

# 基于可拓理论的裂缝性油藏井间窜流判别

赵东锋<sup>1</sup>, 廖新维<sup>1</sup>, 殷丹丹<sup>2</sup>, 赵晓亮<sup>1</sup>, 蔡振华<sup>1</sup>, 王欢<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)提高采收率研究院, 北京 102249)

**摘要:** 目前常用模糊综合判别方法来判别井间窜流,但是当各项评定指标之间出现矛盾时,该方法的准确率大幅度下降。为解决这一问题,将可拓理论应用到井间窜流评价中。根据裂缝性油藏影响井间窜流的地质特征和在水驱开发过程中窜流形成时的生产动态特征,运用物元理论、可拓集合和关联函数,从定性和定量2个角度研究井间窜流形成时的动态特征;通过确定井间窜流物元、经典域物元、节域物元、权重系数和关联函数,建立基于可拓理论的井间窜流程度判别模型,并利用可拓识别方法进行判别,得出窜流程度判别结果。可拓理论充分考虑了各因素的相互联系、相互依存、相互作用的特点,能够把单项指标评定结果的不相容性转化为相容性。在江苏油区杨家坝油藏进行了实际应用,统计结果准确率达86%,证明了该方法的可行性,具有一定的应用前景。

**关键词:** 裂缝性油藏 井间窜流 可拓理论 窜流程度 物元理论 江苏油区

**中图分类号:** TE344

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2013)04-0065-04

在裂缝性油藏的注水开发过程中,井间窜流是导致油藏波及效率和最终采收率低的主要原因。造成井间窜流的原因是多方面的,要全面准确地确定所有因素对井间窜流的影响很困难,甚至不可能<sup>[1-3]</sup>。因此只能用不全面的因素来评价井间窜流程度,目前常用的井间窜流判别方法主要有传统的单因素判别方法和模糊综合判别方法<sup>[4]</sup>。单因素判别方法具有一定的片面性、随机性和不确定性,限制性较大。模糊综合判别方法采用了多因素模型,利用权重系数法和灰色关联法等,解决了单因素判别的缺陷,但当各项评定指标之间出现矛盾时,该方法的判定结果误差增大<sup>[5-11]</sup>。影响井间窜流的因素是相互关联的,判别不仅要考虑多个指标,还要考虑各个指标之间相互矛盾的问题。因此将可拓理论运用到井间窜流评价中,运用物元理论、可拓集合和关联函数,从定性和定量2个角度研究井间窜流动态特征,从而很好地解决了各因素间的矛盾问题和不相容问题<sup>[12-14]</sup>。

可拓学的理论支柱是物元理论和可拓集合理论,其逻辑细胞是物元。物元是事物、事物的概念及该概念对应的量值三者所组成的三元组,记作

$R=(N,c,X)=(\text{事物,概念,量值})$ 。在油藏井间窜流程度评判中, $N$ 表示窜流程度, $c$ 表示窜流程度的影响因素, $X$ 表示窜流程度关于影响因素的取值<sup>[15-16]</sup>。

## 1 井间窜流可拓综合判别思路

井间窜流形成的内因是油藏本身的物性,如地层非均质性、裂缝密度、裂缝分布、孔隙度、原油粘度、渗透率及油藏类型等地质因素。另外窜流形成后,注采井区的生产动态参数会有一定程度的变化,表现在产液剖面和吸水剖面的差异、采液吸水指数的增加、注采压差的异常、含水程度变化等。这些参数变化为利用油田现有的油藏地质资料和生产动态资料识别井间窜流提供了理论依据<sup>[17-18]</sup>。

井间窜流可拓综合判别的基本思路为:①根据油藏的取心资料、测井资料、示踪剂测试资料、试井资料确定不同井间窜流程度及其所对应的地质特征和生产动态特征,即影响因素或判别指标;②根据油田实际情况和专家建议,确定各指标的经典域和节域以及各类数据的关联函数;③把待归类的数代入到各数据类中,计算各个指标的关联度,利

收稿日期:2013-05-27。

作者简介:赵东锋,男,在读博士研究生,从事油田开发系统理论方法和提高采收率技术研究。联系电话:(010)89733223, E-mail: dong-feng117@qq.com。

基金项目:国家“973”项目“二氧化碳减排、存储和资源化利用的基础研究”(2011CB707302),国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011ZX05016),国家科技重大专项“复杂油气田地质与提高采收率技术”(2011ZX05009),国家自然科学基金委员会“超低渗透油藏注气提高采收率理论与技术研究”(U1262101)。

用权重计算出综合关联度;④根据综合关联度的值确定所属的窜流程度(图1)。

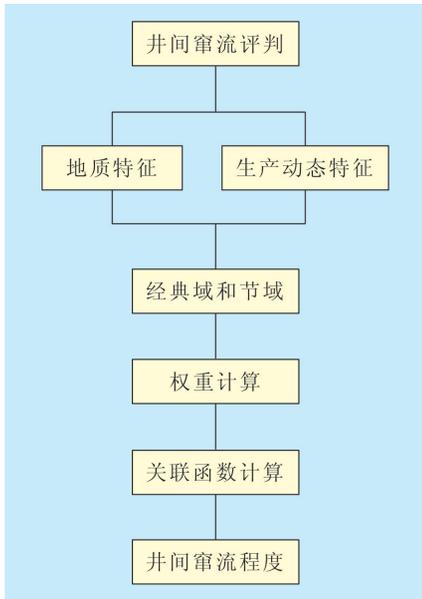


图1 井间窜流程度分级评价流程

## 2 井间窜流可拓综合识别方法

### 2.1 井间窜流物元的确定

假设把窜流程度分成  $m$  个等级, 窜流的影响因素有  $n$  个, 根据物元的定义, 窜流程度可用  $n$  维物元来评价, 即

$$R_i = (N_i, c_j, X_{ij}) = \begin{bmatrix} N_i, c_1, X_{i1} \\ c_2, X_{i2} \\ \vdots \\ c_n, X_{in} \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

式中:  $R_i$  为窜流程度物元;  $N_i$  为第  $i$  个窜流程度;  $c_j$  为  $N_i$  的影响因素;  $j$  为窜流影响因素个数, 其值为  $1, 2, \dots, n$ ;  $X_{ij}$  为  $N_i$  所对应的  $c_j$  的量值。

### 2.2 井间窜流的经典域物元和节域物元的确定

经典域物元是指某个窜流程度用单因素评价时, 窜流程度对应的各影响因素的取值范围, 即

$$R_{0i} = (N_{0i}, c_j, X_{0ij}) = \begin{bmatrix} N_{0i}, c_1, <a_{0i1}, b_{0i1}> \\ c_2, <a_{0i2}, b_{0i2}> \\ \vdots \\ c_n, <a_{0in}, b_{0in}> \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $R_{0i}$  为窜流程度经典域物元;  $N_{0i}$  为窜流程度;  $X_{0ij}$  为  $N_{0i}$  对应  $c_j$  的数值范围, 即经典域  $<a_{0ij}, b_{0ij}>$ ;  $a_{0ij}$  和  $b_{0ij}$  分别为  $X_{0ij}$  的下、上限值。

节域物元是各窜流程度对应影响因素由最小

值到最大值的权值范围, 即

$$R_p = (P, c_j, X_{pj}) = \begin{bmatrix} P, c_1, X_{p1} \\ c_2, X_{p2} \\ \vdots \\ c_n, X_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P, c_1, <a_{p1}, b_{p1}> \\ c_2, <a_{p2}, b_{p2}> \\ \vdots \\ c_n, <a_{pn}, b_{pn}> \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $R_p$  为井间窜流程度划分全体  $P$  的物元;  $P$  为井间窜流程度划分的全体;  $X_{pj}$  为  $P$  对应  $c_j$  的数值范围, 即  $P$  的节域  $<a_{pj}, b_{pj}>$ ;  $a_{pj}$  和  $b_{pj}$  分别为  $X_{pj}$  的下、上限值。

### 2.3 关联函数的确定

当各物元特征的量值为实数时, 判断某待测油井符合各窜流程度的程度, 待识别窜流程度与各类的关联度, 可以通过计算得到, 其表达式为

$$K_i(x_j) = \begin{cases} \frac{-\rho(x_j, X_{ij})}{|X_{ij}|} & x_j \in X_{ij} \\ \frac{\rho(x_j, X_{ij})}{\rho(x_j, X_{pj}) - \rho(x_j, X_{ij})} & x_j \notin X_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\rho(x_j, X_{ij}) = \left| x_j - \frac{a_{ij} + b_{ij}}{2} \right| - \frac{b_{ij} - a_{ij}}{2} \quad (5)$$

$$\rho(x_j, X_{pj}) = \left| x_j - \frac{a_{pj} + b_{pj}}{2} \right| - \frac{b_{pj} - a_{pj}}{2} \quad (6)$$

式中:  $K_i(x_j)$  为  $c_j$  数值范围的关联度;  $x_j$  为  $c_j$  的数值范围;  $\rho$  为离  $x$  最近区间端点与  $x$  的距离;  $a_{ij}$  和  $b_{ij}$  分别为  $X_{ij}$  的下、上限值。

### 2.4 权重系数及关联度的确定

待测油井对窜流程度的关联度为

$$K_i(p) = \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} K_i(x_j) \quad (7)$$

其中

$$\lambda_{ij} = \frac{\frac{x_i}{b_{ij}}}{\sum_{j=1}^n \frac{x_i}{b_{ij}}} \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_{ij} = 1 \quad (9)$$

式中:  $K_i(p)$  为  $p$  对  $N_i$  的关联度;  $\lambda_{ij}$  为  $c_j$  的

权重分配系数。

### 2.5 样本所属类别的判定

待判定样本与某窜流程度的综合关联度值越大,表明它符合该类窜流程度要求的程度越高,因此,可判别其为该类窜流程度,即

$$K_{i0}(p) = \max K_i(p) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

式中:  $K_{i0}(p)$  为某待判定样本与某窜流程度的综合关联度。

## 3 应用实例

将所建立的井间窜流可拓综合判别方法应用于江苏油区杨家坝裂缝性油藏,判别出各注采井间的窜流程度,为后期油田的调整和综合治理提供依据。

### 3.1 油藏概况

杨家坝油藏是一个主要受断层和鼻状构造控制、局部受岩性影响的层状复杂断块砂岩油藏。随着开采时间的推移,也逐渐暴露出一些问题。受储层物性影响,水驱方向性明显,井间窜流严重,存在低效循环带。投入注水开发后水线推进快,见水后含水率急剧上升,产量大幅度递减;水驱储量控制、动用程度普遍较低,储量损失严重。

### 3.2 井间窜流程度判别模型

通过理论和油田实际数据研究表明,在井间发生窜流后,油藏的生产动态参数,如产液量、含水率、产液指数、出水指数和水窜指数等表现为大幅度增加,综合压力指数表现为降低。根据以上分析,选取油井响应时间、导流能力、无因次视产液指数、综合产液压力指数、含水率、出水指数和水窜指数7个要素来判别井间窜流程度。根据选取的参数值建立物元模型,  $N_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$  依次表示窜流程度为严重、比较严重、一般、较低、弱5种,各窜流程度的划分和注采井组应对措施见表1。

井间窜流程度	指示颜色	注采井组应对措施
严重	红色	非常有必要进行控水措施
比较严重	橙色	有必要进行控水措施
一般	紫色	可适当进行控水措施
较低	绿色	生产状况正常
弱	蓝色	生产状况良好

$R_{0ij} (j=1, 2, \dots, 7)$  依次表示各窜流程度的识别

要素,分别为油井响应时间、导流能力、无因次视产液指数、综合产液压力指数、含水率、出水指数、水窜指数。此区域的经典物元模型可表示为

$$R_{01} = \begin{bmatrix} N_{01}, c_1, < 100, 190 > \\ c_2, < 8.6, 7.1 > \\ c_3, < 1.2, 1.5 > \\ c_4, < 2.7, 3.1 > \\ c_5, < 105, 150 > \\ c_6, < 16, 20 > \\ c_7, < 22, 26 > \end{bmatrix} \quad R_{02} = \begin{bmatrix} N_{02}, c_1, < 190, 270 > \\ c_2, < 6.2, 7.1 > \\ c_3, < 1.0, 1.2 > \\ c_4, < 2.3, 2.7 > \\ c_5, < 90, 105 > \\ c_6, < 14, 16 > \\ c_7, < 19, 22 > \end{bmatrix}$$

$$R_{03} = \begin{bmatrix} N_{03}, c_1, < 270, 400 > \\ c_2, < 4.1, 6.2 > \\ c_3, < 0.7, 1.0 > \\ c_4, < 1.5, 2.3 > \\ c_5, < 60, 90 > \\ c_6, < 10, 14 > \\ c_7, < 13, 19 > \end{bmatrix} \quad R_{04} = \begin{bmatrix} N_{04}, c_1, < 400, 470 > \\ c_2, < 2.9, 4.1 > \\ c_3, < 0.5, 0.7 > \\ c_4, < 1.1, 1.5 > \\ c_5, < 40, 60 > \\ c_6, < 7.0, 10 > \\ c_7, < 9.0, 13 > \end{bmatrix}$$

$$R_{05} = \begin{bmatrix} N_{05}, c_1, < 470, 600 > \\ c_2, < 1.3, 2.9 > \\ c_3, < 0.2, 0.5 > \\ c_4, < 0.7, 1.1 > \\ c_5, < 10, 40 > \\ c_6, < 3.0, 7.0 > \\ c_7, < 4.0, 9.0 > \end{bmatrix}$$

窜流程度的节域物元为

$$R_p = \begin{bmatrix} P, c_1, < 100, 600 > \\ c_2, < 1.3, 9.0 > \\ c_3, < 0.2, 1.5 > \\ c_4, < 0.7, 3.1 > \\ c_5, < 10, 150 > \\ c_6, < 3.0, 20 > \\ c_7, < 4.0, 26 > \end{bmatrix}$$

### 3.3 窜流程度判别及结果分析

根据井间窜流可拓综合判别方法,对杨家坝油藏59口油水井进行了窜流程度分类(图2),并与已经做过产液剖面或吸水剖面测井的油水井进行了对照,判别结果与油藏实际情况符合率为86%。从图2可以看出,平面水驱存在较大差异,局部井区水驱效果差,受裂缝影响,水驱存在方向性,杨1、杨19-1、杨5-2、杨8-3、杨6-1油井受效较快,杨33和杨40油井未见到明显注水效果;注入水优先沿裂缝方向推进,其余方向见效缓慢,甚至不见效。一些注采井区经过长期水驱,油井含水率较高,注入水驱替效率差,需要优先实施控水措施,来提高开发效果(表2)。

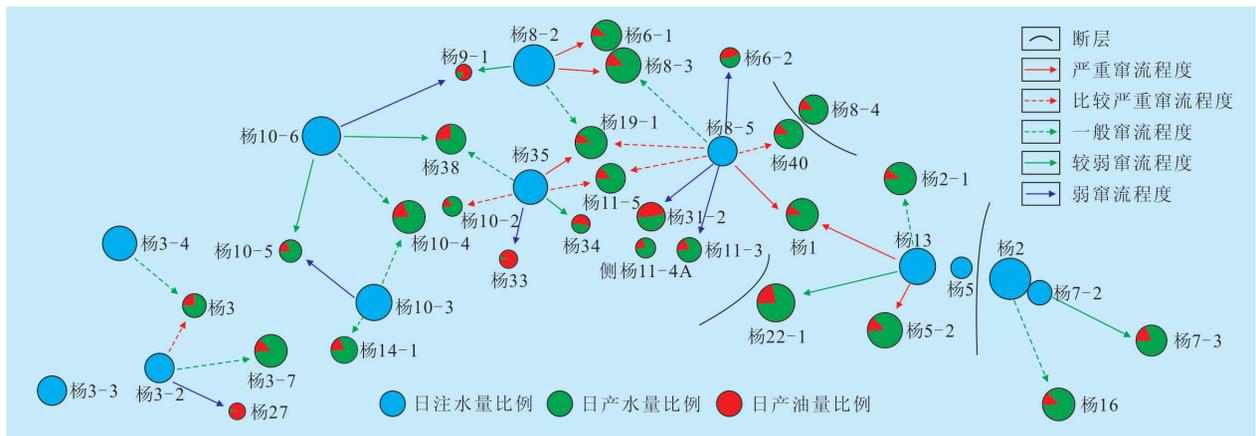


图2 杨家坝油藏井间窜流程度分类  
井圈相对大小表示产液量(或注水量)相对大小

表2 各注采井组注入水窜流情况及控水措施

注水井	对应油井	最高窜流程度及其对应油井	控水措施
杨10-3	杨14-1,杨10-4,杨10-5	一般,杨14-1和杨10-4	适当进行
杨10-6	杨10-4,杨9-1,杨38,杨10-5	一般,杨10-4	适当进行
杨13	杨5-2,杨2-1,杨22-1,杨1	严重,杨1和杨5-2	非常有必要进行
杨2	杨16,杨7-3	一般,杨16	适当进行
杨3-2	杨3,杨3-7,杨27	比较严重,杨3	有必要进行
杨35	杨38,杨33,杨10-2,杨19-1,杨34,杨11-5	严重,杨19-1	非常有必要进行
杨8-2	杨6-1,杨8-3,杨9-1,杨19-1	严重,杨6-1和杨8-3	非常有必要进行
杨8-5	杨1,杨11-5,杨6-2,杨8-3,杨11-3,杨40,杨31-2,杨19-1	严重,杨1	非常有必要进行

## 4 结束语

井间窜流程度判别是油藏注水后期研究的重点和难点,基于可拓理论的窜流程度综合判别方法,从定性和定量2个角度很好地解决了各因素间的矛盾问题和不相容问题,经过现场应用,准确率较高,可以应用于生产。基于可拓理论的井间窜流程度综合判别方法简单易懂,在计算方面容易实现,可应用于各个领域的分类判别研究,实用性强。

### 参考文献:

[1] 何长,李平,汪正勇,等.大孔道的表现特征及调剖对策[J].石油钻采工艺,2000,22(5):63-66.  
 [2] 周德华,葛家里,李阳,等.复杂裂缝油藏中窜流函数的建立[J].油气采收率技术,2000,7(2):30-32.  
 [3] 窦之林,曾流芳,张志海.大孔道诊断和描述技术研究[J].石油勘探与开发,2001,28(1):75-77.  
 [4] 刘月田,孙保利,于永生.大孔道模糊识别与定量计算方法[J].石油钻采工艺,2003,25(5):54-59.  
 [5] 毛振强,谷建伟,董平志.疏松砂岩油藏大孔道形成机理与预测[J].油气地质与采收率,2011,18(1):77-79.  
 [6] 杨伦标,高英仪.模糊数学原理及应用[M].广州:华南理工大学

出版社,1995:23-32.

[7] 赵传峰,姜汉桥,王佩华,等.裂缝型低渗透油藏的水窜治理对策——以扶余油田为例[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2008,30(6):116-119.  
 [8] 冯其红,史树彬,王森,等.利用动态资料计算大孔道参数的方法[J].油气地质与采收率,2011,18(1):74-76.  
 [9] 刘淑芳,梁继德.试井技术识别无效注采循环方法探讨[J].油气井测试,2004,13(1):27-30.  
 [10] 曾流芳,陈柏平,王学忠.疏松砂岩油藏大孔道定量描述初步研究[J].油气地质与采收率,2002,9(4):53-54.  
 [11] 戢灵美,王健,戢磊,等.裂缝性油藏选择性堵剂的室内研制及性能评价[J].油气地质与采收率,2011,18(6):100-103.  
 [12] 孟凡顺,刘明珠,黄彦铭,等.基于可拓理论识别低效无效循环带方法研究[J].中国海洋大学学报,2010,40(4):60-64.  
 [13] 朱晓映,娄潇聪.基于可拓理论的混凝土裂缝危害程度等级评价[J].水利与建筑工程学报,2010,8(1):107-109.  
 [14] 刘明珠,孟凡顺,邓瑞,等.基于可拓分类理论识别沉积微相方法研究[J].物探化探计算技术,2010,32(1):54-59.  
 [15] 蔡文,杨春燕,何斌,等.可拓学基础理论研究的新进展[J].中国工程科学,2003,5(2):80-87.  
 [16] 蔡文.可拓论及其应用[J].科学通报,1999,44(7):673-682.  
 [17] 姜建伟,李红茹,李远光,等.安棚深层系裂缝特征重新认识与井网调整[J].油气地质与采收率,2012,19(2):26-28.  
 [18] 彭仕宓,史彦尧,韩涛,等.油田高含水期窜流通道定量描述方法[J].石油学报,2007,28(5):79-84.

编辑 刘北羿