

致密储层水平井重复压裂技术优化

宋丽阳,王纪伟,李凤霞,刘长印,苏建政,张汝生
(中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:为改善致密低渗储层水平井重复压裂效果,提高压后生产经济效益,针对水平井重复压裂过程中选井选层方案、压裂工艺技术开展优化研究:应用多层次模糊综合评判法和人工神经网络法,计算研究各地质因素和工程因素对重复压裂改造效果的影响规律,确定压裂选井选层标准;研究压裂及生产过程中应力场变化及裂缝转向、延伸规律,优选压裂材料;以现场数据为依据,应用真三维压裂模拟软件优化三口目标井重复压裂施工参数。研究成果可为水平井重复压裂技术的科学、高效应用提供指导。

关键词:致密储层;重复压裂;水平井

中图分类号:TE357 文献标识码:A

Optimization of horizontal well refracturing technology in tight reservoirs

Song Liyang, Wang Jiwei, Li Fengxia, Liu Changyin, Su Jianzheng and Zhang Rusheng,

(Gas Reservoirs Production of Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the refracturing effects of the tight reservoirs and the economic benefits, we provided the optimization methods for the well and layer selection and fracturing design in the refracturing process of the tight wells: the multi-level fuzzy comprehensive evaluation method and artificial neural network method were applied to study the influence of the geological and engineering factors on the refracturing effect, so that the well and layer selection criteria of refracturing for the horizontal wells in tight reservoirs could be determined. The stress field variation and fracture extension rule were studied, and the fracturing material for tight reservoirs was provided. Based on the field production data, 3D fracturing simulation software was used to optimize the refracturing parameters of 3 target horizontal wells. The studying results can scientifically guide the application of refracturing technology in tight reservoir wells.

Key words: tight reservoir, refracturing, horizontal well

对于致密低渗储层,水平井分段压裂、体积压裂等增产改造技术措施已得到普遍应用。随着开发的进行,初次压裂裂缝逐渐闭合,裂缝导流能力不断降低,近井地带污染不断加剧,且初始裂缝控制区储量动用程度增大,剩余油不断减少,需通过重复压裂,延伸原有裂缝,并压开新裂缝,增大泄油区域,增加单井控制储量^[1-8]。

当前,水平井重复压裂技术已在国内外得到广泛应用,由于施工成本高、施工成功率等问题,水平井重复压裂技术的研究、改进与应用仍有待进一步探索。合理的选井选层、高效的措施工艺方案是提

升致密低渗储层水平井重复压裂效果的关键。在进行水平井重复压裂选井选层时,需综合考虑目标井的地质条件、初次压裂改造程度和生产状态,通过量化分析各因素对水平井重复压裂改造效果的影响规律,确定选井选层标准。初次压裂后,随着生产的进行,近井地带应力场发生改变,使重复压裂裂缝发生转向,在充分认识应力场变化规律基础上,根据致密地层特点,合理选用暂堵材料和压裂材料。对鄂南油田3口井进行重复压裂设计,应用真三维压裂模拟软件优化设计施工参数,指导现场压裂施工^[9-18]。

收稿日期:2017-07-13。

第一作者简介:宋丽阳(1991—),女,助理工程师,硕士,储层压裂改造。

1 水平井重复压裂选井方法

水平井重复压裂多选用初期改造不彻底、污染严重、固井质量好、储量高的潜力井,应根据前期测井和试井资料综合评价目标井的潜力,并合理选取改造层位,确保重复压裂效率。影响重复压裂效果的地质因素包括储层有效厚度、渗透率、孔隙度、含水饱和度、地层压力、应力差、泊松比、杨氏模量等,工程因素包括水平井段长度、压裂段数、射孔簇数、井距、可采储量、累产油量、目前日产量等。

应用多层次模糊综合评判法和人工神经网络法研究储层有效厚度、渗透率、孔隙度、含水饱和度、射孔簇数、累产油量、目前日产量对水平井重复压裂效果影响规律,根据两种方法的计算结果,结合现场生产实际,确定致密低渗储层水平井重复压裂选井选层标准。

多层次模糊综合评判方法基本过程是:在对各因素进行归类基础上,划分和建立层次结构,对最低层次元素进行模糊综合评判,以此为基础评价上一层次矩阵行向量,确定各层次权重集合,通过进行矩阵运算,得到各因素的综合评判值,以此为基础,结合生产实际,确定各因素最优范围。

针对评判对象建立因素集 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 和评价集 $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_m\}$, 进行单因素评判, 建立 X 到 $F(Y)$ 的模糊映射:

$$f(y_i) = \frac{r_{i1}}{y_1} + \frac{r_{i2}}{y_2} + \dots + \frac{r_{im}}{y_m} \quad (1)$$

诱导得出单因素评判矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

为各因素赋予权重值,建立权重集 $\omega=\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$, 综合评判系数集 $n=\{n_1, n_2, \dots, n_m\}$, 则有:

$$n_j = \prod_{i=1}^n w_i \Delta r_{ij} \quad (3)$$

将综合评判系数进行归一化处理,得到最终的评判结果。通过对7个目标因素进行分析,认为各因素对重复压裂效果影响程度为储层有效厚度>渗透率>累产油量>目前日产量>含水饱和度>孔隙度>射孔簇数。

人工神经网络法是基于神经网络形成的可用于

解决复杂非线性映射问题的先进计算方法,有很强的自适应性和灵活性。基本思路是:以前期录取的样品集为依据,根据输入值计算隐值,得到各节点输出值,进一步计算期望值与实际输出值误差,反复调节权值直至输出值达到要求,基本流程见图1。

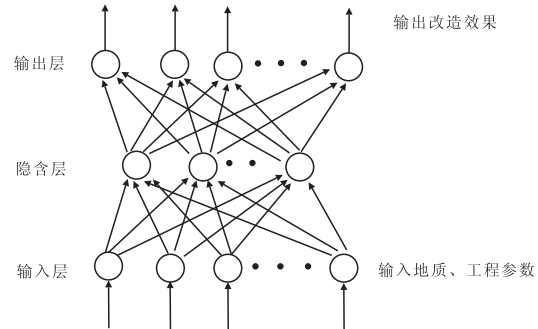


图1 人工神经网络算法

Fig. 1 Calculation of artificial neural network method

应用 Matlab 语言编程计算储层有效厚度、渗透率、孔隙度、含水饱和度、射孔簇数、累产油量,目前日产量对水平井重复压裂效果的影响规律,计算结果显示,各因素影响程度为渗透率>储层有效厚度>累产油量>目前日产量>孔隙度>含水饱和度>射孔簇数。

根据两种方法计算结果,认为渗透率、储层有效厚度、累产油量3个因素对水平井重复压裂效果影响较大,射孔簇数对重复压裂效果影响较小。基于渗透率、储层有效厚度、累产油量、目前日产量、孔隙度和含水饱和度6个影响参数,针对致密储层特点,制定致密地层水平井重复压裂选井选层方案,表1为基于6个参数的基本方案。

表1 水平井重复压裂选井选层方案
Table 1 Well and layer selection method of refracturing for horizontal wells

| 重复压裂建议 | 渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$ | 有效厚度/m | 累产油量/ m^3 | 目前日产量/ m^3 | 孔隙度, % | 含水饱和度, % |
|--------|-----------------------------|---------|--------------------|---------------------|--------|----------|
| 建议 | >0.8 | >30 | 6 900 ~ 13 500 | <50 | >10 | <45 |
| 可行 | 0.4 ~ 0.8 | 20 ~ 30 | 300 ~ 6 900 | 50 ~ 200 | 7 ~ 10 | 45 ~ 55 |
| 不建议 | <0.4 | <20 | <300 | >200 | <7 | >55 |

2 裂缝扩展规律及压裂材料优选

重复压裂改善储层渗流性能机理主要包括两个方面:延长原有裂缝,改善初次压裂裂缝渗透性能,

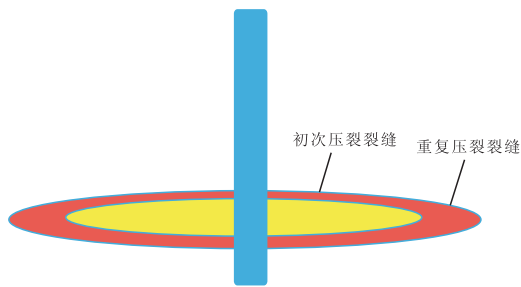


图2 重复压裂改善原有裂缝

Fig. 2 Refracturing improves primary fractures

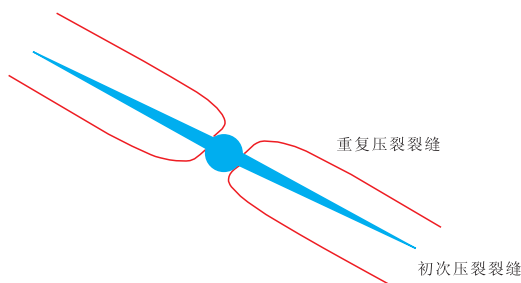


图3 重复压裂产生新裂缝

Fig. 3 New fractures formed after refracturing

如图2所示;利用应力场变化及暂堵技术实现裂缝转向,通过压开新裂缝实现剩余储量的动用,如图3所示。

对于致密储层,扩大裂缝网络、增大改造体积是压裂储层改造的主要目标,因此重复压裂既要增加原有裂缝长度和导流能力,又要通过产生新裂缝沟通新的储油区域,增大泄油面积。重复压裂过程中,应力场的变化在一定程度上促使裂缝转向。

随着开发进行,由于缝内净压力、缝间干扰和孔隙压力的变化和影响,储层应力场会发生变化,导致重复压裂裂缝发生转向。地质和生产条件的变化导致诱导应力的产生,诱导应力的变化特征与地层原始应力场特征相关。通常诱导应力在最小主应力方向增幅最大,在最大主应力方向增幅最小。应力平衡条件为:

$$\sigma_{i\max} - \sigma_{i\min} = \sigma_{y\max} - \sigma_{y\min} \quad (4)$$

式中: $\sigma_{i\max}$ 和 $\sigma_{i\min}$ 为原始最大、最小主应力,MPa; $\sigma_{y\max}$ 和 $\sigma_{y\min}$ 为最大、最小诱导应力,MPa。

当原始最大、最小主应力差小于最大、最小诱导应力差时,即:

$$\sigma_{i\max} - \sigma_{i\min} < \sigma_{y\max} - \sigma_{y\min} \quad (5)$$

地层中原有的应力状态将发生改变,在实施重复压裂时,新裂缝会出现转向,在近井筒地带,诱导

应力较大,裂缝转向程度高于远离井筒的地层区域。在远离井筒的区域,诱导应力的影响较小,重复压裂产生的新裂缝延伸方向与初次压裂裂缝基本一致。

在对致密储层水平井实施重复压裂时,除了依靠应力场变化实现自然转向,还可通过人为方法实现裂缝转向,如应用机械封堵和使用暂堵剂等。当前,暂堵转向技术已在致密油气储层改造中得到广泛应用,配合定向射孔技术,可有效提高重复压裂射孔效率,实现裂缝转向,产生大量新裂缝,提高致密储层改造体积,改善措施井所在储层的渗流性能。应用暂堵剂后岩心裂缝转向效果如图4所示。

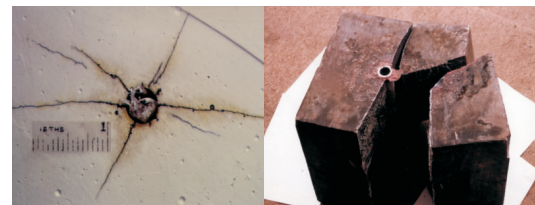


图4 岩心暂堵转向裂缝形态

Fig. 4 Variation of fracture shape in rock

应用暂堵转向剂封堵高渗带,分隔射孔区域,可有效将重复压裂的能量转移到新的射孔区域,压开初次压裂中未压开的区域,降低近井地带的压力损耗,有利于致密油气储层缝网系统的形成。

暂堵剂转向工艺技术多与低黏度压裂液(或滑溜水压裂液)及小粒径、微粒径支撑剂配套使用。在优选压裂材料时,应考虑油气藏地质特征,不同油气储层性质所对应的裂缝特征及适宜选用的压裂液、支撑剂类型如表2所示。

地层塑性和应力各向异性越大,主裂缝导流能力对产能的影响越大,选用交联液来保障支撑剂的铺置;地层脆性越强及地应力各向异性越小时,裂缝

表2 不同储层性质对应的裂缝特征及压裂材料
Table 2 Fracture feature and material of different reservoir properties

| 储层特征 | 裂缝形态 | 压裂液类型 | 支撑剂类型 |
|------|----------|-----------|------------------------|
| 塑性 | 单一裂缝 | 交联液、高黏压裂液 | 大粒径支撑剂 |
| 中等脆性 | 主峰+部分次生缝 | 混砂液 | 大粒径支撑剂(主缝)+小粒径支撑剂(次生缝) |
| 脆性 | 复杂缝网 | 滑溜水压裂液 | 小粒径、微粒径支撑剂 |

复杂程度成为主导产能的因素,需采用低黏压裂液将支撑剂运送到次生裂缝网络,应用交联液和高黏流体不利于产生复杂次生网络。

微粒径支撑剂技术已在美国 Woodford 油田中得到应用,主要应用于前置压裂阶段。微支撑剂粒径小于 100 目,可进入常规支撑剂无法进入的微缝中,支撑次生网络系统,提高体积压裂缝网的整体导流能力。同时可降低摩阻,提高缝内净压力,促使缝网系统进一步扩展。

致密油气储层脆性矿物含量较高,在压裂过程中容易形成复杂缝网,需要应用水平井体积压裂技术形成复杂缝网,最大程度地提高改造体积,改善近井地带的渗流特性。因此,在对致密地层水平井实施压裂改造及重复压裂改造时,建议应用滑溜水压裂液,与小粒径、微粒径支撑剂配合使用,在实施重复压裂时,应用转向剂技术实现压裂裂缝转向,可提高致密油气储层重复压裂改造效果。

3 水平井重复压裂施工设计

针对鄂南油田某区块进行重复压裂施工设计,应用真三维压裂模拟软件优化设计施工参数。该区块渗透率为 $0.47 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度为 8.3%,储层有效厚度为 25 m,含水饱和度为 45%。三口目标井的基本参数如表 3 所示。

三口目标水平井段长在 650~700 m,初次压裂压开 6~7 段,每段 2~3 簇,生产一段时间,三口井的日产油量低于 $3 \text{ m}^3/\text{d}$,评价其地质及工程参数,认为重复压裂技术可行。应用暂堵剂转向技术实现射孔、压裂裂缝转向,在初次压裂基础上,每段增加 2~3 簇。

表 3 三口目标井基本参数

Table 3 Basic parameters of 3 target wells

| 井号 | 渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ | 有效厚 度/m | 累产油 量/ m^3 | 目前日产油/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ | 孔隙度, % | 含水饱和 度, % |
|----|---------------------------------|------------|------------------------|--|-----------|--------------|
| W1 | 0.42 | 23 | 556 | 2.1 | 8.3 | 45 |
| W2 | 0.48 | 25 | 875 | 2.4 | 8.3 | 45 |
| W3 | 0.51 | 27 | 1 022 | 2.6 | 8.3 | 45 |

| 井号 | 压裂 段数 | 每段 簇数 | 水平段 长/m | 杨氏模量/ GPa | 泊松比 | 储隔层应 力差/MPa |
|----|----------|----------|------------|--------------|------|----------------|
| W1 | 7 | 2 | 700 | 2.5 | 0.21 | 3.5 |
| W2 | 6 | 3 | 670 | 2.5 | 0.21 | 3.5 |
| W3 | 6 | 2 | 650 | 2.5 | 0.21 | 3.5 |

表 4 三口目标井重复压裂施工参数

Table 4 Refracturing parameters of 3 target wells

| 井号 | 压裂段数 | 新增簇数 | 总液量/ m^3 | 砂比, % | 施工排量/ m^3 |
|----|------|------|-------------------|-------|--------------------|
| W1 | 7 | 3 | 1 092 | 45 | 6 |
| W2 | 6 | 2 | 624 | 50 | 5 |
| W3 | 6 | 3 | 936 | 55 | 5 |

采用滑溜水压裂液、小粒径支撑剂,砂比在 45%~50%。三口井重复压裂施工参数见表 4。

经过重复压裂改造,三口井的产能得到提升,日产油量增加。三口井重复压裂前 30 天和重复压裂后 50 天日产油量曲线如图 5 所示。

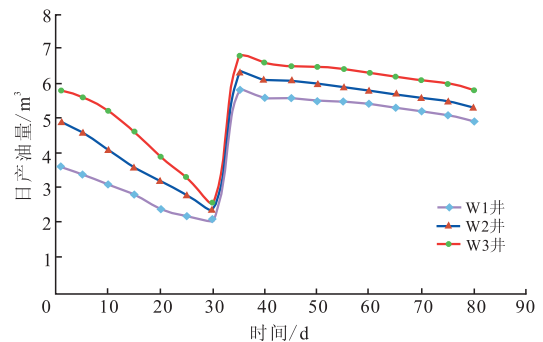


图 5 三口目标井重复压裂前后日产油量曲线

Fig. 5 Daily oil production curves of 3 target wells before and after refracturing

从图中可以看出,重复压裂后,三口目标井的日产油量明显增加。对比重复压裂前,产油量的下降幅度变缓,说明重复压裂不仅可以在短时间内提高目标井日产量,还可从本质上改善近井地带渗流环境,降低日产油量下降速率。三口井中,W3 井渗透率和有效厚度较大,累产油量较高,重复压裂后产量大幅度提升,进一步证实在进行重复压裂选井选层时,应优先考虑渗流性能较好,地质储量丰富,目前产量较低的油气井。

4 结论

1) 应用多层次模糊综合评判法和人工神经网络法,计算研究各地质因素和工程因素对重复压裂改造效果的影响规律,选取 7 个影响参数进行评价,认为渗透率、储层有效厚度、累产油量 3 个因素对水平井重复压裂效果影响较大。

2) 深入研究重复压裂过程中应力场变化及裂缝转向、延伸规律,并针对致密油气储层特性优选压

裂材料。对于致密油气储层,建议应用转向剂技术实现压裂裂缝转向,并将滑溜水压裂液与小粒径、微粒径支撑剂配套使用。

3) 应用真三维压裂模拟软件优化设计鄂南油田三口水平井的重复压裂施工参数,在原有压裂段部位增加2~3簇,采用滑溜水压裂液、小粒径支撑剂实施大规模重复压裂,对比重复压裂前日产油量,重复压裂后目标井的产能明显提升,日产油量下降幅度变缓。

参考文献

- [1] 韩忠英. 重复压裂力学机理研究及应用[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2012.
- [2] 唐潮,陈小凡,杜志敏,等. 缝洞型油藏单井缝洞单元压降试井解释模型研究[J]. 油气藏评价与开发,2017,7(2):31-35.
- [3] 张广清,陈勉,姚飞,等. 各向异性地层重复压裂最优时机及影响因素分析[J]. 石油学报,2008,29(6):885-888.
- [4] J D Matt. Case histories in cost-efficient re-fracturing of horizontal wells[C]// paper SPE-179166-MS presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 9-11 February 2016, The Woodlands, Texas, USA.
- [5] Chunlou Li, Jiahang Han, Randy Lafollette, et al. Lessons learned from refractured wells: Using data to develop an engineered approach to rejuvenation[C]// paper SPE-179148-MS presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 9-11 February 2016, The Woodlands, Texas, USA.
- [6] 姚飞,翁定为,李阳,等. 重复压裂前地应力场预测软件研究及现场应用[J]. 石油学报,2007,28(4):130-133.
- [7] E S McCartney, R L Kennedy. A family of unique diverting technologies increases tight production and recovery in multiple applications—initial fracturing, refracturing, and acidizing[C]// paper SPE-179115-MS presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 9-11 February 2016, The Woodlands, Texas, USA.
- [8] 苏建政. 水平井压裂选井选层技术探讨[J]. 断块油气田,2010,17(4):455-457.
- [9] 李士斌,官兵,张立刚,等. 裂缝诱导应力场影响因素敏感性评价[J]. 油气藏评价与开发,2017,7(2):23-30.
- [10] G J Lindsay, D J White, G A Miller. Understanding the applicability and economic viability of refracturing horizontal wells in tight plays[C]// paper SPE-179113-MS presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 9-11 February 2016, The Woodlands, Texas, USA.
- [11] Bill Grieser, James Calvin, James Dulin. Lessons learned: Refracts from 1980 to Present[C]// paper SPE-179152-MS presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 9-11 February 2016, The Woodlands, Texas, USA.
- [12] Wang H, Liao X, Lu N, et al. A study on development effect of horizontal well with SRV in tight oil reservoir[J]. Journal of the Energy Institute, 2014, 87(2): 114-120.
- [13] Yu W, Sepehrnoori K. Optimization of multiple hydraulically fractured horizontal wells in tight gas reservoirs[J]. Journal of Petroleum Engineering, 2013,(2).
- [14] Zhao Y L, Zhang L H, Luo J X, et al. Performance of fractured horizontal well with stimulated reservoir volume in tight gas reservoir[J]. Journal of Hydrology, 2014, 512(10): 447-456.
- [15] Yan X, Zhao H, Wang T, et al. Horizontal well staged fracturing new technology and its adaptability analysis of tight reservoir [J]. Reservoir Evaluation & Development, 2016.
- [16] 曾忠杰,郭建春,赵金洲,等. 重复压裂候选井多级模糊决策方法[J]. 大庆石油地质与开发,2006,25(3):73-75.
- [17] Strother D, Valadares R, Nakhwa A D, et al. Challenges of re-fracturing horizontal wells in tight and tight reservoirs[C]// paper SPE-167000-MS presented at the SPE Unconventional Resources Conference and Exhibition—Asia Pacific, 11-13 November 2013, Brisbane, Australia.
- [18] Ma X, Gildin E, Plaksina T. Efficient optimization framework for integrated placement of horizontal wells and hydraulic fracture stages in tight gas reservoirs[J]. Journal of tight Oil & Gas Resources, 2015, 9: 1-17.

(编辑 黄颖)