

渤海湾盆地渤南洼陷沙四段 岩相的岩石力学性质差异

李志鹏¹, 卜丽侠²

(1. 中国石化 胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015;

2. 中国石化 胜利油田分公司 东辛采油厂, 山东 东营 257015)

摘要: 根据渤海湾盆地渤南洼陷沙四段低渗透油藏取心井资料, 研究了其岩相类型, 利用不同岩相常规三轴压缩实验分析资料, 建立了静态岩石力学参数油藏围压条件的恢复图版, 分析了不同岩相静态力学参数及应力—应变关系的差异性。渤南洼陷沙四段低渗透油藏可划分为粗粒砂岩相、细砂岩相、粉砂岩相、泥质砂岩相及碳酸盐质砂岩相 5 种岩相; 同一岩相随着围压的不断加杨氏模量变大, 泊松比增加; 随着岩相粒度变粗, 存在杨氏模量增加、泊松比减小的整体趋势; 粗粒砂岩相的泊松比不遵循整体趋势, 较细粒砂岩相大, 比粉砂岩相小; 岩相粒度变粗, 应力—应变关系越趋近线弹性, 初始颗粒重排列塑性段变小, 高应力塑性段变短。

关键词: 岩相; 力学性质; 低渗透油藏; 沙四段; 始新统; 渤南洼陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE311

文献标识码: A

Difference of lithofacies mechanical properties of the fourth member of Shahejie Formation in the Bonan Subsag, Bohai Bay Basin

LI Zhipeng¹, BU Lixia²

(1. Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Shengli Oilfield, Dongying, Shandong 257015, China;

2. Dongxin Oil Exploration Plant, SINOPEC Shengli Oilfield, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: Based on the data of well cores in low permeability reservoirs in the fourth member of Shahejie Formation in the Bonan Oilfield, the rock facies types were studied. Using conventional three axis compression test data of different lithofacies, restored static rock mechanical parameters were established under reservoir confining pressure conditions. The differences of static mechanical parameters and stress-strain relation between lithofacies were analyzed. The low permeability reservoirs in the Bonan Oilfield can be divided into 5 types: coarse grained sandstones, fine sandstones, siltstones, mudstones and carbonate sandstones. In the same rock, with the increasing confining pressure, the Young's modulus becomes larger, and the Poisson's ratio increases slightly. With the increase of rock grain size, the Young's modulus increases and the Poisson's ratio decreases. However, the Poisson's ratio of coarse grained sandstones does not follow the overall trend, and is larger than that of fine sandstones and smaller than that of siltstones. As the grain size of rock becomes coarser, the stress-strain relation becomes more linear. And the initial grain rearrangement plastic section and the high stress plastic section become smaller.

Key words: lithofacies; mechanical property; low permeability reservoir; fourth member of Shahejie Formation; Eocene; Bonan Subsag; Bohai Bay Basin

沉积岩的岩性、矿物成分、岩石结构都存在较大的差异, 可以划分为不同类型的岩相。其岩性、岩石结构及成岩作用等的差异从本质上会造成力学性质的不同^[1-5], 进而影响地应力场的分布^[6-8]。而地应力是控制低渗透油气藏水力压裂裂缝形态及井网部署的重要因素^[9-12]。随着国内外低渗透油藏开发的不断进行, 特别是致密油气藏的大规模

压裂开发^[13-16], 地应力、岩石力学性质的差异成为了低渗透油气藏井网部署、调整及压裂等研究的重要基础。因此, 明晰不同岩相的岩石力学性质差异, 是进行地应力场预测、压裂施工设计等的关键。本文以渤海湾盆地渤南洼陷沙四段低渗透油藏^[17-18]为研究对象, 根据取心井资料, 研究了其岩相类型, 利用不同岩相常规三轴压缩实验分析资料, 建立了

收稿日期: 2018-04-20; 修订日期: 2019-02-13。

作者简介: 李志鹏 (1983—), 男, 博士, 副研究员, 从事油藏描述方面的研究。E-mail: lizhipeng20020015@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项“渤海湾盆地济阳坳陷致密油开发示范工程”(2017ZX05072)和山东省胜利油田博士后课题“低渗透油藏相控地应力预测及其应用”(YKB1514)联合资助。

静态岩石力学参数油藏围压条件的恢复图版,分析了不同岩相间静态力学参数及应力—应变关系的差异性,旨在为渤南洼陷沙四段低渗透油藏的地应力预测、钻井、压裂工艺设计提供借鉴。

1 岩相类型划分

渤南洼陷沙四段低渗透油藏主要为扇三角洲沉积,岩性以粉砂岩、细砂岩为主,同时发育砂砾岩、粗砂岩、中砂岩、泥质砂岩及灰质砂岩等。砂岩岩性复杂多样,根据沉积特征、岩性及物性特征等,可将砂岩划分为粗粒砂岩相、细砂岩相、粉砂岩相、泥质砂岩相及碳酸盐质砂岩相 5 种岩相(表 1)。自粗粒砂岩相—细砂岩相—粉砂岩相,沉积水动力条件不断减弱,粒度变细,孔隙度降低,以上 3 种岩相泥质含量较低,以钙质和泥质胶结为主。泥质砂

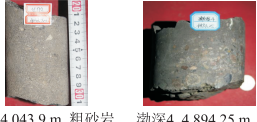
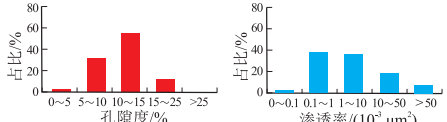

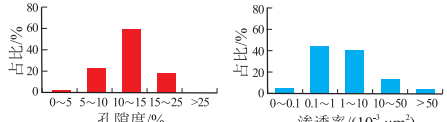

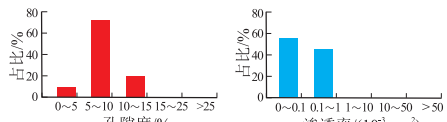

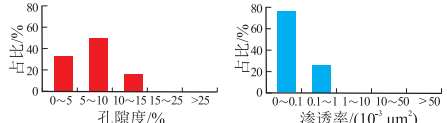

岩相泥质含量较高,大于 30%,以泥质胶结为主。碳酸盐质砂岩相碳酸盐含量较高,大于 25%,为钙质和白云质胶结,胶结程度较高;一般发育在砂体顶底与泥岩接触的部位,为后期成岩作用形成的一类岩石,发育相对较少。该岩相岩石脆性大,取心过程中易于破碎。

2 实验样品及数据

本文实验样品的取样,是在相同岩相、相近深度(深度差异小于 200 m)钻取 4~5 块直径为 25 mm、长度大于 50 mm 的岩样。通过岩样岩石薄片观察,岩石组分以石英、长石和岩屑为主,石英平均含量 35%,长石平均含量 32%,岩屑平均含量 29%,为岩屑质长石砂岩或长石质岩屑砂岩(图 1)。利用美国 GCTS 公司的 RTX 高温高压岩石三轴仪进行三

表 1 渤海湾盆地渤南洼陷沙四段低渗透油藏砂岩岩相类型划分

Table 1 Lithofacies classification of sandstones in low permeability reservoirs of fourth member of Shahejie Formation, Bonan Subsg, Bohai Bay Basin

岩相类型	沉积特征	岩性	典型岩心照片	物性特征
粗粒砂岩相	粒度粗 滚动沉积 河道滞留沉积 块状结构	砾岩 含砾砂岩 粗砂岩 中砂岩	 义172, 4 043.9 m, 粗砂岩 渤深4, 4 894.25 m, 砂砾岩	
细砂岩相	跳跃沉积 水下分流河道 河口坝 块状结构 交错层理	细砂岩 粉细砂岩 中—细砂岩	 义170, 3 810.7 m, 细砂岩 义160, 3 680.79 m, 细砂岩	
粉砂岩相	跳跃沉积 水下分流河道 河口坝 席状砂 小型交错层理	粉砂岩	 义171, 3 527.7 m, 粉砂岩 义171, 3 526.4 m, 粉砂岩	
泥质砂岩相	跳跃、悬浮沉积 席状砂 支流间弯砂体 块状结构 水平层理	泥质细砂岩 泥质粉砂岩	 义176, 3 785.4 m, 泥质细砂岩, 泥质分布不均	
碳酸盐质砂岩相	砂岩成岩期灰质、白云质胶结而成,多发育在砂体顶或底部	灰质细砂岩 灰质粉砂岩 白云质细砂岩 白云质粉砂岩	 义160, 3 678.9 m, 灰质细砂岩	

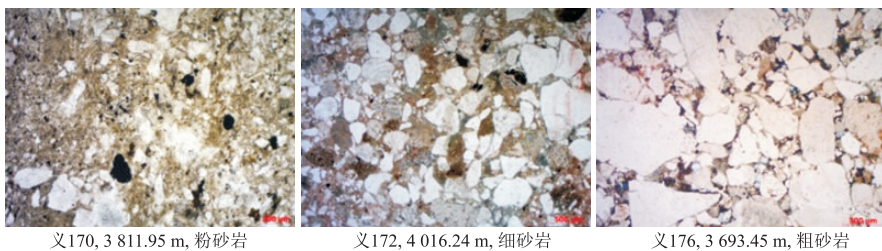


图 1 渤海湾盆地渤南洼陷沙四段实验样品典型薄片

Fig.1 Typical slices of experiment samples in the fourth member of Shahejie Formation, Bonan Subsg, Bohai Bay Basin

轴压缩实验。为了使实验条件更接近油藏条件,将岩样饱和水^[19],再用密封薄膜将岩样密封,保证实验过程中岩心中的流体不外溢。实验为室温条件,三轴围压分别加载 0.1, 12, 22, 32 MPa,对相同岩相的样品进行分别实验,得到不同围压条件下岩样的杨氏模量及泊松比(表 2)。

3 岩相的岩石力学性质差异性

3.1 静态力学参数油藏围压条件矫正

根据渤南洼陷沙四段低渗透油藏埋藏深度(3 300~4 500 m)与水平应力大小的统计关系(式 1),渤南洼陷沙四段低渗透油藏围压($S_H + S_h$)/2 要在 68 MPa 以上。

$$\begin{cases} S_H = 0.018 7D + 19.252 & R^2 = 0.563 6 \\ S_h = 0.02D - 10.661 & R^2 = 0.693 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_H 为水平最大主应力,MPa; S_h 为水平最小主应力,MPa; D 为油藏的埋藏深度,m。

围压对岩石力学参数影响较大^[20],研究岩相力学参数差异性前,需对实验室内测量的静态岩石力学参数进行油藏围压条件下的矫正。利用本次实验的有限测试数据,尝试建立了渤南洼陷低渗透油藏各岩相杨氏模量、泊松比与围压的关系图,并拟合了杨氏模量与围压、泊松比与围压的关系式(表 3)。根据目前的有限测试数据,各岩相杨氏模量、泊松比与围压呈指数关系,相关性较好。

表 2 渤海湾盆地渤南洼陷沙四段样品岩石力学参数实验测试结果

Table 2 Rock mechanical parameters in the fourth member of Shahejie Formation, Bonan Subsg, Bohai Bay Basin

井号	样品编号	饱和状态	测试温度/℃	岩相	岩性	围压/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa
义 170	1	水	22	泥岩相	灰质泥岩	0.1	4.08	0.300	41.88
义 170	2	水	22	泥岩相	灰质泥岩	12	13.20	0.340	51.33
义 170	3	水	22	泥岩相	灰质泥岩	22	14.60	0.355	84.25
义 170	4	水	22	泥岩相	灰质泥岩	32	15.45	0.360	108.21
义 170	5	水	22	泥质砂岩相	泥质粉砂岩	0.1	9.60	0.260	51.83
义 170	6	水	22	泥质砂岩相	泥质粉砂岩	12	19.00	0.300	77.21
义 170	7	水	22	泥质砂岩相	泥质粉砂岩	22	20.40	0.305	103.54
义 170	8	水	22	泥质砂岩相	泥质粉砂岩	32	21.28	0.310	120.30
义 172	9	水	22	粉砂岩相	粉砂岩	0.1	12.12	0.240	61.97
义 172	10	水	22	粉砂岩相	粉砂岩	12	22.40	0.270	96.12
义 172	11	水	22	粉砂岩相	粉砂岩	22	23.49	0.270	139.42
义 172	12	水	22	粉砂岩相	粉砂岩	32	24.98	0.280	184.17
义 176	13	水	22	细砂岩相	粉—细砂岩	0.1	13.05	0.150	76.28
义 176	14	水	22	细砂岩相	细砂岩	0.1	14.32	0.170	77.49
义 176	15	水	22	细砂岩相	细砂岩	0.1	13.27	0.160	80.25
义 176	16	水	22	细砂岩相	细砂岩	12	23.55	0.180	98.75
义 176	17	水	22	细砂岩相	细砂岩	12	23.97	0.190	106.70
义 176	18	水	22	细砂岩相	细砂岩	22	24.87	0.190	205.96
义 176	19	水	22	细砂岩相	细砂岩	32	25.92	0.190	215.36
渤深 4	20	水	22	粗粒砂岩相	中—粗砂岩	0.1	15.87	0.170	81.29
渤深 4	21	水	22	粗粒砂岩相	中—粗砂岩	12	26.38	0.190	132.96
渤深 4	22	水	22	粗粒砂岩相	中—粗砂岩	22	27.17	0.220	217.49
渤深 4	23	水	22	粗粒砂岩相	中—粗砂岩	32	28.56	0.220	229.69

表 3 渤海湾盆地渤南洼陷沙四段低渗透油藏岩石力学参数与围压拟合关系式

Table 3 Fitting relationship between rock mechanical parameters and confining pressure in low permeability reservoirs in the fourth member of Shahejie Formation, Bonan Subsg, Bohai Bay Basin

岩相	杨氏模量与围压的关系		泊松比与围压关系	
	相关关系	相关系数	相关关系	相关系数
粗粒砂岩相	$E = 2.162 4 \ln P + 20.852$	$R^2 = 0.998$	$\lambda = 0.008 1 \ln P + 0.186 4$	$R^2 = 0.787 7$
细砂岩相	$E = 2.127 9 \ln P + 18.446$	$R^2 = 0.995 1$	$\lambda = 0.005 3 \ln P + 0.172 2$	$R^2 = 0.839 3$
粉砂岩相	$E = 2.172 5 \ln P + 17.087$	$R^2 = 0.997 7$	$\lambda = 0.006 3 \ln P + 0.254 3$	$R^2 = 0.967 6$
泥质砂岩相	$E = 2.006 1 \ln P + 114.19$	$R^2 = 0.999 4$	$\lambda = 0.008 5 \ln P + 0.279 4$	$R^2 = 0.998 7$
泥岩相	$E = 1.952 2 \ln P + 8.543 5$	$R^2 = 0.999 3$	$\lambda = 0.01 \ln P + 0.322$	$R^2 = 0.971 4$

注: E 为杨氏模量, GPa; P 为围压, MPa; λ 为泊松比; R 为相关系数。

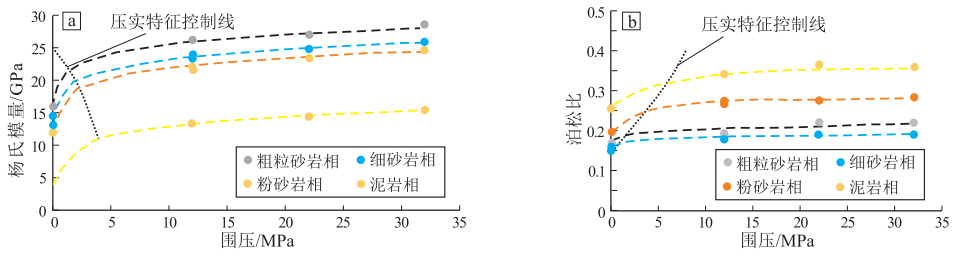


图 2 渤海湾盆地渤南洼陷沙四段低渗透油藏岩石力学参数与围压关系
实验条件:岩样规格 25 mm×50 mm, 饱和水。

Fig.2 Relationship between rock mechanical parameters and confining pressure in low permeability reservoirs in the fourth member of Shahejie Formation, Bonan Subsg, Bohai Bay Basin

渤南洼陷沙四段低渗透油藏不同岩相间力学参数差异性较大(图 2)。相同围压条件下,随着岩相粒度变细,杨氏模量下降,反映了岩石颗粒越细,颗粒与颗粒之间支撑作用相对越弱的特点,泥质含量的增加会大幅降低岩石的杨氏模量(图 2a)。岩相对泊松比的影响较复杂,总体上随着岩相粒度变细及泥质含量的增加,泊松比增加,粗粒砂岩相不符合上述规律,较细砂岩相要稍高(图 2b)。同一岩相随着围压增大,杨氏模量及泊松比都呈现指数增加,杨氏模量增加幅度较泊松比大,两参数都存在拐点,岩相间拐点出现的早、晚受岩石本身抗压实作用的影响,粒度越粗,抗压实作用越强,拐点出现得越早(图 2)。

3.2 岩相静态力学参数差异

根据式(1)和表 3 的拟合关系式,对渤南洼陷沙四段低渗透油藏不同岩相的杨氏模量及泊松比进行了油藏围压条件的矫正。统计发现粗粒砂岩相、细砂岩相及粉砂岩相杨氏模量差异较小,泥岩相杨氏模量相对较低(图 3a);粗粒砂岩相与细砂岩相泊松比相近,粗粒砂岩相较细砂岩相稍高,粉砂岩相泊松比较粗粒砂岩相高,较泥岩相低,泥岩相泊松比最高(图 3b)。相同岩相内杨氏模量与泊松比差异并不大,可认为基本为一个均质的力学参数体。

3.3 岩相应力—应变关系差异

从图 2 看,渤南洼陷沙四段低渗透油藏各岩相在围压达 22 MPa 后,岩石力学参数变化幅度明显

减小,选取围压 35 MPa 条件下的应力—应变曲线(图 4),研究其应力—应变关系。粗粒砂岩相颗粒粗,颗粒间支撑作用强,在轴压作用下,颗粒重排列塑性变形段基本不发育,线弹性变形段长,后期高轴压作用下,微裂隙形成的塑性变形段短。细砂岩相与粉砂岩相的应力—应变关系相似,在低轴压作

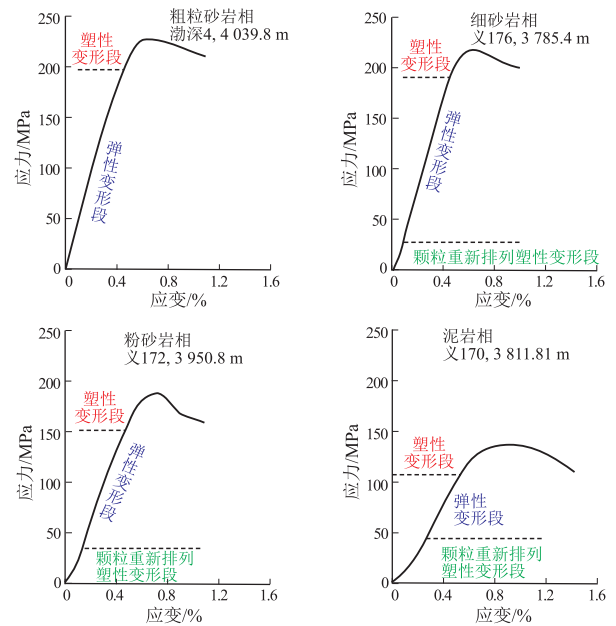


图 4 渤海湾盆地渤南洼陷低渗透油藏不同岩相典型应力—应变关系

实验条件:围压 32 MPa, 室内常温, 岩样饱和水。

Fig.4 Typical stress—strain relationship of different lithofacies in low permeability reservoirs in Bonan Subsg, Bohai Bay Basin

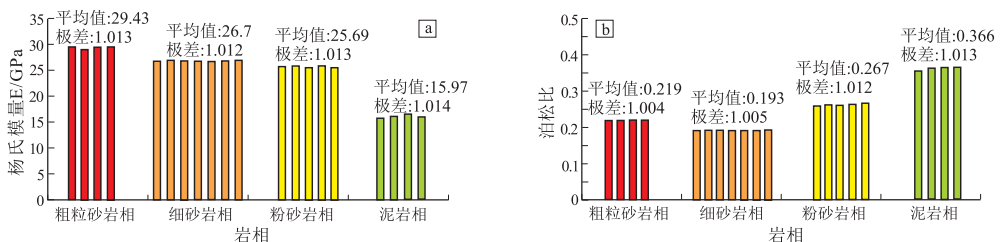


图 3 渤海湾盆地渤南洼陷低渗透油藏围压条件下岩石力学参数

Fig.3 Rock mechanical parameters under confining pressure of low permeability reservoirs in the fourth member of Shahejie Formation, Bonan Subsg, Bohai Bay Basin

用下颗粒首先发生较短的重排列塑性变形段,线弹性段较长,高轴压微裂隙形成的塑性变形段较短;与细砂岩相比,粉砂岩相两端的塑性段要长,线弹性段要短。泥岩相的应力—应变关系与其他3类岩相差异较大,低轴压下的颗粒重排列塑性变形段明显变长,线弹性段发育短,高轴压塑性变形段长。综上,渤南洼陷低渗透油藏粗粒砂岩相、细砂岩相、粉砂岩相可以近似为线弹性材料;泥岩相为弹塑性材料,在地应力模拟等应用过程中,一定要引起重视,不应将油藏条件下的泥岩相也近似为弹性材料。

综合以上分析及渤南洼陷现场测试地应力的实际结果,受地质体复杂展布的影响,力学性质差异是非常复杂的,应该引起足够的重视和警惕。目前大部分商业软件,利用有限元、有限差分等数值模拟技术正演地应力场的分布,受计算机计算能力及运算方式等影响,地质框架模型注重刻画构造形态,但对于不同力学性质地质体的展布形态刻画不足,导致力学参数模型为了节省模拟时间大部分采用了层内的均质模型,造成模拟结果水平最大应力方向基本与区域主应力方向一致,应力方向在整个油藏内几乎不发生较大的变化。油藏地应力模拟首先利用岩心室内测试,明晰不同地质体力学性质的差异性。地质模型着重刻画不同地质体空间展布形态,对砂泥岩油气藏,着重刻画砂体的展布形态,对不同的地质体选用不同的力学参数建立力学参数模型。有条件的情况下,甚至可以建立力学参数的三维非均质模型,并对不同地质体选择合适的本构定律。在此基础上,进行有限元或有限差分的地应力场模拟,得到油气藏非均质的地应力场,为油田的油藏工程设计、钻井工程设计及压裂设计等提供尽可能准确的地应力场。

4 结论

(1) 渤南洼陷沙四段低渗透油藏砂泥岩可以划分为粗粒砂岩相、细砂岩相、粉砂岩相、泥质砂岩相、碳酸盐质砂岩相及泥岩相6种类型。

(2) 初步建立了不同岩相杨氏模量及泊松比与围压的关系图版,同一岩相,围压越大,杨氏模量及泊松比不断增加。随着岩相粒度的不断变粗,杨氏模量增加,泊松比减小,但粗粒砂岩相的泊松比不遵循整体趋势,较细粒砂岩相大,比粉砂岩相小。

(3) 岩相粒度越粗,颗粒重新排列塑性变形段变短,高轴压塑性变形段变短,线性弹性段增加。粗粒砂岩相、细砂岩相、粉砂岩相可以近似为线弹

性材料,泥岩相为弹塑性材料。

致谢:本文在研究过程中得到了胜利油田分公司勘探开发研究院低渗透油藏研究室同仁在资料等方面的大力支持,在此致以衷心感谢!

参考文献:

- [1] 谭成轩,孙叶,王连捷.地应力测量值得注意的若干问题[J].地质力学学报,2003,9(3):275-280.
TAN Chengxuan, SUN Ye, WANG Lianjie. Some problems of in-situ crustal stress measurements[J]. Journal of Geomechanics, 2003, 9(3):275-280.
- [2] 景锋,盛谦,张勇慧,等.不同地质成因岩石地应力分布规律的统计分析[J].岩土力学,2008,29(7):1877-1883.
JING Feng, SHENG Qian, ZHANG Yonghui, et al. Statistical analysis of geostress distribution laws for different rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7):1877-1883.
- [3] 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[J].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.
- [4] 杨海博,武云云.致密储层岩石的微观结构和力学性质试验分析[J].复杂油气藏,2011,4(3):10-15.
YANG Haibo, WU Yunyun. The experimental analysis of microstructure and mechanical properties of tight reservoir rocks[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2011, 4(3):10-15.
- [5] 祖克威,曾联波,刘喜中,等.厚层河道砂体地应力分布影响因素分析[J].地质力学学报,2014,20(2):149-158.
ZU Kewei, ZENG Lianbo, LIU Xizhong, et al. Analysis of influencing factors for ground stress in channel sandstone[J]. Journal of Geomechanics, 2014, 20(2):149-158.
- [6] 秦向辉,谭成轩,孙进忠,等.地应力与岩石弹性模量关系试验研究[J].岩土力学,2012,33(6):1689-1695.
QIN Xianghui, TAN Chengxuan, SUN Jinzhong, et al. Experimental study of relation between in-situ crustal stress and rock elastic modulus[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6):1689-1695.
- [7] 裴启涛,丁秀丽,黄书岭,等.地应力与岩体模量关系的理论及试验研究[J].冰川冻土,2016,38(4):889-897.
PEI Qitao, DING Xiuli, HUANG Shuling, et al. Theoretical and experimental study of relation between in-situ stress and rock mass modulus[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4):889-897.
- [8] 俞然刚,田勇.砂岩岩石力学参数各向异性研究[J].实验力学,2013,28(3):368-375.
YU Rangang, TIAN Yong. On the rock mechanics parameters anisotropy of sandstone[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(3):368-375.
- [9] 刘钦节,闫相祺,杨秀娟.分层地应力方法在薄互层低渗油藏大型压裂设计中的应用[J].石油钻采工艺,2009,31(4):

83-88.

LIU Qinjie, YAN Xiangzhen, YANG Xiujuan. Application of stratified stress method in massive hydraulic fracturing design[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(4): 83-88.

[10] 严成增, 郑宏, 孙冠华, 等. 基于 FDEM-Flow 研究地应力对水力压裂的影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 237-246.

YAN Chengzeng, ZHENG Hong, SUN Guanhua, et al. Effect of in-situ stress on hydraulic fracturing based on FDEM-Flow[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1): 237-246.

[11] 唐书恒, 朱宝存, 颜志丰. 地应力对煤层气井水力压裂裂缝发育的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 65-69.

TANG Shuheng, ZHU Baocun, YAN Zhifeng. Effect of crustal stress on hydraulic fracturing in coalbed methane wells[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 65-69.

[12] 王伯军, 张士诚, 李莉. 基于地应力场的井网优化设计方法研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(3): 55-59.

WANG Bojun, ZHANG Shicheng, LI Li. The well pattern optimization design method based on the earth stress field[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(3): 55-59.

[13] 付道明, 吴晓东, 牟善波, 等. 大型压裂技术在低孔低渗薄互层中应用与研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(1): 213-216.

FU Daoming, WU Xiaodong, MU Shanbo, et al. Research on and application of large-scale fracturing technology in low porosity and ultra-low permeability laminated layers[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(1): 213-216.

[14] CIRAK F, DEITERDING R, MAUCH S P. Large-scale fluid-structure interaction simulation of viscoplastic and fracturing thin-shells subjected to shocks and detonations[J]. Computers & Structures, 2007, 85(11/14): 1049-1065.

[15] 曾雨辰, 杨保军. 页岩气水平井大型压裂设备配套及应用[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(6): 78-82.

ZENG Yuchen, YANG Baojun. Equipment outfitting and application for large-scale fracturing in shale gas horizontal wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(6): 78-82.

[16] 赵金洲, 王松, 李勇明. 页岩气藏压裂改造难点与技术关键[J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 46-49.

ZHAO Jinzhou, WANG Song, LI Yongming. Difficulties and technical keys of fracturing reformation in shale gas reservoir[J]. Nature Gas Industry, 2012, 32(4): 46-49.

[17] 罗顺社, 刘魁元, 何幼斌, 等. 渤南洼陷沙四段陆源碎屑与碳酸盐混合沉积特征与模式[J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(4): 19-21.

LUO Shunshu, LIU Kuiyuan, HE Youbin, et al. Mixed sedimentary characteristics and mode of terrigenous clastics and carbonate in Es₄ of Bonan Depression[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2004, 26(4): 19-21.

[18] 刘毅, 陆正元, 戚明辉, 等. 渤海湾盆地沾化凹陷沙河街组页岩油微观储集特征[J]. 石油实验地质, 2017, 39(2): 180-185.

Liu Yi, LU Zhengyuan, QI Minghui, et al. Microscopic characteristics of shale oil reservoirs in Shahejie Formation in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2017, 39(2): 180-185.

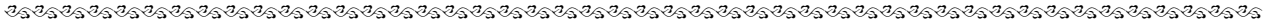
[19] 高磊. 饱水对岩石力学性能影响的试验研究[J]. 新疆水利, 2015(2): 1-5.

GAO Lei. Experimental study on effect of saturated water on rock mechanical properties[J]. Xinjiang Water Resources, 2015(2): 1-5.

[20] 尤明庆. 岩石试样的杨氏模量与围压的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 53-60.

YOU Mingqing. Effect of confining pressure on the Young's Modulus of rock specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 53-60.

(编辑 徐文明)



(上接第 227 页)

[13] 白玉彬, 赵靖舟, 方朝强. 鄂尔多斯盆地长 6 油层组准连续型致密砂岩油藏形成机理[J]. 石油实验地质, 2013, 35(1): 65-71.

BAI Yubin, ZHAO Jingzhou, FANG Chaoqiang. Forming mechanism of quasi-continuous tight sandstone reservoir of Chang 6 oil-bearing formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(1): 65-71.

[14] 赵靖舟, 王永东, 孟祥振, 等. 鄂尔多斯盆地陕北斜坡东部三叠系长 2 油藏分布规律[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 23-27.

ZHAO Jingzhou, WANG Yongdong, MENG Xiangzhen, et al. Law of petroleum accumulation and distribution in Triassic Chang 2 oil-bearing Formation in eastern North Shaanxi Slope,

Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1): 23-27.

[15] 侯平, 欧阳华, 王震, 等. 石油二次运移优势路径影响因素及形成动力学条件[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(1): 57-62.

HOU Ping, OUYANG Hua, WANG Zhen, et al. Effect factors and dynamic conditions in the formation of preferable paths in oil secondary migration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(1): 57-62.

[16] 张发强, 罗晓容, 苗盛, 等. 石油二次运移的模式及其影响因素[J]. 石油实验地质, 2003, 25(1): 69-75.

ZHANG Faqiang, LUO Xiaorong, MIAO Sheng, et al. The patterns and its effect factors of secondary hydrocarbon migration[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(1): 69-75.

(编辑 黄娟)