

低渗透储层裂缝研究进展

王珂¹, 张荣虎¹, 戴俊生², 邰志鹏³, 田福春⁴

(1. 中国石油杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023; 2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 3. 中国石油塔里木油田公司塔北勘探开发项目经理部, 新疆 库尔勒 841000; 4. 中国石油大港油田公司石油工程研究院, 天津 300280)

摘要: 储层裂缝对改善致密砂岩和碳酸盐岩等低渗透储层以及致密砾岩、火成岩、泥页岩等非常规低渗透储层的物性具有重要作用。通过总结近年来储层裂缝的相关研究进展, 对储层裂缝的多种识别和预测方法进行了分析, 并讨论了储层裂缝研究的几个关键问题。结果表明: 储层裂缝的识别技术是点(岩芯、薄片)、线(测井)、面(相似地表露头区)、体(地震资料)和时间(生产动态资料)组成的多维综合体系; 储层裂缝的定性预测主要是根据裂缝与构造部位和岩性之间的关系进行, 定量预测方法包括井间直接插值法、曲率法、能量法与岩石破裂法(二元法)、地震法、分形分维法、构造应力场数值模拟法和多参数判据法等, 每种预测方法各有其优势与不足, 因此, 需要综合多种方法才能实现储层裂缝的有效预测; 储层裂缝研究的关键问题包括裂缝分布预测与精细表征、裂缝动态参数和裂缝三维地质建模等方面。最后, 在油气田勘探开发中进行储层裂缝预测及建模等工作时, 应以明确储层裂缝的成因、演化及主控因素为基础。

关键词: 低渗透储层; 裂缝识别; 定性预测; 定量预测; 关键问题; 动态参数; 地质建模

中图分类号: P618.130.2⁺1; TE122.2 **文献标志码:** A

Review on Low-permeability Reservoir Fracture

WANG Ke¹, ZHANG Rong-hu¹, DAI Jun-sheng², HUAN Zhi-peng³, TIAN Fu-chun⁴

(1. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 2. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China; 3. Tabei Exploration and Development Project, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, Xinjiang, China; 4. Petroleum Engineering Research Institute, Dagang Oilfield Company, PetroChina, Tianjin 300280, China)

Abstract: Reservoir fractures have a significant effect on improving the physical property of tight sandstone reservoir, carbonate rock reservoir and unconventional low-permeability reservoir such as tight conglomerate rocks, igneous rocks and shale rocks. The researches on reservoir fracture were summarized, several methods of recognition and prediction on reservoir fracture were analyzed, and several key questions in reservoir fracture research were discussed. The results show that the recognition technology of reservoir fracture is a multi-division synthetic system composed with point (core and slices), line (logging), surface (similar surface outcrops), volume (seismic data) and time (dynamic production data); the qualitative prediction of reservoir fracture is mainly based on the relationship between fracture and structural location, lithology; the quantitative prediction methods contain inter-well direct interpolation, curvature, energy and rock failure (two-factor method), seismic, fractal dimension, tectonic stress field numerical

收稿日期: 2014-11-25

基金项目: 国家科技重大专项项目(2011ZX05015-002, 2011ZX05046-003)

作者简介: 王珂(1987-), 男, 山东郓城人, 工程师, 理学博士, E-mail: wangk_hz@petrochina.com.cn。

simulation and multi-parameter criterion, etc.; each prediction method of reservoir fracture has its own advantage and disadvantage, thus the combination of multiple methods can realize the efficient prediction of reservoir fracture; the key questions of reservoir fracture research contain the fracture distribution prediction and elaborate characterization, fracture dynamic parameters and fracture 3D geological modeling. Finally, reservoir fracture prediction and modeling should be based on confirming the genesis, evolution and primary controlling factors of reservoir fracture in exploration and development of hydrocarbon fields.

Key words: low-permeability reservoir; fracture recognition; qualitative prediction; quantitative prediction; key question; dynamic parameter; geologic modeling

0 引言

多年来的油气勘探实践表明,裂缝性油气藏是中国含油气盆地中一种重要的油气藏类型。这类油气藏的探明地质储量已经超过 40×10^8 t, 超过目前探明油气资源总量的 1/3; 另据有关专家预测, 在中国超过 130×10^8 t 的剩余油气资源量中, 约有 60% 的油气资源量分布与储层裂缝有关^[1]。因此, 裂缝性油气藏的勘探开发在中国石油工业中的地位越来越重要。如何有效地勘探, 合理地动用与高效地开发这些裂缝性油气藏, 对中国石油工业的持续稳定发展以及增强中国能源安全供应的保障能力, 确保国家安全与经济协调、持续快速发展具有长远的战略意义^[1]。储层裂缝研究已有近百年的历史。以 CMexov、Van Golf-Racht、Nelson、Laubach、Olson、曾联波、宋惠珍、袁士义、刘建中、穆龙新、戴俊生、周新桂以及侯贵廷等为代表的学者曾发表了大量的论文, 并出版了一系列专著, 为储层裂缝研究奠定了良好的理论基础^[2-28]。由于储层裂缝的复杂性以及人类认识水平和技术水平的限制, 在很长一段时间内对储层裂缝的研究一直以定性描述或半定量分析为主; 近年来, 随着认识水平的提高与计算机模拟技术的发展, 储层裂缝空间分布特征的定量分析以及储层裂缝地质建模逐渐成为该领域的研究热点, 离散化裂缝网格模型以及近几年逐步发展起来的复合裂缝模型即为其典型代表^[29]。目前, 对储层裂缝的研究多集中于低渗透的致密砂岩和碳酸盐岩储层^[30-32], 随着非常规油气藏的勘探开发, 致密砾岩类、火成岩类、泥页岩类储层的裂缝研究也越来越受到重视^[33-51]。本文对现有储层裂缝研究方法进行归纳总结, 分析各种方法的优缺点, 并讨论储层裂缝研究的几个关键问题, 从而为储层裂缝的相关研究提供参考。

1 储层裂缝的识别

1.1 岩芯裂缝观察

岩芯裂缝观察是识别地下储层裂缝最直接的方法^[4]。通过岩芯裂缝的观察与统计, 可以获得裂缝的产状、密度、张开度、充填程度等参数, 是含油气盆地勘探开发中进行储层裂缝相关研究的原始数据库, 也是检验储层裂缝预测方法所得结果是否合理的标准之一^[52-53]。目前, 岩芯裂缝观察通常采用肉眼直接观察, 其优点是成本低且效率高, 但往往受到取芯长度、岩芯完整性以及人的主观因素和识别精度的影响, 而且肉眼直接观察只能观察到岩芯表面的裂缝, 对于裂缝在岩芯内部的延伸情况无法观察到。近年来, 很多学者开始尝试利用工业 CT (计算机层析成像) 扫描技术识别岩芯裂缝^[54]。这种技术的优点是可以在不破坏岩芯的情况下, 将岩芯横截面进行分段扫描, 从而直观地观察裂缝在岩芯内部的延伸情况, 并且可以将扫描截面重新组合, 进行岩芯的三维重构, 同时对岩芯裂缝的定量参数进行计算。这种方法弥补了肉眼观察岩芯的不足, 提高了岩芯的利用价值, 是岩芯裂缝分析的发展方向。工业 CT 扫描技术已在塔里木盆地大北气田和克深 2 气田等地区得到了初步应用^[55-56], 但就目前来讲, 由于工业 CT 扫描技术试验费用高, 试验周期长以及评价体系尚不完善等, 在国内还没有得到十分广泛的应用。

1.2 薄片裂缝分析

薄片裂缝分析的对象是储层微观裂缝, 包括粒内缝、粒缘缝和穿粒缝等 3 种类型^[57]。微观裂缝对于改善低渗透储层岩石物性具有重要作用, 而且从裂缝演化的角度来看, 微观裂缝很可能是宏观裂缝的雏形, 因此, 根据自相似性原理, 研究微观裂缝的分布对认识宏观裂缝的分布规律也有重要的参考价值, 有必要对储层微观裂缝的发育情况进行分析^[1]。

储层微观裂缝的张开度一般在微米级(通常小于 50 μm),肉眼及测井手段均难以识别,因此,需要借助岩石薄片在显微镜下进行分析,一般采用普通薄片或铸体薄片,其中铸体薄片显示微观裂缝更加直观,观察更为方便。薄片微观裂缝的观察与描述对于认识含油气区储层裂缝的发育规律有非常明显的不足:一方面受制于岩石薄片以及其中裂缝的数量,数量太少则不具有统计意义,难以准确反映储层裂缝的实际发育特征;另一方面,岩石薄片的尺寸非常有限,由此统计得出的储层裂缝参数与实际情况往往误差较大,只能用作定性或半定量分析,因此,薄片微观裂缝的描述统计与分析常作为认识某一地区储层裂缝发育特征的辅助手段。

1.3 测井资料裂缝识别

测井资料是识别储层裂缝的一种重要方法,可分为常规测井和成像测井两大类。对储层裂缝响应较为敏感的常规测井系列包括电阻率、声波速度、自然伽马、自然电位、密度、中子、井径及地层倾角测井等。利用常规测井系列识别裂缝的方法有单一测井特征参数法、多种测井参数综合概率法、人工神经网络法和灰色理论法等,其共同点是根据研究区的大量资料进行统计,提取对储层裂缝较为敏感的特征参数,从而建立储层裂缝与常规测井之间的响应关系模式,进一步对新区块或新井段的储层裂缝发育特征进行解释^[1]。采用常规测井系列识别裂缝成本相对较低,应用也较方便,但难度较大,需要从测井信息中提取可以反映裂缝的微弱信号,而且对于不同地区,对储层裂缝敏感的特征参数不尽相同,储层裂缝与测井资料之间的匹配模式也不尽一致,因此,常规测井方法往往只能定性地评价储层裂缝发育程度,很难准确有效地对储层裂缝的定量参数进行计算。

井壁成像测井是利用声波束或电流束对井壁进行扫描,从而得到井壁展开的图像。前者称为声成像测井,主要包括井下声波电视测井(BHTV)、DSI偶极声波成像和井周声波测井(CBIL);后者称为电成像测井,主要包括微电阻率扫描测井(FMS)和全井眼地层微电阻率成像(FMI),其中较为常用的是全井眼地层微电阻率成像。成像测井资料可以提供单井在垂向上连续的储层裂缝发育剖面,通过岩芯裂缝刻度,可以对全井段的裂缝发育情况进行解释,并定量计算出不同层段裂缝的线密度、长度、张开度、孔隙度等参数^[58]。储层裂缝在成像测井图上通常表现为正弦曲线,其中开启缝表现为暗色的正弦曲线,低阻充填缝表现为不连续的暗色正弦曲线,高

阻充填缝表现为亮色正弦曲线。需要注意的是,天然裂缝、沉积界面和诱导裂缝等都会在成像测井图上有所反映,因此,在定量计算天然裂缝参数时要将沉积界面和诱导裂缝剔除^[4]。成像测井识别裂缝的缺点是易受测井分辨率的影响。一些规模较小的小裂缝和微裂缝无法识别或识别不清,而且往往受到地层分界面的干扰,导致某些井点(如靠近断层大量发育网状缝的井)的裂缝参数解释结果有较大误差;此外,钻井时若采用油基泥浆也会干扰成像测井资料的精度。因此,如何进一步提高成像测井资料分辨率以及排除泥浆因素的干扰,是利用成像测井识别裂缝的主要研究方向。

1.4 相似地表露头区裂缝识别

相似地表露头区是全面了解天然裂缝在平面上的展布特征以及不同组系裂缝之间相互关系最直观的场所^[59-61]。通过对相似地表露头区裂缝的观察分析,不仅可以研究裂缝的产状和规模、裂缝成因类型及其形成环境、不同组系裂缝的分布特征及其相互关系、裂缝形成期次及其与构造应力场之间的关系,而且可以研究裂缝不同参数之间的相互关系,总结控制裂缝形成与分布的主要地质因素^[1,62]。对于出露地表的岩层,可以肉眼直接观察测量,而对于地表浅层(深度小于 10 m)的岩层,则需借助探地雷达(或称地质雷达)进行观测^[63-64]。

通过野外地表露头区的裂缝研究,可以根据力学类型和走向特征对裂缝进行分组,分析裂缝与背斜、断层等构造之间的关系^[65-66],从而建立露头区裂缝分布的地质模型及裂缝参数信息库;并通过地表露头与油气田地下储层地质条件的相似性分析和类比,建立油气田地下储层裂缝分布的概念模型;然后,再结合油气田岩芯和测井等方法所获取的单井裂缝资料以及实际地质条件,通过相似类比性分析,指导对油气田目的层储层裂缝发育规律及其分布模式的认识,以弥补油气田岩芯和测井等井点研究的不足^[1]。这种方法的缺点在于:地面地质条件与实际地层条件往往差别很大,由此统计出的裂缝特征难以由点到面、由浅到深地定量应用到地下油气储层。

1.5 地震裂缝识别

储层裂缝发育带会引起地震波的动力学特征(振幅、能量、吸收衰减、频率等)和运动学特征(走时、速度、时差等)发生变化。通过检测地震波的这些变化,便可以对储层裂缝发育带进行识别。目前,储层裂缝的地震识别技术包括横波分裂技术、三维

三分量技术、纵波 AVO 技术、叠前 AVAz 技术、VV Az 技术、VSP(垂直地震剖面)技术以及相干体技术等^[67-68]。

地震资料识别裂缝的优势在于覆盖面积广且探测深度大,但很容易受到地震分辨率的影响。例如,在塔里木盆地克拉苏构造带的克拉—克深地区主要含气层位之上覆盖有 1 000~2 000 m 的巨厚膏盐层,导致地震资料品质变差,同相轴反射杂乱,无法应用于地下储层裂缝的识别。另一方面,地震资料的多解性也是制约地震资料识别储层裂缝精度的重要因素。因此,裂缝性储层的复杂性和特殊性决定了采用地震资料识别裂缝仍然是一个有待深入解决的难题,需要在地震响应机理和识别方法等方面不断探索^[1]。

1.6 生产动态资料裂缝识别

当油气藏中发育储层裂缝时,便会在钻井和开发过程中有所体现。油气田的生产动态资料包括泥浆漏失、井壁崩落、压裂施工、试油试井和钻时钻具等资料^[16]。泥浆在储层裂缝发育层段往往发生漏失,漏失量越高,表明裂缝可能越发育,但要注意区分裂缝性漏失和非裂缝性漏失,以免产生错误判断;裂缝的存在使储层岩石稳定性变差,在钻井中便会发生井壁崩落或垮塌,井壁崩落或垮塌的方向通常与裂缝走向一致;在进行压裂施工作业的地层若发育有大量裂缝,那么在压裂施工曲线上便不会出现典型的破裂压力点,而只出现扩展压力点;裂缝发育层段的试井曲线上会出现明显的双重介质特征,在试井中可通过流体流动特征反映出来,因此,根据试井曲线可以对储层裂缝进行定性和定量识别,以评价储层裂缝在油气藏开发中的作用;在钻井过程中钻遇储层裂缝发育带时,往往出现钻进加快和钻具放空等现象,从而可根据钻时钻具信息对裂缝进行识别。此外,识别裂缝的生产动态资料法还包括气测录井、固井质量、试油试采、示踪剂分析、注水动态分析和压力分析等方法^[52]。

1.7 小结

综上所述,储层裂缝的识别技术是由点(岩芯观察、薄片分析)、线(测井资料解释)、面(相似地表露头区)、体(地震资料)和时间(生产动态资料)组成的多维综合体系。岩芯和薄片的裂缝分析是基础,测井资料解释可以提供单井剖面上的裂缝特征,相似地表露头区反映了裂缝的平面展布,地震资料可以识别裂缝在三维空间的发育规律,生产动态资料则反映了裂缝渗流性能随时间的变化情况。

2 储层裂缝的预测

2.1 定性预测

储层裂缝预测的定性方法主要是根据储层裂缝的发育程度与构造部位和岩性之间的关系进行预测。储层裂缝往往在断层带两侧、断层端部、断层交会处、断层产状发生改变的局部构造区域、构造隆起的顶部及其陡坡处较为发育。随着断层距离增加,储层裂缝发育程度减弱;对于断层带而言,其内外岩石的力学性质差别越大,储层裂缝越发育。另外,储层裂缝发育程度还与断层的力学类型有关,一般认为压扭断层的裂缝发育程度最高,其次为逆冲断层或逆掩断层,而正断层和平移(走滑)断层的裂缝发育程度相对较低。对于背斜构造,在轴线方向上的裂缝密度、规模和连通性通常都要高于背斜翼部^[69]。

储层岩性与裂缝发育程度之间存在明显的相关性,是影响储层裂缝发育程度的一个重要因素。一般认为,致密的白云岩、灰岩、粉砂岩和细砂岩中的储层裂缝发育程度要高于泥岩和砾岩的储层裂缝发育程度^[11,70-72],因此,可以通过相似地表露头区或岩芯裂缝的分析,明确储层岩性与裂缝发育程度之间的关系,然后结合油气田内储层岩性的空间分布特征对储层裂缝的发育情况进行定性预测。

2.2 定量预测

2.2.1 井间直接插值法

井间直接插值法,又称已知井点约束法,是指利用多个井点的实测裂缝数据,按照线性或非线性插值预测储层裂缝的井间分布^[21]。这种方法是预测油气区储层裂缝井间分布最朴素的方法,但其适用条件十分有限;首先,研究区的构造形态要比较简单,构造起伏较小,没有断层或只有少量断距不大的小断层;其次,有裂缝资料的井点要足够多且分布相对均匀;第三,目的储层的岩性和厚度在平面上稳定分布,没有较强的非均质性。显然,只有一些简单的小型含油气区带才能满足以上条件,而大多数油气田均发育有数量不等的断层,且储层非均质性明显,井点也很难达到均匀分布,因此,该方法在实际工作中较少运用。

2.2.2 曲率法

曲率法是预测储层裂缝的一种常用方法,包括最大主曲率、最小主曲率、高斯曲率和欧拉曲率等^[73]。Murray 首次采用曲率法对美国 Spanish 油田的储层裂缝进行了成功预测^[74],随后该方法在中

国逐渐得到广泛应用。李志勇等利用主曲率法对江汉盆地潜江凹陷王场地区潜二段的储层裂缝进行了预测,预测结果与实际情况基本一致^[75];孙尚如将构造主曲率法与高斯曲率法进行了对比分析,发现高斯曲率法的裂缝预测结果与地质资料以及钻井和测井资料对应较好,并认为在构造面相对平缓、变形幅度不大的地区使用主曲率法预测得到的裂缝分布与实际情况吻合较差,而高斯曲率法的计算结果则符合地质规律,可广泛应用于裂缝性油气藏储层裂缝的平面预测^[76]。

刘宏等在研究四川盆地大池干井构造带三叠系嘉陵江组裂缝性储集层时,采用趋势面拟合法和差分法对面曲率进行计算,采用三点圆弧法及曲线拟合法对线曲率进行计算,然后在此基础上将多种数学方法计算得到的曲率值进行归一化处理,得到各方法的相对曲率值,并取其中的最大值(即“综合曲率”)来对储层裂缝的分布进行预测,即综合曲率法^[77]。该方法克服了单一曲率法预测裂缝分布的不足,通过与油气显示和气井产能等资料的对比分析,认为综合曲率法的裂缝预测效果要优于单一曲率法,提高了利用曲率方法进行裂缝预测的准确程度,能更好地对地下裂缝的分布规律进行预测。刘金华等在研究商河油田浅层侵入岩中的裂缝时,发现直接利用曲率值进行裂缝预测并不合适,因此提出了采用曲率变化值进行裂缝预测的改良方法,采用缝面比对储层裂缝的发育程度进行研究,并分析了曲率与裂缝发育程度之间的关联性,从而达到了预测裂缝分布的目的^[78]。

与三维应变(应力)分析相比,曲率通常只考虑了二维的构造面起伏,而没有考虑垂向上的地层几何形态,并且与生产数据(尤其是产能指数)之间的关系不如三维应变(应力)分析紧密^[79]。另外,主曲率计算公式中所取的地层厚度值并未考虑层间滑动,而层间滑动对岩石应变和破裂具有明显的控制作用^[80]。按照主曲率的计算公式,地层厚度越大,则裂缝孔隙度越大,在厚度不大的前提下,这种结论是成立的,但如果厚度增加到一定程度,那么根据公式计算出来的裂缝孔隙度会大大超过油气田的实测值,与实际严重不符。从原理上讲,主曲率法的裂缝预测结果往往只适用于岩层受力弯曲变形而派生的纵张裂缝,而对于多数油气田来讲,低渗透储层裂缝主要为构造挤压作用下形成的剪切裂缝,即使在西部挤压盆地一个完整的纵弯背斜构造中,这类纵张裂缝所占的比例也非常小,因而构造主曲率难以反

映出一个地区裂缝的真实分布规律^[60]。因此,单独采用曲率法进行储层裂缝的定性或半定量预测具有一定的优势^[81-82],但进行定量预测难度较大。McLennan 等将曲率和三维应变以及裂缝间距强度(FSI)相结合,采用贝叶斯修正对美国怀俄明州石油山背斜的裂缝进行了多变量综合定量预测,其结果与实际地质情况对应较好^[83]。

2.2.3 能量法与岩石破裂法(二元法)

20 世纪 60 年代,Price 根据岩石破裂形成裂缝时表面能不断增加的现象,将发育于岩石中的裂缝数量与岩石中的应变能作了定性联系,提出裂缝的发育程度与储存在岩石中的弹性应变能成正比^[84]。基于上述原理,在 20 世纪 90 年代初出现了数值模拟预测裂缝的能量法^[23],此方法采用岩石应变能作为预测储层裂缝的参数,认为岩石的应变能越高,裂缝越发育。

岩石破裂法是目前国内油气田储层构造裂缝预测的一种常用方法。20 世纪 90 年代,宋惠珍等将基础地质资料与构造应力场数值模拟进行结合,初步建立了基于有限元数值模拟的岩石破裂法储层裂缝预测体系^[11-15,85]。该方法是在构造应力场研究的基础上,结合岩石的破裂准则计算出岩石的破裂值,然后以单井实测的裂缝数据为约束,采用最小二乘法拟合出岩石破裂值与实测裂缝参数之间的关系式,从而进一步对储层裂缝发育规律进行预测。由于剪切裂缝和张性裂缝通常同时出现,所以必须综合岩石的剪切破裂准则和拉张破裂准则计算出岩石的总破裂值,然后以此为基础判断储层裂缝发育的有利区域及优势方位^[86-87]。

丁中一等在对吐哈盆地丘陵油田的构造裂缝进行研究时,发现单独利用能量法或岩石破裂法进行构造裂缝预测的结果均不能与实际情况较好地对应,但若同时考虑岩石的能量值和破裂值,则可以提高裂缝预测的准确性,因此提出了构造裂缝定量预测的二元法^[85]。该方法通过拟合岩石能量值、破裂值与单井裂缝密度实测值之间的函数关系式,在构造应力场分布的基础上对构造裂缝的分布进行预测;应用实践表明,利用该方法进行构造裂缝的预测操作简便,且效果显著^[86-87]。

二元法的基本思想较容易理解,实现起来也比较方便,但由于施加在力学模型上的应力载荷是古构造应力场,没有考虑现今应力场的作用,因此,通常只能得到裂缝线密度的分布,对于现今地应力场影响下的裂缝开度、裂缝孔隙度和裂缝渗透率等参

数难以预测,而且由于该方法需要进行二元二次或一元二次拟合,对数据点的个数即井点数量有一定要求,井点数过少的情况下所得到的拟合方程与实际情况可能有较大出入。另外,由于裂缝线密度没有考虑裂缝的规模,难以反映储层裂缝的综合发育程度,在油气田开发中单纯根据裂缝线密度值来判断储层裂缝有利发育区并不合适,所以二元法仍然是一种半定量预测储层裂缝发育程度的方法,而且有一定的局限性。

2.2.4 地震法

预测储层裂缝的地震技术包括横波分裂法、相干体数据法和地震属性分析法等^[88]。对于裂缝较为发育的储层来讲,横波在其内部传播时会分裂成与裂缝走向平行的快横波和垂直于裂缝走向的慢横波(即横波分裂或横波双折射现象),利用检波器接收横波数据并进行相关处理,便可以得到裂缝在储层中的分布情况。张明等认为利用横波分裂现象预测裂缝的方法主要包括最小熵旋转法、正交基旋转法和全局寻优法等^[89]。多波多分量技术可以直接将快、慢横波分量进行分离,并从中提取反映裂缝发育情况的信息,实践表明利用该方法进行裂缝预测具有良好的效果^[52]。相干体数据法形成于20世纪90年代初,对于断层和岩相变化的解释效果比较好,因此,在判断裂缝主控因素的基础上,可以通过断层和岩相的解释成果来预测裂缝的有利发育区^[16]。

地震属性系指直接从地震数据中获取的几何学和统计学分析的定量参数^[90]。目前的地震数据处理技术可以从地震资料中提取诸如频率、振幅能力、均方根振幅、曲率等地震属性^[16]。与其他属性相比,曲率属性在储层裂缝的识别方面更具优势。1994年,Lisle将曲率属性引入到地质学领域^[91],随后这一技术在地质学领域得到越来越广泛的应用。王雷等利用曲率属性法对柴达木盆地昆北地区某区块的裂缝发育带进行了预测,并对不同曲率属性的特点进行了分析对比,指出识别裂缝有利发育区的最优曲率属性是最正曲率和最负曲率,同时指出曲率属性法是识别裂缝发育区的有效方法,但不能单独作为评价标准,必须结合其他属性分析方可提高裂缝预测的精度^[92]。Baytok等将曲率属性与三维地震振幅数据、蚂蚁追踪属性以及井壁成像测井相结合,对储层裂缝发育强度的空间差异性及岩性对储层裂缝分布的控制作用进行了分析,取得了较好的效果,但同时也指出,由于地震频率特性随深度而变化,并且频率本身也会发生衰减,所以往往会出现

与储层裂缝强度无关的地震属性差异^[93]。

此外,纵波检测技术、VSP资料、岩相高分辨率地震反演、广义希尔伯特变换等方法也可用于储层裂缝的预测^[16]。

2.2.5 分形分维法

分形分维的有关理论认为,岩石的破裂过程具有自相似性,裂缝和断层均具有分形特征,仅在尺度上有所不同^[94],断层组合的展布特征与岩芯裂缝密度分布之间具有明显的相关性,因此,可以在断层组合分布规律研究的基础上,利用断层组合的分维值对储层裂缝在三维空间上的发育情况进行定量预测^[95]。邬光辉等对塔里木盆地中部地区奥陶系碳酸盐岩裂缝的研究表明,裂缝的密度越大,分布越杂乱,延伸长度越大,弯曲程度越高,则相应的裂缝分维值也越高^[95]。冯阵东等在利用分形分维法评价克拉2气田的储层裂缝时指出,裂缝线密度与断层的分维值之间呈正相关关系,并且断层对裂缝发育的控制作用局限在一定范围^[96]。断层的规模越大,则单条断层所释放的构造应力就越大,不利于次级断层的形成,对断层附近裂缝带的贡献也比较有限;断层密度大但规模较小的区域,构造应力可通过多条断层释放,若断层间距足够小,那么相邻断层所控制的裂缝发育带可能出现叠加,使得裂缝比较发育。采用分形分维法预测裂缝也有一定的前提条件,即研究区的断层发育程度要较高,这一方面决定于研究区本身的断层发育情况,另一方面还受制于地震资料的构造解释精度。

2.2.6 构造应力场数值模拟法

构造应力场数值模拟法是目前预测油气田储层裂缝分布的常用方法。天然构造裂缝通常是在构造应力的作用下产生的,并且一般取决于裂缝形成时期的古构造应力,因此,裂缝空间分布规律的预测可归结为古构造应力场的反演问题。古构造应力场的反演具有多解性,由于地质体的力学性质和边界条件等均属于未知,所以必须借助合适的力学模型来进行模拟分析、反复验证和逐步逼近。构造应力场分析一般采用有限单元法,其基本原理是天然裂缝能够以基于永久形变的地质力学模型来解释或反映^[80],因此,可以在褶皱变形力学和岩石断裂力学分析的基础上,以研究区的断裂展布和构造形迹为依据,采用非线性有限元技术来对研究区在地质历史时期中的构造应力场进行反演,并将数值模拟结果与库伦-莫尔准则或格里菲斯准则结合,即可对储层裂缝的分布规律进行预测或评价。

构造应力场与储层构造裂缝的三维有限元数值模拟是数学、力学和地学相互渗透与有机结合的系统,全过程是地质模型、力学模型和数学模型相互制约的过程^[97]。大量研究表明,低渗透储层中的裂缝往往以高角度构造裂缝为主,其形成与分布受构造部位、地层深度、储层岩性及岩石组分、孔隙流体、岩层厚度、地层结构和沉积微相等诸多地质因素的共同控制。因此,从影响储层构造裂缝形成与发育的地质因素入手,在构造裂缝形成时期古构造应力场数值模拟的基础上,结合岩石破裂准则和单井裂缝描述成果,是目前定量预测构造裂缝分布规律的有效手段^[1]。汪必峰等利用裂缝表面能理论、岩石应变能理论及能量守恒定律,通过选取合适的岩石破裂准则,建立了古今应力场与储层构造裂缝参数之间的定量数学关系模型,该模型已应用到中国东、西部多个含油气区块的储层裂缝定量预测上,取得了良好的效果^[98-105]。

就目前来看,通过建立研究目标区块的地质模型和力学模型,利用构造应力场数值模拟方法进行储层裂缝预测具有良好的理论基础,是一种比较可靠的储层裂缝预测方法。但由于该方法需要在建立精细地质模型和符合实际的岩石力学参数场以及施加合理边界条件的基础上,才能尽可能准确地对储层裂缝的空间分布进行定量预测,而现有的技术条件和软件环境还很难完全达到上述要求,所以该方法的储层裂缝预测精度仍然非常有限,特别是在面对复杂地质条件下的储层裂缝预测仍有很大难度。

2.2.7 多参数判据法

闫相桢等在预测江苏油田某区块的裂缝时,利用优化反分析方法获得目标区地应力场的分布,并考虑储层岩石的多轴应力状态,提出了储层裂缝预测的多参数判据法^[106]。该方法采用基于多个岩石材料参数建立的破坏曲面作为边界条件,通过研究应力状态函数与破坏曲面间的相互关系对储层裂缝的发育情况进行预测分析,并根据关键井点处的实测裂缝参数计算出储层平面内各点处的裂缝密度。该方法采用了多个岩石强度参数作为岩石破裂准则,对储层裂缝的预测比单参数岩石破裂准则具有更高的精度。结果表明,储层裂缝的体密度与发育指数的常用对数之间具有较好的线性关系。

2.3 小结

储层裂缝的定量预测方法还有灰色评判法、构造有限变形转动场法、人工神经网络法、模糊聚类法、构造滤波分析法和裂缝间距指数法等^[59-60]。

目前来看,储层裂缝的各种预测方法都有其自身的优势,但又不可避免地存在一定的缺陷或局限性,难以真正满足勘探开发的需求。中国的含油气盆地(尤其是西部前陆盆地)一般都经历了多期构造运动,从而造成储层裂缝的多期叠加,而目前对于多期裂缝预测的研究仍然较为薄弱;另一方面,目前所进行的储层裂缝预测都是针对张性裂缝和剪切裂缝进行的,对于具有过渡性质的裂缝(如压扭裂缝、张剪裂缝等)和非构造裂缝(如成岩收缩裂缝、溶蚀裂缝等)还不能很好地预测^[24]。此外,对于致密砾岩、火成岩、泥页岩和碳酸盐岩储层裂缝的预测方法仍然相对较少,难以达到理想的预测效果。

同时,由于影响储层裂缝发育的因素很多,在不同研究区或者同一研究区的不同构造部位和演化阶段,储层裂缝的发育特征可能有较大差异,所以单独采用某一种方法进行储层裂缝预测往往难以做到与实际相符。李志明等指出,储层裂缝的研究方向是不断进行方法和技术的创新,结合多学科的研究成果,最大限度地发挥不同方法的特长,并进行多方法的综合应用,从而形成一套完整有序的储层裂缝预测研究体系^[59]。

3 储层裂缝研究的几个关键问题

3.1 裂缝的分布预测与精细表征

裂缝发育的复杂性提高了储层裂缝的研究难度。曾联波等指出,在储层裂缝研究中需要重点解决的问题有裂缝形成机理及其地球物理响应机理、地质-测井-地震多学科综合的裂缝预测与定量评价方法、不同类型与非均质性岩层裂缝分布定量模型、高精度裂缝及其渗流网络的定量预测与评价体系、裂缝与基质孔隙之间的相互作用和匹配关系以及裂缝与地应力之间的相互耦合关系等^[1]。徐会永等认为,复杂岩性组合地层(如砂泥岩互层)的裂缝预测以及多期次构造应力场作用下多期裂缝的参数定量表征是目前亟待解决的理论问题,并总结出今后裂缝研究的重点发展方向是构造-沉积耦合对裂缝发育的控制作用的深入分析、基于岩石损伤力学理论的裂缝形成机制研究、多因素作用下的非线性复合岩石破裂准则和本构关系的建立以及应力-应变和裂缝参数之间的线性或非线性定量关系模型的建立,从而实现储层裂缝三维空间展布的精细表征^[107]。

3.2 裂缝的动态参数

目前来讲,对于储层裂缝参数的描述及预测主要侧重于油田开发初期的裂缝静态参数,但在注水

开发过程中,由于岩石基质的渗透性较差,注入流体不易在井底扩散,导致地层能量补给困难,地层压力快速下降,裂缝面受到的有效应力增大,进而导致裂缝开度和裂缝渗透率下降,即所谓裂缝的应力敏感性或压力敏感性。裂缝的应力敏感性直接影响着低渗透油藏开发后期的方案调整和开发效果,因此,开展裂缝应力敏感性研究,对于低渗透油藏的开发具有十分重要的意义^[108-109]。曾联波等将这种随着油气田开发而发生变化的裂缝参数称为裂缝动态参数,并指出裂缝动态参数的评价及其预测方法对低渗透油藏的开发管理具有重要的理论与应用价值,其变化规律是低渗透油藏开发后期井网调整的重要地质依据^[1]。目前,对于裂缝性储层的应力敏感性研究仍然相对较少,没有形成相对完善的评价体系,因此,裂缝性储层的应力敏感性将是裂缝性油气藏开发中有待突破的新课题。

3.3 裂缝三维地质建模

随着裂缝性油气田开发的需要,储层裂缝的三维地质建模逐步成为储层裂缝领域的研究热点,这也是裂缝的地质研究与油藏工程的结合点^[110]。储层裂缝的三维地质建模可分为地质式建模和油藏式建模两类。地质式建模主要是对储层裂缝空间发育规律的抽象表述,较侧重于地质分析,而油藏式建模则是为了对油气田开发起指导作用,主要采用地表露头区观测、三维地震资料和成像测井数据建立地下储层裂缝参数的三维数据体,从而直接用于裂缝性油藏数值模拟^[111]。在裂缝性油气田的开发中,主要应用的是油藏式建模,相关软件有 Petrel、FracMan 及 FracFlow 等,然而由于相关技术和方法需要进一步发展和完善,特别是单井裂缝参数描述与井间裂缝预测方法的有机结合尚不成熟,所以能真正满足开发需要的裂缝三维地质建模仍然是一个有待解决的问题。

3.4 小结

总的来看,目前储层裂缝的研究重点逐渐由勘探向开发转变,因此,储层裂缝的空间分布预测与定量表征、动态参数和三维地质建模是目前储层裂缝研究的热点。但油气田开发中储层裂缝相关工作的开展,必须以明确储层裂缝的成因、演化和主控因素为基础,只有在明确储层裂缝的成因、演化及主控因素的基础上,才能选择相应方法和软件进行储层裂缝的预测,并进一步应用在开发中。就目前来讲,这些基础工作并不能说已经非常成熟,特别是在西部盆地(如塔里木盆地、四川盆地、鄂尔多斯盆地等)

中,由于地质条件的复杂性和构造运动的多期性,导致储层裂缝的成因、演化与主控因素相对于东部盆地更为复杂,所以在今后的储层裂缝研究中,仍然要重视这些基础工作,不能忽视其重要性。

4 结 语

(1)岩芯和薄片的裂缝分析是储层裂缝研究的基础,测井资料、相似地表露头区、地震资料和生产动态资料分别反映了储层裂缝在剖面、平面、三维空间的分布规律和随时间的变化情况,上述几个方面共同组成了储层裂缝识别技术“点-线-面-体-时间”的多维综合体系。

(2)储层裂缝的定性预测主要根据裂缝发育程度与构造部位和岩性的关系,常用的定量预测方法包括曲率法、能量法与岩石破裂法(二元法)、分形分维法、构造应力场数值模拟法等,储层裂缝的有效预测需综合多种方法方能实现。

(3)储层裂缝的分布预测与精细表征(包括多学科综合的裂缝预测评价、多期次裂缝的参数定量表征等)、裂缝的动态参数(即裂缝的应力敏感性)和裂缝三维地质建模(包括地质式建模和油藏式建模)等方面是目前储层裂缝研究的关键问题。

参考文献:

References:

- [1] 曾联波,柯式镇,刘洋,等.低渗透油气储层裂缝研究方法[M].北京:石油工业出版社,2010.
ZENG Lian-bo, KE Shi-zhen, LIU Yang, et al. Study Methods of Fractures in Low-permeability Oil-gas Reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [2] CMEXOB E M. 裂缝性油气储集层勘探的基本理论与方法[M]. 陈定宝,曾志琼,吴丽芸,译.北京:石油工业出版社,1985.
CMEXOB E M. Fundamental Theory and Method of Fractured Reservoir Exploration[M]. Translated by CHEN Ding-bao, ZENG Zhi-qiong, WU Li-yun. Beijing: Petroleum Industry Press, 1985.
- [3] VAN GOLF-RACHT T D. 裂缝油藏工程基础[M]. 陈钟祥,金玲年,秦同洛,译.北京:石油工业出版社,1989.
VAN GOLF-RACHT T D. Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering[M]. Translated by CHEN Zhong-xiang, JIN Ling-nian, QIN Tong-luo. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989.
- [4] NELSON R A. Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs[M]. 2nd ed. Houston: Gulf Profes-

- sional Publishing, 2001.
- [5] LAUBACH S E, OLSON J E, GROSS M R. Mechanical and Fracture Stratigraphy[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(11):1413-1426.
- [6] OLSON J E, LAUBACH S E, LANDER R H. Natural Fracture Characterization in Tight Gas Sandstones: Integrating Mechanics and Diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(11):1535-1549.
- [7] 曾联波. 低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- ZENG Lian-bo. Formation and Distribution of Reservoir Fractures in Low-permeability Sandstones[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [8] 曾联波. 低渗透砂岩油气储层裂缝及其渗流特征[J]. 地质科学, 2004, 39(1):11-17.
- ZENG Lian-bo. Fissure and Its Seepage Characteristics in Low-permeable Sandstone Reservoir[J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(1):11-17.
- [9] 曾联波, 漆家福, 王永秀. 低渗透储层构造裂缝的成因类型及其形成地质条件[J]. 石油学报, 2007, 28(4):52-56.
- ZENG Lian-bo, QI Jia-fu, WANG Yong-xiu. Origin Type of Tectonic Fractures and Geological Conditions in Low-permeability Reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4):52-56.
- [10] 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 Lian-bo, LI Yue-gang, ZHANG Gui-bin, et al. Controlling Factors for Fracture Distribution in the Low-permeability Sandstone Reservoir of the Second Member of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the South of Western Sichuan[J]. Geology in China, 2007, 34(4):622-627.
- [11] 曾联波, 李跃纲, 王正国, 等. 川西南部须二段低渗透砂岩储层裂缝类型及其形成序列[J]. 地球科学, 2007, 32(2):194-200.
- ZENG Lian-bo, LI Yue-gang, WANG Zheng-guo, et al. Type and Sequence of Fractures in the Second Member of Xujiahe Formation at the South of Western Sichuan Depression[J]. Earth Science, 2007, 32(2):194-200.
- [12] 曾联波, 巩磊, 祖克威, 等. 柴达木盆地西部古近系储层裂缝有效性的影响因素[J]. 地质学报, 2012, 86(11):1809-1814.
- ZENG Lian-bo, GONG Lei, ZU Ke-wei, et al. Influence Factors on Fracture Validity of the Paleogene Reservoir, Western Qaidam Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(11):1809-1814.
- [13] 宋惠珍. 脆性岩储层裂缝定量预测的尝试[J]. 地质力学学报, 1999, 15(1):76-84.
- SONG Hui-zhen. An Attempt of Quantitative Prediction of Natural Crack on Brittle Rock Reservoir[J]. Journal of Geomechanics, 1999, 15(1):76-84.
- [14] 宋惠珍, 曾海容, 孙君秀, 等. 储层构造裂缝预测方法及其应用[J]. 地震地质, 1999, 21(3):205-213.
- SONG Hui-zhen, ZENG Hai-rong, SUN Jun-xiu, et al. Methods of Reservoir Tectonic Fracture Prediction and Its Application[J]. Seismology and Geology, 1999, 21(3):205-213.
- [15] 宋惠珍, 贾承造, 欧阳健, 等. 裂缝性储集层研究理论与方法: 塔里木盆地碳酸盐岩储集层裂缝预测[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- SONG Hui-zhen, JIA Cheng-zao, OUYANG Jian, et al. Theory and Methods of Fractured Reservoir Research: Fracture Prediction of Carbonate Reservoir in Tarim Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [16] 袁士义, 宋新民, 冉启全. 裂缝性油藏开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- YUAN Shi-yi, SONG Xin-min, RAN Qi-quan. Development Technology of Fractured Reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [17] 刘建中, 孙庆友, 徐国明, 等. 油气田储层裂缝研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- LIU Jian-zhong, SUN Qing-you, XU Guo-ming, et al. Research on Reservoir Fractures in Oil-gas Field[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [18] 穆龙新, 赵国良, 田中元, 等. 储层裂缝预测研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- MU Long-xin, ZHAO Guo-liang, TIAN Zhong-yuan, et al. Study on Reservoir Fracture Prediction[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [19] 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 Jun-sheng, WANG Bi-feng. Integrated Approach of Identifying and Predicting Fracture in Reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10(1):1-2, 8.
- [20] 戴俊生, 冯建伟, 李明, 等. 砂泥岩间互地层裂缝延伸规律探讨[J]. 地学前缘, 2011, 18(2):277-283.
- DAI Jun-sheng, FENG Jian-wei, LI Ming, et al. Discussion on the Extension Law of Structural Fracture in Sand-mud Interbed Formation[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(2):277-283.
- [21] 戴俊生, 冯阵东, 刘海磊, 等. 几种储层裂缝评价方法的适用条件分析[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(4):

- 1234-1242.
- DAI Jun-sheng, FENG Zhen-dong, LIU Hai-lei, et al. Analysis for the Applicable Conditions of Several Methods of Reservoir Fracture Evaluation[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(4): 1234-1242.
- [22] 周新桂, 邓宏文, 操成杰, 等. 储层构造裂缝定量预测研究及评价方法[J]. 地球学报, 2003, 24(2): 175-180.
- ZHOU Xin-gui, DENG Hong-wen, CAO Cheng-jie, et al. The Methods for Quantitative Prediction and Evaluation of Structural Fissures in Reservoirs[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2003, 24(2): 175-180.
- [23] 周新桂, 操成杰, 袁嘉音. 储层构造裂缝定量预测与油气渗流规律研究现状和进展[J]. 地球科学进展, 2003, 18(3): 398-404.
- ZHOU Xin-gui, CAO Cheng-jie, YUAN Jia-yin. The Research Actuality and Major Progresses on the Quantitative Forecast of Reservoir Fractures and Hydrocarbon Migration Law[J]. Advances in Earth Science, 2003, 18(3): 398-404.
- [24] 周新桂, 张林炎, 范昆, 等. 油气盆地低渗透储层裂缝预测研究现状及进展[J]. 地质论评, 2006, 52(6): 777-782.
- ZHOU Xin-gui, ZHANG Lin-yan, FAN Kun, et al. The Research Situation and Progresses of Natural Fracture for Low Permeability Reservoirs in Oil and Gas Basin[J]. Geological Review, 2006, 52(6): 777-782.
- [25] 周新桂, 张林炎, 塔巴庙地区上古生界低渗透储层构造裂缝及其分布定量预测[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(5): 575-580.
- ZHOU Xin-gui, ZHANG Lin-yan. Basic Characteristics and Quantitative Prediction of Natural Fracture System in the Upper Paleozoic Tight Sand Reservoirs in Tabamiao Area, North Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(5): 575-580.
- [26] 周新桂, 张林炎, 范昆. 含油气盆地低渗透储层构造裂缝定量预测方法和实例[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(3): 328-333.
- ZHOU Xin-gui, ZHANG Lin-yan, FAN Kun. Methods for Quantitative Prediction of Tectonic Fractures in Compact Reservoirs in Petroliferous Basins and a Case Study[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(3): 328-333.
- [27] 周新桂, 张林炎, 屈雪峰, 等. 沿河湾探区低渗透储层构造裂缝特征及分布规律定量预测[J]. 石油学报, 2009, 30(2): 195-200.
- ZHOU Xin-gui, ZHANG Lin-yan, QU Xue-feng, et al. Characteristics and Quantitative Prediction of Distribution Laws of Tectonic Fractures of Low-permeability Reservoirs in Yanhewan Area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 195-200.
- [28] 侯贵廷, 潘文庆. 裂缝地质建模及力学机制[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- HOU Gui-ting, PAN Wen-qing. Fracture Geological Modeling and Its Mechanism[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [29] 唐永, 梅廉夫, 唐文军, 等. 裂缝性储层属性分析与随机模拟[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2010, 32(4): 56-66.
- TANG Yong, MEI Lian-fu, TANG Wen-jun, et al. Property Analysis and Stochastic Modelling of Fractured Reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2010, 32(4): 56-66.
- [30] 商琳, 戴俊生, 贾开富, 等. 碳酸盐岩潜山不同级别构造裂缝分布规律数值模拟[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(6): 1260-1267.
- SHANG Lin, DAI Jun-sheng, JIA Kai-fu, et al. Numerical Simulation for the Distribution of Different Levels of Tectonic Fractures in Carbonate Buried Hills[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(6): 1260-1267.
- [31] 潘文庆, 侯贵廷, 齐英敏, 等. 碳酸盐岩构造裂缝发育模式探讨[J]. 地学前缘, 2013, 20(5): 188-195.
- PAN Wen-qing, HOU Gui-ting, QI Ying-min, et al. Discussion on the Development Models of Structural Fractures in the Carbonate Rocks[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(5): 188-195.
- [32] 张鹏, 侯贵廷, 潘文庆, 等. 塔里木盆地寒武系白云岩构造裂缝发育特征[J]. 海相油气地质, 2014, 19(3): 51-56.
- ZHANG Peng, HOU Gui-ting, PAN Wen-qing, et al. Development Characteristics of Structural Fractures in Cambrian Dolostone, Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2014, 19(3): 51-56.
- [33] 李跃纲, 巩磊, 曾联波, 等. 四川盆地九龙山构造致密砾岩储层裂缝特征及其贡献[J]. 天然气工业, 2012, 32(1): 22-26.
- LI Yue-gang, GONG Lei, ZENG Lian-bo, et al. Characteristics of Fractures and Their Contribution to the Deliverability of Tight Conglomerate Reservoirs in the Jiulongshan Structure, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(1): 22-26.
- [34] 王京红, 邹才能, 靳久强, 等. 火成岩储集层裂缝特征及成缝控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 708-715.

- WANG Jing-hong, ZOU Cai-neng, JIN Jiu-qiang, et al. Characteristics and Controlling Factors of Fractures in Igneous Rock Reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(6): 708-715.
- [35] 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 Wen-long, XU Chang-chun, JIU Kai, et al. The Research Progress of Shale Fractures[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(2): 135-144.
- [36] TRUMBO A, RICH J P. Azimuthal Variations in Attributes for Induced Fracture Detection in the Barnett Shale[J]. *Interpretation*, 2013, 1(2): 51-59.
- [37] 赵振宇, 郭彦如, 顾家裕, 等. 不同成岩期泥质岩非构造裂缝发育规律、形成机理及其地质意义[J]. *沉积学报*, 2013, 31(1): 38-49.
- ZHAO Zhen-yu, GUO Yan-ru, GU Jia-yu, et al. The Growth Patterns and Mechanisms of Mud Cracks at Different Diagenetic Stages and Its Geological Significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(1): 38-49.
- [38] 刘惠民, 张鹏飞, 宋国奇, 等. 鲁西地区太古界裂缝类型与发育规律[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2014, 38(5): 34-40.
- LIU Hui-min, ZHANG Peng-fei, SONG Guo-qi, et al. Fracture Types and Distribution of Archaean Rocks in West Shandong, China[J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2014, 38(5): 34-40.
- [39] GALE J F W, LAUBACH S E, OLSON J E, et al. Natural Fractures in Shale: A Review and New Observations[J]. *AAPG Bulletin*, 2014, 98(11): 2165-2216.
- [40] IMBER J, ARMSTRONG H, CLANDY S, et al. Natural Fractures in a United Kingdom Shale Reservoir Analog, Cleveland Basin, Northeast England[J]. *AAPG Bulletin*, 2014, 98(11): 2411-2437.
- [41] 刘景新. 火成岩油气储层构造裂缝发育程度预测研究[J]. *西北大学学报: 自然科学版*, 2014, 44(2): 279-284.
- LIU Jing-xin. The Method of Forecasting the Developmental Characteristics of Tectoclase in Igneous Reservoir[J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2014, 44(2): 279-284.
- [42] 王月蕾, 陈学国, 郝志伟, 等. 准噶尔盆地哈山地区石炭系火成岩裂缝预测[J]. *地质科技情报*, 2014, 33(2): 66-71.
- WANG Yue-lei, CHEN Xue-guo, HAO Zhi-wei, et al. Fracture Prediction of Carboniferous Igneous Rock in Hashanxi Area of Junggar Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2014, 33(2): 66-71.
- [43] 周坤, 杨志冬, 范存辉, 等. 准噶尔西北缘四区火山岩风化壳储层裂缝特征[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(1): 28-34.
- ZHOU Kun, YANG Zhi-dong, FAN Cun-hui, et al. Fracture Characteristics of Carboniferous Volcanic Weathering Crust Reservoir in the 4-2 Region, the Northwest Margin of Junggar Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015, 34(1): 28-34.
- [44] 范存辉, 周坤, 秦启荣, 等. 基底潜山型火山岩储层裂缝综合评价[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(12): 1925-1932.
- FAN Cun-hui, ZHOU Kun, QIN Qi-rong, et al. Comprehensive Assessment of Fractures in the Volcanic Basement Buried Hill Reservoirs[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(12): 1925-1932.
- [45] 贾跃玮, 魏水建, 吕林. 应用地震纵波方位各向异性定量预测火山岩裂缝[J]. *石油物探*, 2014, 53(4): 477-483.
- JIA Yue-wei, WEI Shui-jian, LU Lin. Application of Seismic P-wave Azimuthal Anisotropy in Volcanic Fracture Quantitative Prediction[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2014, 53(4): 477-483.
- [46] 汪勇, 陈学国, 王月蕾, 等. 叠后多属性分析在哈山西石炭系火山岩裂缝预测中的应用研究[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(4): 1772-1779.
- WANG Yong, CHEN Xue-guo, WANG Yue-lei, et al. Application of Multiple Post-stack Seismic Attributes in the Prediction of Carboniferous Fracture in West Hashan[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(4): 1772-1779.
- [47] 陈树民, 姜传金, 刘立, 等. 松辽盆地徐家围子断陷火山岩裂缝形成机理[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2014, 44(6): 1816-1826.
- CHEN Shu-min, JIANG Chuan-jin, LIU Li, et al. Fracture Formation Mechanism of Volcanic Rocks in Xujiaweizi Fault Depression of Songliao Basin[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(6): 1816-1826.
- [48] 孙耀庭. 沾车地区泥岩裂缝成因分析[J]. *地质科技情报*, 2014, 33(4): 46-50.
- SUN Yao-ting. Formation Analysis of Mudstone Fracture in Zhanche Area[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2014, 33(4): 46-50.
- [49] 马中远, 黄苇, 曹自成, 等. 亚松迪地区泥岩裂缝储层形成主控因素与油气成藏[J]. *断块油气田*, 2013,

- 20(5):564-567.
- MA Zhong-yuan, HUANG Wei, CAO Zi-cheng, et al. Main Controlling Factor of Mudstone Fracture Reservoir Formation and Hydrocarbon Accumulation in Yasongdi Area[J]. Fault-block Oil and Gas Field, 2013, 20(5):564-567.
- [50] 骆 杨, 赵彦超, 陈红汉, 等. 构造应力-流体压力耦合作用下的裂缝发育特征[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2):177-185.
- LUO Yang, ZHAO Yan-chao, CHEN Hong-han, et al. Fractures Characteristics Under the Coupling Effect of Tectonic Stress and Fluid Pressure[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2):177-185.
- [51] 刘 平, 陈书平, 刘世丽, 等. 苏北盆地阜宁组泥页岩裂缝类型及形成期次[J]. 西安石油大学学报:自然科学版, 2014, 29(6):13-20, 28.
- LIU Ping, CHEN Shu-ping, LIU Shi-li, et al. Types and Forming Epochs of the Fractures in the Shale of Funing Formation of Subei Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2014, 29(6):13-20, 28.
- [52] 崔 健, 张 军, 王延民, 等. 储层裂缝预测方法研究[J]. 重庆科技学院学报:自然科学版, 2008, 10(1):5-8.
- CUI Jian, ZHANG Jun, WANG Yan-min, et al. Study on Forecast Means of Reservoir Fractures[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2008, 10(1):5-8.
- [53] 王鹏威, 陈 筱, 庞雄奇, 等. 构造裂缝对致密砂岩气成藏过程的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(2):185-191.
- WANG Peng-wei, CHEN Xiao, PANG Xiong-qi, et al. The Controlling of Structure Fractures on the Accumulation of Tight Sand Gas Reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(2):185-191.
- [54] WENBERG O P, MALM O, NEEDHAM T, et al. On the Occurrence and Formation of Open Fractures in the Jurassic Reservoir Sandstones of the Snohvit Field, SW Barent Sea[J]. Petroleum Geoscience, 2008, 14(2):139-150.
- [55] 张奎华, 冯建伟, 戴俊生. 深层砂泥岩储层继承性裂缝发育特征[J]. 地质力学学报, 2013, 19(2):214-224.
- ZHANG Kui-hua, FENG Jian-wei, DAI Jun-sheng. Development Characteristics of Inherited Fractures in Deep Sand-shale Reservoir[J]. Journal of Geomechanics, 2013, 19(2):214-224.
- [56] 昌伦杰, 赵力彬, 杨学君, 等. 应用 ICT 技术研究致密砂岩气藏储集层裂缝特征[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(4):471-475.
- CHANG Lun-jie, ZHAO Li-bin, YANG Xue-jun, et al. Application of Industrial Computed Tomography (ICT) to Research of Fractured Tight Sandstone Gas Reservoirs[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(4):471-475.
- [57] 曾联波, 李跃纲, 王正国, 等. 邛西构造须二段特低渗透砂岩储层微观裂缝的分布特征[J]. 天然气工业, 2007, 27(6):45-47.
- ZENG Lian-bo, LI Yue-gang, WANG Zheng-guo, et al. Distribution of Microfractures in Ultralow Permeability Sandstone Reservoirs of the Second Member of Xujiahe Formation in Qiongxian Structure[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(6):45-47.
- [58] 黄继新, 彭仕宓, 王小军, 等. 成像测井资料在裂缝和地应力研究中的应用[J]. 石油学报, 2006, 27(6):65-69.
- HUANG Ji-xin, PENG Shi-mi, WANG Xiao-jun, et al. Applications of Imaging Logging Data in the Research of Fracture and Ground Stress[J]. Acta Petroli Sinica, 2006, 27(6):65-69.
- [59] 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.
- LI Zhi-ming, ZHANG Jin-zhu. In-situ Stress and Petroleum Exploration and Development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [60] 吴胜和. 储层表征与建模[M]. 北京:石油工业出版社, 2010.
- WU Sheng-he. Reservoir Characterization and Modeling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [61] 吴胜和, 杨延强. 地下储层表征的不确定性及其科学思维方法[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(2):72-80.
- WU Sheng-he, YANG Yan-qiang. Uncertainty and Scientific Methodology in Subsurface Reservoir Characterization[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(2):72-80.
- [62] 张惠良, 张荣虎, 杨海军, 等. 构造裂缝发育型砂岩储层定量评价方法及应用:以库车前陆盆地白垩系为例[J]. 岩石学报, 2012, 28(3):827-835.
- ZHANG Hui-liang, ZHANG Rong-hu, YANG Hai-jun, et al. Quantitative Evaluation Methods and Applications of Tectonic Fracture Developed Sand Reservoir: A Cretaceous Example from Kuqa Foreland Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3):827-835.
- [63] GRASMUECK M, WEGER R, HORSTMAYER H. Three-dimensional Ground-penetrating Radar Imaging of Sedimentary Structures, Fractures, and Archaeological Features at Submeter Resolution[J]. Geology, 2004, 32(11):933-936.
- [64] THEUNE U, ROKOSH D, SACCHI M D, et al. Map-

- ping Fractures with GPR: A Case Study from Turtle Mountain[J]. *Geophysics*, 2006, 71(5): 139-150.
- [65] CASINI G, GILLESPIE P A, VERGES J, et al. Sub-Seismic Fractures in Foreland Fold and Thrust Belts: Insight from the Lurestan Province, Zagros Mountains, Iran[J]. *Petroleum Geoscience*, 2011, 17(3): 263-282.
- [66] AWDAL A H, BRAATHEN A, WENNERBERG O P, et al. The Characteristics of Fracture Networks in the Shiranish Formation of the Bina Bawi Anticline: Comparison with the Taq Taq Field, Zagros, Kurdistan, NE Iraq[J]. *Petroleum Geoscience*, 2013, 19(2): 139-155.
- [67] HUNT L, REYNOLDS S, BROWN T, et al. Quantitative Estimate of Fracture Density Variations in the Nordegge with Azimuthal AVO and Curvature: A Case Study[J]. *The Leading Edge*, 2010, 29(9): 1122-1137.
- [68] PRIOUL R, JOCKER J. Fracture Characterization at Multiple Scales Using Borehole Images, Sonic Logs, and Walkaround Vertical Seismic Profile[J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(11): 1503-1516.
- [69] GHOSH K, MITRA S. Structural Controls of Fracture Orientations, Intensity, and Connectivity, Teton Anticline, Sawtooth Range, Montana[J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(8): 995-1014.
- [70] AMEEN M S, MACPHERSON K, AL-MARHOON M I, et al. Diverse Fracture Properties and Their Impact on Performance in Conventional and Tight-gas Reservoirs, Saudi Arabia: The Unayzah, South Haradh Case Study[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(3): 459-492.
- [71] 范存辉, 郭彤楼, 王本强, 等. 四川盆地元坝中部地区须家河组储层裂缝发育特征及控制因素[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(5): 52-54.
- FAN Cun-hui, GUO Tong-lou, WANG Ben-qiang, et al. Characteristics and Controlling Factors of Reservoir Fractures in Xujiahe Formation, Central Yuanba of Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(5): 52-54.
- [72] 李世川, 成荣红, 王 勇, 等. 库车坳陷大北 1 气藏白垩系储层裂缝发育规律[J]. *天然气工业*, 2012, 32(10): 24-27.
- LI Shi-chuan, CHENG Rong-hong, WANG Yong, et al. Fracture Development Pattern in the Cretaceous Reservoirs in the Dabai-1 Gas Pool of the Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(10): 24-27.
- [73] CHOPRA S, MARFURT K J. Observing Fracture Lineaments with Euler Curvature[J]. *The Leading Edge*, 2014, 33(2): 122-126.
- [74] MURRAY G H. Quantitative Fracture Study: Sanish Pool, McKenzie County, North Dakota[J]. *AAPG Bulletin*, 1968, 52(1): 57-65.
- [75] 李志勇, 曾佐勋, 罗文强. 裂缝预测主曲率法的新探索[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(6): 83-85.
- LI Zhi-yong, ZENG Zuo-xun, LUO Wen-qiang. A New Approach for Predicting Fractures Using Principal Curvature[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(6): 83-85.
- [76] 孙尚如. 预测储层裂缝的两种曲率方法应用比较[J]. *地质科技情报*, 2003, 22(4): 71-74.
- SUN Shang-ru. Application Comparison of Two Curvature Methods for Predicting Reservoir Fractures[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2003, 22(4): 71-74.
- [77] 刘 宏, 蔡正旗, 谭秀成, 等. 川东高陡构造薄层碳酸盐岩裂缝性储集层预测[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(4): 431-436.
- LIU Hong, CAI Zheng-qi, TAN Xiu-cheng, et al. Forecasting of Fracture Reservoirs in Thin Carbonate Rocks of Precipitous Structure Belt, East Sichuan[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(4): 431-436.
- [78] 刘金华, 杨少春, 陈宁宁, 等. 火成岩油气储层中构造裂缝的微构造曲率预测法[J]. *中国矿业大学学报*, 2009, 38(6): 815-819.
- LIU Jin-hua, YANG Shao-chun, CHEN Ning-ning, et al. Forecasting Method of Tectoclase in the Igneous Reservoirs Using a Curvature of the Microtectonics[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2009, 38(6): 815-819.
- [79] SHABAN A, SHERKATI S, MIRI S A. Comparison Between Curvature and 3D Strain Analysis Methods for Fracture Predicting in the Gachsaran Oil Field (Iran)[J]. *Geology Magazine*, 2011, 148(5/6): 868-878.
- [80] SMART K J, FERRILL D A, MORRIS A P. Impact of Interlayer Slip on Fracture Prediction from Geomechanical Models of Fault-Related Folds[J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(11): 1447-1458.
- [81] 李志军, 张 瀛, 窦 煜, 等. 曲率法致密砂岩储层裂缝预测[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2013, 35(6): 57-63.
- LI Zhi-jun, ZHANG Ying, DOU Yu, et al. Fracture Prediction in Tight Sandstone Reservoir with Curvature Method[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition*, 2013, 35(6): 57-63.
- [82] 王 珂, 戴俊生, 商 琳, 等. 曲率法在库车坳陷克深气田储层裂缝预测中的应用[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2014, 29(1): 34-39, 45.

- WANG Ke, DAI Jun-sheng, SHANG Lin, et al. Reservoir Fracture Prediction of Keshen Gasfield in Kuqa Depression Using Principal Curvature Method[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2014, 29(1): 34-39, 45.
- [83] MCLENNAN J A, ALLWARDT P F, HENNINGS P H, et al. Multivariate Fracture Intensity Prediction: Application to Oil Mountain Anticline, Wyoming[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(11): 1585-1595.
- [84] PRICE N J. Fault and Joint Development in Brittle and Semi-Brittle Rock [M]. Oxford: Pergamon Press, 1966.
- [85] 丁中一, 钱祥麟, 霍红, 等. 构造裂缝定量预测的一种新方法——二元法[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(1): 1-7, 14.
DING Zhong-yi, QIAN Xiang-lin, HUO Hong, et al. A New Method for Quantitative Prediction of Tectonic Fractures—Two-factor Method[J]. Oil and Gas Geology, 1998, 19(1): 1-7, 14.
- [86] 鞠玮, 侯贵廷, 黄少英, 等. 库车坳陷依南—吐孜地区下侏罗统阿合组砂岩构造裂缝分布预测[J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(4): 592-602.
JU Wei, HOU Gui-ting, HUANG Shao-ying, et al. Structural Fracture Distribution and Prediction of the Lower Jurassic Ahe Formation Sandstone in the Yinan-Tuzi Area, Kuqa Depression[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(4): 592-602.
- [87] 鞠玮, 侯贵廷, 冯胜斌, 等. 鄂尔多斯盆地庆城—合水地区延长组长6₃储层构造裂缝定量预测[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 310-320.
JU Wei, HOU Gui-ting, FENG Sheng-bin, et al. Quantitative Prediction of the Yanchang Formation Chang-6₃ Reservoir Tectonic Fracture in the Qingcheng-Heshui Area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(6): 310-320.
- [88] 巫芙蓉, 李亚林, 王玉雪, 等. 储层裂缝发育带的地震综合预测[J]. 天然气工业, 2006, 26(11): 49-51.
WU Fu-rong, LI Ya-lin, WANG Yu-xue, et al. Comprehensive Seismic Prediction of Fractured Zone in Reservoir[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(11): 49-51.
- [89] 张明, 姚逢昌, 韩大匡, 等. 多分量地震裂缝预测技术进展[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(2): 293-297.
ZHANG Ming, YAO Feng-chang, HAN Da-kuang, et al. Progress of Multi-component Seismic for Fracture Detection[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(2): 293-297.
- [90] SLIZ K, AL-DOSSARY S. Seismic Attributes and Kinematic Azimuthal Analysis for Fracture and Stress Detection in Complex Geologic Settings[J]. Interpretation, 2014, 2(1): 67-75.
- [91] LISLE R J. Detection of Zones of Abnormal Strains in Structures Using Gaussian Curvature Analysis[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(12): 1811-1819.
- [92] 王雷, 陈海清, 陈国文, 等. 应用曲率属性预测裂缝发育带及其产状[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(6): 885-889.
WANG Lei, CHEN Hai-qing, CHEN Guo-wen, et al. Application of Curvature Attributes in Predicting Fracture-developed Zone and Its Orientation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(6): 885-889.
- [93] BAYTOK S, PRANTER M J. Fault and Fracture Distribution Within a Tight-gas Sandstone Reservoir: Mesaverde Group, Mamm Creek Field, Piceance Basin, Colorado, USA [J]. Petroleum Geoscience, 2013, 19(3): 203-222.
- [94] 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 Heng-mao. Description and Prediction of Reservoir Fractures Networks [J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2004, 16(2): 9-13.
- [95] 邬光辉, 李建军, 杨栓荣, 等. 塔里木盆地中部地区奥陶纪碳酸盐岩裂缝与断裂的分形特征[J]. 地质科学, 2002, 37(增): 51-56.
WU Guang-hui, LI Jian-jun, YANG Shuan-rong, et al. Fractal Characteristics of Fissures and Fractures of Ordovician Carbonate Rocks in the Central Tarim Area [J]. Chinese Journal of Geology, 2002, 37(S): 51-56.
- [96] 冯阵东, 戴俊生, 邓航, 等. 利用分形几何定量评价克拉2气田裂缝[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(6): 928-933, 939.
FENG Zhen-dong, DAI Jun-sheng, DENG Hang, et al. Quantitative Evaluation of Fractures with Fractal Geometry in Kela-2 Gas Field[J]. Oil and Gas Geology, 2011, 32(6): 928-933, 939.
- [97] 唐湘蓉, 李晶. 构造应力场有限元数值模拟在裂缝预测中的应用[J]. 特种油气藏, 2005, 12(2): 25-28.
TANG Xiang-rong, LI Jing. Application of Finite Element Numerical Simulation of Tectonic Stress Field in Fracture Prediction[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2005, 12(2): 25-28.
- [98] 汪必峰. 储集层构造裂缝描述与定量预测[D]. 青岛: 中国石油大学, 2007.
WANG Bi-feng. Description and Quantitative Prediction of Reservoir Tectoclase[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2007.
- [99] 孙业恒. 史南油田史深100块裂缝性砂岩油藏建模及

- 数值模拟研究[D]. 北京:中国矿业大学,2009.
- SUN Ye-heng. Study on Reservoir Modeling and Numerical Simulation for Fractured Sandstone Reservoir in Block Shishen-100 in Shinan Oilfield[D]. Beijing: China University of Mining and Technology,2009.
- [100] 冯建伟,戴俊生,马占荣,等. 低渗透砂岩裂缝参数与应力场关系理论模型[J]. 石油学报,2011,32(4): 664-671.
- FENG Jian-wei, DAI Jun-sheng, MA Zhan-rong, et al. The Theoretical Model Between Fracture Parameters and Stress Field of Low-permeability Sandstones[J]. Acta Petrolei Sinica,2011,32(4):664-671.
- [101] 戴俊生,商琳,王彤达,等. 富台潜山凤山组现今地应力场数值模拟及有效裂缝分布预测[J]. 油气地质与采收率,2014,21(6):33-36.
- DAI Jun-sheng, SHANG Lin, WANG Tong-da, et al. Numerical Simulation of Current In-situ Stress Field of Fengshan Formation and Distribution Prediction of Effective Fracture in Futai Buried Hill[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2014,21(6):33-36.
- [102] 商琳,戴俊生,冯建伟,等. 砂泥岩互层裂缝发育的地层厚度效应[J]. 新疆石油地质,2015,36(1):35-41.
- SHANG Lin, DAI Jun-sheng, FENG Jian-wei, et al. Effect of Strata Thickness on Fracture Development in Sand-mud Interbed[J]. Xinjiang Petroleum Geology,2015,36(1):35-41.
- [103] 赵继龙,王俊鹏,刘春,等. 塔里木盆地克深2区块储层裂缝数值模拟研究[J]. 现代地质,2014,28(6): 1275-1283.
- ZHAO Ji-long, WANG Jun-peng, LIU Chun, et al. Reservoir Fracture Numerical Simulation of Keshen-2 Block in Tarim Basin[J]. Geoscience,2014,28(6): 1275-1283.
- [104] 王俊鹏,张荣虎,赵继龙,等. 超深层致密砂岩储层裂缝定量评价及预测研究:以塔里木盆地克深气田为例[J]. 天然气地球科学,2014,25(11):1735-1745.
- WANG Jun-peng, ZHANG Rong-hu, ZHAO Ji-long, et al. Characteristics and Evaluation of Fractures in Ultra-deep Tight Sandstone Reservoir: Taking Keshen Gasfield in Tarim Basin, NW China as an Example[J]. Natural Gas Geoscience,2014,25(11):1735-1745.
- [105] 岳喜伟,戴俊生,王珂. 岩石力学参数对裂缝发育程度的影响[J]. 地质力学学报,2014,20(4):372-378.
- YUE Xi-wei, DAI Jun-sheng, WANG Ke. Influence of Rock Mechanics Parameters on Development of Fracture[J]. Journal of Geomechanics,2014,20(4):372-378.
- [106] 闫相祯,王志刚,刘钦节,等. 储集层裂缝预测分析的多参数判据法[J]. 石油勘探与开发,2009,36(6): 749-755.
- YAN Xiang-zhen, WANG Zhi-gang, LIU Qin-jie, et al. Reservoir Fracture Prediction by Multi-parameter Criteria Method[J]. Petroleum Exploration and Development,2009,36(6):749-755.
- [107] 徐会永,冯建伟,葛玉荣,等. 致密砂岩储层构造裂缝形成机制及定量预测研究进展[J]. 地质力学学报,2013,19(4):377-384.
- XU Hui-yong, FENG Jian-wei, GE Yu-rong, et al. Research Progress on Mechanism and Quantitative Prediction of Structural Fractures in Tight-sand Reservoirs[J]. Journal of Geomechanics,2013,19(4):377-384.
- [108] 曾联波,史成恩,王永康,等. 鄂尔多斯盆地特低渗透砂岩储层裂缝压力敏感性及其开发意义[J]. 中国工程科学,2007,9(11):35-38.
- ZENG Lian-bo, SHI Cheng-en, WANG Yong-kang, et al. The Pressure Sensitivity of Fractures and Its Development Significance for Extra Low-permeability Sandstone Reservoirs in Ordos Basin[J]. Chinese Engineering Sciences,2007,9(11):35-38.
- [109] 王珂,戴俊生,张宏国,等. 裂缝性储层应力敏感性数值模拟:以库车坳陷克深气田为例[J]. 石油学报,2014,35(1):123-133.
- WANG Ke, DAI Jun-sheng, ZHANG Hong-guo, et al. Numerical Simulation of Fractured Reservoir Stress Sensitivity: A Case from Kuqa Depression Keshen Gasfield[J]. Acta Petrolei Sinica,2014,35(1):123-133.
- [110] 吴斌,唐洪,张婷,等. 两种新颖的离散裂缝建模方法探讨——DFN模型和DFM模型[J]. 四川地质学报,2010,30(4):484-487.
- WU Bin, TANG Hong, ZHANG Ting, et al. An Approach to Discrete Fracture Network Stochastic Modeling—DFN Model and DFM Model[J]. Journal of Sichuan Geology,2010,30(4):484-487.
- [111] WILSON C E, AYDIN A, KARIMI-FARD M, et al. From Outcrop to Flow Simulation: Constructing Discrete Fracture Models from a LIDAR Survey[J]. AAPG Bulletin,2011,95(11):1883-1905.