

天府气田致密气支撑剂回流防治技术研究及应用

李 静^{1,2}

¹中国石油大学(北京), 石油工程学院, 北京

²中国石油西南油气田公司川中油气矿, 四川 遂宁

收稿日期: 2023年7月26日; 录用日期: 2023年9月4日; 发布日期: 2023年9月15日

摘 要

目前, 天府气田致密气的主要有效开发形式为加砂体积压裂, 但在压后试油和生产阶段存在支撑剂回流现象, 高速流体携带碎屑颗粒对阀门、管道等形成严重的冲蚀, 造成本体穿孔失效, 严重影响生产正常运行。形成一套有效的支撑剂回流防治技术, 对于保障天府气田致密气的高效开发和人员设备安全, 具有重要意义。研究及生产实际表明, 压裂控砂、生产防砂、井口除砂相结合的技术路线是支撑剂回流防治的有效技术, 能减少支撑剂回流及砂粒冲蚀对设备的破坏作用, 有力夯实了致密气高效平稳运行基础。

关键词

致密气, 加砂体积压裂, 冲蚀, 防治技术

Study on Proppant Reflux Prevention and Control Technology of Tight Gas in Tianfu Gas Field

Jing Li^{1,2}

¹College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing

²Petrochina Southwest Oil and Gas Field Company Chuanzhong Oil and Gas Mine, Suining Sichuan

Received: Jul. 26th, 2023; accepted: Sep. 4th, 2023; published: Sep. 15th, 2023

Abstract

At present, the main effective development form of tight gas in Tianfu gas field is volumetric frac-

文章引用: 李静. 天府气田致密气支撑剂回流防治技术研究及应用[J]. 石油天然气学报, 2023, 45(3): 287-292.

DOI: 10.12677/jogt.2023.453035

turing with sand. However, proppant reflux phenomenon exists in the post-pressure oil testing and production stage, and the debris particles carried by high-speed fluid seriously erodes valves and pipelines, resulting in body perforation failure and seriously affects the normal operation of production. The formation of an effective proppant reflux control technology is of great significance to ensure the efficient development of tight gas in Tianfu gas field and the safety of personnel and equipment. Research and production practice show that the combination of sand control in fracturing, sand control in production and sand removal at wellhead is an effective technology for proppant reflux prevention and control, which can reduce the damage of proppant reflux and sand erosion on equipment, and effectively consolidate the foundation for efficient and stable operation of tight gas.

Keywords

Tight Gas, Volumetric Fracturing with Sand, Erosion, Scour Corrosion, Prevention and Control Technology

Copyright © 2023 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

致密气的开采途径是通过加砂压裂工艺在地层中形成具有一定几何尺寸的高导流人工裂缝，为油气生产提供通道，支撑剂的作用主要是使人工裂缝在泵注停止和返排后保持张开状态[1]，对于提高产量具有重要作用。目前天府气田致密气各单井加砂压裂时所加支撑剂为 40/70 目覆膜砂和 70/140 目石英砂，各水平井单井加砂总量范围为 3393~10,856 t，但在试油和生产时存在支撑剂回流现象，目前行业内主要采用地面除砂器进行砂粒治理，但存在除砂效率低，劳动强度大等问题，需开展回流机理、砂粒冲蚀特点等分析，制定防治措施并开展现场试验，最终形成切实有效的防治技术。

2. 天府气田致密气出砂现状

Table 1. Equipment failure statistics of tight gas in Tianfu gas field

表 1. 天府气田致密气设备失效统计表

类型	次数	失效情况	备注
除砂器	2	除砂器滤筒破裂	
水套炉盘管	2	水套炉盘管毗漏	
水套炉阀门	30	针阀阀芯毗坏	19
		笼套式节流阀损坏	9
		针阀阀体变形	1
总站阀门	12	电动调节阀阀杆变形	1
		段塞流捕集器手动排污阀门内漏	4
		段塞流捕集器气动排污阀阀芯刺漏	8
脱水器	3	脱水器受回油及砂粒堵塞影响频繁出现无法自动排水	
油罐	5	密闭发油撬频繁出现发油泵前后过滤器砂堵	

天府气田致密气各单井出砂无明显规律, 整体表现为试油阶段和投产初期出砂量多, 后期减少, 目前出砂主要在新井投产初期, 造成设备堵塞、管线失效等。对出砂砂样开展 X-射线衍射沉积岩全岩定量分析, 与气井压裂所加石英砂成分相近, 即天府气田致密气出砂为支撑剂回流[2]。经统计, 共造成设备失效达 54 次, 其中阀门类共出现变形、内漏、阀芯损坏等故障 42 次, 因设备失效所引起的关井维护共计 15 次, 影响气量接近 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$, 见表 1。

3. 支撑剂回流机理

支撑剂回流是指人工裂缝中的支撑剂在地层能量的作用下被流体从裂缝中带入井筒的过程[3]。

天府气田致密气支撑剂回流原因分析如下:

1) 高速流体的影响。天府气田致密气压裂用液量大, 大量压裂液对地层的挤压及高速流体对近井砂岩的冲刷剪切作用将导致井筒附近的裂缝张口较大, 降低缝壁对支撑剂的夹持作用, 为支撑剂回流创造了条件[3]。

2) 闭合应力的影响。闭合应力越大, 裂缝中各种颗粒间的摩擦力也会增大, 提升了填充层的稳定性, 但当闭合应力增加到一定值时, 会将部分支撑剂压碎, 支撑剂破碎后, 即使流速很小, 碎片也会被带入井筒中[4]。

3) 气液两相流动的影响。随着压裂后液体的返排, 填砂裂缝内出现气液两相流动, 液滴附着在裂缝壁面和支撑剂颗粒上, 会产生新的阻力, 主要是毛细管力和贾敏效应产生的力[5], 对支撑剂而言, 表现为回流动力。

4) 气井生产压差的影响。生产过程中, 提产作业、关井后开井等将在井筒底部形成较大的压差[6], 压差越大, 渗流体对支撑剂的拖拽力就越大, 支撑剂受力易脱落, 造成气井出砂[7]。

4. 支撑剂回流防治技术研究及现场试验

根据天府气田致密气支撑剂回流机理、设备失效原因、砂粒冲蚀特点等分析结果, 开展天府气田致密气支撑剂回流防治技术研究, 初步制定压裂控砂、生产防砂、井口除砂相结合的防治技术路线, 并开展现场试验以验证其效果。

4.1. 压裂控砂

4.1.1. 储层改造工艺优化

天府气田致密气储层改造思路为: 在段内形成多条人工裂缝, 提高井筒与储层的接触面积, 从而提高改造效果[8], 历经四轮技术攻关, 持续开展参数优化, 基本形成致密气高强度低伤害多缝压裂技术, 具体如表 2 所示。

国内外非常规油气储层改造实践表明, 提高加砂强度有利用提高单井产量[9], 此外, 在满足加砂强度的前提下, 需控制入井液量, 以降低对储层的二次伤害[10][11], 根据室内模拟实验, 施工排量越高, 砂堤形态更平缓, 并有向裂缝深处运移的趋势, 若施工排量过低, 支撑剂将无法输送到裂缝深处, 因此, 为了形成更长更有效的支撑裂缝, 条件允许下应尽量提高施工排量。为了实现高强度加砂, 需要开展大规模压裂施工, 而为了降低对储层的伤害, 需要减少滑溜水的用量[8]。为解决这一矛盾, 采用大排量泵注滑溜水, 在保证高强度加砂的前提下减少入井液量, 即施工排量由 $12 \text{ m}^3/\text{min}$ 优化至 $18 \text{ m}^3/\text{min}$ 、加砂强度由 3 t/m 优化至 $4\sim 5 \text{ t/m}$, 液砂比由 $6.7 \text{ m}^3/\text{t}$ 优化至 $3.0 \text{ m}^3/\text{t}$, 压裂液体系由“滑溜水 + 交联液”优化至“变粘滑溜水”(高粘造缝, 携带小粒径支撑剂, 低粘携带大粒径支撑剂, 在缝口附近), 不仅有利于提高裂缝长度, 也有助于形成更加平缓的砂堤形态。

Table 2. Research on reservoir reconstruction technology of tight gas in Tianfu gas field**表 2.** 天府气田致密气储层改造技术攻关

阶段	第一阶段：借鉴吸收	第二阶段：技术攻关	第三阶段：参数优化	第四阶段：技术推广
时间	~2019.06	2019.07~2019.12	2020.01~2020.12	2021.01~至今
支撑剂	70~140 目石英砂 + 40~70 目覆膜砂	70~140 目石英砂 + 40~70 目覆膜砂	70~140 目石英砂 + 40~70 目覆膜砂	70~140 目石英砂 + 40~70 目覆膜砂
压裂液体系	滑溜水 + 交联液	滑溜水	变粘滑溜水	变粘滑溜水
施工排量 (m ³ /min)	12~14	14~16	16~18	18
加砂强度(t/m)	3.0	4~6.7	4~5	4~5
液砂比(m ³ /t)	6.7	4.5	3.2	3.0
井均测试产量 万方/天	5.05	19.77	32.17	43.43

生产数据显示，储层改造工艺优化后，单井无阻流量有了显著提高，第三阶段、第四阶段单井生产阶段均呈现微量出砂或不出砂现象，即“变粘滑溜水 + 高排量 + 适当液量”起到了有效提升逢长、使砂堤形态更平缓的效果。

4.1.2. 纤维控砂技术

加砂压裂已成为油气田增产的一项重要举措，但压后支撑剂回流给生产带来了较大影响，金秋气田致密气采取了尾追覆膜砂的控砂举措，采取该控砂工艺的单井在放喷排液阶段的出砂率为 1.5~5.1%。国内外很多油气田都进行了控砂工艺技术研究，目前，应用较为广泛的支撑剂回流预防控制技术为纤维控砂技术，其原理是把纤维和支撑剂充分混合后随压裂液一起泵入地层，以支撑剂为基体，以纤维为增强相，在人工裂缝中形成复合性支撑剂，纤维与支撑剂颗粒通过接触压力和摩擦力相互作用形成空间网状结构，从而增强支撑剂的内聚力，将其稳定在原始位置，而流体仍可自由通过，最终达到预防支撑剂回流的目的，见图 1。

**Figure 1.** Principle of fiber sand control**图 1.** 纤维控砂原理

在天府气田致密气 JQ511 平台开展“伴注纤维 + 尾追覆膜砂”现场试验，70~140 目石英砂伴注 3 mm 纤维、40~70 目覆膜砂伴注 6 mm 纤维，优化纤维浓度 0.4%，该井累计加砂 8232 t，放喷排液阶段出砂 32 t，出砂率仅为 0.4%，显著低于前期压裂井，起到了明显的控砂效果，见图 2。

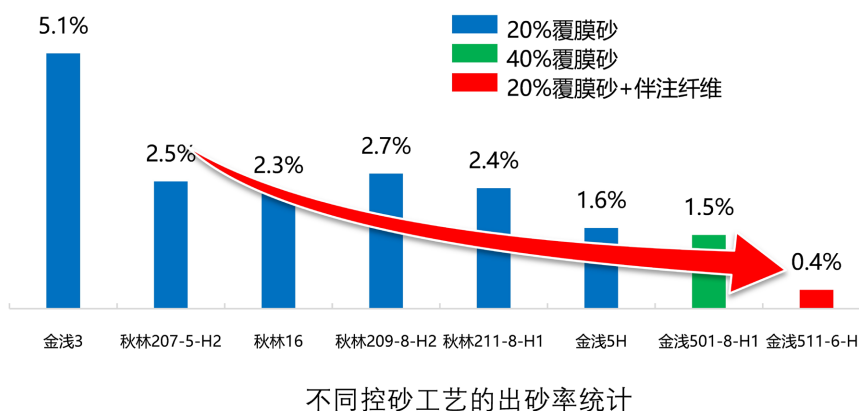


Figure 2. Sand production rate statistics of different sand control processes

图 2. 不同控砂工艺的出砂率统计

4.2. 生产防砂

气井生产压差越大会导致支撑剂更易受力脱落, 造成气井出砂, 根据该原理并结合前期各平台井的出砂规律, 以及出砂在线监测系统使用结论: 产气瞬时越高, 井口大量出砂的概率就越大, 在天府气田致密气后续新井投产时制定了“33”工作制度, 即开井后通过“1/3 定产, 2/3 定产, 3/3 定产”这三个阶段逐步达定产, 每个阶段三天, 每个阶段对产量、压力、出砂现象进行实时监测, 监测结果表明: 通过实施“33”工作制度, 有效缓解了投产初期出砂情况。

4.3. 井口除砂

4.3.1. 除砂器优选

除砂器是地面除砂作业的主要设备, 在井口安装除砂器, 可以对流体中的固体颗粒进行分离处理, 有效保护地面流程设备免受高速含砂流体的冲蚀。除砂器的分离原理主要有过滤分离、旋流分离、重力分离、惯性分离, 根据除砂原理的不同, 目前常用的除砂器有旋流式和过滤式两种[2]。除砂器的安装方式有立式和卧式两种, 立式除砂器可以利用重力进行分离, 理论分离效果好; 卧式除砂器则更便于安装操作。

初期投产时各单井井口至水套炉之间均各安装 1 台单滤管道除砂器(过滤式), 现场应用效果表明: 投产初期出砂多, 易堵塞滤网、导致滤网变形, 损坏, 且清洗除砂器时需倒换旁通, 由于出砂无规律性, 清洗时可能有砂粒进入下游, 造成冲蚀[2]。综合考虑过滤式、旋流式除砂器的优缺点, 在后续投产井中推行定产 10 万方/天以上平台井 2~3 个月的排采期, 采用原理为旋流分离的排采除砂设备, 正式流程采用过滤式双滤筒除砂器。

4.3.2. 现场应用及效果

在 QL16 和 QL207 平台采用排采设备—旋流式除砂器, 并配合使用声学法出砂在线监测系统, 现场应用效果: QL16 平台旋流式除砂器除砂效率为 77%, 后端流程取样未见出砂, QL207 平台除砂效率约 92%, 后端取样未发现出砂或偶尔微量见砂。在配合旋流式除砂器和出砂在线监测系统使用的同时, 对砂粒冲蚀重点位置进行壁厚检测(超声波测厚、DR 射线检测、相控阵 C 扫描检测等), 以判断砂粒对管线的冲蚀情况, 从检测结果发现, 投产初期出砂量较大, 且除砂工艺不适应, 壁厚减薄较为明显, 在后期由于出砂量降低, 且除砂工艺优化后减薄明显减缓。

现场应用表明, 旋流式除砂器能除去大部分出砂, 有力减少砂粒对地面流程设备的冲刷腐蚀, 在线

监测装置能对出砂趋势进行监测。根据实际应用效果,继续推行定产 10 万方/天以上的平台井设置 2~3 个月的排采期(采用原理为旋流分离的排采除砂设备),正式流程采用过滤式双滤筒除砂器,目前基本满足生产需要。

5. 防治效果分析

通过调研,行业内最常用的支撑剂回流治理方式为采用地面除砂器,未从源头进行治理,本文通过分析支撑剂回流机理、设备失效原因等,形成全生命周期的支撑剂回流防治技术路线-优化储层改造工艺、制定生产防砂制度、优化井口除砂措施,现场生产实际表明其能有效地减少支撑剂回流对流程设备的冲蚀破坏,10 口井单月因出砂造成的失效次数已由之前的 6.8 次下降至目前的 1.1 次,砂粒防治取得明显的成效。

6. 结论

1) 采用“变粘滑溜水 + 高排量 + 适当液量”储层改造工艺,起到了有效提升逢长、使砂堤形态更平缓的效果,生产效果显示各单井的无阻流量均有显著提高,放喷排液和生产阶段出砂量明显降低。

2) 天府气田致密气平台井开采过程中采用“33”工作制度、逐步开到定产,有力降低了因生产压差过大造成的气井出砂。

3) 通过优选井口除砂器、配合使用出砂在线监测装置,并开展砂粒冲蚀重点位置壁厚检测,实现了井口有效除砂,最大限度地降低了砂粒对地面流程设备的冲蚀破坏。

现场应用效果表明,天府气田致密气压裂控砂、生产防砂、井口除砂相结合的砂粒防治技术路线是切实有效的。

参考文献

- [1] 梁天成,才博,蒙传幼,等.水力压裂支撑剂性能对导流能力的影响[J].断块油气田,2021,28(3):403-407.
- [2] 李静,古纯勇,殷建成,等.秋林区块致密气设备冲蚀和除砂工艺分析[J].石油化工腐蚀与防护,2022,39(4):25-29.
- [3] 陈冬林,周天春,刘华杰,等.川西气田压裂井出砂机理及防砂技术[J].天然气工业,2007,27(8):91-93.
- [4] 袁嘉欣.深层致密气压裂水平井支撑剂回流数学模型研究及应用[D].[硕士学位论文].北京:中国石油大学(北京),2017.
- [5] 何世云,陈琛.加砂压裂压后排液的控砂技术[J].天然气工业,2002,22(3):45-46.
- [6] 江春河,郎学军,易明新,等.支撑剂回流控制技术研究与应[J].钻采工艺,2008,31(6):151-153.
- [7] 李耀,解亚鹏,薛辉,张玉华.榆林气田气井出砂机理分析及合理配产确定[J].石油化工应用,2016,35(11):86-90.
- [8] 郑有成,韩旭,曾冀,等.川中地区秋林区块沙溪庙组致密砂岩气藏储层高强度体积压裂之路[J].天然气工业,2021,41(2):92-99.
- [9] 闫怀荣,蒲三龙,魏江伟,张倩,李曼平.姬塬油田高强度压裂改造工艺技术研究[J].石油化工应用,2017,36(4):84-88.
- [10] 王帅,谢元,周渝,等.延长气田微弱伤害胍胶压裂液体系的研究应用[J].石油化工应用,2020,39(4):26-31.
- [11] 唐洪明,唐浩轩,何江,等.水基压裂液对致密砂岩气层的损害机理——基于《水基压裂液性能评价方法:SY/T 5107-2016》的改进[J].天然气工业,2020,40(9):55-63.