

以抑制管柱结垢腐蚀为目标的注水井 水源选择方法研究及应用

张启龙, 许杰, 高斌, 李进, 龚宁

(中海石油(中国)有限公司天津分公司 海洋石油高效开发国家重点实验室, 天津 300459)

摘要: **目的** 减少注水管柱结垢腐蚀现象的发生, 解决常用的水质评价方法存在测量困难、人为经验影响大等问题, 提出一套以抑制注水管柱发生结垢腐蚀为目标的注水井水源选择方法。**方法** 基于渤海油田 7 个水样分析结果, 以水质的结垢腐蚀趋势为参考序列, 水质成分 (HCO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 的离子浓度) 为比较序列, 通过灰色关联度的方法研究各个离子成分对结垢腐蚀现象的敏感性。在此基础上, 利用模糊物元的方法, 对注水井水源选择的方法进行研究。**结果** 得到了渤海油田水质成分 (HCO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-}) 对注水管柱结垢的最优影响权重 (0.1964、0.1785、0.1753、0.1748、0.1706、0.1044), 在此基础上, 形成了一套注水井水源的快速选择方法。利用该方法对渤海 A 油田某注水井的三个水源 (1 号、2 号和 3 号水源) 的水质进行了分析, 计算得到的水源优劣排序为 2 号水源 > 1 号水源 > 3 号水源, 通过 SI 指数测定实验和挂片腐蚀实验验证了该选择方法的准确性。**结论** 该方法可应用于未来渤海油田注水井水质的选择, 对减少注水管柱发生结垢腐蚀现象具有较好的指导意义。

关键词: 注水井; 水质成分; 结垢腐蚀; 灰色关联度法; 模糊物元法

中图分类号: TG172 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2019)11-0290-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.11.032

Research and Application of Water Source Selection Method for Water Injection Well Aiming at Inhibiting Scaling and Corrosion of Pipe String

ZHANG Qi-long, XU Jie, GAO Bin, LI Jin, GONG Ning

(State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a set of water source selection methods for water injection well aiming at inhibiting scaling and corrosion of pipe string, in order to reduce the occurrence of scaling and corrosion and solve the problems in the commonly used evaluation methods for water quality, such as difficulty in measurement and great influence of human experience. Based on analysis results of seven water samples in Bohai oilfield, the sensitivity of each ion component to scaling corrosion phenomenon was studied by grey correlation degree with the scaling and corrosion trend of water quality as reference sequence and the ion concentration of water quality components (HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-}) as comparison sequence. Based of this, the method of water source selection for water injection wells was studied by means of fuzzy matter

收稿日期: 2019-02-15; 修订日期: 2019-04-28

Received: 2019-02-15; Revised: 2019-04-28

基金项目: “十三五”国家科技重大专项 (2016ZX05058-002); 国家自然科学基金项目 (51490652)

Fund: Supported by the "Thirteenth Five-Year" Major National Science and Technology Projects (2016ZX05058-002) and National Natural Science Foundation of China (51490652)

作者简介: 张启龙 (1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为石油完井工程设计和工具防腐。邮箱: zhangql40@cnooc.com.cn

Biography: ZHANG Qi-long (1988—), Male, Master, Engineer, Research focus: oil completion engineering design and tool antisepsis. E-mail: zhangql40@cnooc.com.cn

element method. The optimal influence weights (0.1964, 0.1785, 0.1753, 0.1748, 0.1706, 0.1044) of water quality components (HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-}) on scaling of water injection string were obtained. On this basis, a set of rapid selection method of water sources for water injection wells was formed, and the water quality of three water sources (No.1, No.2 and No.3) of a water injection well in Bohai A oilfield was analyzed by this method. The ranking of the water sources was “No.2 > No.1 > No.3” after calculation. Through SI index measurement experiment and scraper corrosion test, the accuracy of the selection method was verified. This method can be applied to water quality selection of injection wells in Bohai oilfield in the future, and has a good guiding significance for reducing scaling and corrosion of injection pipe string.

KEY WORDS: water injection well; water quality components; scaling corrosion; grey correlation analysis method; fuzzy matter-element method

中国各大油田的开发模式以注水开发为主,注水井具有排量高、数量多、重要性大等特点。目前管柱结垢腐蚀是渤海油田注水井面临的巨大问题^[1-3],管柱的结垢腐蚀会造成以下危害:结垢物质堵塞注水管柱,造成注入量达不到配注要求;管柱发生结垢腐蚀后,增加注水井修井频率,减小了注水时间,并增加了修井费用;结垢会在管柱内沉积,造成管柱的局部腐蚀,甚至穿孔,对注水井的寿命造成严重危害^[4-7]。造成注水井发生结垢腐蚀的因素有很多,如井下流体 pH 值的升高、井下温度的升高、井下压力的增加以及水质的原因等。其中最根本的原因还是注水水质的因素,因此注水井水源的水质选择至关重要。目前选择和判断水质是否容易发生结垢的方法主要用斯蒂夫-戴维斯饱和指数法(简称“SI 指数法”)、里兹那稳定指数法、帕科拉兹结垢指数法等。应用最广泛、认可度最高的是 SI 指数法,但该方法存在测量难度大、

步骤繁琐及涉及修正系数等问题^[8-9]。

基于以上问题,文中综合渤海油田的 7 个水样分析结果,基于灰色关联度的分析方法,分析了造成注水管柱发生结垢腐蚀现象的水质成分因素,并通过模糊物元的数学方法形成了一套注水井水源优选方法,对现场注水井的水源选择具有较好的指导意义。

1 注水管柱的结垢腐蚀

目前渤海油田 700 余口注水井中,约有 1/3 的井出现了管柱的结垢腐蚀现象。其中结垢腐蚀较为严重的井出现了环空带压现象,严重威胁着井口人员和设备的安全。将这些井的注水管柱取出后,发现这些井都发生了管柱的局部刺漏,如图 1 所示。发生这种现象的原因就是注水管柱受水质和井下环境的影响,发生了结垢和腐蚀反应。



图 1 结垢腐蚀造成的管柱穿孔

Fig.1 Pipe string perforation caused by scaling corrosion

其发生这种破坏反应的过程如下:由于注水水质较差,并且修井周期较长,水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子与 CO_3^{2-} 等发生化学反应,生成晶类物质(CaCO_3 、 MgCO_3 等),晶体堆积后形成金属表面的垢类物质;受到井下 CO_2 环境和水质中 HCO_3^- 的影响,金属表面发生阴阳极的氧化还原反应,其中阳极是 H^+ 和 HCO_3^- 得到电子发生还原反应,而阳极的管柱失去电子发生氧化反应,导致金属表面的腐蚀;水中的 Cl^- 具有较

强的穿透能力,其易吸附在金属壁面,导致金属材料的电化学腐蚀,从而加速薄弱金属面的腐蚀速率,如垢类物质与金属管柱的交界处;垢类物质在注水流速的冲击和周边金属界面腐蚀的共同作用下,发生表面剥离,导致了注水管柱的局部破坏,从而发生穿孔现象。因此管柱的结垢腐蚀现象与注水水质有着直接的关系,如何进行注水水源的选择对抑制管柱的结垢腐蚀现象有着十分重要的意义。

2 权重计算模型

进行注水井水质优选时,首先要对水质的成分进行测定,综合判断水源井的各个水质成分对管柱结垢腐蚀的影响。由于水质的成分组成较为复杂,采用灰色关联度的计算模型计算水质各个成分之间的敏感性关系,探究水质成分对套管或注水管柱的影响权重,辅助进行注水井水质的优选。

2.1 灰色关联度计算模型

灰色关联度分析法是基于灰色关联度的概念,采用符合系统行为特征的方法,寻求系统中各子系统(因素)间的数值关系,基于各个因素对系统的影响程度寻求量化描述。该方法目前在很多领域都有所应用,如航天、气象、土木等,其具体的分析步骤如下^[10-14]。

1) 确定参考序列和比较序列。首先确定描述系统特征行为的参考序列,以及由待评估的影响因素组成的比较序列。参考序列与比较序列如式(1)和(2)所示,其中比较序列中的各个因素要对反应系统行为的参考序列有一定的影响。

$$Y = \{Y(k) | k = 1, 2, \Lambda, n\} \quad (1)$$

$$X_i = \{X_i(k) | k = 1, 2, \Lambda, n\}, i = 1, 2, \Lambda, m \quad (2)$$

2) 无量纲化处理。为了消除参考序列和比较序列中各因素单位不同带来的影响,要对因素的单位进行无量纲化处理,即将各因素的单位转化为1。常见的方法主要有均值化、最大化、最小值化以及中心化等,不同无量纲化方法对结果可能有一定影响。

3) 关联度系数的计算。计算差序列 $\Delta_i = |y(k) - x_i(k)|$, 取差序列的最大值和最小值分别为 $\max_i \max_k |y(k) - x_i(k)|$ 和 $\min_i \min_k |y(k) - x_i(k)|$, 然后计算各因素的关联度系数序列, 见式(3)。得到关联度系数矩阵后, 对各个因素的关联度系数进行算术平均处理, 见式(4)。得到不同因素的灰色关联度 r_i , 用其描述各因素对系统的影响程度。

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |y(k) - x_i(k)| + 0.5 \max_i \max_k |y(k) - x_i(k)|}{|y(k) - x_i(k)| + 0.5 \max_i \max_k |y(k) - x_i(k)|} \quad (3)$$

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (4)$$

4) 权重的确定与敏感性排序。根据计算得到的各个因素的灰色关联度, 利用式(5)计算第 k 个比较序列的所占权重 R_k 。根据权重的大小关系, 可以得到不同比较序列的敏感性排序。

$$R_k = \frac{r_k}{\sum_{i=1}^n r_i} \quad (5)$$

2.2 参考序列与比较序列的确定

目前评价注水井结垢趋势最常用、最准确的方法是史蒂夫-戴维斯饱和指数(SI)法。实际井况证明, 渤海油田注水管柱的结垢腐蚀趋势与水质的SI值呈正相关, 即SI值越大, 井下管柱发生结垢腐蚀的趋势越大。因此选定水质的SI值为参考序列 X , 综合评价水质发生结垢腐蚀的风险, 在进行样本参数的计算时, 要保证SI参数的准确性。

水源井水质成分组成较为复杂, 其中与管柱结垢腐蚀相关的主要有 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等成分, 分别介绍其对管柱结垢腐蚀的影响^[5-6]。 Na^+ 和 K^+ 等盐离子的增加, 会增加 CaCO_3 和 MgCO_3 等结垢物质的溶解度。这是因为盐离子在静电作用的驱使下降低了垢离子的活性, 从而抑制结垢现象的发生。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等垢累离子在水中发生化学反应, 形成 MgCO_3 、 CaCO_3 和 CaSO_4 等结垢物质, 因此垢类离子对管柱发生结垢腐蚀现象有促进作用^[15]。矿化度离子(主要是 Cl^-)的存在强化了离子通路, 加速了金属管柱的电化学腐蚀作用, 其与管柱的腐蚀存在正相关的关系^[16-17]。基于以上分析, 选定以上6个成分含量($\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^-)为比较序列 $Y_1 \sim Y_6$, 综合评价这6个参数对水结垢腐蚀的影响。

2.3 模型的计算与分析

模型建立完毕后, 进行模型的求解。首先对渤海油田的7个水源井水样进行成分和SI指数的测定, 在确保各参数准确性的前提下, 得到了参考序列和比较序列的测量结果, 见表1。然后以均值化无量纲方法为例, 利用式(3)、(4)和(5)对各比较序列的权重进行计算, 通过比较权重的大小得到了各因素的敏感性排序, 计算结果见表2。

灰色关联度中关键的一步为参数的无量纲化处理, 不同无量纲化的方法对结果有一定的影响。常见的无量纲化方法主要有均值化法、中心化法、最大值法和最小值法, 这几种方法的计算公式见表3。按照以上四种无量纲化方法进行灰色关联度的计算, 计算结果如图2所示。可以看出, 不同的无量纲化方法对灰色关联度的计算有一定的影响, 因为灰色关联度法是通过比较不同因素关联度大小来判断敏感性的一种数据分析方法, 其准确性的判断标准就是关联度的差异性, 其差异性越大, 则证明结果的准确性越精确^[18]。因此通过计算各种处理方法的标准差和极差来判断各种方法的准确性, 计算结果见表4。通过比较标准差和极差, 最优的处理方法是最大化法, 因此最优敏感性排序为 $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{SO}_4^{2-}$, 灰色关联度分别为0.1964、0.1785、0.1753、0.1748、0.1706、0.1044。根据分析, HCO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 是造成管柱发生结垢腐蚀的最主要成分因素, 因此可以通过物理吸附或化学药剂的注入减小这些离子的浓度, 从而降低结垢腐蚀发生的可能性。

表 1 参考序列和比较序列的测量结果
Tab.1 Measurement results of reference sequence and comparison sequence

Water sample number	Reference sequence	Comparison sequence/(mg·L ⁻¹)					
		Y ₁ (Na ⁺ +K ⁺)	Y ₂ (Ca ²⁺)	Y ₃ (Mg ²⁺)	Y ₄ (Cl ⁻)	Y ₅ (SO ₄ ²⁻)	Y ₆ (HCO ₃ ⁻)
Bohai A Oilfield	SI index <i>X</i>						
1#	1.33	3031.86	467.33	184.35	5858.47	61.16	229.44
2#	1.43	3685.76	467.32	271.18	6721.34	96.55	276.68
3#	1.38	3381.81	408.51	255.20	6210.59	53.03	254.71
4#	0.67	1808.72	274.15	130.84	3536.85	62.64	122.65
5#	1.62	3667.35	568.01	318.28	6895.74	69.34	295.33
6#	1.54	3526.70	486.46	269.44	7156.79	49.81	294.93
7#	1.20	3895.00	479.00	291.00	7552.00	45.00	203.00

表 2 参考序列的敏感性计算结果
Tab.2 Sensitivity calculation of reference sequences

Comparison sequence	Correlation degree	Grey correlation degree	Sensitivity ranking
Y ₁ (Na ⁺ +K ⁺)	0.7515	0.1691	5
Y ₂ (Ca ²⁺)	0.7632	0.1721	2
Y ₃ (Mg ²⁺)	0.7647	0.1717	3
Y ₄ (Cl ⁻)	0.7541	0.1697	4
Y ₅ (SO ₄ ²⁻)	0.5309	0.1194	6
Y ₆ (HCO ₃ ⁻)	0.8800	0.1980	1

表 3 不同无量纲化方法的计算公式
Tab.3 Calculating formulas of different dimensionless methods

Dimensionless methods	Calculating formulas	Remarks
Averaging method	$x_i(k) = y_i(k) \sqrt{\bar{y}_i}$	\bar{y}_i represents the average of the sample, the same below
Centralization method	$x_i(k) = \frac{y_i(k) - \bar{y}_i}{\sigma_i}$	σ_i represents the standard deviation of the sample
Maximum method	$x_i(k) = y_i(k) / \max \{y_i(k)\}$	$\max \{y_i(k)\}$ represents the maximum of the sample
Minimum method	$x_i(k) = y_i(k) / \min \{y_i(k)\}$	$\min \{y_i(k)\}$ represents the minimum of the sample

表 4 不同无量纲化方法的计算结果
Tab.4 Calculation results by different dimensionless methods

Dimensionless methods	Standard deviation	Extreme deviation	Sequencing
Averaging method	0.103 940 112	0.349 165 887	3
Centralization method	0.098 886 444	0.326 498 661	4
Maximum method	0.130 892 055	0.414 894 15	1
Minimum method	0.113 729 505	0.377 871 126	2

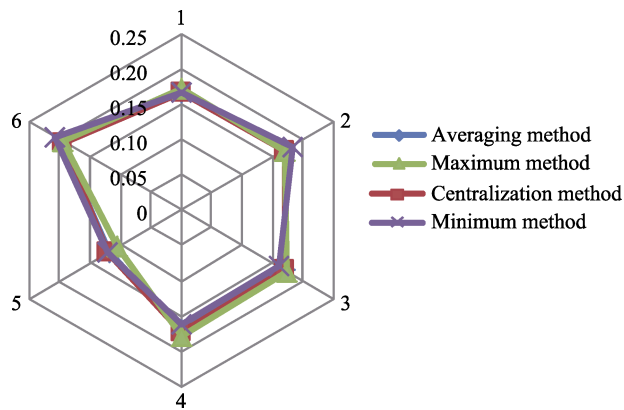


图 2 不同无量纲化方法的计算结果
Fig.2 Calculation results of different dimensionless methods

3 注水井水源优选方法研究

注水井进行水质优选时，由于水质含量种类复杂，不同成分含量可能导致不同的选择结果，需要对各成分因素进行综合决策，选择发生结垢腐蚀可能性最低的水质进行注水井的注入，以减少由于管柱腐蚀破坏造成的不必要损失。基于以上分析，提出基于模糊物元理论的注水井水源优选方法。该方法在综合了造成管柱结垢腐蚀的多个成分因素后进行水质选择，克服了单因素考虑单一以及 SI 指数测试困难等问题。

3.1 模糊物元模型的建立

模糊物元是一种将模糊数学方法和物元分析方

法相结合的数学分析方法,其是将众多影响事物结果的因素进行综合分析,量化每个事物的优选结果,从而得到事物最优解决方案的方法。以注水井最优水源选择方法为目标,形成一套综合水质优选方法^[19-22],

计算流程如图 3 所示。由于该模型的基础是水质成分对注水管柱结垢腐蚀的影响权重,因此该方法应用于其他油田或区块时,首先要利用第 2 节的方法对权重重新计算。

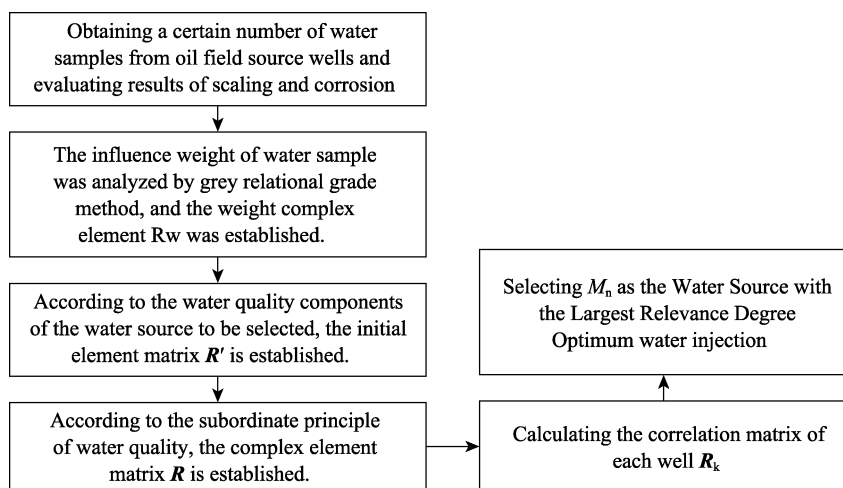


图 3 水质优选方法计算流程
Fig.3 Calculation flow of water quality optimization method

首先建立以“分析事物 M 、事物特征 C 、特征值 X ”为基本元的初始元矩阵 R' , 如式 (6) 所示。本文中的分析事物 M 指的是待优选的水样, 事物特征 C 包括第 1 节分析的 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等 6 种成分的含量, x_{mn} 表示的含义是第 m 个分析事物的第 n 个特征的值。

$$R' = \begin{bmatrix} M_1 & M_1 & \cdots & M_m \\ C_1 & x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{m1} \\ C_2 & x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ C_n & x_{1n} & x_{2n} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

利用特征值 X 计算模糊量 $\mu(x)$, 计算 $\mu(x)$ 时有两种隶属原则: 当特征值 X 越大越优时, $\mu(x)$ 的计算式如式 (7) 所示; 当特征值 X 越小越优时, $\mu(x)$ 的计算式如式 (8) 所示。本文的 6 个事物特征中, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 的含量为越大越优型, 其余特征 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 含量) 都为越小越优型。这样就得到了复合元模型 R , 如式 (9) 所示。

$$\mu(x_{mn}) = \frac{x_{mn} - x_{mn \min}}{x_{mn \max} - x_{mn \min}} \quad (7)$$

$$\mu(x_{mn}) = \frac{x_{mn \max} - x_{mn}}{x_{mn \max} - x_{mn \min}} \quad (8)$$

$$R = \begin{bmatrix} M_1 & M_1 & \cdots & M_m \\ C_1 & \mu(x_{11}) & \mu(x_{21}) & \cdots & \mu(x_{m1}) \\ C_2 & \mu(x_{12}) & \mu(x_{22}) & \cdots & \mu(x_{m2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ C_n & \mu(x_{1n}) & \mu(x_{2n}) & \cdots & \mu(x_{mn}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

建立各个事物特征 C 的权重复合元 R_w , 即建立各个因素的权重。建立权重的方法有很多, 例如层次分析法、专家经验法、统计法等, 该例中使用 1.3 节灰色关联度法建立的权重, 因此 6 个复合元 $R_1 \sim R_6$ 分别为 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 所占的权重, 因此建立的权重复合元 R_w 如式 (10) 所示。

$$R_w = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & \cdots & R_n \\ W_1 & W_2 & \cdots & W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Na}^+ + \text{K}^+ & \text{Ca}^{2+} & \text{Mg}^{2+} & \text{Cl}^- & \text{SO}_4^{2-} & \text{HCO}_3^- \\ 0.1748 & 0.1753 & 0.1706 & 0.1785 & 0.1044 & 0.1964 \end{bmatrix} \quad (10)$$

最后利用计算得到的复合元模型 R 和权重复合元 R_w 进行关联度向量 R_k 的计算, 计算公式如式 (11) 所示, 按照水质 $M_1 \sim M_n$ 的关联度大小进行优劣排序, 从中选出最优的水质作为注水井的最优水源。

$$R_k = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_n \\ \sum_{i=1}^6 \oplus \omega_i \mu_{1i} & \sum_{i=1}^6 \oplus \omega_i \mu_{2i} & \cdots & \sum_{i=1}^6 \oplus \omega_i \mu_{ni} \end{bmatrix} \quad (11)$$

3.2 实例计算与验证

已知渤海 A 油田某井进行注水作业, 目前有三个砂体的水源可以作为注水水源。首先对三个水源的水质进行成分测定, 得到了三个水源的成分含量, 见表 5。然后利用 3.1 节建立的模糊物元模型进行水源的选择。

首先根据式 (6) 建立水源优选模型的初始元矩阵 R' , 如式 (12) 所示。再利用式 (7) ~ (9) 计算

表 5 待优选水源水质成分
Tab.5 Water quality components of water sources to be optimized

Bohai A Oilfield	Mass concentration/(mg·L ⁻¹)					
	Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
No.1 water source	3041.26	201.87	14.83	5031.35	30.49	205.7
No.2 water source	2643.3	176.72	9.68	4060.34	45.07	347.53
No.3 water source	3381.81	408.51	255.2	6210.59	53.03	254.71

得到复合元模型 R ，如式（13）所示。最后结合如式（10）所示的权重复合物元 R_w ，利用式（11）计算得到最终的关联度向量 R_k ，如式（14）所示。由结果可知，三个水源的关联度系数分别为 0.5840、0.7577、0.3033，因此该水源优选模型得到的水源优劣排序为 2 号水源 > 1 号水源 > 3 号水源，2 号水源作为该井的最优水源。为了验证该模型优选结果的准确性，利用 SI 指数测量实验对三个水源的 SI 值进行测定，其结果分别为 1.2034、0.8219、1.38，与模糊物元模型优选的顺序一致。

$$R' = \begin{bmatrix} M_1 & M_1 & \cdots & M_m \\ C_1 & x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{m1} \\ C_2 & x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ C_n & x_{1n} & x_{2n} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 \\ \text{Na}^+ + \text{K}^+ & 3041.26 & 2643.3 & 3381.81 \\ \text{Ca}^{2+} & 201.87 & 176.72 & 408.51 \\ \text{Mg}^{2+} & 14.83 & 9.68 & 255.2 \\ \text{Cl} & 5031.35 & 4060.34 & 6210.59 \\ \text{SO}_4^{2-} & 30.49 & 45.07 & 53.03 \\ \text{HCO}_3^- & 205.7 & 347.53 & 254.71 \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$R = \begin{bmatrix} M_1 & M_1 & \cdots & M_m \\ C_1 & \mu(x_{11}) & \mu(x_{21}) & \cdots & \mu(x_{m1}) \\ C_2 & \mu(x_{12}) & \mu(x_{22}) & \cdots & \mu(x_{m2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ C_n & \mu(x_{1n}) & \mu(x_{2n}) & \cdots & \mu(x_{mn}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 \\ \text{Na}^+ + \text{K}^+ & 0.5389 & 0 & 1 \\ \text{Ca}^{2+} & 0.9871 & 1 & 0 \\ \text{Mg}^{2+} & 0.6795 & 1 & 0 \\ \text{Cl} & 0.5484 & 1 & 0 \\ \text{SO}_4^{2-} & 1 & 0.3532 & 0 \\ \text{HCO}_3^- & 0 & 1 & 0.6544 \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$R_k = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_n \\ \sum_1^6 \oplus \omega_i \mu_{1i} & \sum_1^6 \oplus \omega_i \mu_{2i} & \cdots & \sum_1^6 \oplus \omega_i \mu_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 \\ 0.5840 & 0.7577 & 0.3033 \end{bmatrix} \tag{14}$$

为了进一步证明预测结果的准确性，利用高压釜泡水实验对待选水源中的 1 号和 2 号水源进行结垢腐蚀评价实验。首先把相同材质（N80）的金属挂片放入无水乙醇浸泡约 5 min，取出擦干后进行称量。然后将挂片和待测水源放入高压釜中，抽空氧气后，注入一定配比的氮气和二氧化碳至预设压力，温度调至 85 ℃，48 h 去除金属挂片。表面处理（去除金属表面的垢类物质）进行称量，得到实验前后的质量差 Δm ，计算得到了挂片在不同水质下的结垢腐蚀速率。1 号和 2 号水源分别进行两组实验，取平均值作为实验结果，实验条件和结果见表 6 和图 4。从结果可知，2 号水源的平均腐蚀速率和腐蚀程度比 1 号低，与优选结果一致。

综上所述，SI 指数和挂片腐蚀实验同时验证了该注水井水源优选方法的准确性。其有望成为一种快速准确的注水井水源选择方法，从根本上减小了注水管

表 6 实验条件与结果
Tab.6 Experimental conditions and results

Water source number	Scraper number	Texture of material	Pressure condition	Corrosion rate / (mm·a ⁻¹)	Average corrosion rate / (mm·a ⁻¹)
No. 1 water source	1#	N80	0.4 MPa CO ₂ + 4.6 MPa N ₂	1.3113	1.5174
	2#			1.7236	
No. 2 water source	3#	N80	0.4 MPa CO ₂ + 4.6 MPa N ₂	0.9096	0.9326
	4#			0.9556	

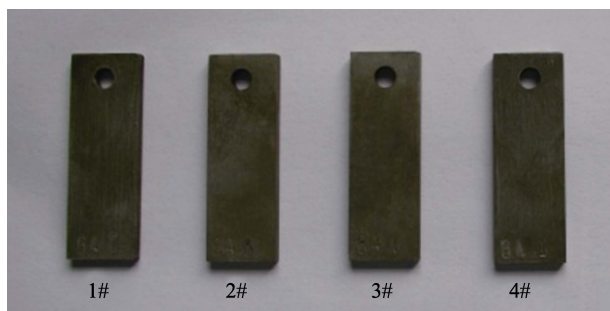


图 4 金属刮片腐蚀结果照片

Fig.4 Pictures of corrosion result of metal scraper

柱发生结垢腐蚀的可能性,降低了相关不必要资金的浪费,具有较好的指导意义。

4 结论

1) 综合渤海油田的 7 个水样分析结果,基于灰色关联度的分析方法,分析了造成注水井管柱发生结垢腐蚀现象的水质成分因素,得到了最优敏感性排序: $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{SO}_4^{2-}$ 。最优权重分别为: 0.1964、0.1785、0.1753、0.1748、0.1706、0.1044。

2) 根据灰色关联度分析结果, HCO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 是造成管柱结垢腐蚀的最主要水质因素,可以通过物理吸附或化学药剂的注入等方法减小其浓度,以减小结垢腐蚀发生的可能性。

3) 在最优权重的基础上,形成了一套基于模糊物元理论的注水井水源优选方法,并利用该方法对渤海 A 油田某井的注水水源进行了优选。

4) 利用 SI 指数测定实验和挂片结垢腐蚀实验,得到了与注水井水源优选方法相同的优选结果,验证了该方法的准确性,证明了该方法在注水水源选择方面具有较好的指导意义。

参考文献:

- [1] 王永强. 南堡油田注水井结垢及治理对策研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
WANG Yong-qiang. Scaling of water injection wells in nanpu oilfield and its control measures[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [2] 李功, 杨小婕, 耿娜, 等. 渤海油田油水相对渗透率和水驱油效率研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(14): 61-65.
LI Gong, YANG Xiao-jie, GENG Na, et al. Study on oil-water relative permeability and water displacement efficiency in bohai oilfield[J]. Journal of Yangtze University (Natural science edition), 2015, 12(14): 61-65.
- [3] 刘洪杰, 陈鸿, 王海更, 等. 海上复杂断块油田合理注水压力研究[J]. 断块油气田, 2015, 22(2): 228-233.
LIU Hong-jie, CHEN Hong, WANG Hai-geng, et al. Study on reasonable water injection pressure of offshore complex fault-block oilfield[J]. Fault-block oil and gas field, 2015, 22(2): 228-233.
- [4] 吴萌, 管丽, 涂乙, 等. 渤海 SZ36-1 油田注水结垢趋势预测与试验验证[J]. 化学工程与装备, 2009(9): 15-16.
WU Meng, GUAN Li, TU Yi, et al. Study of water wells scaling products and mechanism in SZ36-1 oilfield[J]. Chemical engineering & equipment, 2009(9): 15-16.
- [5] 王婷婷. 海上油田碳酸盐垢形成的影响因素及结垢预测[J]. 化学工程师, 2017, 31(4): 71-73.
WANG Ting-ting. Factors influencing the formation of calcium carbonates scale and prediction of scaling in offshore oilfields[J]. Chemical engineer, 2017, 31(4): 71-73.
- [6] 甄宝生, 方培林, 高怡明, 等. 金县 1-1-A1w 水源井腐蚀结垢机理分析[J]. 海洋石油, 2017, 37(3): 29-32.
ZHEN Bao-sheng, FANG Pei-lin, GAO Yi-ming, et al. Mechanism analysis of acaring and corrosion in water source well JX1-1-A1w[J]. Offshore oil, 2017, 37(3): 29-32.
- [7] AMIRI M, MOGHADASI J, PORDEL M. The effect of temperature, pressure, and mixing ratio of injection water with formation water on barium sulfate scale formation in Siri oilfield[J]. Petroleum science and technology, 2012(8): 635-645.
- [8] 刘絮飞, 王奇峰, 王久生, 等. 水质指数法在火电厂循环水腐蚀结垢预防中的应用[J]. 吉林电力, 2016, 44(6): 8-10.
LIU Xu-fei, WANG Qi-feng, WANG Jiu-sheng, et al. Application of water quality index proposed to evaluate the tendency of corrosion and scaling caused by circulating water treatment[J]. Jilin electric power, 2016, 44(6): 8-10.
- [9] 祝安, 肇启明, 于永辉, 等. 应用水垢指数法对贵阳污水热能适用性的分析[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(7): 1609-1612.
ZHU An, ZHAO Qi-ming, YU Yong-hui, et al. Analysis of sewage heat application by scale deposit index in Guiyang[J]. Hubei agricultural sciences, 2010, 49(7): 1609-1612.
- [10] 晋盛武, 吴鹏, 金菊良. 安徽典型城市环境 K 线形态及灰色关联度分析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(7): 2068-2077.
JIN Sheng-wu, WU Peng, JIN Ju-liang. Environmental Kuznets curve (EKC) shape features in typical cities of Anhui Province and analysis of gray correlation degree[J]. Acta scientiae circumstantiae, 2013, 33(7): 2068-2077.
- [11] 张希, 唐红涛, 李瑞莎, 等. 基于灰色关联度的鲜水河断裂活动特征与大震关系研究[J]. 地震研究, 2012, 35(4): 500-505.
ZHANG Xi, TANG Hong-tao, LI Rui-sha, et al. Research on activity features of Xianshuihe Fault and its relationship with great earthquakes based upon grey relation degree method[J]. Journal of seismological research, 2012, 35(4): 500-505.

(下转第 311 页)

- 450-455.
- [15] WANG Y, LI H, FU Q, et al. SiC/HfC/SiC ablation resistant coating for carbon/carbon composites[J]. Surface and coatings technology, 2012, 206(19-20): 3883-3887.
- [16] WANG Y, CHEN Z, YU S J. Ablation behavior and mechanism analysis of C/SiC composites[J]. Journal of materials research and technology, 2016, 5(2): 170-182.
- [17] 何洪庆, 严红. EPDM 的烧蚀模型[J]. 推进技术, 1999, 20(4): 36-39.
HE Hong-qing, YAN Hong. Ablation model of EPDM[J]. Journal of propulsion technology, 1999, 20(4): 36-39.
- [18] 邹杰. 富氧环境下 C/SiC 复合材料的非稳态烧蚀研究[D]. 哈尔滨市: 哈尔滨工程大学, 2014.
ZOU Jie. Transient ablation investigation of C/SiC composite material in oxygen-rich environment[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- [19] 王玲玲, 吴玉燕, 嵇阿琳, 等. 固体冲压发动机环境下 C/C-SiC 喷管的烧蚀行为及重复性使用分析[J]. 复合材料学报, 2017, 34(7): 1569-1574.
WANG Ling-ling, WU Yu-yan, JI A-lin, et al. Ablation behavior and repetitive-use analysis of the C/C-SiC composites nozzle for solid propellant ramjet[J]. Acta materiae compositae sinica, 2017, 34(7): 1569-1574.
- [20] CROSS P G, BOYD I D. Two-dimensional modeling of ablation and pyrolysis with application to rocket nozzles[J]. Journal of spacecraft and rockets, 2017, 54(1): 212-224.
- [21] SUN W, XIONG X, HUANG B Y, et al. ZrC ablation protective coating for carbon/carbon composites[J]. Carbon, 2013, 77(14): 25-30.
- [22] LI K Z, SHEN X T, LI H J, et al. Ablation of the carbon/carbon composite nozzle-throats in a small solid rocket motor[J]. Carbon, 2011, 49(4): 1208-1215.
- [23] LI K, LIU G, ZHANG Y. Ablation properties of HfB₂ coatings prepared by supersonic atmospheric plasma spraying for SiC-coated carbon/carbon composites[J]. Surface and coatings technology, 2019, 357: 48-56.
-
- (上接第 296 页)
- [12] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.
DENG Ju-long. Grey system theory tutorial[M]. Wuhan: Central China Polytechnic University Press, 1990.
- [13] LIN Chin-tsai, CHANG Che-wei, CHEN Chie. The worst ill-conditioned silicon wafer slicing machine detected by using grey relational analysis[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2006, 31(4): 388-395.
- [14] 钟海智, 陈富强, 陈哲华, 等. 基于灰色关联度分析的广东省林业产业结构研究[J]. 林业调查规划, 2018, 43(4): 145-149.
ZHONG Hai-zhi, CHEN Fu-qiang, CHEN Zhe-hua, et al. Forestry industrial structure in Guangdong Province based on grey relational analysis[J]. Forest inventory and planning, 2018, 43(4): 145-149.
- [15] ODDO J E, TOMSON M B. Simplified calculation of CaCO₃ Saturation at high temperatures and pressures in brine solutions[J]. Journal of petroleum technology, 1982, 34(7): 1583-1590.
- [16] 王晓鹏, 王啸, 修海媚, 等. 渤海某油田 F 井旁路管腐蚀失效研究[J]. 表面技术, 2016, 45(5): 104-110.
WANG Xiao-peng, WANG Xiao, XIU Hai-mei, et al. Corrosion failure of bypass pipe of well F in bohai oilfield[J]. Surface technology, 2016, 45(5): 104-110.
- [17] 李桢, 孙阳超, 郭蒙蒙, 等. N80、45[#]、20[#]钢在京 11 区块注入水中的腐蚀规律[J]. 表面技术, 2016, 45(11): 99-105.
LI Zhen, SUN Yang-chao, GUO Meng-meng, et al. Corrosion law of N80, 45[#] and 20[#] steels in injected water of Jing 11 block[J]. Surface technology, 2016, 45(11): 99-105.
- [18] 李炳军, 朱春阳, 周杰. 原始数据无量纲化处理方法对灰色关联序的影响[J]. 河南农业大学学报, 2002, 36(2): 199-202.
LI Bing-jun, ZHU Chun-yang, ZHOU Jie. Effects of non-dimensional quantities of original data on grey incidence order[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2002, 36(2): 199-202.
- [19] 张立刚, 闫立鹏, 曲思凝, 等. 基于模糊物元法的煤层气有利开发区优选[J]. 数学的实践与认识, 2018, 48(14): 215-221.
ZHANG Li-gang, YAN Li-peng, QU Si-ning, et al. The CBM favorable zone selection based on fuzzy matter-element method[J]. Mathematics in practice and theory, 2018, 48(14): 215-221.
- [20] 李静, 张雪娜, 包卓. 基于模糊物元的水利水电工程绿色施工评价[J]. 水电能源科学, 2017, 35(3): 158-162.
LI Jing, ZHANG Xue-na, BAO Zhuo. Study on green construction evaluation of water resources and hydropower projects based on fuzzy matter-element theory[J]. International journal hydroelectric energy, 2017, 35(3): 158-162.
- [21] 张玄奇. 模糊物元精细评价方法在油水井酸化选井选层中的应用[J]. 兰州大学学报, 2004(5): 83-86.
ZHANG Xuan-qi. The application of a fuzziness unit fine evaluation method in selecting a well and a layer of acidification[J]. Journal of Lanzhou University (Natural science), 2004(5): 83-86.
- [22] 杨斯玲, 杨小云, 刘应宗. 模糊物元模型在生态林项目效益评价中的应用研究[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2013, 15(3): 37-41.
YANG Si-ling, YANG Xiao-yun, LIU Ying-zong. Application of fuzzy matter-element model to the benefit evaluation of ecological forestry project[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China (Social sciences edition), 2013, 15(3): 37-41.