

致密油储层有效厚度经济界限确定方法

董尚富¹, 刘文苹²

1. 中国石油大庆油田有限责任公司勘探事业部 黑龙江大庆 163458
2. 中国石油大庆油田有限责任公司采油工程研究院 黑龙江大庆 163453

通讯作者: E-mail: dongshangfu@petrochina.com.cn

项目支持: 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“大庆致密/页岩油体积改造技术提升攻关与现场试验”

引用: 董尚富, 刘文苹. 致密油储层有效厚度经济界限确定方法[J]. 油气井测试, 2022, 31(2): 61-66.

Cite: DONG Shangfu, LIU Wenping. Determination method of economic limit of effective thickness of tight oil reservoirs[J]. Well Testing, 2022, 31(2): 61-66.

摘要 为确定大庆油田龙西地区 TA 区块致密油储层有效厚度经济界限, 解决薄层压裂选层取舍难题, 采用投入产出比法和产量经济界限法综合确定了龙西地区 TA 区块致密油直井三类储层有效厚度经济界限, 即致密油 I 类、II-1 类、II-2 类油层有效厚度经济界限均可达 0.2 m。该方法为大庆外围油田致密油直井压裂选层提供了依据和技术借鉴。

关键词 致密油储层; 测试; 体积压裂; 有效厚度; 经济界限; 确定方法; 产液剖面; 产量预测

中图分类号: TE353 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.02.011

Determination method of economic limit of effective thickness of tight oil reservoirs

DONG Shangfu¹, LIU Wenping²

1. Exploration Business Division of PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163458, China
2. Oil Production Engineering Institute, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163453, China

Abstract: To facilitate thin-layer selection for fracturing of tight oil reservoirs in TA block in Longxi area of Daqing Oilfield, the input-output ratio method and the production economic limit method were used to comprehensively determine the economic limit of the effective thickness of three types of tight oil reservoirs in vertical wells in TA block. The results show that for all class I, class II-1 and class II-2 tight oil reservoirs, the economic limit of effective thickness can reach 0.2 m. This method provides a basis and technical reference for fracturing layer selection of tight oil vertical wells in peripheral oilfields of Daqing.

Keywords: tight oil reservoir; testing; volume fracturing; effective thickness; economic limit; Determination method; liquid production profile; production forecast

大庆油田扶余油层属于致密砂岩油藏, 储层发育面积大、油层多、资源量大, 但存在砂体窄、油层厚度薄、横向连续性差、孔吼细等特征^[1-5]。结合储层流动性、储集性、含油性和可压性等特征, 扶余致密油层从好至差依次划分为致密油 I 类、II-1 类、II-2 类和 III 类, 由于致密 III 类油层有效厚度特别小, 达不到选压对象划分标准, 目前致密油 I 类、II-1 类、II-2 类为主要压裂改造对象。大庆油田致密油藏薄层多, 通常薄层预测压裂缝高是储层有效厚度的 3 至 15 倍, 实际改造体积远远大于有效储层体积, 导致压裂规模大、成本高。尤其是有效厚度小于 1.0 m 的薄层, 在高成本压裂改造的情况下, 单层产量能否达到经济界限亟需研究明确。

近年来, 大量学者在压裂选层方面开展了相关研究工作。杨玉才^[6]针对 Q 油田低孔特低渗透储层缝网压裂井, 采用产液剖面测试数据分析评价方法, 得出低孔特低渗透储层缝网压裂选层标准。孟祥灿^[7]针对大情字井油田特低渗油藏开发效果差问题, 建立了重复压裂选井原则和选层原则。王发现等^[8]针对压裂选层成功率和准确率低的问题, 利用试井资料研究压前测试及试井曲线形态, 可定性判断合适压裂层段。张雁雁等^[9]针对低渗透油田的水力压裂选层问题, 采用统计分析方法, 研究了影响压裂效果的参数, 得出了低渗透油层压裂选层方法。詹耀华等^[10]针对致密气藏重复压采用数理统计和模糊数学理论相结合的方法, 研究基于多因

素关联体系下致密气藏重复压裂选井选层评价算法,得出了致密气藏重复压裂选井选层方法。薛颖^[11]采用综合评价分析方法,研究了测井曲线和油层压裂后产量峰值相关性,确定了油层分类划分标准和选井标准。冯笑含^[12]研究了岩石复杂程度与压后产能规律性,定性得出体积压裂改造选井方法。黎铖等^[13]采用录井资料统计分析方法,得出了赛东洼槽低孔隙度、低渗透性储集层碎屑岩储集层压裂录井参数标准。该方法受录井探测范围较小限制,准确性较差。徐凤兰等^[14]针对二连探区依靠取心资料进行压裂选层存在局限性,采用动静因素双重约束的流动单元法,得出储层压裂选层综合决策方法。但该方法只限用常规压裂井定性和半定量压裂选层,且只适用于二连油田。王鑫鑫等^[15]针对低渗透砂岩储层压裂改造成本高问题,采用统计分析地层测试资料方法,得出低渗透砂岩储层压裂选层的标准图版,但该方法不适合致密油层。董烈^[16]利用缝网压裂致密油直井和体积压裂水平井产量变化规律,提出致密油藏经济参数优选和评价的方法,建立了在内部收益率为6%、不同油价下单井投资界限与日产量界限图版。

由此可见,目前大量学者开展的诸多压裂选层研究及评价,主要是针对低渗、特低渗储层,少数学者针对致密油储层仅限于单井经济界限开展了研究,缺少针对单个薄层有效厚度经济界限的研究评价。为了确定致密油薄层有效厚度经济界限,提出了投入产出比法和产量经济界限法两种确定致密油储层有效厚度经济界限方法,并利用这两种方法综合确定了龙西地区TA区块致密油直井三类储层有效厚度经济界限,解决了该区块压裂选层取舍难题。

1 TA 区块致密油藏地质特征

TA 区块位于松辽盆地中央坳陷区齐家-古龙凹陷龙虎泡阶地敖古拉鼻状构造的南部。区域沉积相分析表明,扶余油层主要受北部和西部沉积体系控制,发育三角洲分流河道及分流河道间沉积,局部发育滨浅湖沉积。由于河道不断改道及摆动迁移,使沉积的砂体多呈短条带状和透镜状特征,且各期砂体在平面上相互交织、错叠连片。从已开发井区砂体解剖结果看,主力砂体规模较小,横向变化较快,砂体宽度一般在200~1 000 m之间,单砂体

厚度0.4~9.5 m,平均厚度1.7 m,厚度小于1.0 m的占20.6%;单层有效厚度0.3~3.5 m,平均为1.4 m,厚度小于1 m的占42.2%;地层压力系数在0.95~1.06之间,属于正常压力系统;地下原油平均密度0.768 g/cm³,平均黏度2.53 mPa·s,平均原始气油比28.5 m³/m³,储层不产水。

2 有效厚度经济界限确定方法

优选多口薄层多的致密油直井,对有效厚度小于1.0 m的薄层和大于1.0 m的厚层全部按相同的设计方法实施大规模缝网压裂,为了确保各层全部充分改造,薄层和厚层全部单卡单压,避免因多层合压丢层。

2.1 投入产出比法

根据单井各层压裂规模,分别测算出单层支撑剂和压裂液费用(含材料费和配制费) m_s 。

$$m_s = V_f \times P_f + V_s \times P_s \quad (1)$$

对各层支撑剂和压裂液费用求和,得到单井支撑剂和压裂液总费用 M_s ,进而可得各层支撑剂和压裂液费用在单井支撑剂和压裂液总费用中的占比,按照各层占比分别将单井压裂公共费用分摊到各层。公共费用包括:水源井钻凿和蓄水费用、配合压裂作业费用、井下工具费用、压裂施工费和人员费用等。则各层分摊的公共费用为

$$m_c = (M_l - M_s) \times m_s / M_s \quad (2)$$

则各层压裂成本为:

$$m_n = m_c + m_s \quad (3)$$

式中: V_f 为单层压裂液量,m³; P_f 为压裂液价格,万元/m³; V_s 为单层支撑剂量,m³; P_s 为支撑剂价格,万元/m³; M_l 为单井压裂工程总费用,万元; m_c 为单井压裂公共费用分摊到单层的额度,万元; m_n 为单层压裂成本,万元。

用公式(1)至(3)可分别求出区块内多个有效厚度最小的Ⅱ-2类薄层压裂成本,进而得到此类薄层平均压裂成本 m_1 。

各层压裂后,从见油开始生产2至3年内,分早期、中期和后期不同生产时间分别对上述小层进行多次环空产液剖面测试,分别求取各层不同生产时间的日产油量,并分别回归出产油量预测公式 $f(x)$,再用 $f(x)$ 分别预测出各小层极限产油量或评价期内累计产油量,扣除相应的采油成本及税费,进而得到各层产油获得的利润。用各层的平均利润 X 与平均压裂成本 m_1 相比较,若 $X/m_1 \geq 1$,说明

对这个有效厚度的薄层大规模体积压裂是能够达到经济界限的,则这个有效厚度值即为经济界限。否则,需按上述方法,依次计算次薄层投入产出比,直至满足 $X/m_1 \geq 1$ 时,这个层的有效厚度即为经济界限值。

以此类推,可以分别求得 I 类、II-1 类油层有效厚度经济界限。

2.2 产量经济界限法

产量经济界限法是利用区块经济评价给出的生产第一年单井平均日产量经济界限作为对比指标,确定有效厚度经济界限的方法。

首先,求取 TA 区块单层日产油量经济界限 Q_n , 即

$$Q_n = Q/H \times h_n \quad (4)$$

式中: H 为区块内单井油层平均有效厚度, m; h_n 为单层有效厚度, m; Q 为单井平均日产油量经济界限, t/d。

与投入产出比法相同,用第一个有效厚度最小的 II-2 类薄层不同生产时间下的环空产液剖面测试日产油量回归出产量预测公式,并用这个公式预测出该薄层见油后第一年累计产量,进而得到第一年平均日产油量。再用同样的方法求出其它有效厚度相同的 II-2 类薄层第一年平均日产油量。用它们的平均值 q_1 与 Q_n 相比较,若 $q_1 \geq Q_n$,说明对这个有效厚度的薄层大规模体积压裂是能够达到经济界限的,则这个层的有效厚度即为经济界限值。否则,按上述方法用依次求取有效厚度次薄层的第一年平均日产油量,直至满足 $q_1 \geq Q_n$ 时,这个薄层有效厚度即为经济界限值。

以此类推,可以分别确定 I 类、II-1 类油层有效厚度经济界限。

2.3 小层产油量预测方法

常规水驱油藏,由于注水的原因,含水率逐步增加,将进入高含水期。然而,致密油藏压裂后多为衰竭式开发,无注入水井情形下,单井产量将进入递减阶段,含水率随生产时间逐步降低。因而,致密油藏压后产量递减规律是小层产油量预测的重要组成部分,也是致密油开发的共性难题。

致密油产量预测模型主要有经验模型和分析模型。Arps 方法为最经典的经验模型^[17],后有系列改进^[18-21]。分析模型是指考虑开发动态而建立的方法,如物质平衡方法、试井分析方法等^[22-23]。物质平衡与开发动态可结合用来预测致密油产量递

减规律^[24]。现有的物质平衡的理论基础仍是基于传统开发理论,还可进一步改进。

上述方法均可用来预测最终累产油和小层极限产油量。小层极限产油量预测方法是:先用产量预测公式 $f(x)$ 求出小层日产油量为 0 时的生产时间 t_1 ,然后对 $f(x)$ 从生产时间 $x=0$ 到 t_1 积分,结果即为小层极限产油量。具体使用的方法可根据实际开发动态进行选择。小层评价期累计产油量的预测方法是:若评价期天数为 t_2 ,对产量预测公式 $f(x)$ 从生产时间 $x=0$ 到 t_2 积分,结果即为小层评价期累计产油量。

3 TA 区块有效厚度经济界限确定

以龙西地区 TA 区块为实例,分别给出投入产出比法、产量经济界限法确定的经济界限结果。

3.1 区块压裂基本情况

龙西地区 TA 区块压裂投产直井均采用油管坐压多层大规模缝网体积压裂。压裂分段原则是,能单独压裂的不合压,确保各层充分改造。单井平均压裂 5.6 段,压裂液用量 6 120 m³,支撑剂用量 342 m³,投产 1 年单井平均日产油 3.2 t/d 左右,储层不产水。

3.2 区块经济评价指标

龙西地区 TA 区块油藏开发方案经济评价结果是,在单井平均有效厚度 10.0 m,缝网体积压裂后生产 1 年的条件下,单井日产油量经济界限为 1.76 t/d。

3.3 环空产液剖面测试产出特征分析

为了评价薄层大规模体积压裂是否产油以及日产量是否能够达到经济界限,在油井见油后,先后对其中 20 口井进行了环空产液剖面测试。单独压裂且有效厚度小于等于 1.0 m 的 49 个层全部产油产液, I 类、II-1 类和 II-2 类油层有效厚度最小值分别为 0.7 m、0.4 m 和 0.2 m,各类油层先后四次测试均产油产液,其中有效厚度最小的层产液剖面测试产油情况见表 1。

3.4 投入产出比法确定经济界限

首先,根据 T2-32 井经济评价表(见表 2)中各层压裂设计参数,在已知本井压裂工程总费用为 312 万元的前提下,利用公式(1)至(3)可以得到 F II 5-2 层压裂费用。F II 5-2 层有效厚度为 0.2 m,为本区块有效厚度最薄层,压裂成本为 31.4 万元。

根据各类油层中有效厚度最小的层产液剖面

测试结果(见表 1),用 T2-32 井 FⅡ 5-2 层 4 次测试产量进行回归得到该层产量预测曲线(见图 1)。然后用此曲线求出见油后第 1 年的累计产油量和极限

产油量(见表 2)。利用极限产量获得的收入,再扣除采油成本和税费,即可得到该层最终获得的利润为 46.6 万元。

表 1 各类油层中有效厚度最小的层产液剖面测试结果

Table 1 Test results of the reservoir with the least effective thickness in each reservoir

井号	层号	砂岩 厚度/ m	有效 厚度/ m	综合 解释 分类	第一次测试		第一次测试		第三次测试		第四次测试	
					生产天数 /d	日产油/ (t·d ⁻¹)	生产天数 /d	日产油/ (t·d ⁻¹)	生产天数 /d	日产油/ (t·d ⁻¹)	生产天数 /d	日产油/ (t·d ⁻¹)
T2-19	FⅡ 2-2	1.8	0.7	I	25	0.68	60	0.72	550	0.76	628	0.44
	FⅡ 2-1	1.3	0.7	I	25	0.73	60	0.54	550	0.59	628	0.41
	FⅠ 3-1	1.9	0.7	I	25	0.58	60	0.46	550	0.50	628	0.37
	FⅠ 5	1.1	0.4	Ⅱ-1	25	0.71	60	0.68	550	0.76	628	0.43
	FⅠ 3-2	1.6	0.2	Ⅱ-2	25	0.48	60	0.42	550	0.32	628	0.28
T2-32	FⅡ 5-2	1.3	0.2	Ⅱ-2	26	0.67	64	0.52	305	0.50	456	0.34

表 2 T2-32 井经济评价表

Table 2 Economic evaluation form for T2-32 well

层号	砂岩 厚度/ m	有效 厚度/ m	储层 分类	预测 缝高/ m	压裂 液量/ m ³	支撑 剂量/ m ³	压裂液和 支撑剂费用/ 万元	公用费 用分摊/ 万元	单层压 裂费用/ 万元	第 1 年 累产油/ t	极限 产油量/ t	原油销 售利润/ 万元
FⅢ3-2	3.7	0.7	Ⅱ-2	6.2	781	40	18.8	37.7	56.5	/	/	/
FⅢ3-1	2.1	1.1	Ⅱ-2	7.0	882	46	21.2	42.5	63.8	/	/	/
FⅡ5-2	1.3	0.2	Ⅱ-2	3.0	500	21	10.5	20.9	31.4	143.0	312	46.6
FⅣ4-2	3.2	2.2	Ⅱ-1	5.0	630	33	15.2	30.4	45.5	/	/	/
FⅣ4-1	2.3	0.9	Ⅱ-1	5.8	731	38	17.6	35.2	52.8	/	/	/
FⅡ2-2	1.3	0.9	Ⅱ-2	6.8	857	44	20.6	41.3	61.9	/	/	/
合计	13.9	6.0	/		4 381	221	103.9	208.1	312.0	/	/	/

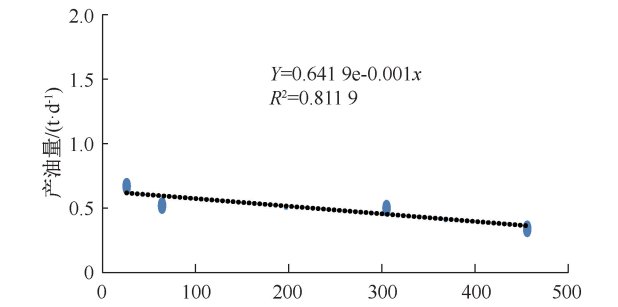


图 1 T2-32 井 FⅡ 5-2 层产量预测曲线
Fig.1 Production forecast for T2-32 well

用同样方法,可以得到 T2-19 井 FⅠ 3-2 层压裂成本和利润分别为 19.4 万元和 36.4 万元(见表 3)。由此可得,该层与 T2-32 井 FⅡ 5-2 层平均压裂成本和平均利润分别为 25.4 万元和 41.5 万元,单层平均利润高于平均压裂成本。由此可以认为,TA 区块Ⅱ-2 类油层有效厚度经济界限为 0.2 m。因为Ⅰ类、Ⅱ-1 类油层好于Ⅱ-2 类油层,则可以推断,TA 区块各类油层有效厚度经济界限均可达 0.2 m。

表 3 T2-19 井经济评价表

Table 3 Economic evaluation form for T2-19 well

层号	砂岩 厚度/ m	有效 厚度/ m	储层 分类	预测 缝高/ m	压裂 液量/ m ³	支撑 剂量/ m ³	压裂液和 支撑剂费用/ 万元	公用费 用分摊/ 万元	单层压 裂费用/ 万元	第 1 年 累产油/ t	极限 产油量/ t	原油销 售利润/ 万元
FⅢ3-2	2.3	0.7	Ⅱ-1	9.0	1 368	68	32.3	32.9	65.2	/	/	/
FⅢ2	3.5	2.5	I	8.5	1 292	65	30.5	31.0	61.5	/	/	/
FⅡ 2-2	1.8	0.7	I	4.0	608	30	14.3	14.6	29.0	195.0	563	84.0
FⅡ 2-1	1.3	0.7	I	3.0	456	23	10.8	11.0	21.7	166.0	511	76.3
FⅠ 7	4.2	2.6	I	5.8	882	44	20.8	21.2	42.0	/	/	/
FⅠ 5	1.1	0.4	Ⅱ-1	3.0	456	23	10.8	11.0	21.7	186.0	532	79.4
FⅠ 3-1	1.9	0.7	I	6.0	912	46	21.5	21.9	43.4	150.0	497	74.2
FⅠ 3-2	1.6	0.2	Ⅱ-2	2.6	395	21	9.6	9.8	19.4	70.1	244	36.4
FⅠ 2-FⅠ 1	4.2	2.8	Ⅱ-1	7.2	1 094	55	25.8	26.3	52.1	/	/	/
合计	21.9	11.3			7 463	374	176.4	179.6	356.0	/	/	/

3.5 产量经济界限法确定经济界限

龙西地区 TA 区块油藏开发方案经济评价结果是,在单井平均有效厚度 10.0 m,缝网体积压裂后生产 1 年的条件下(按有效生产天数 300 d 计),单井日产油量经济界限为 1.76 t/d。利用公式(4)可以求得有效厚度为 0.2 m 的油层第一年平均日产油经济界限,即

$$Q_n = Q/H \times h_n = 0.0352 \text{ t/d}$$

TA 区块油层有效厚度最小值为 0.2 m。T2-32 井 F II 5-2 层见油后第一年累产油量为 143 t(如表 1),则第一年平均日产油为 0.48 t/d。同理可得,T2-19 井 F I 3-2 层见油后第一年平均日产油为 0.23 t/d。上述两个层的平均值为 0.36 t/d,远高于 0.0352 t/d。与投入产出比法同理,用产量经济界限法确定的有效厚度经济界限也是 0.2 m。

4 结论

(1)本文提出了两种有效厚度经济界限确定方法,即投入产出比法和产量经济界限法。

(2)利用上述两种方法,综合确定大庆油田龙西地区 TA 区块致密油直井 I 类、II-1 类、II-2 类油层有效厚度经济界限可达 0.2 m。

(3)大庆油田与 TA 区块地质条件和原油物性等特征类似的致密油区块,压裂选层可以参考本文确定的有效厚度界限值。

(4)测井资料划出的单层有效厚度仅代表井筒附近的储层特征,不排除由于井筒远处的储层变厚、物性和含油性等因素变好,致使本文确定的有效厚度经济界限值偏低或偏乐观。

(5)两口测试井测试测点较少,回归的产量预测曲线可能会存在一定误差,从而影响有效厚度经济界限值精度。下步研究,需增加测试层数和单层测试次数,提高产量预测精度,使求得的有效厚度经济界限更可靠。

致谢:感谢大庆油田公司勘探事业部同意本文公开发表。

参考文献

- [1] 杜金虎,李建中,郭彬程,等. 中国陆相致密油[M]. 北京:石油工业出版社,2016.
DU Jinhu, LI Jianzhong, GUO Bincheng, et al. China continental tight oil[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [2] 王社教,郭秋麟,吴晓智,等. 致密油资源评价技术与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2014.
WANG Shejiao, GUO Qiulin, WU Xiaozhi, et al. Evaluation technology and application of dense oil resources[M].

Beijing: Petroleum Industry Press, 2014.

- [3] 金成志,杨东,张永平,等. 松辽盆地北部非均质致密油水平井增产改造设计优化技术[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(6): 40-46.
JIN Chengzhi, YANG Dong, ZHANG Yongping, et al. Optimization techniques for stimulation design of horizontal wells of heterogeneous tight oil in northern Songliao basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(6): 40-46.
- [4] 崔宝文,林铁峰,董万百,等. 松辽盆地北部致密油水平井技术及勘探实践[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(5): 16-22.
CUI Baowen, LIN Tiefeng, DONG Wanbai, et al. Horizontal well techniques and their exploration practices in the tight oil reservoirs in north Songliao basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(5): 16-22.
- [5] 周永炳,徐启,樊晓东,等. 大庆外围油田致密油层叠置组合分类与开发实践[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(5): 195-202.
ZHOU Yongbing, XU Qi, FAN Xiaodong, et al. Overlap classification and development practice of the tight reservoirs in Daqing Peripheral Oilfields[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 195-202.
- [6] 杨玉才. Q 油田缝网压裂选层标准研究[J]. 化学工程与装备, 2019(2): 70-71.
YANG Yucai. Study on fracture network fracturing layer selection standard in Q oilfield[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2019(2): 70-71.
- [7] 孟祥灿. 大情字井油田 A 区块重复压裂增产技术[J]. 油气井测试, 2020, 29(5): 44-49.
MENG Xiangcan. Repeated fracturing stimulation to Block A in Daqingzijing Oilfield[J]. Well Testing, 2020, 29(5): 44-49.
- [8] 王发现,张松革,高萍,等. 试井资料在压裂选层中的作用[J]. 油气井测试, 2005, 14(3): 21-22, 24.
WANG Faxian, ZHANG Songge, GAO Ping, et al. Application of Testing data for selecting Layer in Fracture[J]. Well Testing, 2005, 14(3): 21-22, 24.
- [9] 张雁雁,王海霞. 压裂选井选层方法及其与应用[J]. 化学工程与装备, 2020(4): 75-76.
ZHANG Yanyan, WANG Haixia. Method of well and layer selection in fracturing and its application[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2020(4): 75-76.
- [10] 詹耀华,鲁明晶,毕曼,等. 基于多因素关联体系的重复压裂选井选层方法研究及应用[J]. 钻采工艺, 2020, 43(2): 78-81.
ZHAN Yaohua, LU Mingjing, BI Man, et al. Research and application of re-fracturing candidate selection method based on multi factor association system[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(2): 78-81.
- [11] 薛颖. 基于油层分类标准的特低渗油藏压裂井层定量优选研究及应用[J]. 新疆石油天然气, 2019, 15(3):

- 58-61.
- XUE Ying. Research and application of quantitative optimization of fractured well layer in ultra-low permeability reservoir based on reservoir classification standard [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2019, 15(3): 58-61.
- [12] 冯笑含. 基于多重分形的岩石矿物分布规律研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(8): 109-110.
- FENG Xiaohan. Study on the distribution of rock minerals based on multifractal theory [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2018, 38(8): 109-110.
- [13] 黎铖, 蔡军, 张君子, 等. 赛东洼槽碎屑岩储集层压裂录井选层方法[J]. 录井工程, 2018, 29(4): 13-19.
- LI Cheng, CAI Jun, ZHANG Junzi, et al. Mud logging optimizing horizon for fracturing elastic rock reservoir in Saidong trough [J]. Mud Logging Engineering, 2018, 29(4): 13-19.
- [14] 徐凤兰, 李琳琳, 王永军, 等. 动静因素双重约束下储层压裂综合决策方法[J]. 油气井测试, 2019, 28(5): 67-73.
- XU Fenglan, LI Linlin, WANG Yongjun, et al. Comprehensive decision-making method for reservoir fracturing under dual constraints of dynamic and static factors [J]. Well Testing, 2019, 28(5): 67-73.
- [15] 王鑫鑫, 霍丽丽, 张辉, 等. 利用地层测试资料指导低渗透砂岩储层压裂改造选层[J]. 油气井测试, 2020, 29(5): 54-60.
- WANG Xinxin, HUO Lili, ZHANG Hui, et al. Application of formation test data to guide fracturing candidate for low-permeability sandstone reservoirs [J]. Well Testing, 2020, 29(5): 54-60.
- [16] 董烈. 致密油藏经济有效开发主要指标界限[J]. 大庆石油地质与开发, 2021, 40(6): 167-147.
- DONG Lie. Main index limits for the economic and effective development of tight oil reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(6): 167-147.
- [17] ARPS J J. Analysis of decline curves [J]. Transactions of the AIME, 1945, 160(1): 228-247.
- [18] WANG K, LI H, WANG J, et al. Predicting production and estimated ultimate recoveries for shale gas wells: A new methodology approach [J]. Applied energy, 2017, 206: 1416-1431.
- [19] GUPTA I, RAI C, SONDERGELD C, et al. Variable exponential decline-modified ARP to characterize unconventional shale production performance [C]. paper SPE 194005 presented at the SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, Houston, Texas, 23-25 July 2018.
- [20] GUPTA I, RAI C, DEVEGOWDA D, et al. Haynesville shale: predicting long-term production and residual analysis to identify well interference and fracture hits [C]. paper SPE 195218 presented at the SPE Oklahoma City Oil and Gas Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, USA, 9-10 April 2019.
- [21] 周楚艺. 致密砂岩油藏水平井可采储量估算方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(4): 161-165.
- ZHOU Chuyi. Estimation method of recoverable reserves of horizontal wells in tight sandstone reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(4): 161-165.
- [22] EKER I, KURTOGLU B, KAZEMI H. Multiphase rate transient analysis in unconventional reservoirs: theory and applications [R]. SPE 171657, 2014.
- [23] 魏漪, 冉启全, 李冉, 等. 基于分区补给物质平衡法预测致密油压裂水平井动态储量[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 448-455.
- WEI Yi, RAN Qiquan, LI Ran, et al. Prediction of dynamic reserves of fractured horizontal Wells in tight oil based on zoned replenishment material balance method [J]. Petroleum Exploration and development, 2016, 43(3): 448-455.
- [24] 孙科, 刘慧卿, 王腾, 等. 致密油藏压裂后衰竭开采单井可采储量预测新方法[J]. 石油学报, 2020, 41(10): 10.
- SUN Ke, LIU Huiqing, WANG Teng, et al. A new method for predicting recoverable reserves of single well after fracturing and depletion in tight reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(10): 10.

编辑 刘振庆

第一作者简介: 董尚富, 男, 1972年10月出生, 硕士研究生, 高级工程师, 2009年毕业于南京大学构造地质学专业, 目前主要从事试油压裂技术研究与管理工。电话: 0459-5576750, 13836991430; Email: dongshangfu@petrochina.com.cn。通讯地址: 黑龙江省大庆市让胡路区西宾街道西柳街2号勘探事业部, 邮政编码: 163458。