

水平井砾石充填参数优化设计的正交数值试验法^{*}

董长银 张 琪 曲占庆
(石油大学, 山东东营 257061)

摘要 影响水平井砾石充填效果的施工参数包括砂浆排量、携砂比、携砂液黏度、冲筛比和滤失强度等, 影响机理比较复杂, 采用常规方法难以对其进行优化设计。首先确定这些因素的位级取值, 然后使用正交表对其进行排列组合得到少量组合方案。利用水平井砾石充填数值模拟软件对这些组合方案分别进行数值试验, 得到每种方案的充填效果评价指标; 采用直观分析方法确定最优参数组合。对最优参数组合重新模拟表明, 正交数值试验法得到的施工参数组合确实能达到最好的充填效果。采用方差分析法得到各因素对水平井砾石充填效果影响程度从大到小排序为: 携砂比、冲筛比、充填排量、滤失强度、携砂液黏度。

关键词 水平井 砾石充填 优化设计 正交试验 数值模拟

水平井砾石充填施工参数设计的目的是优化组合施工参数, 避免提前堵塞, 使充填过程稳定安全并达到 100% 的充填率。施工参数主要包括砂浆排量、携砂比、携砂液黏度、冲筛比和滤失强度等。水平井砾石充填实质是存在携砂液滤失条件下的固液两相变质量流动和砂床运移过程, 上述参数影响充填效果的机理比较复杂, 充填率与这些参数之间没有显式的关系方程。目前的参数设计方法主要是根据一些简单的水平充填室内试验或分析模型对某些参数进行局部设计, 而对全部施工参数进行系统全面的优化组合设计还没有较好的解决办法。

正交试验设计是一种利用规格化正交表来科学合理地安排与分析多因素试验的方法, 具有可靠性高、使用较少的试验次数便可找到最优试验结果等优点。本研究将针对目前水平井砾石充填参数设计存在的问题, 采用正交设计对各施工参数位级进行排列组合, 得到部分组合方案; 然后利用笔者开发的水平井砾石充填数值模拟软件对这些方案进行模拟并对结果进行直观分析和方差分析, 进而确定最优参数组合; 首次提出一套可靠的对水平井砾石充填施工参数进行全面优化组合设计的理论和方法。

1 施工参数组合的综合评价指标

水平井砾石充填包括 α 和 β 两个充填过程。最

优的水平井砾石充填施工参数组合意味着不但能达到 100% 完全充填, 还要能保持 α 充填过程的稳定和安全, 因此只用充填率并不能全面评价不同参数组合的优劣。

α 充填过程是否安全稳定可采用最终砂床平衡高度指标来评价。最终充填前沿砂床高度越高, 则提前堵塞的危险性越大; 相反, 如果最终砂床高度过低, 则说明 α 充填过程中难以形成稳定的平衡砂床, 会导致 β 充填过程达不到密实充填效果。因此, 最终砂床高度太高或太低都意味着较差的充填效果。为得到无因次充填过程安全稳定性评价指标, 可认为当 α 充填过程的平衡砂床高度等于井筒半径时充填最稳定, 效果最好。无因次最终砂床高度评价指标可表示为

$$\Psi_{H_b} = 1 - \frac{|R_w - H_b|}{R_w} \quad (1)$$

式中, H_b 为最终砂床高度, mm; R_w 为井筒或套管内半径, mm; Ψ_{H_b} 为最终砂床高度评价指标, 无量纲。

砂床高度评价指标 Ψ_{H_b} 越大, 表示充填过程越安全稳定。充填率本身为无量纲量, 可直接作为充填率评价指标。但在正交试验中, 每种方案试验结果只需一个指标来表示, 因此需将砂床高度评价指标和充填率指标表述成一个综合评价指标, 表示为

^{*} 国家自然科学基金资助项目: 水平井砾石充填动态模型及其应用研究 (No. 50274055)。

作者简介: 董长银, 1976 年生。1998 年毕业于石油大学(华东), 现在采油研究室从事采油工程、固液两相流与防砂方面的教学与科研工作, 博士, 讲师。电话: 0546-8393777。

$$V = \alpha_{H_b} \Psi_{H_b} + \alpha_P \Psi_P \quad (2)$$

$$\alpha_{H_b} + \alpha_P = 1$$

式中, Ψ_P 为充填率评价指标; α_{H_b} 、 α_P 为砂床高度、充填率评价指标的权重系数, 可分别取 0.25 和 0.75; V 为水平井砾石充填效果综合评价指标, 无量纲。

综合评价指标越高, 施工参数组合能达到 100% 充填, 且充填过程越安全稳定, 充填效果越好。

2 正交数值试验设计及模拟结果

某水平井水平段长 400 m, 裸眼砾石充填完井, 筛管外径 89 mm, 携砂液密度 1000 kg/m³, 砾石尺寸 0.4~0.8 mm, 砾石密度 2632 kg/m³。以该井为例说明采用正交数值试验法进行水平井砾石充填施工参数优化设计的原理和方法。

正交表必须具有以下性质^[1]: (1) 表中任何一行, 其所含各因素位级数值的个数都相同, 即对于该列中的因素, 各取值出现的次数是相同的; (2) 表中任何两列中, 对应因素的位级数值的组合出现的次

数相同。

将充填排量、携砂比、携砂液黏度、冲筛比、滤失强度 5 个参数作为正交设计考虑的因素。考虑到数值模拟的计算量较大, 根据实际需要, 将每种因素的取值分为 4 个位级, 各因素各位级的取值见表 1。

表 1 各因素各位级的取值

位级	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	因素 E
	充填排量 / L·min ⁻¹	携砂比 / %	携砂液黏度 / mPa·s	冲筛比	滤失强度 / L·(min·m) ⁻¹
1	400	5	1	0.5	0.1
2	550	8	5	0.6	0.5
3	700	10	10	0.7	1.0
4	850	15	15	0.8	1.5

显然若将这些不同位级的参数全部组合, 可得 1024(4⁵) 种方案, 需进行 1024 次试验; 而根据正交表的设计方法只需计算 16 种方案即可。设计得到正交表 L₁₆(4⁵) 如表 2 所示。

分别利用水平井砾石充填数值模拟软件对 16 种方案进行模拟计算, 得到各种方案下的砂床高度指标、充填率指标及综合评价指标(见表 2)。

表 2 正交表 L₁₆(4⁵) 设计及模拟结果

序号	充填排量 / L·min ⁻¹	砂比 / %	携砂液黏度 / mPa·s	冲筛比	滤失强度 / L·(min·m) ⁻¹	试验结果			综合指标
						最终床高 / mm	床高指标	充填率 / %	
1	400	5	1	0.5	0.1	无法充填	0	0	0
2	400	8	5	0.6	0.5	200	0	51.72	0.3879
3	400	10	10	0.7	1	200	0	58.82	0.4411
4	400	15	15	0.8	1.5	200	0	44.09	0.3307
5	550	5	5	0.7	1.5	200	0	70.43	0.5282
6	550	8	1	0.8	1	180	0.2	100	0.8000
7	550	10	15	0.5	0.5	200	0	29.26	0.2195
8	550	15	10	0.6	0.1	150	0.5	100	0.8750
9	700	5	10	0.8	0.5	134	0.66	100	0.9150
10	700	8	15	0.7	0.1	114	0.86	100	0.9650
11	700	10	1	0.6	1.5	200	0	36.66	0.2749
12	700	15	5	0.5	1	200	0	6.42	0.0482
13	850	50	15	0.6	1	146	0.54	100	0.8850
14	850	8	10	0.5	1.5	200	0	59.92	0.4494
15	850	10	5	0.8	0.1	108	0.92	100	0.9800
16	850	15	1	0.7	0.5	148	0.52	100	0.8800

3 最优参数确定及试验结果分析

3.1 最优施工参数的确定——直观分析法

根据正交设计原理, 最优方案并不一定在正交表中的试验方案中产生, 而需通过计算分析确定。

用 K_i^A 表示 A 因素第 i 个位级数值对应的试验结果指标之和, 则该因素第 i 位级值的平均试验结果指标为

$$k_i^A = \frac{K_i^A}{r_i} \quad (3)$$

式中, r_i 为该因素第 i 个位级数值的试验次数。这样可找到 A 因素下平均试验结果指标最好的位级数值。用同样的方法计算可得每个因素对应的最好平均试验结果指标对应的位级数值, 将全部因素的最优位级数值组合得到的参数组合即为最优的试验方案。

对表 2 的数值试验结果, 采用直观分析法可从中优选最佳参数组合即最佳方案。表 3 为各因素各

表 3 各因素各位级的平均评价指标

因素	充填排量		携砂比		携砂液黏度		冲筛比		滤失强度	
	/ L·min ⁻¹		/ %		/ mPa·s				/ L·(min·m) ⁻¹	
位级	位级	k_i^A	位级	k_i^B	位级	k_i^C	位级	k_i^D	位级	k_i^E
1	400	0.2899	5	0.5821	1	0.4887	0.5	0.1792	0.1	0.7050
2	550	0.6057	8	0.6506	5	0.4860	0.6	0.6057	0.5	0.6006
3	700	0.5507	10	0.4788	10	0.6701	0.7	0.7036	1.0	0.5436
4	850	0.7986	15	0.5335	15	0.6000	0.8	0.7564	1.5	0.3958

为检验采用正交试验得到的最优施工参数组合的正确性, 对表 3 得到的最佳施工参数进行数值模拟检验计算。经计算, 该参数组合充填得到最终砂床高度 106 mm, 砂床高度指标 0.94, 充填率指标 1.0, 综合评价指标 0.9850。

根据正交试验结果直观分析法得到最优参数组合不但达到了完全充填, 而且砂床高度指标较高, 充填过程安全稳定。另外, 最优参数的模拟结果指标比表 3 中的全部方案的指标都要高。这表明, 采用正交数值试验进行施工参数优化组合得到的结果是可靠的。

需要注意的是, 滤失强度实际上越低越好, 限于本例给定的位级取值才选择了 0.1 L/(min·m)。实际作业中, 滤失强度并不是可以人为精确控制的, 而是由有关参数确定和计算得到的, 本例将滤失强度作为施工设计参数对待, 仅是为了研究滤失强度对充填效果的影响。

3.2 各因素的影响程度分析——方差分析法

为研究各因素对充填效果的影响程度, 利用方差分析法对表 3 的正交数值试验结果进行分析, 计算得到各因素的离差平方和: 充填排量为 0.5279; 携砂比为 1.4783; 携砂液黏度 0.099; 冲筛比 0.8248; 滤失强度 0.1997。

离差平方和表示各因素对充填效果的影响, 数值越大表示对结果的影响或作用越大。对于水平井砾石充填, 将 5 种因素按影响程度大小排列依次为

位级的平均试验结果指标。对比可知, 充填排量中位级 850 L/min 对应的平均结果指标最高, 携砂比、携砂液黏度、冲筛比和滤失强度因素中对应平均结果指标最高的位级分别为 8%、10 mPa·s、0.8 和 0.1 L/(min·m)。因此, 对于该算例, 在给定的全部位级中, 最佳施工参数组合为充填排量 850 L/min、携砂比 8%、携砂液黏度 10 mPa·s、冲筛比 0.8 和滤失强度 0.1 L/(min·m)。

携砂比、冲筛比、充填排量、滤失强度、携砂液黏度。

4 结论与建议

(1) 除充填率外, 最终砂床高度可作为评价充填过程是否安全稳定的指标, 两者加权可得到充填效果的综合评价指标。

(2) 采用水平井砾石充填数值模拟软件和正交试验设计法, 研究出一套采用正交数值试验对水平井砾石充填施工参数进行优化设计的理论和方法。算例结果表明, 该方法得到的参数组合能够达到最佳充填效果, 是合理、可靠的。

(3) 使用方差分析法对正交数值试验结果进行了分析。对于水平井砾石充填, 影响充填效果的因素按影响程度大小排列依次为携砂比、冲筛比、充填排量、滤失强度和携砂液黏度。

(4) 采用正交数值试验法得到的最优参数结果与所选参数的位级有关, 其实质是在给定的一系列参数的取值位级中选择最优组合。在确定各参数的位级取值时, 应选取实际中可行的数据。

参 考 文 献

- [1] 韩於葵. 应用概率统计. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1989: 237~251

(收稿日期 2003-11-12)

(修改稿收到日期 2004-02-12)

〔编辑 付丽霞〕

error is about 10% , sometimes as high as 13% when there is gas cut. A new method is presented to accurately calculate formation pressure by using the real monitored downhole pressure data, while the downhole under- balanced pressure and drilling fluid average density in the annular can be calculated also, thus a better determination of the mud weight in the following under- balanced drilling becomes possible.

Key words under- balanced drilling formation pressure downhole pressure data acquisition system downhole under- balanced value

FACTORS CAUSING POOR CEMENTING QUALITY IN SLIM HOLE AND SOLUTIONS

by Song Shengli, Yang Fengxiang, Wang Mule, (Zhongyuan Oilfield Company); Liu Kun

Abstract Poor cementing quality is a common problem in the slim hole due to its small clearance and uneven distribution of cement slurry, it can also cause the reduction of casing collapsing strength. Factors causing the poor cementing quality are investigated by finite element simulation calculating and physical modeling test, and such tool and technologies as casing centralizer, time- delay cementing technology, back- inserting hydraulic liner hanger are developed. Compared with the conventional cementing technology in the same condition, good cementing quality improved by 29%. This technology effectively improved the cementing quality in the slim hole and expanded the life of casing.

Key words slime hole cementing quality time delay cementing slurry hanging back insert

NEW METHOD OF FORMATION PRESSURE REAL TIME MONITORING USING DRILLING PARAMETERS

by Rao Lei, Cui Jie, (Drilling Technology Research Inst. of Shengli Oilfield)

Abstract Lots of methods are available for calculating the formation pressure, while the results vary greatly in different area, different geological condition and different deposition environment, and sometime the accuracy is not satisfactory enough. The new method omitted the concept of normal shale trend line, and took such occasions as the abnormal formation pressure by under- compression, abnormal formation pressure by fluid inflation and abnormal formation pressure by other factors into consideration. The method of heredity is used for abnormal formation pressure calculation, and downhole pressure changing is separated real time from ROP data, thus realizing the real time calculating of formation

pore pressure. Field application of this method improves the accuracy of formation pore pressure calculation.

Key words pressure monitoring heredity calculation compression trend ROP formation pore pressure

PERPENDICULAR NUMERICAL TRIAL FOR HORIZONTAL WELL GRAVEL- PACKING OPTIMIZATION

by Dong Changyin, Zhang Qi, Qu Zhanqing, (University of Petroleum)

Abstract The operation parameters for horizontal well gravel- packing concern slurry pump rate, gravel concentration, carrier fluid viscosity, wash- pipe diameter and filtration velocity. Because the mechanism of these parameters affecting the packing effect is very complicated, it's difficult to optimize them by normal method. In this paper, according to perpendicular form, the values for all levels of these parameters are permuted to make up of a few operation parameter combinations. The evaluation index of packing effect for every combination is calculated by the simulation program. Then, the optimum parameter combination is found out from all of results by direct analysis method, the re- simulation of which indicates that the packing effect of the optimum combination is really excellent. The variance analysis method is used to analyze the degree of all parameters influencing the packing effect, which are ranged from great to petty as followed: gravel concentration, wash- pipe diameter, pump rate, filtration velocity and fluid viscosity.

Key words horizontal well gravel- packing design optimization perpendicular trial numerical simulation

ADVANCES IN OIL- SOLUBLE VISCOSITY- REDUCERS FOR VISCOUS CRUDE OIL

by Chen Qiufen (University of Petroleum); Wang Daxi, Liu Ranbing

Abstract In this paper the advances in oil- soluble viscosity- reducers for viscous crude oil at home and abroad are reviewed. The article analyzes the mechanisms of the viscosity forming and the viscosity reduction by oil- soluble viscosity- reducers. The viscosity- reducers are classified into three types, the synthesis methods and the application in the oil- field are presented. The article discusses the possible problems in the research and development of high efficiency viscosity- reducers, also in the applications. It indicates that introducing polar groups or