

储层裂缝表征及预测研究进展

唐 诚

中石化西南石油工程有限公司地质录井分公司,四川绵阳 621000

摘要 全面、准确对致密储层的裂缝网络进行定量表征及预测影响着裂缝性油气田的高效开发。在系统调研国内外裂缝研究成果且详细对比分析的基础上,从地质分析、测井识别、构造曲率法及应力场模拟、地震裂缝检测、非线性理论方法等着手,总结出了储层裂缝表征及预测研究的进展。研究表明,根据成因将储层裂缝划分为构造裂缝和非构造裂缝两大类,构造缝包括区域性裂缝、局部构造缝和复合型构造缝,局部构造缝指与断层和褶皱相关的裂缝;非构造缝主要分为收缩缝和与表面有关的裂缝两大类及9个亚类,裂缝类型不同,其特征及成因机理也不同。采用地质分析与测井解释相结合,建立露头、岩心与测井的识别模式对裂缝进行准确识别。利用地质、测井和构造应力等资料,建立数学模型,对裂缝参数进行定量计算。详细阐述并分析了多种裂缝预测方法的优缺点,最终指明了储层裂缝研究的不足与发展方向。

关键词 裂缝性储层;裂缝表征;裂缝识别;裂缝预测

中图分类号 P618.13

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.21.013

Progress in Fracture Characterization and Prediction

TANG Cheng

Geologic Logging Company of Southwest Petroleum Bureau, Sinopec, Mianyang 621000, Sichuan Prvovince, China

Abstract It is very important for exploration and development of oil and gas to comprehensively and accurately and quantitatively describe and predict fracture. Base on the basis of the literature investigation of fractures research findings around the world, from geological analysis, log fracture identification, curvature method, tectonic stress simulation, seismic fracture prediction and so on, the progress of fracture characterization and prediction are summarized. It is shown that the reservoir fractures can be classified into two types, including structural and non-structural fracture according to their origin. The structural fracture includes regional fracture, local fracture and complex structural fracture, in which the local structural fracture is related to fracture of fault and fold. The non-structural fracture can be classified into contraction fracture and related fracture of surface, which have 12 sub-types. Every type of fractures has different characteristics and origin. The main identification of fracture is combination of geological analysis and log interpretation, and then pattern recognition of outcrop, core and well logging will be established. Also quantitative calculation method for fracture is proposed using geological, logging and tectonic stress data. With the aid of those bases, the advantage and disadvantage of methods for detection and prediction of the fracture distribution are discussed. Finally the shortcoming and development of fracture research are pointed out.

Keywords fractured reservoir; fracture characterization; fracture identification; fracture prediction

0 引言

裂缝性油气藏是近年油气勘探开发的重点,如何对裂缝进行准确表征,对不同类型裂缝的识别、分布规律的预测以及如何建立更加贴近实际的裂缝性油气藏地质模型,一直以来都是研究的重点和难点^[1,2]。为此,国内外学者做了很多努力,最早的研究方法是通过露头、岩心、薄片等地质分析来对裂缝特征进行描述,如 Van Golf-Racht^[3]在薄片观察的基础

上,提出了裂缝孔隙度、渗透率以及体密度的计算方法,Ruhland 提出裂缝强度等概念^[4]。随测井技术的发展,利用常规测井数据分析,总结出了一系列数学统计方法:神经网络法、多元统计、灰色关联等,罗贞耀、戴俊生等^[5,6]提出了裂缝物性参数计算方法。在裂缝预测方面,主要有数值模拟、非线性理论预测等方法,包括构造曲率法、构造应力场数值模拟、二维、三维有限元数值模拟、物探方法等^[7]。本文通过系统总结分析

收稿日期:2013-01-28;修回日期:2013-03-18

作者简介:唐诚,工程师,研究方向为石油地质录井与信息技术研究,电子邮箱:110880280@qq.com

近年来裂缝研究的进展与不足,为今后裂缝研究指明方向。

1 裂缝表征

1.1 裂缝的类型及分类

失去结合力的岩石发生破裂形成裂缝,广义上断层也是一种裂缝,狭义上将裂缝定义为沉积岩中的节理,地质上裂纹、裂隙也归为裂缝。裂缝的分类,主要利用裂缝的产状、充填、尺寸、以及成因等进行分类,以成因分类为主^[89]。由于构造运动的多期性与复杂性、地质作用及环境的差异性,裂缝成因机制极其复杂。外界地质因素是产生裂缝最直接的原因,主要包括:构造运动所产生的构造应力作用、重力滑脱作用、火成岩侵入作用、差异压实作用、上覆地层的侵蚀卸载作用、岩相变化作用、底劈及刺穿作用等^[90]。与此相对应,形成了多种多样的裂缝,如构造缝、重力破裂缝、风化裂缝、差异压实缝、收缩缝等,以构造缝对油气藏作用最大,也是研究的重点,分类也最为细致^[11]。按照成因,将裂缝分为构造缝、收缩缝和与表面作用有关的裂缝。构造缝包括区域性裂缝、局部构造裂缝以及复合型裂缝。局部构造缝是指与断层和褶皱伴生、派生的裂缝,复合型裂缝包括重张裂缝和追踪张裂缝。收缩缝分为:干燥裂缝、脱水裂缝、矿物相变裂缝、热收缩裂缝、岩浆烘烤裂缝。与表面有关的裂缝包括:重力破裂缝、卸载裂缝、风化裂缝、差异压实裂缝。

1.2 裂缝地质分析

(1) 岩心、薄片分析法。

岩心、薄片分析是最基础的也是最能反映井下裂缝的方法,测井、地震等都要以此为基础,岩心、薄片实际观察内容差距不大,都是对裂缝的一些基本参数进行统计分析,如裂缝长度、宽度、倾角、充填程度等,不同的是岩心观察宏观裂缝,薄片分析微观裂缝。在观察过程中,如果岩心是定向取心或者利用古地磁定向,还可确定裂缝产状^[12]。在岩心观察过程中,应该注意岩心的归位以及判断天然裂缝和后期裂缝,取心少,资料不足,不能全面反映全井段以及工区的裂缝基本

发育情况是其最大的缺点,其次裂缝发育段岩心破碎严重,取心困难,同时还存在岩心定向等问题^[13]。

(2) 野外露头调查法。

地面露头和深部岩体裂缝具有相似性,如果目标区露头情况不好或者未出露,可以选择相似露头区进行观察。通过野外露头调查,可以分析裂缝产状及延伸长度,确定裂缝的成因类型及主控因素,统计裂缝的基本参数,与岩心观察和构造演化对比分析,可以建立裂缝的成因机制。

1.3 裂缝测井识别

(1) 常规测井识别。

常规测井识别裂缝被认为是一种经济有效的方法。常规测井主要包括深、浅侧向电阻率测井、密度测井、补偿密度测井、中子测井、声波测井、伽马测井、井径测井等,裂缝的常规测井特征大致为:深浅侧向电阻率出现差异,差异越大,裂缝越发育;高角度缝声波值差异较小,低角度裂缝声波值差异较大;密度补偿曲线出现相应高值;中子孔隙度变大;伽马测井反应不明显;井径曲线增大^[14]。对于不同地区,不同层位,需要综合考虑各种常规测井信息,通过建立交会图,还可以进行定量识别,从而对未取心井段进行定性乃至定量识别。例如利用双侧向测井,通过建立平板状、火柴棍、方体等导电模型可对裂缝进行定量识别。

(2) 成像测井识别。

成像测井能更加直观的反映井下地质情况,如裂缝、层理、缝合线、溶蚀孔洞等,还能反映钻井过程的地质特征。利用成像测井识别裂缝,首先必须对真假裂缝进行识别,建立起成像测井裂缝识别模式。

层理表现为一组平行或近平行的均匀高电导异常(图1(a));天然裂缝为可断续的相互对称曲线,呈180°左右(图1(b));缝合线在成像图上表现为两条变化幅度较大的正弦线;应力释放缝出现两组羽状排列的电导率异常,两侧出现垂直于层理的高电导异常,大小不规则,形态各异,方向性差(图1(c));机械破碎缝非常微小,径向延伸很短;压裂缝近于

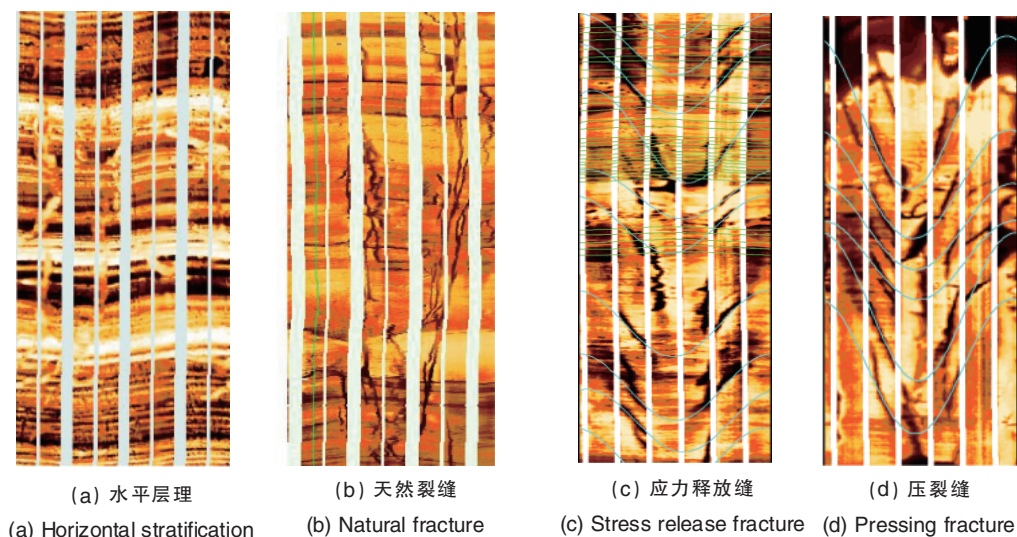


图1 裂缝 FMI 成像测井特征

Fig. 1 FMI feature of fracture

直立,是重泥浆作用导致井壁压裂而成(图 1(d))。此外成像测井还可识别裂缝产状,裂缝的倾角为正弦曲线的幅度 h 与井径 d 的比值,正弦波最低点或者最高点所对应的方向即为裂缝倾向^[15](图 2)。成像测井数据可提供大量有价值的裂缝参数的信息,其精度和分辨率都很高,在进行裂缝预测时,往

往是最好的资料。但是其成本过高,不可能实现每口井、全井段测定。

因此,在利用测井资料识别裂缝时,应当将岩心、薄片观察和成像资料刻画常规测井,建立常规测井识别模式,结合测井交会图,对裂缝进行高效识别。

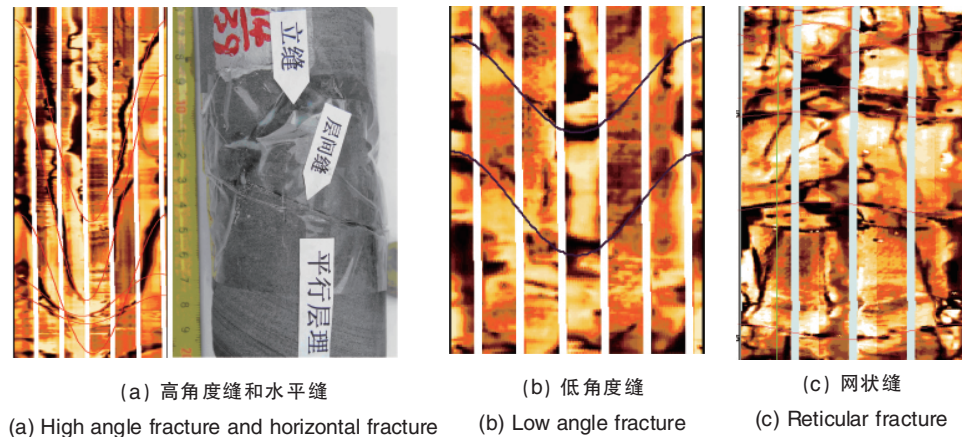


图 2 FMI 成像测井图像裂缝产状特征

Fig. 2 FMI imaging of fracture occurrence

1.4 裂缝参数的定量计算

定性识别裂缝不能满足勘探开发的需求,对裂缝参数的定量计算国内外学者进行了较多的探索,大致有以下一些计算方法^[12,9]。

(1) 基于岩心、薄片观察的裂缝参数计算方法。

裂缝密度一直被认为是最重要的定量表征裂缝发育程度的参数,在岩心上,分别从线、面、体对裂缝密度分析。线密度表示裂缝条数与岩心长度的比值,面密度表示累计裂缝长度与所观测岩心裂缝面积的比值,体积密度表示裂缝总表面积与岩心总体积的比值。岩心裂缝密度可采用分形方法计算。在薄片上,采用面积法统计计算裂缝面密度。

利用岩心观测结果统计所得到的裂缝宽度、裂缝间距等参数资料可计算裂缝的孔隙度和渗透率。微观裂缝孔隙度采用薄片面积法计算,表示为微裂缝面积与薄片总面积的比值。微观裂缝渗透率一般采用 Cmexoba 等提出的计算方法^[16]。

(2) 基于测井资料的裂缝参数计算。

井壁成像测井不仅仅可定性评价裂缝,还可以定量评价裂缝参数,如视裂缝长度、密度、宽度、孔隙度。成像测井探测深度较浅且存在井眼扩大、含其他导电矿物等因素影响,所以将计算参数称为视参数^[17]。视裂缝长度为单位面积井壁上裂缝长度的和,视裂缝密度为单位长度井壁上的裂缝条数,视裂缝宽度一般依据 Luthi 等^[18]所得研究成果。视孔隙度为单位面积井壁上裂缝累计面积。

研究表明,利用双侧向测井可有效地计算裂缝宽度、孔隙度、渗透率等参数,按倾角将裂缝定义为水平缝($<30^\circ$)、斜交缝($30^\circ\sim 75^\circ$)、直立缝($>75^\circ$),目前较为普遍采用季宗镇等根据深、浅电阻率数值建立的计算模型^[19],分别计算不同倾角

裂缝宽度。根据 Philippe 等建立的算法,计算裂缝孔隙度。最后将裂缝渗透率 K_f 表示为

$$K_f = 4.16 \times 10^{-3} \zeta^2 \Phi_f$$

式中, ζ 为裂缝开度, μm ; Φ_f 为裂缝孔隙度,%。

(3) 基于构造应力的裂缝参数计算。

地应力是形成裂缝的根本原因,仅利用构造应力场模拟结合库伦-莫尔与格里菲斯准则对裂缝发育程度进行定性或半定量预测,满足不了油气田开发的需求。对裂缝开度、密度、孔隙度、渗透率的计算是双孔双渗裂缝性油气藏地质建模的基础。季宗镇、戴俊生等^[19,20]定义了应力作用下的裂缝空间分布状态,基于岩石力学及断裂力学,建立了三向挤压应力状态的裂缝参数定量计算模型。基本原理为岩石在应力作用下发生应力变形,若应变能释放率与所产生的单位面积裂缝表面能密度相当,岩层发生断裂变形,在此过程中,可认为断裂发生释放的应变能等于新增裂缝的表面能量。因此,提出了在三向挤压应力状态下裂缝参数计算模型。

2 裂缝预测方法

2.1 曲率法和构造应力场模拟法

多年来,构造曲率分析预测裂缝取得很大进展,但曲率法只能预测受力脆性岩层发生抗张应力而形成的张裂缝,且不考虑岩层的塑性变形,发展至今,最主要的是主曲率法及高斯曲率法。曲率表示为圆半径的倒数,曲率值的大小与裂缝发育程度成正比,首先需要采用多项式对趋势面进行拟合,以求剔除因测量误差造成的异常,拟合后得到曲面表达式,然后选用差分方法计算微分,得到每个数据点的两个曲率值。高斯曲率表示的是某点的最大、最小曲率的乘积,高斯

曲率与主曲率的最大区别在于高斯曲率可以定量反映构造面局部构造形态及细小变化^[21,22]。

构造应力场数值模拟预测裂缝技术是在分析油气区构造形变的基础上,建立模拟的地质模型,将地质模型转变为数学模型,加入相适应的边界条件等参数进行应力场计算,根据其结果不断调整模拟方案,使模型逐渐逼近原型,利用最接近实际构造分布规律的地质模型所模拟的结果,认识油气区构造应力场,进而从构造应力场的角度去深入研究油气区的构造现象;根据局部构造应力场的强度、性质、方位等,去预测构造裂缝的发育区带,再结合岩石力学性质、钻井及测井资料,局部构造特征等综合分析研究区块内的裂缝分布规律^[23,24]。

2.2 地震裂缝预测

裂缝具有多尺度性和各向异性,目前主要采用横波、纵波及转换波之间的参数变化来预测裂缝。核心技术为裂缝等效介质模型、纵波各向异性及横波分裂现象。在此基础上,发展出多种裂缝检测技术,如纵波各向异性、转换波以及叠后地震处理检测裂缝。伴随地震采集、处理技术的进步,利用多分量转换波和纵波方位各向异性预测裂缝发展迅速,已经成为目前地震预测最为普遍的方法,同时在常规三维叠后技术上发展而来的地震属性分析技术也成果显著^[25]。

(1) 叠后地震属性分析。

目前,基于三维地震数据,已经通过提取振幅、频率、相位数据对裂缝发育带进行预测,但不能准确预测裂缝方位、尺度等,因此,国内外学者提出了曲率分析、地震相干及频谱分解等裂缝预测技术^[25,26]。曲率分析从几何地震的角度出发,认为曲率为反射曲面沿着方向矢量的法截面所截曲线的二阶导数,目前主要朝多尺度曲率分析、构造倾角滤波及三维曲率体计算方向发展;相干技术已发展到第3代,连续地层对应高相干系数,反之,相干系数较低,倾角/方位角叠合相干分析应用最为普遍;频谱分解包含短时傅里叶变换、小波变换等算法。地震反射的不连续性对应地质体的多尺度性,根据不同频率数据体,利用纵横向上的频谱差值、比值、下降率预测裂缝发育带。

(2) 纵波方位各向异性裂缝预测。

纵波各向异性检测裂缝较横波有很大优势,不仅可以识别裂缝密度、方位、尺度等问题,还可识别裂缝的充填性,地震频率的衰减速度与裂缝密度大小为正相关关系,振幅随偏移距的变化(Amplitude Versus Offset, AVO)较小梯度方向为裂缝走向,最大方向为裂缝法线方向^[27]。

(3) 多分量转换波裂缝预测。

转换波具有横、纵波的诸多优点,同时还具有信息更多,信噪比更高,探测深度更大等特点,Ata、Grechka等^[28,29]在这方面做了很多工作,在处理多分量数据时,最为关键的一步,首先需要用最小熵旋转法、全局寻优法、正交基旋转等方法判断纵横波分离是否完全,利用转换波预测裂缝包括相对时差梯度法与层剥离法^[25]。相对时差梯度法计算裂缝方位及密度,步骤如下:①分时窗,扫描裂缝发育方向;②将径向、横

向分量的数据体旋转至裂缝方位上,以提取快波、慢波数据体;③计算快、慢波时差,计算时差梯度,检测裂缝密度。层剥离法,顾名思义为沿层位检测:①沿研究层顶面计算裂缝方位、密度;②旋转分析、时间补偿,去除上覆岩层各向异性;③沿研究层底面分析裂缝方位、密度。

2.3 利用非线性理论方法检测和识别地下裂缝

(1) 分形方法预测裂缝。

分形几何学由Mandelbrot于1975年提出,用于描述大小混乱、规则不一但具有自相似性结构的复杂现象。裂缝被证实区域上具有自相似性,因此,可利用分形方法预测裂缝,其基本原理是物体数目与测量尺度间存在幂律规则,而这种特点用分维数 D 表示。自20世纪90年代以来,王自明、侯贵廷等^[30,31]都曾利用分形方法对断裂、裂缝进行识别和预测。在实际计算中有相似维数、网格覆盖法与关联维数3种方法,其中网格覆盖法应用最为广泛,根据地震精确解释的构造图,选取不同边长的方格覆盖,计算分维值,认为分维值越大,裂缝越发育。此外,杜小武等^[32]还利用分形插值方法对井间裂缝进行预测,其理论依据为分数布朗运动和地质统计学方法。测井方面,利用声波时差资料进行变尺度 R (分维数)/ S (分形数)分析,确定 $R(n)/S(n)$ 曲线的斜率 H ,最终确定分维数 $D=2-H$ 。

(2) 反向传播神经网络预测裂缝。

人工神经网络方法在数据分类方法应用最为广泛,而人工神经网络方法中又以反向传播(Back Propagation, BP)神经网络应用最为广泛^[33]。它是一个多层前向神经网络,包括输入、输出层及多个隐含层。数据由输入层传至隐含层,经过传递函数处理,在传至输出层,得到计算结果。BP神经网络的优势在于,拟合数据能更准确的包含大部分属性点的范围。更密切拟合数据时,低值区会出现不稳定。此外还有一种概率神经网络,其原理是数学插值方法;更紧密拟合数据时,低值区会出现不稳定。

(3) 灰关联理论预测裂缝。

灰关联分析是建立未知模式与标准模式的相似性从而评价其间的相关关系。因此,通过建立裂缝已知因素(测井、地震、评价标准等参数)与未知参数裂缝发育程度的灰色系统,利用多参数裂缝评价模型求得灰关联度来识别和预测裂缝^[34]。主要包括以下步骤:①建立裂缝特征分类评价标准模式;②建立储层裂缝特征分类评价待识别评价模式;③求取待识别储层数列与标准模式灰色关联系数,确定灰色多元加权系数;④求取待识别储层与标准模式间灰关联度,最后得到评价结果。具体而言,将取心井段裂缝观察参数与该段成像测井、常规测井进行刻度,提取出典型井段曲线数值作为标准模式指标体系,然后将数据标准化,从而开展灰关联分析识别和预测裂缝研究。

3 发展趋势及不足之处

(1) 泥页岩裂缝研究将受重视。鉴于国内外泥页岩裂缝

性油气藏的大量发现,特别是以北美为代表的页岩气勘探开发的巨大成功,泥页岩裂缝研究越来越受到重视^[35]。近年来泥页岩裂缝研究在理论、技术都取得了较大进展,同砂岩和碳酸盐岩裂缝研究一致,泥页岩裂缝研究主要包括裂缝成因、分类、发育特征以及定性到定量识别与预测等^[36,37]。泥页岩裂缝也可分为构造缝和非构造缝,但泥页岩塑性较其他岩性强,表现为韧性破裂,高角度剪切缝和张扭缝主要发育于层间,低角度滑脱缝发育于层面,特别是与砂岩接触区;非构造缝成因与其他岩性基本一致。泥页岩裂缝的识别方法主要有岩石学法、地质法、测井、钻井、录井法、地震法、井间压力干扰试井法等。国内外学者建立的地球物理模型和数学模型,目前已在泥页岩研究中得到较好应用。对泥页岩裂缝的研究,最终还需落实到对裂缝分布规律的预测,目前可采用地质分析法、异常孔隙流体压力法、地震属性与地震能量吸收分析法以及构造应力场模拟等。同时,以往对泥页岩裂缝研究较少,起步晚,目前也还有很多问题,今后一段时间将致力于宏观与微观裂缝研究相结合,对裂缝主控因素进行量化研究,建立裂缝评价的标准参数体系。此外,对于依赖于裂缝发育的泥页岩储层,需要更加重视对裂缝储集性能与渗流特性的研究。

(2) 机制研究的物理仿真模拟。裂缝的成因问题虽一直以来是裂缝研究的重点,但致缝成因仍有较多观点,特别是对于非构造成因的裂缝,一直以来研究不系统,地位越来越重要。采用物理模拟被认为是很好的方法,包括相似材料模拟、光弹模拟,通过进行岩石力学实验,结合构造演化,根据实际条件分析确定不同的地质力学边界,选取不同的材料(砂、黏土、橡皮泥等),对裂缝的产生进行物理模拟,认识裂缝的成因机制。光弹模拟是在光照射下受力材料发生弹性变形产生规则的干涉条纹而反映应力情况,再结合应力应变关系,可建立裂缝成因模式。

(3) 断层有关裂缝定量描述。与断层和褶皱有关的裂缝一直以来都是裂缝研究的热点,目前常规背斜构造油气藏已越来越少,与断裂、裂缝相关的油气藏成为勘探开发的重点,开展断层伴生与派生相关的裂缝定量描述很有必要。普遍认为,断层共生裂缝与断层距离呈反比趋势,裂缝密度是岩性、埋深、断层类型等的函数,断层上盘裂缝较下盘发育,断层末端、外凸及交汇处等应力集中区裂缝发育,2012年李小刚等^[38]通过建立断层相关裂缝空间和断面脱空空间的置换模型,推导出断层裂缝空间的定量计算公式,提出断层裂缝的定量描述方法。但总体来说,对断层相关裂缝定量描述思路欠缺,建立完善的量化评价模型将是今后的发展趋势。

(4) 多方法裂缝定量评价技术。裂缝发育程度的定量评价至今没有一个统一的标准,而影响裂缝发育的因素多,各因素间关系复杂,因此裂缝定量评价标准的制定还有较大的难度。对裂缝参数的计算以及裂缝分布规律的预测,目前已有多种数学及物理方法,仍没有一种完善的方法能准确描述裂缝基本情况,且各种方法在不同地区、不同层位裂缝计算

中精确度不一,在不断提高裂缝认识准确度的同时,最大限度地运用地质、物探、油藏工程等不同专业的综合信息,紧密结合动态、静态资料,不断提高裂缝预测精度,使裂缝研究趋向量化发展。

(5) 裂缝形成后的成岩后生改造问题。地质历史时期形成的裂缝可能因充填而闭合,或是被溶蚀而扩大,所以在裂缝有效性方面的预测还有很大难度。

参考文献 (References)

- [1] 童亨茂. 储层裂缝描述与预测研究进展 [J]. 新疆石油学院学报, 2004, 16(2): 9-13.
Tong Hengmao. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2004, 16(2): 9-13.
- [2] 苏培东, 秦启荣, 黄润秋. 储层裂缝预测研究现状与展望[J]. 西南石油大学学报, 2005, 27(5): 14-18.
Su Peidong, Qin Qirong, Huang Runqiu. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2005, 27(5): 14-18.
- [3] Van Golf-Racht T D. Fundamentals of fractured reservoir engineering [M]. New York: Elsevier Scientific, 1982.
- [4] Fossen H, Gabrielsen R H. Experimental modeling of extensional fault systems by use of plaster [J]. Journal of Structural Geology, 1996, 18(5): 673-687.
- [5] 罗贞耀. 用侧向资料计算裂缝张开度的初步研究 [J]. 地球物理测井, 1990, 14(2): 83-92.
Luo Zhenyao. Well Logging Technology, 1990, 14(2): 83-92.
- [6] 戴俊生, 汪必峰. 综合方法识别和预测储层裂缝 [J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(1): 1-2, 8.
Dai Junsheng, Wang Bifeng. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10(1): 1-2, 8.
- [7] 宋永东, 戴俊生. 储层构造裂缝预测研究[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(6): 9-13.
Song Yongdong, Dai Junsheng. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(6): 9-13.
- [8] 张鹏, 侯贵廷, 潘文庆, 等. 新疆柯坪地区碳酸盐岩对构造裂缝发育的影响[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(5): 831-836.
Zhang Peng, Hou Guiting, Pan Wenqing, et al. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(5): 831-836.
- [9] 曾联波, 李跃纲, 张贵斌, 等. 川西南部上三叠统须二段低渗透砂岩储层裂缝分布的控制因素[J]. 中国地质, 2007, 34(4): 622-627.
Zeng Lianbo, Li Yuegang, Zhang Guibin, et al. Geology in China, 2007, 34(4): 622-627.
- [10] 郭璇, 钟建华, 徐小林, 等. 非构造裂缝的发育特征及成因机制[J]. 中国石油大学学报, 2004, 28(2): 6-11.
Guo Xuan, Zhong Jianhua, Xu Xiaolin, et al. Journal of China University of Petroleum, China, 2004, 28(2): 6-11.
- [11] 秦启荣, 苏培东. 构造裂缝类型划分与预测[J]. 天然气工业, 2006, 26(10): 33-36.
Qin Qirong, Su Peidong. Natural Gas Industry, 2006, 26(10): 33-36.
- [12] 曾联波, 李忠兴, 史成恩, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 174-179.
Zeng Lianbo, Li Zhongxing, Shi Cheng'en, et al. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 174-179.
- [13] 刘宁. 岩心裂缝图像分析技术及应用 [J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(5): 17-19.
Liu Ning. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(5): 17-19.

- 17-19.
- [14] Li X Y, Dai H C, Mancini F. Converted-wave imaging in anisotropic media: An overview[C]. 2004 SEG Annual Meeting, Denver, Colorado, October 10-15, 2004.
- [15] 赵俊峰, 纪友亮, 陈汉林, 等. 电成像测井在东濮凹陷裂缝性砂岩储层评价中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(3): 383-390.
Zhao Junfeng, Ji Youliang, Chen Hanlin, et al. Oil & Gas Geology, 2008, 29(3): 383-390.
- [16] Bergosh J L, Lord G D. New developments in the analysis of cores from naturally fractured reservoirs[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, US, September 27-30, 1987.
- [17] Hicks T W, Pine R J, Richards J W, et al. A hydro-thermo-mechanical numerical model for HDR geothermal reservoir evaluation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, 1996, 33(5): 499-511.
- [18] Luthi S M, Souhaite P. Fracture apertures from electrical borehole scans [J]. Geophysics, 1990, 55(3): 821-833.
- [19] 季宗镇, 戴俊生, 汪必峰. 地应力与构造裂缝参数间的定量关系[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 68-72.
Ji Zongzhen, Dai Junsheng, Wang Bifeng. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 68-72.
- [20] 季宗镇, 戴俊生, 汪必峰, 等. 构造裂缝多参数定量计算模型[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(1): 24-28.
Ji Zongzhen, Dai Junsheng, Wang Bifeng, et al. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2010, 34(1): 24-28.
- [21] Ozkaya S I. QUADRO—A program to estimate principal curvatures of folds[J]. Computers and Geosciences, 2002, 28(4): 467-472.
- [22] Murray G H. Quantitative fracture study, spanish poll, McKenzie County, North Dakota[J]. American Association of Petroleum Geologists, 1968, 52(1): 57-65.
- [23] 沈国华. 有限元数值模拟方法在构造裂缝预测中的应用[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(4): 24-26, 29.
Shen Guohua. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(4): 24-26, 29.
- [24] Dai J S, Meng Z P. Numerical simulation of Palaeozoic tectonic stress field in the Chengdao area [J]. Scientia Geologica Sinica, 1999, 8(2): 223-232.
- [25] 刘振峰, 曲寿利, 孙建国, 等. 地震裂缝预测技术研究进展[J]. 石油物探, 2012, 51(2): 191-198.
Liu Zhenfeng, Qu Shouli, Sun Jianguo, et al. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51(2): 191-198.
- [26] Chen Q, Sidney S. Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring [J]. The Leading Edge, 1997, 16(5): 445-448.
- [27] 毕研斌, 龙胜祥, 郭彤楼, 等. 地震方位各向异性技术在 TNB 地区嘉二段储层裂缝检测中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(2): 190-195.
Bi Yanbin, Long Shengxiang, Guo Tonglou, et al. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(2): 190-195.
- [28] Ata E, Michelena R J. Mapping distribution of fractures in a reservoir with P-S converted waves[J]. The Leading Edge, 1995, 14(6): 664-676.
- [29] Grechka V, Kachanov M. Seismic characterization of multiple fracture sets: Dose orthotropy suffice?[J]. Geophysics, 2006, 71(3): D93-D105.
- [30] 王自明, 宋文杰, 戴勇, 等. 利用分形模拟建立裂缝型碳酸盐岩储层渗透率变异函数[J]. 天然气工业, 2007, 27(11): 73-75.
Wang Ziming, Song Wenjie, Dai Yong, et al. Natural Gas Industry, 2007, 27(11): 73-75.
- [31] 侯贵廷. 裂缝的分形分析方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 1994(2): 301-306.
Hou Guiting. Journal of Basic Science and Engineering, 1994 (2): 301-306.
- [32] 杜小武, 尚海燕. 分形插值方法在地层裂缝预测中的应用[J]. 西安电子科技大学学报, 1998, 25(2): 174-176.
Du Xiaowu, Shang Haiyan. Journal of Xidian University, 1998, 25(2): 174-176.
- [33] 宫清华, 黄光庆. 基于人工神经网络的滑坡稳定性预测评价[J]. 灾害学, 2009, 24(3): 61-65.
Gong Qinghua, Huang Guangqing. Journal of Catastrophology, 2009, 24(3): 61-65.
- [34] 李琼, 李正文, 魏野. 同铁构造嘉陵江组储层裂缝非线性预测与分析研究[J]. 矿物岩石, 2004, 24(2): 78-81.
Li Qiong, Li Zhengwen, Wei Ye. Journal of Mineralogy and Petrology, 2004, 24(2): 78-81.
- [35] Warlick D. Gas shale and CBM development in North America [J]. Oiland Gas Financial Journal, 2006, 3(11): 1-5.
- [36] Bowker K A. Basettshale gasproduction, FortWorth Basin: Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [37] 丁文龙, 许长春, 久凯, 等. 泥页岩裂缝研究进展 [J]. 地球科学进展, 2011, 26(2): 135-144.
Ding Wenlong, Xu Changchun, Jiu Kai, et al. Advances in Earth Science, 2011, 26(2): 135-144.
- [38] 李小刚, 徐国强, 韩剑发, 等. 断层裂缝定量描述技术在塔中 X 井区良里塔格组裂缝研究中的应用[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(2): 344-352.
Li Xiaogang, Xu Guoqiang, Han Jianfa, et al. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(2): 344-352.

(责任编辑 刘志远)



《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。