

西湖油气田低渗储层压裂效果主要影响因素分析

李舜水, 李三喜

[中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200030]

摘要 近年来水力压裂在西湖低渗储层的应用逐渐增多。开展海上低渗储层压裂效果的主要影响因素研究,对西湖压裂选井选层研究及压裂改造设计具有重要指导意义。通过灰色关联法和模糊曲线法两种数学方法分析了西湖低渗储层压裂效果的主要影响因素,结果表明试验区压裂效果主要影响因素为试井渗透率、表皮系数、地质储量、加砂强度、孔隙度和有效厚度。两种分析方法得到的各影响因素排序位置略有差异,但得出的各因素对压裂效果的影响程度总体趋势一致,因此本研究确定的压裂效果主要影响因素是合理的。

关键词 水力压裂;压裂效果;西湖油气田;灰色关联分析;模糊曲线分析;影响因素

中图分类号 TE357.1+4

文献标志码 A

文章编号: 2095-7297(2015)02-0080-04

Analysis of Main Factors Affecting Fracturing Effect in Low Permeability Reservoir of Xihu Oil and Gas Field

LI Shun-shui, LI San-xi

(CNOOC China Limited Shanghai, Shanghai 200030, China)

Abstract Hydraulic fracturing has found more and more applications in low permeability reservoir of Xihu oil and gas field in recent years. It is of great guiding significance to the selection of well and layer for fracturing and fracturing design to study the main factors affecting the fracturing result in low permeability reservoir in offshore oil field. We analyze such factors through gray correlation method and fuzzy curve method. The results show that the main factors affecting the fracturing result in the test areas are well testing permeability, skin factor, geological reserves, sanding strength, porosity, and effective thickness. The two analysis methods lead to slightly different ranking results of the affecting factors, but with the same overall trend. Therefore, the main factors affecting the fracturing effect can be identified in this way.

Key words hydraulic fracturing; fracturing effect; Xihu oil and gas field; gray correlation analysis; fuzzy curve analysis; affecting factors

0 引言

水力压裂在西湖油气田低渗储层的应用正逐渐增多。对陆上常规低渗透砂岩油气藏压裂效果影响因素的研究在各类文章中探讨较多^[1-4],而对于海上低渗储层压裂效果的影响因素研究却少有报道。因此,有必要结合西湖油气田低渗储层压裂改造情况,开展海上低渗储层压裂效果的主要影响因素研究,这对于西湖油气田压裂选井选层研究及压裂改造设计都将具有指导意义。

统计分析法和数学分析法是压裂效果影响因素评价的常见方法。统计分析法通过对大量压裂井资料的统计得出压裂井增产效果与影响因素之

间的关系。该方法依赖于分析数据的完整性,即每种因素需选择多口井进行分析统计。西湖区块的压裂尚处于试验阶段,施工井数较少,能统计到的生产资料有限,因此限制了统计方法在该区块的应用。另外,统计分析所得的结果是基于简单的数学分析得出,只能形成一种定性的认识,无法定量地准确反映压裂改造主次影响因素。数学分析法则可以定量地分析影响西湖油气田压裂效果的主要因素,用分析结果指导区块压裂改造。影响压裂改造效果的因素很多,每一种因素对改造效果的影响都不尽相同。为此,本文将采用灰色关联分析法和模糊曲线分析法进行压裂效果主要影响因素分析。

收稿日期: 2015-03-01

作者简介: 李舜水(1983—),男,主要从事钻完井方面的研究。

1 数学分析法原理

1.1 灰色关联分析法原理

灰色系统理论^[5]是控制论的观点和方法延伸到其他领域的产物,是自动控制学科和运筹学相结合的初步尝试。信息不完全是灰色系统的特征。灰色系统用灰数、灰色方程、灰色矩阵等来描述,其中灰数指信息不完全的数,它是灰色系统的基本单元。在实际应用中,灰数指一个区间或一个一般的数集。灰色关联分析是灰色系统理论的重要组成部分,它用关联度来度量两个系统或两个因素间关联性的情况。因为关联度不是唯一的,所以关联度本身大小并不是关键,而各关联度大小的排列顺序则更为重要。灰色关联度分析步骤如下。

(1) 原始数据预处理,即消除量纲、数值大小等因素对计算结果的影响。

(2) 确定母序列 X_0 与子序列 X_i 。

(3) 计算每个时刻母序列与各子序列差的绝对值 $\Delta_{0i}(t_j)$,即

$$\Delta_{0i}(t_j) = X_0(t_j) - X_i(t_j). \quad (1)$$

(4) 从结果列表中取差值绝对值的最大值与最小值,即 $\Delta_{\max}, \Delta_{\min}$ 。

(5) 求在各时刻母序列 X_0 与各子序列 X_i 的关联系数,计算公式为

$$L_{0i}(t_j) = \frac{\Delta_{\min} + \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(t_j) + \Delta_{\max}}, \quad (2)$$

式中: Δ_{\max} 为 $|X_i - X_0|$ 的最大值; Δ_{\min} 为 $|X_i - X_0|$ 的最小值; $\Delta_{0i}(t_j)$ 为 t_j 时刻的 $|X_i - X_0|$ 值。

(6) 求关联度,即计算关联系数的平均值:

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n L_{0i}(t_j). \quad (3)$$

(7) 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 $\langle X_a | X_0 \rangle > \langle X_b | X_0 \rangle$ (优于);

若 $\gamma_{0a} < \gamma_{0b}$, 则有表达式 $\langle X_a | X_0 \rangle < \langle X_b | X_0 \rangle$ (劣于);

若 $\gamma_{0a} = \gamma_{0b}$, 则有表达式 $\langle X_a | X_0 \rangle = \langle X_b | X_0 \rangle$ (等价于)。

1.2 模糊曲线分析法原理

模糊曲线分析法^[6]是由世界著名的实验室诺斯-阿拉姆斯实验室系统应用中心金融分析小组开发的一种非常有价值的统计方法。它主要用来压缩输入数据的维度、发现影响产出变量的重要因素。设系统具有 n 个可能输入 x_1, x_2, \dots, x_n 和一个输出 y , 其中 n 个输入分别代表影响压裂效果的各种因素, 输出 y 就代表压后产量。应用模糊曲线分析方法研究压裂主要影响因素可通过下列三个步骤完成。

(1) 对每个输入变量 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$, 在 x_i - y 空间描画 m 个数据点 $(x_{i,k}, y_k) (k=1, 2, \dots, m)$ 。其中, $x_{i,k}$ 是影响因素 x_i 的 m 个样本数据值。

(2) 对 x_i - y 空间中每个点 $(x_{i,k}, y)$, 画输入变量 x_i 的模糊隶属函数, 此函数由下式定义:

$$\mu_{i,k}(x_i) = \exp\left[-\left(\frac{x_{i,k} - x_i}{b}\right)^2\right] \quad (k=1, 2, \dots, m), \quad (4)$$

式中: b 视具体的系统而定, 在本文中取 $b=0.1$ $[\max(x_{i,k}) - \min(x_{i,k})] (1 \leq k \leq m)$ 。在每一个数据点 x_i 处画 $y_k \times \mu_{i,k}(x_i)$, 当 $\mu_{i,k}(x_i)=1$ 时, 正好是点 $(x_{i,k}, y_i)$ 。

(3) 解模糊隶属函数, 对每个输入变量 x_i 产生一个模糊曲线 C_i 。模糊隶属函数的求解可以用如下公式:

$$C_i(x_i) = \frac{\sum_{k=1}^m y_k \times \mu_{i,k}(x_i)}{\sum_{k=1}^m \mu_{i,k}(x_i)}. \quad (5)$$

图1是模糊曲线分析法三个步骤的示意图。

通过求取模糊曲线 C_i 的变化幅度就可判断输入参数对输出量的影响大小。变化幅度越大, 对输出量的影响就越大, 对应的输入参数就越重要。

2 西湖油气田压裂效果主要影响因素分析

2.1 灰色关联分析法确定压裂效果主要影响因素

2.1.1 原始数据的预处理

使用原始数据时, 由于各个原始数据的单位和量纲往往是不相同的, 而且各个数据的数值大小、变化范围也不相同, 因此, 直接用原始数据进行计算是不合适的。如果不对原始数据进行预处理, 在计算

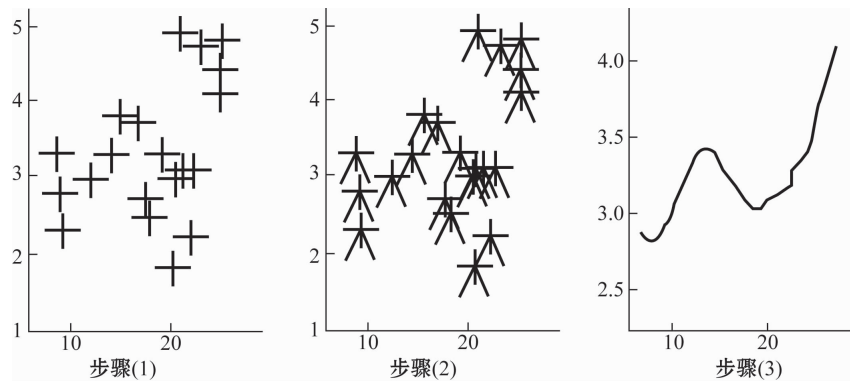


图1 模糊曲线分析法示意图

Fig.1 Illustration of the fuzzy curve analysis method

结果中就会突出那些数值大的变量的作用,而降低那些数值小的变量的作用。对定量数据进行标准化的目的就是要克服这些不合理的影响,使单位不同、量纲不同的各个变量,通过变换而成为某种规范尺度下的变量。对变量进行正规化,就是要求把各种变量变换为同一尺度下的规范化变量。

对于时间序列(或经济序列),其原始数据规范化处理的主要方法如下。

(1) 初值化变换。计算公式如下:

$$X'_{ij} = X_{ij} / X_{i1}. \quad (6)$$

(2) 均值化变换。计算公式如下:

$$X'_{ij} = X_{ij} / \sqrt{X_j}. \quad (7)$$

而对于空间序列(或指标序列),其原始数据规范化处理的主要方法如下。

(1) 极差变换。其计算公式为

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}}. \quad (8)$$

(2) 效果测度变换。对于越大越好的指标,采用上限测度,计算公式为

$$X'_{ij} = X_{ij} / X_{j\max}; \quad (9)$$

对于越小越好的指标,采用下限测度,计算公式为

$$X'_{ij} = X_{j\min} / X_{ij}. \quad (10)$$

本文采用极差变换进行数据处理,其基本特征是经过极差变换后数据的值在0与1之间,最大值为1,最小值为0,即变换到闭区间[0,1]内。

2.1.2 压裂效果主要影响因素分析结果

选取前述分析中的渗透率、孔隙度等12类影响因素作为初始影响因素,利用西湖油气田历年压裂改造井数据进行主要影响因素分析,分析结果如表1所示。

对压裂效果的影响因素进行关联排序,选出主要因素(关联度大于0.75的为主要影响因素),如表2所示。

表1 灰色关联法分析结果表

Table 1 Analysis results of the gray correlation method

| 序号 | 影响因素 | 关联度 | 序号 | 影响因素 | 关联度 |
|----|-------|-------|----|--------|-------|
| 1 | 渗透率 | 0.877 | 7 | 地层压力 | 0.746 |
| 2 | 孔隙度 | 0.791 | 8 | 储层级别 | 0.695 |
| 3 | 表皮系数 | 0.887 | 9 | 破裂压力梯度 | 0.676 |
| 4 | 地质储量 | 0.835 | 10 | 加砂强度 | 0.822 |
| 5 | 有效厚度 | 0.787 | 11 | 施工排量 | 0.739 |
| 6 | 含气饱和度 | 0.785 | 12 | 施工压力 | 0.712 |

表2 灰色关联分析法确定的试验区压裂效果主要影响因素及权重

Table 2 Main affecting factors and weights of fracturing effect determined by the gray correlation analysis method in field practice

| 影响因素 | 表皮系数 | 渗透率 | 地质储量 | 加砂强度 | 孔隙度 | 有效厚度 | 含气饱和度 |
|------|-------|-------------------------|-------------------|-----------------------|-------|-------|-------|
| 代号 | I-2 | I-3 | I-6 | I-7 | I-8 | I-9 | I-10 |
| 单位 | — | $10^{-3} \mu\text{m}^2$ | 10^8m^3 | m^3/m | % | m | % |
| 权重 | 0.887 | 0.877 | 0.835 | 0.822 | 0.791 | 0.787 | 0.785 |

2.2 模糊曲线法确定压裂效果主要影响因素

根据模糊曲线分析原理,利用西湖油气田4口压裂施工井基础数据,进行试验区压裂效果主要影

响因素分析,分析结果如表3所示。

根据模糊曲线法分析结果,选取 C_i 范围值大于100的因素作为主要影响因素。试验区压裂效果主要影响因素分别为:试井渗透率、表皮系数、地质储量、加砂强度、孔隙度、有效厚度、储层级别。

表3 模糊曲线法分析结果

Table 3 Analysis results of the fuzzy curve method

| 序号 | 影响因素 | C_i 范围值 | 序号 | 影响因素 | C_i 范围值 |
|----|-------|-----------|----|--------|-----------|
| 1 | 渗透率 | 168.79 | 7 | 地层压力 | 56.34 |
| 2 | 孔隙度 | 130.96 | 8 | 储层级别 | 114.40 |
| 3 | 表皮系数 | 164.52 | 9 | 破裂压力梯度 | 85.69 |
| 4 | 地质储量 | 141.36 | 10 | 加砂强度 | 133.47 |
| 5 | 有效厚度 | 122.60 | 11 | 施工排量 | 92.63 |
| 6 | 含气饱和度 | 94.25 | 12 | 施工压力 | 69.37 |

2.3 两种方法分析结果对比

灰色关联分析法和模糊曲线分析法对压裂效果主要影响因素分析的结果对比见表4。从表4可以看出,虽然各影响因素在不同方法中排序的个别位置略有差异,但各影响因素对压裂效果的影响程度趋势总体是一致的。因此,本研究所确定的压裂效果主要影响因素是合理的。

表4 不同方法分析结果对比

Table 4 Comparison between the results obtained by different analysis methods

| 模糊曲线分析法 | | 灰色关联分析法 | |
|---------|----|---------|----|
| 项 目 | 排序 | 项 目 | 排序 |
| 试井渗透率 | 1 | 表皮系数 | 1 |
| 表皮系数 | 2 | 试井渗透率 | 2 |
| 地质储量 | 3 | 地质储量 | 3 |
| 加砂强度 | 4 | 加砂强度 | 4 |
| 孔隙度 | 5 | 孔隙度 | 5 |
| 有效厚度 | 6 | 有效厚度 | 6 |
| 储层级别 | 7 | 含气饱和度 | 7 |

3 结 语

(1) 灰色关联分析法对压裂效果主要影响因素分析结果显示,影响压裂效果的因素依次是试井渗透率、表皮系数、地质储量、加砂强度、孔隙度、有效厚度、储层级别等;模糊曲线分析法对压裂效果主要影响因素分析结果显示,影响压裂效果的因素依次是表皮系数、试井渗透率、地质储量、加砂强度、孔隙度、有效厚度、含气饱和度等。

虽然两种分析方法得到的各影响因素排序位置略有差异,但各因素对压裂效果的影响程度趋势总体是一致的,因此本研究所确定的压裂效果主要影响因素是合理的。

(2) 由两种数学分析方法的分析结果可知,试井渗透率、表皮系数和地质储量是西湖油气田压裂效果的三大主要影响因素。因此在钻井以及压裂过程中需注意储层的保护,预防储层特别是近井地带由外来流体带来的伤害。同时,研究结果表明压裂改造是西湖油气田开发的必要措施,在压裂施工时可适当提高加砂强度,提高裂缝导流能力,进而改善压裂效果。

(3) 储层地质同样是影响压裂效果的关键,因此在西湖油气田后期压裂选井选层时要结合油气藏地质进行压裂井的优选,进而为良好的压裂效果提供保障。

参 考 文 献

- [1] 李文学,马新仿,王研. 水力压裂效果影响因素的多元线性回归分析[J]. 科学技术与工程,2011,29(11):7245.
- [2] 贾海正,李佳奇,张勇辉. 莫北油气田水力压裂及影响因素分析[J]. 内蒙古石油化工,2011(14):152.
- [3] 唐汝众,温庆志,苏建,等. 水平井分段压裂产能影响因素研究[J]. 石油钻探技术,2010,38(2):80.
- [4] 劳斌斌,刘月田,屈亚光,等. 水力压裂影响因素的分析与优化[J]. 断块油气田,2010,17(2):225.
- [5] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武昌:华中理工大学出版社,1990:53-63.
- [6] 杨纶标,高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州:华南理工大学出版社,2001:75-81.