

引用格式:张斗中,汤济广,蔡俊.渝东南川地区龙马溪组地应力场特征[J].油气藏评价与开发,2021,11(2):190-196.

ZHANG Douzhong, TANG Jiguang, CAI Jun. Characteristics of geostress field of Longmaxi Formation in Nanchuan area, Eastern Chongqing[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(2): 190-196.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.02.007

渝东南川地区龙马溪组地应力场特征

张斗中^{1,2}, 汤济广², 蔡俊²

(1.长江大学非常规油气湖北省协同创新中心,湖北武汉430100;

2.长江大学地球科学学院,湖北武汉430100)

摘要:地应力场的研究对于南川地区页岩气的开发具有重要的理论和现实意义。为明确渝东南川地区志留系龙马溪组现今地应力场的分布情况,通过区内钻井的井壁坍塌方向确定了现今地应力的水平最大主应力方向,并收集区内钻井的地应力大小。通过地震资料计算区内岩石力学参数的分布情况,结合南川地区志留系龙马溪组底界构造图划分地质单元,建立地质模型。利用关键井的地应力资料作为约束,进行了南川地区龙马溪组地应力场的有限元数值模拟,分析了地应力场的分布规律。研究表明,区域地应力场以挤压应力场为主,现今最大主应力的方向约为NEE25°—SEE20°,大小为56.12~93.79 MPa;最小主应力的方向约为NNW25°—NNE20°,大小为48.06~71.67 MPa。应力大小整体上呈现了东低西高的分布趋势,断层对地应力方向和大小均有影响,岩石力学性质对地应力大小也有影响。

关键词:南川地区;龙马溪组;现今地应力;有限元;数值模拟

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Characteristics of geostress field of Longmaxi Formation in Nanchuan area, Eastern Chongqing

ZHANG Douzhong^{1,2}, TANG Jiguang², CAI Jun²

(1.Hubei Cooperative Innovation Center for Unconventional Oil and Gas, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China;

2.School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

Abstract: The study of geostress field has important theoretical and practical significance for the development of shale gas in Nanchuan area. In order to determine the distribution of the current geostress field of Silurian Longmaxi Formation in Nanchuan area, Eastern Chongqing, the maximum horizontal principal stress direction of the current geostress has been determined according to the direction of borehole collapse of key wells in the area, and the magnitude of the geostress of drilled wells has been collected. The distribution of the rock mechanics parameters in the area has been calculated on the basis of the seismic data, the geological units have been divided based on the tectonic map of the bottom of Silurian Longmaxi Formation in Nanchuan area, and a geological model has been established. Taking the ground stress data of key wells as the constraint, the finite element numerical simulation of the geostress field of Longmaxi Formation in Nanchuan area has been carried out, and the distribution law of the geostress field has been analyzed. The results show that the main stress field is the extrusion stress field. The current maximum principal stress is about NEE25° to SEE20°, 56.12~93.79 MPa while the minimum principal stress is approximately NNW25° to NNE20°, 48.06~71.67 MPa. On the whole, the stress has a distribution trend of low in the east and high in the west. The fault has an influence on the direction and the magnitude of the stress while the mechanical properties of rocks also influence the stress magnitude.

Key words: Nanchuan area, Longmaxi Formation, current geostress, finite element, numerical simulation

收稿日期:2020-09-21。

第一作者简介:张斗中(1994—),男,在读博士研究生,从事矿产普查与勘探。地址:湖北省武汉市蔡甸区大学路特1号长江大学,邮政编码:430100。E-mail:2428786389@qq.com

基金项目:中国石化项目“渝东南盆缘转换带页岩气富集主控因素研究”(P18057-2);油气资源与探测国家重点实验室开放基金“前陆冲断带横向断层差异变形机理研究”(wx2018115)。

南川地区作为中国石化在渝东南盆缘转换带区域的页岩气产建区,页岩气资源储量丰富,但研究区自中生代以来,经历了多期的构造应力作用,造成了构造作用的叠加,使研究区构造情况复杂,地应力分布情况不明,对南川地区页岩气的开发带来了很大的难度。研究地应力,可以为油田开发页岩气井网的布置、调整,水平井及开发方案设计等提供科学的背景资料^[1-2];可宏观研究地层岩石力学参数的变化,制定相应的储层开发方案^[3]。前人对南川地区的沉积相特征、储层成因^[4-6]、保存情况进行了描述,并对川东南地区的龙马溪组进行了地应力场模拟,分析了区域上的地应力分布特征^[7-8],但对南川地区龙马溪组的地应力场的分布特征还没有较为系统的论述。因此,本文以区内志留系龙马溪组的构造分析为基础,利用钻井地应力资料作为约束,开展地应力场有限元数值模拟,分析地应力的分布情况,以期对南川地区的页岩气勘探开发提供一定地质依据。

近几十年来,国内外对于如何提高页岩气的产量开展了大量的研究。由于页岩的自生自储、低孔低渗的特性,主要是通过水平井和压裂技术提高采收率。然而水平井眼方向的确定和水力压裂的裂缝扩展都离不开地应力研究。开展地应力的预测研究,对页岩气的勘探开发有着重要的作用。对于如何更好地预测地应力,自1912年地质学家海姆首次提出地应力以来,前人做了大量的研究,逐渐形成较为成熟的研究手段,主要有数值算法、物理模型法、测井资料算法、岩心测试法等。其中针对泥页岩的研究,HIGGINS(2005)^[9]运用了各向同性和横观各向同性2种地应力预测模型对Baxter页岩进行研究;张广智等人(2015)^[10]建立了等效页岩储层的岩石物理模型,通过物理模拟进行地应力预测。王珂等人(2017)^[11]基于有限元数值模拟技术,通过相关地层条件的约束,建立地质模型和力学模型,开展地应力场的分布预测。本文采用了有限元数值模拟技术,前人大多数采取将地层作为均质体开展模拟,所以模拟结果的准确性与地质模型和力学模型相关参数的获取有很大的关系,对于力学参数相差较大的区域的应力结果产生较大的影响,所以本文根据研究区的岩石力学参数分布情况,对南川地区进行地质单元的划分,能更好地提高模拟结果的可信度。

1 南川地区地质概况

研究区处于南川的东北部,金佛山背斜的西北部,焦石坝的西南部,行政上隶属于重庆市南川区,构造上位于四川盆地东南缘褶皱构造带内(图1)。前人的研究资料表明^[12-13],四川盆地东南部现今主要受到印度板块向亚洲板块的挤压作用,形成南西—北东东方向挤压应力场。研究区东部边界取在青龙乡断层以东,西部边界取在龙石桥断层以西,北部边界取在JY8井以北,南部边界取在南川区块南部,这些区域的选取几乎覆盖了南川区块的主要构造区域。通过对研究区的地震资料的精细解释(图2),得知区内断层的主要沿北东—南西向展布,局部有北西向和近南北向断层发育,其成因机制是

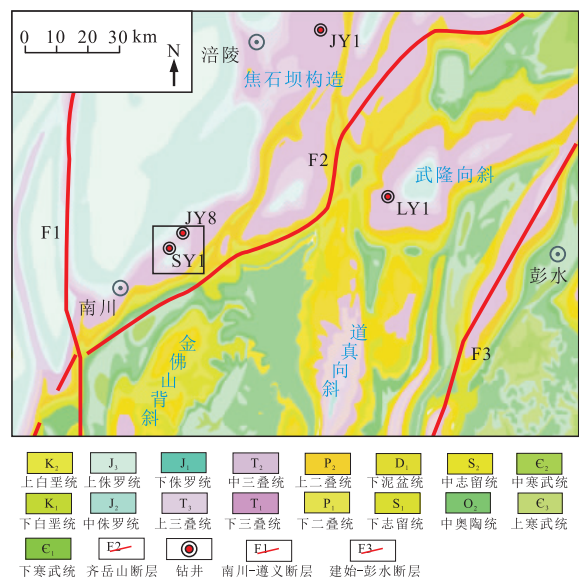


图1 研究区位置与构造

Fig. 1 Location and structure of study area

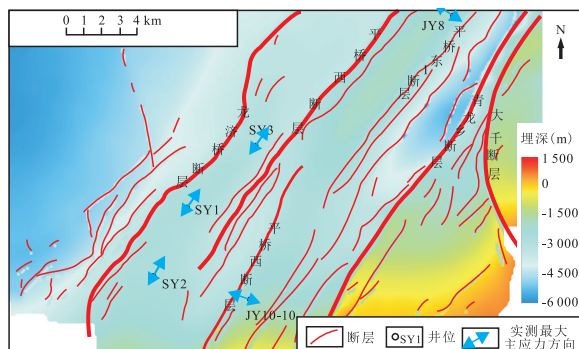


图2 南川地区志留系龙马溪组构造

Fig. 2 Structure of Longmaxi Formation of Silurian in Nanchuan area

江南隆起的陆内造山作用的远程传导,研究区受到来自南东—北西向的应力推覆作用,形成北东—南西走向断层和褶皱,使区内构造主体呈北东—南西向展布;后期受到了应力方向发生偏转,在区内西部区域少量的北西向和近南北向断层。

2 地应力场数值模拟

为了解南川地区志留系龙马溪组地应力场分布特征,通过对地震资料的解释和计算,绘制出南川地区志留系龙马溪组的构造图和岩石力学参数(弹性模量和泊松比)的分布情况,建立基础地质模型和力学模型。将研究对象作为弹性物体,利用ANSYS软件提供的用于分析弹性应力、应变的二维有限单元即三角形单元形态。通过测井资料,获取区内钻井的现今地应力大小和方向数据作为模拟的约束条件,基于有限元法数值模拟原理,开展研究区的地应力场数值模拟。

2.1 地质模型

地质模型是应力场数值模拟的基础,且直接影响着力学模型和数学模型的合理选取以及有限单元的边界元和间隙的划分。基于地震资料,解释并绘制出南川区块现今龙马溪组底界构造图(图2),以此为依据,建立基础地质模型^[14-15]。

为了建立的地质模型充分反映了研究区的主要地质特征,模型中主要考虑了对构造起控制作用的贯穿性断层,忽略了一些局部的小断层,并对断层做了相应的简化和合并处理^[16-18]。地质资料表明,区内的大断裂:青龙乡断层、平桥西断层、龙济桥断层、平桥东1号断层、大千断层等主干断层,其断至层位一般为寒武系—二叠系,最高向上延伸至地表,向下延伸至前寒武基底,形成了研究区的主体构造。然而断层处的岩石力学参数(杨氏模量、泊松比)一般无法直接获取,现在大多数处理方法都是将断层及其周边区域划分为断裂带,并参考其围岩的岩石力学参数,进行调整。

2.2 力学模型

本文的模拟方案是采用有限元分析法,把研究区域当成一个理想弹性体,在平面上受到应力作用产生应变的状态下进行的,把每个有限元单元内的

应力、应变看成是均匀的。

岩石力学参数的合理选取可直接影响数值模拟的准确性,因此,本文在提供区域的岩石力学参数时考虑了岩系的整体特征。在本文中有限元单元分断层单元和围岩单元两大类,这两类单元的物理参数取值不同,但各自均被看成各向同性的弹性体(图3、图4)。根据研究区龙马溪组的纵波时差、横波时差以及密度资料,利用下列公式计算出该地区的弹性模量和泊松比^[19-20]:

$$E_d = \frac{\rho}{\Delta t_s^2} \frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \quad (1)$$

$$\mu_d = \frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2}{2(\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2)} \quad (2)$$

式中: E_d 为杨氏模量, GPa; μ_d 为泊松比; ρ 为岩石密度, g/cm^3 ; Δt_p 为纵波时差, $\mu s/m$; Δt_s 为横波时差, $\mu s/m$ 。

结合南川地区龙马溪组的岩心三轴应力试验资料进行校正(表1),计算得到南川地区龙马溪组杨氏模量和泊松比的分布情况,拟合结果可以看出差值在可接受范围之内。

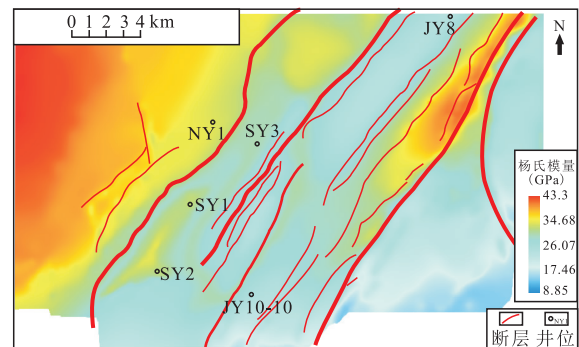


图3 南川地区志留系龙马溪组杨氏模量分布
Fig. 3 Distribution of Young's modulus of Silurian Longmaxi Formation in Nanchuan area

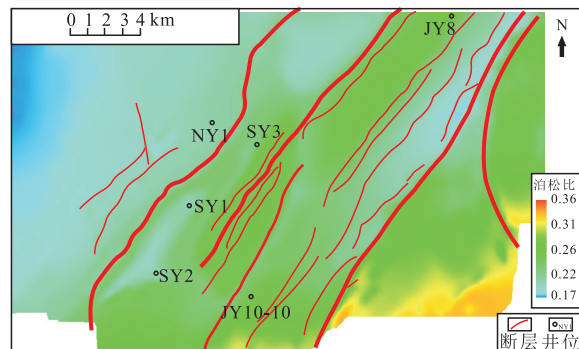


图4 南川地区志留系龙马溪组泊松比分布
Fig. 4 Poisson score layout of Silurian Longmaxi Formation in Nanchuan area

表1 南川地区志留系龙马溪组力学参数拟合
Table 1 Mechanical parameters fitting of Silurian Longmaxi Formation in Nanchuan area

井号	测试数据		计算结果	
	杨氏模量(GPa)	泊松比	杨氏模量(GPa)	泊松比
SY1	31.50	0.236	31.47	0.22
NY1	32.99	0.195	32.86	0.20

根据杨氏模量和泊松比分布差异,将数值差值较大地区划分开来,计算出不同区域的岩石杨氏模量和等效泊松比均值(表2)。断层的岩石力学参数一般选取为围岩的杨氏模量的50%~70%;而断层的泊松比则比正常沉积区的泊松比大一些,通常情况下两者差值在0.02~0.1之间,缓冲区域的数值选取一般为模拟区域(除断层区域)的杨氏模量和泊松比的平均值^[21]。

表2 南川地区应力场模拟力学参数
Table 2 Simulated mechanical parameters of stress field in Nanchuan area

单元体	杨氏模量(GPa)	泊松比
1	27.8	0.237
地层单元	33.7	0.223
2	41.7	0.218
3	21.4	0.276
断层	34.6	0.227
缓冲区		

2.3 模型的网格划分及边界条件确定

统计南川地区的钻井诱导缝走向(图2),确定了现今最大主应力的方向在南西60°—南东65°。先存断层的存在,使得现今地应力在断层区域得到部分应力释放,应力会在断层走向方向产生分力,改变断层及附近区域的应力的方向,与断层走向相交,使局部构造应力状态发生变化。现今地应力测量的方法较多,例如三轴岩石力学实验、测井资料计算法、水力压裂法、钻孔应力解除法等^[22]。本文主要是通过测井资料计算区内钻井实测地应力数据,区内最大主应力为:63.3~78.39 MPa,最小主应力为:54~68.16 MPa。反复模拟试验,得出最为合适的施加应力的数值。

经反复模拟之后发现,从边界处施加南西25°、75 MPa的挤压应力和北西335°、65 MPa的挤压应力。

于边界的具体方式,所以本文采取载荷均匀施加于边界上。为了对模型施加不同方向的力,便于施加对边界的约束以及为减小边界效应的影响,因此建立外围缓冲区边框,同时将建立好的地质模型始终放在缓冲区域的几何中心(图5)。

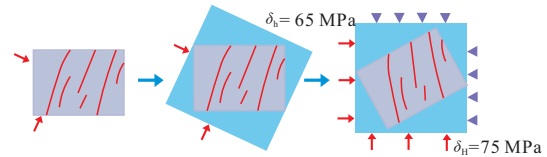


图5 应力场数值模拟边界条件

Fig. 5 Boundary conditions of numerical simulation of stress field

在ANSYS软件中导入建立好的地质模型,并对地质体单元赋予相对应的岩石力学参数。本文中的模型将使用3节点三角元素进行网格划分,根据有限元划分原理,将断层及其周围区域的网格单元划分得较小,网格密度大,而其他区域的网格规模较大,密度较小。模型的网格划分共计有59 363个节点,29 632个单元(图6)。

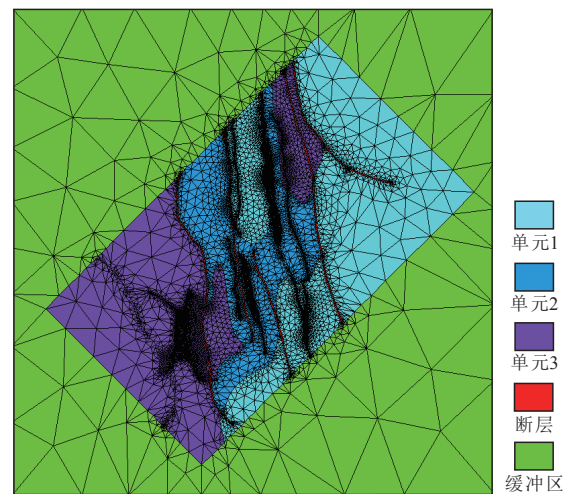


图6 ANSYS模型网格划分

Fig. 6 Mesh division of ANSYS model

3 数值模拟结果分析

与研究区内钻井实测地应力数值对比结果显示(表3),水平最大主应力的模拟结果与实测地应力的偏差值均在3 MPa以下,应力的偏差率均小于2%;水平最小主应力的模拟结果与实测地应力的偏差值均在4 MPa以下,偏差率大多数小于5%;

表3 现今构造应力场数据对比
Table 3 Stress field data comparison of current structure

井号	最大主应力			最小主应力			差应力		
	实测值(MPa)	模拟值(MPa)	偏差(%)	实测值(MPa)	模拟值(MPa)	偏差(%)	实测值(MPa)	模拟值(MPa)	偏差(%)
SY1	78.39	76.90	-1.90	68.16	65.68	-3.64	11.0	11.22	2.00
SY2	66.60	67.20	0.90	60.6	60.30	-0.50	6.0	6.90	15.00
SY3	66.60	67.48	1.32	59.00	60.45	2.46	6.6	7.03	6.52
JY10-10	63.30	64.50	1.90	54.00	56.48	4.59	9.3	8.02	-13.76

水平差应力(水平最大主应力与水平最小主应力的差值)的偏差率略高,大多小于15%,但偏差值均在2 MPa以下。综合分析后认为,模拟结果的偏差在合理的范围之内,基本符合实际地质规律。

3.1 现今最大主应力

渝东南川地区龙马溪组现今地应力场的模拟结果显示(图7),研究区处于挤压应力场环境,现今最大主应力方向约为 $NEE25^{\circ}$ — $SEE20^{\circ}$,与钻井诱导缝走向一致。受到先存断层的影响,现今应力作用于断层处时,会在沿着断层方向产生分力,使得水平最大主应力方向向东发生偏转,东西两侧的水平最大主应力方向差值最大约有 45° 。最大主应力的值域范围为56.12~93.79 MPa。受到先存断层的影响,断裂带最大主应力数值最小为52.32~68.5 MPa,为应力低值区,但是在断裂带延伸的端点与断层的转折区域的应力值较大,出现应力集中,可视该区域为临界状态,处于裂缝即将贯穿形成断层而未贯穿的状态。不同走向的断层及其附近区域的应力高、低值区也是有差异的,研究区南西—北东向断层的应力值要略小于南东—北西向的断层,如西边区域断层,构造应力在不同走向的断层区域传导时,断层走

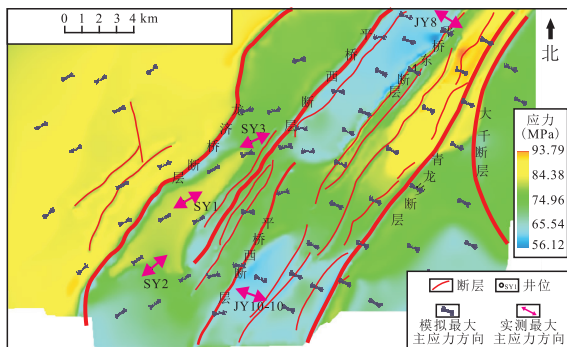


图7 南川地区龙马溪组现今最大主应力分布
Fig. 7 Distribution of present maximum principal stress of Longmaxi Formation in Nanchuan area

向的差异引起断层附近岩层的等效物理参数的变化,导致断层应力大小的变化,同样引起了周围区域的应力值的变化。研究区内龙济桥断层左侧区现今最大主应力值较大,该区域的地层埋深均大于4 500 m,在一定程度上对岩石的力学参数产生影响;龙济桥断层右侧区域埋深相对较浅,现今最大主应力值较小。区内向斜区域的应力值要高于其附近平缓区域应力值,排除断层的影响,背斜的核部区域明显大于其翼部区域;而背斜区域恰恰相反,该区域应力值相对较低,背斜核部区域挤压应力值最小,向两翼逐渐增大。

3.2 现今最小主应力

渝东南川地区龙马溪组现今最小主应力也为压应力,现今最小主应力与现今最大主应力方向垂直,应力方向为 $NNW25^{\circ}$ — $NNE20^{\circ}$,与钻井的井壁崩落方向一致。现今最小主应力值范围在48.06~71.67 MPa(图8)。水平最小主应力的分布特征与水平最大主应力的分布特征相似,全区的最小主应力分布不均匀,低值区分布明显受断层控制,断裂带区域为低值区,为48~55 MPa。同样以龙济桥断层为界限,断层左边区域水平最小主应力值较大,为69.3~71.3 MPa,

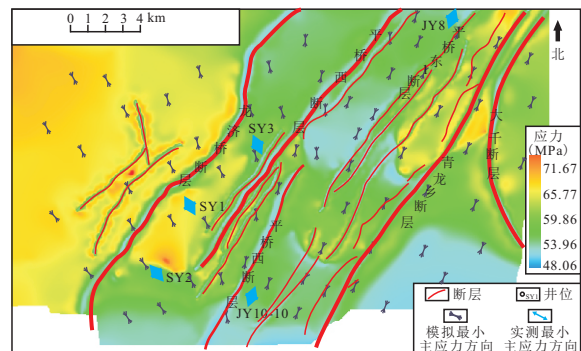


图8 南川地区龙马溪组现今最小主应力分布
Fig. 8 Distribution of present minimum principal stress of Longmaxi Formation in Nanchuan area

东部相对较小,为50.6 ~ 68.1 MPa。

4 结论

1) 南川地区的断裂分布有着比较明显的特征,主干断层的走向基本上都是北东—南西向,其他小断层走向都基本上和主干断层平行;西部区域发育有少量的北西—南东向,且该走向断层均为小断层,只有一条延伸长度较大。

2) 研究区现今最大主应力方向为NEE25°—SEE20°,大小为56.12~93.79 MPa;现今最小主应力方向为NNW25°—NNE20°,大小为48.06~71.67MPa。现今的应力分布受构造部位的影响较大,分布趋势上呈现北东—南西走向。应力方向受断层的影响较大,会在断层区域发生轻微的偏转。区内有效裂缝的优势走向为NNW25°—NNE20°;西部和向斜区域应力值较大,裂缝的开度较小;背斜核部区域应力值较小,裂缝的开度较大,为储层发育区域。

3) 通过对地质模型进行地质单元的划分,并对不同的模型单元赋予能代表区域岩石性质的岩石力学参数,能够有效地提高应力场模拟结果的精准度,更好地反映储层地应力分布特征。

参考文献

- [1] 周文,闫长辉,王世泽,等.油气藏现今地应力场评价方法及应用[M].北京:地质出版社,2007.
ZHOU Wen, YAN Changhui, WANG Shize, et al. Evaluation method and application of in-situ stress field in oil and gas reservoir[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [2] HAGHI A H, KHARRAT R, ASFF M R, et al. Present-day stress of the central Persian Gulf: Implications for drilling and well performance[J]. *Tectonophysics*, 2013, 608: 1429-1441.
- [3] 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 Junsheng, SHANG Lin, WANG Tongda, 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
- [4] 宫云鹏.南川地区构造特征及对龙马溪组页岩储层物性的控制作用[D].徐州:中国矿业大学,2015.
GONG Yunpeng. Structural feature and its control on reservoir properties of the Longmaxi Formation in Nanchuan Area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [5] 何龙,王云鹏,陈多福,等.重庆南川地区五峰组—龙马溪组黑色页岩沉积环境与有机质富集关系[J].天然地球科学,2019,30(2):203-218.
HE Long, WANG Yunpeng, CHEN Duofu, et al. Relationship between sedimentary environment and organic matter accumulation in the black shale of Wufeng-Longmaxi Formations in Nanchuan area, Chongqing[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(2): 203-218.
- [6] 黄籍中.四川盆地页岩气与煤层气勘探前景分析[J].岩性油气藏,2009,21(2):116-120.
HUANG Jizhong. Exploration prospect of shale gas and coal-bed methane in Sichuan Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2009, 21(2): 116-120.
- [7] 陈泽明,雍自权,朱杰平,等.四川盆地东南部南川地区五峰组龙马溪组页岩特征[J].成都理工大学学报:自然科学版,2013,40(6):696-702.
CHEN Zeming, YONG Ziquan, ZHU Jieping, et al. Features of Wufeng Formation and Longmaxi Formation shale in Nanchuan, southeast of Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, 40(6): 696-702.
- [8] 高莉.黔北—渝南地区五峰—龙马溪页岩储层物性研究[D].北京:中国地质科学院,2019.
GAO Li. Physical properties of Wufeng-Longmaxi Shale Reservoir in North Guizhou-South Chongqing Area[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2019.
- [9] HIGGINS S M, GOODWIN S A, DONALD A, et al. Anisotropic stress models improve completion design in the Baxter shale [C]// paper SPE-115736-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 21-24 September, 2008, Denver, Colorado, USA.
- [10] 张广智,陈娇娇,陈怀震,等.基于页岩岩石物理等效模型的地应力预测方法研究[J].地球物理学报,2015,58(06):2112-2122.
ZHANG Guangzhi, CHEN Jiaojiao, CHEN Huaizhen, et al. Prediction for in-situ formation stress of shale based on rock physics equivalent model[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(6): 2112-2122.
- [11] 王珂,张惠良,张荣虎,等.塔里木盆地大北气田构造应力场解析与数值模拟[J].地质学报,2001,79(11):2557~2572.
WANG Ke, ZHANG Huiliang, ZHANG Ronghu, et al. Analysis and numerical simulation of tectonic stress field in the Dabei Gas Field, Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(11): 2557-2572.
- [12] 邓起东,张培震,冉勇康,等.中国活动构造基本特征[J].中国科学D辑,2002,32(12):1020-1030.
DENG Qidong, ZHANG Peizhen, RAN Yongkang, et al. Basic characteristics of active tectonics in China[J]. *Science In China (Series D)*, 2002, 32(12): 1020-1030.
- [13] 郑文俊,张培震,袁道阳,等.中国大陆活动构造基本特征及其对区域动力过程的控制[J].地质力学学报,2019,25(5):699-721.
ZHENG Wenjun, ZHANG Peizhen, YUAN Daoyang, et al. Basic characteristics of active tectonics and associated geodynamic processes in continental China[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(5): 699-721.
- [14] ANSYS Inc. Theory Release 5.7[M]. 12th ed. Canonsburg PA:

- SAS IP, Inc, 2001: 668-669, 928.
- [15] 邱登峰,郑孟林,张瑜,等.塔中地区构造应力场数值模拟研究[J].大地构造与成矿学,2012,36(2):168-175.
QIU Dengfeng, ZHENG Menglin, ZHANG Yu, et al. Numerical simulation of the tectonic stress field in the Tazhong Area[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2012, 36(2): 168-175.
- [16] 李春林,郭鹏,任德生.大民屯凹陷构造应力场及其与油气运聚关系[J].油气地质与采收率,2013,19(6):47-49.
LI Chunlin, GUO Peng, REN Desheng. Relationship between tectonic stress field and migration and accumulation of oil and gas in Damintun depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 19(6): 47-49.
- [17] 王珂,戴俊生,冯建伟,等.塔里木盆地克深前陆冲断带储层岩石力学参数研究.中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(5):25-33.
WANG Ke, DAI Junsheng, FENG Jianwei, et al. Research on reservoir rock mechanical parameters of Keshen foreland thrust belt in Tarim Basin[J]. Journal of China University of Petroleum, 2014, 38(5): 25-33.
- [18] 谢润成,周文,陶莹,等.有限元分析方法在现今地应力场模拟中的应用[J].石油钻探技术,2008,36(2):60-63.
XIE Runcheng, ZHOU Wen, TAO Ying, et al. Application of finite element analysis in the simulation of the in-situ stress field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(2): 60-63.
- [19] 路保平,鲍洪志.岩石力学参数求取方法进展[J].石油钻探技术,2005,33(5):44-47.
LU Baoping, BAO Hongzhi. Advances in calculation methods for rock mechanic parameters[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(5): 44-47.
- [20] 陈勉,金衍,张广清.石油工程岩石力学基础[M].北京:石油工业出版社,2011.
CHEN Mian, JIN Yan, ZHANG Guangqing. Fundamentals of rock mechanics in petroleum engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [21] 徐荣忠.东北梨树断陷断陷期构造应力场分析[D].西安:西安石油大学,2014.
XU Rongzhong. The analysis of tectonic stress field of Lishu Fault Depression in Northeast China[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2014.
- [22] 孙礼健,朱元清,杨光亮,等.断层端部及附近地应力场的数值模拟[J].大地测量与地球动力学,2009,29(2):7-12.
SUN Lijian, ZHU Yuanqing, YANG Guangliang, et al. Numerical simulation of ground stress field at ends and vicinity of a fault[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(2): 7-12.

(编辑 尹淑容)

(上接第189页)

- area[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(4): 73-77.
- [11] 赵玉集,郭为,熊伟,等.页岩等温吸附/解吸影响因素研究[J].天然气地球科学,2014,25(6):940-946.
ZHAO Yuji, GUO Wei, XIONG Wei, et al. Study of impact factors on shale gas adsorption and desorption[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(6): 940-946.
- [12] 王瑞,张宁生,刘晓娟,等.页岩气吸附与解吸机理研究进展[J].科学技术与工程,2013,13(19):5562-5565.
WANG Rui, ZHANG Ningsheng, LIU Xiaojuan et al. Research progress of mechanism of adsorption and desorption of gas in shale[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(19): 5562-5565.
- [13] 孔德涛,宁正福,杨峰,等.页岩气吸附规律研究[J].科学技术与工程,2014,14(6):108-111.
KONG Detao, NING Zhengfu, YANG Feng, et al. Study of methane adsorption on shales[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(6): 108-111.
- [14] 王玉普,左罗,胡志明,等.页岩高温高压吸附实验及吸附模型[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(11):4129-4135.
WANG Yupu, ZUO Luo, HU Zhiming, et al. Experiment of supercritical methane adsorption on shale and adsorption modelling[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(11): 4129-4135.
- [15] 梁彬,姜汉桥,李俊键,等.考虑多因素的页岩气吸附能力计算模型[J].特种油气藏,2015,22(1):121-124.
LIANG Bin, JIANG Hanqiao, LI Junjian, et al. Calculation model of multi-factor shale gas adsorption capacity[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2015, 22(1): 121-124.
- [16] 曲占庆,林珊珊,张杰.多组分和吸附对页岩气储量计算的影响[J].特种油气藏,2012,19(3):141-143.
QU Zhanqing, LIN Shanshan, ZHANG Jie. Impacts of multi-component and adsorption on shale gas reserve estimation[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2012, 19(3): 141-143.
- [17] 熊亮,魏力民,史洪亮.川南龙马溪组储层分级综合评价技术及应用[J].天然气工业,2019,39(S1):60-65.
XIONG Liang, WEI Limin, SHI Hongliang. Comprehensive evaluation technology and application of reservoir classification of Longmaxi formation in South Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(S1): 60-65.
- [18] 王晋,房晓红,曾凡桂.伊利石1M多型结构模型的构建及XRD模拟[J].硅酸盐学报,2015,43(8):1162-1166.
WANG Jin, FANG Xiaohong, ZENG Fangui. Structure modeling of illite-1M and its XRD simulation[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(8): 1162-1166.
- [19] 韩永华.高岭石、蒙脱石表面性质及其分散机理的量子化学研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2017.
HAN Yonghua. Quantum chemistry study on the surface properties and dispersion of kaolinite and montmorillonite[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2017.
- [20] LANGMUIR I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum[J]. Journal of the American Chemical Society, 1918, 40(9): 1361-1403.

(编辑 黄颖)