

doi: 10.13745/j.esf.2016.02.008

页岩储层构造应力场模拟与裂缝分布预测方法及应用

丁文龙^{1,2,3}, 曾维特⁴, 王濡岳^{1,2,3}, 久凯⁵, 王哲⁶, 孙雅雄^{1,2,3}, 王兴华^{1,2,3}

1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083
2. 中国地质大学(北京) 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083
3. 中国地质大学(北京) 页岩气资源战略评价国土资源部重点实验室, 北京 100083
4. 海南省地质调查院, 海南 海口 570206
5. 北京京能油气资源开发有限公司, 北京 100022
6. 山东科瑞控股集团有限公司, 山东 东营 257000

DING Wenlong^{1,2,3}, ZENG Weite⁴, WANG Ruyue^{1,2,3}, JIU Kai⁵, WANG Zhe⁶,
SUN Yaxiong^{1,2,3}, WANG Xinghua^{1,2,3}

1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China
2. Key Laboratory for Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Abundance Mechanism (Ministry of Education), China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China
3. Key Laboratory for Shale Gas Exploration and Assessment (Ministry of Land and Resources), China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China
4. Hainan Geological Survey, Haikou 570206, China
5. Beijing Jingneng Petroleum Corporation Limited, Beijing 100022, China
6. Shandong Kerui Group Holding Co., Ltd, Dongying 257000, China

DING Wenlong, ZENG Weite, WANG Ruyue, et al. Method and application of tectonic stress field simulation and fracture distribution prediction in shale reservoir. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(2): 063-074

Abstract: Fracture is a key factor for the enrichment and high production of shale gas. Compared with other types of reservoirs, shale reservoir is characterized by a relatively strong ductility and multi-types of structural and non-structural fractures such as high dip-angle tension-shear fracture, low dip-angle slip fracture and bedding fracture. According to the characteristics of shale reservoirs and fractures from the perspective of geological origin, a method of tectonic stress field simulation and fracture distribution prediction was put forward and effectively applied in the Lower Silurian Longmaxi shale in the southeastern Chongqing area, the emphasis of which is the establishment of accurate geological, mechanical and mathematical Models. By the use of uniaxial and triaxial compression and acoustic emission tests, the paleo-stress, present-day stress and mechanical data were obtained to conduct a numerical simulation of the tectonic stress field. The rationality of the established models was examined and calibrated by the comparison of the simulation results and actual geological data. For the particular existence of tension and shear fractures in shale, Griffith and Mohr-Coulomb criteria were respectively used to calculate the tension and shear rupture rates. According to the proportions of the tension and shear fractures, a comprehensive rupture rate was introduced. By the combination of the comprehensive rupture rate and other dominant controlling factors of fractures, such as total organic carbon (TOC) and brittle mineral contents, the fracture developmental coefficient was proposed as an ultimate evaluating index to characterize the developmental degree and distribution of fractures. This

收稿日期: 2015-09-15; 修回日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41372139, 41072098); 国家油气重大专项专题(2016ZX05046-003, 2011ZX05018-001-002, 2011ZX05033-004)

作者简介: 丁文龙(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事石油构造分析与控油气作用、非常规油气构造和裂缝及其与含气性关系研究等方面的教学与科研工作。E-mail: dingwenlong2006@126.com

method not only provides a new technical approach for the optimization of ‘sweet spot’, but also has important reference value for the design of horizontal wells and fracturing programs.

Key words: southeast Chongqing area; Longmaxi Formation; shale reservoir; tectonic stress field simulation; fracture prediction

摘要:裂缝是页岩气富集高产的关键因素。页岩储层相对于其他类储层,其塑性相对较强,非构造裂缝比较发育。构造裂缝除了高角度的张性裂缝以外,还发育有较多近水平的层理缝和低角度构造滑脱缝等。针对页岩储集层的特点和裂缝发育特征,从地质成因的角度,明确了页岩储层构造应力场模拟数值模拟与裂缝分布预测的方法,其核心在于建立模拟地区目的层的精确地质模型、力学模型和计算模型。利用页岩的单轴和三轴压缩变形试验和声发射古、今地应力测试结果进行应力场数值模拟,获得研究区构造应力场分布,将应力场模拟果与实际地质资料对比分析,进一步检验校正已建立地质模型的合理性;在此基础上,针对富有机质页岩主要发育张裂缝和剪裂缝的特殊性,分别采用格里菲斯、库伦-摩尔破裂准则计算页岩储层张破裂率、剪破裂率,依据张裂缝与剪裂缝所占的比例关系,求取页岩储层的综合破裂率,据此分别定量表征页岩储层中张裂缝、剪裂缝和构造裂缝的发育程度及分布特征;并在全面考虑影响页岩储层裂缝发育程度的综合破裂率、脆性矿物含量、有机碳含量多种主控因素的基础上,进一步提出了页岩“裂缝发育系数”作为最终判别指标,综合定量表征页岩储层裂缝的发育程度和预测裂缝的分布,页岩裂缝发育系数越大,裂缝发育程度则越高。该方法在我国渝东南地区下志留统龙马溪组页岩储层裂缝分布预测中得到了有效应用。此不仅为页岩气甜点优选提供了一种新的技术方法,而且模拟成果对页岩气水平井和压裂改造方案的设计具有重要的参考价值。

关键词:渝东南地区;龙马溪组;页岩储层;构造应力场模拟;裂缝预测

中图分类号:P618.130.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2016)02-0063-12

对于低孔、低渗致密性页岩储层而言,基质孔隙已基本不具备有效渗滤条件,因此,裂缝不仅是油气的主要储集空间类型,也是油气运移的有效渗滤通道^[1-14]。北美的海相富有机质页岩层系中天然气勘探开发的巨大成功亦表明,如果天然裂缝发育或经过人工压裂改造后能够产生大量裂缝系统,泥质烃源岩则完全可以成为页岩气聚集的有效储集层^[1-5]。裂缝对储层空间,特别是对渗流能力的改善,是页岩油气高产的关键。国内外大量的勘探开发实际资料显示,致密储层裂缝发育程度与产能大小密切相关,如北美地区古生界海相页岩裂缝发育程度与总含气量和游离气量呈正相关关系,表现为页岩裂缝越发育,其含气量越大,产气量越高,页岩裂缝发育带内的页岩气勘探成功率越高,我国四川盆地古生界海相富有机质页岩层中的天然气显示与产能均与裂缝发育密切相关^[6-10]。

构造运动是页岩储层裂缝形成的外因,它控制了裂缝的组系、延伸方向、产状及力学性质,对于经历过强烈构造运动的地区,构造裂缝分布范围广、规律性强,对页岩储集空间贡献更大,但同时多期次构造运动叠加使得裂缝分布更加复杂,大大增加了裂缝分布预测工作的难度。在对构造裂缝进行识别及分布预测的过程中,除了要分析其构造演化、古今地应力的方向和大小,更要注重页岩自身的特殊性对

裂缝形成发育及分布的影响。页岩储层与砂岩和碳酸盐岩储层相比较,在地下埋藏条件下,其塑性相对较强,富有机质页岩中非构造裂缝比较发育。而构造裂缝除了高角度的张性裂缝以外,还发育有较多的近水平层理缝、低角度构造滑脱缝等^[6-16]。国内外研究结果表明:高有机碳含量与高脆性矿物含量的页岩储层在同样构造应力作用下更容易形成构造裂缝,水力压裂效果好^[1-15]。因此,针对页岩这类非常规油气储集层的特点和构造裂缝发育特征^[7-14],从地质成因的角度,明确了页岩气储层构造应力场模拟的思路和主要内容,引入了张破裂率和剪破裂率及综合破裂率,分别定量表征页岩储层中张裂缝、剪裂缝及构造裂缝的发育程度及分布特征^[17-18]。并在全面考虑了影响页岩储层裂缝发育程度的多种主控因素的基础上,进一步提出了页岩“裂缝发育系数”作为最终综合判别指标,定量表征页岩储层裂缝的发育程度和预测裂缝的分布,裂缝发育系数越大,则页岩裂缝发育程度越高。该方法在我国渝东南地区下志留统龙马溪组页岩储层裂缝分布预测中进行应用,取得了很好的效果,这不仅为非常规页岩气储层的裂缝分布预测与甜点优选提供了一种新的技术方法,而且模拟成果对页岩气水平井和压裂改造方案的设计具有重要的参考价值,有助于加快我国页岩气的勘探开发进程。

1 构造应力场数值模拟方法

运用有限元方法对构造应力场进行数值模拟,能够预测构造裂缝的平面分布。在明确构造应力期次、方向、大小、作用时间的前提条件下,利用地质分析、实验测试和计算机数值模拟等方法对构造应力场进行定量研究。该方法的核心在于建立模拟地区的精确地质模型、力学模型和计算模型,并采用模拟层段实测的岩石力学性质参数和古、今地应力值进行应力场数值模拟,获得研究区构造应力场分布。将应力场模拟结果与实际地质资料对比分析,进一步检验校正已建立地质模型的合理性。在此基础上,针对富有机质页岩主要发育张裂缝和剪裂缝的特殊性,分别采用格里菲斯、库伦-摩尔破裂准则计算页岩储层张破裂率、剪破裂率,并依据张裂缝与剪裂缝所占的比例关系,求取页岩的综合破裂率,据此分别定量表征页岩储层中张裂缝、剪裂缝和构造裂缝的发育程度及分布特征。在考虑到影响页岩裂缝发育的多种主要因素后,提出了页岩裂缝发育系数,用于综合定量预测裂缝发育程度及分布有利地区(图1),为研究区页岩裂缝性储层的油气勘探提供构造地质依据。由此可见,构造应力场模拟是目前裂缝分布预测较为成熟的有效方法之一,已被广泛应用于储层裂缝的定量预测之中^[17-28]。

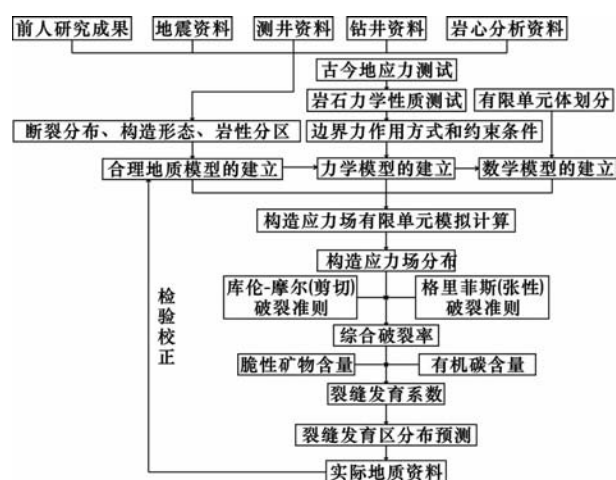


图1 页岩储层构造应力场数值模拟与裂缝分布预测流程图
Fig. 1 Flow diagram of tectonic stress field numerical simulation and fracture distribution prediction in shale reservoir

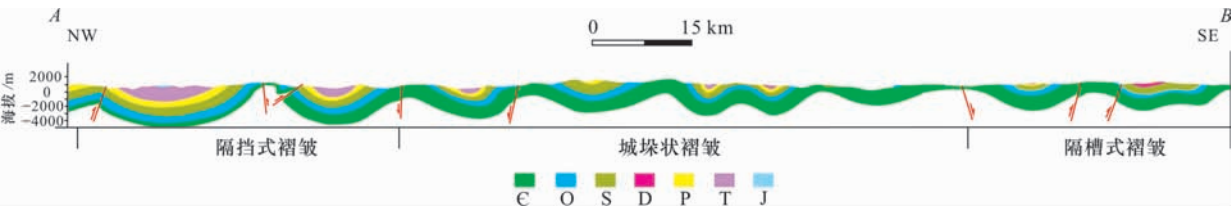
1.1 地质模型

由于地质体是一个十分复杂的地下岩石块体,其复杂性大大增加了数值模拟的难度。首先,地壳

中各种地质构造类型、形态是在漫长地质历史演化过程中形成的,这种复杂的地质演化过程不可能恢复。在模拟对象既确定又模糊的条件下,只能考虑用相对静止、简易的观点及方法去处理地质体的问题,计算过程中的边界条件和具体参数难以准确赋值。其次,目的层构造涉及范围大(一般大于几十平方公里)、埋藏深,岩石物理性质和地质构造特征随着影响因素的变化而不断变化,不同地区差异性较大,就同一地区而言,同一目的层系其特征也存在着差异。虽然目的层或地质岩体常表现出复杂的非均质性,但是在具体的计算过程中难以考虑过于复杂的非均质岩体,只能采用均质的岩体去替代实际的地质体,否则,将难以控制数值模拟中的模型误差。某地质历史时期所形成的构造后期会受到多期次构造运动的改造,现今的构造特征是多期次构造运动作用的综合反映,其构造形成受最近一期的应力场影响相对较大。

地质模型主要包括区域断裂构造体系及沉积环境两个方面,对渝东南地区构造演化史与沉积体系展布特征的研究结果表明:燕山运动早—中期,由于太平洋板块向亚洲板块的强烈俯冲,在北西—南东向的挤压应力作用下,在渝东南地区形成了一系列北北东向呈相互平行或雁列式展布的褶皱带和断裂带,因挤压应力自南东向北西方向传递和能量衰减,故在该区由南东至北西方向形成了隔槽式褶皱—城垛状褶皱—隔挡式褶皱(图2)。燕山运动晚期,由于区域应力的方向发生了逆时针方向的扭转,使得已有的褶皱构造形态发生变形,在平面上形成“S”形或弧形褶皱。燕山运动形成的北北东向褶皱,到喜马拉雅运动期,构造应力产生了松弛或释放,因而在背斜的翼部形成了一系列规模较大的北北东向正断层,组成地垒式及地堑式断层,表明该区受到北西—南东向的引张,但又仍可能有南北向挤压应力的存在,该类断层多具有张扭性质,并产生逆时针方向的扭动,并最终形成了该地区现今的构造格局^[18, 29]。

在早志留世,渝东南地区主要物源来自南部,发育了一套黑色碳质页岩和少量灰色泥岩和灰色粉砂岩质页岩。研究区的沉积和沉降中心位于中北部和西北部地区,以半深海和深水陆棚环境为主,其岩石类型主要为黑色页岩、深灰色页岩、深灰色粉砂质页岩和硅质页岩;东北部地区可能受到“湘鄂水下高地”的影响^[11, 30],沉积环境为浅水陆棚相,岩石类型主要为灰色页岩、黑色页岩和钙质页岩;南部地区以浅



位置见图 3。
图 2 渝东南地区区域构造剖面图
Fig. 2 Tectonic cross-section of southeastern Chongqing area

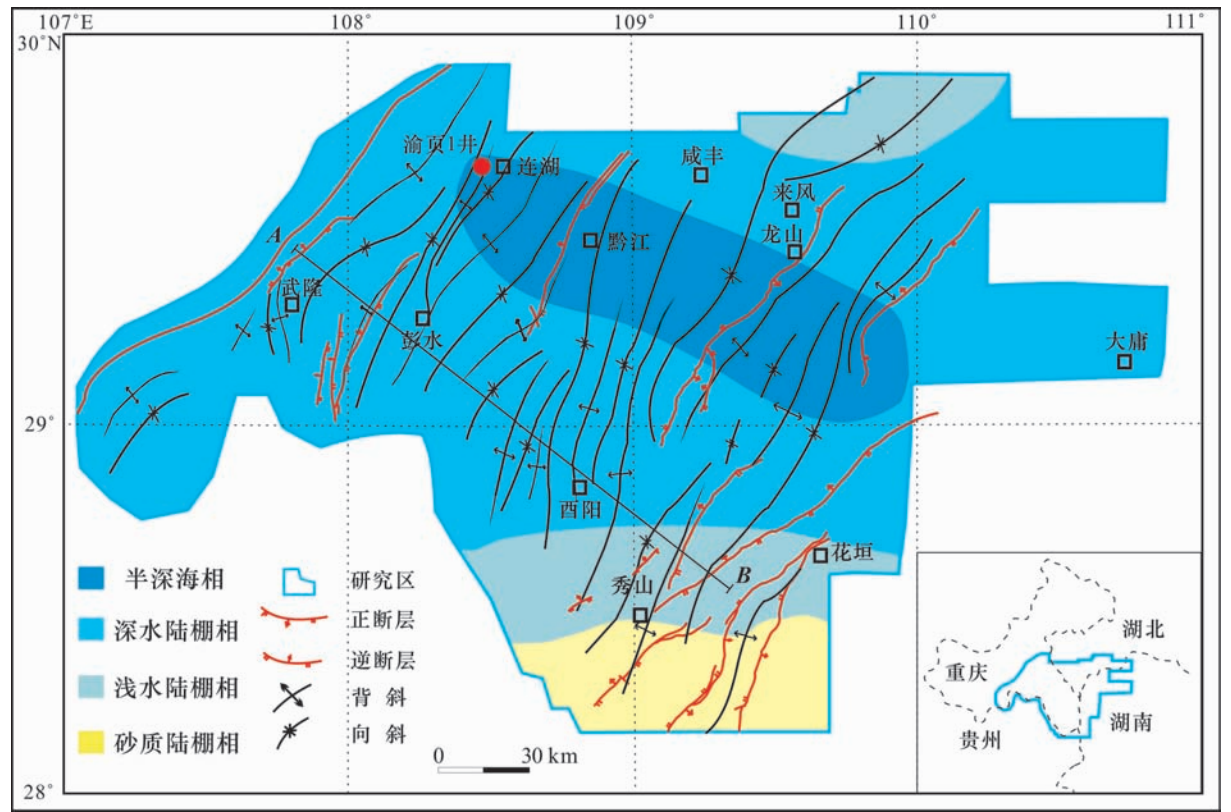


图 3 渝东南地区燕山期龙马溪组页岩储层地质模型
Fig. 3 Geological model of Longmaxi shale in Yanshanian of southeastern Chongqing area

水陆棚相为主,部分地区为砂质陆棚相,岩石类型以灰色粉砂质泥岩、钙质页岩和灰色粉砂岩为主(图 3)。

1.2 力学模型

建立了研究区目的层的地质构造模型后,需要确定模型中不同材料性质和结构属性,通过本构方程表征地质模型各部分材料属性,将地质模型向力学模型进行转换。在定义材料属性的前提下,划分不同类型的材料单元,包括断裂带、褶皱带和正常沉积区,并对不同材料单元进行岩石力学性质属性赋值,主要考虑了弹性模量和泊松比两个力学参数^[26-29]。

力学模型的建立主要包括以下三方面:(1) 边界条件,确定地质体的边界构造应力的加载方式、大小及约束条件;(2) 岩石力学参数,厘定研究目的层

系不同单元的岩石力学性质参数;(3) 断层带和褶皱带处理方案,确定研究区内目的层系的断层带、褶皱带的处理方案,其准确性将会直接影响到构造应力场的模拟结果。

1.2.1 边界条件

宏观地将地质体划分为若干块均匀的岩石体,定义模拟对象为弹性材料,若是塑性材料,会造成数值模拟结果中出现不可控制的非线性问题,甚至使模拟结果严重偏离实际。

从力学角度考虑,有两种边界条件可以采用。一是位移边界条件;二是受力边界条件,假设边界上所受力为一确定值,在无法确定边界每一点所受力强度的条件下,可将作用在研究区边界上的力看成

是均匀分布的。利用岩石声发射实验可获得古构造运动期次及页岩地层曾经受到的最大有效古应力值^[31](图 4、5)。

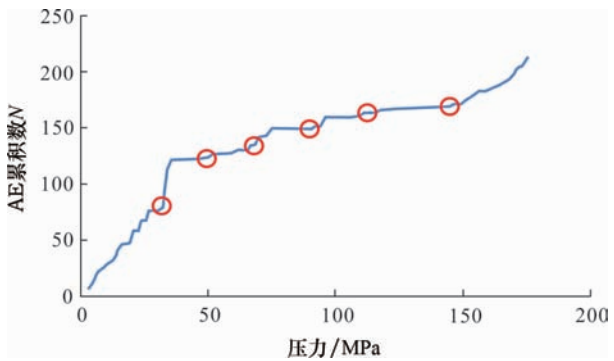


图 4 渝页 1 井龙马溪组页岩样品初压声发射古应力测量曲线

Fig. 4 Paleostress curve of initial pressures of acoustic emissions for shale samples from the Yuyel well

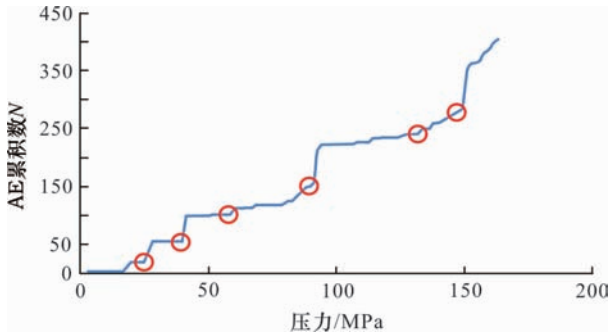


图 5 渝页 1 井龙马溪组页岩样品复压声发射古应力测量曲线

Fig. 5 Paleostress curve of repeated pressures of acoustic emissions for shale samples from the Yuyel well

依据区域构造运动期次与变形特征及声发射地应力测试结果等综合分析认为:燕山期,渝东南地区构造运动最强烈,所受最大构造应力最大为 148.8 MPa;其次为喜山运动,该时期所受最大构造应力为 122.5 MPa (表 1)。

表 1 渝页 1 井龙马溪组岩石声发射实验构造应力测量结果

Table 1 The tectonic stress values of Longmaxi shale samples by acoustic emissions from the Yuyel well

井号	深度/m	地层	各期幕构造应力 σ_1 有效值/MPa	记忆的主要构造运动期(幕)次
渝页 1 井	0~325.5	龙马溪组	23.1,40.8,57.4, 91.0,122.5,148.8	6

在喜山期,渝东南地区整体处于北西-南东向构造挤压应力场环境,考虑到渝页 1 井位于连湖镇郭厂坝背斜轴部,预测构造应力模拟结果在该位置

的应力强度应该比正常沉积地层的要大。经反复调试,对建立的地质模型施加的位移边界条件为:对左上、右下边界施加 80 MPa 最大主应力,右上、左下边界施加 30 MPa 最小主应力,同时对模型右角与左角节点进行 X、Y 方向上的位移约束,其他单元均可自由移动,在左上角与右下角节点分别施加一对与最大主应力方向平行的拉张力 25 MPa,模拟喜山期研究区所受到的左旋剪切应力(图 6)。

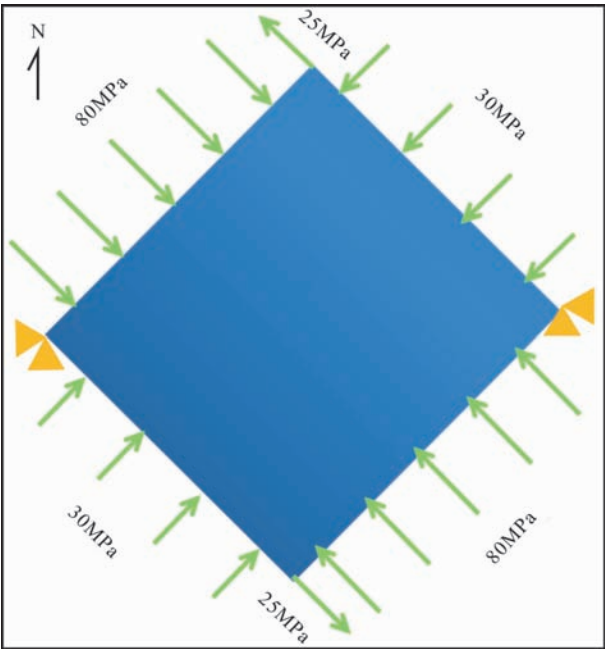


图 6 渝东南地区龙马溪组页岩储层喜山期构造应力场模拟力学模型

Fig. 6 Mechanical model of the Longmaxi shale in southeast Chongqing during the Cenozoic

1. 2. 2 岩石力学参数

对地质模型划分的主要单元类型有断裂区、褶皱区和正常沉积地层区。其中,断裂区根据规模形态和延伸范围,将断裂分为一级断裂、二级断裂和三级断裂。褶皱区根据构造形态可细分为隔槽式褶皱、城垛状褶皱、隔挡式褶皱。

沉积区目的层依据不同的页岩岩相划分为不同的单元类型,主要的岩性包括黑色页岩、深灰色页岩、泥质粉砂岩、钙质页岩、硅质页岩等岩相。由于本次研究为二维构造应力场模拟,故所需的岩石力学参数主要为弹性模量和泊松比(表 2)。

1. 2. 3 断层带、褶皱带处理方案

将断层带定义为一个“软弱区”,其弹性模量通常比正常沉积地层区的小,为正常沉积地层的 50%~70%,而泊松比则比正常沉积地层区的大,两者差值

表 2 渝东南地区龙马溪组不同类型页岩单轴和三轴压缩变形试验数据表
Table 2 A calculation table for the uniaxial and triaxial compression test of various rock types

岩性	天然密度 $\rho_0/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	抗拉强度 σ_t/MPa	抗压强度 σ_c/MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	粘聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
黑色页岩	2.715	16.67	100.95	52.83	0.266	22.33	34.53
深灰色页岩	2.657	5.95	149.60	59.75	0.255	27.71	34.56
泥质粉砂岩	2.688	12.23	102.75	65.82	0.286	3.84	56.36
钙质页岩	2.655	6.79	132.87	42.87	0.205	16.42	49.01
硅质页岩	2.747	9.06	101.83	54.06	0.261	12.42	58.11

在 0.02~0.1;褶皱区认定为一个“强硬区”,其弹性模量一般比正常沉积地层区的大,是正常沉积地层的 1.5~3.0 倍,而泊松比则小于正常沉积地层,二者差值在 0.01~0.15(表 3)。

表 3 渝东南地区龙马溪组断裂带和褶皱带岩石
力学性质参数赋值

Table 3 Mechanical properties of different types
of rock units

单元类型	弹性模量 E/MPa	泊松比
断裂区	一级断裂	21 435
	二级断裂	32 436
	三级断裂	36 981
褶皱区	隔槽式褶皱	102 180~137 460
	城垛状褶皱	85 660~102 180
	隔挡式褶皱	65 740~85 660

1.3 数学模型

数学模型建立的依据是有限元原理,其基本思想是:将所要求解的连续场函数域划分成一系列单元,单元与单元之间仅靠节点连接,通过选定的函数关系插值求得单元内部未知量点的函数值。这种结构单元特点是形状简单,很容易通过单元之间的平衡关系或能量关系,建立节点与未知量之间的方程式,并将各个单元的方程组合归纳为总体代数方程组,在确定边界条件后对方程组求解,即可得到未知量的解。地质体单元划分越细,计算模拟结果精度越高。本次研究是将建立的渝东南地质模型进行三角网格化,细分为一系列的节点和单元网格,包含节点 9 965 个,网格单元 19 670 个(图 7)。

将地质模型划分为若干平面的三角形网格单元,对于任意一个三角形网格单元来说,单元中任意一点 (x,y) 的位移 u,v 可表示为矩阵形式:

$$[f]^e = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_i u_i + N_j u_j + N_m u_m \\ N_i v_i + N_j v_j + N_m v_m \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_m & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i & v_i & u_j & v_j & u_m & v_m \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

式(1)可简化为

$$[f] = [N][\delta]^e \quad (2)$$

式中: $N_i、N_j、N_m$ 为单元位移的形态函数或形函数; $[N]$ 为形函数矩阵; $[\delta]^e$ 为节点位移分量矩阵。

确定了位移函数并以结点位移表示单元内点的位移后,需由几何方程确定单元的应变:

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式(1)代入式(3)可得到单元的应变矩阵:

$$[\epsilon] = [B][\delta]^e \quad (4)$$

式中转换矩阵 $[B]$ 为几何矩阵。

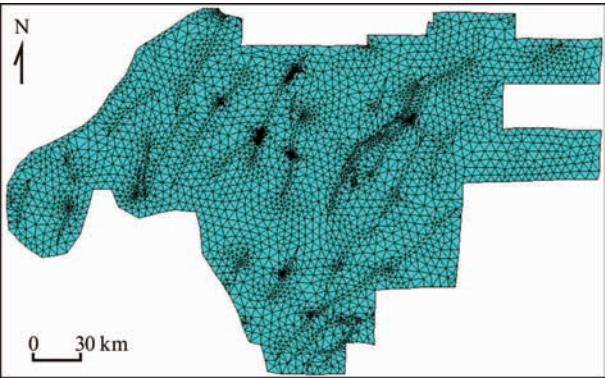


图 7 渝东南地区龙马溪组页岩储层地质模型三角网格化
Fig.7 Triangulation of geological model of the Longmaxi shale in southeastern Chongqing

从弹性力学方程可以得到应力、应变具有以下关系:

$$[\sigma] = [D][\epsilon] \quad (5)$$

将式(4)代入式(5)可得单元的应力矩阵:

$$[\sigma] = [D][B][\delta]^e = [S][\delta]^e \quad (6)$$

式中 $[S]$ 为应力矩阵。

三角形单元的节点力总共有六个分量:

$$[P]^e = [U_i \ V_i \ U_j \ V_j \ U_m \ V_m]^T \quad (7)$$

由单元节点力引起的应力为

$$[\sigma] = [\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}]^T \quad (8)$$

根据虚位移原理和虚功原理推导可得单元刚度矩阵为

$$[P]^e = [K]^e[\delta]^e \quad (9)$$

式中 $[K]^e$ 为单元刚度矩阵,表征了节点力与节点位移之间的关系。

将单元刚度矩阵进行变形,就可以得到整体的刚度矩阵,然后将边界条件引入到方程中,改造整体刚度矩阵,可以得到整体刚度方程为

$$[P] = [K][\delta] \quad (10)$$

式中: $[K]$ 为整体刚度矩阵; $[P]$ 为整体节点载荷列阵; $[\delta]$ 为单元内整个结构节点的位移列阵。

对线性方程(10)进行求解,就可以得到整体结构节点位移列阵 $[\delta]$,于是就可以得到每个单元节点位移。将位移回代至单元方程(3)、(4)、(5)、(6),可分别得到每个单元的位移、应变、应力。

对于每一个单元,最大主应力通常是通过坐标变换求得的,即求解下式的特征值问题:

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma \end{vmatrix} = 0 \quad (11)$$

求解上式可得到最大主应力 σ_1 , MPa;最小主应力 σ_3 (二维构造应力场模拟无 σ_2), MPa。

1.4 构造应力场分布

运用 ANSYS 软件对研究区下志留统龙马溪组页岩储层进行二维平面的构造应力场数值模拟,可以获得龙马溪组页岩储层最大主应力、最大剪应力和应力强度值的分布。其中,最大主应力是控制构造变形和断裂形成及分布的主要因素,应力强度的大小决定着区域范围内构造作用的强弱和断裂、褶皱发育的程度,而最大剪应力的强弱则对断裂、褶皱的破碎及扭曲变形具有重要控制作用。

从构造应力场数值模拟结果可以看出(图 8),渝东南地区龙马溪组页岩储层最大主应力集中分布在 $-217.404 \sim -4.109$ MPa,规定正值为张应力,负值为压应力。断裂带内部岩石破碎程度较高,其内部的最大主应力相对于普通沉积地层较低,强度值主要分布在 $-46.768 \sim -4.109$ MPa。与断裂带相比,连续沉积地层在区域上岩性分布稳定,最大主应

力值分布范围在 $-103.647 \sim -46.768$ MPa,该范围值在研究区内分布面积最广。褶皱带内部岩石遭受褶皱变形,特别是褶皱的轴部和转折端处的岩石变形更为严重,在没有断层破坏且应力得不到释放的前提下,这些构造部位的应力将处于高度集中状态。若是褶皱被逆断层所夹持,如,花垣西南方向以及彭水西向断裂褶皱带,或者与断层紧邻的断层相关褶皱,如龙山、秀山一带,其最大主应力值会更高,且褶皱与断层越近则应力梯度变化越明显。除了上述褶皱带外,断层带末端和断层转折端也是断层带内部破碎岩石向连续地层的过渡区域,此处岩石处于破碎边缘状态,因此应力值较高。最大主应力分布范围在 $-217.404 \sim -103.647$ MPa。

渝东南地区龙马溪组页岩储层剪应力为 $-4.707 \sim 49.222$ MPa(图 9),其中,规定正值代表剪应力方向为左旋,负值代表剪应力方向为右旋。研究区构造表现出了明显的走滑特征,北北东向“S”形断裂与褶皱多具有逆时针旋转扭动的特点。从图 9 可以看出,研究区剪应力值总体为正值,反映渝东南地区喜山期构造应力是以逆时针左旋剪切应力场为主,该模拟结果与研究区喜山期所表现出的压扭性走滑构造变形特征相一致。

应力强度图与最大主应力分布图不同,它只是显示地质模型每个单元上所受应力的绝对值而不能显示出上每个单元受挤压和拉张的应力状态。根据应力强度模拟结果(图 10)可知,渝东南地区龙马溪组页岩储层总应力强度分布规律与最大主应力分布规律相似,在 $4.109 \sim 217.404$ MPa。其中,渝页 1 井位置处的应力强度在 $117 \sim 130$ MPa,模拟结果与声发射地应力实验结果得到的 122.5 MPa 相接近,表明渝东南地区龙马溪组页岩储层应力场模拟结果是合理的。

研究区南部龙马溪组为水体较浅的砂质陆棚相沉积,主要岩性为钙质页岩、泥质粉砂岩、粉砂岩,随着页岩中的石英、碳酸盐岩等脆性矿物含量增加,其岩石力学性质逐渐表现为高弹性模量、低泊松比的特点,而在研究区的中北部和西北部,龙马溪组以半深海和深水陆棚相为主,岩石类型主要为黑色碳质页岩、深灰色页岩和硅质页岩为主,其弹性模量相对降低而泊松比相对增高,因此,渝东南地区的中北部、西北部连续地层应力强度值较南部、东部要低一些。燕山期,渝东南地区受到了自南东向北西方向的构造挤压应力作用,形成了隔档式褶皱,随着挤压

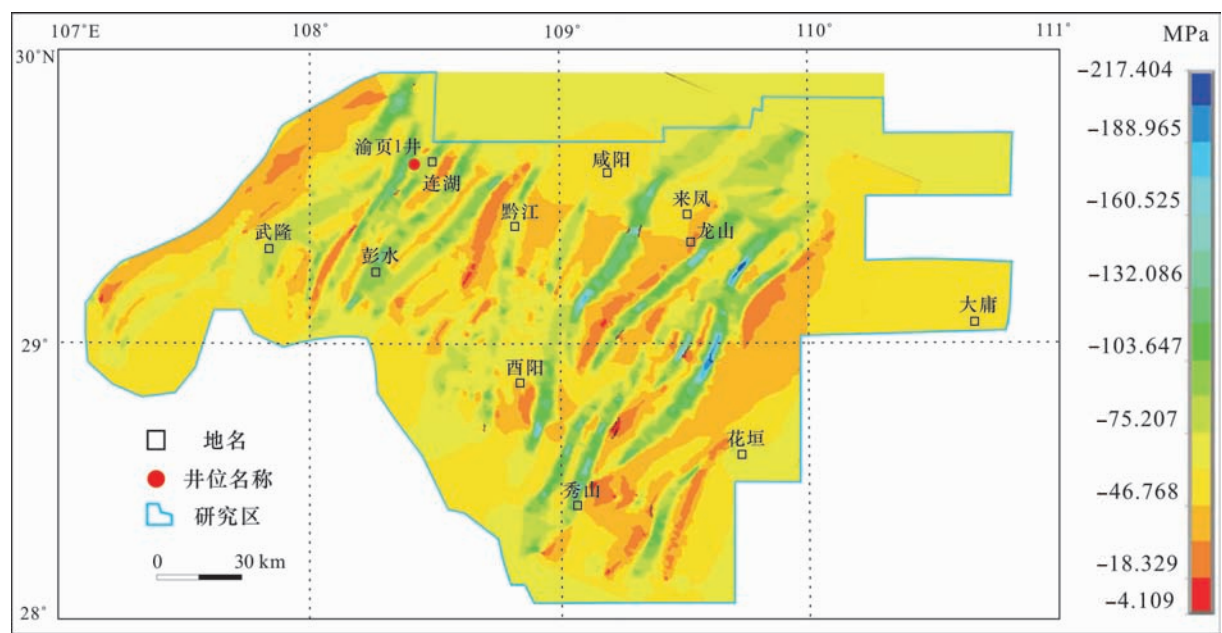


图 8 渝东南龙马溪组页岩储层最大主应力分布图

Fig. 8 Distribution of maximum principal stress intensity of the Longmaxi shale in southeastern Chongqing

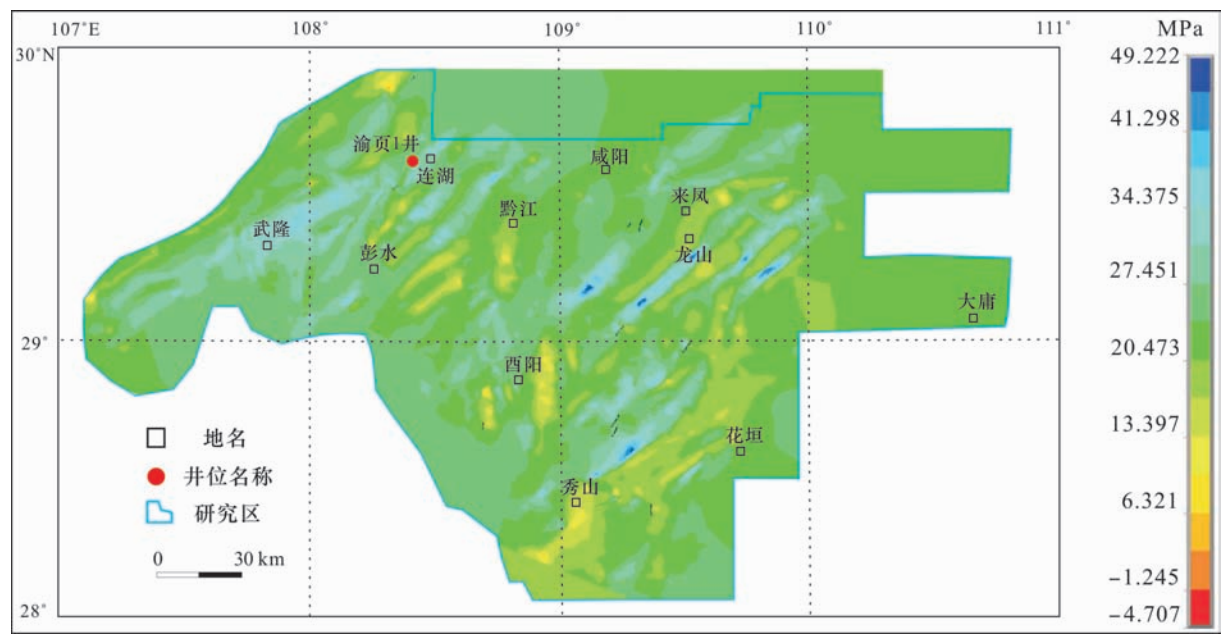


图 9 渝东南地区龙马溪组页岩储层剪应力分布图

Fig. 9 Distribution of shear stress magnitudes of the Longmaxi shale in southeastern Chongqing

推覆进行,最终演化成前端为隔挡式褶皱,后端为隔槽式褶皱,后端(研究区东南部)变形比前端(研究区西北部)强。其中,隔槽式褶皱中以向斜变形最为强烈,而隔挡式褶皱中的向斜变形程度最小,“城垛状”褶皱变形程度介于两者之间,向斜与背斜变形程度相似。研究区应力场模拟结果(图 8、9、10)均显示出了东南部隔槽式褶皱区应力强度值明显高于西

北部隔挡式褶皱区的应力强度值,其中,东南部隔槽式褶皱区中的向斜应力强度值高于背斜,西北部隔挡式褶皱区中的向斜应力强度值低于背斜,中间分布的“城垛式”褶皱区中的向斜与背斜应力强度值大体相当。应力场模拟结果显示出的应力强度变化规律与研究区的实际构造变形特征具有很好的一致性。

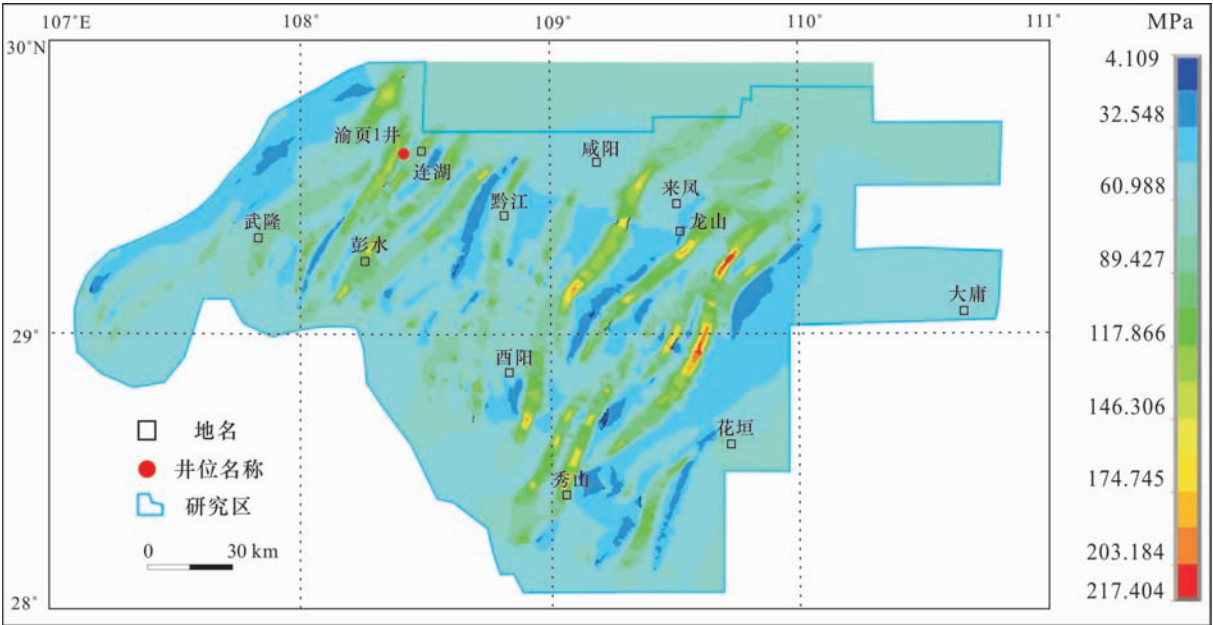


图 10 渝东南地区龙马溪组页岩储层应力强度分布图
Fig. 10 Distribution of stress intensity of the Longmaxi shale in southeastern Chongqing

2 裂缝分布预测方法

通常情况下,在应力作用下岩石内部的破裂形式主要有两种:一种是张破裂,另一种是剪切破裂。其中,剪切破裂主要是根据库伦-摩尔(Coulomb-Mohr)剪切破裂准则来进行判别,而张破裂主要用格里菲斯(Griffith)破裂准则来判别(图 1)。

2.1 格里菲斯准则

格里菲斯针对脆性材料的破坏提出了格氏强度理论。格氏认为含有大量微细的、似椭圆状的裂隙的脆性材料在应力场作用下,椭圆裂隙周边将产生切向拉应力集中,一旦裂隙周边端部附近某处的切向拉应力高度集中达到材料的分子内聚强度值时,则材料将在该处开始沿某一确定方向发生脆性破坏。格里菲斯强度理论的平面破裂准则表达式为当 $\sigma_1 + 3\sigma_3 \geq 0$ 时,破裂准则为

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - 8(\sigma_1 + \sigma_3)\sigma_T = 0 \tag{12}$$

当 $\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0$ 时,破裂准则为

$$\sigma_3 + \sigma_T = 0 \tag{13}$$

式中: σ_1 为最大主应力,MPa; σ_3 为最小主应力,MPa; σ_T 为岩石的张应力,MPa。

2.2 库伦-莫尔剪破裂准则

库伦-莫尔准则认为,岩石的破裂沿某一截面发生剪切破裂,不仅与该截面上的剪应力 τ 大小有

关,而且与该面上的正应力 σ 有关,即平面上的剪切破坏与该面上的正应力 σ 与剪应力 τ 的组合有关。库伦-摩尔剪切破裂准则可表示为

$$|\tau| = C + \sigma \tan \varphi \tag{14}$$

式中: $|\tau|$ 为岩石的抗剪强度,MPa; σ 为正应力,MPa; C 为粘聚力,是正应力为零时岩石的抗剪强度,MPa; φ 为内摩擦角,(°); $\tan \varphi$ 为内摩擦系数。

2.3 页岩储层破裂综合判别

在页岩层裂缝形成期构造应力场模拟的基础上,针对页岩储层中主要发育高角度的张裂缝、低角度剪裂缝(滑脱缝)的特点,依据裂缝的成因类型,则采用了不同的裂缝判别准则,分别计算出了研究区内页岩储层的张应力值和剪应力值,通过与岩石的抗张强度、抗剪强度的比较,判断岩石是否发生破裂。

为了便于计算机处理和定量分析计算,在此引入裂缝的张破裂率 I_t 和剪破裂率 I_n :

$$I_t = \sigma_T / \sigma_t \tag{15}$$

式中: σ_T 为有效张应力,MPa; σ_t 为岩石的抗张强度,MPa。当 $I_t \geq 1$ 时,岩石发生张破裂。

$$I_n = \tau_n / |\tau| \tag{16}$$

式中: τ_n 为有效剪应力,MPa; $|\tau|$ 为岩石的抗剪强度,MPa。当 $I_n \geq 1$ 时,岩石发生剪破裂。

在实际情况中,页岩储层中往往既发育张裂缝系,又发育有低角度的剪切裂缝系,两者呈共生或伴生关系。岩石破裂方式是张性应力和剪切应力两者

的综合反映。因此,为了更好地定量表征页岩储层中构造裂缝发育程度,又引入了综合破裂率参数(图1)。

$$I_z = (aI_t + bI_n)/2 \tag{17}$$

式中, a 、 b 分别是页岩岩心和电镜观察中所得到的张裂缝(包括张剪缝)和剪裂缝所占比例,由渝页1井岩心龙马溪组富有机质页岩裂缝统计与电镜中微观裂缝观察结果,最终确定研究区龙马溪组页岩中喜山期张裂缝与剪裂缝的数量比值为6:4。同样当 $I_z \geq 1$ 时,岩石达到破裂状态,而且页岩的综合破裂率值越高,破裂程度就越大^[17]。

2.4 裂缝发育系数研究

页岩储层裂缝发育程度是多种因素综合作用的结果,在进行裂缝定量预测的过程中,如果只以单一因素为判断标准进行预测会造成结果的片面性及局限性。在确立影响页岩储层裂缝发育程度的多种主控因素的基础上,具体分析每一因素对裂缝发育的影响程度,以单一因素与裂缝发育程度相关性为依据对多个因素进行加权赋值,并通过公式计算得出裂缝发育系数 I_F ,裂缝发育系数是页岩储层裂缝定量预测的最终判断标准,裂缝发育系数越大,则页岩裂缝发育程度越高。

对于渝东南地区而言,构造应力、岩石矿物组分、有机碳含量都是控制页岩裂缝发育的重要因素,并且从不同程度上影响了页岩裂缝的发育。该区经历了多期构造运动,区内断裂发育、构造复杂,构造应力对裂缝控制程度最高。其次为页岩的岩石矿物组成,在相同的构造背景下,页岩中石英、长石、白云石作为岩石中的脆性矿物控制着页岩裂缝的发育;而在构造背景和岩性相同,且纵向上矿物组成的离散程度较小情况下,页岩的裂缝发育程度的主控因素是岩石中的有机碳(TOC)含量,其与裂缝发育程度呈正相关关系。原因是在有机质热演化的过程中,不断生成的有机酸、CO₂ 和 H₂S 等酸性流体,对碳酸盐岩、长石进行溶蚀,不仅改善页岩的孔隙状况,在外力的作用下也易于形成裂缝(有机缝)^[31-35]。Jarvie 等^[1]的实验分析结果也为上述的统计认识提供了佐证,即有机质含量为7.0%的页岩在生烃演化过程中,消耗35%的有机碳,可使页岩孔隙增加4.9%。不仅如此,有机质形成的残余碳质,导致岩石脆性变强。另外,有机碳含量控制着页岩含气量,高有机碳含量的页岩产生大量的气体,增大围岩的压力,在外力作用下,页岩也易于发生断裂和破碎。因此,在考虑到影响裂缝发育的多种主控因素的前提

下,选择了综合破裂率、页岩有机碳含量、页岩脆性矿物含量等参数,提出了页岩裂缝发育系数计算公式:

当 $I_z < 1$ 时,岩石未发生破裂:

$$I_F = I_z \tag{18}$$

当 $I_z \geq 1$ 时,岩石已达到破裂状态:

$$I_F = af(M) + Bf(T)^n + c[(kf(I_z)^2 + if(I_z))] + d \tag{19}$$

式中: I_F 为裂缝发育系数,量纲为1; M 为页岩脆性矿物含量,%; T 为页岩总有机碳含量,%; I_z 为综合破裂系数,量纲为1; a , b , c 为权值; k , i , n , d 为常数。 $f(x)$ 为因变量 x_i 在数组中的变化比率函数,其表达式为

$$f(x) = \frac{x_i - \text{Min}(x)}{\text{Max}(x) - \text{Min}(x)} \tag{20}$$

将式(20)代入式(19),可得:

$$\begin{aligned} I_F = & 0.825 \times \frac{M_i - \text{Min}(M)}{\text{Max}(M) - \text{Min}(M)} + 0.149 \times \\ & \left(\frac{T_i - \text{Min}(T)}{\text{Max}(T) - \text{Min}(T)} \right)^{0.9899} \\ & + 2.218 \left(\frac{I_{zi} - \text{Min}(I_z)}{\text{Max}(I_z) - \text{Min}(I_z)} \right)^2 + 1.170 \times \\ & \frac{I_{zi} - \text{Min}(I_z)}{\text{Max}(I_z) - \text{Min}(I_z)} + 0.0273 \end{aligned} \tag{21}$$

根据不同研究区、不同性质页岩储层的特点,可以相应的增加或减少裂缝发育主控因素,考虑的主控因素越多,则裂缝发育系数计算结果越精确、预测结果越接近于真实情况。

2.5 裂缝分布定量预测

对页岩储层裂缝发育程度进行定量预测,根据裂缝发育系数的分布情况,将页岩储层裂缝发育程度划分为五个等级,分别为不发育区(X)、较发育区(I)、发育区(II)、很发育区(III)和极其发育区(IV)(表4)。

表4 页岩储层裂缝发育程度判别标准

Table 4 Determination criteria of the degree of fracture development

裂缝发育等级	裂缝发育系数 I_F	裂缝发育程度
X	$I_F < 1.0$	不发育
I	$1.0 \leq I_F < 2.0$	较发育
II	$2.0 \leq I_F < 3.0$	发育
III	$3.0 \leq I_F < 4.0$	很发育
IV	$I_F \geq 4.0$	极其发育

根据渝东南地区龙马溪组页岩储层裂缝发育系数等值线图(图11),可以预测喜山期页岩储层裂缝分布情况,研究区东部(来凤、龙山东南方向)广泛分

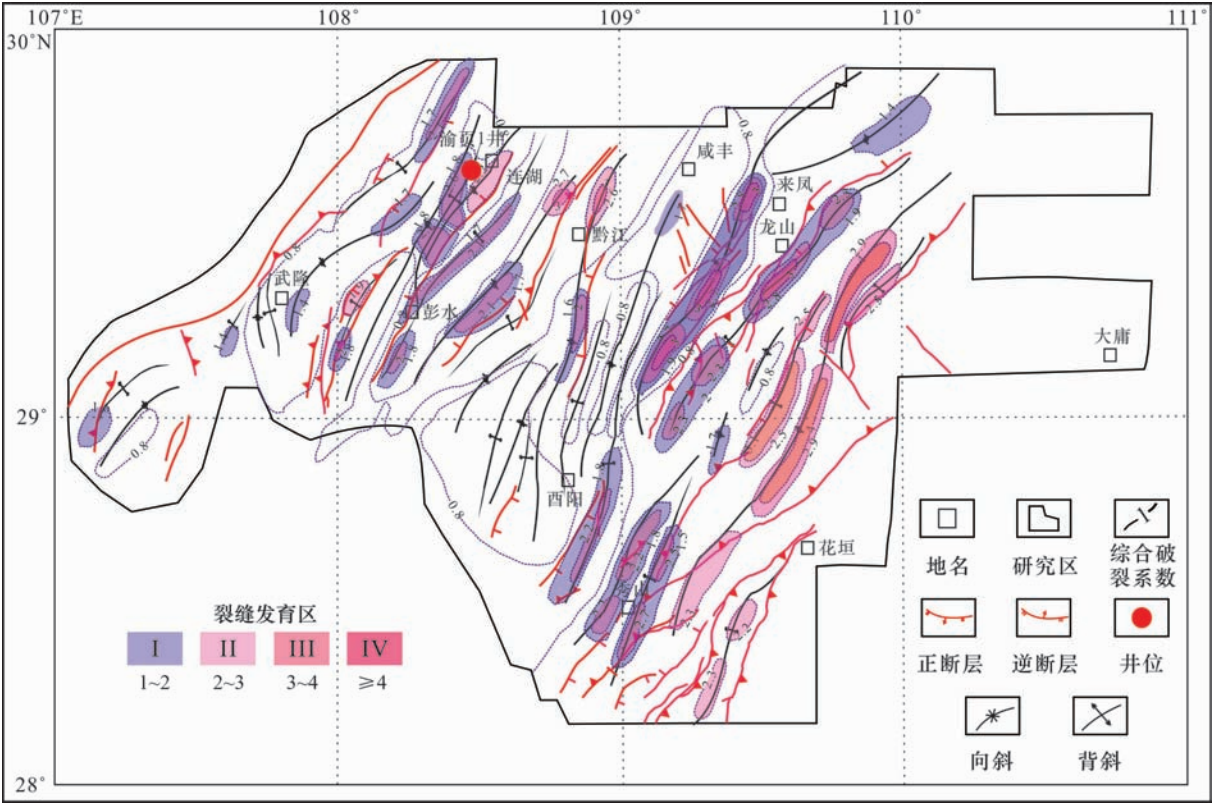


图 11 渝东南地区龙马溪组页岩储层喜山期裂缝发育系数等值线图

Fig. 11 Predicted distributions of favorable areas of the Longmaxi shale in southeastern Chongqing area during the Cenozoic

布有 I ~ IV 级裂缝发育区,其裂缝发育系数主要在 1.4~4.0,其中,花垣北部的大型隔槽式褶皱轴部为裂缝极其发育区(IV 级),裂缝发育系数甚至到达了 4.0 以上,岩石破碎严重。南部(秀山、花垣以南)和西北部(连湖地区)主要为裂缝发育有利区(II 级)和较发育有利区(I 级)。西部(武隆、彭水)主要为裂缝较发育有利区(I 级),裂缝发育系数在 1.0~1.4。龙马溪组页岩储层 TOC 含量与脆性矿物含量高值区主要位于黑色页岩的沉积中心,即连湖-黔江、龙山南等地区,在综合破裂系数相当的情况下,高 TOC 含量和高脆性矿物含量的页岩裂缝更为发育。研究区东部、南部为裂缝最发育地区,特别是与断层紧邻的区域和变形相对较强的隔槽式褶皱轴部,如来凤一带的向斜轴部则出现了张性正断层。研究区南部砂质陆棚相页岩发育区,岩石弹性模量高、泊松比低,在外力作用下更容易发生破裂而产生裂缝。

3 结论

(1)构造应力场数值模拟方法核心在于建立精确的地质模型、力学模型和数学计算模型。针对页岩储

层特殊性,在模拟过程中必须以地质模型为依据,按岩石相划分页岩类型,并确定不同岩相页岩的岩石力学性质参数。在以往的构造建模过程中,只考虑岩性和断层两方面,而忽视了褶皱的影响因素,须将三者在地质建模中精细刻画,并赋予合理的处理方案。

(2)研究区褶皱带内部,特别是褶皱的轴部和转折端附近的页岩储层遭受到了严重构造变形,为应力高度集中区。断层带末端和转折端是断层带内部破碎页岩向正常沉积地层连续过渡区域,处于破碎边缘状态,应力值高。位于沉积中心、分布稳定和构造变形较弱的半深海相的黑色碳质页岩、硅质页岩和浅海陆棚相的钙质页岩以高弹性模量、低泊松比为特征,页岩脆性较强,在相同的构造应力作用下,也易于产生构造裂缝。

(3)页岩裂缝分布定量预测不能只以单一因素为判断标准,否则会造成结果的片面性及局限性。应尽可能地考虑到影响页岩储层裂缝发育程度的综合破裂率、页岩有机碳含量、页岩脆性矿物含量等多种主控因素,采用裂缝发育系数定量表征页岩裂缝发育程度及分布特征。针对不同研究区、不同性质页岩储层的特点,可以相应的增加或减少裂缝发育

主控因素,考虑的主控因素越多,计算出的裂缝发育系数就越精确,裂缝预测结果越接近于真实情况。

(4)裂缝发育区多集中在构造变形严重的应力高值区域。页岩中石英、白云石、长石等脆性矿物含量的增加会降低页岩抗张剪能力,在相同的构造背景下高脆性矿物含量的页岩更容易形成天然裂缝和诱导裂缝。页岩有机碳含量在平面上与裂缝发育关系并不十分明显,但在纵向上表现为有机碳含量越高则页岩裂缝越发育,此对页岩裂缝的纵向分布预测具有重要指导作用。

参考文献

- [1] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [2] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [3] Ross D J K, Bustin R M. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale Member, northeastern British Columbia, Canada[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2007, 55(3): 51-75.
- [4] Gale J F W, Reed R M, Holder J. Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 603-622.
- [5] David G, Lombardi T E. Fractured gas shale potential in New York[J]. Northeastern Geology and Environmental Sciences, 2004, 26: 57-78.
- [6] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 392-400.
- [7] 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.
- [8] 丁文龙, 李超, 李春燕, 等. 页岩裂缝发育主控因素及其对含气性影响[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 212-220.
- [9] 聂海宽, 张金川. 页岩气储层类型和特征研究: 以四川盆地及其周缘下古生界为例[J]. 石油实验地质, 2011, 33(3): 219-225.
- [10] Wang R, Ding W, Zhang Y, et al. Analysis of developmental characteristics and dominant factors of fractures in Lower Cambrian marine shale reservoirs: A case study of Niutitang formation in Cen'gong block, southern China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 138: 31-49.
- [11] Zeng W, Zhang J, Ding W, et al. Fracture development in paleozoic shale of Chongqing area(South China). Part one: Fracture characteristics and comparative analysis of main controlling factors[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 75: 251-266.
- [12] Ding W, Zhu D, Cai J, et al. Analysis of the developmental characteristics and major regulating factors of fractures in marine-continental transitional shale-gas reservoirs: A case study of the Carboniferous-Permian strata in the southeastern Ordos Basin, central China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 45: 121-133.
- [13] Jiu K, Ding W, Huang W, et al. Fractures of lacustrine shale reservoirs, the Zhanhua Depression in the Bohai Bay Basin, eastern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 48: 113-123.
- [14] 久凯, 丁文龙, 李玉喜, 等. 黔北地区构造特征与下寒武统页岩气储层裂缝研究[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(4): 797-803.
- [15] 何建华, 丁文龙, 王哲, 等. 页岩储层体积压裂缝网形成的主控因素及评价方法[J]. 地质科技情报, 2015, 34(4): 108-118.
- [16] 曾锦光. 构造裂缝的理论分析研究[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 34-41.
- [17] Jiu K, Ding W, Huang W, et al. Simulation of paleotectonic stress fields within Paleogene shale reservoirs and prediction of favorable zones for fracture development within the Zhanhua Depression, Bohai Bay Basin, East China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 110: 119-131.
- [18] 吴礼明, 丁文龙, 张金川, 等. 渝东南地区下古生界富有机质页岩储层裂缝分布预测[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(9): 43-46.
- [19] 丁文龙, 樊太亮, 黄晓波, 等. 塔中地区上奥陶统古构造应力场模拟与裂缝分布预测[J]. 地质通报, 2011, 30(4): 588-594.
- [20] Ding W, Fan T, Yu B, et al. Ordovician carbonate reservoir fracture characteristics and fracture distribution forecasting in the Tazhong area of Tarim Basin, northwest China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 86/87: 62-70.
- [21] 张明利, 万天丰. 含油气盆地构造应力场研究新进展[J]. 地球科学进展, 1998, 13(1): 38-43.
- [22] 万天丰. 古构造应力场[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 56-102.
- [23] 刘翠荣. 东海西湖凹陷中新世构造应力场数值模拟及油气有利聚集区预测[J]. 石油实验地质, 2002, 24(1): 73-76.
- [24] 李理, 戴俊生. 埕岛地区中生界和古生界构造应力场数值模拟及裂缝分析[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2000, 24(1): 6-9.
- [25] 石胜群. 三维构造应力场数值模拟技术预测泥岩裂缝研究应用[J]. 中国西部科技, 2008, 27(7): 1-2, 39.
- [26] 曾联波, 田崇鲁. 构造应力场在隐蔽性油气藏勘探中的应用[J]. 现代地质, 1998, 23(3): 401-405.
- [27] 谭成轩, 王连捷, 孙宝珊, 等. 含油气盆地三维构造应力场数值模拟方法[J]. 地质力学学报, 1997, 3(1): 71-80.
- [28] 叶葱林. 金湖凹陷构造应力场模拟[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2009: 1-48.
- [29] 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 13-700.
- [30] 樊隽轩, Melchin M J, 陈旭, 等. 华南奥陶-志留系龙马溪组黑色笔石页岩的生物地层学[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 24(1): 130-139.
- [31] 孙宝珊, 丁原辰, 邵兆刚, 等. 声发射法测量古今应力在油田的应用[J]. 地质力学报, 1996, 2(2): 11-17.