

致密气藏石英砂代替陶粒技术研究及应用

张立朋¹ 何太洪² 刘伟¹ 涂利辉² 宋邵飞¹

(1. 西部钻探工程有限公司工程技术研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

(2. 西部钻探工程有限公司苏里格气田分公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: 鄂尔多斯盆地天然气资源丰富, 但具有典型的“三低”特征(低渗透、低压力、低丰度), 储层非均质性强, 含水高, 开发难度大, 开发成本居高不下。为全面落实低成本开发战略, 结合苏里格苏东二区储层实际情况, 试验应用石英砂代替陶粒工艺, 并结合生产情况对其进行全面评价, 为下一步石英砂代替陶粒的推广应用、降低开发成本积累了一定经验。

关键词: 导流能力; 破碎率; 低成本开发; 石英砂代替陶粒; 苏东二区

Abstract: Ordos Basin is rich in natural gas resources, but it has typical three low characteristics (low permeability, low pressure and low abundance), strong reservoir heterogeneity, high water cut, difficult to develop and high development cost. To fully implement the low-cost development strategy, Combined with the actual situation of the second area of Sulige East, Quartz sand was used to replace ceramsite, Combined with the production situation, it is evaluated comprehensively. Some experience has been accumulated for the promotion and application of quartz sand instead of ceramsite to reduce the development cost.

Key words: Conductivity; Broken rate; Low-cost development; Quartz sand instead of ceramsite; The second area of Sulige East

鉴于国内石油行业发展进入瓶颈期, 油气田开发难度逐步增大, 开发成本高, 尤其体现在钻井和压裂中。针对目前现状, 油气田及工程公司采取多种工艺措施降低综合成本, 提高开发效益。从压裂角度来分析, 除压裂设备服务费以外, 最主要的为压裂液和压裂用支撑剂成本^[1-2], 近年来国内已开始大规模推广滑溜水体系和变粘免混配压裂液体系, 压裂液成本大幅降低; 但支撑剂尤其是陶粒的成本居高不下, 亟需对石英砂替代陶粒技术进行深入研究, 降低支撑剂成本。

1 国内外石英砂应用现状

1.1 国内石英砂应用现状

通过对长庆区域石英砂应用进行调研^[3-5], 长庆油田石英砂代替陶粒技术主要应用在含气性好、埋深浅的神木、米脂气田及苏里格东区东部进行推广应用; 于苏里格中区及西区的采气三厂应用3口井, 均出现返排停喷。通过对苏里格气田各工区石英砂应用情况调研, 川庆钻探开展了石英砂应用试验, 2019年在含气性较好的桃7区块试验, 结果表明对气井产能影响不大。2020年在苏东含水区块推广时, 出现了气井返排困难、产量大幅下降现象, 且多数气井只能间开投产; 长城钻探在支撑剂导流能力匹配性试验攻关, 因破碎率高、导流能力大幅下降的评价结果而未推广应用。渤海钻探、华北油田均未应用该工艺。

1.2 国外石英砂应用现状

国外石英砂调研^[6], 开展石英砂国内外参数调研及室内实验对比, 美国石英砂中的石英含量高于国产石英砂22.5%; 国产的20-40目石英砂较美国的20-40目石

英砂在不同压力下对比发现, 国产石英砂的整体导流能力远低于美国石英砂, 同时, 在压力低于40MPa时, 美国的20-40目石英砂导流能力好于国产30-50目陶粒的导流能力; 在压力在40MPa-60MPa之间时, 美国的20-40目石英砂导流能力和国产30-50目陶粒的导流能力基本相当, 但远远好于国产的20-40目石英砂。

为评价石英砂在不同闭合压力下地层闭合后的破碎情况^[7], 选取国内5家石英砂样品进行室内评价, 分别选取赤峰砂厂、奈曼旗猛龙、郑州少林、和丰西海、青铜峡五家石英砂厂家的20-40目石英砂、40-70目石英砂、70-140目石英砂砂样进行试验分析, 结果如下:

对于20-40目石英砂, 在闭合压力为28MPa时, 破碎率均低于行业标准(破碎率 $\leq 9\%$); 在闭合压力为35MPa时, 破碎率为6.8-13.2%, 在闭合压力高于35MPa时, 破碎率持续上升, 在52MPa时, 破碎率为21-27.1%。对于40-70目石英砂和70-140目石英砂, 在闭合压力为35MPa时, 破碎率均低于行业标准(破碎率 $\leq 9\%$); 且具有粒径越小、破碎率越低的规律, 在闭合压力为52MPa时, 破碎率为12.0-14.5%。

2 支撑剂性能对比

为直观对比20-40目石英砂与20-40目陶粒在不同压力下破碎情况, 分别在压力为0、30MPa、40MPa、50MPa、60MPa、70MPa六个级别压力下显微镜观察形态, 明显可以看出:

① 20-40目石英砂在30MPa压力下有少量破碎, 在40MPa压力下有破碎的石英砂明显增多, 在50-70MPa压力下有破碎的石英砂比例明显升高, 且破碎的石英砂

粒径远远小于未破碎之前的石英砂；

② 20–40 目陶粒在 50MPa 以下基本无破碎现象，在 50MPa 压力下有少量破碎，在 60–70MPa 压力下有破碎的陶粒明显增多，且破碎的陶粒粒径约为未破碎之前的陶粒粒径的 1/3–1/2；

③结合实际情况，20–40 目石英砂在 30MPa 及以下压力情况下，破碎现象较少；在 40MPa 及以上压力下，破碎现象明显且破碎后的粒径过小，易堵塞孔隙；20–40 目陶粒在 50MPa 及以下压力情况下，破碎现象较少；在 60MPa 及以上压力下，破碎现象较明显且破碎后的粒径约为未破碎之前的陶粒粒径的 1/3–1/2，不易堵塞孔隙。

根据区块储层岩石力学特点，最终优选确定现场石英砂和陶粒使用粒径和组合类型，石英砂替代陶粒占比优化为 40–55% 之间。

3 现场应用效果分析

2018 年底在苏里格合作开发区内进行多组石英砂与陶粒混合实验，优选对导流能力影响较小的陶粒与石英砂组合比例，2019 应用 63 井次，其中直丛井 58 口，水平井 5 口，石英砂占比直丛井 48.0%，水平井 43.6%；2020 应用 38 井次（直丛井 27 口，水平井 11 口），石英砂占比直丛井 53.6%，水平井 42.6%。

2020 年开展水平井示踪剂评价，对石英砂尾追陶粒与全陶粒井排液情况进行跟踪，水平井试验数据表明石英砂尾追陶粒对初期返排无明显影响；直丛井压后返排差于全陶粒井，对无阻流量影响较小，但从长期生产情况看，对累产影响较大。

表 1 石英砂气井与全陶粒
气井试气与生产效果统计对比表

评价参数	2018 年	2019 年		2020 年
支撑剂类型	全陶粒	全陶粒	石英砂 + 陶粒	石英砂 + 陶粒
井数 (口)	141	34	61	22
石英砂占比 (%)	0	0	48.0	56.3
试气无阻流量 (10 ⁴ 方 / 天)	7.82	8.53	6.56	6.48
平均产量 (10 ⁴ 方 / 天)	0.77	0.83	0.4	0.45

4 石英砂替代陶粒工艺设计

为探索水平井中石英砂和陶粒混合加砂和分段加砂对导流能力的影响，进行了 20–40 目石英砂和 20–40 目陶粒 1:1 比例混合铺置和 1:1 比例分段铺置导流能力试验，试验结果表明：以 41.4MPa 为分界线，若地层闭合压力 < 41.4MPa，则混合加砂方式的导流能力高于分段加砂方式的导流能力；若地层闭合压力 > 41.4MPa 时，则分段加砂方式的导流能力高于混合加砂方式的导流能力。

通过上述区域调研、实验对比分析、试气返排及累计评价^[7–8]，石英砂不能完全满足区块试验，直丛井加砂规模小，为降低石英砂破碎对导流能力及稳产能力影响，后期全部采用陶粒支撑剂；兼顾降本增效，水平井使用石英砂加注比例不高于 40%，加注方式采用陶粒和石英砂分段式加砂，不采用直接混合式加砂。

5 总结及建议

①石英砂代替陶粒工艺对产能造成一定的影响，在低成本开发的条件下，还需继续优化石英砂占比；

②基于不同储层特点，总结不同石英砂替代陶粒加注工艺，提高支撑剂铺置效果，匹配合试的导流能力；

③针对苏里格苏东二区的石英砂应用改造规模小的地层不建议加注石英砂；储层条件好、改造规模大的地层可以采用 40% 以内石英砂比例、分段伴注方式。同时国内石英砂的导流能力差、破碎率高，后期需从改进石英砂强度方面入手，寻找抗压强度更高的石英砂，大规模降低压裂用支撑剂成本。

参考文献：

- [1] 李宪文, 肖元相, 陈宝春, 等. 苏里格气田致密砂岩气藏多层分压开采面临的难题及对策 [J]. 天然气工业, 2019, 39(08): 66–73.
- [2] 寇双锋, 陈绍宁, 何乐, 等. 石英砂在苏里格致密砂岩气藏压裂的适应性 [J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(02): 65–70.
- [3] 王继平, 张城玮, 李建阳, 等. 苏里格气田致密砂岩气藏开发认识与稳产建议 [J]. 天然气工业, 2021, 41(02): 100–110.
- [4] 何乐, 寇双锋, 陈锐, 等. 低品位致密砂岩气藏压后综合评价与经济高效压裂技术——以苏里格气田桃 7 区块为例 [A]. 中国石油学会天然气专业委员会. 2018 年全国天然气学术年会论文集 (03 非常规气藏) [C]. 中国石油学会天然气专业委员会: 中国石油学会天然气专业委员会, 2018: 11.
- [5] 朱筱敏, 孙超, 刘成林, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田储层成岩作用与模拟 [J]. 中国地质, 2007(02): 276–282.
- [6] 葛党科, 刘宁, 程运甫, 等. 大港油田深层致密气井压裂研究 [C]. // 第十九届中国油田化学品开发应用研讨会. 2013: 28–30.
- [7] 蒋艳芳. 大牛地气田压裂支撑剂优化组合研究与应用 [J]. 天然气技术与经济, 2020, 14(04): 30–35.
- [8] Economides, M. J., Nolte, K. G. 著; 张宝平等译. 油藏增产措施: 第三版 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.4

作者简介：

张立朋 (1988–), 男, 山东东营人, 硕士研究生, 工程师, 2014 年毕业于中国石油大学 (华东), 主要从事油气藏储层改造基础理论、技术方法和现场应用等工作。