

说明书

一种钻井完井堵漏材料定量评分优选方法

技术领域

本发明属于漏失控制技术领域，涉及一种基于层次分析法的钻井完井堵漏材料定量评分优选方法。

背景技术

漏失性地层工作液大量漏失增加了油气田开发的钻井完井成本和建井周期甚至可能引发卡钻等事故，这严重影响了油气资源的勘探开发进程，该问题一直是困扰国内外石油勘探开发的重大技术难题，至今未能完全解决。

作为补充，漏失控制是解决地层工作液漏失的主要方法之一，然而随着漏失控制技术的不断发展，堵漏材料也变得多种多样。现如今井况复杂，针对不同地层的漏失需要选择不同的堵漏材料，而研究人员往往是凭借经验或者是经过大量的实验后选择的堵漏材料，到最后还不能确定所选择材料是否为最优材料，而目前没有统一的堵漏材料选择标准或方法。

发明内容

为了解决上述技术问题，本发明提供了一种基于层次分析法的钻井完井堵漏材料定量评分优选方法，对钻井完井堵漏材料进行评分，为研究人员堵漏配方中堵漏材料的选择提供依据。

本发明所采用的技术方案是：一种钻井完井堵漏材料定量评分优选方法，包括以下步骤：

步骤 1：获取钻井完井堵漏材料的性能参数，所述的性能参数包括：力学参数、化学参数和几何参数，其中力学参数包括但不限于摩擦系数、抗压能力、抗磨蚀能力和纤维抗拉强度；化学参数包括但不限于酸溶率和抗温能力；几何参数包括但不限于形状、纤维长径比、圆球度和粒度分布；所述关键性能参数的提取依据包括但不限于漏失控制效果预测模型，并根据漏失层具体地质情况从性能参数中提取；

步骤 2：对步骤 1 获取的关键性能参数进行排序，并确定其每两个关键性能参数之间的相对重要程度。其中，关键性能参数的排序是由研究人员根据具体情况和经验进行主观性上的定性排序，重要程度的标度由研究人员根据具体情况和经验进行标度；

步骤 3：利用层次分析法计算每种关键性能参数的权重；

步骤 4：获取现有堵漏材料的关键性能实验参数并对其进行评价：根据制定

说明书

的参数评价标准，将现有堵漏材料的关键性能参数划分为高、较高、中等、较低和低等五个等级，并对应不同的分值；

步骤 5：根据步骤 3 和步骤 4 计算出各现有堵漏材料的综合得分；

步骤 6：根据步骤 5 计算的现有材料的综合得分情况，选出得分最高的即为优选材料，或在考虑堵漏材料经济成本因素下，得分按从高到底排序位于前 5% 的材料。

进一步的，步骤 1 中漏失控制效果预测模型为：

$$P_z = \frac{a \left(1 - \phi - \frac{A_f}{A} \right) k_p \varepsilon_p \tan \delta_1}{\Delta H \pi d_p^2} + 2P_c \left(\frac{A_f}{A} \right) \left(\frac{1 - \sin \delta_1 \sin(\delta_1 - 2\theta_i)}{3\pi \cos^2 \delta_1} \right) \left(\frac{l_f}{d_f} \right) \tan \delta_2 \sin a (\cos \theta + \sin \theta \tan \delta_1)$$

$$\text{其中： } \theta = \arcsin \frac{\sin \theta_i}{1 + 2 \left(\frac{P_c'}{E_f} \right) \left(\frac{1 - \sin \delta_1 \sin(\delta_1 - 2\theta_i)}{\cos^2 \delta_1} \right) \left(\frac{l_f}{d_f} \right) \tan \delta_2 \sin \theta_i}$$

其中： P_z —封堵承压能力，表征漏失控制效果，MPa； ΔH —裂缝封堵层剪切破坏部分高度（mm）； W —封堵裂缝宽度，mm； H —裂缝高度，mm； h —封堵层高度，mm； ϕ —封堵层孔隙度，%； A_f —横截面上纤维所占面积，mm²； A —横截面总面积，mm²； k_p —颗粒材料刚度（N/mm）； ε_p —颗粒接触形变，mm； E_f —纤维弹性模量，MPa； P_c —裂缝闭合压力，MPa； P_c' —裂缝水平向压力，MPa； E_f —纤维弹性模量，MPa； δ_1 —颗粒表面摩擦角，°； δ_2 —纤维表面摩擦角，°； δ_3 —封堵层—裂缝面间摩擦角，°； d_p —颗粒平均直径，mm； l_f —纤维长度，mm； α —纤维初始倾斜角，°； d_f —纤维直径，mm； θ_i —纤维初始倾斜角，°； θ —纤维剪切后倾斜角，°； σ_{fc} —纤维抗拉强度，MPa； a —封堵层长度，mm。

进一步的，步骤 3 的具体操作过程为：

3.1 首先用统一标准对同一层内元素的相对重要程度两两进行比较，建立判断矩阵。漏失层段各关键性能参数的判断矩阵如下：

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1j} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{i1} & b_{i2} & \cdots & b_{ij} \end{bmatrix}$$

$$\text{式中： } b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当 } i = j \\ \frac{1}{b_{ji}}, & \text{当 } i \neq j \end{cases} \text{表示参数 } i \text{ 相对于参数 } j \text{ 的重要程度的比例；}$$

说明书

其中各项关键性能参数间重要程度比例标度如下表所示：

标度	各参数间重要程度
1	参数 i 和参数 j 具有同等重要性
3	参数 i 比参数 j 稍微重要
5	参数 i 比参数 j 明显重要
7	参数 i 比参数 j 十分重要
9	参数 i 比参数 j 极端重要
2、4、6、8	当相对重要程度介于相邻重要程度之间是取中值

步骤 3.2：将判断矩阵的每一列元素归一化处理，其元素的一般项为

$$\overline{b}_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^n b_{ij}}, (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

其中， b_{ij} 表示判断矩阵第 i 行第 j 列的元素，n 表示判断矩阵阶数；

步骤 3.3：对各列归一化的判断矩阵，按行相加，即

$$\overline{W}_i = \sum_{j=1}^n \overline{b}_{ij}, (j = 1, 2, \dots, n)$$

步骤 3.4：向量 $\overline{W} = [\overline{W}_1, \overline{W}_2, \dots, \overline{W}_j]$ ($j=1, 2, \dots, n$)，把向量 \overline{W} 归一化处理所得结果即为所求特征向量，即

$$W_j = \frac{\overline{W}_j}{\sum_{j=1}^n \overline{W}_j}, (j = 1, 2, \dots, n)$$

特征向量 W 中的元素即为对应参数的权重；

步骤 3.5：通过判断矩阵和特征向量计算最大特征根，即

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(BW)_i}{nW_j}$$

其中， $(BW)_i$ 表示向量的第 i 个元素；

步骤 3.6：计算判断矩阵的一致性，并检验；

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

说明书

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

其中 CI 表示一致性参数，RI 表示随机一致性参数如下表所示。

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.94	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

当 $CR < 0.1$ 时，则认为判断矩阵的不一致性程度在容许范围内，此时判断矩阵的特征向量即为权向量，否则，应返回步骤 3.1，调整两元素相对重要程度的判断值。直至满足一致性条件为止。

进一步的，所述步骤 4 中关键性能参数等级与分值的关系如下表所示：

分值	10	8	6	4	2
关键性能参数等级	高	中等偏高	中等	中等偏低	低

同时通过对大量堵漏材料性能参数评价得出性能参数评价表，适用于所有漏失地层，部分性能参数评价表如下图所示：

性能参数	参数评价				
圆球度	≤ 0.3	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-0.9	> 0.9
	低	中等偏低	中等	中等偏高	高
摩擦系数	≤ 0.5	0.5-0.8	0.8-1.1	1.1-1.4	> 1.4
	低	中等偏低	中等	中等偏高	高
抗压能力	> 0.3	0.2-0.3	0.1-0.2	0.05-0.1	≤ 0.05
	低	中等偏低	中等	中等偏高	高
抗磨蚀能力	> 0.3	0.2-0.3	0.1-0.2	0.05-0.1	≤ 0.05
	低	中等偏低	中等	中等偏高	高
纤维长径比	≤ 100	100-200	200-400	400-600	> 600
	低	中等偏低	中等	中等偏高	高
可溶率	≤ 0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	> 0.8
	低	中等偏低	中等	中等偏高	高
粒度 抗温能力	> 0.3	0.2-0.3	0.1-0.2	0.05-0.1	≤ 0.05
	低	中等偏低	中等	中等偏高	高
强度 抗温能力	> 0.3	0.2-0.3	0.1-0.2	0.05-0.1	≤ 0.05
	低	中等偏低	中等	中等偏高	高

进一步的，所述步骤 5 中各堵漏材料的综合得分计算公式为：

$$S = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) \phi_i(x)$$

其中 S 表示堵漏材料或堵漏配方的最终评分， $\varphi_i(x)$ 和 $\phi_i(x)$ 分别表示各关

说明书

键性能参数的权重和对应参数的得分。

对于现有堵漏技术，本发明的有益效果是：

(1) 基于层次分析法的堵漏材料定量评分优选方法，能够系统的考虑漏失层段的地质情况和漏失情况，为研究人员提供科学合理的堵漏材料选择依据，节约实验成本和时间，避免研究人员盲目选择堵漏材料。

(2) 基于对大量堵漏材料性能参数评价而得出的性能参数评价表，基于特定漏失地层而选定的关键性能参数，考虑漏失层段对堵漏材料的性能要求，保证了评价体系的准确性和优越性。

(3) 利用层次分析法建立评分体系，计算堵漏材料各性能参数权重，并通过一致性检验保证结果的准确性。

附图说明

图 1：本发明实施例的递阶层次结构模型示意图；

图 2：具体实施案例中堵漏材料优选层次结构；

图 3：层次分析法结构图。

具体实施方式

为了方便本领域普通技术人员理解和实施本发明，下面结合图及实施例对本发明作进一步的详细描述，应当理解，此处所述的实施示例仅用于说明和解释本发明，并不用于限定本发明。

本发明提供一种基于层次分析法的钻井完井堵漏材料定量评分方法，包括以下步骤：

步骤 1：提取钻井完井堵漏材料性能参数；

根据钻井完井漏失控制机理和漏失控制效果预测模型，确定漏失层段对堵漏材料的性能要求，进而从性能参数中提取出漏失层所需钻井完井堵漏材料的关键性能参数，漏失控制效果预测模型可参照但不限于以下公式，相关性能参数包括但不限于表 1 中所列的几何、力学和化学参数。

$$P_z = \frac{a \left(1 - \phi - \frac{A_f}{A} \right) k_p \varepsilon_p \tan \delta_1}{\Delta H \pi d_p^2} + 2P_c \left(\frac{A_f}{A} \right) \left(\frac{1 - \sin \delta_1 \sin(\delta_1 - 2\theta_i)}{3\pi \cos^2 \delta_1} \right) \left(\frac{l_f}{d_f} \right) \tan \delta_2 \sin a (\cos \theta + \sin \theta \tan \delta_1)$$

$$\text{其中： } \theta = \arcsin \frac{\sin \theta_i}{1 + 2 \left(\frac{P_c'}{E_f} \right) \left(\frac{1 - \sin \delta_1 \sin(\delta_1 - 2\theta_i)}{\cos^2 \delta_1} \right) \left(\frac{l_f}{d_f} \right) \tan \delta_2 \sin \theta_i}$$

说明书

其中： P_z —封堵承压能力，表征漏失控制效果，MPa； ΔH —裂缝封堵层剪切破坏部分高度（mm）； W —封堵裂缝宽度，mm； H —裂缝高度，mm； h —封堵层高度，mm； ϕ —封堵层孔隙度，%； A_f —横截面上纤维所占面积，mm²； A —横截面总面积，mm²； k_p —颗粒材料刚度（N/mm）； ε_p —颗粒接触形变，mm； E_f —纤维弹性模量，MPa； P_c —裂缝闭合压力，MPa； P'_c —裂缝水平向压力，MPa； E_t —纤维弹性模量，MPa； δ_1 —颗粒表面摩擦角，°； δ_2 —纤维表面摩擦角，°； δ_3 —封堵层—裂缝面间摩擦角，°； d_p —颗粒平均直径，mm； l_f —纤维长度，mm； α —纤维初始倾斜角，°； d_f —纤维直径，mm； θ_i —纤维初始倾斜角，°； θ —纤维剪切后倾斜角，°； σ_{fc} —纤维抗拉强度，MPa； a —封堵层长度，mm。

表 1 钻井完井堵漏材料性能参数

堵漏材料	几何参数	形状系数
		纤维长径比
		圆球度
		粒度分布
	力学参数	摩擦系数
		抗压能力
		抗磨蚀能力
		膨胀率
		纤维抗拉强度
	化学参数	酸溶率
		抗温能力

步骤 2：根据漏失地层的温度、压力、地应力等地质特征参数，漏失类型和堵漏施工要求，对从步骤 1 中选择的堵漏关键性能参数按重要程度进行排序，重要程度由研究人员根据具体情况和经验进行标度。

步骤 3：利用层次分析法计算堵漏材料每种关键性能参数的权重

对堵漏材料的重要程度进行了定性的评判后用层次分析法将定性的排序转换为定量排序，表现为各关键性能参数所占权重的大小；

步骤 3.1：首先用统一标准对同一层内元素的相对重要程度两两进行比较，建立判断矩阵。漏失层段各关键性能参数的判断矩阵如下：

说明书

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1j} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{i1} & b_{i2} & \cdots & b_{ij} \end{bmatrix}$$

式中： $b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当 } i = j \\ \frac{1}{b_{ji}}, & \text{当 } i \neq j \end{cases}$ 表示参数 i 相对于参数 j 的重要程度的比例；

其中各项关键性能参数间重要程度比例标度如下表 2：

表 2 各项关键性能参数重要程度比例标度

标度	各参数间重要程度
1	参数 i 和参数 j 具有同等重要性
3	参数 i 比参数 j 稍微重要
5	参数 i 比参数 j 明显重要
7	参数 i 比参数 j 十分重要
9	参数 i 比参数 j 极端重要
2、4、6、8	当相对重要程度介于相邻重要程度之间是取中值

步骤 3.2：将判断矩阵的每一列元素归一化处理，其元素的一般项为

$$\overline{b}_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^n b_{ij}}, (i, j = 1, 2, \cdots, n)$$

其中， b_{ij} 表示判断矩阵第 i 行第 j 列的元素， n 表示判断矩阵阶数；

步骤 3.3：对各列归一化的判断矩阵，按行相加，即

$$\overline{W}_i = \sum_{j=1}^n \overline{b}_{ij}, (j = 1, 2, \cdots, n)$$

步骤 3.4：相加后向量归一化处理，所得结果即为所求特征向量，即

$$W = \frac{\overline{W}}{\sum_{j=1}^n \overline{W}_j}, (j = 1, 2, \cdots, n)$$

特征向量 W 中的元素即为对应参数的权重；

步骤 3.5：通过判断矩阵和特征向量计算最大特征根，即

说明书

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(BW)_i}{nW_j}$$

其中, $(BW)_i$ 表示向量的第 i 个元素;

步骤 3.6: 计算判断矩阵的一致性, 并检验;

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

其中 CI 表示一致性参数, RI 表示随机一致性参数, 其值如表 3:

表 3 平均随机一致性参数 RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.94	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

当 $CR < 0.1$ 时, 则认为判断矩阵的不一致性程度在容许范围内, 此时判断矩阵的特征向量即为权向量, 否则, 应返回步骤 3.1, 调整两元素相对重要程度的判断值, 直至满足一致性条件为止。

步骤 4: 对现有堵漏材料的关键性能参数进行实验评价:

获取现有堵漏材料各关键性能参数, 并按照表 4 的性能参数评价表对各性能参数进行等级划分, 然后根据表 5-6 得出堵漏材料各关键性能参数得分。

表 4 堵漏材料部分性能参数评价表

性能参数	参数评价				
圆球度	≤ 0.3	0.3-0.5	0.5-0.7	0.7-0.9	> 0.9
	低	中等偏低	中等	中等偏高	高
摩擦系数	≤ 0.5	0.5-0.8	0.8-1.1	1.1-1.4	> 1.4
	低	中等偏低	中等	中等偏高	高
抗压能力	> 0.3	0.2-0.3	0.1-0.2	0.05-0.1	≤ 0.05
	低	中等偏低	中等	中等偏高	高
抗磨蚀能力	> 0.3	0.2-0.3	0.1-0.2	0.05-0.1	≤ 0.05
	低	中等偏低	中等	中等偏高	高
纤维长径比	≤ 100	100-200	200-400	400-600	> 600
	低	中等偏低	中等	中等偏高	高
可溶率	≤ 0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	> 0.8
	低	中等偏低	中等	中等偏高	高
粒度 抗温能力	> 0.3	0.2-0.3	0.1-0.2	0.05-0.1	≤ 0.05
	低	中等偏低	中等	中等偏高	高

说明书

强度	>0.3	0.2-0.3	0.1-0.2	0.05-0.1	≤0.05
抗温能力	低	中等偏低	中等	中等偏高	高

注：材料抗压能力、抗磨蚀能力和强度抗高温能力均采用 25MPa 下粒度 D90 降级率评价；粒度抗高温能力采用高温老化后与老化前对比的粒度 D90 降级率评价；最终抗高温能力取粒度抗高温能力和强度抗高温能力之中的较小值。

表 5 堵漏材料部分性能参数不同等级对应的分值

分值	10	8	6	4	2
摩擦系数	高	中等偏高	中等	中等偏低	低
颗粒抗压强度	高	中等偏高	中等	中等偏低	低
纤维抗拉强度	高	中等偏高	中等	中等偏低	低
圆球度	低	中等偏低	中等	中等偏高	高
抗温能力	高	中等偏高	中等	中等偏低	低
抗磨蚀能力	高	中等偏高	中等	中等偏低	低
纤维长径比	高	中等偏高	中等	中等偏低	低

表 6 堵漏材料 D90 不同等级对应的分值

分值		5	7	10	8	6
D90	一级	<0.7Wf	0.7-0.9Wf	0.9-1.1Wf	1.1-1.3Wf	>1.3Wf
	二级	<1/7Wf	1/7-1/3Wf	1/3-1/2Wf	1/2-2/3Wf	>2/3Wf
	三级	<1/49Wf	1/49-1/9Wf	1/9-1/4Wf	1/4-4/9Wf	>4/9Wf

步骤 5：利用打分法计算各堵漏材料的综合得分；

钻井完井堵漏材料综合评分函数如下：

$$S = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) \phi_i(x)$$

其中 S 表示堵漏材料或堵漏配方的最终得分， $\varphi_i(x)$ 和 $\phi_i(x)$ 分别表示各关键性能参数的权重和对应参数的得分。

步骤 6：根据材料的综合得分情况优选出最适合漏失层段的堵漏材料类型。

实施例 1：

本实施案例以库车山前某区块的储层段架桥材料定量评分为例，该漏失层为储层段，属于高温、高压、高地应力储层。根据钻井完井漏失控制机理、漏失控制效果预测模型以及该漏失层特征，选择堵漏材料关键性能参数为：粒度分布 D90、摩擦系数、圆球度、抗高温能力、抗压能力、抗磨蚀能力。

说明书

根据这些关键性能参数对该区块储层段堵漏效果的重要程度对它们进行排序，重要程度从大到小依次为：粒度 D90>摩擦系数>圆球度>抗高温能力>抗压能力>抗磨蚀能力。

对以上堵漏材料关键性能参数构建判断矩阵如下：

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 1/2 & 1 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 1/5 & 1/4 & 1 & 2 & 5 & 6 \\ 1/6 & 1/5 & 1/2 & 1 & 4 & 5 \\ 1/7 & 1/6 & 1/5 & 1/4 & 1 & 2 \\ 1/8 & 1/7 & 1/6 & 1/5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

利用层次分析法计算出各关键性能参数权重如表 7。

表 7 各关键性能参数参数的相对权重

参数	粒度 D90	摩擦系数	圆球度	抗温能力	抗压能力	抗磨蚀能力
权重	0.418	0.295	0.130	0.090	0.039	0.028

最后计算各种堵漏材料的最终得分，最终得分靠前的堵漏材料的关键性能参数及最终得分见表 8 和表 9，选择分数最高的堵漏材料进行试验，测试堵漏效果。

表 8 该区块非储层段架桥材料关键性能参数等级

序号	编号	关键性能参数级别					
		粒度 D90(μm)	抗压能力	摩擦系数	抗温能力	圆球度	抗磨蚀能力
1	LCM-K3	6836.2	中等偏高	高	高	中等偏低	高
2	LCM-K4	4207.9	中等	高	中等偏高	中等偏低	中等偏低
3	LCM-K5	2715.3	中等	中等偏高	高	中等偏低	中等
4	LCM-D2	4308.4	高	中等	高	中等偏高	高
5	LCM-D3	4446.1	高	中等偏高	高	中等偏高	高
6	LCM-D4	3384.6	高	中等偏高	高	中等偏高	中等偏高

表 9 该区块非储层段架桥材料关键性能参数的评分及材料的最终得分

序号	编号	关键性能参数评分						综合得分
		粒度 D90	抗压能力	摩擦系数	抗温能力	圆球度	抗磨蚀能力	

说明书

1	LCM-K3	7	8	10	10	8	10	8.41
2	LCM-K4	8	6	10	8	8	4	8.40
3	LCM-K5	6	6	8	10	8	6	8.10
4	LCM-D2	8	10	6	10	4	10	6.79
5	LCM-D3	8	10	8	10	4	10	7.79
6	LCM-D4	5	10	8	10	4	8	6.48

根据堵漏材料的综合得分，可以看出 LCM-K3 的综合得分最高，即表示该材料最适用于该层段的架桥材料，可优先用该材料进行堵漏试验，经堵漏实验结果证明，材料 LCM-K3 为最优材料，证明了本发明方法的可预见性与优越性。

本发明将层次分析法应用到钻井完井堵漏材料定量评分方法当中，能够科学有效的对堵漏材料对目标地层的适用程度进行评分优选，为研究人员节约时间与成本。

以上所述，并非对本发明作任何形式上的限制，虽然本发明已以较佳实施例揭露如上，然而并非用以限定本发明，任何熟悉本专业的技术人员，在不脱离本发明技术方案范围内，当可利用上述揭示的技术内容做出些许更动或修饰为等同变化的等效实施例，但凡是未脱离本发明技术方案的内容，依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与修饰，均仍属于本发明技术方案的范围。