

文章编号:0253-9985(2008)06-0797-04

应用偏相关+灰关联方法进行致密砂岩 气藏压裂地质选层

谢润成¹, 周文², 高雅琴³, 郭新江⁴, 葛善良¹, 张凌子¹

(1. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610059;

2. 成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川 成都 610059;

3. 中国石油化工股份有限公司 西南分公司 石油勘探开发研究院, 四川 成都 610081;

4. 中国石油化工股份有限公司 西南分公司 工程技术研究院, 四川 德阳 618000)

摘要:压裂选层需要考虑的因素多而复杂,并且具有高度非线性特征,选层时除了利用经验类比外,还需要运用非线性数学理论才可能满足现场需要。通过对现有各种方法的对比分析,建立了偏相关+灰关联压裂地质选层方法。依靠提取待压层段有效厚度、孔隙度、地应力差及顶底隔层平均厚度等14项特征参数进行的优选压裂层段的偏相关+灰色关联度计算,其结果与现场压裂测试结果对比表明,该方法计算简单快速,结果可靠,并对于同类型气藏的压裂评井选层具有一定的借鉴意义。

关键词:灰关联;偏相关;压裂;选层;致密储层

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Application of partial and grey correlation methods to layer selection for fracturing in tight sand gas reservoirs

Xie Runcheng¹, Zhou Wen², Gao Yanqin³, Guo Xinjiang⁴, Ge Shanliang¹, Zhang Linzi¹

(1. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

3. Southwest Branch of SINOPEC Petroleum Exploration and Development Research Institute, Chengdu, Sichuan 610081, China;

4. Research Institute of SINOPEC Southwest Company, Deyang, Sichuan 618000, China)

Abstract: Layer selection for fracturing requires thorough consideration of many factors, which represent clear nonlinear characteristics. In addition to empirical analogy methods, nonlinear mathematical theories are also needed to meet the requirements of fracturing operation. A geological optimization method consisting of partial and grey correlation for selecting layers for fracturing operation has been established after an analysis of all available layer selection methods. Fourteen parameters (such as net thickness, porosity and stress difference of layers to be fractured, and the average thickness of top and bottom barriers) are involved in the application of the method. The calculation result shows a good coincidence with that of in-site fracturing test. The method features in easy and fast calculation and yielding reliable results, and therefore can be used as reference in well evaluation and layer selection for fracturing in the same types of gas reservoirs.

Key words: grey correlation; partial correlation; fracturing; layer selection; tight reservoir

致密砂岩气藏的勘探开发离不开水力压裂, 裂选层。众所周知,压裂选层需要考虑的因素多而水力压裂能否取得好的增产效果的关键则是压 而复杂,传统的经验类比法、试井资料法、统计法

收稿日期:2008-10-08。

第一作者简介:谢润成(1979—),男,讲师,油气田开发工程。

基金项目:中石化“川西特低渗透深层砂岩气藏压裂技术研究与应用”(P02034-T01)。

等传统压裂选层方法已远远不能满足现场要求,而运用更多的是非线性数学方法,如神经网络法、模糊综合评判法及灰关联等^[1-3]。由于模糊数学着重内涵明确而外延不清楚的问题研究^[4],而对于一个确定的待压井(层)来说,其外延是明确的,但影响压裂效果的各种地质因素不完全明了,而且各地质因素如何影响压裂效果及各地质因素之间的相互影响关系也不完全清楚,因此,压裂选层是一个灰色系统,经典灰关联度分析可以用来确定各因素对压裂效果的影响程度^[5],而且灰色关联度分析对样本量没有太高的要求,也无需作典型分布规律研究,所以应用起来较方便。

但是,经典灰色关联度在计算灰色关联度时通常采用的是等权计算^[5,6],而不同地质参数对压裂增产效果的影响程度不同,应具有不同的权值。目前,常用的权重确定方法主要有经验类比法、频数统计分析法、主成分分析法、回归法及层次分析法等。层次分析法虽然是一种将定性分析和定量分析相结合的多准则思维的方法,其在目标结构复杂且缺乏必要的情况数据下尤为实用,但层次分析法中的标度确定带有一定的主观性。本文通过对现有各种方法的对比分析,建立了偏相关+灰关联压裂地质选层方法,既克服了经验类比的盲目性,又较好地解决了压裂评井选层中的主观性。

1 基本原理

灰关联分析的实质是对时间序列数据进行几何关系的比较,计算系统之间或因素间关联性的量度,即关联度。若两个序列在各个时刻相对变化基本一致,则认为两者关联度大;反之,两者关联度就小。关联度分析一般包括以下计算与步骤:确定母序列和子序列,原始数据变换,计算关联系数,求关联度,排关联序,列出关联矩阵^[7]。

1.1 确定母序列和子序列

在对所研究问题定性分析的基础上,确定一个因变量因素和多个自变量因素(1)式和(2)式。

$$r_o = (r_1, r_2, \dots, r_n) \quad (1)$$

$$r_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}) \quad (2)$$

式中:

r_o ——母序列;

r_n ——母序列中的变量;

r_i ——第*i*个子序列;

r_{in} ——第*i*个子序列中的变量。

由于所提取的地质参数的数据量纲不同,数值大小相差过分悬殊,而且又不是时间序列,因此初值化、均值化均不合适,而且在分类计算时,只需从数量上分析,必须消除物理量单位的干扰,因此,要利用效用函数的处理方法对描述事物的特征值标准化。本文使用的处理方法为:

(1) 值越大越有利的储层参数采用下式进行标准化:

$$x_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

(2) 值越小越有利的储层参数采用下式进行标准化:

$$x_i = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

式中:

x_i ——母序列或子序列中任一变量;

$x_{\min}, x_{\max}$ ——与其对应变量的最小值与最大值。

这样严格定量化的参数计算出的结果值都是越大越有利,并且原始数据都转化在0~1之间变化,且消除了在关联度计算中量纲和舍入误差的影响。

1.2 计算关联系数

若记经数据变换的母序列为 $\{x_o(t)\}$,子序列为 $\{x_i(t)\}$,则在时刻 $t=j$ 时, $\{x_o(t)\}$ 与 $\{x_i(t)\}$ 的关联系数 $\xi_{oi}(k)$ 为:

$$\xi_{oi} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(j) + \rho \Delta_{\max}} \quad (5)$$

式中:

$\Delta_{oi}(k)$ ——*k*时刻两个序列的绝对差,即:

$$\Delta_{oi}(j) = |x_o(j) - x_i(j)| \quad (6)$$

$\Delta_{\max}, \Delta_{\min}$ 分别为各个时刻的绝对差中的最大值与最小值,因为进行比较的序列在经数据变换后互相相交,所以一般而言 $\Delta_{\min} = 0$;

ρ 为分辨系数,其作用在于提高关联系数之间的差异显著性, $\rho \in (0, 1)$,一般情况取0.1~0.5,通常取0.5。

1.3 权重确定

从关联系数的计算得到的是子序列 i 与母序列 o 在各点的关联系数值,结果较多,信息过于分散,不便于比较,为此有必要将每个子序列各个时刻(或指标、空间)的关联系数集中为一个值,这个数值就是灰色关联度。经典灰色关联度是以两个比较序列各个时刻的关联系数的平均值来计算(反映全过程的关联程度),即:

$$r_{oi} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \xi_{oi}(j) \quad (7)$$

由于压裂选层考虑的各地质因素对压裂增产效果的影响程度不同,故其应该赋予不同的权值。本文采用偏相关分析方法确定各地质参数的权重。

偏相关系数定义的即是控制一个或几个另外的参数的影响条件下求取两个参数间的相关性^[8]。设 X_3 是控制变量,则 X_1 和 X_2 的偏相关系数为:

$$r_{X_1X_2, X_3} = \frac{r_{X_1X_2} - r_{X_1X_3}r_{X_2X_3}}{\sqrt{(1-r_{X_1X_3}^2)(1-r_{X_2X_3}^2)}} \quad (8)$$

若 X_3, X_4 是控制变量,则 X_1 和 X_2 的偏相关系数为:

$$r_{X_1X_2, X_3X_4} = \frac{r_{X_1X_2, X_3} - r_{X_1X_4, X_3}r_{X_2X_4, X_3}}{\sqrt{(1-r_{X_1X_4, X_3}^2)(1-r_{X_2X_4, X_3}^2)}} \quad (9)$$

其余偏相关系数以此类推。

在进行偏相关系数的统计意义检验时,检验假设为两个变量间的相关系数为 0;备选假设为两个变量间的相关系数不为 0。用 t 检验给出假设成立的概率为:

$$t = \frac{\sqrt{n-k-2}}{\sqrt{1-r^2}} r \quad (10)$$

式中: r 是计算的偏相关系数, n 是样本观测数, $n-k-2$ 是自由度, k 是控制变量数目。取显著性水平为 0.05, 当 $t > t_{0.05(n-k-2)}$ 时拒绝原假设, 否则接受原假设认为两变量间的偏相关系数为 0, 两变量不相关^[8]。

1.4 求关联度

在计算关联度时,采用偏相关计算结果 $R(j)$ ($j=1, 2, \dots, n$),按下式进行计算:

$$r_{oi} = \sum_{j=1}^n \xi(j) R(j) \quad (11)$$

其中, $\sum_{j=1}^n R(j) = 1, R(j) \geq 0$ 。

1.5 排关联序

在关联度分析中,各因素关联度数值大小的实际意义不大,而关键是将多个子序列对同一母序列的关联度按大小顺序排列起来组成关联序,它直接反映了各个子序列对于同一母序列的“优劣”或“主次”关系。

2 实例分析

本文以川西某气田致密砂岩气藏 10 口井作为例子来阐述偏相关+灰关联压裂地质选层方法的应用。由于地质因素是决定压裂效果的本质因素^[9,10],根据压裂地质选层思路 and 原则,选取可以代表地层岩性、孔隙度、含流体情况等 14 项参数,各井提取的特征参数如表 1 所示。

表 1 10 口气井待压层段的地质特征参数

Table 1 Geologic parameters of candidate layers for fracturing in 10 gas wells

井号	有效厚度/ m	声波时差/ ($\mu\text{s} \cdot \text{ft}^{-1}$)	补偿密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	自然伽马/ API	深侧向电阻率/ ($\Omega \cdot \text{m}$)	浅侧向电阻率/ ($\Omega \cdot \text{m}$)	补偿中子/ %	泥质含量/ %	孔隙度/ %	渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	含水饱和度/ %	地层压力/ MPa	应力差/ MPa	顶底隔层平均厚度/ m
J1	6.0	85	2.35	75	11.5	10.5	13.5	15	10.5	8.1	67.5	5.73	1.82	2.57
J2	6.0	92	2.43	82	13	13	14	15	11.5	8.4	50	9.80	2.81	2.66
J3	5.0	88	2.41	124	12.5	11	14	21	10	7.5	77	4.84	2.54	3.12
J4	5.0	94	2.40	72.5	8.5	7	15	15	14	9	65	7.12	3.93	3.96
J5	6.3	88	2.35	68.5	22.7	17	11.5	14	13	8.5	60	13.96	3.46	2.33
J6	19.0	82.5	2.39	68	20	18	12	10	14	4	45	7.26	5.42	4.69
J7	8.0	105	2.38	66	33	24	15	8	14	8	45	9.39	5.38	4.35
J8	11.7	84	2.36	82	33	30	13	10	14	7.5	24	13.68	4.82	3.57
J9	15.7	83	2.36	67	20	18	9	10	12	7	43	15.93	4.19	4.89
J10	13.5	140	2.32	59	21.5	19.5	15	12.5	15	6	30	14.83	5.76	5.48

表2 各地质参数权重计算结果

Table 2 Calculated weights of each geologic parameter

参数	有效厚度	声波时差	补偿密度	自然伽马	深侧向电阻率	浅侧向电阻率	补偿中子	泥质含量	孔隙度	渗透率	含水饱和度	地层压力	应力差	顶底隔层平均厚度
权值	0.136	0.113	0.006	0.046	0.117	0.003	0.026	0.071	0.141	0.118	0.032	0.122	0.041	0.028

表3 灰关联度计算结果与压裂产能对比结果

Table 3 Comparison of the gray correlation calculation results and actual productivity after fracturing

井号	偏相关加权关联度	偏相关加权灰关联序	灰色综合关联度	产能/(10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)			增产比, %
				压前	压后	增加	
J1	0.389 9	9	0.368 4	0.110 0	0.095 3	-0.014 7	0.87
J2	0.420 4	8	0.401 2	0.219 6	1.161 9	0.942 3	5.29
J3	0.365 6	10	0.389 4	0.011 0	1.154 4	1.143 4	104.95
J4	0.459 2	7	0.427 6	0.054 4	1.182 0	1.127 6	21.73
J5	0.494 4	6	0.485 6	0.082 0	2.002 6	1.920 6	24.42
J6	0.675 3	2	0.694 1	1.042 2	24.574 7	23.532 5	23.58
J7	0.631 2	4	0.654 6	0.230 1	18.333 7	18.103 6	79.68
J8	0.634 4	3	0.621 9	0.381 3	12.092 0	11.710 7	31.71
J9	0.593 2	5	0.581 7	0.426 5	11.731 5	11.305 0	27.51
J10	0.774 6	1	0.793 3	1.363 8	47.899 4	46.535 6	35.12

2.1 参数标准化处理

根据(3),(4)两式对各参数进行标准化处理,其中值越大越有利的参数为:压裂层段有效厚度、声波时差、深侧向电阻率、浅侧向电阻率、补偿中子、孔隙度、压裂时的地层压力、压裂层段与上下隔层间的地应力差、顶底隔层平均厚度;数据越小越有利的参数为:补偿密度、自然伽马、泥质含量、测井渗透率、含水饱和度。

2.2 差序列及关联系数计算

由于各参数已标准化,参考数列即为最优数列,即取为 $r_0(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)$ 。根据(5),(6)两式并取 $\rho=0.5$,分别计算出差序列 $\Delta(j)$ 和关联系数。

2.3 权重计算

根据偏相关分析原理,借助 SPSS 数理统计软件分别计算各地质参数权重(表2)。得到 $R(j)=[R_1, R_2, \dots, R_{14}]^T=[0.136, 0.113, 0.006, 0.046, 0.117, 0.003, 0.026, 0.071, 0.141, 0.118, 0.032, 0.122, 0.041, 0.028]^T$ 。

2.4 计算灰色关联度

由(11)式计算出灰色关联度,并引入灰色综合关联度^[11],最后与井的压前/压后测试产能进行

对比(表3)。从表3看出,偏相关+灰色关联度分析结果与灰色综合关联度分析结果有较好的一致性,并且与待压裂井层压后的增产情况也较相吻合,说明本文建立的压裂地质选层方法计算结果具有一定的可靠性。

3 结论与建议

1) 由于灰色关联度分析法不受数据的限制,并可综合考虑多项影响因素,确定出各因素的主次关系,较以往采用传统的单一因素或经验类比进行评优选层更为科学合理。

2) 靠经验确定各影响因素权重的方法具有一定的盲目性和主观性,本文使用的偏相关分析法科学可靠,评价结果相对更为客观实际。

3) 本文建立的偏相关+灰色关联度分析方法可用于优选压裂井层、压裂方案等,具有一定的推广应用价值。

4) 由于压裂选层涉及的因素很多,本文仅从地质选层的角度建立了偏相关+灰关联分析方法,因此,在进行压裂选层综合研究时,还应考虑井身结构、完井质量、压裂施工设备等因素。

参 考 文 献

- 1 潘金明,耿福兰,张志勇.利用试井曲线进行油气井压裂选层及压裂效果评价[J].油气井测试,2002,11(5):33~35

(下转第805页)

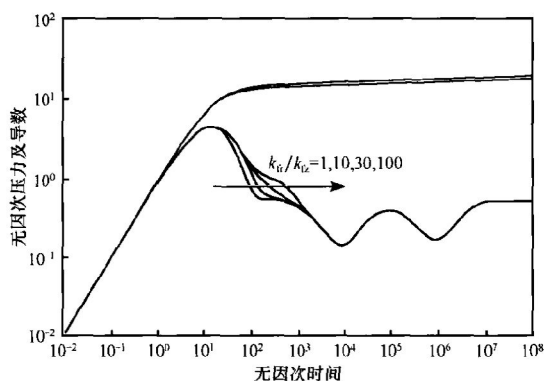


图4 各向异性对样板曲线的影响

Fig. 4 Effects of anisotropy

4 结论

1) 在考虑井筒储集和表皮效应的情况下,建立了三重介质油藏部分射开井的试井模型,求得了不同顶、底边界组合条件下的 Laplace 空间解析解;利用 Stehfest 数值反演求得实空间的解,绘制出新型的样板曲线,并划分了流动阶段。

2) 当顶、底边界均为封闭边界时,压力导数曲线最终表现为值为 0.5 的水平线;而当顶、底边界存在定压边界时,压力导数曲线后期则表现出不同程度的下掉,而且顶、底边界均为定压边界比顶、底边界为混合边界下掉要快一些。

3) 通过对部分射开 ($L_D < 100\%$) 与完全射开 ($L_D = 100\%$) 样板曲线的比较,发现若用完全射开模型对部分射开井进行试井解释,将会解释出一个较大的表皮,产生一种井底污染严重的假象而得出不准确的判断。

4) 打开程度对样板曲线影响的分析结果表明,对打开程度较大的部分射开井,若选用完全射

开模型进行试井解释,误差较小;但对打开程度较小的部分射开井,若选用完全射开模型进行试井解释,误差较大。

参考文献

- 1 陈清华,刘池阳,王书香,等.碳酸盐岩缝洞系统研究现状与展望[J].石油与天然气地质,2002,23(2):196~202
- 2 阎相宾.塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征[J].石油与天然气地质,2002,23(3):262~265
- 3 肖玉茹,何峰煜,孙义梅.古洞穴型碳酸盐岩储层特征研究[J].石油与天然气地质,2003,24(1):75~80
- 4 Abbaszadeh M, Hegeman P. Pressure-transient analysis for a slanted well in a reservoir with vertical pressure support[J]. SPE 20793, 1990
- 5 Ozkan E, Raghavan R. New solutions for well-test analysis problems; Part 1, analytical considerations[J]. SPE 18615, 1991, 6(3):359~368
- 6 Kucuk F J, Kirwan P A. New skin and wellbore storage type curve for partially wells[J]. SPE 11676, 1987, 2(4):546~554
- 7 Yildiz T, Bassiouni Z. Transient pressure analysis in partially penetrating wells[J]. SPE 21551, 1990
- 8 Bui T D, Mamora D D, Lee W J. Transient pressure analysis for partially penetrating wells in naturally fractured reservoirs[J]. SPE 60289, 2000
- 9 廖新维,沈平平.现代试井分析[M].北京:石油工业出版社,2002.125~130
- 10 王建平,王晓东,马世东.各向异性部分射开直井不稳定渗流理论研究[J].大庆石油地质与开发,2007,26(3):65~71
- 11 Stehfest H. Algorithm 368 numerical inversion of Laplace transform[J]. Communication of the ACM, 1970, 13(1):47~49
- 12 吴小庆.数学物理方程[M].四川成都:电子科技大学出版社,2004.168~178
- 13 Camacho V R, Vasquez C M, Castrejon A R, et al. Pressure transient and decline curve behaviors in naturally fractured vuggy carbonate reservoirs[J]. SPE 77689, 2002

(编辑 李 军)

(上接第 800 页)

- 2 吴建发,郭建春,赵金洲.模糊分析方法优选压裂井层[J].天然气工业,2005,25(2):84~86
- 3 郭建春,吴建发,赵金洲,等.用灰色关联分析法优选压裂井[J].钻采工艺,2005,28(2):25~27
- 4 冉启全,周南翔.双河油田油层组油层的灰色关联评价[J].西南石油学院学报,1993,15(4):25~31
- 5 邓聚龙.灰理论基础[M].湖北:华中科技大学出版社,2002.122~150
- 6 阳小平,程林松,孙福街,等.灰色关联分析法在油气藏措施优选中的应用[J].新疆石油地质,2003,24(4):335~337
- 7 易德生,郭萍.法灰色理论与方法—提要·题解·程序·应用

[M].北京:石油工业出版社,1992.25~57

- 8 黄润龙.数据统计与分析技术—SPSS 软件实用教程[M].北京:高等教育出版社,2004.168~170
- 9 谢润成,周文,李良.鄂尔多斯盆地大牛地上古生界气藏压裂效果分析[J].天然气工业,2004,24(12):71~73
- 10 郝蜀民,惠宽洋,李良.鄂尔多斯盆地大牛地大型低渗气田成藏特征及其勘探开发技术[J].石油与天然气地质,2006,27(6):762~768
- 11 刘思峰,郭天榜,编著.灰色系统理论及其应用[M].河南:河南大学出版社,1991.81~83

(编辑 董 立)