

复杂碳酸盐岩储层裂缝预测方法对比性研究

祖克威^{1,2}, 程秀申², 罗周亮², 尹楠鑫³, 王楷⁴

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

2. 中国石化中原油田分公司勘探开发科学研究院, 河南 郑州 450018;

3. 重庆科技学院石油与天然气工程学院, 重庆 401331;

4. 河南发展燃气有限公司, 河南 郑州 450018)

摘要: 围绕着复杂碳酸盐岩储层裂缝的预测方法, 以普光地区嘉陵江组为例, 在统计研究区裂缝发育规律的基础上, 分别利用构造曲率法、纵波宽方位各向异性法和有限元法对裂缝进行预测, 比较各个方法预测结果和适用条件。对比结果表明: 曲率法基于几何学理论, 可以定性的分析裂缝发育强度, 无法预测裂缝方位, 该方法适用于基础资料较少、构造简单、褶皱发育的地区; 纵波宽方位各向异性法是地球物理法预测裂缝的首选方法, 可以直接反映有效裂缝的方位和密度, 但是该方法适用于倾斜裂缝和高角度裂缝发育区, 对地震资料质量和处理要求较高; 有限元数值模拟法从正演角度再现了裂缝形成过程, 计算分析裂缝的发育强度和方位, 该方法需要对研究区裂缝形成机理认识充分, 预测结果的精度取决于模型的精细程度。

关键词: 碳酸盐岩储层; 裂缝预测; 曲率法; 宽方位各向异性; 有限元法; 普光地区

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT METHODS FOR FRACTURE PREDICTION IN COMPLEX CARBONATE ROCK RESERVOIR

ZU Kewei^{1,2}, CHENG Xiushen², LUO Zhouliang², YIN Nanxin³, WANG Kai⁴

(1. College of Geoscience, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Exploration and Development Research Institute, Zhongyuan Oilfield Branch Company, SINOPEC, Zhengzhou 450018, Henan, China;

3. College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;

4. Henan Development Gas Co., Ltd., Zhengzhou 450018, Henan, China)

Abstract: Taking Jialingjiang formation in Puguang area as an example, with the fractures development law drawn in the area as a basis, the structural curvature method, S-wave wide azimuth anisotropy method and finite element method were used in fracture prediction, and the results and application conditions of each method were compared. The results show that the curvature method based on the geometry theory could be used to analyze the intensity of fracture development but not the azimuth. It fits in the area with fewer data, simple structure and folds. The S-wave wide azimuth anisotropy method is a preferred geophysics method, which could identify the azimuth and development density of the fracture; however, this method only fits in the area with dipping or high-angle fracture and requires a high quality of seismic data; The finite element method (FEM) could reappear the forming process of fractures in the

way of forward and calculate the development intensity and azimuth, but it requires a good understanding of the fracture formation mechanism in the study area, and the accuracy of the prediction results depends on the precision of the model.

Key words: carbonate rock reservoir; fracture prediction; curvature method; wide azimuth anisotropy; finite element method; Puguang area

0 引言

碳酸盐岩油气藏在全球分布广泛,世界碳酸盐岩储层的油气产量约占油气总产量的60%,是目前全球油气勘探开发领域的重点靶区^[1]。我国碳酸盐岩分布面积近 $300 \times 10^4 \text{ km}^2$,在塔里木盆地、四川盆地、鄂尔多斯盆地和华北地区广泛发育碳酸盐岩储层^[2]。由于储层基质孔隙度和渗透率低,碳酸盐岩无法直接形成储层,但经历了复杂的成岩作用改造后,一方面多期的构造运动,产生大量天然裂缝,可以作为良好的储层空间和运移通道;另一方面,碳酸盐岩溶蚀作用相对强烈,也会形成大量的孔洞型储集空间。由于目前国内外发现的碳酸盐岩储层多数为缝洞型^[3],因此,裂缝的研究是碳酸盐岩储层分析中非常重要的环节^[4-5]。

裂缝作为地球表面最小,分布最广,同时也是最复杂的构造^[6],已有100多年的研究历史,早期利用地表露头、岩心和薄片,立足于几何学和运动学原理,对裂缝的发育类型、力学性质、成因机制方面开展了大量的描述和研究工作^[7],后期随着数值模拟算法的突破和相应软件的推出,与此同时,地球物理资料精度的不断提高和地震资料不同类型属性体的充分应用,使得目前研究重点更多的关注于裂缝参数的描述和定量预测^[8-10]。

从国内外研究现状看,对裂缝的预测方法研究仍处于探索阶段,目前的裂缝预测方法主要体现在两个方面:根据岩心、常规测井和纵波资料,在裂缝有效识别的基础上,以地质规律为指导,通过测井裂缝信息,标定地震资料,充分挖掘和提取裂缝的地震信息,从而利用地震信息预测裂缝分布^[11];另一方面从裂缝的构造成因角度,通过古构造应力场数值模拟和岩石破裂准则预测的发育特征。近些年来发展比较快、应用相对较多的裂缝预测方法主要有构造主曲率法、地震属性分析和基于地质力学理论的应力场数值模拟法,

由于各种预测方法根据其理论假设有着自身的缺陷,在使用过程中,应该充分考虑研究区的实际地质条件和资料准备情况,选择更为合适的方法提高裂缝预测的准确率。

普光气田作为“川气东送”工程重要的气源地,目前主力天然气产层为下三叠统飞仙关组 and 上二叠统长兴组。下三叠统嘉陵江组作为四川盆地重要的产气层,同样也是普光气田未来重要的能源接替层位,属于碳酸盐岩储层。根据目前已钻遇单井资料解释结果表明,好的气测显示层段为高孔隙度下的裂缝发育段,裂缝的发育程度控制了储层的质量。目前针对普光地区嘉陵江组储层裂缝的研究尚未系统展开,因此,文章选取普光地区嘉陵江组复杂碳酸盐岩储层,分别利用构造曲率法、纵波宽方位各向异性法和有限元应力场数值模拟法对嘉陵江组第二段(简称嘉二段(T_1j^2),下同)储层裂缝进行预测,并对三种方法的结果和适用性进行评价,具有重要的理论意义和经济价值。

1 研究区地质概况

1.1 研究区构造特征

普光气田位于四川盆地东北部,其北部和东部分别为米仓山冲断带和大巴山弧形冲断构造带,在构造格局上不仅受四川盆地基底构造变形的控制,又在一定程度上受米仓山、大巴山逆冲断裂构造变形的影响,整个研究区北东向构造发育(见图1)。嘉陵江组作为四川盆地重要的区域性产气层,具有较大的勘探前景,其中嘉二段的油气显示最好,该段构造起伏较大,埋深在2500~5500 m。嘉二该段岩性复杂,包括白云岩、石灰岩、膏岩和泥岩,根据取心井的分析化验资料表明,白云岩的孔隙度普遍 $>2\%$,平均孔隙度为5.8%,石灰岩孔隙度最大为2.18%,平均孔隙度为1.72%,基质渗透率普遍 $<0.25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于特低孔低渗储层。

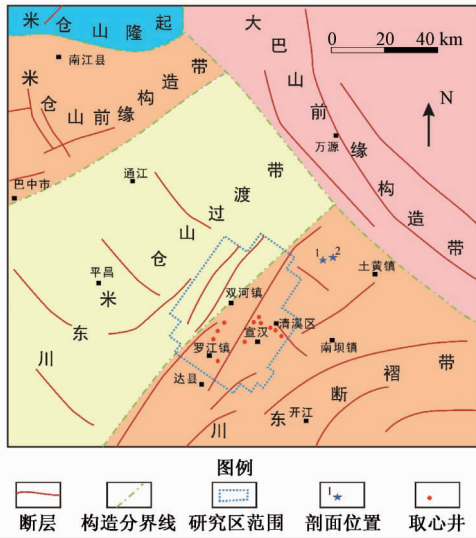


图1 普光地区构造纲要图

Fig. 1 Structure outline map of Puguang area

嘉二段沉积以来, 研究区相继经历了印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动。印支运动时期, 在北北东向挤压作用下, 南秦岭拗拉槽自东向西碰撞关闭, 迫使南秦岭—米仓山—大巴山地区盖层发生褶皱, 形成了大巴山褶皱冲断系^[12], 在普光地区以垂向隆升为主, 水平运动不明显, 没有形成大量的区域裂缝; 燕山运动时期为普光地区构造格架形成的重要时期, 燕山运动早期相对较为平静, 进入燕山运动晚期后, 由于秦岭造山带的挤压, 普光地区受到北西—南东向挤压作用, 以水平运动为主, 形成了普光地区中西部的北东向主干断层, 并引起普光中东部地区发生抬升, 这一时期在普光地区形成了北西向和近南北向裂缝, 主要以北西向为主, 同时裂缝充填现象较为明显; 喜马拉雅运动时期为定型期和改造期, 可分为喜马拉雅运动早期阶段和喜马拉雅运动晚期阶段, 喜马拉雅运动早期普光地区受到西侧龙门山北西—南东向强烈推挤作用, 进一步加强了燕山运动晚期褶皱变形区的形变和改造, 在与燕山运动晚期近于相同的应力方向下, 一方面引起了燕山运动晚期裂缝的重新活动, 同时也产生了新的北西向和近南北向裂缝; 进入喜马拉雅运动晚期, 受到欧亚板块的俯冲作用和大巴山造山带强烈隆升的共同作用, 普光地区最大主应力方向变为北东—南西向, 研究区发生进一步改造, 主要在清溪场地区形成北西向断层, 同时形成北东向和近南北向裂缝, 其中, 北东向裂缝最为发育, 这个时期形成的裂缝充填性差, 有效性好, 对储

层的贡献最大。

1.2 研究区裂缝发育规律

结合野外露头实测结果, 利用岩心和薄片资料将普光地区嘉陵江组天然裂缝分为构造裂缝和非构造裂缝, 其中构造裂缝可以进一步分为区域性裂缝和局部构造裂缝, 区域性构造裂缝为在一定的区域内发育的同地层高角度或垂直相交的剪切裂缝, 产状稳定, 形成于地层变形初期, 可以用来恢复其形成时期的主应力方位; 局部构造裂缝不具有区域性特征, 在不同地区、不同构造类型和样式以及不同构造部位, 裂缝的产状、性质和规模等方面均不相同, 这种裂缝可以进一步分为断层相关裂缝和褶皱相关裂缝。

对川东北宣汉县渡口段和河口段剖面开展嘉陵江组野外地质裂缝实测, 统计结果表明, 裂缝主要发育有北东—南西向、东西向和南北向3组。利用裂缝间距指数法, 即野外统计裂缝所在的力学层厚度与该组系裂缝平均间距的比值, 对3组裂缝发育程度进行评价计算, 结果表明北东—南西向裂缝最为发育, 其次为东西向(见图2)。

薄片分析结果表明, 构造裂缝以高角度—近于直立裂缝为主, 但裂缝高度通常小于0.6 m; 其次发育有一些低角度裂缝, 裂缝高度通常不超过0.3 m(见图3)。11口井的岩心统计表明, 研究区有效裂缝和无效裂缝的开度通常小于300 μm , 主要集中在10~60 μm (见图4)。

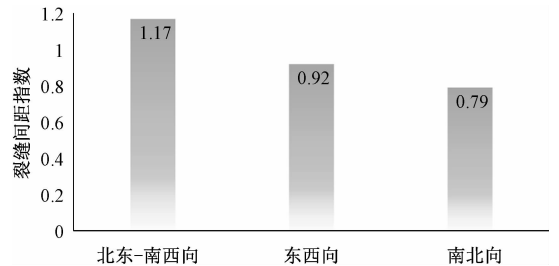


图2 不同组系裂缝间距指数

Fig. 2 The fracture spacing indexes of different sets

2 储层裂缝预测研究

2.1 构造曲率法

利用构造主曲率法预测裂缝是由 Murray G H 于1968年提出^[13], 其原理为当岩层在挤压作用下发生弯曲变形, 褶皱中性面以上的外凸部位产生拉张应力, 进而产生的褶皱相关裂缝(见图5)。

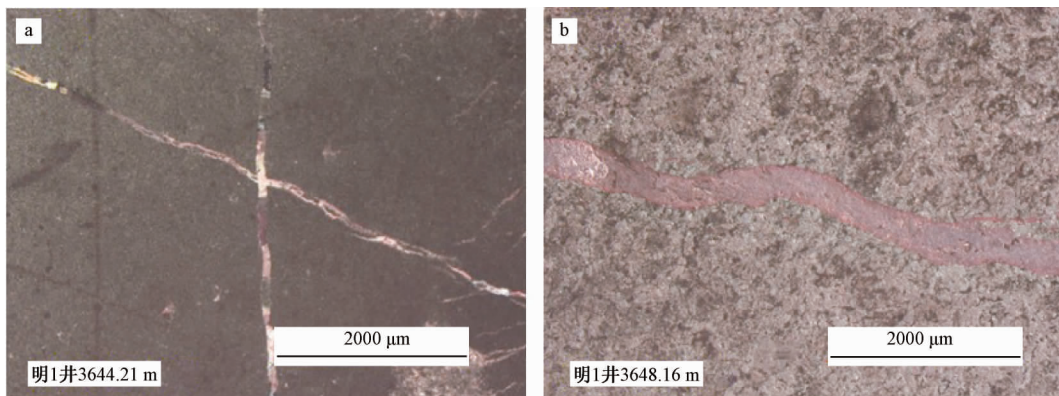


图3 普光地区薄片裂缝发育特征

Fig. 3 The development characteristics of fractures in thin sections from Puguang area

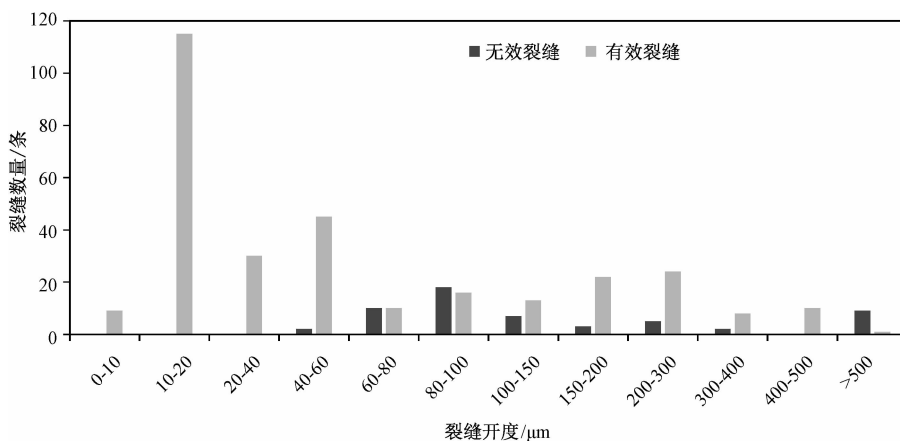


图4 薄片统计不同类型裂缝开度分布图

Fig. 4 The histogram of different types of fractures in thin section

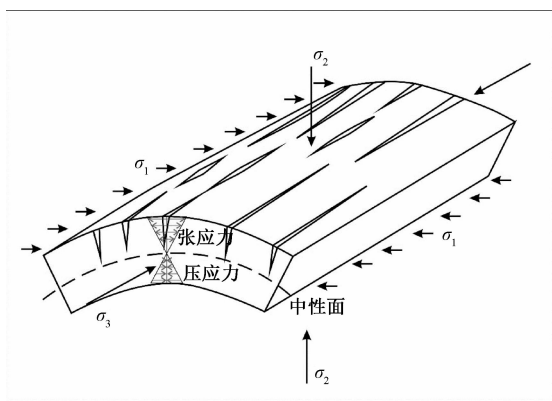


图5 构造主曲率法预测裂缝原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the principle of structural principal curvature method for predicting fracture

当岩层受到的应力越大, 变形就越严重, 具有更高的曲率值, 裂缝的发育程度更高。曲率值包括主曲率、高斯曲率、极大与极小曲率、最大正曲率、最小负曲率、倾向曲率和走向曲率等。目前, 用于预测裂缝的曲率主要为曲率和高斯曲

率^[14-17]。Staples 曾尝试以最大正曲率和最小负曲率直接对裂缝进行预测, 其精度达到了裂缝预测的要求^[18]。

利用曲率法预测裂缝需要满足以下条件: ① 储层厚度不大且横向稳定; ② 预测的构造裂缝为岩层受到构造应力形成的, 而不是侵蚀和岩石体积收缩等因素; ③ 岩层发生弹性和脆性变形, 不考虑岩层发生的塑性流动。

目前国内学者认为利用高斯曲率可以更真实地反映构造形态, 并在一些地区取得了较好的效果。但是, 在选择曲率类型时, 应充分考虑研究区的构造形态, 对于非长轴圆柱状褶皱, 利用高斯曲率可以较好地反映出褶皱枢纽方位和产状的变化, 尤其在鞍状构造中有着较好的应用效果; 但是对于圆柱状和长轴褶皱, 高斯曲率在褶皱枢纽处的构造几乎为 0, 主曲率可以更好的反映出真实的曲率, 进而可以分析裂缝发育区。

由于普光地区早期形成的北东向构造控制并

限制了晚期北西向构造的发育, 在普光地区多发育北东向圆柱状长轴背斜, 因此, 文中利用主曲率对普光地区嘉二段储层裂缝的发育程度进行分析。

在对断层处数据处理校正后, 对嘉二段顶面构造主曲率进行计算 (见图6), 不难发现, 曲率高值区的展布规律严格受断层的展布方向控制, 同断层展布方位一致, 且位于断裂带前的上盘。中部和西部地区曲率高值区主要为北东向展布, 东部地区的曲率高值区呈北西向展布。

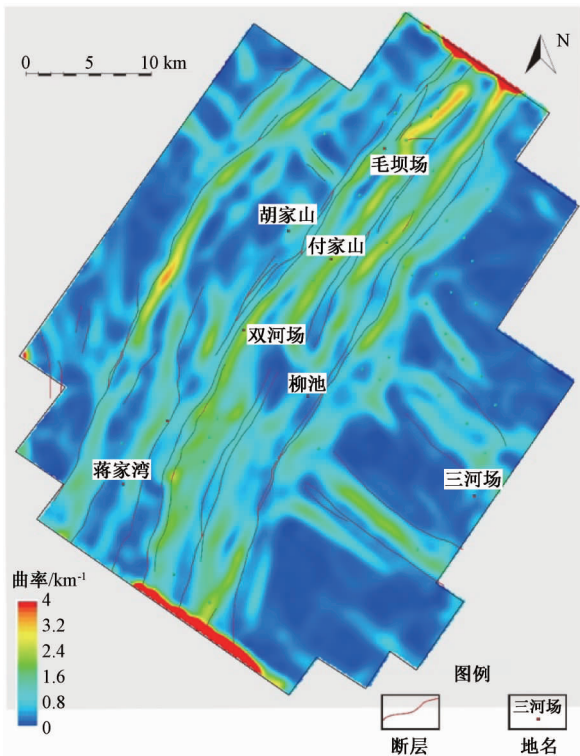


图6 普光地区嘉二段最大主曲率分布图

Fig. 6 The distribution map of maximum principal curvature in the second member of Jialingjiang Formation, Puguang area

定义研究区单井解释的嘉二段裂缝发育段总长度与该井嘉二段层厚的比值为裂缝发育强度, 该值无量纲, 可以反映不同地区裂缝发育程度的相对强弱。将计算的曲率值同裂缝发育强度对比, 结果表明, 整体上各单井裂缝发育强度同构造主曲率值相关性较差 (见图7a), 当构造主曲率值大于 1.1 km^{-1} 时, 即地层变形至一定程度时, 裂缝发育强度同构造主曲率值大致呈线性相关, 具有较高的相关系数 (见图7b)。

根据曲率法原理可知, 预测的裂缝为褶皱伴生裂缝中的纵张裂缝, 这种类型的裂缝发育规模有限。在挤压作用强烈的西部, 岩层变形程度较大时, 这种类型的裂缝才会形成一定的规模^[19], 利用曲率法对裂缝进行研究时, 通常会存在一个曲率门限值^[14], 当曲率达到这个值时, 由于岩石发生严重形变, 会体现出裂缝发育强度同曲率值的相关性, 当达不到这个值时, 主要为区域性共轭剪切裂缝。

构造曲率法通常用于勘探早期阶段, 适用于构造较为简单的褶皱地区, 多为定性的分析裂缝发育区, 在基础资料相对较少的地区, 曲率法的优势较为明显^[20]。

2.2 纵波宽方位各向异性法

随着地震资料处理技术的发展, 相关学者尝试利用包含方位信息的叠前道集数据对岩层的非均质性进行分析, 随后发展出纵波宽方位各向异性法识别裂缝。其原理是当地下存在裂缝或流体等介质时会引起方位各向异性, 纵波在传播过程中出现旅行时延迟、振幅降低和频率衰减等异常现象。通常, 垂直于裂缝走向方位的地震能量衰减较快, 且裂缝越发育, 能量衰减现象越明显。对其方位各向异性的分析就是将每个采样点上不

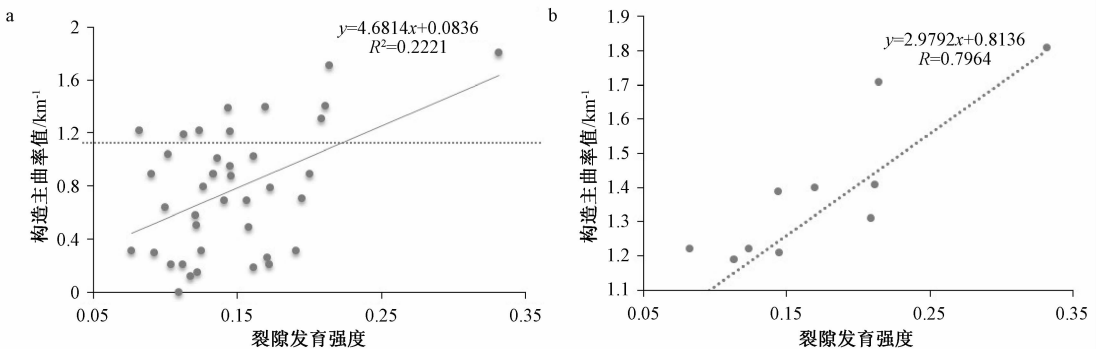


图7 主曲率法计算结果同裂缝发育强度对比图

Fig. 7 The contrast map of the calculating result by principal curvature and fracture development intensity

同方位角的地震信号进行椭圆拟合,长短轴的比值代表了该采样点各向异性的大小,长轴方向代表了裂缝发育方位。目前,国内外研究人员使用的模型为 Rüger 提出的层状垂直裂缝模型^[21],经过近二十年的发展,该模型从过去单一层的 HTI (Traverse Isotropy with Horizontal axis) 介质模型,逐步发展到包含 HTI 裂缝块的多层模型^[22-23]。

在进行预测前,首先要进行分方位角数据处理,其原则是:①所选方位角的能量大体一致;②所选方位角的覆盖次数大体一致;③所选方位角包含的近中远偏移距的数据量大体一致。

选取普光地区东北部作为计算的工区范围,最终方位角的选取定为扇区 1 (0°~82°)、扇区 2 (82°~132°)、扇区 3 (132°~180°)。利用方位振幅属性对裂缝属性进行分析和计算,结果表明,研究区裂缝发育区主要集中在断裂带附近,裂缝方位以北东向和北西向裂缝为主,在裂缝发育强度较低的地区,裂缝方位主要表现为一组北东向裂缝(见图 8)。

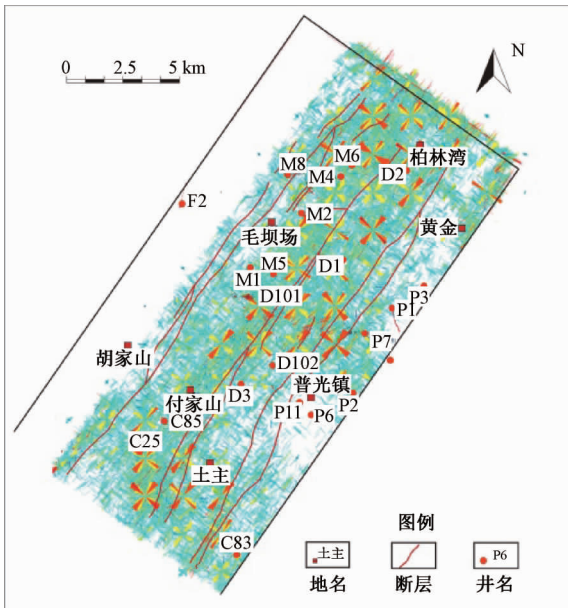


图 8 纵波宽方位各向异性裂缝分析结果

Fig. 8 The analysis result of fractures based on S-wave azimuth anisotropy

利用分析结果同单井裂缝发育强度进行对比(见图 9),结果表明,两者在整体的趋势上具有正相关性。同样,当地区全井段取心资料较丰富时,可以通过建立破裂强度和裂缝线密度的相关性,得到平面裂缝面密度的展布规律。

叠前宽方位法预测裂缝是在综合考虑了各个

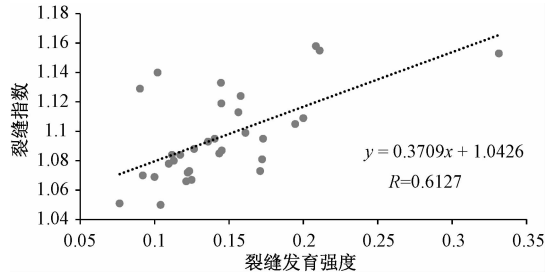


图 9 方位各向异性分析的裂缝指数和单井裂缝发育强度关系图

Fig. 9 The relationship map between the fracture index calculated by azimuth anisotropy and fracture development intensity in single well

裂缝的主控因素下,通过反演的方法识别现有的张开有效的裂缝。该方法的预测结果较为直观,即可以反映有效裂缝的发育强度,又可以反映有效裂缝的方位,是科研工作者利用地球物理方法预测裂缝的首选方法。

该方法要求地震数据体中含有方位角信息,最大程度的保持储层振幅、频率、相位和波形等信息,这种要求和常规基于构造解释的地震资料处理要求有着较大的区别。根据宽方位各向异性的原理,当研究区以低角度或水平裂缝发育为主,或者网状裂缝发育时,各向异性法无法使用。利用该方法预测裂缝的准确程度取决于地震资料的质量和分方位角数据体的个数。

2.3 有限元数值模拟法

储层裂缝形成于地质历史时期,在古地应力作用下形成。古地应力状态和岩石内摩擦角决定了构造裂缝的方位和发育程度^[24]。而现今地应力由于其构造作用相对较弱,无法形成新的裂缝,但对裂缝的有效性产生了影响^[6]。因此,在研究区构造裂缝的形成机理分析和构造演化恢复的基础上,利用有限元法对裂缝形成各个时期的古构造应力场进行模拟,并结合岩石破裂准则对裂缝的破裂程度进行计算,进而定量地评价构造裂缝的分布。有限元法的基本原理包括两个部分:一是对研究区的地质模型进行离散处理,即剖分,将研究区整体根据计算精度划分为有限个彼此相连的单元,单元与单元之间以面接触或者线接触,以代表原工作区实体;二是对各个单元的运算,即利用函数对各个单元求近似解,最后把这些单元上的近似解结合形成工作区整体的解。

对裂缝形成机理分析是有限元法预测裂缝的

基础, 根据野外露头统计区域性共轭剪切裂缝的方位, 以恢复裂缝形成期次和古地应力方向, 结果表明, 研究区裂缝形成时期古地应力方向为两个, 即北东向和北西向, 反映裂缝的形成期次至少为两期; 利用不同层位的岩心柱塞样开展声发射试验, 以获取古地应力大小和期次, 根据不同层位的 Kaiser 效应点, 表明自嘉二段沉积以来, 发生了 3 次破裂事件; 利用裂缝充填包裹体均一温度的测试结果结合埋藏史, 来恢复裂缝形成期次和时间, 结合普光地区剖面构造演化分析, 嘉二段裂缝形成主要发生在 3 个时期: 燕山运动晚期的北西—南东向构造挤压运动、喜马拉雅运动早期北西西—南东东向构造挤压作用和喜马拉雅运动晚期北东—南西向的构造挤压作用。

在普光地区嘉二段三个时期裂缝形成的构造格架基础上, 建立地质模型, 以岩石力学测试和测井数据计算结果为力学参数, 建立力学模型, 由于在模拟过程中通常以一个点代表垂向上一段深度的力学参数, 因此, 该力学参数以等效力学参数表示^[25]。根据计算得到的岩石力学参数分布, 以大于 54 GPa, 50 ~ 54 GPa, 46 ~ 50 GPa, 小于 46 GPa 的标准, 将地质模型分成不同的力学单元。以声发射试验计算得到的裂缝各形成时期的应力值作为应力加载大小, 以裂缝形成的三个时期的地应力方向为加载方向对模型加载, 计算各时期的最大、最小主应力。

根据岩石的破裂行为, 利用格里菲斯准则对作用在裂缝面上的张应力进行计算, 用张应力与抗张强度的比值作为张破裂率, 利用库伦—莫尔准则对作用在裂缝面上的剪应力进行计算, 用剪应力与抗剪强度的比值作为剪破裂率, 然后根据岩心中张裂缝和剪裂缝所占比例, 进行加权分析, 得到各个部位的总破裂率^[16]。最后, 将预测结果同单井的裂缝发育强度进行比对, 当结果符合率较低时, 修改力学参数和加载方式, 反复迭代直至模拟结果收敛 (见图 10)。对比总破裂率的模拟结果同单井裂缝发育强度计算结果 (见图 11), 结果表明, 数值模拟预测结果同单井统计的裂缝发育强度趋势上较为一致, 相关系数为 0.7435, 符合率较高。当研究区全井段取心资料较多时, 可以建立破裂率和裂缝密度的相关性分析, 进而可以刻画裂缝密度的平面展布。

有限元法是从地质力学角度出发, 充分考虑

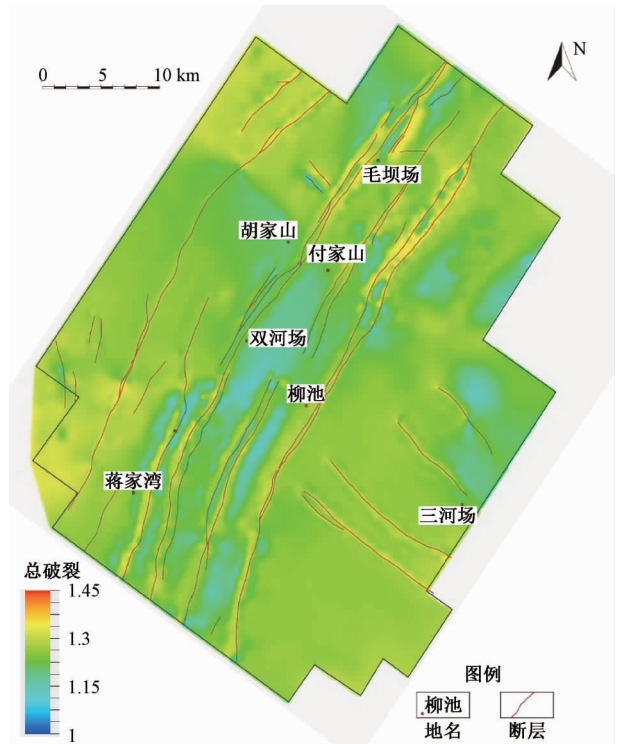


图 10 裂缝预测总破裂分布图

Fig. 10 The distribution map of total fracture prediction

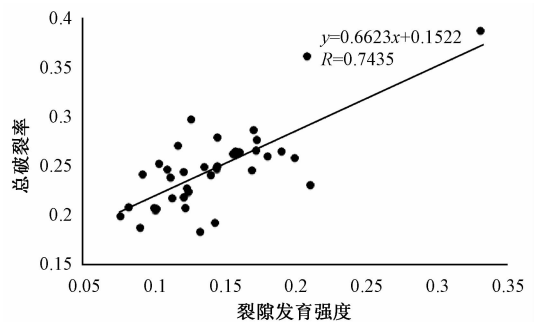


图 11 数值模拟预测裂缝破裂率和单井裂缝发育强度关系图

Fig. 11 The map of relationship between the fracture rates predicted by numerical simulation and fracture development intensity in single well

了断层、沉积相、岩性和应力的前提下通过正演手段对不同类型的裂缝分期次进行计算和分析, 方法较容易理解, 尽管预测结果在整体上同单井裂缝密度一致, 但是, 仍然存在明显误差, 不难发现该方法有以下几点不足: ①利用有限元法预测裂缝时, 对研究区构造裂缝的形成机理要有充分的认识; ②力学模型为非连续模型, 因此, 将单元划分的越细, 精度越高, 但是运算速度越慢;

③模型的边界条件无法准确地确定,断裂带内的力学参数的确定依据经验反复调试;④仅用该方法无法确定裂缝的充填性和有效性,需要结合成像测井资料和现今应力场状态进行进一步分析。尽管如此,该方法适用性强,可以应用在不同的构造背景下,是目前利用地质手段定量预测裂缝最为常用的方法。

3 结论

研究通过分析总结普光地区嘉陵江组第二段碳酸盐岩储层裂缝发育规律,在此基础上对比了构造曲率法、纵波宽方位各向异性分析法有限元数值模拟法在裂缝预测中各自的优缺点。

(1) 普光地区嘉二段构造裂缝发育有北东—南西向,东西向和南北向3组,其中北东—南西向裂缝最为发育。裂缝以高角度—直立裂缝为主,缝高通常小于0.6 m,有效裂缝和无效裂缝的开度通常小于300 μm ,主要集中在10~60 μm 。

(2) 曲率法预测裂缝基于几何学理论,对资料的要求较低,以高曲率值反映裂缝发育区,但是该方法的理论基础主要为纵张裂缝的预测,无法分析裂缝发育方位,地震资料品质和层数据处理方式影响预测结果。该方法主要应用在勘探或开发初期,地质和地球物理的资料相对较少。

(3) 利用纵波宽方位各向异性法预测裂缝直接为有效裂缝,不用考虑裂缝的多期次性,可以获取有效裂缝发育方位和程度,但是该方法对地震数据采集要求高,同时在资料处理时,需要保留方位信息,各向异性的响应特征具有多解性。该方法要求研究区具有保留宽方位信息的叠前地震数据体,同时倾斜裂缝和高角度裂缝较为发育。

(4) 有限元数值模拟法基于地质学思想和岩石力学理论,从正演角度还原裂缝的形成过程,计算获取裂缝发育方位和发育程度,但该方法的使用需要对研究区裂缝形成机理的充分认识,计算得到的裂缝为构造裂缝,未考虑是否有效,其准确程度取决于模型的精度。

参考文献/References

[1] 范嘉松. 世界碳酸盐岩油气田的储层特征及其成藏的主要控制因素 [J]. 地质前缘, 2005, 12 (3): 23~30.
FAN Jiasong. Characteristics of carbonate reservoirs for oil and gas fields in the world and essential controlling factors for their

formation [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12 (3): 23~30. (in Chinese with English abstract)

[2] 赵文智, 汪泽成, 胡素云, 等. 中国陆上三大克拉通盆地海相碳酸盐岩油气藏大型化成藏条件与特征 [J]. 石油学报, 2012, 33 (S2): 1~10.
ZHAO Wenzhi, WANG Zecheng, HU Suyun, et al. Large-scale hydrocarbon accumulation factors and characteristics of marine carbonate reservoirs in three large onshore cratonic basins in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33 (S2): 1~10. (in Chinese with English abstract)

[3] 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]. 地质前缘, 2013, 20 (5): 188~195.
PAN Wenqing, HOU Guiting, QI Yingmin, et al. Discussion on the development models of structural fractures in the carbonate rocks [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20 (5): 188~195. (in Chinese with English abstract)

[4] 邬光辉, 刘胜, 汪海, 等. 塔中地区奥陶系碳酸盐岩裂缝特征与评价 [J]. 勘探家, 1999, 4 (4): 48~54.
WU Guanghui, LIU Sheng, WANG Hai, et al. Characteristics and evaluation of Ordovician carbonate rock in Tazhong area [J]. Petroleum Explorationist, 1999, 4 (4): 48~54. (in Chinese with English abstract)

[5] 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. Research on the forecast of reservoir structural fractures [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14 (6): 9~13. (in Chinese with English abstract)

[6] Pollard D D, Aydin A. Progress in Understanding Jointing over the past century [J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100: 1181~1204

[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 Lianbo. The formation and distribution of fractures in low permeability sandstone reservoir [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)

[8] 曾联波, 柯式镇, 刘洋. 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 Lianbo, KE Shizhen, LIU Yang. The study method on low permeability oil field reservoir fracture [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010. (in Chinese)

[9] Connolly P, Cosgrove J. Prediction of fracture-induced permeability and fluid flow in the crust using experimental stress data [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83 (5): 757~777.

[10] Laubach S E. A method to detect natural fracture strike in sandstones [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81 (4): 604~623.

[11] Jamison W R. Quantitative evaluation of fractures on Monkshood anticline, a detachment fold in the foothills of western Canada [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81 (7): 1110~1132.

[12] 唐大卿, 汪立君, 曾韬, 等. 川东北宜汉一达县地区构造演化及其对油气藏的改造作用 [J]. 现代地质, 2008, 22 (2): 230~238.

- TANG Daqing, WANG Lijun, ZENG Tao, et al. Tectonic evolution function to oil and gas pool's reformation in Xuanhan-Daxian area, northeastern Sichuan Basin [J]. *Geoscience*, 2008, 22 (2): 230 ~ 238. (in Chinese with English abstract)
- [13] Murray G H. Quantitative fracture study - Sanish Pool, Mckenzie County, North Dakota [J]. *AAPG Bulletin*, 1968, 52 (1): 57 ~ 65.
- [14] 彭红利, 熊钰, 孙良田, 等. 主曲率法在碳酸盐岩气藏储层构造裂缝预测中的应用研究 [J]. *天然气地球科学*, 2005, 16 (3): 343 ~ 346.
- PENG Hongli, XIONG Yu, SUN Liangtian, et al. The research on main curvature method application in carbonate gas reservoir's structural fracture prediction [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16 (3): 343 ~ 346. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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 Zhiyong, ZENG Zuoxun, LUO Wenqiang. A new approach to predicting fractures using principal curvature [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30 (6): 83 ~ 85. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘升贵, 安里千, 薛茹, 等. 运用高斯曲率法预测煤层天然裂隙发育区 [J]. *中国矿业大学学报*, 2004, 33 (5): 573 ~ 577.
- LIU Shenggui, AN Liqian, XUE Ru, et al. Application of Gaussian curvature method in forecasting natural fracture zones in coal seam [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004, 33 (5): 573 ~ 577. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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 Shangru. Application comparison of two curvature methods for predicating reservoir fractures [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2003, 22 (4): 71 ~ 74. (in Chinese with English abstract)
- [18] Staples E, Marfurt K J, Reches Z. Fracture analysis using 3D seismic attributes in the Hunton Limestone, Oklahoma, USA [J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2010*, 2010, 1516 ~ 1520.
- [19] 吴胜和. 储层表征与建模 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- WU Shenghe. *Reservoir characterization & modeling* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [20] 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 Zhijun, ZHANG Ying, DOU Yu, et al. Fracture prediction in tight sandstone reservoir with curvature method [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2013, 36 (6): 57 ~ 63. (in Chinese with English abstract)
- [21] Rüger A. P-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry [J]. *Geophysics*, 1997, 62 (3): 713 ~ 722.
- [22] Ekanem A M, Wei J, Li X Y, et al. P-wave attenuation anisotropy in fractured media: a seismic physical modelling study [J]. *Geophysical Prospecting*, 2013, 61 (S1): 420 ~ 433.
- [23] Mahmoudian F, Margrave G F, Wong J, et al. Azimuthal amplitude variation with offset analysis of physical modeling data acquired over an azimuthally anisotropic medium [J]. *Geophysics*, 2015, 80 (1): C21-C35.
- [24] 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 Xingui, DENG Hongwen, CAO Chengjie, et al. The methods for quantitative prediction and evaluation of structural fissures in reservoirs [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2003, 24 (2): 175 ~ 180. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王珂, 戴俊生, 冯阵东, 等. 砂泥岩间互地层等效岩石力学参数计算模型及其应用 [J]. *地质力学学报*, 2013, 19 (2): 143 ~ 151.
- WANG Ke, DAI Junsheng, FENG Zhendong, et al. Calculating model of equivalent rock mechanical parameters of sand-mud interbed and its application [J]. *Journal of Geomechanics*, 2013, 19 (2): 143 ~ 151. (in Chinese with English abstract)