

文章编号: 0253- 9985(2004) 01- 0111- 04

用灰色模型预测水力压裂缝导流能力

杨 宇¹, 孙致学¹, 郭春华²

(1. 成都理工大学能源学院, 四川成都 610059; 2. 四川理工学院, 四川自贡 643033)

摘要: 压裂后裂缝的导流能力直接关系着压裂缝的渗流能力, 是客观评价压裂效果的重要指标之一。在分析用不稳定试井计算人工压裂井的裂缝导流能力的前提和方法后, 结合四川盆地川西地区新场气田的应用实例, 提出用偏相关分析方法, 优选影响导流能力水力压裂的层厚、声波时差、泥质含量、加砂量、施工排量、前置液量等 6 项地层参数和施工参数, 并在此基础上, 引入 GM(1, h) 模型进行压裂缝导流能力的预测, 提高了预测精度。用此方法也可进行裂缝半长和增产倍数的预测。但由于增产倍数受到表皮系数等无法预先估算因素的影响, 预测精度较差, 相对而言, 用裂缝导流能力作为评价压裂效果的指标更具有客观性。

关键词: 水力压裂; 效果评价; 试井; 偏相关; 灰色模型

中图分类号: TE122.1 文献标识码: A

Prediction of conductivity of hydraulic fracturing induced fractures with gray models

Yang Yu¹ Sun Zhixue¹ Guo Chunhua²

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan; 2. Chengdu College of Technology, Chengdu, Sichuan)

Abstract: Fracture conductivity directly influences productivity of fractured formation and is an important index for evaluation of fracturing. This paper analyzes the prerequisites and methods to calculate conductivity of hydraulic fractures through transient test. Taking Xinchang gasfield in Sichuan basin as an example, using partial correlation method, formation and operational parameters that influence conductivity of hydraulic fractures including formation thickness, interval transit time, shale content, proppant content, pump output and preflush volume are optimized. GM(1, h) gray model is introduced to increase the accuracy of conductivity prediction. This method can also be used to predict fracture half-length and production gain factor. The prediction accuracy of production gain factor, however, is poor due to the influences of unpredictable factors such as skin. Therefore fracture conductivity is relatively suitable for evaluation of fracturing effects.

Key words: hydraulic fracturing; evaluation of effects; transient test; partial correlation; gray model

对于低渗透性气藏, 水力压裂已成为改善其渗流场, 提高产量的重要措施, 但其效果受到地质因素及施工过程中, 人为因素等众多不确定因素的影响, 因此, 如何正确的进行水力压裂效果预测, 以指导水力压裂施工显得至关重要。

四川盆地川西地区的新场气田为滚动开发气田, 以往用经典的渗流方程建立的数理模型不能反映实际情况, 特别是在对裂缝导流能力的计算方面, 根据数理统计的方法在数据高度离散的条件

下, 难以归纳为合理的数理模型, 预测成功率往往不高, 不易用于现场。为了解决上述难题, 本文在综合试井分析裂缝导流能力的基础上, 采用偏相关分析法优选施工参数, 并采用灰色理论, 将严重离散化的数据进行灰色处理, 建立了灰色 GM(1, h) 模型, 作水力压裂效果预测, 以指导水力压裂施工。

1 可行性讨论

Cinco-Ley^{*} 对有限导流裂缝渗流模型作了分

* Cinco-Ley H. Transient pressure behavior for a well with a finite conductivity vertical fracture[R]. SPE, 1978. 253~ 264

第一作者简介: 杨宇, 男, 31 岁, 博士生, 试井、建模、数学模拟

收稿日期: 2004- 01- 09

析,并作了如下假设:(1)近井筒区为均质、水平和各向同性的地层,而流体为均质、轻微压缩的单相流体;(2)一条单垂直缝切割井筒,井位于裂缝中心;(3)从缝端到井眼,裂缝在单位截面上的流量相等,为均匀流量,且在缝中流动时有压力损失。这种垂直裂缝井模型的流动可分为4个阶段:(1)裂缝内的线性流动;(2)双线性流动;(3)地层内的线性流;(4)视径向流。这4个流动阶段处于一个压力系统内,依次衔接,相互影响,形式上是逐渐过渡的。

在有限裂缝流动中的曲线表现为:(1)裂缝内的线性流动由于时间短,受井筒储集效应掩盖;(2)双线性流动,双对数曲线上呈斜率为1/4的特征直线段;(3)地层内的线性流,在双对数曲线上呈斜率为1/2的特征直线段;(4)视径向流,与无限大地层中流体渗流相似。由1/2特征直线段计算裂缝半长 X_f ,由1/4特征直线段计算裂缝导流能力 f_c ^[2]。须指出的是:由试井计算的裂缝半长是渗流场中的有效半长,其和压裂设计以及施工中直接压开的裂缝半长有一定的区别。

现场上常用的引进试井软件,如EPS, WELTEST200等,在处理井壁裂缝时,均先假定裂缝类型(有限或高导流缝)为垂直缝,对水平裂缝的试井分析还很不成熟^[1]。近年来,国内在这方面已取得了实质性的进展^[2],石油大学新推出的试井平台已能进行水平裂缝模型解释。在具体解释前,应先分析所研究气田的地应力特征,对裂缝的类型进行判断:因为压裂缝垂直于最小主应力,只有当水平方向的应力 σ_x 或 σ_y 等于最小主应力 $\sigma_{\min}$ 时,压裂时才会产生垂直裂缝;否则,压裂时会产生水平裂缝。

2 方法选择

由于缝长和导流能力是多种地质、施工因素共同作用的结果,所以,在分析某种因素对它们的影响的同时,忽视其他施工因素,是不合理的。基于此,我们采用了偏相关和GM(1, h)分析方法,从不同的数学角度对比各类参数和人工压裂缝的导流能力以及缝半长的关系,揭示其重要的影响因素及其组合关系。

2.1 偏相关分析

在作影响因素和裂缝的相关关系分析时,如

果只用Pearson相关系数^[3]分析参数 X_1 和 X_2 的相关程度时,则可能因为参数 $X_3, X_4, \dots, X_h$ 的影响,不能真正反映 X_1 和 X_2 的相关程度。灰关联度分析同样存在这样的问题,而且它不能进行检验,给出可信度。偏相关系数描述的是当控制了一个或几个另外的参数的影响条件下,两个参数间的相关性。例如:在 X_1 和 X_2 同时受 $X_3, X_4, \dots, X_h$ 的影响时,可以控制 $X_3, \dots, X_h$ 的影响,正确反映 X_1 和 X_2 的相关程度。

设 X_3 是控制变量,分析 X_1 和 X_2 的偏相关系数

$$r_{X_1 X_2, X_3} = \frac{r_{X_1 X_2} - r_{X_1 X_3} r_{X_2 X_3}}{\sqrt{(1 - r_{X_1 X_3}^2)(1 - r_{X_2 X_3}^2)}} \quad (1)$$

设 X_3, X_4 是控制变量,分析 X_1 和 X_2 的偏相关系数

$$r_{X_1 X_2, X_3 X_4} = \frac{r_{X_1 X_2, X_3} - r_{X_1 X_4, X_3} r_{X_2 X_4, X_3}}{\sqrt{(1 - r_{X_1 X_4, X_3}^2)(1 - r_{X_2 X_4, X_3}^2)}} \quad (2)$$

式(1), (2)中 r 是Pearson相关系数算符,计算公式为

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

式中 $\bar{X}, \bar{Y}$ 为参数 X, Y 的均值, X_i, Y_i 为参数的第 i 个观测值, n 为样本观测数。

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,检验的假设是:两个变量间的相关系数为0;备择假设是: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

$$t = \frac{\sqrt{n-k-2} r}{\sqrt{1-r^2}} \quad (4)$$

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^[3]。

2.2 GM(1, h)预测模型

基于概率统计的随机过程是按统计规律先验地处理原始数据,如我们常用的多元线性回归等。它要求:(1)原始数据应足够多,因为统计规律一般是建立在大样本基础上的;(2)一般要求样本是

典型的过程(如: 平稳过程、高斯过程、白噪声过程等), 可以用统计规律处理。

灰色模型(Grey Mode)简称 GM 模型, 是灰色系统理论的技术模型, 也是灰色控制理论的基础。它是以灰色模块为基础, 以微分拟合法而建成的模型。

概括地说, GM 模型具有以下特点^[4]:

(1) 建模所需信息较少, 通常只要有 4 个以上数据即可建模;

(2) 不必知道原始数据分布的先验特征, 对无规或服从任何分布的任意光滑离散的原始序列, 通过有限次的生成即可转化成有规序列, 所以它对数据的统计分布无严格要求;

(3) 建模的精度较高, 可保持原系统的特征, 能较好地反映系统的实际状况。

设主行序列为 $X_1^{(0)}$, 因子序列为 $X_2^{(0)}, X_3^{(0)}, \dots, X_N^{(0)}$, GM(1, h) 的生成过程^[5]可简述为以下几个步骤。

(1) 数据进行标准化^[5]。

(2) 对 $X_i^{(0)}$ 作 1-AGO(1 次累加数据) 生成

$$X_i^{(1)}(k) = \sum_{j=1}^k X_i^{(0)}(j) \quad (i = 1, 2, \dots, h; k = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

式中 N 为样本总数, h 为变量总数。

(3) GM(1, h) 相应白化形式的微分方程为

$$\frac{dX_1^{(1)}}{dt} + aX_1^{(1)} = b_1X_2^{(1)} + b_2X_3^{(1)} + \dots + b_{h-1}X_h^{(1)} \quad (6)$$

按最小二乘法求出系数向量, 记向量为 $\hat{a}$, 则

$$\hat{a} = [a, b_1, b_2, \dots, b_{h-1}]^T = [B^TB]^{-1}B^TY_N \quad (7)$$

式中 $Y_N = [X_1^{(0)}(2), X_1^{(0)}(3), \dots, X_1^{(0)}(N)]^T$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[X_1^{(1)}(2) + X_1^{(1)}(1)] & X_2^{(1)}(2) \dots X_h^{(1)}(2) \\ -\frac{1}{2}[X_1^{(1)}(3) + X_1^{(1)}(2)] & X_2^{(1)}(3) \dots X_h^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[X_1^{(1)}(N) + X_1^{(1)}(N-1)] & X_2^{(1)}(N) \dots X_h^{(1)}(N) \end{bmatrix}$$

(4) 求出响应函数

$$X_1^{(1)}(k+1) = \left| X_1^{(1)}(0) - \frac{1}{a} \sum_{i=2}^h b_{i-1} X_i^{(1)}(k+1) \right| e^{-ak} + \frac{1}{a} \sum_{i=2}^h b_{i-1} X_i^{(1)}(k+1) \quad (8)$$

$$(k = 1, 2, \dots, N-1)$$

(5) 最后按累减生成对 1-AGO(1 次累加数据生成) 进行还原

$$X_i^{(0)}(j) = X_i^{(1)}(j) - X_i^{(1)}(j-1) \quad (9)$$

$$(i = 1, 2, \dots, h, j = 1, 2, \dots, N)$$

(6) 模型精度检验。代入已知变量数据的 1-AGO 到 (8) 式计算出预测值, 并按 (9) 式作预测值还原, 与实际值比较, 计算出相对误差向量。

3 应用实例

按照上述分析, 我们对川西地区新场气田的 24 口压裂井进行了分析。

3.1 试井可行性评价

由于试井解释的裂缝类型(有限或高导流缝)均先假定为垂直缝, 而人工压裂缝有可能是水平缝。为此, 我们应先分析气田的地应力特征^[6,7]。

(1) 新场气田的最小主应力方位是北 $30^\circ \sim 60^\circ$ 东, 因为岩石的破裂方向垂直于最小主应力方向, 所以, 破裂方向将沿与之垂直的方向。(2) 根据水力压力设计, 在地层深度为 600 m 以下, 沉积岩一般在压裂时形成垂直缝^[6], 而本地区的压裂层段均在 700 m 以下。所以, 试井裂缝模型中的垂直裂缝假定是适合于本次试井分析的。

3.2 试井分析

对各压裂井进行试井分析。通过试井分析可计算出其导流能力, 记为 $X_1^{(0)}$ 变量。当然, 在预测其他参数, 如增产倍数时, 可记增产倍数为 $X_1^{(0)}$ 向量。

3.3 参数的选取

因为裂缝的导流能力不仅取决于压裂施工, 而且与地层本身的性质有关^[8], 所以, 我们选择了地层参数: 层厚、声波时差、中子密度、泥质含量、孔隙度; 施工参数: 加砂量、施工排量、砂比、前置液量为因变量。

3.4 偏相关分析

为消除舍入误差和量纲的影响, 先作标准化预处理^[3], 然后进行偏相关分析, 优选出和导流能力相关的参数: 层厚、声波时差、泥质含量、加砂量、施工排量、前置液量, 共计 6 个影响变量, 分别记为 $X_2^{(0)}, X_3^{(0)}, \dots, X_7^{(0)}$ 。

3.5 建立 GM(1, 7) 预测模型

为了方便对比, 我们同时作了裂缝半长和增产倍数计算, 并另外采用两种常用方法进行对照

计算: a) 多元线性回归分析; b) 在没有进行偏相关分析优选参数的前提下, 使用了所有的地层参数和施工参数进行 GM(1, 10) 分析。在进行方法对比时, a) 以试井解释的裂缝导流能力和裂缝半长值为标准进行误差计算; b) 以压后和压前的无阻流量比值为增产倍数, 进行误差计算。

我们根据所建立 GM(1, 7) 预测模型, 对另外 50 余口压裂井进行了预测, 并且和压力恢复试井、产能测试结果对比, 进行误差计算, 各方法的计算误差对比如表 1。

表 1 各方法计算结果对照

Table 1 Comparison of outcomes of various methods

预测方法	导流能力 误差均值/ %	裂缝半长 误差均值/ %	增产倍数 误差均值/ %
偏相关+ GM(1, 7)	2.5	3.6	6.3
多元线性回归	15.2	25	35.8
GM(1, 10)	6.9	5.9	8.5

4 结论

(1) 在进行偏相关分析后, 起到了优选参数的作用: 本文采用偏相关+ GM(1, 7) 模型优选出和导流能力相关的参数: 层厚、声波时差、泥质含量、加砂量、施工排量、前置液量, 共计 6 个影响变量, 排除了 3 个不相关因素的干扰, 其拟合的精度和直

接应用灰色模型 GM(1, 10) 相比, 有较大提高。

(2) 应用多元线性回归进行的导流能力拟合误差为 15.2%, 比其他两种方法的误差都要大得多, 证明导流能力等压裂效果参数和其影响参数为非线性关系, 多元线性回归方法不适合于新场气田压裂效果的拟合和预测。

(3) 在进行增产倍数预测时, 几种方法的预测误差均值都较大, 主要是因为增产倍数还和表皮系数等无法预先估算的因素有关, 其影响因素远比裂缝导流能力和裂缝半长的影响因素复杂。

参 考 文 献

1 冯文光. 污染引起的渗流异常机理与 SLUG 试井分析原理[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999

2 陈伟, 段永刚. 水平裂缝压裂井试井分析[J]. 油气井测试, 2000, 9(3): 47~ 50

3 卢纹岱. SPSS for Windows 统计分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000

4 徐忠祥, 吴用平. 灰色系统理论与矿床灰色预测[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993

5 胥泽银, 郭科. 多元统计方法及其程序设计[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1999

6 吴志均, 唐红君. 川西致密砂岩气藏压裂效果的试井解释评价[J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(6): 52~ 54

7 张莉, 岳乐平. 鄯善油田地应力、裂缝系统与油田开发[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(4): 330~ 332

8 吉憾利. 水力压裂技术新进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995

(上接第 105 页)

4 吴智勇, 姜衍文. 全球旋回地层学述评[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(1): 15~ 21

5 沈清, 汤霖. 模式识别导论[M]. 北京: 国防科技大学出版社, 1995

6 陈行禄, 秦永元. 信号分析与处理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993

7 石万忠, 李举子, 李梦溪, 等. 时- 频分析在高分辨率层序地层学中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(3): 235~ 237

8 Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variation in the Earth's Orbit: pacemaker of the ice ages[J]. Science, 1976, 194(4 270): 1 121~ 1 132

9 Erger A L. Spectrum of climate variations and their causal mechanisms [J]. Geophisics Surveys, 1979, 3: 351~ 402

10 Olsen H. Astronomical forcing of meandering river behaviour: Milankovitch cycles in Devonian of East Greenland[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1990, 79: 99~ 115

11 Kashiwaya K, Ryugo M. Long term climato-limnological oscillation during the past 2.5 million years printed in Late Baikal sediments[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(5): 659~ 662

12 姜衍文, 朱忠德, 肖传桃, 等. 全息地层学——新的挑战[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 110~ 118

13 Yang C S, Baumfalk Y A. Milankovitch cyclicity in the Upper Rotliegend Group of the Netherlands Offshore[J]. Spec Publs Int Ass Sediment, 1994, 19: 47~ 61

14 齐永安, 王润怀, 潘结南. 米兰柯维奇旋回与高频波动周期的识别[J]. 焦作工学院学报(自然科学版), 2000, 19(2): 81~ 85

15 郑晓武, 邓宏文, 徐怀大, 等. 测井高分辨率层序地层自动划分技术与应用尝试[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(4), 357~ 360