

# Charlson页岩油藏增产工艺对产量的影响

王玉婷<sup>1</sup>, 王艳朋<sup>2</sup>, 苏力<sup>1</sup>

<sup>1</sup>成都理工大学, 四川 成都

<sup>2</sup>中国石油化工股份有限公司华北油气分公司, 河南 郑州

Email: 940420915@qq.com

收稿日期: 2020年10月21日; 录用日期: 2020年11月4日; 发布日期: 2020年11月11日

## 摘要

压裂技术的应用是页岩油产量持续增长的重要因素, 因而对于压裂施工后页岩油产量特征和施工参数对于产量的影响的研究也就显得尤为重要。本文基于Charlson油田Bakken页岩油藏单井初始最大产油量将油井分为高产井、中产井和低产井; 对比分析不同产能情况下压裂与未压裂典型井的日平均产油量、累积产油量等, 总结压裂对油井动态生产规律的影响; 分析压裂施工参数(压裂液用量、水平段长度、支撑剂用量)对产量的影响, 优选压裂施工参数, 以期达到较好压裂效果, 为该区块今后油井压裂施工提供较为可靠的参考。

## 关键词

页岩油藏, 生产特征, 压裂增产

# Effect of Well Stimulation on Production in Shale Oil Reservoir in Charlson Field

Yuting Wang<sup>1</sup>, Yanpeng Wang<sup>2</sup>, Li Su<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>North China Petroleum and Gas Branch, China Petrochemical Corporation, Zhengzhou Henan

Email: 940420915@qq.com

Received: Oct. 21<sup>st</sup>, 2020; accepted: Nov. 4<sup>th</sup>, 2020; published: Nov. 11<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

The application of fracturing technology is an important factor in the continuous growth of shale oil production. Therefore, it is particularly important to study the characteristics of shale oil pro-

duction after fracturing and the impact of construction parameters on production. Based on the initial maximum yield per well in the Bakken shale reservoir in the Charlson field, oil Wells are divided into high-yielding wells, middle-level wells and low-yielding wells. Compared and analyzed the daily average oil production and cumulative oil production of fractured and unfractured typical wells under different productivity conditions, and summarize the impact of fracturing on the dynamic production law of oil wells. The influence of fracturing operation parameters (dosage of fracturing fluid, length of horizontal section, dosage of proppant) on production was analyzed to optimize fracturing operation parameters, so as to achieve better fracturing effect and provide more reliable reference for fracturing operation in this area in the future.

## Keywords

Shale Oil Reservoir, Producing Characteristic, Fracturing Stimulation

Copyright © 2020 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

页岩油是指储存在致密页岩储层中的油气资源,即泥页岩孔隙、裂缝以及层系中致密碳酸盐岩或碎屑岩邻层或夹层中的石油资源[1]。近年来,水平井和压裂技术的发展推动了页岩油的开采,Bakken 储层作为美国页岩油的主力产层,其产量从2006年的 $10 \times 10^4$ 桶/天,到2010年增长到 $40 \times 10^4$ 桶/天[2]。Bakken 油藏增产措施经历三个阶段,1987年之前,Bakken 油藏采用垂直井生产,通过小型酸化和压裂增产,使得该油藏处于微裂缝发育带的部分井获得产能;1978~1991年,Bakken 油藏开始采用水平井技术,但未采取压裂措施,油井的增产效果不明显;1991年~至今,由于水平井分段压裂技术的快速发展和应用,Bakken 油藏油井的增产效果明显[3][4][5]。压裂技术的应用是页岩油产量持续增长的重要因素,因而对于压裂施工后页岩油产量特征和施工参数对于产量的影响的研究也就显得尤为重要。

## 2. 油田生产特征

Charlson 油田位于 Williston 盆地,该盆地是美国最大页岩油产区,盆地中页岩油典型主要产层包含 Bakken 组和 Three Forks 组[6]。早期由于经济技术的限制,水平井技术还没有成型,页岩油的开发采用的是垂直井。因而获得工业油气流的垂直井较少,并且多位于页岩微裂缝发育带。

Charlson 油田的开发始于 1952 年,但由于页岩开发的特殊性,在 1955~1985 年期间,Charlson 油田在微裂缝发育带共计打 52 口垂直井,经过酸化或压裂处理,获得油气资源较好的井 47 口,但产量大多不高。进入 21 世纪之后,水平井和压裂两大技术发展突飞猛进,美国开始将这两大技术应用于页岩油藏的开发。因而,2010~2014 年期间,Charlson 油田的开发也进入高速开发期。在此期间,Charlson 共计打了 62 口水平井,并全部进行了压裂处理,几乎全部获得工业油气流。

初始产量反应油藏能量大小,根据现有 Charlson 油田油井生产动态数据按油井初始日平均产油量最大值对油田的生产井进行分类,可分为高产井(日平均产油  $> 1000$  桶/天)、中产井(日平均产油 500~1000 桶/天)和低产井(日平均产油  $< 500$  桶/天)(如图 1)。根据统计分析,Charlson 油田压裂前的油井以中低产井为主,特别是低产井占的比例较高。而压裂后的油井以中高产井为主。

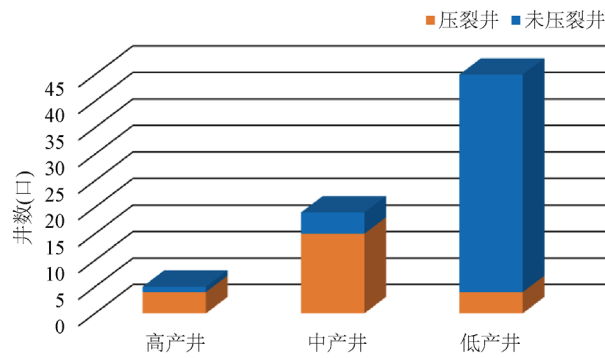


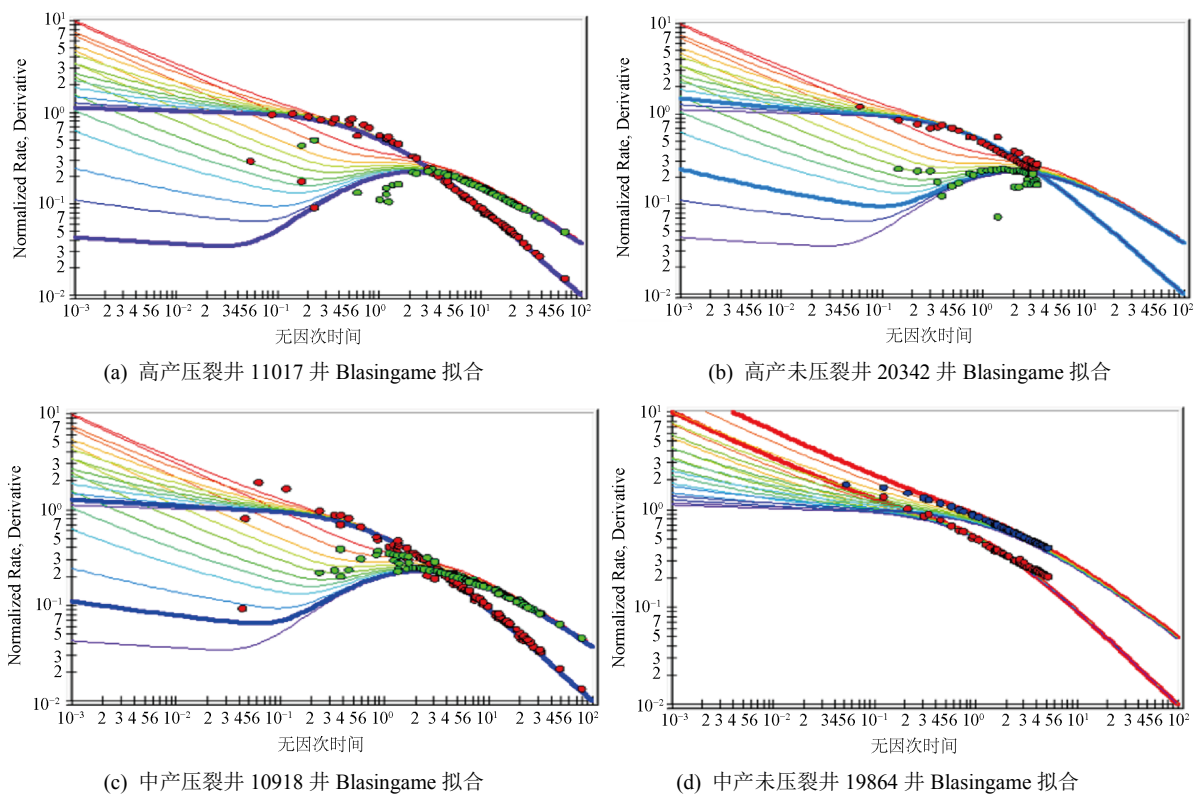
Figure 1. Classification diagram of single well productivity in Charlson Oilfield

图 1. Charlson 油田单井产能分类图

### 3. 油井水平井分段压裂增产

Surjaatmadia 在 1998 年提出了将水力压裂分级的思想和概念[7]。水平井分段压裂最早用于页岩气藏的开发，随着北美页岩气藏大规模的成功开发，天然气价格大幅下降，研究人员开始将目光转向页岩油藏。由于页岩气藏开发的成功经验[8] [9] [10]，水平井分段压裂技术开始应用于页岩油藏的开发，并取得了较大的成功[11]。Charlson 油田中选取不同产能情况下压裂与未压裂典型井进行 Blasingame 图版拟合计算单井 EUR (估计的最终可采储量)，结果如图 2、表 1 所示。

根据典型井的 Blasingame 图版拟合的结果可以看出，Charlson 油田油井的单井 EUR 都比较高，但目前累计产油量较少，油井的采出程度较低。Charlson 油田早期打在微裂缝发育带的垂直井，其产能较高，但产量相对较低，稳产时间较长，但能够获得产量的区域有限。压裂井能够获得较高的产量，三年的累

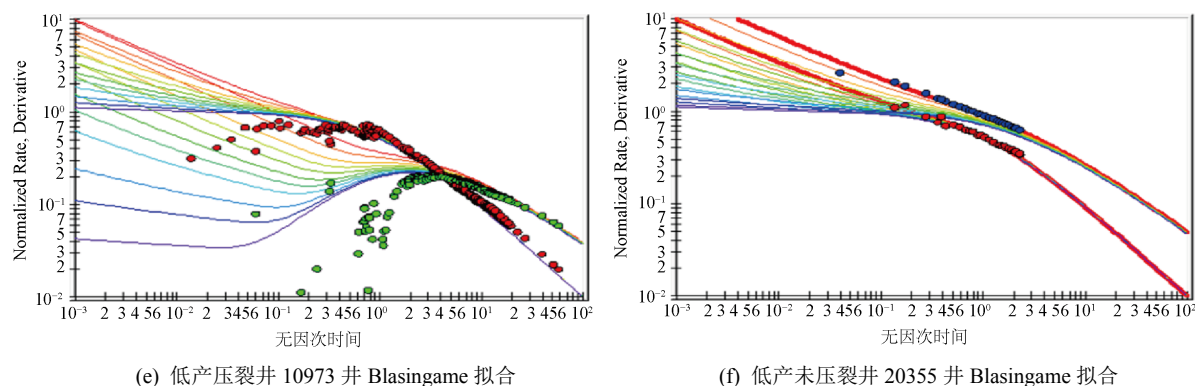


(a) 高产压裂井 11017 井 Blasingame 拟合

(b) 高产未压裂井 20342 井 Blasingame 拟合

(c) 中产压裂井 10918 井 Blasingame 拟合

(d) 中产未压裂井 19864 井 Blasingame 拟合



(e) 低产压裂井 10973 井 Blasingame 拟合

(f) 低产未压裂井 20355 井 Blasingame 拟合

**Figure 2.** Fitting of the fractured well with Blasingame for a typical unfractured well**图 2.** 压裂与未压裂典型井 Blasingame 拟合**Table 1.** Statistical table of Blasingame fitting results for typical Wells**表 1.** 典型井 Blasingame 拟合结果统计表

井类	井号	增产措施	EUR ( $\times 10^4$ 桶)	累计产油 ( $\times 10^4$ 桶)	采出程度	累产时间(天)	平均日产油(桶)
高产井	11017	无	1068.4	64.6	0.060	2545	254
	20342	水平井分段压裂	674.9	58.9	0.087	1087	542
中产井	10918	无	314	25.8	0.082	2808	92
	19864	水平井分段压裂	1172.9	26.2	0.022	1453	180
低产井	10973	无	515.4	91.9	0.178	10509	87
	20355	水平井分段压裂	421.1	9.6	0.023	903	106

计产量与早期垂直井十年的累计产量相当，油井短期的收益较高，但几乎不能保持高产，且早期的递减率较高。

#### 4. 增产措施对产量的影响

由于 Bakken 储层最大深度仅为 12150 ft，目前应用较多的是集射孔、压裂和水力封隔一体的水力喷射压裂技术。这种技术通过使用专用喷射工具产生高速流体，穿破套管和岩石，形成孔眼。然后在孔眼附近产生高于岩石破裂压力的高压，形成裂缝。压开一个层段后，拖动管柱到下一层段，依次施工压裂 [12]。这样可以实现较多段数的压裂，大大改善页岩油藏的泄油面积，从而提高页岩油藏的产量。

在压裂施工过程中，施工的参数如压裂级数、水平段长度、支撑剂的用量和最高施工压力等都会对产量有着或大或小的影响，对 Charlson 油田压裂施工参数进行统计，结果如图 3 所示。该油田的压裂级数主要分布在 15~20 和 25~30，水平段长度主要集中在 3000~5000 ft 和 9000~11000 ft，支撑剂的用量主要分布在小于 2000 千磅和 3000~4000 千磅，而且压裂液的用量 30~70 千桶。

##### 4.1. 压裂液用量对产量的影响

图 4(a)~(d)分别是 Charlson 油田压裂液用量与初始最大日均产油量、三个月日均产油量、累产一年日均产油量和累积日均产油量之间的关系。根据对比可以看出，当 Charlson 油田油井压裂液的用量越高时，油井的初始最大日均产油量、三个月日均产油量、累产一年日均产油量和累积的日均产油量也就越高。根据图 4(a)~(d)，Charlson 油田目前压裂液用量最高在 80 千桶左右。因而，根据上述分析，若要得到较好的压裂效果，压裂液的用量应在 80 千桶左右。

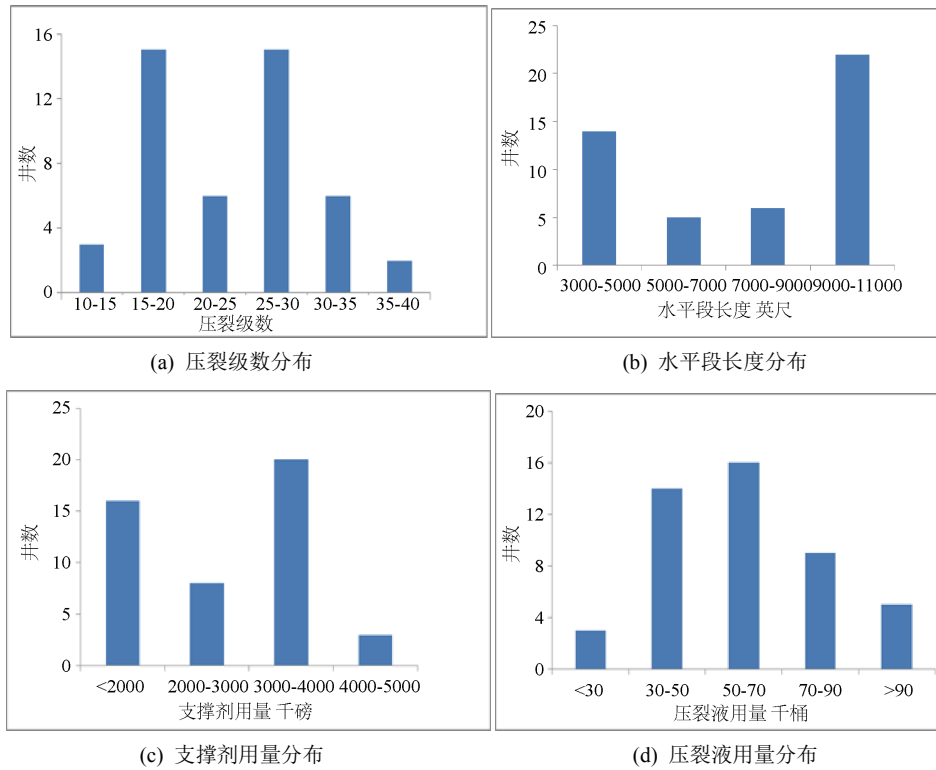


Figure 3. Fracturing parameter statistics of Charlson Oilfield  
图 3. Charlson 油田压裂施工参数统计

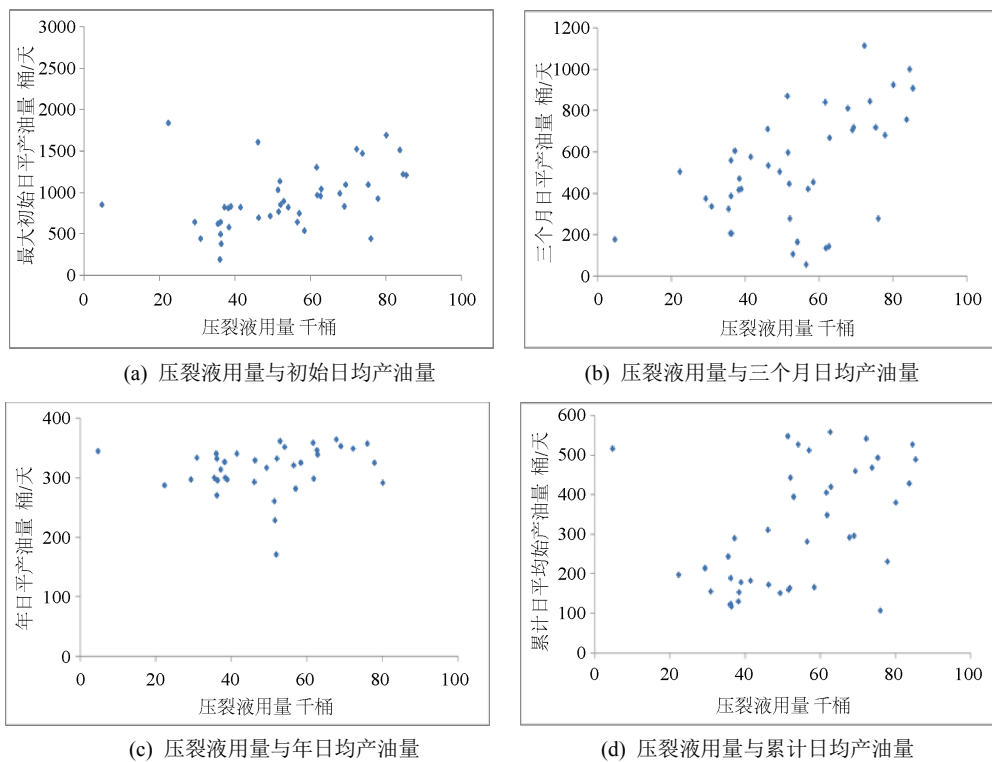


Figure 4. Diagram of fracturing fluid consumption and oil production in Charlson Oilfield  
图 4. Charlson 油田压裂液用量与产油量关系图

## 4.2. 水平段长度对产量的影响

对比分析 Charlson 油田水平段长度与产量关系图可看出,水平段长度与产量的关系呈现两部分分布,即集中在 3000~5000 ft 和 9000~10000 ft。若初始产量 500 桶/天为中高产井与低产井的分界,累产三个月日均产油量以 400 桶/天为中高产井与低产井的分界,累产一年日平均产油量为 300 桶/天为中高产井与低产井的分界,累积日平均以 200 桶/天中高产井与低产井的分界,则根据图 5(a)~(d)统计规律依次如表 2 所示,水平段长度越长,对于其最大日平均产油量、累计三个月日平均产油量、年累计日平均产油量和累积日平均产油量较高的油井数较多且占比较高。因而,根据上述分析,若要得到较好的压裂效果,水平段长度应在 9000~10000 ft。

## 4.3. 支撑剂用量对产量的影响

支撑剂的用量决定着水力裂缝导流能力的大小,同时也决定了人造裂缝的有效性[13]。图 6(a)~(d)分别是 Charlson 油田支撑剂用量与初始最大日均产油量、累计三个月日均产油量、累计一年日平均产油量和累积日平均产油量之间的关系。Charlson 油田支撑剂用量与产量的关系主要分布在<2000 千磅和 3000~4000 千磅两个区域。依据 4.2 节中的标准对产量分布统计如表 3 所示。在 Charlson 油田压裂施工时,当支撑剂用量在 3000~4000 千磅时,油井的初始产量、三个月日平均产油量、年日平均产油量和累积日平均产油量较高的概率较大,油井高产的概率也比较大。因而,根据上述分析,若要得到较高的压裂效果,支撑剂的用量应在 3000~4000 千磅。

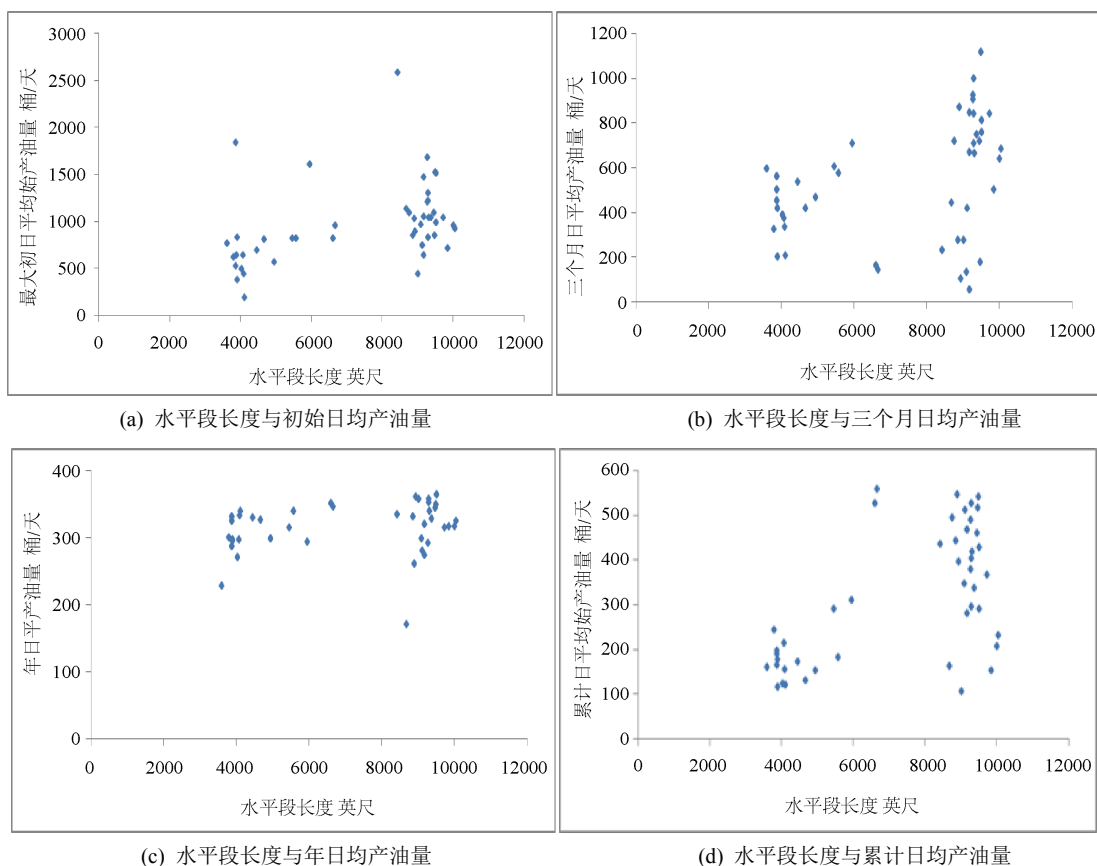
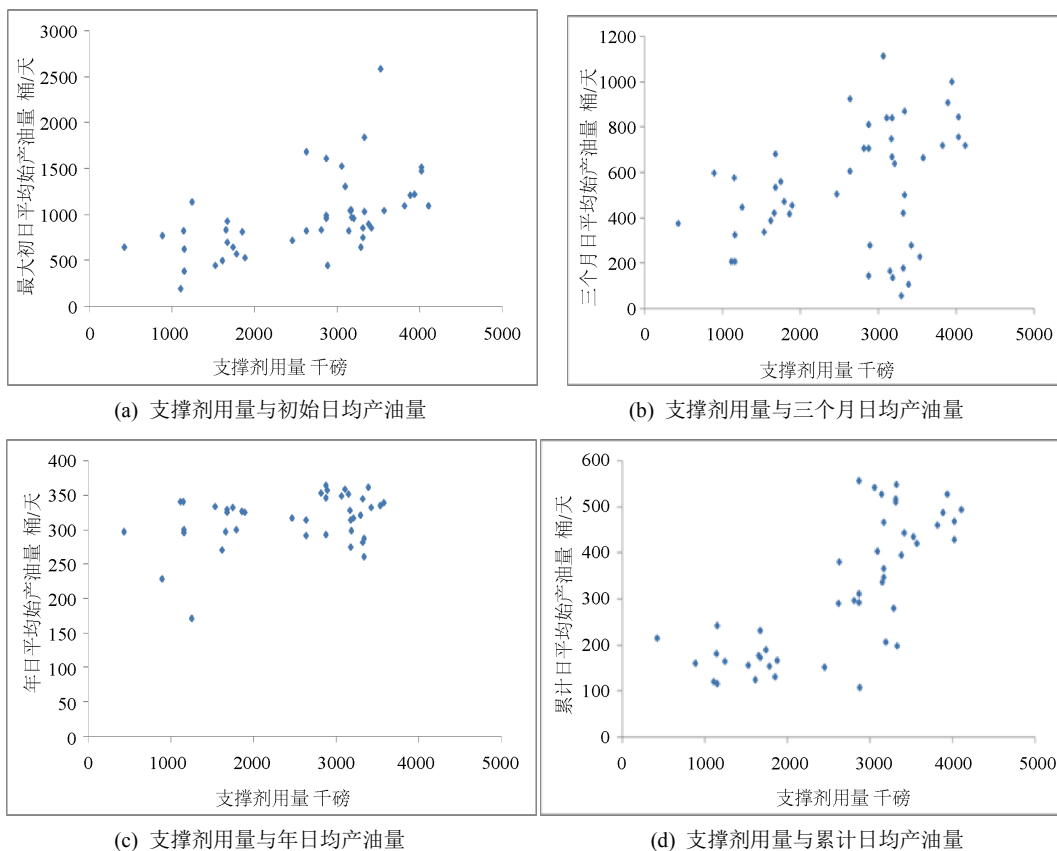


Figure 5. Chart of horizontal section length and oil production in Charlson Oilfield

图 5. Charlson 油田水平段长度与产油量关系图

**Table 2.** Relationship between horizontal section length and oil production in Charlson Oilfield  
**表 2.** Charlson 油田水平段长度与产油量关系统计表

水平段长度与初始日均产油量关系				
	总井数	中高产井数	低产井	中高产井占比
水平段长度 3000~5000 (ft)	14	0	4	0.71
水平段长度 9000~10000 (ft)	29	28	1	0.97
水平段长度与三个月日均产油量关系				
	总井数	中高产井数	低产井	中高产井占比
水平段长度 3000~5000 (ft)	13	7	6	0.54
水平段长度 9000~10000 (ft)	28	21	7	0.75
水平段长度与年日均产油量关系				
	总井数	中高产井数	低产井	中高产井占比
水平段长度 3000~5000 (ft)	13	6	7	0.46
水平段长度 9000~10000 (ft)	22	16	6	0.73
水平段长度与累积日均产油量关系				
	总井数	中高产井数	低产井	中高产井占比
水平段长度 3000~5000 (ft)	13	3	10	0.23
水平段长度 9000~10000 (ft)	26	22	4	0.85



**Figure 6.** Chart of proppant usage and oil production in Charlson Oilfield  
**图 6.** Charlson 油田支撑剂用量与产油量关系图

**Table 3.** The relationship between proppant dosage and oil production in Charlson Oilfield  
**表 3.** Charlson 油田支撑剂用量与产油量关系统计表

支撑剂用量与初始日均产油量关系				
	总井数	中高产井数	低产井	中高产井占比
支撑剂用量(<2000 千磅)	16	11	5	0.69
支撑剂用量(3000~4000 千磅)	21	20	1	0.95
支撑剂用量与三个月日均产油量关系				
	总井数	中高产井数	低产井	中高产井占比
支撑剂用量(<2000 千磅)	16	10	6	0.63
支撑剂用量(3000~4000 千磅)	24	16	8	0.67
支撑剂用量与年日均产油量关系				
	总井数	中高产井数	低产井	中高产井占比
支撑剂用量(<2000 千磅)	16	8	8	0.5
支撑剂用量(3000~4000 千磅)	17	12	5	0.71
支撑剂用量与累积日均产油量关系				
	总井数	中高产井数	低产井	中高产井占比
支撑剂用量(<2000 千磅)	16	3	13	0.19
支撑剂用量(3000~4000 千磅)	21	19	2	0.9

由于压裂措施的成功实施,页岩油藏的油井获得了较高的产量。根据 Charlson 油田压裂参数分析结果表明,并且压裂的水平段长度越长,压裂获高产量的概率相对越高,但并不是说,水平段长度越长越好。对于压裂的支撑剂和压裂液用量来说,支撑剂和压裂液用量越多,产量相对越高。对于 Charlson 油田油井压裂效果来说,目前压裂较好的压裂级数在 25~30 级,压裂段的长度主要在 9000~10000 ft,支撑剂的用量主要在 3000~4000 千磅,而压裂液的用量在 80 千桶左右。因而,对于 Charlson 油田目前的压裂效果而言,若要得到较好的增产效果,需参考这些压裂参数的范围。

## 5. 结论

(1) Charlson 油田压裂前油井以中低产井为主,压裂后的油井以中高产井为主,水平井分段压裂技术明显增加油井产量,但几乎不能保持高产,且早期的递减率较高。

(2) 统计分析表明 Charlson 油田油井常用压裂级数为 25~30 级;压裂液用量与产量呈一定线性关系,压裂液用量越多,产量相对越高;水平压裂段长度越长,产量相对越高,但并不是绝对的,Charlson 油田水平段长度集中在 9000~10000 ft,产量较高的井数较多;支撑剂用量越多,产量也相对越高,Charlson 油田的支撑剂液用量主要集中在 3000~4000 千磅,产量高的井占比较高。

(3)根据分析,对于 Charlson 油田页岩油藏的后续油井压裂,施工建议为压裂级数 30 级左右,压裂液用量 80 千桶,水平段长度为 9000 ft 左右,支撑剂用量为 3000~4000 千磅,以期达到较好的压裂增产效果。

## 参考文献

- [1] 杨升宇,张金川.页岩油及其特征[J].大庆石油地质与开发,2012,31(5):47-50.
- [2] 罗承先,周韦慧.美国页岩油开发现状及其巨大影响[J].中外能源,2013,18(3):33-40.



- 
- [3] Yan, C., Luo, G. and Ehlig-Economides, C.A. (2014) Systematic Study of Bakken Well Performance over Three Well Completion Design Eras. Society of Petroleum Engineers, Canada. <https://doi.org/10.2118/171566-MS>
- [4] Drilling-Info. (2013) Production. <http://info.drillinginfo.com>
- [5] EERC (2011) Bakken Formation Development History. <http://www.undeerc.org/bakken/pdfs/BakkenTimeline2.pdf>
- [6] 姜杉钰, 王金, 孙乃达. 美国页岩油上游产业发展进程和经验启示[J]. 中国矿业, 2020, 29(8): 42-46.
- [7] Surjaatmadja, J.B., Grundmann, S.R., Mcdaniel, B., *et al.* (1998) Hydrajet Fracturing: An Effective Method for Placing Many Fractures in Openhole Horizontal Wells. *SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, Beijing*, 2-6 November 1998, 263-268. <https://doi.org/10.2118/48856-MS>
- [8] 王腾飞, 胡永全, 赵金州. 端部脱砂压裂技术新模型[J]. 石油钻探技术, 2005(3): 55-57.
- [9] 李庆辉, 陈勉, Fred P-Wang, 等. 工程因素对页岩气产量的影响——以北美 Haynesville 页岩气藏为例[J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 54-59.
- [10] Mayerhofer, M.J. (2006) Overview: Tight Reservoirs. *Journal of Petroleum Technology*, **58**, 58. <https://doi.org/10.2118/1006-0058-JPT>
- [11] Stegent, N., Wagner, A., Mullen, J., *et al.* (2010) Engineering a Successful Fracture-Stimulation Treatment in the Eagle Ford Shale. *Tight Gas Completions Conference*, San Antonio, 2-3 November 2010, 1-20. <https://doi.org/10.2118/136183-MS>
- [12] 朱迎辉. 水平井分段压裂优化设计研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2012.
- [13] 张瑞芝, 傅东. 承德石英砂开发利用方向的研究[J]. 河北地质矿产信息, 2003(2): 19-20.