

基于 Pearson 相关系数的低渗透砂岩 油藏重复压裂井优选方法

刘子军

(中国石化胜利油田分公司 河口采油厂,山东 东营 257200)

摘要:胜利油田低渗透砂岩油藏油层跨度大、层间非均质性强、储层物性差。前期压裂井普遍存在低产、低效的问题,亟需开展重复压裂。为实现科学选井,建立了一种基于 Pearson 相关系数的重复压裂选井方法。该方法综合考虑了储层、压裂和生产动态资料,并通过计算候选井与虚拟目标井的 Pearson 相关系数来定量评价候选井的重复压裂增产改造潜力。针对胜利油区大王北油田某区块的一个井组,利用建立的选井方法筛选出最具重复压裂增产改造潜力的井。采用多重暂堵压裂工艺对该井实施了重复压裂改造,压裂后日产油量从 2.5 t/d 提高到 7.3 t/d,证实了该方法的有效性,且无需大量样本支持,不涉及复杂的计算,具有一定现场推广价值。

关键词:重复压裂;低渗透砂岩油藏;增产潜力;Pearson 相关系数

中图分类号:TE319

文献标识码:A

Method for selecting repeated fracturing wells in low-permeability sandstone reservoirs based on Pearson correlation coefficient

LIU Zijun

(Hekou Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257200, China)

Abstract: The low-permeability sandstone reservoirs in Shengli Oilfield have many oil layers, strong interlayer heterogeneity, and poor reservoir petrophysical properties. The previously fractured wells are generally subject to low production and low efficiency, and repeated fracturing is urgently needed. For scientific well selection, a method for selecting repeated fracturing wells based on the Pearson correlation coefficient was developed. The reservoir petrophysical properties, fracturing parameters, and production data were comprehensively considered in the method, and the Pearson correlation coefficients of the candidate well and the virtual target well were calculated to quantitatively evaluate the potential of the candidate well for repeated fracturing stimulation. Aiming at a well group in Shengli Dawangbei Oilfield, the proposed well selection method was used to screen out the well with the greatest potential for repeated fracturing stimulation. Repeated fracturing was implemented on the well with multiple temporary-plugging fracturing techniques. After the fracturing, the daily oil production increases from 2.5 t/d to 7.3 t/d, which confirms the effectiveness of the method. It does not require massive samples and complex calculations and can be applied to field practices.

Key words: repeated fracturing; low-permeability sandstone reservoirs; stimulation potential; Pearson correlation coefficient

低渗透砂岩油藏普遍具有非均质性强、层多、层薄,自然产能低的特征^[1],需要采用压裂对储层进行改造,进而提高单井产量和稳产有效期。但是,这些压裂井经过一段时间的生产后,会出现产量以

及采油速度逐渐降低的问题,严重影响开发效果。而对其进行重复压裂改造是治理这些低产低效井的有效手段^[2]。实施重复压裂改造前,需要对研究区候选井开展重复压裂增产改造潜力评估,优选出

收稿日期:2021-07-08。

作者简介:刘子军(1972—),男,山东德州人,高级工程师,硕士,从事采油工程技术研究与管理工作。E-mail:liuzijun.slyt@sinopec.com。
基金项目:山东省自然科学基金项目“多级强脉冲压裂条件下岩石破坏损伤与裂隙扩展耦合响应机制研究”(ZR2016EEQ04)。

潜力大的重复压裂井来提高压裂效果^[3]。但是,影响重复压裂效果的因素众多,主要包括前期压裂改造规模、采出程度、含水率等。同时,这些因素之间又存在相互作用的现象^[4-5]。因此,需要综合评价这些因素对重复压裂效果的影响。为此,众多学者在对重复压裂技术进行大量研究与实践的基础上,重点针对重复压裂井优选这一关键环节开展了大量的研究^[6-10]。目前,中外学者公认的较为成熟的重复压裂选井方法大致包括现场经验法、神经网络法^[6-7]、油藏数值模拟法^[8-9]、模糊综合评价法^[10-11]4大类。但是在实际的应用过程中,这几种方法或多或少都存在不同的问题。现场经验法主观性较强,容易导致评价结果出现偏差;神经网络法需要选取大量效果存在差异的重复压裂井作为学习训练样本,且涉及复杂的超参数调整,若目标区块前期重复压裂井较少,很难建立可靠的神经网络模型;油藏数值模拟法对储层地质建模的要求非常高,且涉及复杂的数学计算,导致时间成本较高,难以满足现场快速评估的需求;模糊综合评价法同样依赖于专家经验积累,具有一定的主观性^[12]。为此,笔者提出了一种基于Pearson相关系数的重复压裂井优选方法,并在胜利油区大王北油田进行生产实践,以期为低渗透砂岩油藏的重复压裂增产改造提供依据。

1 Pearson相关系数原理

相关系数是一种定量描述2组随机变量的统计学相关性的指标,通常用于表征2个 n 维随机向量的统计学相关性,即2个变量之间变化的趋势方向和程度^[13]。Pearson法则是一种经典的相关系数计算方法,主要用于表征线性相关性,假设2个变量服从正态分布且标准差不为0,其值介于-1与1之间^[14-15],Pearson相关系数的绝对值越接近于1,表明2个变量的相关程度越高,即这2个变量越相似。因此,相关系数能够实现数据优选的这一特性非常适合油气藏勘探开发对目标进行优先级别排序。但目前该方法在油气开发领域的研究与应用相对较少,基于Pearson相关系数对低渗透砂岩油藏重复压裂井进行优选是一次非常有益的尝试。

2 基于Pearson相关系数的重复压裂井优选

重复压裂效果受多重因素影响。从多个候选

井中优选具有重复压裂改造潜力的井,需要综合考虑各个因素的影响,包括储层物性、前期压裂规模和生产动态资料。因此,基于候选井的储层物性、前期压裂规模和生产动态资料,构建最具重复压裂改造潜力的虚拟目标井。然后计算候选井与虚拟目标井的Pearson相关系数。最后,基于计算得到的Pearson相关系数对候选井的重复压裂改造潜力进行定量评价和优选。

2.1 候选井需要采集的参数

重复压裂候选井需要收集前期压裂井的储层、压裂生产动态等参数。这些压裂井的数据既可以来自一个区块,也可以来自一个井组。储层参数主要包括:油层跨度、油层有效厚度、储层孔隙度、储层渗透率和井控储量等;压裂参数包括:施工排量、加砂强度和用液强度等;加砂强度指的是单位压裂段泵入的支撑剂量,用液强度指的是单位压裂段消耗的压裂液量。生产动态参数主要包括累积产油量和含水率。

2.2 虚拟目标井构建标准

通过对候选井采集的参数进行筛选,以此为基础来构建最具有重复压裂增产改造潜力的虚拟目标井。虚拟目标井应具有储层品质好、前期压裂规模小、采出程度低和含水率低等特点。储层品质好指的是储层物性好且原油饱和度高。因此,对于虚拟目标井来说,储层孔隙度、渗透率和井控储量越大越好,即虚拟目标井的储层孔隙度、渗透率和井控储量应选取所有候选井的最大值。前期压裂规模小指的是前期压裂施工排量小、加砂量少、油层跨度大。因为前期油层跨度大、施工排量少会导致储层改造不充分;加砂量少意味着加砂强度低,裂缝导流能力不高且容易失效^[16-17],重复压裂能够更好地恢复老裂缝的导流能力并产生新的裂缝。因此,对于虚拟目标井的油层跨度取所有候选井的最大值,其前期压裂施工排量、加砂强度和用液强度取所有候选井的最小值。虚拟目标井的采出程度低意味着储层还有大量剩余油未动用,因此虚拟目标井的累积产油量越低越好,即虚拟目标井的累积产油量取所有候选井的最小值。此外,为了降低重复压裂后沟通高含水层的风险,虚拟目标井的含水率同样要求越低越好,即虚拟目标井的含水率取所有候选井的最小值。

2.3 Pearson相关系数计算

为消除不同参数量纲的影响,采用Z-score标准化对候选井的原始数据进行处理,其表达式为:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_j}{\sigma_j} \quad (1)$$

经过处理后的数据均值为0,标准差为1,表达式为:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{ij} - \mu_j)^2} \quad (2)$$

在此基础上构建虚拟目标井,并计算 Pearson 相关系数,其计算式为:

$$r = \frac{\sum_{j=1}^{10} (X_{ij} - \bar{X}_i)(Y_{vj} - \bar{Y}_v)}{\sqrt{\sum_{j=1}^{10} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2} \sqrt{\sum_{j=1}^{10} (Y_{vj} - \bar{Y}_v)^2}} \quad (3)$$

其中:

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^{10} X_{ij}}{10} \quad (4)$$

$$\bar{Y}_v = \frac{\sum_{j=1}^{10} Y_{vj}}{10} \quad (5)$$

2.4 候选井重复压裂增产改造潜力评价和排序

基于计算得到的 Pearson 相关系数,按照从大到小的顺序对候选井进行排序。 r 的取值为 $[0, 1]$,不同数值代表候选井与虚拟目标井的相似程度。 r 值为0.8~1,代表相似程度极强; r 值为0.6~0.8,代表相似程度强; r 值为0.5~0.6,代表相似程度较强; r 值为0~0.5,代表相似程度弱。因此, r 值越接近1,表明候选井与虚拟目标井的相似程度越高,即重复压裂增产改造潜力越大,因此选择 Pearson 相关系数排序靠前的井实施重复压裂改造。该方法具有以下优点:①不依赖专家经验。②不涉及复杂的计算,操作简便,可以实现快速决策。③无需大量实际样本支持,候选井可以来自一个区块,也可以来自一个井组。

3 实例应用

胜利油区大王北油田某区块的储层岩性主要为细砂质粉砂岩和粉砂质长石砂岩,油层多且薄,孔隙度平均为0.1,渗透率平均为18.54 mD,属于典型的低渗透砂岩油藏。油层埋深一般为3 050~3 500 m,原始地层压力为33.7 MPa,饱和压力为16.36 MPa,地层压力系数约为1.0,属于正常压力系统。原始油层温度为110~120 ℃,地温梯度为3.1 ℃/hm,属于常温系统。该区块原油具有轻质油的特点。地面原油密度为0.841~0.883 g/cm³,平均为0.855 g/cm³,地面原油黏度为7.2~47.7 mPa·s,平均为21.1 mPa·s。地层原油密度为0.722 g/cm³,地层原油黏度为1.1 mPa·s,凝固点平均为33 ℃。研究区前期部署的直井/斜井大多数已实施了压裂改造,但是随着生产年限的增加,目前面临单井采油速度低、产量低的问题,亟需开展重复压裂。

选取该区块一个井组的6口直井开展重复压裂增产改造潜力评价和优选,并从中选取最优参数构建虚拟目标井。6口候选井及虚拟目标井的储层、压裂和生产动态数据见表1。在此基础上,通过寻找所有候选井各参数中最优指标构建了研究区的虚拟目标井数据。

利用(1)式对数据进行 Z-score 标准化处理,得到标准化后的候选井和虚拟目标井数据(表2)。

基于(3)式计算出候选井与虚拟目标井的 Pearson 相关系数。基于计算得到的相关系数,按照从大到小的顺序进行排序,6号井的 Pearson 相关系数为0.70,2号井为0.39,1号井为0.26,3号井为0.17,5号井为0.12,4号井为0.01。其中,6号井相关系数最大,表明6号井与虚拟目标井的相似程度最强,即6号井的重复压裂增产改造潜力最大。因此,优先

表1 大王北油田某区块6口候选井与虚拟目标井数据

Table1 Data of 6 candidate fractured wells and virtual target wells in a block of Dawangbei Oilfield

井号	油层跨度/m	油层有效厚度/m	储层孔隙度	储层渗透率/mD	井控储量/m ³	施工排量/(m ³ ·min ⁻¹)	用液强度/(m ³ ·m ⁻¹)	加砂强度/(m ³ ·m ⁻¹)	累积产油量/m ³	含水率
1	41	10	0.09	6	428 571	3	8.17	0.92	7 005	0.27
2	45	20	0.08	10	471 429	4	5.39	1.28	11 021	0.31
3	50	15	0.12	20	514 286	5	3.74	0.42	12 303	0.54
4	43	8	0.07	35	462 865	4.5	5.64	0.52	8 071	0.34
5	52	13	0.15	13	397 854	3.5	6.12	1.02	9 765	0.51
6	72	25	0.11	36.28	559 921	5.5	3.74	0.78	8 025	0.3
虚拟目标井	72	25	0.15	36.28	559 921	3	3.74	0.42	7 005	0.27

表2 大王北油田某区块标准化后的6口候选井与虚拟目标井数据

Table2 Data of 6 candidate fracturing wells and virtual target wells after standardization in a block of Dawangbei Oilfield

井号	油层 跨度	油层 有效 厚度	储层 孔隙 度	储层 渗透 率	井控 储量	施工 排量	用液 强度	加砂 强度	累积 产油 量	含水 率
1	-0.84	-0.81	-0.45	-1.09	-0.75	-1.34	1.63	0.30	-1.16	-0.93
2	-0.49	0.76	-0.79	-0.78	-0.02	-0.27	-0.05	1.43	0.82	-0.59
3	-0.04	-0.03	0.57	0.00	0.72	0.80	-1.04	-1.26	1.45	1.39
4	-0.66	-1.13	-1.13	1.16	-0.17	0.27	0.10	-0.95	-0.64	-0.33
5	0.13	-0.34	1.59	-0.55	-1.28	-0.80	0.39	0.61	0.20	1.13
6	1.90	1.54	0.23	1.26	1.50	1.34	-1.04	-0.14	-0.66	-0.67
虚拟 目标井	1.90	1.54	1.59	1.26	1.50	-1.34	-1.04	-1.26	-1.16	-0.93

选择6号井实施重复压裂改造。

6号井于2014年5月压裂投产,对16个油层(跨度为72 m)进行笼统压裂,施工排量为5.5 m³/min,加砂量为56 m³(40/70目陶粒40 m³+20/40目陶粒16 m³)。压裂后初期日产液量为16.8 t/d,日产油量为13.2 t/d,含水率为21.4%。但生产后期产量递减快,实施重复压裂前,日产油量为2.5 t/d,含水率为30%。这是因为,前期油层跨度太大且施工排量不高,储层未能充分改造。此外,加砂强度不高,随着地层压力的衰竭,支撑剂在地应力的作用下破碎变形,裂缝导流能力下降甚至失效。为此,拟定了多重暂堵重复压裂改造的思路,即采用暂堵材料调控储层纵向进液剖面,封堵优势进液通道,提高非优势通道进液量,充分改造储层;促使裂缝转向,增加裂缝复杂程度,从而实现剩余油资源的有效动用。采用一体化变黏压裂液,前期低黏液体造缝,后期高黏液体携砂,并全程伴注纤维辅助携砂。采用组合陶粒支撑剂提高抗破碎变形的能力,实现长期导流能力。其中,近井裂缝采用30/50目的高强度陶粒支撑,次级裂缝采用40/70目的高强度陶粒支撑。此外,重复压裂施工前注入二氧化碳,补充地层能量,降低压裂液滤失。

基于上述改造思路,对6号井实施重复压裂,压裂施工曲线如图1所示。施工排量为6 m³/min,最高砂液比为42%,加砂量为67.28 m³,施工总液量为853.21 m³。施工期间,开展了3次暂堵作业,包括2次缝内暂堵和1次层间暂堵。实施第1次缝内暂堵作业时,降低施工排量至2 m³/min,加入暂堵材料为150 kg,施工排量恢复至6 m³/min后,施工压力增加

4 MPa;实施第2次缝内暂堵作业时,降低施工排量至2 m³/min,加入暂堵材料为100 kg,施工排量恢复至6 m³/min后,施工压力增加4 MPa。2次缝内暂堵作业后,施工压力都出现了先上升然后持续降低的现象,表明暂堵材料在裂缝内形成了有效封堵,导致裂缝发生转向或是沟通了新的天然裂缝。2次缝内暂堵作业期间,还进行了1次层间暂堵作业,共加入暂堵材料为150 kg,暂堵后施工压力增至3 MPa,随后施工压力持续下降,说明开启了新的进液通道。重复压裂后6号井的日产油量提高至7.3 t/d,日产液量为26 t/d,含水率不断下降并稳定在72%(图2),说明重复压裂改造效果较好,也证实了基于Pearson相关系数的重复压裂选井方法的科学性和有效性。

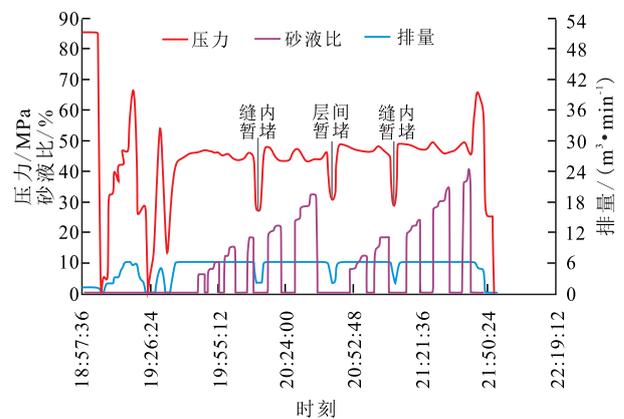


图1 压裂施工曲线

Fig.1 Curves of fracturing operation

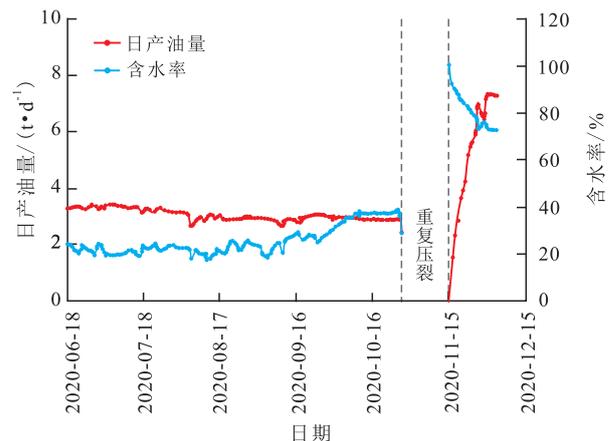


图2 6号井生产曲线

Fig.2 Production curves of Well 6

4 结论

基于Pearson相关系数的重复压裂选井方法综合考虑储层、压裂和生产动态资料,实现了候选井重复压裂增产改造潜力的定量评价。该方法不涉

及复杂的计算,且无需大量实际样本支持,具备现场推广应用价值。前期受认识和工艺水平等限制,大跨度多层笼统压裂效果不理想,储层纵向上改造不充分,裂缝易失效,压裂后初期产量高但递减快。对于这类前期实施了笼统压裂的井,重复压裂可以提高储层纵向上的改造程度,进一步释放产能。

科学的选井方法和针对性的重复压裂工艺是提高重复压裂效果的必要保证。对于纵向上非均质性强、层间差异较大的低渗透砂岩油藏,多重暂堵重复压裂技术可以提高各小层的动用程度,从而增加单井产量。

符号解释

- i ——候选井;
 j ——各项参数;
 N ——样本数量;
 r ——Pearson 相关系数;
 x_{ij} ——候选井各项参数,包括:油层跨度, m; 油层有效厚度, m; 储层孔隙度; 储层渗透率, mD; 井控储量, m³; 施工排量, m³/min; 加砂强度, m³/m; 用液强度, m³/m; 累积产油量, m³; 含水率;
 \bar{X}_i ——候选井各项参数标准化后的均值, 无量纲;
 X_{ij} ——候选井各项参数标准化后的数值, 无量纲;
 \bar{Y}_v ——虚拟目标井各项参数标准化后的均值, 无量纲;
 Y_{vj} ——虚拟目标井各项参数标准化后的数值, 无量纲;
 σ_j ——各项参数的标准差;
 μ_j ——各项参数的均值。

参考文献

- [1] 李阳,曹刚.胜利油田低渗透砂岩油藏开发技术[J].石油勘探与开发,2005,32(1):123-126.
 LI Yang, CAO Gang. Development technology for low-permeability sandstone reservoirs in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1): 123-126.
- [2] SHAN L, GUO B, WENG D, et al. Posteriori assessment of fracture propagation in refractured vertical oil wells by pressure transient analysis[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 168(5): 8-16.
- [3] ROUSSEL N P, SHARMA M M. Selecting candidate wells for refracturing using production data [J]. SPE Production & Operations, 2013, 28(1): 36-45.
- [4] 张海龙,王宪峰,逯艳华,等.新木油田重复压裂的选井选层方法[J].油气地质与采收率,2003,10(增刊):86-87.
 ZHANG Hailong, WANG Xianfeng, LU Yanhua, et al. Well and layer selection method for repeated fracturing in Xinmu Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10(Supplement): 86-87.
- [5] 张丁涌,赵金洲,赵磊,等.重复压裂造缝的应力场分析[J].油气地质与采收率,2004,11(4):58-59.
 ZHANG Dingyong, ZHAO Jinzhou, ZHAO Lei, et al. Analysis on stress field of refracturing fissure generation[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2004, 11(4): 58-59.
- [6] 霍雅迪,江厚顺.一种基于BP神经网络的气井重复压裂井优选方法[J].天然气地球科学,2020,31(4):552-558.
 HUO Yadi, JIANG Houshun. A preferred method for gas well refracturing well based on BP neural network [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(4): 552-558.
- [7] MOHAGHEGH S, MOHAMAD K, ANDREI P, et al. Performance drivers in restimulation of gas-storage wells [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2001, 4(6): 536-542.
- [8] PANKAJ P, GAKHAR K, LINDSAY G. When to refrac combination of reservoir geomechanics with fracture modeling and reservoir simulation holds the answer [C]. Perth: SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, 2016.
- [9] REN W, LI G, TIAN S, et al. Analytical modelling of hysteretic constitutive relations governing spontaneous imbibition of fracturing fluid in shale [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 34: 925-933.
- [10] 孙晓丰.重复压裂选井选层模糊综合评判方法[J].科技创新导报,2008,4(24):80-81.
 SUN Xiaofeng. A refracturing candidate selection method based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2008, 4(24): 80-81.
- [11] GUMUS T, TASKIN A, YAYLA, et al. A Combined Fuzzy-AHP and Fuzzy-GRA methodology for hydrogen energy storage method selection in Turkey [J]. Energies, 2013, 6(6): 3 017-3 032.
- [12] FENG Qihong, REN Jiawei, ZHANG Xianmin, et al. Study on well selection method for refracturing horizontal wells in tight reservoirs [J]. Energies, 2020, 13(16): 1-17.
- [13] 韩晟,韩坚舟,赵璇,等.距离权重改进的Pearson相关系数及应用[J].石油地球物理勘探,2019,54(6):1 363-1 370.
 HAN Sheng, HAN Jianzhou, ZHAO Xuan, et al. A Pearson correlation coefficient improved by spatial weight [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(6): 1 363-1 370.
- [14] WRIGHT S. Correlation and causation [J]. Journal of Agricultural Research, 1921, 20(7): 557-585.
- [15] STIGLER, STEPHEN M. Francis Galton's account of the invention of correlation [J]. Statistical Science, 1989, 4(2): 73-79.
- [16] 雷群,宋振云,吴增智.安塞油田重复压裂技术探讨[J].钻采工艺,1999,22(5):26-29.
 LEI Qun, SONG Zhenyun, WU Zengzhi. Discussion on multiple fracturing technology in Ansai Oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 1999, 22(5): 26-29.
- [17] SHAH M, SHAH S, SIRCAR A. A comprehensive overview on recent developments in refracturing technique for shale gas reservoirs [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 46(8): 350-364.