

促缝增效体积压裂技术研究与实践

张群双¹, 杨 浩¹, 曾 艳²

¹成都劳恩普斯科技有限公司, 四川 成都

²辽河油田冷家油田开发公司, 辽宁 盘锦

收稿日期: 2023年12月31日; 录用日期: 2024年4月17日; 发布日期: 2024年4月25日

摘要

页岩、煤岩等非常规油气配套体积压裂2.0技术实现效益开发, 因降本增效, 丛式水平井平台的井间距减小到300 m左右, 使得压窜问题频发, 给生产带来了很多不利影响。为了在不降低压裂施工规模, 不降低单井EUR的基础上, 达到防治压窜目的, 进行了促缝增效防压窜压裂技术研究。通过对压窜特征进行深入分析, 找出了导致压窜发生最主要的原因, 是压裂过程中受到断裂系统天然弱面、母子井压差驱动等牵引作用, 形成了液流优势通道, 单缝突进, 从而窜通邻段或邻井。为此提出了促缝增效防压窜压裂技术思路, 研发了具有不同性能优势的防压窜多种材料, 根据不同压窜风险, 设计不同的材料组合方式, 形成了针对性地现场工艺实施方案。在川内页岩气现场进行了实验应用, 取得了较好的防压窜效果。

关键词

促缝增效, 防压窜, 封堵, 天然裂缝, 优势通道

Research and Practice of Anti-Pressure Channeling Fracturing Technology for Promote Fractures and Increase Efficiency

Qunshuang Zhang¹, Hao Yang¹, Yan Zeng²

¹Chengdu Learn-Practices Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan

²Lengjia Development Company of Liaohe Oilfield, Panjin Liaoning

Received: Dec. 31st, 2023; accepted: Apr. 17th, 2024; published: Apr. 25th, 2024

Abstract

The unconventional oil and gas matching volume fracturing 2.0 technology, such as shale and coal, has achieved beneficial development. Due to cost reduction and efficiency improvement, the well

文章引用: 张群双, 杨浩, 曾艳. 促缝增效体积压裂技术研究与实践[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(4): 402-410.
DOI: [10.12677/ag.2024.144037](https://doi.org/10.12677/ag.2024.144037)

spacing of the cluster horizontal well platform has been reduced to about 300 meters, resulting in frequent pressure channeling problems and bringing many adverse effects to production. In order to achieve the goal of preventing and controlling pressure channeling without reducing the scale of fracturing construction and single well EUR, research on expanding and controlling fractures to prevent pressure channeling fracturing technology was carried out. Through in-depth analysis of the characteristics of pressure channeling, the main cause of pressure channeling has been identified, which is caused by the natural weak surface of the fracture system and the pressure difference between the mother and child wells during the fracturing process, forming a fluid flow advantage channel and a single fracture advancing, thereby channeling through adjacent sections or wells. To this end, the concept of expanding and controlling fractures to prevent pressure channeling and fracturing technology has been proposed, and various materials with different performance advantages have been developed to prevent pressure channeling. Based on different pressure channeling risks, different material combinations have been designed, forming targeted on-site process implementation plans. Experimental applications were conducted on shale gas sites in Sichuan, and good anti pressure channeling effects were achieved.

Keywords

Promote Fractures and Increase Efficiency, Anti-pressure Channeling, Plugging, Natural Crack, Advantage Channel

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

压窜会严重影响邻井钻井、压裂以及生产正常运行，造成工程复杂和生产井水淹减产。如何防治压窜，已经成为页岩油气体积压裂方案中重点优化内容，行业学者也进行了一些相关研究。

杨学锋[1]等研究认为天然裂缝带发育、生产井-压裂井井间压差、井距较小是导致井间压窜的主要因素。统计数据表明：当井间距小于300米时，压窜几率显著增大最高可达80%；长宁地区74%的压窜段位于连通邻井的天然裂缝上；压窜井通过排水采气工艺和一定时间周期可以恢复94%产能。李亚茜[2]等研究认为影响压窜的地质工程主控因素为：井间位置关系 > 母井生产时间 > 平均单簇用液规模 > 天然裂缝；优化子井压裂时间和平均单簇用液规模，可有效降低压窜影响程度；针对贯穿型天然裂缝发育井段，需要严格优化射孔和压裂参数。何乐[3]等采用灰色关联分析法研究认为井间位置关系、母井生产时间、平均单簇用液规模、天然裂缝、射孔参数为压窜主控因素，单段用液规模、垂深、施工排量为次要因素；针对性优化用液规模、射孔参数，匹配最优单簇用液规模和裂缝体积，有效控制单缝长度，能降低压窜影响程度。王喆[4]认为防止煤层气井压窜的方法有：压裂施工前在窜扰方向预先对生产井注入流体；注入不同尺度的不易溶解的颗粒；使用交错射孔和非均匀射孔工艺；建立压驱邻井压窜风险预警机制；优化加砂量和注液量，控制压裂规模。

以上学者主要是进行了压窜方面的一些统计分析，取得了压窜的主控因素认识，但主体做法是优化射孔和压裂参数，实施“双控”措施(控制加砂规模、控制施工排量)，来控制单缝长度，从实施效果来看，一方面只是一定程度上降低了压窜程度，但并没有有效遏制；另一方面是以减小改造体积，降低单井EUR为代价而实施的被动预防。

为此，开展了促缝增效防压窜压裂技术研究，形成了新技术产品和配套工艺，并在现场进行了实践应用，防压窜效果明显，实现了不降规模，有效防治，增产增效的改造目的。

2. 促缝增效防压窜压裂技术

2.1. 压窜分析

页岩油气田开发技术经不断迭代升级, 目前井距设计基本固化为300~400 m为主, 压裂工艺以段内多簇为主, 为了提高改造效果, 施工规模不断提高, 压窜发生的概率也随之增大。经统计分析, 压窜的主控因素主要为天然裂缝带牵引、子母井间压差驱动和多簇裂缝非均衡扩展[5]。

可见, 压窜防治的目标是要防止液体进入优势通道或母井低压区, 要进行缝端大渗流通道的自然选择性地有效封堵, 促使裂缝转向并均衡扩展, 尽可能扩大页岩基质改造体积[6]。这个通过普通暂堵是很困难实现的, 因为普通暂堵通常采用的是粉末或颗粒, 单一材料应用, 用量较少, 作用有限, 尤其对于天然裂缝带发育的区域, 现场应用结果表明防压窜效果不明显。

通过数值模拟分析可知, 要想取得较好的防压窜效果, 需要多各材料协同作用才能取得更好的效果, 见图1。

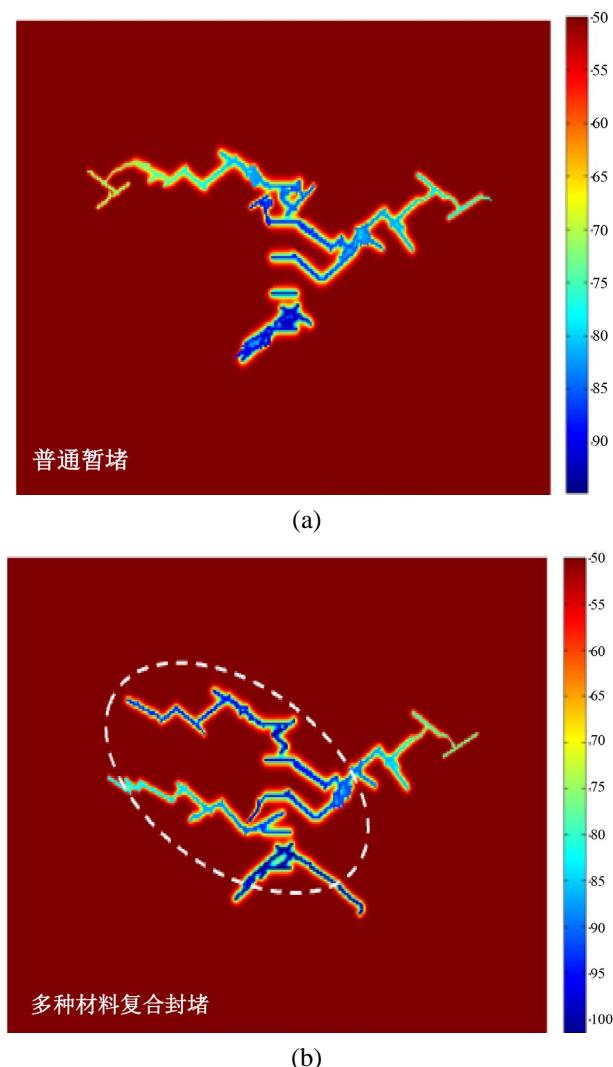


Figure 1. Numerical simulation diagram of ordinary temporary plugging and composite plugging with multiple materials
图1. 普通暂堵和多种材料复合封堵数值模拟图

2.2. 技术思路

页岩一般天然裂缝发育，按发育规模分为微裂缝、裂缝带、地层挠曲、小断层、大断层等；按发育形态分为垂直缝、斜交缝、水平缝等。不同的天然裂缝发育规模和形态，对应压窜风险不同，压窜防治策略也不同。量化表征和预测储层裂缝发育特征及分布状态对页岩气勘探和高效开发具有重要的现实意义[7][8]。借助蚂蚁体、曲率属性等手段对天然裂缝发育情况进行预测，再结合邻井生产情况、平台井压裂进度等情况，综合评估压窜风险，从而能够制定出由不同材料组合和实施工艺的有针对性的防治方案。

为此提出控缝材料 + 支撑剂 + 压裂液“复合材料、综合防治”的促缝增效防压窜压裂技术思路。即选择合适时机，注入防窜组合材料和支撑剂，在压裂液携带下，防窜塞运移到优势通道处，遇阻力开始聚集、粘结组装成团，自适应匹配优势通道尺寸规模进行封堵，促使新缝起裂，增大基质改造体积，压后部分材料溶解保持裂缝有效支撑，恢复渗流通道，从而提高单井 EUR，见图 2。

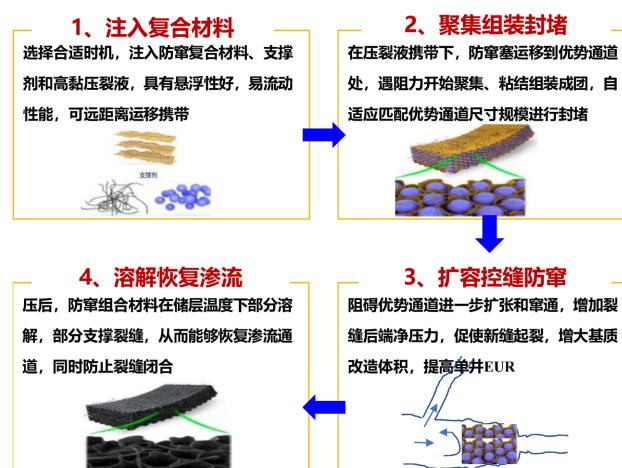


Figure 2. Diagram of fracturing technology of anti-pressure channeling for increasing volume and controlling fractures

图 2. 促缝增效防压窜压裂工艺示意图

2.3. 防窜材料

防窜材料包括防窜剂 A、防窜剂 B、防窜剂 C 三种材料组合，见表 1。

Table 1. Parameter table of anti channeling materials

表 1. 防窜材料性能参数表

材料类型	性状	大小	密度(g/cm ³)	温度(℃)	溶解时间	承压能力
防窜剂 A	丝状	长度 1~12 mm 直径 15 μm	1.2~1.4	40~140	<48 h 可溶或不可溶	
防窜剂 B	固体颗粒	10~20 μm (200~1200 目)	1.2~1.4	40~140	不溶	5~20 MPa 可调
防窜剂 C	固体颗粒	1~3 mm、20~80 目、 200~400 目	1.2~1.4	40~140	<48 h 可溶	

利用三种材料不同的性能优势，与支撑剂和压裂液一起形成固液两相防窜塞，对优势通道实施人工填充封堵，干预和预防主缝和优势通道裂缝过度延伸，实现“控远扩近”，开启新裂缝，提高各簇均衡

扩展程度, 防压窜的同时提高合理缝长范围内的裂缝复杂性, 实现防压窜, 提高 EUR 的目的, 见图 3。

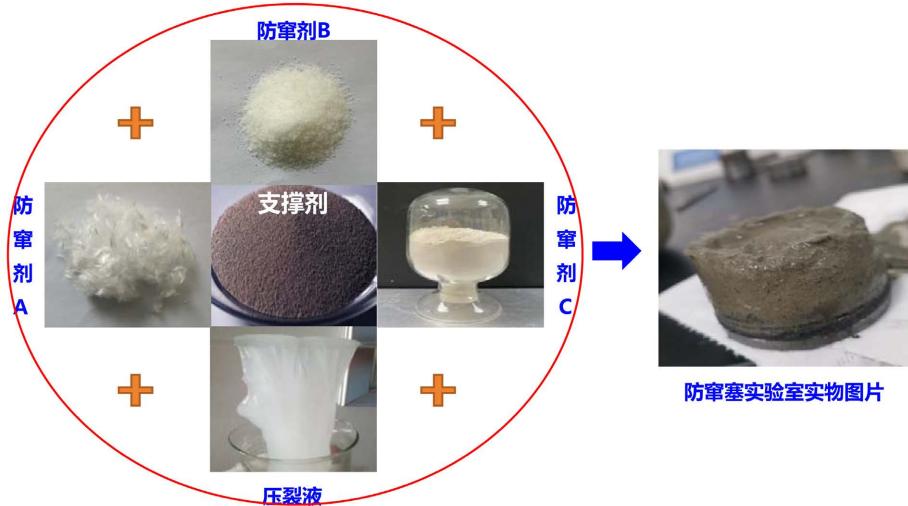


Figure 3. Diagram of anti channeling plug
图 3. 防窜塞形成示意图

2.4. 实验评价

1) 组合承压性能

根据页岩储层特点和现场技术需求, 实验评价不同承压条件、裂缝宽度下的防窜材料组合方案, 通过高温高压三维裂缝堵漏仪, 对比不同组合封堵承压效果。

实验准备: 1) 材料准备: 2000 mL 烧杯 12 个, 清水 1200 mL, 70/140 目石英砂 1800 g、6 mm 防窜剂 A 150 g、200~400 目防窜剂 B 1300 g、20~80 目激活剂 C 150 g、压裂用乳液稠化剂 50 ml; 2) 仪器准备: 搅拌器、改造的岩性驱替装置, 包括钢制岩心缝板、岩心夹持器、驱替泵等, 见图 4。



Figure 4. Physical diagram of steel core fracture plate, core gripper, displacement pump and control panel
图 4. 钢制岩心缝板、岩心夹持器和驱替泵及控制面板实物图

实验方法: 1) 用 2000 mL 烧杯称取 1000 mL 清水, 开启搅拌, 设置转速 600 r/min; 2) 搅拌条件下按照防窜材料组合方案的配比依次加入压裂用乳液稠化剂、70/140 目石英砂、6 mm 防窜剂 A、200~400 目防窜剂 B、20~80 目防窜剂 C; 3) 各项防窜材料加注完毕开始计时, 搅拌 2 min 后静置 3 min 后制得防窜塞备用; 4) 将楔形钢制岩心缝板出口宽度设置为 0.3 mm, 装入岩心夹持器, 连接夹持器与中间容器; 5) 将配置好的防窜沙塞置入 1500 mL 的中间容器中, 打开中间容器的连接阀门, 启动平流泵, 设置平流泵排量为 40 mL/min, 记录峰值压力; 6) 重复上述实验过程, 完成 12 组防窜材料组合方案的承压实验, 分别记录峰值压力, 见表 2 和图 5。

Table2. Table of pressure-bearing in different anti channeling material combination scheme
表 2. 不同防窜材料组合方案的承压性能表

组合方式	配比	峰值压力 (MPa)	推荐应用 条件
组合 1	1.5 wt%防窜剂 A + 0.5 wt%激活剂 C + 8 v/v%石英砂	5.61	
组合 2	1.0 wt%防窜剂 A + 1.0 wt%激活剂 C + 8 v/v%石英砂	6.45	
组合 3	0.5 wt%防窜剂 A + 1.5 wt%激活剂 C + 8 v/v%石英砂	6.79	
组合 4	1.5 wt%防窜剂 A + 8 v/v%防窜剂 B + 1.0 wt%激活剂 C + 8 v/v%石英砂	6.39	承压需求 < 10 MPa
组合 5	1.0 wt%防窜剂 A + 8 v/v%防窜剂 B + 1.0 wt%激活剂 C + 10 v/v%石英砂	7.59	
组合 6	0.5 wt%防窜剂 A + 8 v/v%防窜剂 B + 1.0 wt%激活剂 C + 12 v/v%石英砂	8.76	
组合 7	1.0 wt%防窜剂 A + 8 v/v%防窜剂 B + 0.5 wt%激活剂 C + 10 v/v%石英砂	10.24	
组合 8	1.0 wt%防窜剂 A + 10 v/v%防窜剂 B + 1.0 wt%激活剂 C + 10 v/v%石英砂	11.63	10 MPa ≤ 承压需求 < 15 MPa
组合 9	1.0 wt%防窜剂 A + 12 v/v%防窜剂 B + 1.5 wt%激活剂 C + 10 v/v%石英砂	13.89	
组合 10	1.5 wt%防窜剂 A + 8 v/v%防窜剂 B + 1.5 wt%激活剂 C + 8 v/v%石英砂	13.54	
组合 11	1.5 wt%防窜剂 A + 10 v/v%防窜剂 B + 1.5 wt%激活剂 C + 10 v/v%石英砂	18.12	15 MPa ≤ 承压需求 < 20 MPa
组合 12	1.5 wt%防窜剂 A + 12 v/v%防窜剂 B + 1.5 wt%激活剂 C + 12 v/v%石英砂	19.86	

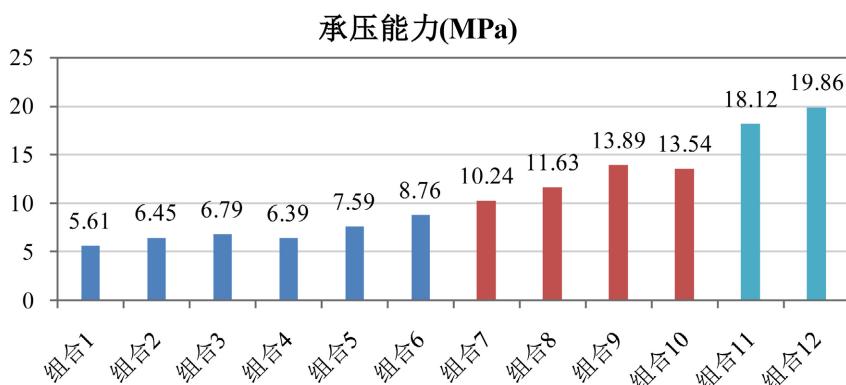


Figure 5. Diagram of pressure bearing capacity different anti channeling material combination schemes

图 5. 不同防窜材料组合方案的承压能力图

2) 可视化平板实验

通过“楔形”可视化平板实验，在平板中不同位置，均可看到“团簇”状防窜塞形成，悬浮性好，运移距离较远。

实验准备：1) 材料准备：清水 50 L, 70/140 目石英砂 7.5 kg、6 mm 防窜剂 A 0.75 kg、200~400 目防窜剂 B 7.5 kg、20~80 目激活剂 C 0.75 kg、压裂用乳液稠化剂 0.2 L；2) 仪器准备：支撑剂平板缝输送实验装置，包括配液罐、混砂罐、平板缝及监测录像系统等。

实验方法：1) 加入 50 L 清水和 0.2 L 压裂用乳液稠化剂，开启配液罐搅拌，设置转速 1000 r/min，测试液体粘度达到 25 mPa.s 以上即可进行下一步；2) 搅拌条件下依次缓慢加入 7.5 kg 70/140 目石英砂、0.75 kg 防窜剂 A、7.5 kg 防窜剂 B、0.75 kg 防窜剂 C；3) 各项防窜材料加注完毕，搅拌均匀，即可进行平板缝注入防窜塞实验；4) 拍摄防窜塞在平板缝中运移状态照片，见图 6。



Figure 6. Diagram of experiment on injecting anti channeling plug into flat seams

图 6. 平板缝中注入防窜塞实验图

2.5. 工艺方案

结合初始压窜风险评估情况进行拉链顺序、压裂段簇及控缝施工规模优化，配合以科学的促缝增效工艺设计提前预防压窜，而非窜后治窜。

1) 压窜风险评估

压窜风险评估是一个动态管理的过程，与井间距、压裂施工规模、天然裂缝发育规模和形态、子母井间压裂和生产进度情况等有关。可以根据获取数据完备度来进行定性或定量地风险分类评估，再进行高、中、低风险分级管理，见表 3。

定量风险评估方法是依据灰色关联法、数值模拟等工具方法[9]，确定各地质工程因素对压窜程度的影响因子，通过加权算术平均求值等计算规则，可以得到各压裂段对应的压窜风险系数。

2) 针对性方案

通过室内实验评价结果和现场应用实践，制定出不同压窜风险等级针对性的促缝增效防压窜工艺设计。

Table3. Table of classification methods and targeted solutions for different risk levels

表 3. 不同风险等级的分类方法和针对性方案表

压窜风险评估	分类依据	促缝增效防压窜工艺设计
高风险段	1) 定性分类依据: ① 发育贯通式裂缝(与井筒方向垂直横切) ② 施工规模较高(高于平均规模) ③ 邻井已压裂投产(投产时间越长，风险越高) 2) 定量分类依据: $0.7 \leq \text{压窜风险系数}$	以设计排量 50% 的施工排量注入，高加量防窜材料(15~20 吨)，高砂浓加支撑剂(350~400 kg/m ³)，3~4 次注入防窜塞
中风险段	1) 定性分类依据: ① 发育斜交式裂缝(与井筒方向斜交) ② 施工规模中等(接近平均规模) ③ 邻井已压裂未投产(邻井压裂规模越大，风险越高) 2) 定量分类依据: $0.4 \leq \text{压窜风险系数} < 0.7$	以设计排量 80% 的施工排量注入，中加量加防窜材料(10~15 吨)，中砂浓加支撑剂(300~350 kg/m ³)，2~3 次注入防窜塞
低风险段	1) 定性依据: ① 发育平行式裂缝(与井筒方向平行) ② 施工规模较低(低于平均规模) ③ 邻井未压裂(没有邻井工程干扰) 2) 定量依据: $\text{压窜风险系数} < 0.4$	以设计排量 100% 的施工排量注入，低加量注入防窜材料(5~10 吨)，低砂浓加支撑剂(250~300 kg/m ³)，1~2 次注入防窜塞

3. 现场应用实践

川南某页岩气区块，井距 300 m，区域内天然裂缝带发育，且规模较大，多为与井筒方向垂直横穿多井。A 平台有 4 口水平井，从西向北分别为 1、2、3、4 井，其中 4 井已生产，本次拉链压裂 1、2、3 井，1 井西侧与 B 平台 4 井相邻。实施防压窜工艺前，1 井已完成 16 段压裂施工(共 20 段)，其中压窜段有 12 段，占比 75%，且邻井井口平均涨压 9.6 MPa，最高涨压 28 MPa。随着压裂进度推进，由于遇到本井靠近 A 点的 2 条大的天然裂缝带，以及大规模压裂产生的累积效应，经评估，后面未施工段全是高风险段。按任务要求，需对 1 井正处于天然裂缝带上的第 17 段实施防压窜工艺。

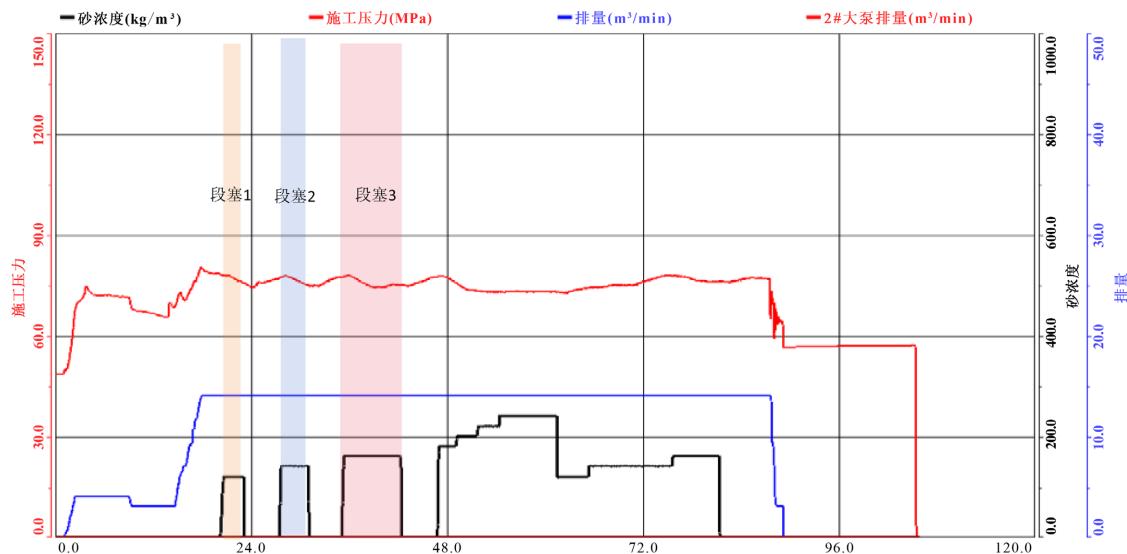


Figure 7. Diagram of anti-channeling fracturing construction curve
图 7. 防压窜压裂施工曲线图

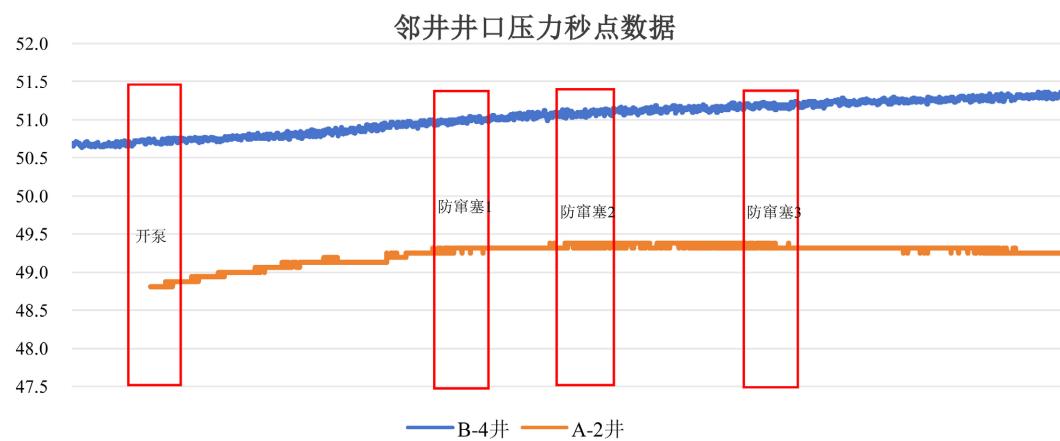


Figure 8. Diagram of pressure response curve of adjacent well with fracturing A-1 well
图 8. A-1 井压裂邻井井口压力响应曲线图

按照不同风险等级的分类方法和针对性方案表，对 1 井第 17 段实施了 3 个防压窜塞，见图 7、图 8。

- 1) 刚开始泵注，邻井 A-2 井口压力缓慢上涨，邻井 B-4 井口压力上涨较快。
- 2) 第 1 个防窜塞进入地层后，西侧 B-4 井裂缝得到控制，不再上涨，东侧 A-2 井仍然上涨。
- 3) 第 2 个防窜塞进入地层后，东侧 A-2 井上涨趋势开始减弱，西侧 B-4 井开始上涨。

4) 第3个防窜塞进入地层后,西侧B-4井裂缝得到控制,不再上涨,东侧A-2井保持微涨趋势。

整个压裂施工过程中,邻井井口压力均得到较好控制,上涨幅度小于0.5 MPa,远低于对比段,防压窜效果明显,同时光纤测井监测结果也表明,实施了防压窜工艺的段产气贡献率明显也高于对比段。

后又在该区块应用了多段,均取得了较好的防压窜效果。

4. 认识和结论

1) 防压窜的目标是在不降低施工规模的情况下,实现邻井压窜的有效防治,同时提高基质改造体积,提高单井EUR。促缝增效防压窜压裂技术经过现场应用实践,说明措施有效,达到了防压窜工艺目标。

2) 通过数值模拟确定了多材料组合应用防窜的可行性,结合室内多材料组合配比承压实验和平板缝实验,优化出不同承压需求的材料组合配比,并创新性地提出压窜风险评估方法,从而制定出有针对性的促缝增效防压窜工艺方案。其技术核心是不同性能材料的有机组合,协同作用,形成特色的多材料聚集组装和自适应封堵技术。

3) 促缝增效防压窜压裂技术在页岩气平台井压窜防治上取得了阶段成功,可进一步在页岩油、煤岩气等油气藏实践应用。

参考文献

- [1] 杨学锋, 黄浩勇, 王颂夏, 等. 长宁地区页岩气井压窜原因分析及对策研究[C]//中国石油学会天然气专业委员会, 第33届全国天然气学术年会(2023)论文集(03非常规气藏). 2023: 8.
- [2] 李亚茜, 阴丽诗, 李芝力, 等. 威荣页岩气田压窜影响特征与管控对策研究[J]. 石化技术, 2023, 30(3): 167-169.
- [3] 何乐, 袁灿明, 龚蔚. 威远页岩气井间压窜影响特征与控制措施[C]//中国石油学会天然气专业委员会, 第31届全国天然气学术年会(2019)论文集(03非常规气藏). 2019: 9.
- [4] 王喆. 延川南煤层气田压窜井影响因素分析和措施[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(16): 9-11.
- [5] 王大为, 高振南, 李俊飞, 等. 裂缝性低渗透油藏窜流规律实验研究[J]. 非常规油气, 2021, 8(4): 43-47.
- [6] 金智荣, 孙悦铭, 包敏新, 等. 基于真三轴压裂物理模拟系统的暂堵压裂裂缝扩展规律试验研究[J]. 非常规油气, 2021, 8(6): 98-105.
- [7] 胡浩浩, 鞠玮, 郭伟, 宁卫科, 梁艳, 于国栋. 川南海坝区块页岩气储层裂缝发育特征与预测[J]. 非常规油气, 2023, 10(1): 61-68.
- [8] 彭越, 张满郎, 李明秋, 等. 基于图像识别技术的裂缝发育程度定量评价新方法——以安岳气田须二气藏为例[J]. 非常规油气, 2024, 11(1): 12-21.
- [9] 刘明, 李彦婧, 潘兰, 等. 南川地区页岩储层构造裂缝特征及其定量预测[J]. 非常规油气, 2023, 10(3): 8-14.