

# 页岩气井滑溜水连续加砂技术研究与应用

张群双<sup>1</sup>, 刘晓宇<sup>2</sup>, 卢家孝<sup>1</sup>

<sup>1</sup>捷贝通石油技术集团股份有限公司, 四川 成都

<sup>2</sup>中国石油集团渤海钻探工程有限公司井下技术服务分公司, 天津

Email: zhangqunshuang@163.com

收稿日期: 2021年4月7日; 录用日期: 2021年6月17日; 发布日期: 2021年6月24日

---

## 摘要

随着页岩气规模开发, 滑溜水压裂液因其低黏、低摩阻、易滤失、低成本以及更适应特低渗、超低渗储层的压裂改造等特性, 应用越来越广泛。滑溜水加砂可以分为段塞式和连续式两种模式。从各油气田统计数据来看, 压后效果与加砂量呈一定的正相关关系, 因此采用滑溜水连续加砂技术提高加砂量是必然也是最为有效的手段。通过对大型可视平板裂缝模拟系统的试验数据进行分析, 掌握了滑溜水携砂规律, 并进行了滑溜水连续加砂成功率影响因素分析, 制作了连续加砂优化版图, 确立了实施低粘滑溜水连续加砂工艺方案, 同时结合现场施工经验, 提出了实施连续加砂前确保成功率的预判方法。现场应用结果表明, 该项加砂工艺可以实现控液提砂, 提高加砂强度, 在同等液量的情况下, 加砂量提高100%~200%, 压裂增产效果提高10%~30%。

## 关键词

滑溜水, 连续加砂, 脆性指数, 砂堤平衡高度, 控液提砂

---

# Research and Application on Continuous Carrying Sand with Slick-Water in Shale Gas Well

Qunshuang Zhang<sup>1</sup>, Xiaoyu Liu<sup>2</sup>, Jiaxiao Lu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gepetto Oil Technology Group Co. Ltd., Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>Downhole Technical Service Branch of CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Tianjin

Email: zhangqunshuang@163.com

Received: Apr. 7<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jun. 17<sup>th</sup>, 2021; published: Jun. 24<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

With the large-scale development of shale gas, fracturing fluid of slick-water has been more and more widely used due to its low viscosity, low friction, easy filtration, low cost and more suitable for stimulation of ultra-low permeability and ultra-low permeability reservoirs. The model of carrying sand with slick water is divided into plug type and continuous type. To improve the quantity of sand, continuous sand with slick-water technology is inevitable, and is also the most effective means. By analyzing the test data of large visual plate crack simulation system, the author masters the law of carrying sand with slick-water, and analyzes the influencing factors of the success rate of slick-water, and establishes continuous carrying sand optimized layout, and shows the plan for continuous sand with slick-water technology, combines with experience in fracturing field, and shows the forecasting methods before continuous sand. The results of field application show that continuous carrying sand is one method of carrying sand efficiently by more sand with less liquid, under the same liquid quantity, increasing the sand quantity by 100%~200% and increasing the fracturing stimulation effect by 10%~30%.

## Keywords

Slick-Water, Continuous Carrying Sand, Brittle Index, Balanced Height of Sand Bank, More Sand with Less Liquid

Copyright © 2021 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. 前言

随着页岩油、页岩气等非常规油气藏开发的兴起,滑溜水压裂液因其具有低黏度、低摩阻、低伤害、低成本、易进入微细孔缝、波及体积大,以及获得了比凝胶压裂液更好的增产效果等特性,应用越来越广泛,用量越来越巨大,相关研究也越来越深入。R. S. Schols [1]利用透明平行玻璃板对不同影响因素下支撑剂的铺置规律进行了研究,并将砂堤的形成过程分为3个阶段。Palisch [2]认为滑溜水压裂形成的裂缝较窄,支撑剂输送困难,裂缝中支撑剂沉降规律不确定,滑溜水压裂需要超低密度高强度支撑剂。2015

年温庆志[3], 自主设计了大型可视平板裂缝模拟系统, 研究了不同支撑剂密度下滑溜水的携砂性能及支撑剂在裂缝中的沉降运移规律。2018年张争[4]设计研发了“水力压裂裂缝与射孔模拟实验系统”装置研究了不同携砂液进口位置对压裂裂缝内滑溜水携砂输送的影响规律, 以及从数值模拟角度研究了裂缝内滑溜水携砂固-液两相输送规律。目前, 这些研究多在室内试验和理论方面开展, 没有把理论与现场压裂施工实践相结合, 就全程低粘滑溜水连续加砂技术在现场应用方面提供了一定的指导意义。

## 2. 滑溜水携砂规律研究

### 2.1. 滑溜水加砂模式

滑溜水加砂模式主要有段塞式加砂和连续式加砂, 段塞式加砂包括短段塞式加砂和长短组合段塞加砂, 连续式加砂包括一段式连续加砂和多段式连续加砂, 如图 1。连续式加砂的优势有四个方面: 1) 提高了液体效率。几乎不用液塞或液塞很少, 减少了液体浪费。2) 大幅提高加砂量。由于是连续加砂, 单段加砂量得到大幅增加。3) 提高现场决策安全。消除了混砂液柱和净液柱交替变化所引起的压力上下波动变化, 地层反应更加直观, 有利于现场判断和决策。4) 提高压裂效果。据油气田统计数据显示, 压裂效果与加砂规模存在一定的正相关关系, 提高单段和单井的加砂量, 更大概率上能获得高产。

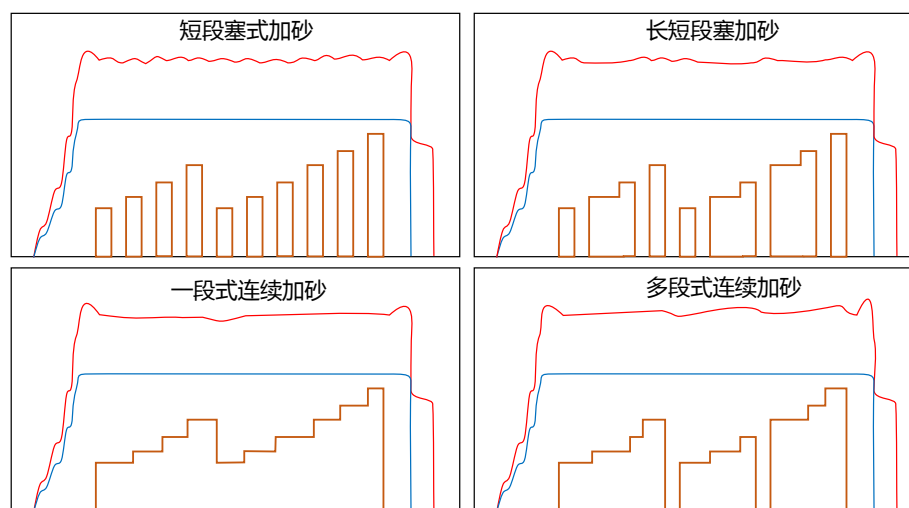
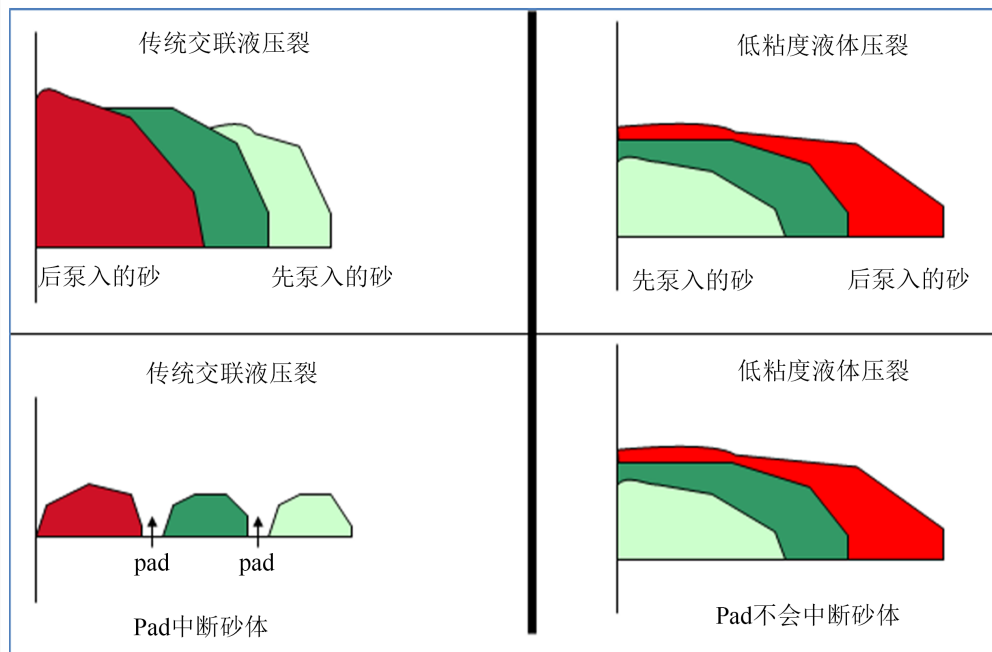


Figure 1. Different sanding patterns with slick-water  
图 1. 滑溜水不同加砂模式图

### 2.2. 滑溜水携砂规律

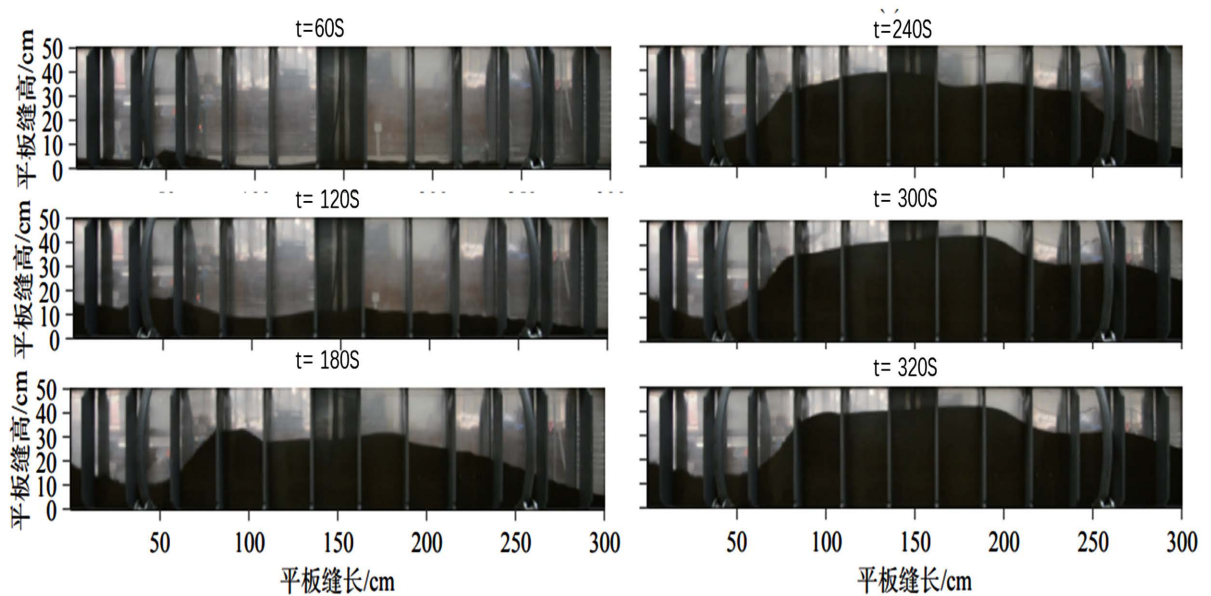
滑溜水黏度小, 携砂能力差, 施工中多使用大排量进行携砂[5], 该特征决定了支撑剂在压裂液中的沉降及运移规律势必不同于传统的高黏度胍胶压裂液, 湍流强度、流固耦合等可能成为此时主要的影响因素。

滑溜水携砂规律与交联液携砂规律有很大不同。传统交联液加砂, 液体黏度高, 悬浮性好, 沉降较慢, 先泵入的支撑剂向裂缝端部运移, 后泵入的支撑剂逐步向缝口沉降堆积; 如果采取段塞式加砂, 将可能出现支撑剂铺置不连续的情况。而滑溜水加砂, 液体黏度低, 沉降较快, 先泵入的支撑剂在缝口附近首先堆积, 裂缝截面减小, 流速变大, 携带后泵入的支撑剂向缝端滚动运移和沉降, 使得后泵入的支撑剂覆盖前面形成的砂堤, 逐步向缝端堆积; 如果采取段塞式加砂, 支撑剂铺置仍然是一个连续剖面, 如图 2。可见, 滑溜水加砂无论是段塞式还是连续加砂, 支撑剂铺置都是层叠的连续剖面。



**Figure 2.** Profile of proppant placement with different fracturing fluids  
**图 2.** 不同压裂液携砂支撑剂铺置剖面图

通过大型可视化平板裂缝系统进行滑溜水携砂规律研究发现，平板裂缝内砂堤的形成有三个阶段[6][7]：第一阶段(图 4 中 t1~t5)，在离注入口一定水平距离的位置，出现砂堤高峰，且高度逐渐升高，直到达到平衡高度；第二阶段(图 4 中 t6~t8)，砂堤在水平长度上增长缓慢，主要是填补砂堤与平衡高度间的高度差；第三阶段(图 4 中 t9~t12)，砂堤主要是在长度上增加，持续注入的支撑剂被携带到裂缝端部。如图 3、图 4。图 3 是试验室实拍图，图 4 为模拟图。



**Figure 3.** Visualization of sand dike shape at different time in flat slab fracture system  
**图 3.** 可视化平板裂缝系统中不同时间的砂堤形态

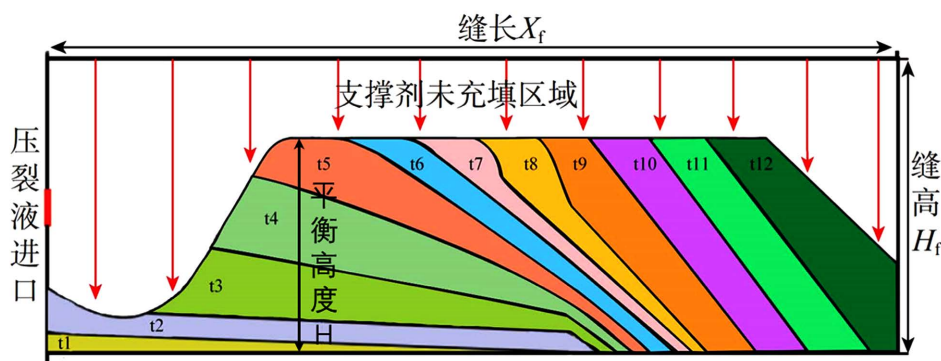


Figure 4. Sand dyke formed by slick-water carrying sand at different times  
图 4. 在不同时间滑溜水携砂形成的砂堤剖面

### 3. 滑溜水连续加砂工艺研究

可视化平板裂缝系统展现的是理想裂缝中滑溜水携砂规律，对于实际地层中，裂缝是不规则的、不光滑的、动态变化的，砂堤剖面形态会更复杂，加砂过程中存在着压力持续上升，压力安全窗口变窄，甚至砂堵的情况，因此有必要从储层性质和工艺参数两方面因素进行滑溜水连续加砂成功率的分析。

#### 3.1. 连续加砂成功率影响因素分析

##### 3.1.1. 储层性质影响因素

###### 1) 脆性指数

高脆性是评价非常规油气储层可压性非常重要的一个参数[8]。压裂高脆性储层时，地层易于破裂，很容易建立设计排量，破裂后压力降明显，裂缝延伸也较顺利，压力曲线呈平稳或下降趋势，连续加砂成功率高。

目前脆性指数计算方法常用的有矿物脆性指数  $BI'$  和力学脆性指数  $BI''$  两种。

$$BI' = \frac{W_1 + W_2}{W_1 + W_2 + W_3} \times 100\% \quad (1)$$

$$BI'' = \frac{E - 280000\mu + 102000}{1400} \times 100\% \quad (2)$$

式中， $BI'$ ——矿物脆性指数，%； $W_1$ ——石英含量，%； $W_2$ ——方解石含量，%； $W_3$ ——泥岩含量， $BI''$ ——力学脆性指数，%； $E$ ——杨氏模量，MPa； $\mu$ ——泊松比，无因次。

据现场不完全统计(图 5)，通常矿物脆性指数不小于 50%，力学脆性指数不小 60%，滑溜水连续加砂成功率高。

###### 2) 地应力

最小主应力越小，施工压力越低，安全压力窗口越大，连续加砂可调控的空间越大，成功率也越高。主应力差异系数越小，越有利于形成复杂裂缝，同时压裂液造缝过程中阻力变化幅度也越小，越有利于安全实施滑溜水连续加砂。据现场统计(图 5)，通常主应力差异系数不大于 0.3 的储层，滑溜水连续加砂成功率高。

###### 3) 断裂韧性

断裂韧性是一项表征裂缝延伸难易程度的重要因素，储层的断裂韧性值越小，水力裂缝对岩石的穿透能力越强，地层的可压性程度越高。断裂韧性依据线弹性力学分为三种类型，分别为张开型(I 型)、错

开型(II型)和撕开型(III型),在页岩储层压裂改造过程中主要以I型和II型为主[9],通常I型断裂韧性不大于0.80,II型断裂韧性不大于0.9,滑溜水连续加砂成功率高(图5)。

#### 4) 天然裂缝

天然裂缝对连续加砂成功率的影响比较复杂。天然裂缝处于不同的特性,如满充填、半充填和无充填;微缝、细缝、中缝、大缝、洞缝;单缝、散缝、裂缝带;与人工裂缝斜交、叠交、不相交等,都会有不同程度的影响。充填越满,缝级别越小,缝规模越小,与人工裂缝相交越少,对于施工压力的波动影响越小,但同时对于形成复杂缝支撑也最不利。据西南某区块统计,36口页岩气共计805段压裂施工砂堵11次,其中由于天然裂缝发育影响为6次,占比54.6%。

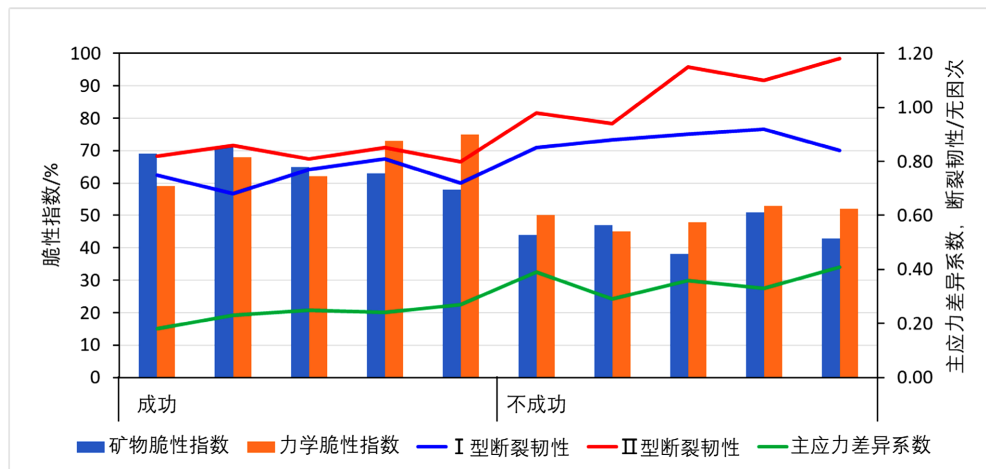


Figure 5. Continuous carrying sand construction and related parameter statistics  
图5. 连续加砂施工及相关参数统计

### 3.1.2. 工艺参数影响因素

#### 1) 施工排量

可视化平板裂缝系统试验结果表明,施工排量越高,平衡高度越小,砂堤前缘距离越大,砂堤前缘高度越小,平衡时间越短[6],如图6。即在人工裂缝参数相同的情况下,施工排量越高,裂缝过砂截面积越大,砂堤前缘空间越大,越有利于滑溜水连续加砂。

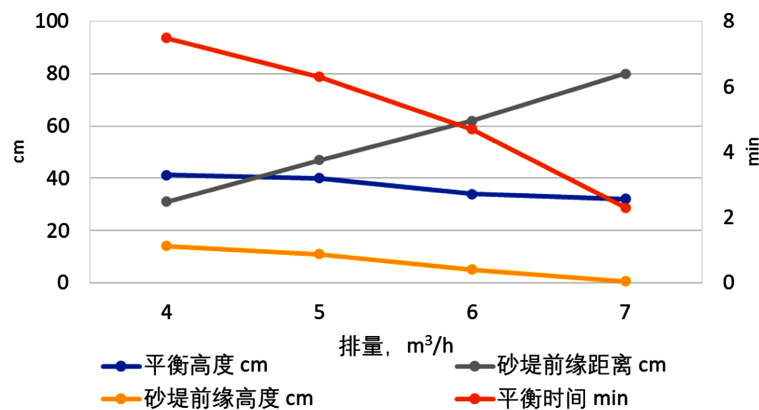


Figure 6. Sand dike parameters under different construction discharge  
图6. 不同施工排量下的砂堤参数



## 2) 支撑剂规格

支撑剂粒径越大、密度越大，颗粒重力也越大，沉降速度也越快，砂堤前缘距离越小，砂堤前缘高度越大，砂堤平衡高度也越大，平衡时间越短[10]，越不利于支撑剂向远处铺置，如图7、图8。即在人工裂缝参数相同的情况下，支撑剂粒径越小、密度越小，裂缝过砂截面积越大，砂堤前缘空间越大，砂堤高度越晚达到平衡，越有利于滑溜水连续加砂。

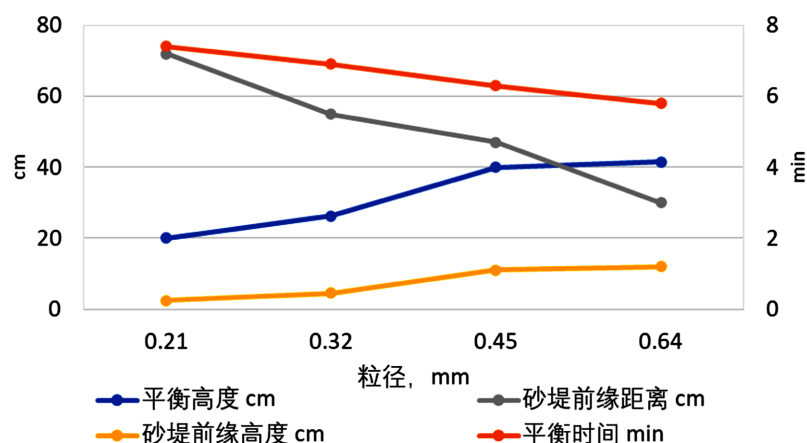


Figure 7. Sand dike parameters under different proppant particle size

图7. 不同支撑剂粒径下的砂堤参数

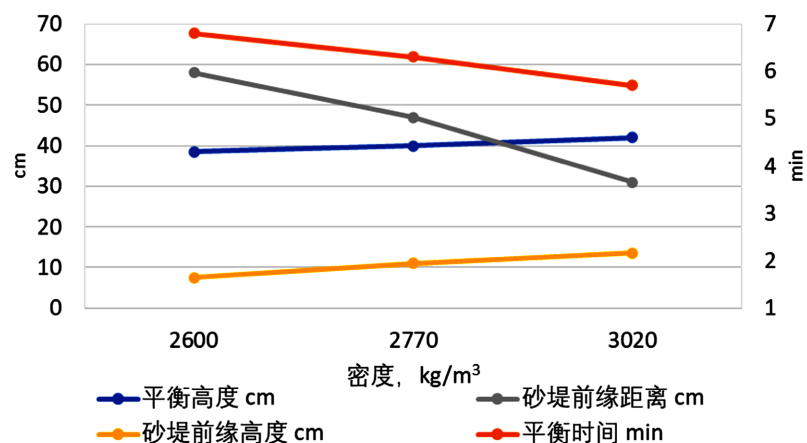


Figure 8. Sand dike parameters under different proppant density

图8. 不同支撑剂密度下的砂堤参数

## 3) 施工砂比

多颗粒支撑剂在压裂液中沉降时，颗粒间存在相互干扰作用，每个支撑剂沉降时均会促使周围的液体向上运动，阻碍了附近支撑剂颗粒的沉降，且砂比越高这种阻碍作用越强，使得支撑剂颗粒受到清水的浮力及黏滞阻力增大，沉降速度减少，水平方向有更多的运移时间。因此，随砂比的增加，砂堤整体向裂缝前端推移，砂堤前缘距离增大，砂堤前缘高度增大，砂堤平衡高度增大，平衡时间减短，如图9。压裂施工时，砂比应阶梯式逐级提砂比，防止出现砂比太大，裂缝内的过流截面不能满足高砂比的顺利输送，就会打破砂堤高度上的平衡，从而出现过堆积的现象，进一步减小过流面积，增加堆积，从而导致砂堵的发生。

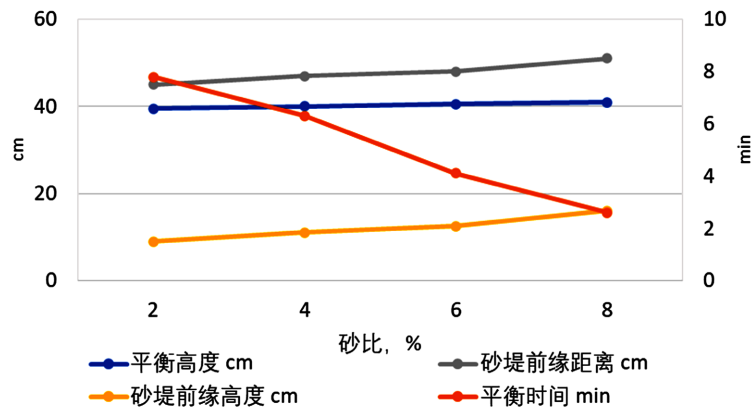


Figure 9. Sand dike parameters under different sand ratio  
图9. 不同砂比下的砂堤参数

### 3.2. 滑溜水连续加砂工艺实施

滑溜水连续加砂工艺按以下步骤实施:

- 1) 井层分析。对具体井层的特点及改造目标进行分析。
- 2) 成功率预判。进行连续加砂成功率预判。
- 3) 连续加砂方案优化。滑溜水连续加砂方案优化。
- 4) 现场决策。

#### 3.2.1. 井层分析

对具体井层,按滑溜水连续加砂成功率影响因素分项进行分析,获取相关的参数数据。

#### 3.2.2. 成功率预判

根据滑溜水连续加砂成功率影响因素分析,可以制成一个图版,以便进行成功率预判。

从左下角到右上角,随着施工排量( $9\sim 17\text{ m}^3/\text{min}$ )逐渐增大、支撑剂粒径(100目 $\sim$ 20/40目)逐渐变小、粉砂占比(20% $\sim$ 100%)逐渐提高、支撑剂密度( $1.35\sim 1.75\text{ kg/m}^3$ )逐渐减小,连续加砂的储层适用范围也逐渐增大(矿物/力学脆性指数和主应力这两个参数值的适应下限可以逐渐提高,断裂韧性参数值的适应上限可以逐渐提高,天然裂缝不利影响可以逐渐放宽),成功率增大,加砂量增加,如图10。

#### 3.2.3. 连续加砂方案优化

根据滑溜水连续加砂图版(图9),合理优化连续加砂施工参数。在保证合适的安全压力窗口的情况下,尽可能地提高施工排量,前中期多采用小粒径、低密度的支撑剂,且砂比应阶梯式逐级缓慢提高,便能够成功地实施全程低粘滑溜水连续加砂。

#### 3.2.4. 现场决策

现场压裂施工时,是否能顺利采用滑溜水连续加砂,可以从地面泵压波动情况来进行预判,预判的关键点有下面三个,如图11:

- 1) 建立排量较易。正常施工后1~2 min内便能快速提高到设计排量,且地层破裂压力平稳后有5 MPa以上的压力安全窗口。
- 2) 地层破裂明显。达到设计排量后,地层破裂明显,压力降幅度较大,达到3 MPa以上。
- 3) 提砂比顺利。在正常阶梯式逐级缓慢提砂比过程中,压力无较大波动,整体呈平缓、向下或缓慢上升趋势。如出现压力上涨,应及时做降砂比措施处理,待压力平稳后再试探小幅提高砂比。



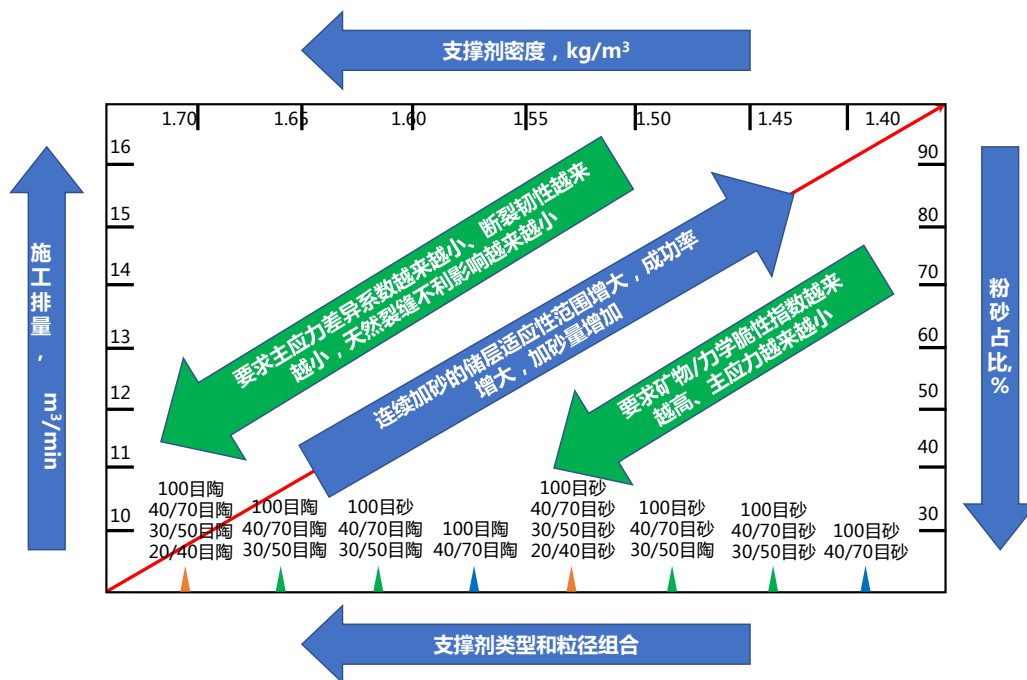


Figure 10. Chart of slick-water continuous carrying sand

图 10. 滑溜水连续加砂图版

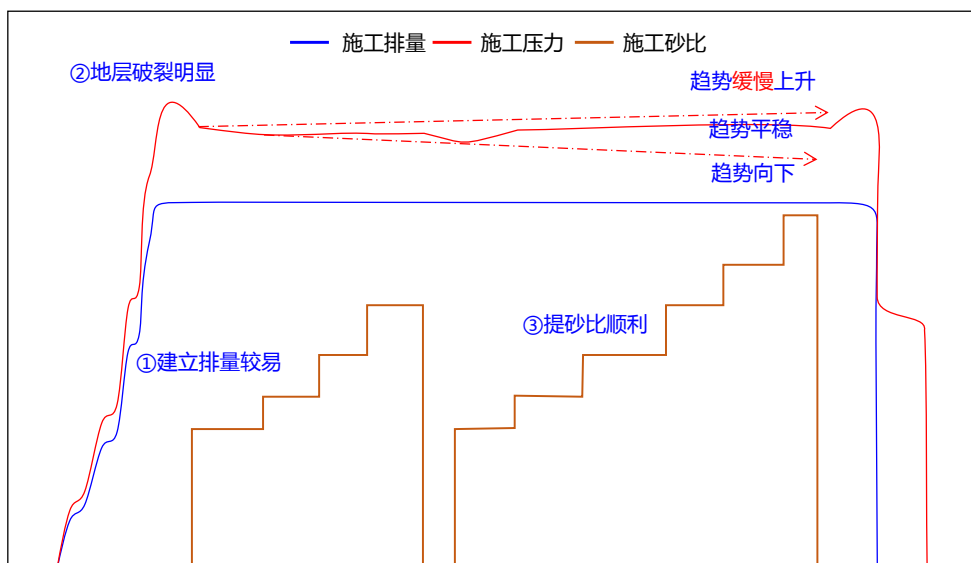


Figure 11. Prediction of continuous carrying sand on site

图 11. 现场实施连续加砂措施预判

#### 4. 现场应用效果

西南某页岩气区块，目前现场已经开始推广应用全程低粘滑溜水连续加砂技术，通过工艺参数上的不断优化，加砂量大幅提升，适用的井层也越来越多，现在单段加砂量最高已经达到了  $312\text{ m}^3$ 。在 A 平台选择 1 井、2 井进行对比试验，A1 井以段塞式加砂为主(如图 12)，在 A2 井以连续加砂为主(如图 13)，都以第 8 段压裂曲线举例。

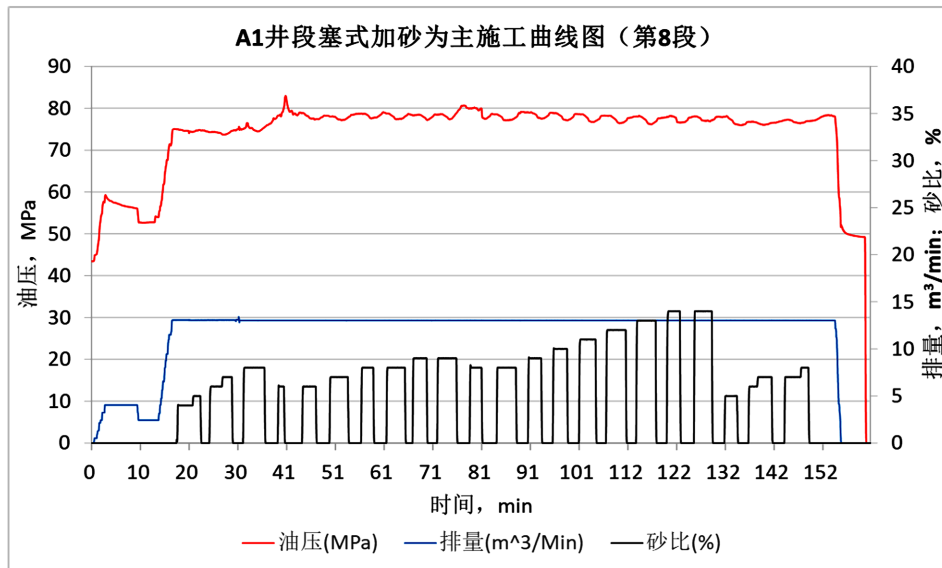


Figure 12. Construction curve of slug sanding in A1 well

图 12. A1 井段塞式加砂施工曲线

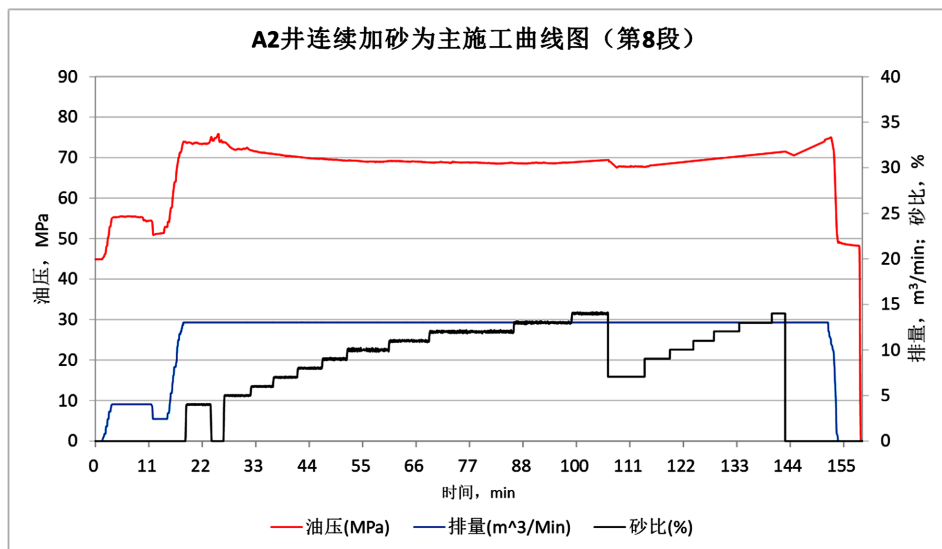


Figure 13. Construction curve of continuous sanding in well A2

图 13. A2 井连续加砂施工曲线

通过现场对比试验可以看出,连续加砂模式使得平均单段加砂量提高了 67.4%,加砂强度提高了 60%,测试产量高出 58.7%,很好的实现了控液提砂提效目标。见表 1。

Table 1. Parameter table of different sand adding modes applied in different wells on the same platform

表 1. 同平台不同井应用不同加砂模式参数表

井号	加砂模式	段数	施工排量	平均单段液量	平均单段砂量	加砂强度	测试产量
			m <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /m	10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /d
A1	段塞式加砂为主	26	13	1995.8	92.7	2.0	20.6
A2	连续加砂为主	25	13	1962.3	155.2	3.2	32.7

## 5. 结论

1) 滑溜水加砂模式主要有段塞式加砂和连续式加砂, 后者在提高液体效率、提高加砂量、提高现场决策安全和提高压裂效果上存在较大的优势。

2) 滑溜水加砂无论是段塞式还是连续加砂, 支撑剂铺置都是层叠的连续剖面, 但连续加砂可以大幅提高单段和单井加砂量, 统计结果来看对于提高页岩气井单井产量有帮助作用。

3) 储层性质和工艺参数间存在最优匹配, 优化工艺参数可以提高连续加砂适应储层的范围; 伴随压裂工艺的优化升级, 页岩气开发的核心理念已经转变成“细分切割、长段多簇、暂堵匀扩、控液提砂”: 簇间距从原来的 20~25 m 逐渐缩短到 4~9 m, 簇数从常规的单段 3 簇逐渐到单段 6~8 簇, 粉砂占比从 30% 逐渐提高到 70%~100%, 用液强度从原来的  $36 \text{ m}^3/\text{m}$  逐渐减小到  $25 \text{ m}^3/\text{m}$ , 加砂强度从  $1.5 \text{ m}^3/\text{m}$  逐渐提高到  $4.3 \text{ m}^3/\text{m}$ , 单段加砂量从  $70\sim 90 \text{ m}^3$  逐渐提高到最高  $312 \text{ m}^3$ , 相应的单井产量过百万方的井次也在逐渐增多, 这在一定程度上要得益于全程低粘滑溜水连续加砂技术的应用。

## 参考文献

- [1] Schols, R.S. and Visser, W. (1974) Proppant Bank Build up in a Vertical Fracture without Fluid Loss. *SPE European Spring Meeting*, Amsterdam, May 1974, SPE4834-MS. <https://doi.org/10.2118/4834-MS>
- [2] Palisch, T.T. and Vincent, M.C. (2008) Slickwater Fracturing: Food for Thought. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Denver, Colorado, September 2008, SPE 115766-MS. <https://doi.org/10.2118/115766-MS>
- [3] 温庆志, 高金剑, 刘华, 刘欣佳, 王淑婷, 王峰. 滑溜水携砂性能动态实验[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(2): 97-100.
- [4] 张争. 压裂裂缝内滑溜水携砂输送规律研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2018: 23-51.
- [5] 刘玉章, 付海峰, 丁云宏, 卢拥军, 王欣, 梁天成. 层间应力差对水力裂缝扩展影响的大尺度实验模拟与分析[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(4): 88-92.
- [6] 周德胜, 张争, 惠峰, 师煜涵, 赵超能, 周媛. 滑溜水压裂主裂缝内支撑剂输送规律实验及数值模拟[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(4): 499-508.
- [7] 温庆志, 胡蓝霄, 翟恒立, 罗明良, 陆斌. 滑溜水压裂裂缝内砂堤形成规律[J]. 特种油气藏, 2013, 20(3): 137-139.
- [8] 张晓. 页岩油储层可压裂性评价[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2018: 28-39.
- [9] 陈建国, 邓金根, 袁俊亮, 闫伟, 蔚宝华, 谭强. 页岩储层 I 型和 II 型断裂韧性评价方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1101-1105.
- [10] 张涛, 郭建春, 刘伟. 清水压裂中支撑剂输送沉降行为的 CFD 模拟[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(1): 75-82.