对的工程难题之一^[5-7],准确的预测地层破裂压力并将井筒压力控制在安全窗口范围内,能够有效地避免井漏以及诱发的井眼垮塌、钻具卡钻、甚至井喷等复杂事故的发生^[8,9]。这不仅提高了作业效率、降低钻井成本,还保证了钻井施工作业的安全。此外,地层破裂压力还是压

裂工程和完井工程的重要参考依据^[10-12],地层破裂压力越高则施工的泵压越大、排量越高,对井口的设备的要求也越高。目前,获取地层破裂压力的方法较多,其中以现场水力压裂实测破裂压力和以利用测井资料预测破裂压力应用最为广泛^[13,14]。现场水力压裂能获得地层破裂压力直接数据,理论上精度更高,但由于测试成本相对较高、测量数据点有限、不能获得连续的破裂压力剖面,并不是石油工程中广泛采用的主体技术。而利用测井资料计算地层破裂压力具有成本低,能获得连续的破裂压力剖面等特点而得到广泛应用。利用测井资料计

* 通讯作者 Corresponding author: 桂俊川,guijunchuan@163.com

收稿日期:2022-08-01; 录用日期:2022-08-23; 发表日期:2022-09-28

基金项目:西南油气田博士后项目“深层页岩地质力学与有效压裂影响因素研究”(编号:20210302-31);西南油气田分公司科研项目“阳101井区地质工程一体化”

算地层破裂压力是一项比较成熟的技术,比较常见的地层破裂压力计算方法主要包括: Matthews-Kelly 模型(1967)、Eaton 模型(1969)、Anderson 模型(1973)、EXLOG 模型(1980)、冯氏模型(1983)、黄氏模型(1985)、谭氏模型(1990)等^[14-16]。这些模型都是建立在各向同性假设的基础上,从弹性力学出发推演而来的,无法满足各向异性地层破裂压力的计算。横向各向同性地层简称 VTI 地层,1998 年,王越之推导了横观各向同性条件下地层破裂压力的计算公式^[15];2007 年,高坤等^[16]在用黄氏模型计算地应力的基础上,进一步推导了横观各向同性条件下地层破裂压力的计算公式,但是该文的横向岩石力学参数(泊松比和杨氏模量)分别采用快、慢横波时差和纵波时差及密度测井资料计算的,实际上也存在明显的误差。

本文以组合弹簧模型计算地应力为基础,通过现场施工数据统计与反演,建立了最大、最小水平主应变与埋藏深度的关系式,并利用偶极横波测井资料计算垂向和横向的岩石力学参数,推导出基于深度—应变关系计算地层破裂压力的新公式,进一步将其优化编程并应用于 L 区块地层破裂压力的计算,最终实现 VTI 地层破裂压力的精细计算。

1 地层破裂压力计算方法

1.1 垂向和横向杨氏模量、泊松比的计算推导

对于具有线弹性特征的岩石,其应力-应变关系可由描述孔隙弹性介质的广义 Hooke 定律表示:

$$\{\sigma\} = [C]\{\epsilon\} \quad (1)$$

式中: $\{\sigma\}$ 为应力张量,MPa; $[C]$ 为刚度矩阵,GPa; $\{\epsilon\}$ 为应变张量,无因次。

对于具有各向异性特征的地层(例如发育一组垂直裂缝的页岩地层),其弹性刚度矩阵可表示为如下所示^[17-19]:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & & & \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{55} & \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} 、 C_{21} 、 C_{22} 、 C_{23} 、 C_{31} 、 C_{32} 、 C_{33} 、 C_{44} 、 C_{55} 、 C_{66} 为刚度矩阵元素,GPa。

对于横观各向同性地层,其弹性刚度矩阵可由 5 个独立的刚度系数表示,分别为: C_{33} 、 $C_{11} = C_{22}$ 、 $C_{12} = C_{21}$ 、 $C_{13} = C_{31} = C_{23} = C_{32}$ 、 $C_{44} = C_{55}$,另根据刚度矩阵对称特性, $C_{66} = (C_{11} - C_{12})/2$ 。五个独立弹性刚度系数可采用下述方法确定^[16,20,21]:

(1) C_{11} 表示沿水平向传播的纵波刚度系数, $C_{11} = \rho V_{ph}^2$ (ρ 为岩石密度, g/cm^3 ; V_{ph} 为沿水平向传播的纵波速度, km/s);

(2) C_{33} 表示沿垂向(井轴方向)传播的纵波刚度系数, $C_{33} = \rho V_p^2$ (V_p 为沿垂向传播的纵波波速, km/s);

(3) C_{44} 表示沿垂向(井轴方向)传播的横波刚度系数, $C_{44} = \rho V_s^2$ (V_s 为沿井轴传播的横波波速, km/s);

(4) C_{66} 表示沿水平向传播的横波刚度系数, $C_{66} = \rho V_{sh}^2$ (V_{sh} 为沿水平向传播的横波速度, km/s)。

这些参数可通过室内岩心各向异性波速测试确定,并利用测试结果对测井资料进行标定。由于取心和测试困难,本研究的 C_{33} 、 C_{44} 和 C_{66} 分别由测井纵波、横波以及斯通利波反演得到, C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} 则由 ANINE 法近似计算^[19]:

$$\begin{cases} C_{11} = C_{33} + 2(C_{66} - C_{44}) \\ C_{12} = C_{11} - 2C_{66} \\ C_{13} = C_{33} - 2C_{44} \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} 、 C_{33} 、 C_{44} 、 C_{66} 为刚度矩阵元素,GPa。

利用 Hooke 公式,可以得到各向异性杨氏模量和泊松比的计算式^[21,22]:

$$\begin{cases} E_v = C_{33} - 2 \frac{C_{13}^2}{C_{11} + C_{12}} \\ E_h = \frac{(C_{11} - C_{12})(C_{11}C_{33} - 2C_{13}^2 + C_{12}C_{33})}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \\ \mu_v = \frac{C_{13}}{C_{11} + C_{12}} \\ \mu_h = \frac{C_{12}C_{33} - C_{13}^2}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: E_h 、 E_v 分别为横向和垂向杨氏模量,GPa; μ_h 、 μ_v 分别为横向和垂向泊松比,无因次。

利用偶极横波测井资料可以计算三个独立的弹性刚度 C_{33} 、 C_{44} 和 C_{66} ,并通过式(3)计算其余弹性刚度,将计算得到的弹性刚度系数代入式(4),实

现各向异性岩石力学参数的计算。尽管王越之^[15]推演了横观各向同性条件下地层岩石力学参数的计算方法,但获取弹性刚度的方法是从地震波中提取的,且年代较为久远,精度亦不如利用偶极横波测井资料计算的。高坤等^[16]利用多极子阵列声波测井资料推演了横观各向同性条件下横向和垂向的岩石力学及泊松比,且认为垂(横)向杨氏模量及泊松比应利用快(慢)横波时差、纵波时差和密度求取,实际上快慢横波都是沿着水平方向偏振而朝着垂直方向传播的,两者计算的都是垂向的杨氏模量和泊松比,这只是两种方位的岩石力学参数,并不是真实的横向和垂向杨氏模量。因此,建议采用本文所述方法,利用多极子阵列声波测井资料计算各向异性岩石力学参数。

1.2 VTI 地层破裂压力的计算

为了计算地层破裂压力,需要先要计算三个主应力和地层孔隙压力。首先,利用密度测井曲线对深度积分求取垂向地应力,即:

$$\sigma_v = \int_0^{\text{Depth}} \rho(z) g dz \quad (5)$$

式中: σ_v 为垂向地应力,MPa;Depth为地层埋深,m; $\rho(z)$ 表示与深度 z 相关的测井地层密度, g/cm^3 ; g 为重力加速度, $9.8N/kg$ 。

对于水平地应力的计算,Higgins等^[23-26]在组合弹簧模型基础上,进一步推导出了适用于横观各向同性地层的水平地应力计算模型:

$$\begin{cases} \sigma_h = \frac{E_h}{E_v} \frac{\mu_v}{1-\mu_h} (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + E_h \frac{\epsilon_h + \mu_v \epsilon_H}{1-\mu_v^2} \\ \sigma_H = \frac{E_h}{E_v} \frac{\mu_v}{1-\mu_h} (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + E_h \frac{\epsilon_H + \mu_v \epsilon_h}{1-\mu_v^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: σ_H 、 σ_h 分别为水平最大、最小地应力,MPa; E_h 、 E_v 分别为横向和垂向杨氏模量,GPa; μ_h 、 μ_v 分别为横向和垂向泊松比,无因次; σ_v 为垂向地应力,MPa; ϵ_H 、 ϵ_h 分别为最大、最小水平主应变,无因次; α 为Biot系数,无因次; P_p 为地层孔隙压力,MPa。

地应力模型中的地层孔隙压力采用伊顿法(Eaton)进行计算,如下所示:

$$P_p = \sigma_v - (\sigma_v - P_w) \left(\frac{L'}{L} \right)^x \quad (7)$$

式中: σ_v 为垂向地应力,MPa; P_w 为地层水静液柱压力,MPa; x 为伊顿(压实)指数,无因次; L' 和 L 为所选取的测井或钻井参数,可以是纵波时差、电阻率、地震层速度、 d_c 指数等,且满足 $L'/L < 1$,本文为纵波时差,us/ft。

在计算获得了地层的地应力和孔隙压力后,即可将其带入破裂压力计算模型,计算地层的破裂压力。当井壁地层所受的拉力超过地层岩石抗张强度时,井壁发生拉张破坏,导致地层破裂,对应的地层破裂压力计算公式为^[27]:

$$P_f = 3\sigma_h - \sigma_H + S_t - \alpha P_p \quad (8)$$

式中: σ_H 、 σ_h 分别为水平最大、最小地应力,MPa; S_t 为岩石抗张强度,MPa,由实验测试获取或者利用破裂压力减去裂缝重启压力进行计算; α 为Biot系数,无因次; P_p 为地层孔隙压力,MPa。

将式(6)中 σ_H 、 σ_h 表达式代入式(8),即可得到横观各向同性条件下破裂压力计算公式:

$$P_f = 2 \frac{E_h}{E_v} \frac{\mu_v}{1-\mu_h} \sigma_v + \left(1 - 2 \frac{E_h}{E_v} \frac{\mu_v}{1-\mu_h} \right) \alpha P_p + \sigma_{tec} + S_t \quad (9)$$

式中: σ_v 为垂向地应力,MPa; σ_H 、 σ_h 分别为水平最大、最小地应力,MPa; E_h 、 E_v 分别为横向和垂向杨氏模量,GPa; μ_h 、 μ_v 分别为横向和垂向泊松比,无因次; α 为Biot系数,无因次; P_p 为地层孔隙压力,MPa; σ_{tec} 为地层构造应力,MPa; S_t 为岩石抗张强度,MPa。

其中地层构造应力由下式计算:

$$\sigma_{tec} = \frac{E_h}{1-\mu_v^2} [(3-\mu_v)\epsilon_h + (3\mu_v-1)\epsilon_H] \quad (10)$$

式中: σ_{tec} 为地层构造应力,MPa; E_h 为横向杨氏模量,GPa; μ_v 为垂向泊松比,无因次; α 为Biot系数,无因次; ϵ_H 、 ϵ_h 分别为最大、最小水平主应变,无因次。

由式(9)可以看出,地层破裂压力主要取决于垂向应力、孔隙压力、构造应力和岩石抗张强度。

1.3 深度与水平应变关系

计算地层破裂压力过程中,式(9)中第一、二和四项可以通过式(5)、(7)和测井资料计算获取,但第三项所述的地层构造应力项尚不确定,其主要取决于地层最大、最小水平主应变。黄荣樽教授认为构造应力在水平方向为一常数,且随着深度的增加

而均匀增加^[13],但限于当时数据和测量技术限制,在推导黄氏模型时,将其视为常数。从构造应力的表达式看,其数值大小主要和最大、最小水平主应变有关,因此,可以建立水平最大、最小主应变随深度的变化关系式。然后,根据式(10)第三项求取构造应力。而最大、最小水平主应变一般通过压裂资料反演确定^[28,29]。通过统计工区多口井压裂资料,反演得到了最大和最小水平主应变 ϵ_H 、 ϵ_h ,经过校正后得到应力应变数据统计表,结果如表 1 所示,由于最大、最小水平主应变的数值较小,表中的应变数值人为放大了 1000 倍。

根据表 1 所列水平应变数据,建立了地层深度-水平应变关系模型,储层深度-应变关系如图 1 所示。由图 1 中拟合公式可得,水平最大最小主应变与储层深度之间的关系为:

$$\begin{cases} \epsilon_H = 0.0004 \times \text{Depth} - 1.265 & (R^2 = 0.909) \\ \epsilon_h = 0.0002 \times \text{Depth} - 0.588 & (R^2 = 0.915) \end{cases} \quad (11)$$

将深度 Depth 代入式(11),可近似计算出最大、最小水平主应变,代入式(10)便可算出构造应力,再带入式(9)即可计算出地层破裂压力。

表 1 水平应变数据统计表

Table 1 Statistical table of horizontal strain data

井号	深度(m)	P_f (MPa)	P_p (MPa)	S_t (MPa)	σ_H (MPa)	σ_h (MPa)	σ_v (MPa)	$1000\epsilon_H$	$1000\epsilon_h$
L1	4266	90.7	41.8	4.11	96.3	81.7	101.0	0.48	0.36
L2	4762	111.7	47.2	4.15	106.7	86.2	111.8	0.64	0.41
	4845	105.5	46.9	3.84	107.9	89.5	113.0	0.72	0.46
Q3	4251	92.7	41.7	5.14	98.5	85.7	100.5	0.48	0.34
L17	3875	94.5	40.2	3.48	86.8	69.4	91.2	0.31	0.25
L20	3865	102.5	39.9	5.18	84.9	70.0	90.7	0.30	0.25
L45	3880	99.1	39.3	4.46	90.2	70.1	91.3	0.31	0.25
L54	3952	94.7	42.1	2.60	90.9	70.6	92.6	0.34	0.26
	3985	88.4	42.3	3.97	90.6	71.9	93.3	0.35	0.27
S222	3828	87.2	37.6	6.42	66.8	60.0	90.3	0.31	0.23
	3794	89.7	37.2	4.30	78.8	63.5	89.1	0.26	0.20

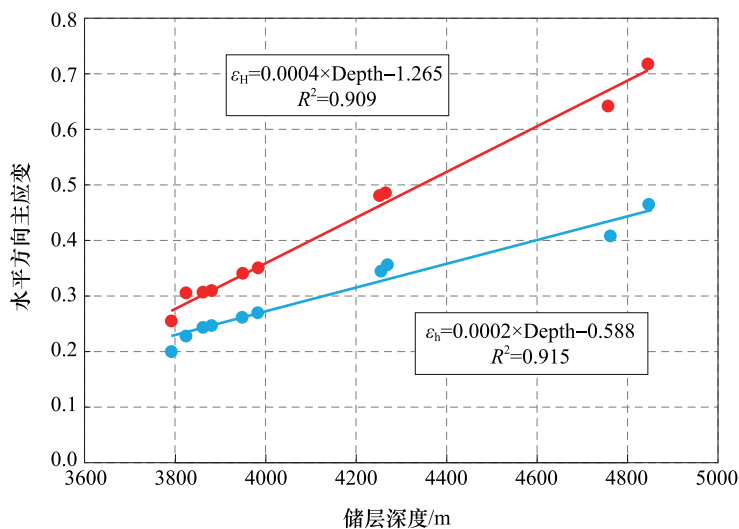


图 1 储层深度和水平应变关系图

Fig. 1 The relationship between reservoir depth and horizontal strain

2 现场案例计算与分析

L 区块位于鄂尔多斯盆地南部,构造上属于伊陕斜坡南部。该区块的主力气层为二叠系山西组山 1 段和山 2 段^[30],储层岩性为粉砂岩和细砂岩,储集空间以孔隙为主,储层埋藏较深,破裂压力较高。基于上述理论和方法,本文利用 Fortran 语言进行了优化编程。将形成的程序挂接到测井解释平台 Forward.NET 上,并处理了该工区多口井测井资料。限于篇幅,本文仅以 L1 井为例进行分析。

L1 井为 L 区块的一口直井,图 2 为 L1 井地层破裂压力处理成果图。图中第五道为弹性刚度矩阵,弹性刚度系数 $C_{33} > C_{44} > C_{55} > C_{66}$,表明垂向传播的纵波速度最快,其次是垂向传播的快横波,再次是垂向传播的慢横波,最后为横向传播的横波,这与岩石各向异性特征相符。考虑到 C_{44} 和 C_{55} 差异不大,可以将地层视为横观各向同性地层。第六道为岩石力学参数, BI_v 、 BI_h 分别为垂向和横向脆性系数,两者在泥岩层相差不大,随着砂岩含量增大,两者逐渐分离并呈现出 $BI_v > BI_h$,显示出砂岩各向异性大于泥岩; E_h 、 E_v 分别为横向和垂向杨氏模量, $E_v > E_h$; μ_h 、 μ_v 分别为横向和垂向泊松比,两者互有大小。第七道为地应力计算结果,其中 σ_v 表示垂向地应力, σ_H 、 σ_h 表示最大、最小水平主应力, σ_{tec} 为构造应力。第八道为三压力剖面,从上到下依次为实测破裂压力 P_f 、传统组合弹簧方法计算的破裂压力 P_{f2} 、横观各向同性方法计算的破裂压力 P_{f1} ,可以看出: P_{f1} 、 P_{f2} 两者变化趋势基本一致,数值差别不大,但 P_{f1} 的变化范围要大于 P_{f2} 。在 4266m 处,L1 井最大、最小水平主应力实测值分别为 96.3MPa 和 81.7MPa,利用测井资料预测的最大、最小水平主应力实测值分别为 96.3MPa 和 81.7MPa,

P_{f2} 为 95.4MPa, P_{f1} 为 93.5MPa,实测地层破裂压力为 90.5MPa。 P_{f2} 与实测结果的相对误差为 5.4%, P_{f1} 与实测结果的相对误差为 3.3%,尽管两种结果均满足工程需要,但 P_{f1} 的精度高于 P_{f2} 。

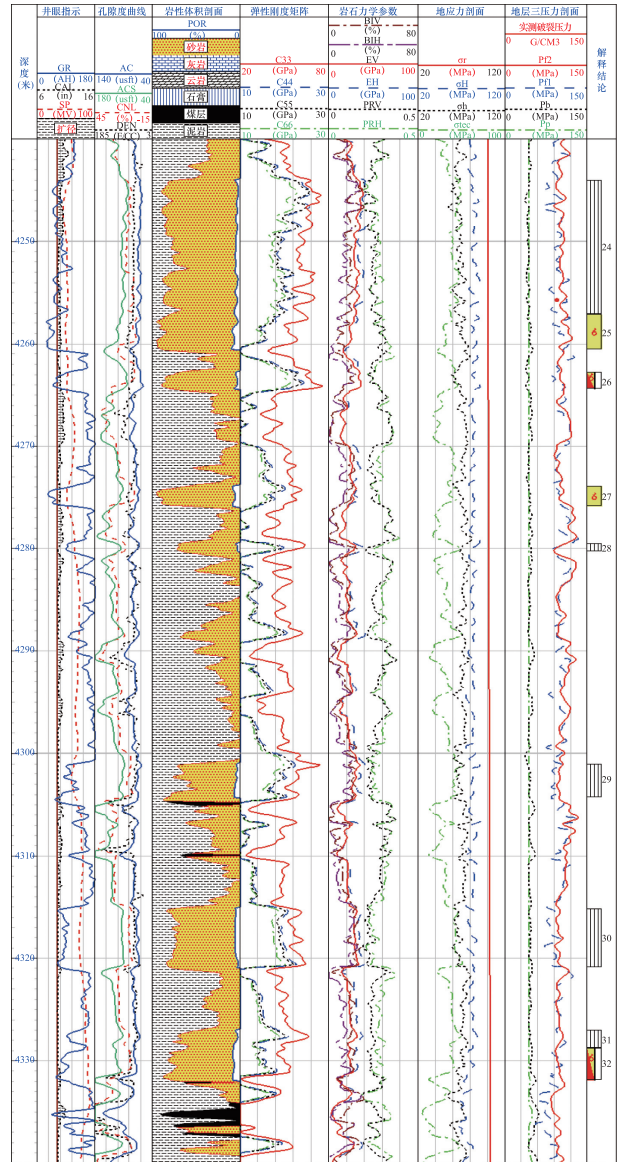


图 2 L1 井 4240~4340m 井段破裂压力计算结果与实测结果对比

Fig. 2 Comparison of calculating and measuring fracture pressure for section 4140-4340m in Well L1

3 结论与建议

(1)将地层视为横向各向同性介质,通过计算弹性刚度矩阵得到垂向和横向的杨氏模量及泊松比,考虑垂向应力与水平应变的关系,推导出基于深度-应变关系计算地层破裂压力的新公式。通过收集工区多口井的压裂施工数据,统计得出最大、最小水平主应变与深度之间的关系,把计算出的垂向和横向杨氏模量、泊松比和统计得到的深度-应变

的关系带入地层破裂压力的新公式,即可计算出横观各向同性地层破裂压力。

(2)将所建立的横观各向同性地层破裂压力计算方法应用于L区块地层破裂压力的计算,现场实测结果对比分析表明,该方法计算的地层破裂压力精度优于传统方法计算的地层破裂压力,4266m处水力压裂实测地层破裂压力为90.5MPa,传统组合弹簧方法计算的破裂压力为93.5MPa、横观各向同性方法计算的破裂压力为95.4MPa,传统组合弹簧方法与实测结果的相对误差为5.4%,横观各向同性方法与实测结果的相对误差为3.3%,横观各向同性方法计算结果优于传统方法。

(3)尽管利用测井资料计算连续的地层破裂压力剖面是一种比较成熟的技术,但大多数地层破裂压力计算方法都假设地层为各向同性,且现有破裂压力计算公式认为构造应力系数或应变为一常数,而黄荣樽教授在早期就指出应变随深度的增加而增大,受当时资料和测量技术限制,将其视为一定值,这在层理和天然裂缝发育的各向异性地层以及埋藏深度变化大的情况是难以成立和适用的。因此,建议采用横观各向同性地层破裂压力计算方法计算地层破裂压力。

(4)由于新地层破裂压力计算方法是基于测井资料计算刚度矩阵实现的,在直井地层中,可以直接利用测井测得的纵横波波速和密度并结合室内试验资料或经验公式计算刚度系数;而在斜井段和水平井段地层,由于井眼轨迹的影响,测井资料测得的纵横波和刚度系数无法直接建立对应的计算关系,获取刚度矩阵困难,不能采用本方法来计算斜井段和水平井段地层破裂压力。后续建议进一步研究斜井段和水平井段地层的刚度矩阵获取方法,以扩展新地层破裂压力计算方法的适用性。

利益冲突:作者声明无利益冲突。

参考文献(References)

- [1] Ma Tianshou, Zhang Q B, Chen Ping, et al. Fracture pressure model for inclined wells in layered formations with anisotropic rock strengths[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 149: 393-408. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.10.050>.
- [2] Ma Tianshou, Wu Bisheng, Fu Jianhong, et al. Fracture pressure prediction for layered formations with anisotropic rock strengths[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 38: 485-503. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.01.002>.
- [3] Ma Tianshou, Liu Yang, Chen Ping, et al. Fracture-initiation pressure analysis of horizontal well in anisotropic formations[J]. International Journal of Oil Gas and Coal Technology, 2019, 22(4): 447-469. <https://doi.org/10.1504/IJOGCT.2019.103508>.
- [4] 马天寿, 杨春和, 陈平, 等. 层状页岩储层水平井破裂压力模型[J]. 天然气工业, 2017, 37(S1): 161-169.
- [5] 马天寿, 王浩男, 杨赟, 等. 不同地应力状态下各向异性地层斜井井壁破裂规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(3): 1123-1135. <https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2022.03.031>.
- [6] 马天寿 唐毅, 陈平, 等. 各向异性地层井壁破裂压力预测[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(3): 80-89. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5005.2019.03.009>.
- [7] 马天寿, 彭念, 陈平, 等. 页岩气水平井井壁裂缝起裂力学行为研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2019, 41(6): 87-99. <https://doi.org/10.11885/j.issn.1674-5086.2019.09.16.05>.
- [8] Liu Yang, Ma Tianshou, Chen Ping, et al. Effects of permeable plugs on wellbore strengthening[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 132: 104416. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104416>.
- [9] Liu Yang, Chen Ping, Wu Bisheng, et al. Mechanics of hydraulic fracture growth from a wellbore intersecting natural fractures[J]. SPE Journal, 2020, 25(2): 646-661. <https://doi.org/10.2118/198890-PA>.
- [10] Liu Yang, Chen Congrui, Ma Tianshou, et al. Experimental investigation on the initiation of hydraulic fractures from a simulated wellbore in laminated shale[J]. Lithosphere, 2021: 4152918. <https://doi.org/10.2113/2021/4152918>.
- [11] Ma Tianshou, Liu Yang, Chen Ping, et al. Fracture-initiation pressure prediction for transversely isotropic formations[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 176: 821-835. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.01.090>.
- [12] 林伯韬. 疏松砂岩储层微压裂机理与应用技术研究[J]. 石油科学通报, 2021, 6(2): 209-227.

- <https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-1693.2021.02.017>.
- [13] 黄荣樽. 地层破裂压力预测模式的探讨[J]. 华东石油学院学报, 1984, 9(4): 335-347.
- [14] 夏宏泉, 张元泽, 陈平, 等. 碳酸盐岩地层破裂压力的测井预测研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(8): 32-35.
<https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0976.2004.08.011>.
- [15] 王越之. 各向异性地层应力的推算及深孔地层破裂压力的预测[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 322-329.
- [16] 高坤, 陶果, 仵岳奇, 等. 利用多极子阵列声波测井资料计算横向各向同性地层破裂压力[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, 31(1): 35-39.
<https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-5870.2007.01.007>.
- [17] 桂俊川, 马天寿, 陈平. 横观各向同性页岩岩石物理模型建立—以龙马溪组页岩为例[J]. 地球物理学报, 2020, 63(11): 4188-4204.
<https://doi.org/10.6038/cjg2020N0294>.
- [18] 桂俊川, 陈平, 马天寿. 正交各向异性岩石弹性参数的空间展布[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2019, 41(3): 13-28.
<https://doi.org/10.11885/j.issn.1674-5086.2018.09.21.02>.
- [19] Gui Junchuan, Ma Tianshou, Chen Ping, et al. Anisotropic damage to hard brittle shale with stress and hydration coupling[J]. *Energies*, 2018, 11(4): 926.
<https://doi.org/10.3390/en11040926>.
- [20] 唐晓明, 郑传汉. 定量测井声学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 108-109.
- [21] 王华, 王兵, 景安语, 等. 斯通利波反演求取横波各向异性参数的方法及实例[J]. 测井技术, 2007, 31(3): 241-244.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-1338.2007.03.011>.
- [22] Gui Junchuan, Guo Jianchun, Sang Yu, et al. Evaluation on the anisotropic brittleness index of shale rock using geophysical logging[J]. *Petroleum*, 2022,
<https://doi.org/10.1016/j.petlm.2022.06.001>.
- [23] Walsh J, Sinha B, Donald A. Formation anisotropy parameters using borehole sonic data[C]. SPWLA 47th Annual Logging Symposium, 4-7 June, 2006, Veracruz, Mexico. <http://www.onepetro.org/conference-paper/SPWLA-2006-TT>.
- [24] Higgins S M, Goodwin S A, Donald A, et al. Anisotropic stress models improve completion design in the Baxter shale[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 21-24 September, 2008, Denver, Colorado, USA.
<https://doi.org/10.2118/115736-MS>.
- [25] Suarez-Rivera R, Deenadayalu C, Chertov M, et al. Improving horizontal completions on heterogeneous tight shales[C]. Canadian Unconventional Resources Conference, 15-17 November, 2011, Calgary, Alberta, Canada.
<https://doi.org/10.2118/146998-MS>.
- [26] Song L, Hareland G. Minimum horizontal stress profile from logging data for Montney Formation of North East British Columbia[C]. SPE Canadian Unconventional Resources Conference, 30 October-1 November, 2012, Calgary, Alberta, Canada.
<https://doi.org/10.2118/162233-MS>.
- [27] 陈勉, 金衍, 张广清. 石油工程岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [28] 任岚, 赵金洲, 胡永全, 等. 水力压裂时岩石破裂压力数值计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 3417-3422.
<https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-6915.2009.z2.018>.
- [29] 梁利喜, 许强, 刘向君. 南海某油井地应力剖面的测井构建研究[J]. 中国矿业, 2007, 16(3): 111-113.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-4051.2007.03.035>.
- [30] 付金华, 李明瑞, 张雷, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区铝土岩天然气勘探突破与油气地质意义探索[J]. 天然气工业, 2021, 41(11): 1-11.
<https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2021.11.001>.

Fracture Pressure Calculation Method in Transversely Isotropic Formation by Logging

GUI Junchuan^{1,*}, XIA Hongquan², SANG Yu³, ZENG Bo¹,
WU Jian⁴, SONG Yi¹, HUANG Haoyong¹, XU Ersi¹

(1. Research Institute of Shale Gas, PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company, Chengdu 610051, China;

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

3. Petro China Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610051, China;

4. Shunan Gas Field of Petro China Southwest Oil & Gasfield Company, Luzhou 646000, China)

Abstract: Fracture pressure is one of the key parameters in drilling engineering, completion engineering and hydraulic fracturing technology. Using logging data to calculate continuous formation fracture pressure is the most commonly used method, but the effect of formation anisotropy is usually ignored by the conventional method. To this end, the formation is considered as the transversely isotropic medium, and the Young's modulus and Poisson's ratio in the vertical and horizontal directions are obtained by calculating the elastic stiffness matrix. By considering the relationship between vertical stress and horizontal strain, a novel formula is derived to calculate the formation fracture pressure based on the relationship between depth and strain. Finally, this novel formation fracture pressure formula is optimally programmed and applied to the calculation of the formation fracture pressure in Block L. The comparison between the field measurement results of formation fracture pressure and the logging prediction results shows that the measured formation fracture pressure of hydraulic fracturing at 4,266m in Well L1 is 90.5MPa, while the fracture pressure calculated by the traditional method is 93.5MPa (with a relative error of 5.4% compared with the measured results), and the fracture pressure calculated by the transversely isotropic method is 95.4MPa (with a relative error of 3.3% compared with the measured results). The accuracy of the formation fracture pressure calculated by the new method is better than that of the formation fracture pressure calculated by the traditional method, which is applicable and comparable.

Keywords: Drilling engineering; hydraulic fracturing; fracture pressure; transversely isotropy; logging data; stiffness matrix

DOI: 10.48014/cpngr.20220801001

Citation: GUI Junchuan, XIA Hongquan, SANG Yu, et al. Fracture pressure calculation method in transversely isotropic formation by logging[J]. Chinese Petroleum and Natural Gas Research, 2022, 1(2): 15-22.

Copyright © 2022 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

