

· 储层改造与完井 ·

文章编号:1004-4388(2018)01-0055-07

塔中志留系储层重复改造选井和产能预测方法

刘虹瑜¹, 杨向同¹, 袁学芳¹, 张 键¹, 吴红军¹, 丁亮亮²

1. 中国石油塔里木油田分公司油气工程研究院 新疆库尔勒 841000

2. 长江大学机械工程学院 湖北荆州 434023

通讯作者:Email:lld1210@163.com

项目支持:国家科技重大专项“塔里木盆地库车前陆冲断带油气开发示范工程—裂缝性砂岩储层污染评价及产能预测技术研究”(2016ZX05051)

引用:刘虹瑜, 杨向同, 袁学芳, 等. 塔中志留系储层重复改造选井和产能预测方法[J]. 油气井测试, 2018, 27(1):55-61.

Cite: LIU Jiangyu, YANG Xiangtong, YUAN Xuefang *et al.* Method of re-stimulation candidate selection and productivity prediction for Silurian reservoirs in Tazhong area [J]. Well Testing, 2018, 27(1):55-61.

摘要 塔中志留系低孔、低渗特低渗储层物性差,自然条件下油气产能低,实施酸压和加砂压裂改造后,油井初期增产效果十分明显,但产量下降较快,有效期短,采出程度低。重复改造是主力油田进入中高含水期后老井挖潜和提高采收率的重要治理措施,由于影响重复改造效果的因素较多,重复改造选井存在着诸多不确定性和复杂性,因此采用灰色关联理论研究了塔中志留系低渗透砂岩储层重复改造效果的影响因素及其影响程度,采用多元回归法建立了产能预测模型。利用产能预测模型对塔中志留系低渗透砂岩储层8口井进行了产能预测,结果表明预测产能与实际产能的相对误差仅为7.79%,处在工程允许的误差范围内。塔中志留系储层的现场实践也表明,运用该方法选择的重复改造井压后增产3.0倍,稳产时间增长80天。该方法能够为低渗透油气藏的重复改造选井提供参考和借鉴,达到提质增效的目的。

关键词 塔中志留系;重复改造;压裂;致密砂岩;灰色关联法;产能预测;选井

中图分类号:TE353

文献标识码:B

DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.01.009

Method of re-stimulation candidate selection and productivity prediction for Silurian reservoirs in Tazhong area

LIU Jiangyu, YANG Xiangtong, YUAN Xuefang, ZHANG Jian, WU Hongjun, DING Liangliang

1. Engineering Research Institute, Tarim Oilfield Company, CNPC, Korla, Xinjiang 841000, China

2. Institute of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China

Abstract: The properties of the low-porosity and low-permeability reservoir in Silurian reservoirs in Tazhong area are bad and the natural productivity is not high. After acidizing and fracturing, the primary effect is very obvious, but the production decreases rapidly. Therefore, the effective period is short and the recovery is lower. Re-stimulation is one of the most effective ways to tap potentials and enhances recovery of existing wells during the medium-high water cut stage. In this respect, selection of candidate wells is essential for successful re-stimulation. In accordance with the grey correlation theory, the influencing factors for performance of re-stimulation in the Silurian low-permeability sandstone reservoirs of Tazhong area and their impacts are discussed. Through multiple regression, the productivity forecast model has been constructed. The productivity forecast model was used to forecast the productivities of 8 wells in Silurian low-permeability sandstone reservoirs of Tazhong area. The results show that the relative error between the predicted productivity and the actual productivity is only 7.79%, which is within the allowable extent. Field applications also reveal that the wells selected by using the proposed technique have their productivities enhanced by 3.0 times and with the stable production period of 80 days after re-stimulation. In conclusion, the proposed technique can provide reliable references for selection of candidate wells for repeated stimulation in low-permeability reservoirs to achieve the purpose of improving quality and efficiency.

Keywords: Silurian reservoir of Tazhong area; re-stimulation; fracturing; tight sand; grey correlation method; productivity prediction; candidate selection

塔中志留系油藏构造属塔中隆起塔中北斜坡塔中10号构造带中东部构造,主要分布在塔中11、塔

中12、塔中16三个区块,主要层系为柯坪塔格组上1亚段、上3亚段,岩性以岩屑石英砂岩为主,纵向

多套砂体,主力含油砂体段地层厚度 17~21 m,单砂体厚度 2~4 m,隔层厚度 2~6 m,砂体纵横向变化大。储层埋深 4 000~4 500 m,地层温度 125 ℃ 左右,平均孔隙度 4%~9%,渗透率 $0.05 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属低孔、低渗特低渗储层^[1],储层物性差、自然条件下油气产能低。这些区块的水平井分段压裂主要面临以下难题:①储层非均质性强,裂缝级数优化难度大;②底水发育,油层距底水仅 20 m,造长缝与控缝高存在矛盾;③超深、高温的油藏条件对井下工具性能要求高^[2]。因此,做好重复改造选井和产能预测,改善施工效果十分必要。

国内外学者已对重复改造的选井进行了大量研究,选井方法主要有神经网络法、模糊识别法、生产数据分析和灰色关联法。孙鹏霄^[3]选取某油田某区块为试验区,应用灰色关联方法分析影响压裂效果的主要因素,分别采用均值变换和极差变换方法对样本库中 16 口井的日增油量进行预测,并通过多元回归方法建立预测模型,预测结果显示极差变换方法预测结果较为准确。Roussel N P 和顾岱鸿等分别建立了基于生产数据的重复压裂选井方法,所不同的是 Roussel N. P. 等人^[4]提出了采用应力转向参数、完井参数和产量递减参数三个参数建立了一种选井方法,而顾岱鸿等^[5]利用定容气藏的物质平衡方程和产量递减曲线联合分析生产数据的方法,对达到拟稳态流动的气井通过拟合变流量和井底压力的生产数据,不关井测试计算表皮系数,再根据计算的表皮系数作为重复压裂选井的参考指标。许多研究者将灰色关联分析法应用到重复压裂选层主要影响因素的量化决策中,灰色关联分析法最早由邓聚龙教授提出^[6],经过多年的发展,已经被广泛应用预测、评价和影响因子分析等方面,例如 WU W. Y. 等人^[7]应用于网络接口数量的预测, YANG F. 等人^[8]应用于地下建筑物的防火安全评估。吕志凯^[9]和 SHELLEY R. F.^[10]等人采用神经网络方法建立了一套高精度的压裂选井选层辅助决策系统,选井效果与实际施工效果比较吻合。李得立^[11]和吴建发^[12]等人统计了影响压裂效果的主要地质因素和施工因素,运用模糊数学分析方法建立了适合目的区块的压裂选井选层数学模型,并根据油田现场生产要求确定了模型的判识标准。Zoveidavian-poor M. 等人^[13]针对压裂选井选层的复杂性、非线性和不确定性特征,总结了模糊数学理论在压裂选井选层中能够降低不确定性因素的应用效果。翁定为

等人^[14]通过对安塞油田以往重复压裂效果分析,挑选出对重复压裂效果影响明显的参数作为选井选层样本库参数,建立了安塞油田重复压裂选井选层样本库,用模糊模式识别模型、多因素非线性生产统计模型和人工神经网络模型分别分析了安塞油田重复压裂选井选层样本库,并对 3 种分析结果取交集确定最优井层,通过测试样本检验,所用方法的选井选层结果与实际增产效果结果符合较好。Shahab M. 等人^[15]总结了包括人工神经网络、遗传算法和模糊数学在内的人工智能方法在重复压裂选井选层中的应用。目前的研究焦点主要集中在重复改造井的选择,对所选井的重复改造效果只是用来简要证明所用方法的可靠性,而系统报道选井过程及措施实施效果的鲜有报道^[16-17]。

因此,以塔中志留系储层的重复改造为研究对象,在重复改造效果影响因素优选的基础上,采用灰度关联法和多元回归法对塔中志留系低渗透砂岩储层进行重复改造选井和产能预测,系统介绍了选井和产能预测方法的适用性和有效性,以期为低油价下的重复改造提供效益保障。

1 重复改造选井和产能预测模型

针对塔中志留系储层特点,先后尝试了酸压和加砂压裂对该区储层进行改造施工,其中 14 口井的生产曲线如图 1 所示。

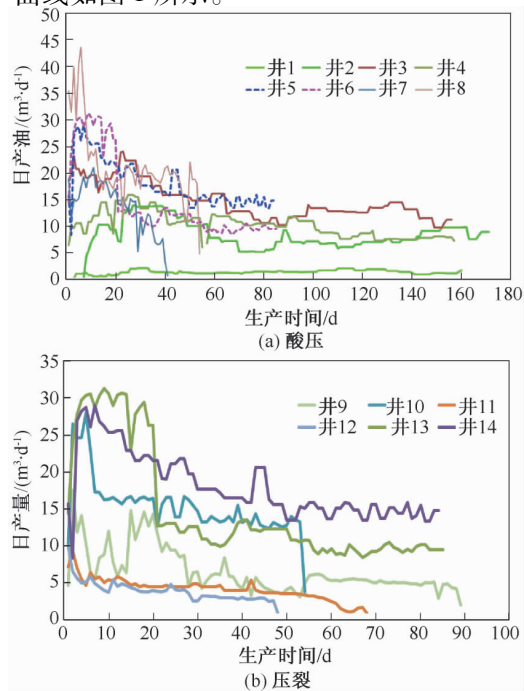


图1 塔中志留系储层酸压和压裂后生产曲线
Fig.1 Production curve after the reservoir acidizing and fracturing for Silurian reservoirs in Tazhong area

由图 1 可以看出,经过改造后,初期增产效果十分明显,但约有 70% 的采油井产量下降较快,措施的有效期不足三个月,采出程度低,从而导致采油井稳产期缩短,投资回报率降低。因此,首先分析重复改造效果影响因素,采用灰色关联发对影响因素根据关联度进行排序,然后采用多元回归法建立产能预测模型,最后对选井和产能预测模型进行验证。

1.1 重复改造影响因素

与完井后的措施改造所不同的是重复改造的对象是针对同井同层,因此,重复改造目标井的选择除了考虑地质情况以外,初次改造状况及单井历史生产数据也是反映目标井重复改造潜力的影响因素。针对塔中志留系储层区域特征,根据近年来国内外石油工作者在重复压裂选井选层方面的研究成果,同时综合地质、开发专家经验和反复测试分析,确定单井地质参数、初次改造参数及历史生产数据三大类共 16 项参数作为选井决策因素(见表 1)。

表 1 重复改造选井评价因素
Table 1 Evaluation factors for re-stimulation candidate selection

参数类别	参数	单位
单井地质参数	渗透率 K	$10^{-3} \mu\text{m}^2$
	有效厚度 h	m
	孔隙度 φ	%
	原始地层压力 p_i	MPa
	目前地层压力 p	MPa
	含油饱和度 S_o	%
	可采储量 N	10^4t
初次改造参数	前期改造总液量 V_1	m^3
	前期改造总砂量 V_2	m^3
	砂浓度 c	kg/m^3
	排量 v	m^3/min
历史生产数据	生产压差 Δp	MPa
	生产时间 t	d
	累产油 N_p	10^4t
	含水率 f	%
	改造前日产油 q	t

1.2 重复改造选井模型建立

对比分析了常用的重复改造选井方法的优缺点,主要有神经网络法、生产数据分析法、模糊识别法和灰色关联法,对比分析结果见表 2。对于重复改造井的效果而言,由于各种因素的影响,改造效果与各因素之间并没有显示出明确的映射关系,因此可将重复改造井的产能作为灰色系统,采用灰色关联法进行重

复改造的效果预测。灰色关联法首先可以确定出各评价因素对重复改造效果的影响大小^[18]。

表 2 重复改造选井方法对比
Table 2 Methods comparison of re-stimulation candidate selection

选井方法	优点	缺点
BP 神经网络法	准确、可靠、预测快速、简便。	受样本选择影响。样本不好或样本数量太少,影响方法的准确性
生产数据分析法	快速、低成本、简单实用	对非均质性强和天然裂缝发育的油藏不适用
灰色关联法	综合考虑了多因素对重复压裂的影响,方法简单易行	较少结合产能与实际应用
模糊识别法	综合考虑了多因素对重复压裂的影响,方法简单易行	评价指标单一,结果有时不准确,不能直接地反映出各个影响因素对改造效果的影响

1.2.1 原始数据的预处理

选用 6 口井的单井地质参数、初次改造参数及历史生产数据和压后日产量进行分析,基础数据见表 3。

设原始数列为:

$$X(0) = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(num)\}$$

在这里, $X(0)$ 就是由表 3 中 6 口井的 16 个基础参数数值组成的行列式,即

$$X(0) =$$

13.5	12.3	14.2	10	7.8	10.6
6.12	7.14	3.01	2.31	2.2	3.12
6.5	6.7	6.1	10.5	19.47	7.5
50.8	50.8	50.8	50.8	46.89	51.15
43.73	46.322	47.83	43.73	43.15	47.73
58	59.4	48	43	61	53.9
2.323 9	1.394 8	1.208 5	1.470 9	1.620 1	4.315 8
13.1	8.2	7.3	7.8	18.01	14.548
7.6	0.77	1.7	2.77	4.9	0.97
21.3	22	15	25.5	19.2	3.7
289	87	67	1 343	15	1 647
0.349	0.058	0.028 3	0.658 3	0.014 7	1.665 8
538.8	340	398.8	490	182.6	456.9
48.5	28	45.9	37.7	16.6	60.9
5	3.5	3.6	5	3.2	5.1
650	640	720	351	745.2	923

选取 $X(0)$ 中每行的最大值为分母,对 $X(0)$ 数列进行初值归一化处理,即

表3 塔中志留系重复改造井基础数据

Table 3 Basic data for re-stimulation well for Silurian reservoirs in Tazhong area

井号	A	B	C	D	E	F
孔隙度 $\varphi/\%$	13.5	12.3	14.2	10	7.8	10.6
渗透率 $K/10^{-3}\mu\text{m}^2$	6.12	7.14	3.01	2.31	2.20	3.12
有效厚度 h/m	6.50	6.70	6.10	10.50	19.47	7.50
原始地层压力 p_i/MPa	50.80	50.80	50.80	50.80	46.89	51.15
目前地层压力 p/MPa	43.730	46.322	47.830	43.730	43.150	47.730
含油饱和度 $S_o/\%$	58.0	59.4	48.0	43.0	61.0	53.9
可采储量 $N/10^4\text{t}$	2.323 9	1.394 8	1.208 5	1.470 9	1.620 1	4.315 8
生产压差 $\Delta p/\text{MPa}$	13.100	8.200	7.300	7.800	18.010	14.548
压前日产量 $q/(\text{t}\cdot\text{d}^{-1})$	7.60	0.77	1.70	2.77	4.90	0.97
含水率 $f/\%$	21.3	22.0	15.0	25.5	19.2	3.7
生产时间 t/d	289	87	67	1343	15	1 647
改造前累产 $N_p/10^4\text{t}$	0.349 0	0.058 0	0.028 3	0.658 3	0.014 7	1.665 8
前期改造总液量 V_1/m^3	538.8	340.0	398.8	490.0	182.6	456.9
前期改造总加砂量 V_2/m^3	48.5	28.0	45.9	37.7	16.6	60.9
排量 $v/(\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1})$	5.0	3.5	3.6	5.0	3.2	5.1
砂浓度 $c/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	650.0	640.0	720.0	351.0	745.2	923.0
重复改造后日产量 q'/t	21.64	3.56	2.48	5.04	2.70	6.39

$$Y(0) = \left| \frac{X^{(0)}(1)}{X^{(0)}(1)}, \frac{X^{(0)}(2)}{X^{(0)}(1)}, \frac{X^{(0)}(3)}{X^{(0)}(1)}, \dots, \frac{X^{(0)}(\text{num})}{X^{(0)}(1)} \right| \quad (1)$$

得到新的数列:

$$Y(0) = \{Y^{(0)}(1), Y^{(0)}(2), Y^{(0)}(3), \dots, Y^{(0)}(\text{num})\}$$

即

$$Y(0) = \begin{pmatrix} 0.9507 & 0.8662 & 1 & 0.7042 & 0.5493 & 0.7465 \\ 0.8571 & 1 & 0.4216 & 0.3235 & 0.3081 & 0.437 \\ 0.3338 & 0.3441 & 0.3133 & 0.5393 & 1 & 0.3852 \\ 0.9932 & 0.9932 & 0.9932 & 0.9932 & 0.9167 & 1 \\ 0.9143 & 0.9685 & 1 & 0.9143 & 0.9022 & 0.9979 \\ 0.9508 & 0.9738 & 0.7869 & 0.7049 & 1 & 0.8836 \\ 0.5385 & 0.3232 & 0.28 & 0.3408 & 0.3754 & 1 \\ 0.7274 & 0.4553 & 0.4053 & 0.4331 & 1 & 0.8078 \\ 1 & 0.1013 & 0.2237 & 0.3645 & 0.6447 & 0.1276 \\ 5.7568 & 5.946 & 4.054 & 6.8919 & 5.1892 & 1 \\ 19.267 & 5.8 & 4.4667 & 89.533 & 1 & 109.8 \\ 23.743 & 3.9458 & 1.9246 & 44.78 & 1 & 113.32 \\ 1 & 0.631 & 0.7402 & 0.9094 & 0.3389 & 0.848 \\ 0.8043 & 0.4643 & 0.7612 & 0.6252 & 0.2753 & 1 \\ 0.9804 & 0.6863 & 0.7059 & 0.9804 & 0.6275 & 1 \\ 0.7042 & 0.6934 & 0.7801 & 0.3803 & 0.8074 & 1 \end{pmatrix}$$

1.2.2 求差序列

所用6口井重复压裂后150天的平均日产量组成母序列矩阵:

$Y_0 = (21.64 \ 3.56 \ 2.48 \ 5.04 \ 2.70 \ 6.39)$ 对其进行初值归一化处理后得到:

$$Y_0(0) = (1.00 \ 0.16 \ 0.11 \ 0.23 \ 0.12 \ 0.30)$$

用矩阵 $Y_0(0)$ 和 $Y(0)$ 计算差序列:

$$\Delta_{oi(k)} = |Y_0^{(0)}(k) - Y_i^{(0)}(k)| \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, \text{num}$$

得到:

$$\Delta_{oi(k)} = \begin{pmatrix} 0.049 & 0.701 & 0.886 & 0.471 & 0.424 & 0.451 \\ 0.143 & 0.835 & 0.307 & 0.091 & 0.183 & 0.142 \\ 0.666 & 0.179 & 0.199 & 0.306 & 0.875 & 0.090 \\ 0.007 & 0.828 & 0.879 & 0.760 & 0.792 & 0.705 \\ 0.086 & 0.804 & 0.886 & 0.681 & 0.777 & 0.702 \\ 0.049 & 0.809 & 0.672 & 0.472 & 0.875 & 0.588 \\ 0.462 & 0.158 & 0.166 & 0.108 & 0.251 & 0.705 \\ 0.273 & 0.291 & 0.291 & 0.200 & 0.875 & 0.512 \\ 0.000 & 0.063 & 0.109 & 0.132 & 0.520 & 0.168 \\ 4.757 & 5.781 & 3.940 & 6.659 & 5.064 & 0.705 \\ 18.267 & 5.635 & 4.352 & 89.300 & 0.875 & 109.505 \\ 22.743 & 3.781 & 1.810 & 44.547 & 0.875 & 113.024 \\ 0.000 & 0.466 & 0.626 & 0.677 & 0.214 & 0.553 \\ 0.196 & 0.300 & 0.647 & 0.392 & 0.150 & 0.705 \\ 0.020 & 0.522 & 0.591 & 0.748 & 0.503 & 0.705 \\ 0.296 & 0.529 & 0.666 & 0.147 & 0.682 & 0.705 \end{pmatrix}$$

1.2.3 求两级最大差和最小差

利用公式(3)计算每个参数差序列中的最大值和最小值,即

$$\begin{cases} \Delta_{\max} = i_{\max} k_{\max} |Y_0^{(0)}(k) - Y_i^{(0)}(k)| \\ \Delta_{\min} = i_{\min} k_{\min} |Y_0^{(0)}(k) - Y_i^{(0)}(k)| \end{cases} \quad (3)$$

得到:

$$(\Delta_{\max} \quad \Delta_{\min}) = \begin{pmatrix} 0.886 & 0.049 \\ 0.835 & 0.091 \\ 0.875 & 0.090 \\ 0.879 & 0.007 \\ 0.886 & 0.086 \\ 0.875 & 0.049 \\ 0.705 & 0.108 \\ 0.875 & 0.200 \\ 0.520 & 0 \\ 6.659 & 0.705 \\ 109.505 & 0.875 \\ 113.024 & 0.875 \\ 0.626 & 0 \\ 0.705 & 0.150 \\ 0.748 & 0.020 \\ 0.705 & 0.147 \end{pmatrix}$$

1.2.4 求取关联系数

利用公式(4)计算关联系数,即

$$\varepsilon_{0i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad (4)$$

式(4)中 ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$,一般而言 ρ 越小可以提高关联度的分辨率。但该方法关键在于排出关联序,与差异的大小无关,为了便于计算文中 ρ 取值 0.5。从而得到 6 口井的关联系数为:

$$\varepsilon_{oi}(k) = \begin{pmatrix} 1.000 & 0.430 & 0.370 & 0.538 & 0.567 & 0.551 \\ 0.907 & 0.406 & 0.701 & 1.000 & 0.846 & 0.909 \\ 0.478 & 0.855 & 0.829 & 0.709 & 0.402 & 1.000 \\ 1.000 & 0.352 & 0.339 & 0.372 & 0.362 & 0.390 \\ 1.000 & 0.424 & 0.398 & 0.436 & 0.433 & 0.461 \\ 1.000 & 0.390 & 0.438 & 0.535 & 0.371 & 0.475 \\ 0.565 & 0.901 & 0.889 & 1.000 & 0.763 & 0.435 \\ 0.898 & 0.876 & 0.875 & 1.000 & 0.486 & 0.671 \\ 1.000 & 0.836 & 0.704 & 0.664 & 0.333 & 0.608 \\ 0.398 & 0.345 & 0.453 & 0.310 & 0.380 & 1.000 \\ 0.762 & 0.921 & 0.941 & 0.386 & 1.000 & 0.339 \\ 0.724 & 0.952 & 0.984 & 0.568 & 1.000 & 0.338 \\ 1.000 & 0.272 & 0.351 & 0.333 & 0.612 & 0.380 \\ 0.917 & 0.771 & 0.503 & 0.675 & 1.000 & 0.476 \\ 1.000 & 0.439 & 0.408 & 0.351 & 0.449 & 0.365 \\ 0.771 & 0.567 & 0.491 & 1.000 & 0.483 & 0.473 \end{pmatrix}$$

1.2.5 求关联度

根据公式(5)计算关联系数的平均值,即

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{n} g \sum_{k=1}^n \varepsilon_{0i}(k) \quad (5)$$

得到重复改造效果影响因素的相关度计算结果见表 4。

表 4 各影响因素的相关度
Table 4 Correlation of each influencing factor

排序	因素	关联度
1	孔隙度	0.576
2	生产压差	0.801
3	渗透率	0.795
4	改造前累产	0.761
5	可采储量	0.759
6	生产时间	0.725
7	前期改造总加砂量	0.724
8	有效厚度	0.712
9	压前日产油	0.691
10	含水率	0.481
11	砂浓度	0.631
12	含油饱和度	0.535
13	目前地层压力	0.525
14	排量	0.502
15	前期改造总液量	0.491
16	原始地层压力	0.469

1.2.6 排关联序

为准确评价及理顺各子序列对母序列的关联程度,需将关联度依大小顺序排成一列,称关联序。对于各子序列要比较其对同一母序列来说,孰大孰小,从而可以明确及理顺各子序列对于母序列的“主次”、“优劣”关系,可表示为:

若 $\gamma_{0a} > \gamma_{0b}$,则有表达式 $\langle Y_a | Y_b \rangle > \langle Y_b | Y_0 \rangle$ (优于);

若 $\gamma_{0a} < \gamma_{0b}$,则有表达式 $\langle Y_a | Y_b \rangle < \langle Y_b | Y_0 \rangle$ (劣于);

若 $\gamma_{0a} = \gamma_{0b}$,则有表达式 $\langle Y_a | Y_b \rangle = \langle Y_b | Y_0 \rangle$ (等价于)。

重复改造效果影响因素的相关度排序见表 4。由表 4 可以看出生产压差、渗透率、改造前累产、可采储量、生产时间、前期改造总砂量、有效厚度、压前日产油、砂浓度和孔隙度是影响较大的因素。

1.2.7 产能预测模型

选取相关度排序前 10 的因素,应用多元回归法对选取的因素进行计算,得到产能预测模型:

$$Y = -15.343 + 1.115\varphi + 0.299\Delta p + 0.868K + 3.592N + 0.062V_2 - 0.018c + 1.748q - 0.001t \quad (6)$$

1.3 模型验证

根据预测模型,选取该区块 8 口井进行预测,预

测结果见表5。

表5 产能预测与现场日产油对比表

Table 5 Comparison of production rate forecasted to that of field

井号	实际日产油 $/(t \cdot d^{-1})$	预测日产油 $/(t \cdot d^{-1})$	绝对误差 $/(t \cdot d^{-1})$	相对误差 $\%$
A1	21.64	22.19	0.55	2.55
A2	3.56	3.87	0.30	8.53
A3	2.48	2.73	0.26	10.31
A4	5.04	5.33	0.29	5.73
A5	2.70	3.06	0.35	13.05
A6	6.39	7.37	0.98	15.32
A7	10.04	10.59	0.55	5.46
A8	18.91	19.18	0.27	1.43

由表5可知,日产油预测结果绝对误差平均值

为0.44 t,相对误差为7.79%,在工程可接受的误差范围内。

2 现场实践

根据灰色关联与产能预测相结合的方法,对塔中志留系具有重复改造潜力的10口井进行了优选(表6),优选出压裂后产能大于15 t/d的5口井作为重复改造候选井。

根据重复改造优选结果,首先对B1井进行了重复压裂。B1井位于塔中12井区,储层物性较差,孔隙度为13%,渗透率为 $6.1 \times 10^{-3} \mu m^2$,该井于2013年8月进行常规加砂压裂,改造后投产,投产初期日产油16.96 t,累计生产291 d,累计产油3 489.4 t。

表6 塔中志留系储层重复改造选井排序

Table 6 Sort of selecting well of the re-stimulation for Silurian reservoirs in Tazhong area

井号	生产压差 $\Delta p/MPa$	渗透率 $K/(10^{-3} \mu m^2)$	可采储量 $N/10^4 t$	生产时间 t/d	前期改造总 加砂量 V_2/m^3	压前日产油 $q/(t \cdot d^{-1})$	砂浓度 $c/(kg \cdot m^{-3})$	孔隙度 $\varphi/\%$	预测压后 产能 q'/t
B1	13.00	6.10	2.12	291	48.0	7.20	600	13.80	21.86
B2	10.00	2.15	1.62	479	0	7.02	0	11.76	20.66
B3	7.70	4.50	1.12	379	0	6.40	0	11.40	18.70
B4	16.70	3.60	0.94	394	0	6.05	0	10.53	18.32
B5	9.00	2.15	2.57	520	0	4.20	0	10.80	17.98
B6	2.30	6.77	1.05	221	0	1.60	0	13.00	12.34
B7	13.80	1.25	1.47	2 002	0	2.79	0	12.20	12.01
B8	7.80	2.31	1.80	294	48.4	6.08	516	10.00	11.12
B9	3.31	3.53	1.24	1 003	60.3	2.40	496	10.13	2.78
B10	5.21	2.02	0.94	47	33.9	3.74	720	11.60	0.16

2014年10月对井段4 333.5~4 416.0 m进行重复压裂。重复压裂采用投球分级加砂压裂工艺,挤入地层总液量1 774.0 m³,总加砂量为90 m³,最高砂浓度369 kg/m³,最高排量为5.5 m³/min,最高施工泵压为63.1 MPa。B1井重复改造前后的日产油曲线如图2所示。

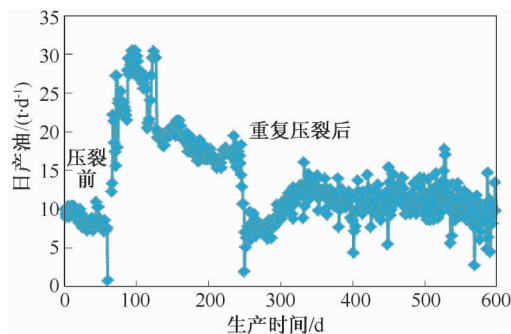


图2 B1井重复改造前后日产油曲线

Fig.2 Production curve before and after re-stimulation of B1 well

从图2可以看出,B1井重复改造前日产油7.2 t,重复压裂后日产油21.64 t,增产3.0倍,累计增油

3 505.23 t,有效期达到了260 d,比原来增加了80 d。从表6可以看出,采用灰色关联分析法和产能预测模型联合预测B1井重复压裂后日产油21.86 t,与实际压裂后的日产油绝对误差0.22 t,相对误差1.02%,在工程允许的误差范围内。现场应用表明,灰色关联法和产能预测模型联合进行重复改造选井和产能预测可行,考虑的主控因素可靠,能够较好的指导重复改造选井。

3 结论

(1)详细分析了研究区影响重复改造效果的主要因素,研究认为生产压差、渗透率、改造前累产、可采储量、生产时间、前期改造总砂量、有效厚度、压前日产油、砂浓度和孔隙度是影响低渗透砂岩储层重复改造效果的主要因素。

(2)采用灰色关联理论和多元回归法建立了适合低渗透砂岩储层的重复改造选井和产能预测方法。通过塔中志留系储层的现场应用表明,所建立的选井方法适用性强、所选井重复改造后增产效果

明显、稳产时间长,对该区的重复改造选井具有一定的指导意义;同时,也可推广应用于其他区块或地区的非常规储层的重复改造选井。

致谢:感谢中国石油塔里木油田分公司支持本文的发表。

参 考 文 献

- [1] 杨向同, 张亚红, 刘举, 等. 低浓度瓜尔胶压裂液在塔中志留系的研究与应用[J]. 石化技术, 2017, (5): 81-83.
YANG Xiangtong, ZHANG Yahong, LIU Ju *et al.* Study and application of low concentration guar gum fracturing fluid in Silurian [J]. Petrochemical Industry Technology, 2017, (5): 81-83.
- [2] 张烨, 杨胜来, 赵兵. 塔中油田顺9井区超深超低渗水平井分段压裂技术[J]. 特种油气藏, 2013, 20(4): 134-137.
ZHANG Ye, YANG Shenglai, ZHAO Bing. Staged fracturing for ultra-deep and ultra-low permeability horizontal wells in Shun 9 wellblock [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2013, 20(4): 134-137.
- [3] 孙鹏霄. 灰色关联方法的分析与应用[J]. 数学的实践与认识, 2014, 44(1): 97-101.
SUN Pengxiao. Analysis and application of gray correlation method [J]. Mathematics in Practice & Theory, 2014, 44(1): 97-101.
- [4] ROUSSEL N P, SHARMA M M. Selecting candidate wells for re-fracturing using production data [J]. SPE Production & Operations, 2013, 28(1): 36-45.
- [5] 顾岱鸿, 王少军, 慕立俊. 应用生产数据进行气井重复压裂选井的方法[J]. 天然气工业, 2006, 26(8): 102-103.
GU Daihong, WANG Shaojun, MU Lijun. Method of selecting refracturing wells by production data analysis [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(8): 102-103.
- [6] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990: 33-78.
DENG Julong. Grey system theory [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 1990: 33-78.
- [7] WU W Y, CHEN S P. A prediction method using the grey model GMC (1, n) combined with the grey relational analysis: a case study on Internet access population forecast [J]. Applied Mathematics & Computation, 2005, 169(1): 198-217.
- [8] YANG F, QIAN X, HUANG P. Fire Safety Assessment of underground buildings based on Grey Relational Analysis [J]. Procedia Engineering, 2012, 45(3): 89-95.
- [9] 吕志凯, 何顺利, 顾岱鸿, 等. 重复压裂选井选层的BP神经网络方法[J]. 油气井测试, 2013, 22(2): 4-6.
LYU Zhikai, HE Shunli, GU Daihong *et al.* Application of BP artificial nerve network to select well and layer for re-fracturing [J]. Well Testing, 2013, 22(2): 4-6.
- [10] SHELLEY R F. Artificial neural networks identify re-stimulation candidates in the Red Oak field [C]. SPE52190, 1999.
- [11] 李得立, 邓虎成, 雷涛, 等. 模糊识别在胡尖山长4+5油藏压裂选井选层中的应用[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(6): 116-120.
LI Deli, DENG Hucheng, LEI Tao *et al.* Application of fuzzy recognition in well and layer selection of reservoir Chang 4+5 fracturing in Hujianshan area [J]. Journal of Oil & Gas Technology, 2011, 33(6): 116-120.
- [12] 吴建发, 郭建春, 赵金洲, 等. 模糊识别分析方法优选压裂井层[J]. 天然气工业, 2005, 25(2): 84-86.
WU Jianfa, GUO Jianchun, ZHAO Jinzhou *et al.* Optimizing well and horizon for fracturing by fuzzy analysis method [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(2): 84-86.
- [13] 翁定为, 蒋廷学, 胥云, 等. 安塞油田重复压裂选井选层研究[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(4): 58-62.
WENG Dingwei, JIANG Tingxue, XU Yun *et al.* Study on well and layer selection for refracturing in Ansai oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(4): 58-62.
- [14] ZOVEIDAVIANPOOR M, SAMSURI A, SHADIZADEH S R. Fuzzy logic in candidate-well selection for hydraulic fracturing in oil and gas wells: a critical review [J]. International Journal of Physical Sciences, 2012, 7(26): 4049-4060.
- [15] SHAHAB M, SCOTT R, DAVID H. Development of an intelligent systems approach for re-stimulation candidate selection [J]. Gas Field, 2000: 497-507.
- [16] 房平亮, 冉启全, 刘立峰, 等. 致密储层低产井重复压裂方式及裂缝参数优化[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(24): 32-37.
FANG Pingliang, RAN Qiquan, LIU Lifeng *et al.* Re-fracturing mode and fracture parameter optimization for stripper well in tight oil reservoir [J]. Science Technology & Engineering, 2017, 17(24): 32-37.
- [17] 李琳琳, 刘述忍, 李拥军, 等. 基于试井数据的低流度储层增产措施选层方法[J]. 科学技术与工程, 2017, 27(9): 172-177.
LI Linlin, LIU Shuren, LI Yongjun *et al.* Stimulation layer candidate selection based on well-testing data for low mobility reservoir [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 27(9): 172-177.
- [18] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 51-60.
LIU Sifeng, DANG Yaoguo, FANG Zhigeng *et al.* Grey system theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 2004: 51-60.

编辑 刘述忍

第一作者简介:刘珏瑜,女,1985年出生,硕士,工程师,2012年获得西南石油大学矿物学、岩石学、矿床学硕士研究生学位,现从事油田储层改造与保护研究。电话:0996-2173394, 18299772570;Email:ljyu-tlm@petrochina.com.cn。地址:新疆库尔勒市塔指小区老办公楼塔里木油田油气工程研究院酸化压裂研究室,邮政编码:841000。