

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2020064

基于CQ指标的长庆油田长6—长8段 致密油储层划分标准研究

夏宏泉¹, 梁景瑞¹, 文晓峰²

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 四川成都 610500; 2. 中国石油集团测井有限公司长庆事业部, 陕西西安 710201)

摘要: 鄂尔多斯盆地三叠系长6—长8段致密油储层具有低孔、低渗、低压和低产等特征, 为了优选单井剖面的地质甜点、工程甜点, 针对长6—长8段致密油储层的地质特性, 提出了一种划分致密油储层标准的实用方法。首先计算或提取储层的最小水平主应力、破裂压力、脆性指数、孔隙度、渗透率及含水饱和度等参数, 建立储层完井品质综合评价指标CQ; 然后基于CQ和单井产能的关系图版, 将储层划分为好、中、差3个等级, 并根据CQ值优选射孔压裂层段。利用该方法对长庆油田陇东地区L375井进行了储层划分, 划分结果与试油结果对比表明, 基于CQ指标优选出的射孔压裂位置与实际高中低产井段完全相符。研究表明, 该方法满足优选致密油射孔压裂位置和寻找地质甜点、工程甜点的要求, 可以用于区块储层的划分。

关键词: 致密油; 脆性指数; 最小水平主应力; 破裂压力; 完井品质; 储层划分; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P631.8⁺4; TE32⁺5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2020)03-0114-06

The Standard Division of Tight Oil Reservoirs in Chang 6-8 Members of Changqing Oilfield based on CQ Index

XIA Hongquan¹, LIANG Jingrui¹, WEN Xiaofeng²

(1. State Key Laboratory of Oil Gas Reservoir Geology and Development Engineering (Southwest Petroleum University), Chengdu, Sichuan, 610500, China; 2. Changqing Division, CNPC Well Logging Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710201, China)

Abstract: The tight oil reservoirs in the Chang 6-8 Member of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin are characterized by low porosity, low permeability, low pressure and low production. In order to optimize the geological engineering sweet spots on the single-well section, a practical method for standard division of tight oil reservoirs has been proposed in accordance with the geological characteristics of Chang 6-8 tight oil reservoir. The first step involved calculating and extracting the minimum horizontal principal stress, fracture pressure, brittleness index, porosity, permeability and water saturation of reservoir etc. This allows them to establish the comprehensive evaluation index of the reservoir completion quality (CQ), and then, to classify the reservoirs “good, medium and bad” based on the relationship chart of CQ and single well productivity. And then to optimize the perforating and fracturing intervals in terms of the CQ value. Using this method, reservoir division was performed in Well L375 of the Changqing Longdong Area, and the comparison of division result and the oil test result showed that the perforating/fracturing interval optimized by the CQ index was completely consistent with the actual intervals of high, medium and low production-yields. Study results also indicated that this method could meet the requirements for optimizing the perforating/fracturing intervals of tight oil and for identifying engineering geological sweet spots, and can be used for a classification standard for block reservoirs.

Key words: tight oil; brittleness index; minimum horizontal principal stress; fracturing pressure; completion quality; reservoir division; Ordos Basin

致密油开发过程中, 计算储层的完井品质综合评价指标(CQ), 对于优选射孔压裂试油层段、优化试油完井方案和实现单井产能预测具有非常重要的作用^[1]。鄂尔多斯盆地陇东地区长6—长8段为致密砂岩储层, 具有低孔、低渗和异常低压的特征^[2-3], 如何根据储层完井品质综合评价指标确定储层划分

收稿日期: 2019-10-25; 改回日期: 2020-04-28。

作者简介: 夏宏泉(1965—), 男, 陕西武功人, 1988年毕业于西南石油学院石油地质专业, 1997年获西南石油学院油气田开发工程专业博士学位, 教授, 主要从事常规测井、偶极声波测井和随钻测井资料的精细解释及研究应用工作。E-mail: hqx3427@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项“鄂尔多斯盆地大型低渗透岩性地层油气藏开发示范工程”(编号:2016ZX05050)部分研究内容。

标准,是目前亟需解决的问题。

截至目前,学者们主要研究了确定优质储层的指标,如岩性、渗透率及裂缝发育程度等^[4],很少研究如何根据综合储层品质和储层力学品质划分储层的优劣。本文针对研究工区储层的岩石力学特征,首先选取各向异性岩石力学参数计算模型,计算了储层脆性指数、最小水平主应力和破裂压力^[5];然后结合储层品质参数联立岩石力学参数,建立了储层完井品质综合评价指标(CQ)计算模型,通过试油产能和 CQ 的关系图版,给出了致密油储层好、中、差的划分标准;最后,将该模型编程挂接到 Forward 测井解释平台,对鄂尔多斯盆地陇东地区 L375 井的储层完井品质评价进行了可视化测井处理,并结合试油结果检验了其适用性。

1 岩石力学参数计算

基于完井品质综合评价指标(CQ)建立储层好、中、差划分标准时,不但要考虑储层品质参数,还要考虑储层岩石的脆性指数、水平主应力和破裂压力,所以准确计算这些与 CQ 相关的参数显得尤为重要。经过比较试算,选取了符合鄂尔多斯盆地长 6—长 8 段的岩石力学参数算法。

1.1 脆性指数的计算

为了提高非常规油气储层的单井产量、延长稳产期,一般都需要进行大规模的压裂改造^[6-7]。准确计算岩石的脆性指数,对于优选压裂层段和多级压裂设计等具有关键作用。岩石的脆性与纵、横向应变和法向应变有关,可以通过杨氏模量和泊松比来计算其脆性指数^[8-9]。长 6—长 8 段各向异性地层岩石脆性指数的计算模型为:

$$BI = \frac{\Delta E_h + \Delta \mu_h}{2} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad \Delta E_h = \frac{E_h - 10}{90 - 10} \quad (2)$$

$$\Delta \mu_h = \frac{0.4 - \mu_h}{0.4 - 0.1} \quad (3)$$

式中: BI 为各向异性脆性指数; ΔE_h 为归一化的水平动态杨氏模量; $\Delta \mu_h$ 为归一化的水平动态泊松比; E_h 为水平动态杨氏模量, GPa; μ_h 为水平动态泊松比。

其中,各向异性泊松比和杨氏模量参数可以由偶极横波测井资料的纵横波时差计算得到的刚度系数 C_{11} — C_{66} 转换而来^[10]。

1.2 水平地应力的计算

目前,计算陇东地区水平地应力时,主要使用 Newberry 模型。该模型没有考虑地层岩石力学各向异性^[9],而常见的各向异性地应力模型选取的参数较多且不易获取,易引起较大的误差。

综合各种地应力计算模型的优缺点,并考虑层理面产状对地应力的影响(倾斜层理面与大地坐标角度的关系如图 1 所示),给出一种更为实用简便的计算陇东地区长 6—长 8 段储层各向异性的地应力模型,能很好地解释纵向上不同岩性地层的地应力差异现象,模型中水平与垂向杨氏模量之比可以表征岩石力学的各向异性^[10]。

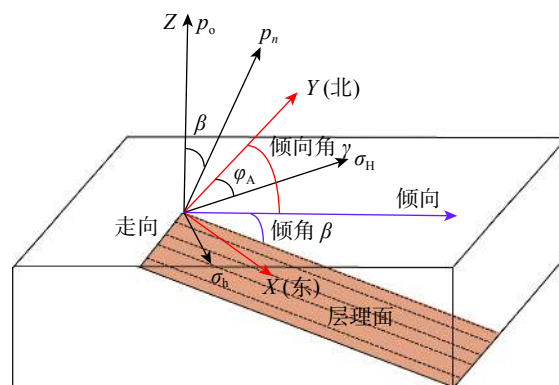


图 1 倾斜层理面或层界面发育地层与大地坐标系、层坐标系的联系

Fig.1 The relationship between the strata developed in inclined bedding plane or layer interface and earth coordinate system and layered coordinate system

$$\sigma_h = \frac{E_h}{E_v} \frac{\mu_v}{1 - \mu_h} (p_o - \alpha p_p) \cos \beta + \quad (4)$$

$$(p_o - \alpha p_p) \sin \beta \sin(\gamma - \varphi_A) + p_p \quad (5)$$

式中: σ_H 和 σ_h 分别为最大、最小水平主应力, MPa; E_v 为垂向动态杨氏模量, GPa; μ_v 为垂向动态泊松比; p_o 为上覆岩层压力, MPa; α 为 Biot 系数; p_p 为地层孔隙压力, MPa; β 为地层倾角, 规定为 Z 轴正向(即 p_o 方向)与层理面法线法向的夹角, ($^\circ$); γ 为地层倾角, 规定为正北方向与层理面法线方向(即法向应力 p_n 的方向)在水平面上投影形成的夹角, ($^\circ$); φ_A 为最大水平主应力的方位角(规定为最大水平主应力与正北方向的夹角), ($^\circ$); k 为最大水平主应力与最小地应力的比值, 此处取 1.25; 地应力分量如图 2 所示。

1.3 破裂压力的计算

地层破裂压力定义为使地层产生水力裂缝或张

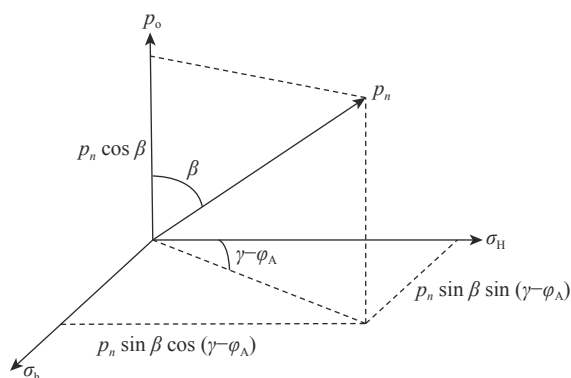


图2 倾斜层状地层的地应力分量转换关系

Fig. 2 Conversion relationship of in-situ stress components of inclined layered strata

开原有裂缝时的井底压力,实现水力加砂压裂的前提条件是地面泵压能使目的层开裂。影响岩石破裂压力的因素包括地层特性、施工条件、裂缝产生方式和完井方式等^[11]。

Hobbs指出,可采用Griffith理论解释抗拉强度各向异性,并建立了最初的各向异性抗拉强度准则;Barron修正了Griffith理论,并导出了各向异性的抗拉强度准则。这2个准则的表达式一样,故称为Hobbs-Barron准则^[12]。基于Hobbs-Barron准则的直井各向异性地层破裂压力计算公式为:

$$p_f = 3\sigma_h - \sigma_H + T(\beta_b) - \alpha p_p \quad (6)$$

式中: p_f 为直井破裂压力, MPa; $T(\beta_b)$ 为基于Hobbs-Barron准则计算的各向异性岩石抗拉强度, MPa; β_b 为井壁最大主应力与层理面法向的夹角, ($^\circ$)。

2 CQ指标的计算与应用

2.1 计算模型的建立

针对鄂尔多斯盆地陇东地区致密油的地质特性,提出了一种优选射孔层段的实用方法,即利用孔隙度、渗透率和含水饱和度,以及脆性指数、地应力和破裂压力等参数来建立储层完井品质综合评价指标CQ^[13],并根据CQ值(该参数用CQ表示,下同)优选射孔层段。CQ的计算公式为:

$$CQ = \phi KH(100 - S_w) \frac{G(BI)}{S_h P_f} \quad (7)$$

式中: ϕ 为地层孔隙度; K 为地层渗透率, mD; H 为射开层段有效厚度(如逐点计算,则为采样深度间隔), m; G 为地层打开位置的应力系数(若油层顶部打开为中高应力,则G取0.8;若油层中部打开为低应力,则G取1.0;若油层底部打开为高应力,则G取

0.5); S_w 为含水饱和度。

式(7)等号右边前4项的乘积反映储层品质,最后一项反映储层力学性质, CQ越大,说明储层的物性和脆性越好。

2.2 建立储层好、中、差划分标准

统计对比鄂尔多斯盆地陇东地区长6—长8段致密油的试油结论和数据发现,层段的单井产能越高, CQ越大。根据单井测试产油量将储层划分成好、中、差3个级别^[13]: 1)好储层,产油量大于5.0 t/d,主要是油层; 2)中等储层,产油量为0.5~5.0 t/d,包括油层和油水同层; 3)差储层,产油量小于0.5 t/d,包括差油层和干层。

陇东地区长6—长8段30口井的单井试油产能Q与完井品质综合评价指标CQ交会分析结果如图3所示,可以得到二者的指数回归关系式:

$$Q = 0.489 6^{0.214 7 CQ} \quad (8)$$

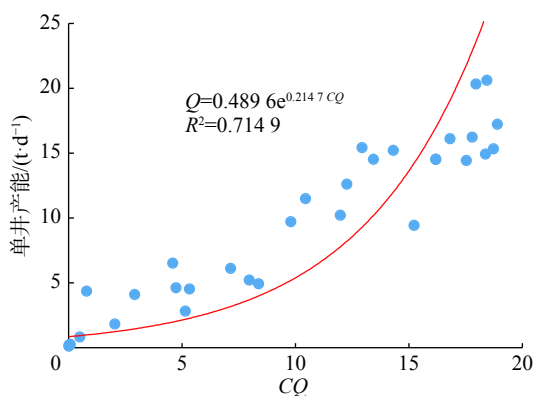


图3 完井品质综合评价指标和单井产能的交会图

Fig.3 Crossplot of comprehensive appraisal index of completion quality and single well daily production

将 $Q=5.0$ 和 0.5 t/d 分别代入式(8),计算得到CQ分别为10.823和0.098,据此得到划分标准: 1) $CQ \geq 10.8$,为好储层; 2) $0.1 \leq CQ < 10.8$,为中等储层; 3) $CQ < 0.1$,为差储层。

2.3 基于CQ指标优选射孔位置

从图3可以看出, Q与CQ呈正相关关系,且相关系数较高,因此可以根据CQ优选射孔压裂层段。压裂层段和射孔位置应选择在地应力和破裂压力低、杨氏模量高、泊松比低和脆性强的井段^[14]。应用岩石力学分析结果、地层评价结果及成像裂缝解释结果进行详细的射孔与水力压裂设计,有助于提高压裂作业的有效性和单井产能^[15]。

将CQ的累计函数S的最大值点作为射孔压裂位置的顶深,考虑油层结构和接箍位置,适当微调

射孔压裂层段的底深。按 $L=4, 3, 2$ 和 1 m 优选射孔压裂位置, 以避免薄夹层, 防止窜流。其计算公式为:

$$S(i) = \sum_{j=i}^M CQ(j)R \quad i = 1, 2, \cdots, N - M + 1 \quad (9)$$

$$S_{\max} = \max[S(i)] \quad (10)$$

其中
$$M = \frac{L}{R} \quad (11)$$

$$N = \frac{D_2 - D_1}{R} \quad (12)$$

式中: $S(i)$ 为 CQ 的累计函数; L 为射孔段长度, m , 一般为 $1\sim 10\text{ m}$; $CQ(j)$ 为射孔段内第 j 点的 CQ 值; R 为

采样间隔, 缺省值为 0.125 m ; $S_{\max}$ 为累计函数 S 的最大值; D_2 为设计层段底深, m ; D_1 为设计层段顶深, m 。

3 实例分析

将上述计算公式进行编程, 对长庆油田陇东地区百余口井的测井资料进行解释处理, 经现场试油结论验证, 完井品质综合评价方法的准确性在 86.0% 以上。下面以陇东地区 L375 井为例进行分析说明。L375 井利用 Forward 测井解释平台得到的处理结果如图 4 所示, CQ 的计算结果和优选射孔位置见表 1。

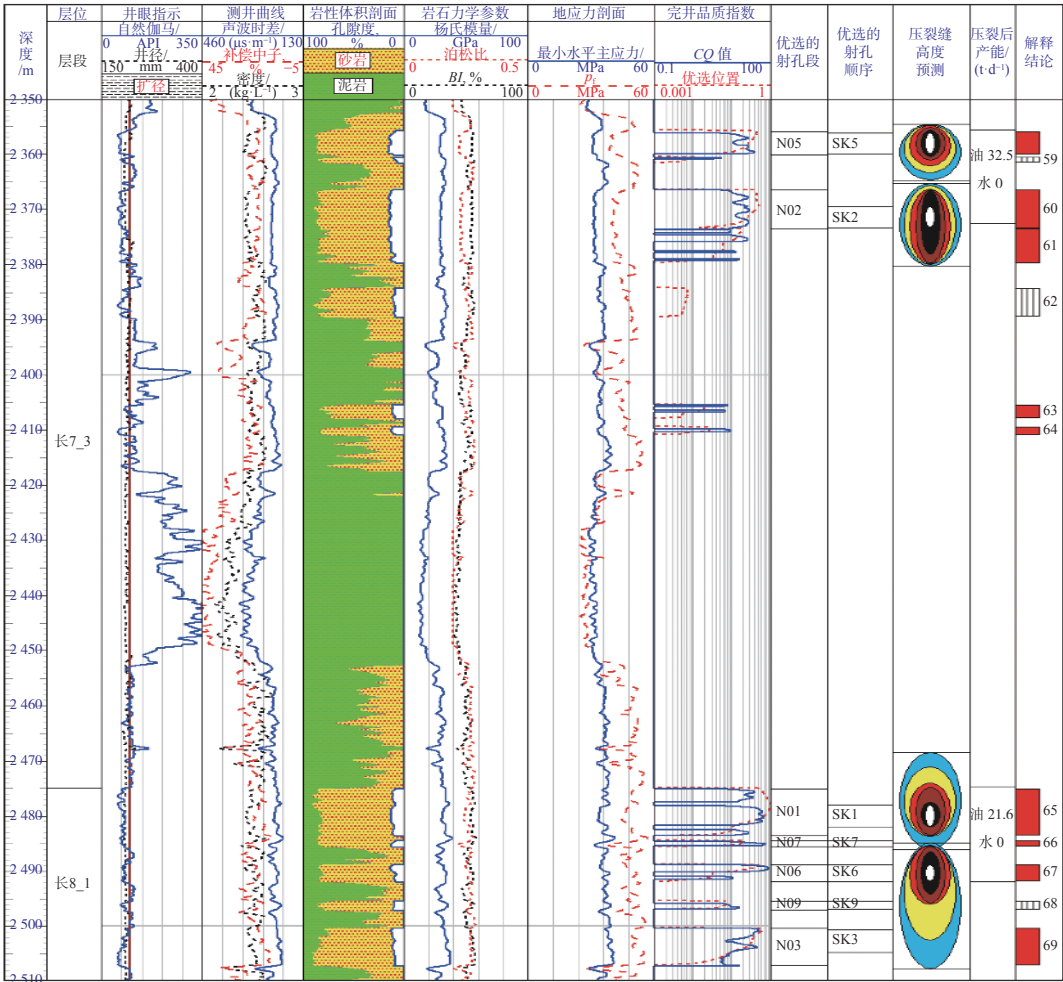


图 4 L375 井长 7—长 8 段 2 350~2 510 m 测井优选的射孔层段及位置

Fig.4 Optimization result of perforating interval and location at 2 350-2 510 m of Chang 7-8 members in Well L375

图 4 中第 6 道和第 7 道分别是用式 (1)、式 (4) 和式 (6) 计算的各向异性岩石力学参数, 第 8 道是式 (8) 和式 (10) 计算的完井品质评价指标 (实线) 与优选的射孔位置 (虚线), 第 9 道和第 10 道是优选的射孔层段和射孔顺序, 第 11 道是压裂缝高度预测饼

状图, 第 12 道是压裂改造后的产能情况。建议在 CQ 大的位置进行射孔, 且 CQ 越大该井段越优先射孔。另外, 用 CQ 指标优选出来的射孔压裂位置与试油结论的射孔压裂位置完全对应, 且通过 CQ 指标划分的储层级别与试油产能结果相符 (见表 2)。

表1 L375井延长组致密油射孔压裂优选层段

Table 1 Optimized intervals for perforating/fracturing in Yanchang tight oil formation of Well L375

小层编号	储层井段/m	解释结论	CQ	优选射孔井段/m	S	排序
65	2 475.00~2 483.50	油层	186.49	2 478.00~2 482.00	192.417	1
60	2 366.50~2 373.50	油层	105.15	2 369.38~2 373.38	149.429	2
69	2 500.38~2 507.00	油层	94.00	2 500.62~2 504.62	122.245	3
55	2 333.00~2 335.88	油层	83.14	2 333.00~2 335.88	113.843	4
58	2 355.75~2 360.00	油层	61.41	2 356.12~2 360.00	77.703	5
67	2 488.75~2 491.88	油层	50.57	2 488.75~2 491.88	68.576	6
66	2 484.50~2 485.50	油层	26.92	2 484.50~2 485.50	34.627	7
52	2 293.38~2 295.75	油层	18.00	2 293.38~2 295.75	21.524	8
68	2 495.38~2 497.00	干层	0.09	2 495.38~2 497.00	0.096	9
51	2 285.00~2 287.88	干层	0.08	2 285.00~2 287.88	0.090	10

表2 L375井实际射孔位置与通过CQ指标所优选射孔位置对比

Table 2 Comparison of actual perforation position and optimized perforation position by CQ index in Well L375

层位	CQ	优选射孔位置/m	实际射孔位置/m	产油量/(t·d ⁻¹)	储层划分结果
长7	61.41	2 356.13~2 360.00	2 358.24	32.47	优质储层
	105.15	2 369.38~2 373.38	2 370.28		
长8	186.49	2 478.00~2 482.00	2 478.00~2 481.00	21.59	优质储层
	50.57	2 488.75~2 491.88	2 489.00~2 491.00		

L375井长7段的2 366.50~2 373.50和2 355.80~2 360.10 m井段,油层有效厚度11.30 m,射孔位置为2 370.28和2 358.24 m,加砂80.0 m³压裂改造后,产油量32.47 t/d,不产水;试油结果为油层,按上述储层划分标准,判定为优质储层。该井长8段的2 488.80~2 491.90和2 475.10~2 483.50 m井段,油层有效厚度11.50 m,射孔层段2 489.00~2 491.00和2 478.00~2 481.00 m,加砂60.0 m³压裂改造后,产油量21.59 t/d,不产水;试油结果为油层,判定为优质储层。

4 结 论

1)鄂尔多斯盆地长6—长8段致密油储层具有明显的各向异性,基于各向异性泊松比、杨氏模量等参数计算出的各向异性脆性指数、水平地应力及破裂压力,与采用传统计算模型计算的结果相比,更符合工区实际地层情况,并为储层完井品质综合评价指标计算提供了可靠的岩石力学数据。

2)综合利用储层品质参数和岩石力学参数,建

立了储层完井品质综合评价指标的计算模型,结合试油生产资料,基于CQ指标和单井产能的关系图版,根据CQ的大小差异可以划分好、中、差储层。

3)利用CQ计算程序优选了多口井的射孔压裂层段,优选出的射孔压裂层段与实际井段产能结果相一致,表明该方法满足找寻地质甜点、工程甜点的要求,可以用于优选致密油的射孔压裂位置。

参 考 文 献

References

- [1] 黄鑫,董秀成,肖春跃,等.非常规油气勘探发现现状及发展前景[J].天然气与石油,2012,30(6):38-41.
HUANG Xin, DONG Xiucheng, XIAO Chunyue, et al. Present situation and development prospect of unconventional oil and gas exploration and development[J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(6): 38-41.
- [2] 杨双定.鄂尔多斯盆地致密砂岩气层测井评价新技术[J].天然气工业,2005,25(9):45-47.
YANG Shuangding. New methods of log evaluation of the tight sandstone gas reservoirs in E'erdusi Basin[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(9): 45-47.
- [3] 楼一珊,金业权.岩石力学与石油工程[M].北京:石油工业出版社,2006.

- LOU Yishan, JIN Yequan. Rock mechanics and petroleum engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [4] 王团. 致密砂岩储层中优质储层的划分及识别方法研究[J]. 国外测井技术, 2015(3): 26–29.
- WANG Tuan. Research on the division and identification of high-quality reservoir in tight sandstone reservoir[J]. World Well Logging Technology, 2015(3): 26–29.
- [5] 杜金虎, 刘合, 马德胜, 等. 试论中国陆相致密油有效开发技术[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 198–204.
- DU Jinhu, LIU He, MA Desheng, et al. Discussion on effective development techniques for continental tight oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 198–204.
- [6] 赖锦, 王贵文, 范卓颖, 等. 非常规油气储层脆性指数测井评价方法研究进展[J]. 石油科学通报, 2016, 1(3): 330–341.
- LAI Jin, WANG Guiwen, FAN Zhuoying, et al. Research progress in brittleness index evaluation methods with logging data in unconventional oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 1(3): 330–341.
- [7] 夏宏泉, 杨双定, 弓浩浩, 等. 岩石脆性实验及压裂缝高度与宽度测井预测[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(4): 81–89.
- XIA Hongquan, YANG Shuangding, GONG Haohao, et al. Research on rock brittleness experiment and logging prediction of hydraulic fracture height & width[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 35(4): 81–89.
- [8] 林英松, 葛洪魁, 王顺昌. 岩石动静力学参数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2): 216–222.
- LIN Yingsong, GE Hongkui, WANG Shunchang. Testing study on dynamic and static elastic parameters of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(2): 216–222.
- [9] 周新桂, 张林炎, 范昆, 等. 鄂尔多斯盆地现今地应力测量及其在油气开发中的应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2009, 24(3): 7–12.
- ZHOU Xingui, ZHANG Linyan, FAN Kun, et al. Measurement of the present earth stress of Ordos Basin and its applications in oil and gas exploitation[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2009, 24(3): 7–12.
- [10] 夏宏泉, 刘畅, 李高仁, 等. 基于测井资料的TIV地层水平地应力计算方法[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(6): 67–72.
- XIA Hongquan, LIU Chang, LI Gaoren, et al. A logging data-based calculation method for the horizontal TIV formation in-situ stress[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(6): 67–72.
- [11] 李传亮, 孔祥言. 油井压裂过程中岩石破裂压力计算公式的理论研究[J]. 石油钻采工艺, 2000, 22(2): 54–56.
- LI Chuanliang, KONG Xiangyan. A theoretical study on rock breakdown pressure calculation equations of fracturing process[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2000, 22(2): 54–56.
- [12] HIGGINS S, GOODWIN S, DONALD A, et al. Anisotropic stress models improve completion design in the Baxter Shale[R]. SPE 115736, 2008.
- [13] 李映艳, 钱根葆, 高阳, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组砾岩致密油藏地质“甜点”分级标准及应用[J]. 东北石油大学学报, 2018, 42(6): 85–94.
- LI Yingyan, QIAN Genbao, GAO Yang, et al. Identification criterion of the geological "sweet point" of conglomerate tight reservoir and its application of Baikouquan Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2018, 42(6): 85–94.
- [14] 夏宏泉, 文晓峰, 冯春珍, 等. 基于测井信息的致密油层射孔优化选层方法研究[J]. 测井技术, 2017, 41(3): 353–357.
- XIA Hongquan, WEN Xiaofeng, FENG Chunzhen, et al. Optimal selecting interval method of tight oil reservoir perforating based on well logging information[J]. Well Logging Technology, 2017, 41(3): 353–357.
- [15] 吴飞鹏, 蒲春生, 陈德春, 等. 射孔油井产能计算模型研究[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(1): 69–72.
- WU Feipeng, PU Chunsheng, CHEN Dechun, et al. Productivity calculation model of perforated oil wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(1): 69–72.

[编辑 滕春鸣]