

苏里格气田影响暂堵压裂效果主控因素研究

张 晗, 谢 鑫, 王鸿森, 向九洲

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年4月11日; 录用日期: 2024年5月14日; 发布日期: 2024年7月5日

摘 要

苏里格气田致密气水平井在开发过程中, 气田不同区块、同一区块中不同井甚至同一口井中不同暂堵段暂堵压裂效果差异较大, 影响暂堵压裂效果因素不清楚。明确主控因素对优化暂堵压裂工艺具有指导意义。采用灰色关联度法与Spearman相关性分析法对主控因素进行分析, 结果表明: 1) 影响苏里格气田暂堵压裂效果的主控因素主要为: 每段液量、簇间距、簇数。2) 簇间距、簇数及每段用液量存在最优区间, 需要进一步优化; 暂堵时机单一, 时机前移或者后移可能会对暂堵效果产生较为明显的影响。

关键词

主控因素, 相关性分析, 灰色关联度, Spearman

Research on the Main Controlling Factors Affecting the Effect of Temporary Plugging and Fracturing in Sulige Gas Field

Han Zhang, Xin Xie, Hongsen Wang, Jiuzhou Xiang

College of Oil and Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Apr. 11th, 2024; accepted: May 14th, 2024; published: Jul. 5th, 2024

Abstract

During the development process of tight gas horizontal wells in the Sulige Gas Field, the temporary plugging and fracturing effects vary greatly in different blocks of the gas field, different wells in the same block, and even different temporary plugging sections in the same well. Factors affecting the temporary plugging and fracturing effects are not sure. Clarifying the main control factors has guiding significance for optimizing the temporary plugging and fracturing process. Gray correlation method and Spearman correlation analysis were used to analyze the main control factors. The

results show that: 1) The main controlling factors affecting the temporary plugging and fracturing effect of the Sulige Gas Field are: liquid volume in each section, cluster spacing, and cluster number. 2) There are optimal intervals for cluster spacing, number of clusters, and liquid consumption in each section, which need to be further optimized; the timing of temporary blockage is single, and moving the timing forward or backward may have a more obvious impact on the temporary blockage effect.

Keywords

Main Control Factors, Correlation Analysis, Gray Correlation Degree, Spearman

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

苏里格气田是我国首个探明储量超万亿立方米的大气田,总资源量 $5.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$,是我国陆地上最大的整装气田,开采潜力巨大[1],地处鄂尔多斯盆地,是我国致密气开采的典范[2]。但在开采过程中致密砂岩储层经过暂堵压裂工艺过后,气田不同区块、同一区块中不同井甚至同一口井中不同暂堵段暂堵压裂效果差异较大,影响暂堵转向效果的因素较多,每一种因素的影响都不尽相同,部分因素影响极大,部分因素影响则相对较小。张凯笑[3]在研究苏里格气田东南部马五段地层水分布规律及主控因素中,认为岩溶古地貌控制气水横向分布非均质性,储层特征控制气驱水效率。靳晓杰[4]认为苏里格气田苏东地区盒8段的砂岩碎屑成分中的石英、高岭石、绿泥石对影响物性起到了主导作用,成岩作用的溶蚀作用控制了苏东地区盒8段的储层物性。崔明明[5]认为不同构型的复合砂体,多样的储层性质,注气参数的差异,共同造成了苏里格地区致密储层的非均质性及含气性差异。虽然很多学者在研究苏里格气田含水规律、影响成岩及储层非均质主控因素上已取得较多成果,但对影响苏里格气田暂堵压裂效果主控因素研究较少。分析主要影响因素,抓住主要因素对优化暂堵转向效果具有更好的指导意义。以每段经过暂堵压裂工艺改造后产气量作为因变量,渗透率、孔隙度、含气饱和度、簇间距、簇数、簇长度、暂堵时机及暂堵剂数量(绳结、暂堵锥数量)等作为自变量,采用灰色关联度法与 spearman 相关性分析法,获得影响经过暂堵后产气量的工艺参数的程度排序。结合现场实际,提出影响暂堵效果的主要工艺参数,为后续优化提供指导依据。本文以苏里格气田苏中、苏东、陇东新区、青石岭及神木区块为例,从五个区块中选取 65 口井 131 段暂堵段分析影响暂堵压裂效果的因素。

2. 区块特征

2.1. 储层参数

统计苏里格气田苏中、苏东、青石岭、陇东新区及神木五个区块 65 口井,131 暂堵段的渗透率、孔隙度、含气饱和度、杨氏模量、泊松比等储层参数,五个区块含气层位渗透率范围在 0.19~0.89 mD,孔隙度在 6%~13%,其中平均渗透率最大层位的为陇东新区山西组(0.33~0.89) 0.58 mD;孔隙度最大的层位为青石岭区块盒 8 (7.90~8.83) 8.26%;含气饱和度最大的层位为苏中区块山 1 (54~68) 61%;杨氏模量最大的层位为青石岭区块盒 8 (30~41) 38 GPa;泊松比最大的层位为苏东区块山 1 (0.14~0.32) 0.27;地应力差最大的层位为青石岭/陇东新区盒 8/山西组(8~12) 10 MPa/(7~14) 10 Mpa。

各井区孔渗差异不大,山 1 平均含气饱和度高于盒 8,盒 8 杨氏模量高于山 1。五个区块储层参数整体数据如表 1 所示。

Table 1. Reservoir parameter statistics table
表 1. 储层参数统计表

层位	苏东区块		苏中区块		青石卯区块	陇东新区区块	神木区块
	盒 8	山 1	盒 8	山 1	盒 8	山西组	太原组
渗透率 (mD)	(0.26~0.52)/0.34	(0.31~0.68)/0.44	(0.16~0.64)/0.35	(0.19~0.34)/0.29	(0.35~0.43)/0.40	(0.33~0.89)/0.58	(0.27~0.41)/0.35
孔隙度 (%)	(7~9)/8	(8~13)/9	(6~9)/8	(7.2~8.1)/7.6	(7.90~8.83)/8.26	(6.00~9.10)/7.57	(7.9~8.4)/8.1
含气饱和度 (%)	(43~60)/52	(49~60)/56	(42~64)/55	(54~68)/61	(48.00~62.00)/53.50	(47.00~62.00)/54.25	(62~70)/66
杨氏模量 (GPa)	(19~41)/31	(23~30)/27	(44~15)/29	(19~35)/30	(41~30)/38	(29~19)/25	(19~28)/24
泊松比	(0.15~0.31)/0.2	(0.14~0.32)/0.27	(0.31~0.15)/0.24	(0.15~0.3)/0.2	(0.20~0.17)/0.18	(0.18~0.15)/0.17	(0.15~0.23)/0.17
地应力差 (MPa)	(5~14)/9	(5~11)/8	(5~13)/9	(7~11)/8	(8~12)/10	(7~14)/10	(6~13)/9

2.2. 施工参数

表 2 为苏东、苏中、青石卯、陇东新区、神木区块不同层位暂堵井分段和射孔统计结果,统计参数包括总段数、暂堵段数、所在段数、单段簇数、簇间距、簇长度和水平段长,其数据显示,各个区块的不同统计参数平均最大值为:苏东区块盒 8 层位总段数(1~19)/17;苏中区块盒 8 层位、苏中区块盒 8 层位、陇东新区区块暂堵段分别为(1~4)/3、(1~5)/3、(2~4)/3;苏东区块盒 8 层位单段簇数(2~6)/4;苏中区块山 1 层位簇间距(18~60)/30,苏中区块山 1 层位簇长度(0.5~4)/2.3;苏东区块盒 8 层位水平段长(819~2450)/1557;最小值为:苏东区块山 1 层位总段数(1~8)/4;青石卯区块盒 8 层位暂堵段(1~2)/1.5;苏东区块山 1 单段簇数(2~6)/3;青石卯区块盒 8 层簇间距(5~21)/16;苏中区块盒 8 层簇长度(0.3~3)/1;苏东区块山 1 水平段长(133~802)/562。

苏东水平段长和总段数相对较大、暂堵段数总体差异不大(2~3 段),苏中山 1 簇数、簇间距和簇长度相对较大。

Table 2. Statistical table of temporarily plugged well segments and perforation parameters in each block
表 2. 各区块暂堵井分段和射孔参数统计表

层位	苏东区块		苏中区块		青石卯区块	陇东新区区块	神木区块
	盒 8	山 1	盒 8	山 1	盒 8	山西组	太原组
总段数(段)	(1~19)/17	(1~8)/4	(2~16)/10	(5~13)/9	(5~12)/9	(5~13)/9	(5~12)/9
暂堵段(段)	(1~4)/3	(1~2)/1.3	(1~5)/3	(1~5)/2.5	(2~3)/2.5	(2~4)/3	(2~3)/2.5
单段簇数(簇)	(2~6)/4	(2~6)/3	(2~6)/4	(4~6)/4.75	(4~4)/4	(3~6)/4	(4~4)/4
簇间距(m)	(10~30)/17	(11~24)/17	(4~32)/18	(18~60)/30	(12~27)/17	(13~25)/18	(12~27)/17
簇长度(m)	(0.5~3)/0.9	(0.5~3)/1.7	(0.3~3)/1	(0.5~4)/2.3	(0.5~1)/0.54	(0.5~2)/0.9	(0.5~1)/0.54
水平段长(m)	(819~2450)/1557	(133~802)/562	(833~1517)/1104	(700~1400)/1100	(413~1560)/1037	(331~1500)/921	(413~1560)/1037

表 3 分别统计不同区块不同层位单段压裂施工参数，其中液量使用最大值为陇东新区山西组 (471~690)/576 m³；砂比(%)为苏中区块盒 8 (16~32)/61%；支撑剂用量为苏东区块山 1 (62~129)/92 m³；暂堵时机除苏中区块盒 8 平均最大都为 0.54。

Table 3. Construction parameter table of single temporary blockage section

表 3. 单段暂堵段施工参数表

	苏东区块		苏中区块		青石卯区块	陇东新区区块	神木区块
	盒 8	山 1	盒 8	山 1	盒 8	山西组	太原组
液量 (m ³)	(404~664)/532	(357~746)/538	(390~644)/520	(477~647)/566	(400~610)/465	(470~658)/575	(195~204)/205
砂比 (%)	(19~28)/23	(20~23)/21	(16~32)/61	(20~22)/21	(19~20)/20	(18~20)/19	(302~385)/330
支撑剂类型	陶粒, 陶粒/石英砂, 石英砂, 超低密陶粒		陶粒/超低密陶粒		陶粒	陶粒	陶粒
支撑剂粒径	20~40/40~70, 20/40, 40~70		20~40/40~70		40~70	40~70	20~40
暂堵时机	(0.50~0.58)/0.54	(0.50~0.58)/0.54	(0.48~0.6)/0.53	(0.54~0.61)/0.54	(0.5~0.56)/0.54	(0.5~0.56)/0.54	20~40
富余系数 (个/孔)	(0.62~0.85)/0.74	(0.47~0.94)/0.78	(0.62~0.95)/0.84	(0.47~0.8)/0.72	(0.79~0.94)/0.86	(0.63~0.83)/0.74	(0.58~0.65)/0.53

3. 数学模型

3.1. 灰色关联度模型

灰色关联度是一种描述变量之间相互关系的方法[6]，可用于数据分析、预测、决策等领域。它可以衡量不同因素之间的相关程度，而不仅仅是线性关系，也可以反映非线性和复杂的关系。灰色关联度方法是基于灰色系统理论和信息论的，可以用于分析具有不完整、不准确和不确定数据的系统。它将待研究的多个因素与已知的一个或几个因素之间的关联性进行比较，通过计算相似性度量值，得出不同变量之间的关联性大小，并据此进行综合评价和预测分析。

灰色关联度方法能够分析不完整、不准确、不确定数据之间的关联性，即使数据量较小也可以进行分析，同时可以反映非线性和复杂关系，避免了传统方法中过度依赖线性假设的问题，灰色关联度方法对数据的敏感度较高，因此可以筛选出对系统具有较大影响的因素。所以，相较于传统的多因素分析方法(如相关、回归等)，由于其对数据的要求较低且计算量较小，灰色关联分析应用领域更加广泛。

灰色关联度分析主要按照以下步骤进行的：

- 1) 选择变量因素，母序列为日产气量，子序列为储层与施工参数。
- 2) 确定母序列 X_0 与子序列 X_i 。

3) 计算相对应时刻的母序列与子序列差的绝对值, 即:

$$\Delta_{0i}(t_j) = X_0(t_j) - X_i(t_j) \quad (1)$$

4) 选取绝对值的最大值与最小值, 即: Δ_{\max} , Δ_{\min} 。

5) 计算相应时刻的母序列与子序列的关联系数, 即:

$$L_{0i}(t_j) = \frac{\Delta_{\min} + \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(t_j) + \Delta_{\max}} \quad (2)$$

其中:

$$\Delta_{\max} = |X_i - X_0|_{\max} \quad (3)$$

$$\Delta_{\min} = |X_i - X_0|_{\min} \quad (4)$$

$$\Delta_{0j}(t_j) = |X_i - X_0| \quad (5)$$

6) 计算各个序列的关联度。

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n L_{0i}(t_j) \quad (6)$$

7) 排关联序。关联度越大, 说明两者之间的变化形式一致。

式中: 母序列 X_0 为日产气量; 子序列 X_1 为渗透率、 X_2 为簇长度、 X_3 为含气饱和度、 X_4 为簇间距、 X_5 为每段簇数、 X_6 为孔隙度、 X_7 为暂堵时机、 X_8 为每段液量、 X_9 为水平段长; L_{0i} 为相应时刻母序列与子序列的关联系数; γ_{0i} 为各个序列的关联度。

3.2. Spearman 模型

由于实验数据中的变量类型, 存在非连续型变量且不符合正态分布特性[7], 所以采用经典 Spearman 相关性分析模型如式(7)所示。

$$p = \frac{\sum_i^N (R_i - R)(S_i - S)}{\sqrt{\sum_i^N (R_i - R)^2 \sum_i^N (S_i - S)^2}} \quad (7)$$

式中:

R_i 、 R ——两个排序好的变量的观测值秩次;

S_i 、 S ——两个变量的平均秩次;

N ——每种变量的总数量。

4. 结果讨论与分析

4.1. 灰色关联度分析

以产气量为主序列, 渗透率、簇长度、含气饱和度、簇间距、每段簇数、孔隙度、暂堵时机、每段液量、簇数。

影响暂堵压裂效果的因素众多, 而且各个因素之间相互关联, 关系复杂, 可以做如下假设:

1) 母序列: 以各暂堵压裂后产气量作为母序列。

2) 子序列: 渗透率(X_1)、簇长度(X_2)、含气饱和度(X_3)、簇间距(X_4)、每段簇数(X_5)、孔隙度(X_6)、暂堵时机(X_7)、每段液量(X_8)、水平段长(X_9)。

将子序列数据标准化后, 进行灰色关联度分析, 得到灰色关联度如下表 4 所示。

Table 4. Gray correlation analysis ranking list of factors affecting temporary plugging and fracturing effects
表 4. 灰色关联度分析影响暂堵压裂效果因素排序表

序号	影响因素	关联度
1	每段液量	0.8
2	簇间距	0.795
3	渗透率	0.794
4	含气饱和度	0.79
5	簇数	0.788
6	孔隙度	0.78
7	暂堵时机	0.74
8	簇长度	0.738
9	暂堵数量	0.716

根据灰色关联度分析,得到影响暂堵压裂效果的因素为每段液量 > 簇间距 > 渗透率 > 含气饱和度 > 簇数 > 孔隙度 > 暂堵时机 > 簇长度 > 暂堵数量。

4.2. Spearman 相关性分析

Spearman 相关性分析是对两两数据的相关系数(相关程度)进行计算,先对 XY 之间是否存在统计上的显著关系($P < 0.05$)进行检验,然后分析相关系数[8]为的正负向以及相关性程度。相关性系数矩阵如下表 5 所示, Spearman 相关性分析,考虑两两因素之间相关性,变量与自身的相关性为 1,多个因素对日产气量相关性排序如下表 6 所示。

Table 5. Correlation coefficient matrix table of each factor
表 5. 各因素相关性系数矩阵表

	簇长度	簇间距	孔隙度	渗透率	暂堵数量	暂堵时机	每段液量	簇数	日产气量
簇长度	1	0.101	0.166	-0.048	0.157	0.172	-0.16	-0.235	-0.329
簇间距	0.101	1	-0.088	0.061	-0.485	0.152	0.187	0.1	0.422
孔隙度	0.166	-0.088	1	0.051	0.297	0.037	-0.075	0.004	-0.214
渗透率	-0.048	0.061	0.051	1	-0.324	0.008	0.173	0.041	0.182
暂堵数量	0.157	-0.485	0.297	-0.324	1	-0.081	-0.312	0.066	-0.606
暂堵时机	0.172	0.152	0.037	0.008	-0.081	1	0.149	-0.219	0.022
每段液量	-0.16	0.187	-0.075	0.173	-0.312	0.149	1	0.035	0.303
簇数	-0.235	0.1	0.004	0.041	0.066	-0.219	0.035	1	0.138
日产气量	-0.329	0.422	-0.214	0.182	-0.606	0.022	0.303	0.138	1

注:最小值  最大值。

Table 6. Spearman analysis ranking list of factors affecting temporary plugging and fracturing effects
表 6. Spearman 分析影响暂堵压裂效果因素排序表

序号	影响因素	相关性系数
1	簇间距	0.422
2	每段液量	0.303

续表

3	渗透率	0.182
4	簇数	0.138
5	暂堵时机	0.022
6	孔隙度	-0.214
7	簇长度	-0.329
8	暂堵数量	-0.606

根据 Spearman 相关性分析结果, 得到影响暂堵压裂效果的因素为簇间距 > 每段液量 > 渗透率 > 簇数 > 含气饱和度 > 暂堵时机 > 孔隙度 > 簇长度 > 暂堵数量。在 Spearman 相关性分析中, 甚至出现了负相关, 根据油气田基本理论, 孔隙度越大暂堵压裂效果应该会越大, 呈现正相关才更加符合, 但在苏里格气田, 孔隙度在 7%~9%左右, 孔隙度变化较小, 考虑孔隙度参数不能很好去表示暂堵压裂效果。苏里格气田分析的五个区块平均渗透率在 0.2 mD~0.6 mD, 渗透率变化较小, 虽然在 Spearman 相关性分析中, 表现出了较好的相关性, 但渗透率微小的变化也不能作为影响暂堵压裂效果的主要因素。暂堵数量出现了较大的负相关性, 这里考虑在苏里格气田暂堵压裂暂堵剂优化过程中, 暂堵剂数量优化可能已经超过最优值。

5. 结论

1) 目前, 学者对影响苏里格气田暂堵压裂效果研究较少, 本文从苏里格气田中 5 个区块选取 65 口井 131 段暂堵段储层与施工参数采用灰色关联度、斯皮尔曼法对影响苏里格气田暂堵压裂效果主控因素进行了分析。得到整体区块孔隙差距不大, 在施工参数上, 陇东新区平均用量相比其他区块高 2%~27%, 暂堵时机较为单一, 影响暂堵压裂效果主控因素为: 簇间距、每段暂堵段液量及簇数。

2) 针对影响暂堵压裂效果主要因素, 建议: 簇间距、簇数及每段用量存在最优区间, 需要进一步优化; 暂堵剂使用数量可能存在用量过剩的问题; 暂堵时机基本集中在整个压裂过程 50%~55%, 时机前移到 40%或后移到 60%可能会对暂堵压裂效果有较为明显的影响。

基金项目

重庆科技大学研究生创新计划项目“致密气水平井分簇射孔暂堵压裂优化研究”(YKJ CX2320132)。

参考文献

- [1] 杨旭鹏, 王晓军, 韩子剑, 等. 苏里格气田采气集气工艺及管网模拟研究现状[J]. 油气田地面工程, 2024, 43(1): 8-14.
- [2] 杨扬, 赖雅庭, 张心怡, 巩肖可, 韩江晨. 含水致密气藏特征、开发风险与有效动用对策——以苏里格气田含水区为例[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(6): 121-133.
- [3] 张凯笑, 郭艳琴, 暴文博, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田东南部马五段地层水分布规律及主控因素[J/OL]. 地质通报: 1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20240409.1213.002.html>, 2024-04-16.
- [4] 靳晓杰, 毛朝瑞, 程昱, 等. 苏里格气田苏东地区盒 8 段储层特征及主控因素分析[J]. 矿产勘查, 2024, 15(1): 53-59.
- [5] 崔明明, 李进步, 李莹, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田西南部致密储层非均质性特征及对成藏的制约[J]. 地质学报, 2024, 98(1): 214-230.
- [6] 余钟莲, 王瑞, 杨莉, 等. 基于熵权法和灰色关联度法评价枸杞子质量[J]. 中成药, 2024, 46(3): 919-926.

-
- [7] 赵生智, 申胤宏, 周鹰槐. 基于斯皮尔曼相关系数的电网企业区间岗级任职资格信度研究[C]//云南电网有限责任公司. 中国电力企业管理创新实践(2022年). 北京: 《中国电力企业管理》杂志社, 2024: 4.
- [8] 徐维超. 相关系数研究综述[J]. 广东工业大学学报, 2012, 29(3): 12-17