

镇北长 8₁ 储层微观孔喉结构及物性参数特征

刘广峰, 白耀星, 顾岱鸿, 高星星, 王文举, 潘少杰, 王 猛
(中国石油大学(北京) 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249)

摘要:采用铸体薄片、高压压汞、恒速压汞、稳定渗流、X衍射全岩分析、三轴压缩声发射等实验方法,对镇北地区长 8₁ 致密砂岩储层储集空间、储层敏感性、岩石脆性等参数特征进行研究,结果表明,该地区储层储集空间以粒间孔和粒间溶孔为主,粒内容孔(长石溶孔+岩屑溶孔)次之,部分地区存在晶间孔;储层发育偏粗态、偏细态、细态 3 种孔喉结构类型,其中以细态型孔隙结构为主;致密砂岩储层品质主要受喉道控制。长 8₁ 致密砂岩储层具有应力敏感性较弱,脆性指数大,水平主应力差值小的特点,适合利用体积压裂技术进行开发。

关键词:致密砂岩储层; 储集空间; 喉道; 应力敏感; 脆性指数; 地应力

中图法分类号: P618.13

文献标识码: A

Characteristics of microscopic pore structure and physical property parameter of Chang 8₁ oil reservoir in Zhenbei Area

LIU Guangfeng, BAI Yaoxing, GU Daihong, GAO Xingxing, WANG Wenju, PAN Shaojie, WANG Meng

(MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The cast thin section analysis, high-pressure mercury, constant-speed mercury porosimetry, steady seepage, X-ray diffraction and acoustic emission of rocks under triaxial compression methods are used to experimentally investigate the reservoir space and physical property parameters of the Chang 8₁ tight sandstone reservoir in the Zhenbei Area. The results show that the reservoir space is dominated by intergranular pore and intergranular dissolution pore, followed by intragranular dissolution pore (feldspar dissolved pore and lithic dissolved pore), and only few areas exhibit intercrystalline pore. Three types of pore structures are observed, namely less wide form, rather narrow form and narrow form. The quality of tight sandstone reservoir is mainly controlled by throat. The results show that the research area has characteristics of the low stress sensitivity, high brittleness index and small horizontal principal stress difference. It's suitable for SRV fracturing.

Key words: tight sandstone oil reservoir; the reservoir space; throat; stress sensitivity; brittleness index; ground stress

我国致密油分布广泛,鄂尔多斯盆地是开发成功的地区之一。目前,研究致密砂岩储层孔喉结构的实验方法众多,依据实验测试手段的不同,可将孔喉结构研究方法分为直接法和间接法。直接法包括铸体薄片^[1]、扫描电镜^[2]、CT扫描^[3]等。间接法主要为高压压汞^[4]和恒速压汞^[5],其中高压压汞是应用最为广泛、最为经济的方法,但无法实现将孔隙、

喉道分开表征^[6-7]。恒速压汞实现了孔隙、喉道分开表征的微观孔隙结构特征的定量研究^[8],但是由于受最高进汞压力低的限制,难以观测到储层中微小孔喉的存在^[9]。本文综合运用铸体薄片、高压压汞和恒速压汞等实验手段,对长 8₁ 储层储集空间、孔隙结构类型以及喉道特征进行了分析,并利用稳定渗流实验、X衍射全岩分析和三轴压缩声发射法对

投稿日期: 2016-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51404282); 中国石油科技创新基金资助项目(2014D-5006-0215); 中国石油大学(北京)科研基金资助项目(2462015YQ0217)

作者简介: 刘广峰(1979-),男,山东东平人,讲师,博士,从事油气田开发工程的教学与研究工作。

储层的应力敏感性、脆性指数、地应力值进行了研究，以期对镇北地区长 8₁ 储层进行注水开发和体积压裂设计提供一定的理论依据。

1 研究区概况

镇北地区位于鄂尔多斯盆地西南部，地理构造属于伊陕斜坡构造单元^[10]。研究区内发育多套含油层系，其中长 8₁ 为主力含油层系^[11]。通过研究发现，长 8₁ 储层为辫状河三角洲前缘亚相沉积，砂岩按成因可分为水下分流河道砂、河口坝砂和远砂坝砂，岩性以细砂岩为主^[12]。大量岩心物性分析实验表明，镇北地区长 8₁ 储层平均孔隙度为 9.08%，中值为 9.5%；平均渗透率为 $0.190 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，中值为 $0.179 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，属于典型的致密砂岩储层。

2 储集空间特征

通过对大量铸体薄片（图 1）镜下观察表明，镇北地区长 8₁ 致密砂岩储层储集空间主要发育粒间孔和粒间溶孔。表 1 为各孔隙类型的具体分布。从表中可以看出，研究区储层内粒间孔和粒间溶孔发育，其次，长石溶孔也较为发育，晶间孔仅在局部区域发育。在成岩作用时期由于溶蚀作用的改造，

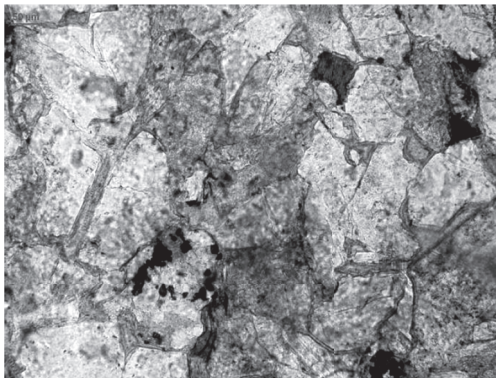


图 1 孔隙类型铸体薄片图
Fig.1 Pore type of thin-section

产生大量的次生孔隙，这类孔隙对于改善储层物性及提高孔喉连通性起到了关键性的作用。

3 储层微观孔隙结构

3.1 孔喉结构类型及分布

毛管压力曲线是进汞过程中，累积进汞饱和度与进汞压力的关系曲线，其形态主要受孔喉大小及分选性等因素影响。不同的孔喉结构具有不同的毛管压力曲线。通过对镇北地区长 8₁ 储层大量的压汞资料分析研究和对其毛管压力曲线形态及各特征参数的统计分析，该地区发育有 3 种孔喉结构类型，图 2 为 3 种孔喉结构类型的高压压汞曲线。

对 3 种孔喉结构类型的压汞曲线特征参数进行归纳总结，得到如表 2 所示的结果。其中偏粗态型孔喉结构最好，细态型孔喉结构最差。随着孔喉结构的变差，其排驱压力逐渐增大，孔喉分选性变差，纳米级喉道增多，孔喉连通性变差。

偏粗态型：该类孔隙结构的毛管压力曲线形态总体表现为：排驱压力分布在 0.7~1.05 MPa，汞饱和度中值压力较低，平均为 2.49 MPa，最大进汞饱和度值为 86%~91%，退汞效率较高，平均

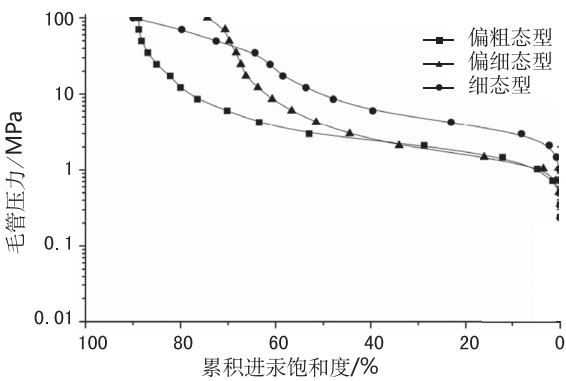


图 2 镇北地区长 8₁ 储层 3 种孔隙结构毛管压力曲线
Fig.2 Capillary pressure curves of three types of pore structures in Zhenbei Area

表 1 镇北地区长 8₁ 储层孔隙类型
Tab.1 Pore types of Chang 8₁ in Zhenbei Area

岩心号	粒间孔 /%	粒间溶孔 /%	长石溶孔 /%	岩屑溶孔 /%	晶间孔 /%	总面孔率 /%
Z-1	1.6	1.3	0.9	0.2	0.7	4.7
Z-2	1.9	1.5	1.2	0.3	—	4.9
Z-3	2.6	0.6	0.4	0.1	—	3.7
Z-4	2.1	1.5	0.5	0.2	0.4	4.7
Z-5	2.9	1.2	1.1	0.4	—	5.6
Z-6	1.5	2.4	0.9	0.3	—	5.1

表 2 孔隙结构特征分类

Tab.2 Statistics on pore structure characteristics

类别	结构特征	孔隙度 /%	渗透率 / $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	平均排驱压力 /MPa	平均中值压力 /MPa	最大进汞饱和度 /%	退汞效率 /%	歪度
偏粗态型	主要发育大孔喉	10~13.5	0.18~0.25	0.84	2.49	88~95	27~35	0.3~0.65
偏细态型	大孔喉和微小孔喉同时发育	7~11	0.15~0.2	0.72	4.56	<80	22~32	0.4~0.6
细态型	主要发育中小孔喉	<8	<0.18	1.18	8.80	86~92	18~31	-0.24~0.2

为 30.87%，表明孔喉连通性较好。平均渗透率为 $0.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均孔隙度为 11.3%。储集空间以粒间孔、长石溶孔为主。

偏细态型：该类孔隙结构的毛管压力曲线形态总体表现为：平均排驱压力为 0.72 MPa，汞饱和度中值压力较高，平均为 4.6 MPa，最大进汞饱和度值为 65%~74%，平均退汞效率为 27.22%，平均渗透率为 $0.17 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，孔隙度主要分布于 7.9%~9.6%。

细态型：该类孔隙结构的毛管压力曲线形态总体表现为：平均排驱压力约为 1 MPa，汞饱和度中值压力高，最大可达 11.5 MPa，最大进汞饱和度值为 86%~91%，退汞效率较低，平均为 24%，渗透率集中分布在 $(0.07\sim0.16) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均孔隙度为 7.6%。歪度较小，主要集中在 -0.24~0.1，显示出储

层孔径微小。储集空间以粒间溶孔、长石溶孔为主，部分地区可见晶间孔。

3.2 喉道特征

喉道反映了孔隙之间的连通情况，通过分析喉道的变化特征可以从本质上揭示储层孔隙结构的变化^[13]。本文采用恒速压汞法对研究区储层岩样进行了分析。图 3 为镇北地区长 8₁ 储层 3 块样品的喉道半径分布特征曲线，由图可以看出，对于渗透率最大的岩心（Y-3），其喉道半径分布峰值为 0.6 μm ，对于渗透率最小的岩心（Y-1），其喉道半径分布峰值为 0.4 μm 。图 4 为孔隙半径分布特征曲线。对比图 3 和图 4 可以发现，对于不同渗透率的样品，其孔隙半径分布大体一样，主要区别在喉道半径的分布上，随着样品渗透率的增大，小喉道所占比例减小，大喉道分布逐渐增多。由此可以得出，对于致密砂岩储层而言，微观孔隙结构的差异主要体现在喉道半径的大小和分布上，与孔隙分布没有太大关系^[14-15]。

4 储层物性参数特征

4.1 渗透率的应力敏感性实验

在钻井完井或油气生产过程中，随着孔隙压力逐渐下降，储层有效应力（即上覆岩层压力与孔隙压力之差）逐渐增大，储层喉道大小和裂缝宽度随之变化，导致孔喉体积和渗透率降低，该类现象称之为储层应力敏感^[16]。为了研究致密砂岩储层的应力敏感性，选取了 5 块岩心，对其进行了实验分析。实验是在围压为 2.25 MPa 的基础上逐步升高至 49.75 MPa，测定不同围压下的岩石渗透率，然后再将围压由 49.75 MPa 下降到 2.25 MPa，得到了不同净有效覆盖压力下储层渗透率变化值。

图 5 为 5 块样品渗透率随净围压的变化曲线，从中可以看出，随着净围压的上升，渗透率逐渐下降；当围压下降时，渗透率逐渐恢复。但在降压过程中，渗透率的恢复出现滞后现象，即在降压过程中，

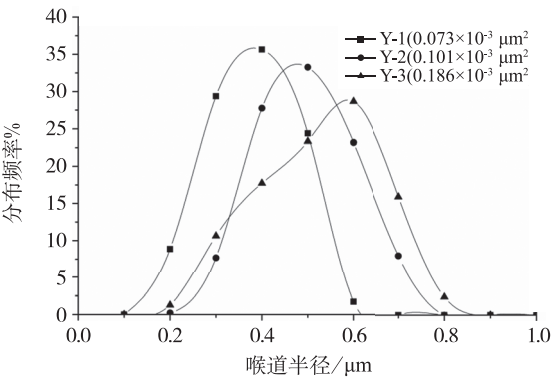


图 3 喉道半径特征曲线分布

Fig.3 Distribution curve of throat radii

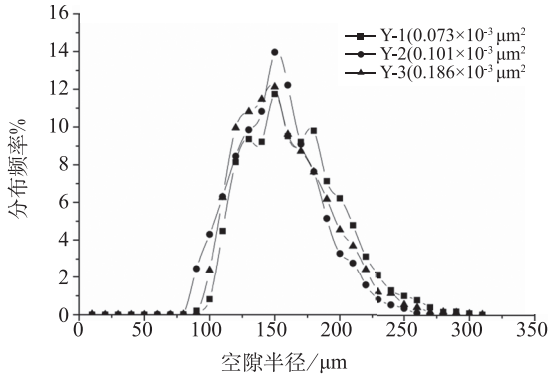


图 4 孔隙半径分布特征曲线

Fig.4 Distribution curve of pore radii

表 3 应力敏感性系数评价标准

Tab.3 The evaluation criteria of stress sensitivity coefficient

S_s	<0.05	$0.05 \leq S_s \leq 0.3$	$0.3 < S_s \leq 0.5$	$0.5 < S_s \leq 0.7$	$0.7 < S_s \leq 1$	>1
敏感程度	无	弱	中等偏弱	中等偏强	强	极强

表 4 应力敏感性实验结果

Tab.4 Results of stress sensitivity tests

岩样	孔隙度 /%	气测渗透率 / $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	应力敏感性系数 S_s	评价
YZ-1	10.32	0.384 2	0.189 7	弱
YZ-2	9.35	0.246 7	0.256 4	弱
YZ-3	8.82	0.084 6	0.456 3	中等偏弱
YZ-4	11.65	1.128 6	0.130 9	弱
YZ-5	12.38	1.178 6	0.142 4	弱

某净围压点所测的渗透率小于升压过程中相同净围压下所测的渗透率值。在分析所有样品的应力敏感性曲线后，发现在经过升—降围压后，岩样的渗透率只能恢复到原值的 36.59%~88.34%，渗透率越低，恢复程度越小。本文采用应力敏感性系数对实验结果进行评价，计算公式见式 1，评价标准如表 3^[17]。

$$S_s = (1 - (\frac{K_i}{K_0})^{\frac{1}{3}}) / \lg \frac{\sigma_i}{\sigma_0} \tag{1}$$

式中： S_s 为应力敏感系数； σ_i 为有效应力，MPa； K_i 为对应有有效应力点的渗透率， $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ； σ_0 为初始测点的有效应力，MPa； K_0 为初始测点的渗透率， $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

通过计算得出该地区岩石的应力敏感程度为弱—中等偏弱。表 4 为各块岩心的物性参数及实验结果，图 6 为气测渗透率与应力敏感系数关系图，由图可以看出，两者之间存在较强的负相关性，即渗透率越大，岩石应力敏感程度越弱。通过观察图 5 发现，在净围压小于 10 MPa 时，渗透率下降较快，

而在净围压大于 10 MPa 以后，渗透率下降缓慢，因此在开发中开采压力不宜过大，应当选取合理的井距^[18]，进行超前注水，保持较高的地层压力，以减少渗透率的损失，提高油藏的采收率^[19]。

4.2 岩石脆性指数测试实验

岩石脆性指数是致密砂岩油气体积压裂应考虑的重要因素之一^[20]。目前，在工程领域关于岩石脆性特征参数评价方法和标准没有统一的定义和测量方法^[21]，每一种评价方法都有自己的脆性指数计算方法，不同的评价方法结果不具有可比性。脆性指数的计算方法主要分为室内岩心实验和测井资料解释^[22-23]。本文采用脆性矿物含量法^[24]（式 2）来计算岩石脆性指数。

$$B = C_{\text{石英}} / (C_{\text{石英}} + C_{\text{粘土}} + C_{\text{碳酸盐}}) \tag{2}$$

式中： $C_{\text{石英}}$ ：岩石中石英相对含量； $C_{\text{碳酸盐}}$ ：岩石中碳酸盐类矿物的相对含量； $C_{\text{粘土}}$ ：岩石中粘土矿物的相对含量； B ：岩石脆性指数。

表 5 为各岩心的矿物成分含量及实验结果。可

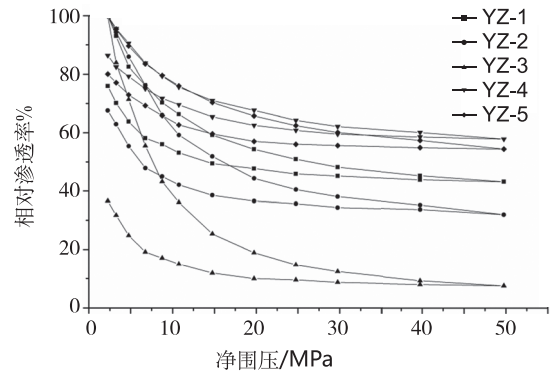


图 5 渗透率随净围压变化关系曲线

Fig.5 Permeability changed with net overburden pressure

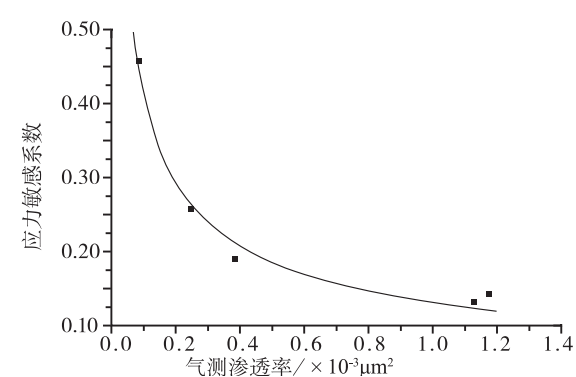


图 6 渗透率与应力敏感系数关系图

Fig.6 Relationship between permeability and stress sensitivity coefficient

以看出，研究区长 8₁ 致密砂岩储层岩石脆性指数分布在 48%~73%，平均为 60.25%，脆性指数较高，可见，长 8₁ 储层适合进行水力压裂。

4.3 岩石声发射地应力值测试实验

致密砂岩储层一般处于低产低效状态，需经过压裂改造才能获得工业产出^[25]。因此，储层中裂缝的展布对致密储层开发有着重要的作用。地应力不仅影响着水力裂缝的起裂方位，而且影响着裂缝的扩展模式^[26]。目前测定地应力方法主要分为测井方法^[27]和岩石力学方法^[28]。陈勉等^[29]通过研究发现，在进行随机裂缝性储层压裂时，高水平主应力差条件下，主缝多分支缝模式占优势；在低水平主应力差条件下，径向网状扩展模式占优势。本文采用围压下声发射 Kaiser 效应法测定地应力值。在现场取出的全直径岩心中钻取一块垂直方向 Φ25×50 mm 的圆柱(Z 轴)，在垂直岩心轴线平面内相隔 45° 各取一块 Φ25×50 mm 的圆柱，共钻取 4 块。表 6 为应用声发射测得的地应力值，从表中可以看出，水平地应力差分布在 3~5 MPa，水平主应力差值小，在水力压裂过程中裂缝易形成缝网状。基质中的流体能够通过裂缝更好的流向井筒，从而提高油井产量。

5 结论

- 1) 研究区储层储集空间以粒间孔和粒间溶孔为主，同时长石溶孔也较为发育，部分地区可见晶间孔；储层发育偏粗态型、偏细态型和细态型三种孔隙结构，其中以细态型孔隙结构为主，孔径以中孔和微孔为主，孔喉连通性较差，退汞效率低。
- 2) 喉道特征表现为随着渗透率的增大，小喉道减少，大喉道逐渐增多，孔隙分布与渗透率大小没有明显的相关性，与喉道分布显示出较强的正相关性，表明储层物性主要受喉道控制。
- 3) 该地区储层应力敏感性为弱—中等偏弱，在净围压较小下渗透率下降快，开发中应注意地层压

表 6 声发射测地应力实验结果

Tab.6 Results of ground stress tests

岩心 编号	水平最大 地应力值 /MPa	水平最小 地应力值 /MPa	垂向地 应力值 /MPa
S-1	54	51	56
S-2	48	44	51
S-3	47	42	50
S-4	52	48	55

力的保持；储层脆性指数较大，以及水平主应力差小，适合进行体积压裂，裂缝容易形成缝网。

参考文献：

[1] 罗蛰潭，王允诚. 油气储集层的孔隙结构 [M]. 北京：科学出版社，1986：62–80.

[2] DESBOIS G, URAI J L, KUKLA P A, et al.High-resolution 3D fabric and porosity model in a tight gas sandstone reservoir: a new approach to investigate microstructures from mm-to nm-scale combining argon beam cross-sectioning and SEM imaging[J].J Petrol Sci. Eng., 2011 (78) : 243–57.

[3] 孙 卫，史成恩，赵惊蛰，等.X-CT 扫描成像技术在特低渗透储层微观孔隙结构及渗流机理研究中的应用——以西峰油田庄 19 井区长 82 储层为例 [J]. 地质学报，2006，80 (5) : 775–781.

[4] 廖光明，夏宏全. 孔隙结构新参数 r 顶点及其应用 [J]. 石油勘探与开发，1997，24 (3) : 78–81.

[5] 何顺利，焦春燕，王建国，等. 恒速压汞与常规压汞的异同 [J]. 断块油气田，2011，18 (2) : 235–237.

[6] AGUILERA R.Incorporating capillary pressure, pore throat aperture radii, height above free water table, and Winland r35 values on Pickett plots[J].AAPG Bulletin, 2002, 86(4): 606–624.

[7] GRIMSMO TEIGE G M, HERMANRUD C, WIBEKE H T, et al. Capillary resistance and trapping of hydrocarbons: A laboratory experiment[J].Petroleum Geoscience, 2005, 11 (2) : 125–129.

表 5 岩心 X 衍射实验结果

Tab.5 Results of X-ray tests

岩心编号	粘土矿物含量 /%	石英含量 /%	碳酸盐含量 /%	脆性指数 /%
M-1	16	56	5	72.73
M-2	20	50	3	68.49
M-3	17	38	20	50.67
M-4	11	37	29	48.05
M-5	21	46	8	61.33

- [8] 马永平. 苏里格气田致密砂岩储层微观孔隙结构研究[D]. 西安: 西北大学, 2013: 1-90.
- [9] 王国亭, 何东博, 王少飞, 等. 苏里格致密砂岩气田储层岩石孔隙结构及储集性能特征[J]. 石油学报, 2013, 34(4): 660-666.
- [10] 秦卫军. 鄂尔多斯盆地镇北长81砂体成因与分布规律[D]. 西安: 西安石油大学, 2014: 1-94.
- [11] 秦卫军, 宋立军, 李书恒, 等. 鄂尔多斯盆地镇北地区长8₁成岩作用特征分析[J]. 天然气勘探与开发, 2014, 37(1): 20-29.
- [12] 杨巍, 陈国俊, 张铭杰, 等. 鄂尔多斯盆地镇北地区长8油层组自生绿泥石对储层物性的影响[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(3): 27-32.
- [13] 解伟, 张创, 孙卫, 等. 恒速压汞技术在长2储层孔隙结构研究中的应用[J]. 断块油气田, 2011, 18(5): 549-551.
- [14] 李珊, 孙卫, 王力, 等. 恒速压汞技术在储层孔隙结构研究中的应用[J]. 断块油气田, 2013, 20(4): 485-487.
- [15] 杜江民, 傅强, 刘东明, 等. 苏东区块盒8段储层微观孔喉结构特征研究[J]. 地质与勘探, 2016, 52(2): 340-345.
- [16] 闫丰明, 康毅力, 李松, 等. 2裂缝-孔洞型碳酸盐岩储层应力敏感性实验研究[J]. 天然气地球科学, 2010, 1(3): 489-493.
- [17] 杜新龙, 康毅力, 游利军, 等. 低渗透储层应力敏感性控制因素研究[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(2): 295-299.
- [18] 陈民锋, 姜汉桥, 郑伟, 等. 低渗透压敏油藏极限注采井距研究[J]. 断块油气田, 2010, 17(5): 579-582.
- [19] 冯红霞, 黄新文, 陈军斌, 等. 文留油田低渗透砂岩裂缝储层压力敏感性研究[J]. 断块油气田, 2010, 17(5): 599-601.
- [20] 李华阳, 周灿灿, 李长喜, 等. 致密砂岩脆性指数测井评价方法—以鄂尔多斯盆地陇东地区长7段致密砂岩储集层为例[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(5): 593-597.
- [21] KAHRAMANA S, ALTINDAG R A. Brittleness index to estimate fracture toughness[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(2): 343-348.
- [22] 张矿生, 刘顺, 蒋建方, 等. 长7致密油藏脆性指数计算方法及现场应用[J]. 油气井测试, 2014, 23(5): 29-32.
- [23] 徐赣川, 钟光海, 谢冰, 等. 基于岩石物理实验的页岩脆性测井评价方法[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 38-45.
- [24] GARGOURI M. Multicomponent 3D seismic interpretation of the marcellus shale bradford country, pennsylvania[D]. Houston: University of Houston, 2012: 1-93.
- [25] 徐梦雅, 冉启全, 李宁, 等. 应力敏感性致密气藏压裂井动态反演新方法[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(12): 2058-2064.
- [26] 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.
- [27] 王越, 姚昌宇, 高志军, 等. 利用常规测井资料计算地应力—以泾河油田延长组储层为例[J]. 新疆石油地质, 2014, 10(1): 92-97.
- [28] 赵奎, 闫道全, 钟春辉, 等. 声发射测量地应力综合分析方法与实验验证[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1403-1411.
- [29] 陈勉, 周健, 金衍, 等. 随机裂缝性储层压裂特征实验研究[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 431-434.

(责任编辑 王利君)