

层理性页岩力学参数对水力压裂 裂缝形态的影响分析

胡光

(中石化江汉石油工程有限公司页岩气开采技术服务公司,湖北武汉433100)

摘要:岩石力学性质及地应力等地质力学参数是进行储层压裂改造的基础数据,影响着整个压裂设计的准确性。由于页岩层理发育及矿物组成的复杂性、页岩力学性质的横观各向同性,所以基于传统力学模型获取的压裂参数设计将丧失意义。以横观各向同性模型体现层理发育页岩储层的力学性质,通过简化的横纵弹性模量和泊松比可以较好地表达出页岩的横观各向同性,并总结了横观各向同性地应力解释方法。基于上述理论,应用商业化水力压裂数模软件对四川盆地某层理页岩储层进行了压裂设计,比较横观各向同性模型与传统模型解释力学参数差异,非常规储层动静力学参数转换,同时通过改变射孔位置研究了起裂点对裂缝形态的影响。研究发现,横观各向同性解释的杨氏模量、地应力要略高于传统方法,同时横观各向同性解释的地层地应力差较小,所以受不同射孔位置的变化对裂缝几何的形态影响要远远高于各向同性模型模拟的结果,特别是缝高变化更为明显。同时数据表明,在高应力区射孔将形成更为狭窄缝宽的水力裂缝,这会严重影响后续支撑剂的进入,以上结论将为提高页岩储层的压裂设计精确性给予重要帮助。

关键词:页岩储层;横观各向同性;力学参数;裂缝;水力压裂

中图分类号:TE32;TE24 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)02-0097-07

Influences of anisotropic mechanical properties in the hydraulic fracturing design in shale reservoirs

HU Guang

(Shale Gas Development Technical Service Company, SSC Jianghan, Wuhan Hubei 433100, China)

Abstract: Rock properties and in-situ stress can provide basic information for stimulated reservoir volume, and they affect fracture propagation evidently. Since shale has well developed lamination, the conventional methods with sonic velocity data, without considering special shale anisotropy, always express apparent error. A transverse isotropic model was presented to illustrate the unique rock properties of shale and a novel stress calculation method was investigated. The differences in rock mechanical parameters between isotropic model and anisotropic model were analyzed, and conversion of dynamic and static mechanical parameters was also presented. It was found the young's modulus and the stress were greater than those from the conventional methods. The influence of initiation pressure from the anisotropic model was more obvious than that from the isotropic model. Fracturing simulation was performed with fracturing optimization software for shale formation in Jiaoshiba, Fuling. Numerical results show the fracture width is impacted noticeably and the anisotropy model underestimates the fracture height growth, which can provide technology support for in-situ fracturing treatment.

Key words: shale reservoir; anisotropy; mechanical parameter; fracture; hydraulic fracturing

收稿日期:2021-04-28; **修回日期:**2021-09-11 **DOI:**10.12143/j.ztgc.2022.02.013

作者简介:胡光,男,汉族,1986年生,副经理,高级工程师,石油工程专业,长期从事非常规油气储层改造方面的研究工作,湖北省武汉市东湖新技术开发区高新大道807号,huguang.osjh@sinopec.com。

引用格式:胡光.层理性页岩力学参数对水力压裂裂缝形态的影响分析[J].钻探工程,2022,49(2):97-103.

HU Guang. Influences of anisotropic mechanical properties in the hydraulic fracturing design in shale reservoirs[J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):97-103.

0 引言

页岩气是一种位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中、以吸附或游离状态聚集的天然气,因为页岩基质的纳达西超低渗透特点,一般无自然产能,只有通过体积压裂技术对页岩储层进行大规模改造才能实现商业性油气流^[1-3]。页岩岩石力学参数作为储层压力改造设计的关键参数,其准确性直接影响着压裂设计的结果。通常,通过室内岩石力学实验,现场小型压裂测试或者测井资料解释等手段可以获得高分辨率的岩石力学参数,其中因为基于测井资料的岩石力学参数解释方法可以形成连续性解释剖面,并且实用性较强,所以广泛应用于现场。

与常规地层岩石物理性质不同的是,页岩储层由于含有大量的粘土矿物,并同时因长期的压实作用逐渐形成了层理状的沉积结构,使得页岩层常常具有层理发育的明显特性,因此,页岩在杨氏模量、泊松比等关键力学参数方面表现出较为明显的横观各向同性,该情况尤其是在粘土含量较高或者有机质含量较高的页岩层中更为突出。Wang等^[4]分析了美国鹰潭页岩的动静态力学参数差异,认为沿层理和垂直层理2个方向上力学性质形成差异较大,其中平行层理的杨氏模量要高于垂直层理的杨氏模量,而泊松比则具有相反的趋势。衡帅等^[5]开展了层理性页岩的水力裂缝扩展规律研究,比较了不同条件的断裂韧性横观各向同性,以及层理面开裂和断裂偏移路径的差异性。杜梦萍等^[6]研究了层理性页岩在巴西劈裂条件下的声发射响应,并利用数字散斑技术对裂缝的纹萌生、扩展和贯通全过程的变形场进行了实时跟踪,发现除90°试件产生竖向主裂缝为张拉破坏外,随加载方向与层理面夹角的增加,各加载角度试件的主破裂模式从张拉剪切破坏逐渐过渡为剪切滑移破坏。马霄一等^[7]通过超声波方法研究了不同层理角度的力学参数变化,发现平行于层理方向的页岩弹性模量随着孔隙度的增高而变大,垂直于层理方向的弹性模量随着孔隙度的增高而减小。贾庆升等^[8]则通过力学试样计算分析了岩心的泊松比、弹性模量和强度参数,比较了在不同层理角度上的脆性指数。研究发现:随着围压升高,各力学参数的横观各向同性度都呈下降趋势,且弹性参数较强度参数的横观各向同性对围压变化更为敏感。过往研究表明,有些地区的垂直与水平弹性模量的比值高达3.5,高横观各向同性的存在使得这些

地区的页岩储层在储层改造中面临着异常的破裂压力,以及非平面裂缝起裂和扩展延伸问题^[9-11]。为此,只有通过将页岩视为横观各向同性介质,以沿层理发育方向的横向力学参数和层理法向的纵向力学参数进行综合表征,才能较好地地表征层理性页岩的力学特征。

基于上述分析和讨论,本文总结了适用于层理性页岩储层的岩石力学参数计算方法,比较了基于横观各向同性模型和传统模型力学参数解释差异,并通过数值模拟的方法研究了地应力等压裂参数解释结果对裂缝几何形状的影响,并分析了可能导致的潜在压裂施工问题。研究成果可对层理性页岩的压裂优化设计提供相关参考依据。

1 考虑横观各向同性的压裂设计参数计算方法

1.1 横观各向同性本构模型

储层的沉积历史、压实过程、存在的胶结等复杂物理和化学过程综合作用被认为是导致页岩层理发育、表现出横观各向同性的主要原因。储层横观各向同性本质为岩石微观结构上的层理发育,通过室内SEM分析及矿场露头等信息观察可知,页岩层在各个尺度上都表现出层理的发育和较为明显的横观各向同性^[12-14]。由于页岩气储层常常采用大规模水平井分段体积压裂,所以解释的横向力学剖面将会对分析裂缝的起裂有着重要影响,也对优化裂缝形态与储层的接触体积十分重要。为了减少横观各向同性带来的解释误差,提出了TI(Transverse Isotropic)介质的概念,如图1所示,根据层理方向,忽略不太明显的水平横观各向同性,一般只考虑垂向方向的横观各向同性影响。学者Sayers等基于胡克定律,推导了基于各向同性介质的声波速度和弹性模量的关系表达式^[10]:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} - \alpha P_p \quad (1)$$

式中: C_{ijkl} ——弹性刚度系数; ϵ_{kl} ——二阶应变张量; P_p ——孔隙压力,MPa。

考虑对称性简化的刚度张量为:

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: C_{11} ——水平方向的压缩波波速; C_{33} ——垂直方向的压缩波波速; C_{44} ——垂直剪切波波速; C_{66} ——水平剪切波波速。

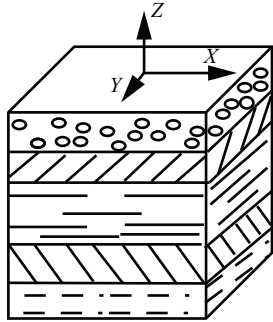


图1 横观各向同性岩石示意
Fig.1 Transversely isotropic rock

每个 C_{ii} 是体密度和表观速度的平方。对于各向同性模型而言,一般常规双极声波测井就可以解释层段的力学参数。但对于横向各向介质,则需要垂直和水平2个方向的声波资料,目前一些高级的测井工具可以通过单级斯通利波结果转换为裸眼条件下直井的水平剪切声波时差,水平横波时差则可以通过下式进行计算^[15]:

$$C_{11} = C_{33} + 2(C_{66} - C_{44}) \quad (3)$$

通过定义 Tomnson 伽马参数 γ 可以估计 TI 介质横观各向同性的程度^[12]:

$$\gamma = \frac{C_{66} - C_{44}}{C_{44}} \quad (4)$$

从式(4)可看出,水平剪切波波速 C_{66} 越大,垂直剪切波波速 C_{44} 越小,地层的横观各向同性越明显。

1.2 动静态转换关系模型

动态泊松比和静态泊松比一般相差较小,所以一般并不转换成静态,直接用动态进行代替。但动态、静态杨氏模量之间有着明显的界限,无论是在高应力或者低应力加载状态下,动态模量都要大于静态弹性模量,所以不进行动静态转换将会对描述地层性质、计算地应力等有很大的影响。

关于页岩等沉积岩动静态转换关系的模型很多,然而回归关系的精确性则往往局限于所取资料的区域。一般多用线性关系法和幂律关系法,分别如式(5)和(6)所示^[16-17]:

$$\log E_s = \log(\rho E_d) - 0.55 \quad (5)$$

$$E_s = 0.1832E_d^{1.5795} \quad (6)$$

式中: E_s 、 E_d ——静态和动态杨氏模量,MPa。

通过室内大量的实测数据发现,储层含水饱和度的高低对动态杨氏模量影响较大,但是对于静态弹性模量的影响较小。

1.3 最小水平主应力计算方法

水平地应力是控制裂缝高度的重要因素,在压裂设计中扮演着极为重要的角色。通常来讲,横观各向同性并不会影响上覆岩层压力的大小与方向,所以经典基于密度资料的传统方法仍适用于页岩储层。对于水平应力而言,目前多应用 Amadei 提出修正的系数 K_0 来表示横观各向同性力学特征对地应力的影响^[18-22]:

$$K_0 = \frac{E_h}{E_v} \frac{\nu_v}{1 - \nu_h} \quad (7)$$

所以,最小水平应力的计算表达式为:

$$\sigma_h = \frac{E_h}{E_v} \frac{\nu_v}{1 - \nu_h} [\sigma_v - \alpha P_p] + \alpha P_p + \sigma_T \quad (8)$$

式中: α ——毕奥特系数,无量纲; ν_h 、 ν_v ——垂直和水平泊松比,无量纲; E_h 、 E_v ——垂直和水平杨氏模量,MPa; σ ——二阶应力张量。

根据式(8)可以看出, E_h/E_v 增加会导致水平应力的增加,而忽略横观各向同性会导致较小的估测最小水平应力

在进行最小水平主应力计算时,很多时候并没有考虑构造应力、岩石线弹性和热变量的影响。因此,Blanton等提出一种综合系数校正方法来计算的最小水平主应力^[23-25]:

$$\sigma_h = c_1 \epsilon_T + c_2 \quad (9)$$

参数 c_1 与 c_2 的具体表达式为:

$$c_1 = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (10)$$

$$c_2 = \frac{\nu \sigma_v + (1 - 2\nu) \alpha P_p + E \alpha_T \Delta T}{1 - \nu} \quad (11)$$

式中: E ——地层杨氏模量,Pa; ν ——泊松比; ΔT ——井底某深度和地面的温度差,K。

其中构造应变的大小需要通过目的层进行相关测试来获取,热扩展系数 ϵ_T 在岩石拉伸时取负值,而压缩时取正值。通常, α_T 的取值和岩性密切相关,对于砂岩来说, α_T 一般为 $5.56 \times 10^{-6}/F$,页岩为 $5.00 \times 10^{-6}/F$,而碳酸盐大约为 $4.44 \times 10^{-6}/F$ 。对于 ΔT 而言,则可以通过地区地热梯度和井底温度进行反推。

2 力学参数对页岩压裂改造影响分析

2.1 岩石力学和地应力解释结果分析

以四川盆地某页岩气探井为例,分析各向同性和横观各向同性解释力学参数差异对水力压裂改造结果的影响。该储层主要为黑色硅质及碳质泥页岩,有机质丰度高(平均有机质含量在3.1%左右),总厚度75 m左右,而净页岩厚度在30 m左右,热成熟程度适中,该页岩储层天然裂缝一定程度发育,通过密度测井发现孔隙度为4.28%~11.20%,渗透率在1 mD左右,岩石呈现比较明显的层理性。该探井具体的压裂施工程序如表1所示,其中,采用滑溜水作为主要的压裂液,根据前期储层地质甜点分类,分别选择层位1(1458~1459.5 m)、层位2(1468~1469.5 m)、层位3(1478~1479.5 m)等3个层位进行射孔改造,比较射孔层位变化对裂缝形态的影响。

通过现场收集岩心,开展动静态力学实验,并结合测井数据分析获得各向同性模型条件下的力学参数解释结果,而横观各向同性弹性模量和泊松比等参数主要通过岩心波速分析获得,结果如图2所示,从实验结果看,地层的横观各向同性弹性模量要略高于垂直弹性模量,对于泊松比而言,2种模型解释的结果相差不大。考虑页岩层理力学特征后,采用横观各向同性系数计算的最小水平主应力要略高于常规方法计算的最小水平主应力,在计算过程中将整个地层视为常压地层,比奥特系数为1,忽略水平和垂直应变对地应力的影响。另外从解释结果看,各向同性模型预测的各层之间的应力差异较大,而各向同性模型预测的储层应力差异较小。图3为2种回归方法的动静态杨氏模量转换关系图,可以发现幂律性回归方法的结果和实际结果较为符合。

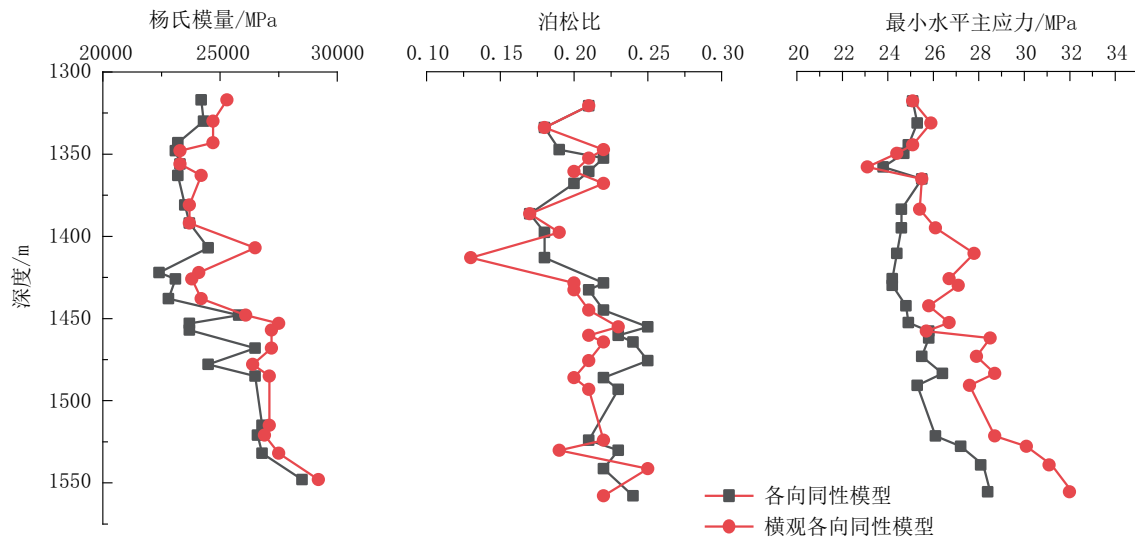


图2 基于各向同性及横观各向同性模型的力学参数和地应力解释结果

Fig.2 Mechanical properties and in-situ stress profile based on the isotropic and transversely isotropic mechanical models

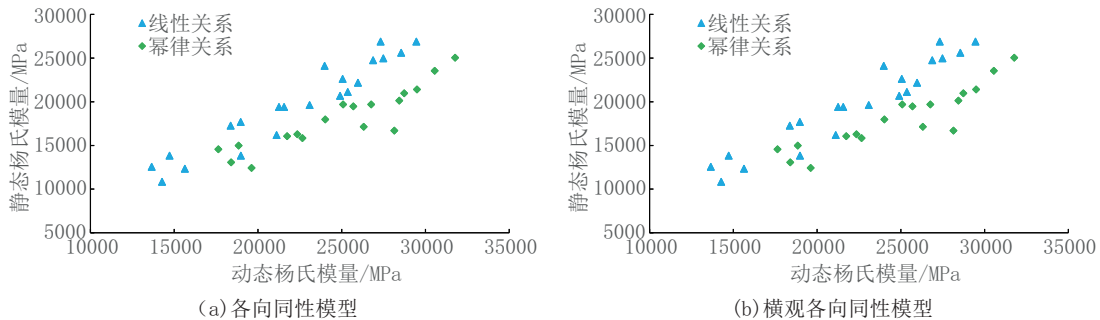


图3 各向同性模型与横观各向同性模型的杨氏模量动静态转换关系

Fig.3 Relationship between static and dynamic Young's modulus with the isotropic and transversely isotropic mechanical models

页岩压裂施工基础数据为:前置液注入量 50 m³,施工时间 32 min,压裂液总液量 450 m³,平均泵入速率 10 m³/min,支撑剂总量 19.9 t,平均滤失系数 0.001 m/min^{0.5}。

2.2 射孔位置改变对层理页岩储层水力压裂改造影响分析

通过水力压裂商业压裂软件 Stimplan 开展层理性页岩压裂数值模拟,该软件可以具有压裂设计,压裂分析和优化的全部功能,由于基于有限元技术进行压裂扩展数值求解,因此模拟结果较传统基于拟三维模型的压裂数值模拟结果更为准确。

采用各向同性和横观各向同性模型进行岩石力学和地应力参数解释后,分别改变射孔层位,获得了压裂裂缝形态的数值模拟结果,如图 4、图 5 所示。

结合裂缝形态结果,可以发现,各向同性模型下模拟的裂缝缝高受到了较大限制。而利用横观各向

同性模型计算地应力结果,模拟出的裂缝则穿层明显,所以横观各向同性模型计算出的缝高结果要大于常规方法预测的结果,主要原因是因为产层和遮挡层之间的应力差所造成,同时解释的弹性模量结果也对最后模拟的裂缝形态起到了重要作用。合理的缝高设计能提高射孔的有效性,提高页岩储层的压裂效率。另外,从缝宽结果看,横观各向同性模型下模拟出的裂缝缝宽要小于常规各向同性模型下模拟的计算结果,主要是因为采取横观各向同性计算的弹性模量要大于常规模型的结果,而缝宽的大小将直接影响着支撑剂的注入和运移问题,不匹配的支撑剂粒径会导致早期在近井口出现砂堵现象,产生异常的高净压力,甚至致使整个压裂施工失败。同时,裂缝宽度还直接和裂缝的导流能力相关,所以对产量的影响将十分明显。

进一步分析可以发现,在改变射孔位置后,对各

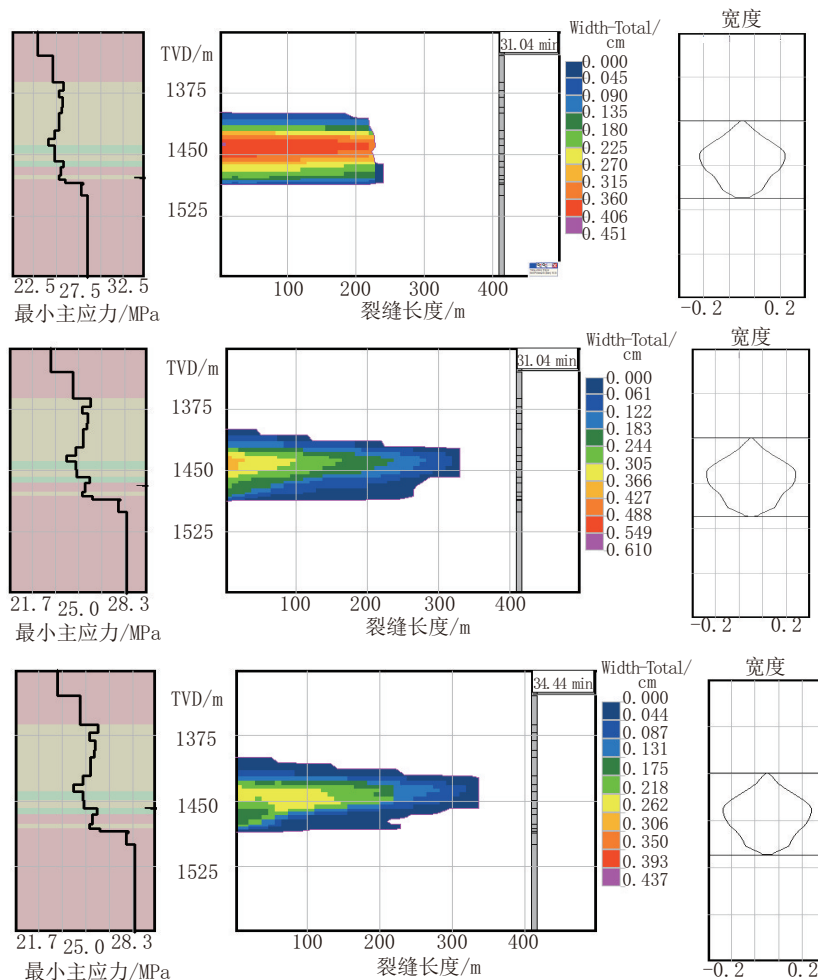


图 4 基于各向同性模型解释数据的裂缝几何形态模拟结果

Fig.4 Fracture geometry based on the isotropic mechanical model

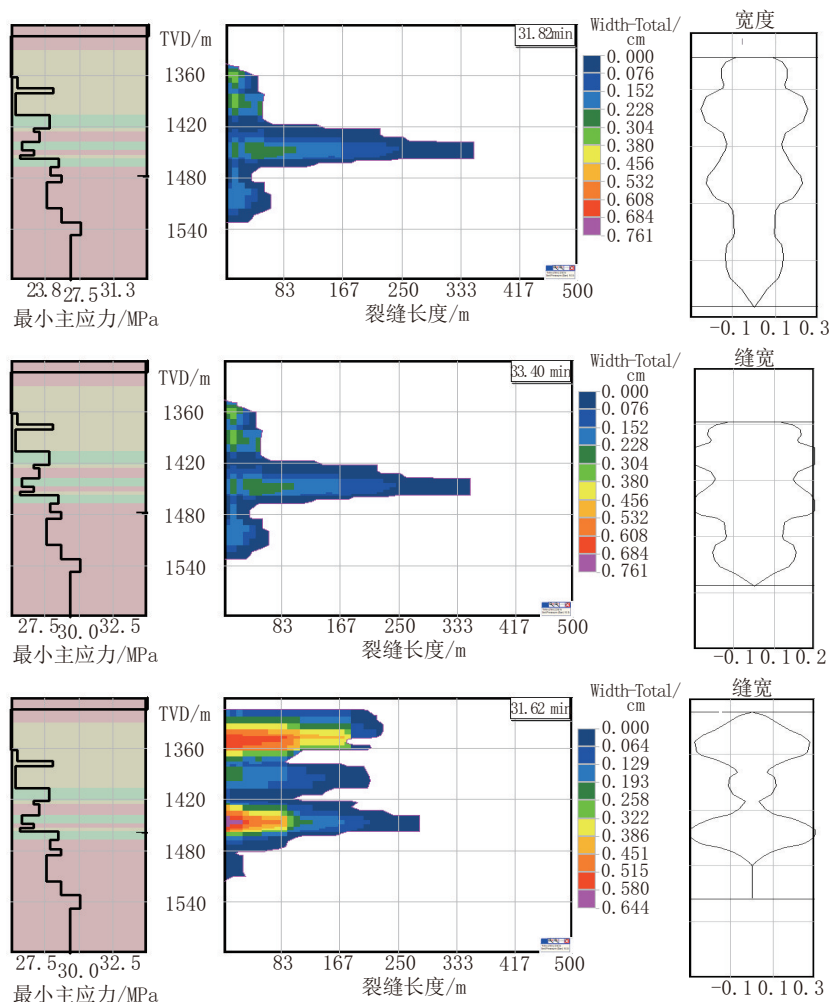


图5 基于横观各向同性模型解释数据的裂缝几何形态模拟结果

Fig.5 Fracture geometry based on the transversely isotropic mechanical model

向同性模型的模拟结果影响较小,而对横观各向同性模型的影响更为明显。同时,可以发现在应力相对较高的区域进行射孔,起裂会造成近井筒周围形成较为狭窄型的水力裂缝,这会造成严重的支撑剂输送问题,并且从这些区间起裂还有可能产生明显的近井筒压降,同时引起较高的压裂施工压力,增加压裂失败的风险。对于页岩储层来说,粘土含量与弹性模量之间有较为密切的联系,高粘土含量的页岩层常常具有较高的水平最小主应力,但该地层一般具有较低的水平杨氏模量,所以高应力地层会存在支撑剂嵌入问题。

3 结论与认识

(1)由于多数页岩储层都表现出较强的层理性发育特征,因此在进行压裂设计过程中忽略力学横

观各向同性对压裂设计参数的影响将导致较大的误差,传统基于各向同性的压裂参数计算方法在层理性页岩储层力学计算中有时难以获得理想的计算结果。通过进一步研究发现,基于横观各向同性解释的力学参数相较各向同性模型解释的力学参数更高,同时幂律性动静态力学参数回归模型在回归中可以获取更好的计算结果。

(2)对于层理性页岩压裂裂缝扩展而言,因为地层沿水平井井筒的横向射孔位置不同会造成不同的裂缝高度,其主要原因是地层岩石力学和地应力性质造成各层裂缝起裂压力的不同所造成。页岩储层中裂缝的垂向延伸不仅与层间最小水平主应力差相关,产隔层岩石力学性质差异也同样十分重要。页岩储层内高强度层理一般会对裂缝缝高发育产生钝化影响。由于横观各向同性解释的应力值较高,模拟的缝

宽结果相对较小,因此在页岩储层的高应力区域进行射孔会造成狭窄型的水力裂缝,加大砂堵风险。

(3)考虑页岩储层中天然裂缝的发育,利用横观各向同性岩石力学和地应力解释模型则可以获取层理性页岩的准确力学参数,但是过多参数的获取有时也会潜在造成计算结果的不确定性。对于复杂的层理性页岩结果,只有通过室内岩心实验和高级测井技术融合,才可以达到定义小尺度页岩储层结构、力学和应力特征的目的,这对选择和优化最佳层理性页岩射孔段,指导压裂设计优化等具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 唐颖,张金川,张琴,等.页岩气井水力压裂技术及其应用分析.天然气工业,2010,30(10):33-38.
TANG Ying, ZHANG Jinchuan, ZHANG Qin, et al. An analysis of hydraulic fracturing technology in shale gas wells and its application[J]. Natural Gas Industry, 2010,30(10):33-38.
- [2] 翁定为,雷群,胥云,等.缝网压裂技术及其现场应用.石油学报,2011,32(2):280-284.
WENG Dingwei, LEI Qun, XU Yun, et al. Network fracturing technology and its application in the field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(2):280-284.
- [3] 宋景远,姚谋,景文平,等.环江油田巴19区块长7段钙夹层评价与大斜度井分段压裂优化[J].钻探工程,2021,48(10):29-35.
SONG Jingyuan, YAO Mou, JING Wenping, et al. Calcic interbed evaluation and multi-stage frac optimization for high deviation wells in Chang-7 reservoir, Ba-19 Block of Huanjiang Oilfield[J]. Drilling Engineering, 2021,48(10):29-35.
- [4] Yang Wang, Dehua Han, Luanxiao Zhao, et al. An experimental investigation of the anisotropic dynamic and static properties of eagle ford shales[C]. URTEC, 2019:304.
- [5] 衡帅,杨春和,郭印同,等.层理对页岩水力裂缝扩展的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(2):228-237.
HENG Shuai, YANG Chunhe, GUO Yintong, et al. Influence of bedding planes on hydraulic fracture propagation in shale formations[J]. Rock Mechanics and Engineering, 2015,34(2):228-237.
- [6] 杜梦萍,潘鹏志,纪维伟,等.炭质页岩巴西劈裂载荷下破坏过程的时空特征研究[J].岩土力学,2016,37(12):3437-3446.
DU Mengping, PAN Pengzhi, JI Weiwei, et al. Time-space laws of failure process of carbonaceous shale in Brazilian split test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016,37(12):3437-3446.
- [7] 马霄一,李呈呈,白俊,等.基于超声测试的页岩岩石物理特征分析[J].石油地球物理勘探,2021,56(4):801-808.
MA Xiaoyi, LI Chengcheng, BAI Jun, et al. Analysis of shale petrophysical characteristics based on ultrasonic testing[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021,56(4):801-808.
- [8] 贾庆升,钟安海,张子麟,等.济阳坳陷泥灰质纹层页岩脆性横观各向同性数值模拟研究[J].石油钻探技术,2021,49(4):78-84.
JIA Qingsheng, ZHONG Anhai, ZHANG Zilin, et al. Numerical simulation of the brittleness anisotropy of lam innated argillaceous limestone facies shale in the Jiyang depression[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021,49(4):79-84.
- [9] Safdar Khan, Sajjad Ansari, Hongxue Han, et al. Importance of shale anisotropy in estimating in-situ stresses and wellbore stability analysis in Horn River Basin[J]. SPE, 2011:149433.
- [10] C.Deenadayalu, R.Suarez-Rivera. The effect of horizontal completions on the breakdown pressures of anisotropic gas shales [C]//44th U.S. Rock Mechanics Symposium and 5th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium. Salt Lake City, Utah: 2010.
- [11] Franquet J. A., Rodriguez E. F. Orthotropic horizontal stress characterization from logging and core derived acoustic anisotropies [C]//46th U. S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. Chicago, Illinois: 2012.
- [12] R. D. Barree, J. V. Gilbert, M. W. Conway. Stress and rock property profiling for unconventional reservoir stimulation [J]. SPE, 2009:118703.
- [13] S. D. Larkin, E. K. Brown, L. W. Bazan. Stimulation design and post fracture production analysis: a tight gas sand case history [J]. SPE, 2002:74361.
- [14] Lisa Song, Geir Hareland. Minimum horizontal stress profile from logging data for montney formation of North East British Columbia [J]. SPE, 2012,162233.
- [15] Sayers C. M. Seismic anisotropy of shales [J]. Geophysical Prospecting, 2005,53:35-49.
- [16] Higgins S., Goodwin S., Donald A., et al. Anisotropic stress models improve completion design in the baxter shale [C]//Paper SPE 115736 Presented at the 2008 SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver, Colorado:2008: 21-24.
- [17] Thomsen, L. Weak Elastic Anisotropy. Geophysics 51:1954-1966.1986.
- [18] George A. Waters, Richard E. Lewis, Doug C. Bentley. The effect of mechanical properties anisotropy in the generation of hydraulic fractures in organic shales [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver, Colorado, USA.
- [19] Eissa E. A., Kazi, A. Relation Between Static and Dynamic Young's moduli of rocks [J]. J. Rock Mech., Min. Sci. & Geomech., 1988,25(6):479-482.
- [20] Amadei B. Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., 1996,33(3):293-325.
- [21] Amadei B., Savage W. Z., Swolfs H. S. Gravitational stresses in anisotropic rock masses [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., 1987,24:5-14.
- [22] T. L. Blanton, J. E. Olson. Stress magnitudes from logs: Effects of tectonic strains and temperature [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, SPE54653.
- [23] Olson J. E. Predicting fracture swarms-the influence of subcritical crack growth and the crack-tip process zone on joint spacing in rock [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2004,231:73-88.
- [24] Meyer B. R., Bazan L. W. A discrete fracture network model for hydraulically induced fractures-theory, parametric and case studies [J]. SPE, 2011,140514.
- [25] X. Weng, Kresse O., Cohen C., et al. Modeling of hydraulic-fracture-network Propagation in a Naturally Fractured Formation [J]. SPE, 2011,140253.

(编辑 李艺)