

# 固井水泥浆主要性能模糊评价方法研究

嵇井明<sup>1,2</sup>, 杨远光<sup>2</sup>, 安新朝<sup>3</sup>

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学, 四川 成都 610500; 3. 大港油田公司工程造价中心, 天津 300280)

**摘要:** 根据不同模糊数学隶属函数分布曲线的形状和走向, 分别选取适合描述水泥浆稠化时间、流性指数、API 滤失量、抗压强度和析水性能的模糊分布, 以实际固井的水泥浆实测性能综合评分与实际固井质量评分对比, 优选了相关隶属函数的参数。以 5 口井的实际固井为例, 验证了评价方法的可靠性, 所得到的评价结果与现场固井胶结质量的平均拟合误差由文献[4]中的  $\pm 12.26\%$  减小到  $\pm 3.34\%$ 。证明本研究所确定的评价方法可作为水泥浆体系及外加剂的优选方法, 合理确定固井质量。

**关键词:** 水泥浆性能; 模糊评判; 固井; 胶结质量

**中图分类号:** TE256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2016)02-0024-04

**Research on Fuzzy Evaluation Method for Cement Slurry in Main Performance/**JI Jing-ming<sup>1,2</sup>, YANG Yuan-guang<sup>2</sup>, AN Xin-Chao<sup>3</sup> (1. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation (Southwest Petroleum University), Chengdu Sichuan 610500, China; 2. Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China; 3. Cost Center of Dagang Oil Company, Tianjin 300280, China)

**Abstract:** Based on the shape and direction of different fuzzy membership function's distributional curve, we selected the fuzzy distribution which is suitable to describe the cement slurry's thickening time, liquidity index, API fluid loss, compressive strength. By comparing the actual performance of cement slurry designed and measured with actual cementing quality score, we got the parameters of related membership function. Taking the 5 wells as an example, the results obtained from this evaluation method are verified by existing literature and the average fitting error of the cementing quality of the site is raised to  $-3.34\%$  by  $-12.26\%$ , which means this method can be used as a practical and reliable method for optimization of cement slurry system and admixture.

**Key words:** cement slurry performance; fuzzy evaluation; the cementing; cementing quality

## 0 引言

水泥浆体系的性能是影响固井质量的关键因素。在室内进行水泥浆体系实验时, 主要测试几项关键性能<sup>[1-3]</sup>: 稠化时间、流性指数、API 滤失量、抗压强度、析水。这些描述水泥浆体系的性能参数, 对固井质量的影响权重差别很大, 目前对水泥浆综合性能的评价方法<sup>[4-5]</sup>还不成熟, 与固井胶结质量关联的效果仍然很不理想。因此, 有必要开展模糊分布及其参数优选方面的研究, 为室内水泥浆体系 and 外加剂的优选提供一种快捷的评判途径。

## 1 模糊综合评价方法模型

许多事物具有很大的模糊性, 因此对事物的评

价也应采用模糊的方法。应用模糊数学方法<sup>[6-10]</sup>进行综合评价会有比较好的效果, 其综合评判一般分一级和多级模型, 一级模型的应用步骤如下:

(1) 建立评判对象的因素集:

$$U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\}$$

(2) 建立评判集:

$$C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$$

(3) 建立单因素评判, 即建立一个从  $U$  到  $F(C)$  的模糊映射:

$$f: U \rightarrow F(C), A u_i \in U$$

$$u_i \rightarrow f(u_i) = \frac{r_{i1}}{c_1} + \frac{r_{i2}}{c_2} + \frac{r_{i3}}{c_3} + \dots + \frac{r_{im}}{c_m} \quad (0 \leq r_{ij} \leq 1, 1 \leq i \leq n)$$

由  $f$  可诱导出模糊关系  $\tilde{R}$ , 得到模糊矩阵:

收稿日期: 2015-08-17; 修回日期: 2015-12-31

基金项目: 国家科技重大专项“低渗气藏水平井固井长效封固关键技术研究”(编号: 2011ZX05022-006-005HZ)

作者简介: 嵇井明, 男, 汉族, 1991年生, 西南石油大学在读硕士研究生, 油气井工程专业, 从事油气井固井与完井技术研究, 四川省成都市新都区新都大道8号, 201421000027@stu.swpu.edu.cn。

$$\tilde{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix}$$

$\tilde{R}$ 称为单因素评判模糊矩阵,  $(U, C, \tilde{R})$ 构成了综合评判模型,也称为综合评判空间。

(4) 综合评价。

因素集  $U$  中各因素侧重可能不同,因此要赋予每个因素合适的权重,数学上表示为因素集  $U$  的一个模糊子集,记为  $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ ,在权重赋予时要求  $a_1 + a_2 + \dots + a_n = 1$ ,赋予权重、根据模糊映射得到模糊矩阵后,综合评价式为:  $B = A \cdot R$ 。

$B$  是  $C$  上的一个模糊子集,为各评价级别隶属度的集合,综合评价结果取最大的隶属度所对应的评价级别。

## 2 水泥浆体系综合性能模糊评价方法的建立

### 2.1 因素集合的建立

描述水泥浆体系性能的因素较多,但每个因素并不是独立的,例如水泥浆 API 滤失量与防窜性能有一定的关联性等。在实际固井工作中不是每个因素都要检测,目前侧重检测的指标有:稠化时间、流性指数、API 滤失量、抗压强度、析水。因此,本研究选用这 5 个因素建立因素集合  $U = \{稠化时间 T、流性指数 n、API 滤失量 V、抗压强度 P、析水 F\}$ 。

### 2.2 水泥浆性能评判集合的建立

根据固井工作中对水泥浆体系评价的通行观点,将水泥浆体系的每一个性能分为 5 个等级:优秀、良好、中等、合格、不合格,并用这 5 个等级建立其评判集合  $C$ 。

### 2.3 各因素隶属函数的建立

选取了前置液体系、钻井液类型、井身结构基本相同的 5 口井的水泥浆性能数据作为样本数据<sup>[5]</sup>,见表 1。

#### 2.3.1 稠化时间的隶属函数

根据模糊分布曲线的形状及走向,适合描述

表 1 5 口井的水泥浆性能数据

井号	数据来源	流性指数	API 滤失量/ [mL·(30 min) <sup>-1</sup> ]	稠化时间/ min	抗压强度/ MPa	析水/ %	模糊 评分	固井质 量评分
金蓬 35	设计	≥0.700	≤150.0	100	≥11.0	≤1.4	70.03	79.42
	实测	0.631	62.0	109	14.6	0.4		
金遂 12-1	设计	≥0.800	≤100.0	100	≥14.0	≤1.4	70.97	85.48
	实测	≥0.844	83.0	82	18.3	0		
新蓬 16	设计	≥0.700	≤100.0	100	≥14.0	≤1.4	79.46	89.84
	实测	0.715	56.0	107	20.8	0		
川孝 483	设计	≥0.800	≤100.0	100	≥14.0	≤1.4	85.75	95.07
	实测	0.808	45.0	103	21.7	0		
金蓬 30-1	设计	≥0.700	≤100.0	100	≥14.0	≤1.4	86.70	97.60
	实测	0.829	45.0	105	23.6	0		

稠化时间模糊现象特征的模糊分布有:正态、柯西、梯形等。具体描述分为以下形式:

(1) 当稠化时间实验数据  $t$  与设计数据  $T$  满足  $0.8T < t \leq 1.2T$  时,描述稠化时间优秀,适合这种偏向小的一方的模糊现象的模糊分布有偏小型正态、偏小型梯形、偏小型抛物线等,在本文选用偏小型正态分布;

(2) 稠化时间良好、一般、合格可看作处于中间状态的模糊现象,适合表示这种模糊现象的模糊分布有中间型柯西、中间型梯形、中间型抛物线等,在本文中选用中间型柯西分布;

(3) 稠化时间不合格时,这种现象可看作偏向

大的一方的模糊现象,适合表示这种模糊现象的模糊分布有偏大型正态、偏大型梯形、偏大型抛物线等,在本文中选用偏大型正态分布。

这 3 种分布表达式分述如下。

偏小型正态分布:  $\tilde{A}(x) = e^{-\frac{(x-a)^2}{\sigma^2}}$  通过计算样本数据得到稠化时间数据的标准差  $\sigma \approx 40$ ;

中间型柯西分布:  $\tilde{A} = 1 / [(1 + \alpha(x-a)^\beta)] (\alpha > 0, \beta \text{ 为正偶数})$ ;

偏大型正态分布:  $\tilde{A}(x) = 1 - e^{-\frac{(x-a)^2}{\sigma^2}}$ 。

模型中的常数取值为:(1)对于  $\alpha$  值和  $\beta$  值,经多次计算各井水泥浆数据得到隶属度,得到模糊矩

阵,再综合评判与固井质量评分对比,最终 $\alpha$ 取0.2, $\beta$ 取2,效果比较好;(2)关于 $a$ 值的选取,一般认为实验值与设计值完全相等为优秀,偏离5%为良好,偏离10%为一般,偏离15%为合格,偏离20%为不合格。稠化时间的隶属函数见表2。

表2 水泥浆稠化时间的隶属函数

隶属函数类别	函数分布形态	隶属函数表达式
优秀	偏小型正态分布	$T_1 = e^{-\left(\frac{x-T}{\sigma}\right)^2}$
良好	中间型柯西分布	$T_2 = \frac{1}{1 + (1/5)(x - 1.05T)^2}$
一般	中间型柯西分布	$T_3 = \frac{1}{1 + (1/5)(x - 1.1T)^2}$
合格	中间型柯西分布	$T_4 = \frac{1}{1 + (1/5)(x - 1.15T)^2}$
不合格	偏大型正态分布	$T_5 = 1 - e^{-\left(\frac{x-1.2T}{\sigma}\right)^2}$

注:表中 $x$ 为水泥浆性能实测值,下表同。

### 2.3.2 其他性能参数隶属函数

表3 其他隶属函数汇总

隶属函数类别	主要性能隶属函数			
	API 滤失量	流性指数	抗压强度	析水
优秀	$V_1 = e^{-\left(\frac{x-40}{\sigma}\right)^2}$	$n_1 = \begin{cases} 0, x < 0 \\ \left(\frac{x}{0.95}\right)^k, 0 \leq x \leq 0.95 \\ 1, x > 0.95 \end{cases}$	$P_1 = \begin{cases} 0, x < 14 \\ \left(\frac{x-14}{16}\right)^k, 14 \leq x \leq 30 \\ 1, x > 30 \end{cases}$	$F_1 = e^{-\left(\frac{v}{0.3}\right)^2}$
良好	$V_2 = \frac{1}{1 + \frac{1}{3000}(x - 95)^2}$	$n_2 = \frac{1}{1 + 50(x - 0.85)^2}$	$P_2 = \frac{1}{1 + \frac{1}{6}(x - 26)^2}$	$F_2 = e^{-\left(\frac{v-0.35}{0.3}\right)^2}$
一般	$V_3 = \frac{1}{1 + \frac{1}{3000}(x - 150)^2}$	$n_3 = \frac{1}{1 + 50(x - 0.75)^2}$	$P_3 = \frac{1}{1 + \frac{1}{6}(x - 22)^2}$	$F_3 = e^{-\left(\frac{v-0.7}{0.3}\right)^2}$
合格	$V_4 = \frac{1}{1 + \frac{1}{3000}(x - 205)^2}$	$n_4 = \frac{1}{1 + 50(x - 0.65)^2}$	$P_4 = \frac{1}{1 + \frac{1}{6}(x - 18)^2}$	$F_4 = e^{-\left(\frac{v-1.05}{0.3}\right)^2}$
不合格	$V_5 = \begin{cases} 0, x < 40 \\ \left(\frac{x-40}{240}\right)^k, 40 \leq x \leq 260 \\ 1, x > 260 \end{cases}$	$n_5 = \begin{cases} e^{-\left(\frac{x-0.55}{\sigma}\right)^2}, n \geq 0.55 \\ 1, n < 0.55 \end{cases}$	$P_5 = \begin{cases} e^{-\left(\frac{x-14}{\sigma}\right)^2}, n > 14 \\ 1, n < 14 \end{cases}$	$F_5 = \begin{cases} 0, V = 0 \\ \left(\frac{x}{1.4}\right)^k \\ 1, v \geq 1.4 \end{cases}$

依据已有的水泥浆性能模糊评价综合评分计算方法<sup>[5]</sup>,综合评判 $S$ 值的算法: $S =$ 优秀的隶属度 $\times 100 +$ 良好的隶属度 $\times 90 +$ 中等的隶属度 $\times 80 +$ 合格的隶属度 $\times 70 +$ 不合格的隶属度 $\times 60$ (综合评分之前要判断综合评判结果是否归一,否则要先进行归一)。

### 2.6 水泥浆综合性能模糊评价的步骤

将数据代入隶属函数 $\rightarrow$ 选取模糊权重子集 $\rightarrow$ 综合评判 $\rightarrow$ 评判结果归一化 $\rightarrow$ 综合评分。

### 3 模糊评价的应用示例

金遂12-1井所用水泥浆性能数据<sup>[5]</sup>如表4。

用稠化时间隶属函数相同的方法,可得到API滤失量、流性指数、抗压强度和析水的隶属函数的模糊分布,见表3。

### 2.4 权重模糊子集的建立

根据严思明、谷升高<sup>[4]</sup>等人的经验建立的如下权重模糊子集 $A$ 。

#### 2.4.1 直井

对应因素集合 $U =$ (稠化时间,API滤失量,流性指数,抗压强度,析水)的权重模糊子集为: $A = (0.3, 0.2, 0.2, 0.15, 0.15)$ 。

#### 2.4.2 斜井和水平井

对应因素集合 $U =$ (稠化时间,API滤失量,流性指数,抗压强度,析水)的权重模糊子集为: $A = (0.3, 0.2, 0.1, 0.1, 0.3)$ 。

### 2.5 综合评分 $S$ 值的算法

表4 金遂12-1井水泥浆性能数据

数据 来源	密度/(g· cm <sup>-3</sup> )	流性 指数	API 滤失量/[mL· (30 min) <sup>-1</sup> ]	稠化时 间/min	抗压强 度/MPa	析水/ %
设计	1.90	$\geq 0.800$	$\leq 100.0$	100	$\geq 14.0$	$\leq 1.4$
实测	1.90	0.844	83.0	82	18.3	0

各性能隶属函数组成模糊矩阵如下:

$$R = \begin{pmatrix} T_1 & T_2 & T_3 & T_4 & T_5 \\ V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 \\ n_1 & n_2 & n_3 & n_4 & n_5 \\ P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ F_1 & F_2 & F_3 & F_4 & F_5 \end{pmatrix}$$

将数据代入隶属函数,得到隶属度并按照上面

模糊矩阵对应的位置排列得到具体的模糊矩阵 $R$ 。由于该井是直井,权重模糊子集为 $A = (0.3, 0.2, 0.2, 0.15, 0.15)$ ,有了 $R$ 和 $A$ 之后,进行综合评判,评判公式为 $B = A \cdot R$ ,计算过程如下:

$$\begin{aligned} B &= A \cdot R \\ &= (0.3, 0.2, 0.2, 0.15, 0.15) \cdot R \\ &= (0.349, 0.460, 0.287, 0.358, 0.337) \end{aligned}$$

$B$ 中元素之和不为1,要进行归一化:

$$\begin{aligned} B &= (0.349, 0.460, 0.287, 0.358, 0.337) / (0.349 + \\ &0.460 + 0.287 + 0.358 + 0.337) \\ &= (0.195, 0.257, 0.160, 0.200, 0.188) \end{aligned}$$

最后进行综合评分:

$$\begin{aligned} S &= 0.195 \times 100 + 0.257 \times 90 + 0.160 \times 80 + \\ &0.200 \times 70 + 0.188 \times 60 \\ &= 80.71 \end{aligned}$$

#### 4 不同模糊评价方法效果对比

选取5口井<sup>[5]</sup>:金蓬35井、金遂12-1井、新蓬16井、川孝483井、金蓬30-1井,这5口井的井身结构、钻井液类型、前置液体系基本相同,运用本文提出的新的隶属函数组成的模糊评价方法对现场水泥浆体系进行评价,得到新的数据并算出误差百分比,与文献[4]中的方法进行对比,详细数据对比情况如表5。

表5 评价结果对比

井号	固井质量评分	文献[4]		本文	
		评分	误差/%	评分	误差/%
金蓬35	79.42	70.03	-11.82	81.12	+2.14
金遂12-1	85.48	70.97	-16.97	80.71	-5.58
新蓬16	89.84	79.46	-11.55	88.11	-1.93
川孝483	95.07	85.75	-9.80	90.60	-4.70
金蓬30-1	97.60	86.70	-11.17	91.13	-6.63
平均	89.48	78.58	-12.26	86.33	-3.34

由表5可见:对5口实际固井的水泥浆性能与固井质量的评判结果说明,本文提出的评价方法得到的结果明显与实际固井质量评分更接近。文献

[4]评分平均为78.58,而本文评分平均为86.33,文献[4]的模糊评分与实际固井质量评分的平均误差为偏低了12.26%,而本文只偏低了3.34%。实际固井质量评分平均为89.48。

#### 5 结论

(1)水泥浆的主要性能隶属函数适合正态、柯西和抛物线分布,引入其分布并通过计算和优选确定模糊分布的参数,可有效改进水泥浆综合性能的模糊评价方法。

(2)在其他条件基本相同的条件下,本文提出的新的水泥浆性能模糊评判方法拟合的固井质量评分与实际固井质量吻合较好,说明运用该方法能很好地分辨不同体系或同一体系不同配方的优劣,这是室内和现场优选外加剂及其水泥浆体系配方的实用和可靠的方法之一。

#### 参考文献:

- [1] M. J. 埃克诺米德斯, L. T. 沃特斯, S. 邓恩-诺曼. 油井建井工程[M]. 万仁溥, 张琪译. 北京: 石油工业出版社, 2001: 232 - 233.
- [2] 丁士东. 国内外固井技术现状及发展趋势[J]. 钻井液与完井液, 2002, 19(5): 35 - 39.
- [3] 丁保刚, 王忠福. 固井技术基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 53 - 58.
- [4] 严思明, 谷升高, 莫军, 等. 水泥浆体系综合性能模糊评价方法[J]. 天然气工业, 2007, 27(12): 89 - 92.
- [5] 严思明. 新型耐温油井水泥降失水剂体系的研究[D]. 四川成都: 西南石油大学, 2008.
- [6] 刘合香. 模糊数学理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1 - 20.
- [7] 刘林, 曹艳平, 王婷, 等. 应用模糊数学[M]. 陕西西安: 陕西科学技术出版社, 2008: 1 - 8.
- [8] 侯健, 陈月明. 基于模糊综合评判模型的蒸汽吞吐注采参数优化设计方法的研究[J]. 特种油气藏, 1997, 4(3): 15 - 21.
- [9] 熊钰, 孙雷, 孙良田, 等. 沈84块高凝油注水开发效果模糊综合评价[J]. 特种油气藏, 2001, 8(3): 49 - 52.
- [10] 李国锋, 秦玉英, 李哲, 等. 模糊分析方法在大牛地气田优选压裂酸化井层中的应用[J]. 特种油气藏, 2010, 17(5): 110 - 112.