

文章编号: 0253-2697(2013)04-0759-06 DOI:10.7623/syxb201304018

防砂水平井旋转水射流解堵工艺参数优化实验

董长银¹ 隆佳佳¹ 王登庆² 吴建平² 张忠禄¹ 张晓斌¹

(1. 中国石油大学石油工程学院 山东青岛 266555; 2. 中国石化胜利油田分公司采油院 山东东营 257000)

摘要: 设计了水平井解堵效果评价地面实验装置,使用实际堵塞筛管进行了水平井旋转水射流解堵实验,研究了解堵效果与解堵液类型、施工排量、移动方式等施工参数间的定性关系,分析了其影响规律,并对解堵施工参数进行了优化。提出了“阶段推进停留”取代以往的“匀速推进”解堵方式,解堵器每次推进 1.5~2 m 并停留喷射 2~4 min 可得到较好的解堵效果。在解堵过程中施工排量越大,解堵效果越好,实际施工中解堵排量不低于 550~600 L/min 为宜;同时,使用复合酸解堵液,可达到更加均匀的解堵效果。通过实验发现,旋转水射流解堵技术更适用于堵塞严重的筛管,堵塞越严重解堵效果反而越好。

关键词: 水平井;防砂筛管;堵塞;旋转水射流解堵;参数优化

中图分类号: TE357.3

文献标识码: A

Experiment of parameters optimization for plug removal by rotating jet flow in sand-control horizontal wells

DONG Changyin¹ LONG Jiajia¹ WANG Dengqing² WU Jianping¹ ZHANG Zhonglu¹ ZHANG Xiaobin¹

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;

2. Research Institute of Oil Production Technology, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257000, China)

Abstract: A particular experimental device was designed to perform experiments on plug removal by rotating jet flow with actually plugged sand-control screens removed from horizontal wells in the Gudao oilfield. With this experiment, qualitative relationships of plug removal effects with construction parameters, such as plug remover types, pumping rate and moving mode, were examined and their sensitive regularity was analyzed as well. Finally, a reasonable plug removal and its corresponding parameters were recommended by optimizing construction parameters of plug removal, and this method involved a fashion of “intermittent moving and staying” instead of the previous one of “uniform-velocity moving”. An optimal distance for every advance is 1.5~2 m with staying time for 2~4 min, which can produce a better plug removal effect. During plug removal, the higher the pumping rate, the better the plug removal effect can be gained, thereby a real pumping rate should not be less than 550~600 L/min. In addition, the use of a compound-acid plug remover could gain a more even effect of plug removal. The comparison experiment indicated that compound acid tends to remove screen plug more efficiently than clean-water fluid and the plug removal effect of severely plugged screens is better than that of slightly plugged screens. So, the technique of plug removal by rotating jet flow should be applied preferentially to the severely plugged sand control horizontal wells.

Key words: horizontal well; sand control screen; plugging; plug removal by rotating jet flow; parameter optimization

对于出砂问题,疏松砂岩油藏水平井通常采取机械筛管或筛管砾石充填防砂。这种防砂水平井在生产过程中,地层流体会携带地层细砂、黏土泥质、机械杂质等固相堵塞物逐渐堵塞挡砂介质(机械筛管的挡砂层和砾石层),造成挡砂介质渗透率降低,进而影响水平井的产能。目前,挡砂介质的堵塞已成为困扰防砂水平井正常生产的主要问题之一^[1-6]。例如,在胜利油田 200 余口低液水平井中,挡砂介质堵塞是造成其低产的重要原因。

高压旋转水射流解堵技术是利用井下可控转速的旋转自振空化射流解堵装置产生高压水射流直接冲洗

防砂管柱实现解堵^[7-15]。喷射器在水射流作用下自行旋转,同时在管柱带动下缓慢移动,通过一次或往复多次旋转喷射达到解堵目的。笔者设计了水平井解堵效果评价地面实验装置,利用从实际低液防砂水平井中拔出的已堵塞机械筛管,在解堵模拟实验装置中进行了解堵实验,研究了解堵液类型、施工排量、移动方式等不同解堵参数对解堵效果的影响,得到了最佳的施工参数组合。

1 旋转水射流解堵实验

1.1 实验装置

实验装置由井筒模拟容器、堵塞筛管、解堵器及支

第一作者及通信作者:董长银,男,1976 年 4 月生,1998 年毕业于石油大学(华东)石油工程专业,2003 年获石油大学(华东)油气田开发工程专业博士学位,现为中国石油大学(华东)副教授,主要从事油气井防砂完井、固液多相流方面的研究工作。Email:dongcy@upc.edu.cn

架、泵车、液罐、数据采集与测量系统等部分组成。为模拟实际施工条件,使用水平井解堵现场施工所用的泵车作为动力源,其排量和压力均与实际施工条件相同,实验中所用筛管也是从孤岛油田防砂水平井中起出的已堵塞的筛管。实验装置及流程图如图1所示,实验装置主要参数如表1所示。

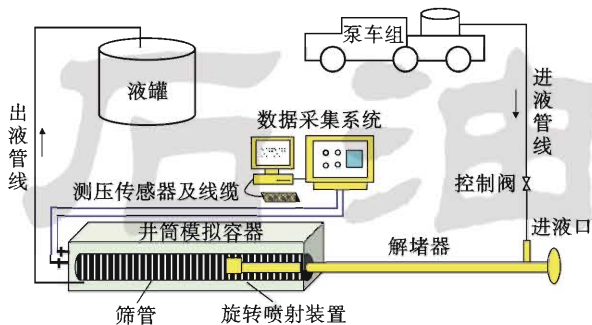


图1 水平井解堵实验装置及流程

Fig. 1 Device and flow of horizontal well plug removing experiment

表1 水平井解堵实验装置基本参数

Table 1 Parameters of horizontal well plug removing experimental facility

实验装置	基本参数	数值
井筒模拟容器	尺寸/m	5.2×0.4×0.4
	容纳筛管长度/m	4.8
	最大耐压/MPa	40
	泄流孔直径/mm	30
	泄流孔个数	5
解堵器	直径/mm	101
	排量/(L·min ⁻¹)	350~650
	往返距离/m	4.2
	喷射孔直径/mm	3
泵车	泵压/MPa	18~30
	长度/m	4.8
筛管	外径/mm	140
	内径/mm	108

实验在室外常温下进行,实验中所用流体为清水和复合酸液,实验中所用筛管和解堵器如图2所示。



(a) 已堵塞筛管

(b) 旋转解堵器

图2 实验所用的堵塞筛管和旋转解堵器

Fig. 2 Plugged screens from production wells and rotating jet ejector used in the experiment

1.2 实验方法

将旋转喷射器置入水平放置的已堵塞机械筛管内,用清水浸泡实验筛管约20 min,恢复其在实际井液中的状态。参考旋转射流解堵器技术指标及目前现场施工情况,实验中解堵排量为400~600 L/min,喷射器移动速度为0.1~1.5 m/min,往返次数1~2次。实验过程中测量并记录排量和筛管内压力(即喷嘴外压力)随时间的变化数据。

在排量基本不变的情况下,筛管内压力越低,表示筛管总体渗透率越高,解堵效果越好。则解堵过程中筛管渗透率为

$$K = \frac{Q\mu_1 \ln(r_o/r_i)}{2\pi L(p_i - p_o)} \quad (1)$$

式中: K 为筛管解堵后渗透率, $D;Q$ 为解堵排量, m^3/s ; μ_1 为解堵液黏度, $Pa \cdot s$; r_o, r_i 为筛管外半径和内半径, m ; L 为筛管解堵段长度, m ; p_i 为测量得到的筛管内部压力, Pa ; p_o 为筛管外部压力,可取大气压 $1.013 \times 10^5 Pa$ 。

2 实验结果及分析

选用5根已堵塞筛管(编号为1#—5#)进行了解堵实验,实验情况汇总如表2所示。

表2 实验情况汇总

Table 2 Summary of plug removing experiments

筛管	实验阶段	解堵液类型	解堵排量/(L·min ⁻¹)	泵压/MPa	持续时间/min
1#	阶段1	清水	500	17	36
	阶段2	清水	500	10	29
2#	阶段1	清水	400	10	700
	阶段2	清水	400	10	700
	阶段3	清水	550	18	480
	阶段4	清水	550	18	620
3#	阶段1	清水	400	12	400
	阶段2	清水	500	17	270
	阶段3	清水	500	17	360
	阶段4	清水	500	17	130
	阶段5	清水	500	17	410
	阶段6	清水	500	17	270
4#	阶段1	清水	550	17	560
	阶段2	清水	550	17	300
5#	阶段1	复合酸	400	12	100
	阶段2	复合酸	500	17	600
	阶段3	复合酸	500	17	800
	阶段4	复合酸	600	25	900

2.1 1#筛管解堵实验

在1#筛管的解堵实验中,解堵液为清水,排量为500 L/min,泵压为17 MPa,筛管内压力及渗透率变化曲线如图3、图4所示。实验分2个阶段进行:

阶段1(0~36 s),筛管内压力压力较高,筛管端面

反作用力较大,喷射器快速由筛管前端向后端移动,且无法被固定。此阶段筛管渗透率约 0.3 D,压力变化无规律。由于喷射器移动较快,基本起不到解堵作用。

阶段 2(36~65 s),约 36 s 时,喷射器到达筛管后端不再移动,压力升至约 0.75 MPa。随着解堵继续,筛管内压力迅速下降。约 65 s 时筛管渗透率恢复到约 3.5 D。实验表明,当喷射器位置固定时,即使解堵时间较短,也能实现疏通筛管孔眼的目的,起到较好的解堵效果。图 5 为 1# 筛管末端解堵后的流动情况,部分孔眼堵塞物被冲掉,但仍有部分孔眼未能解堵。

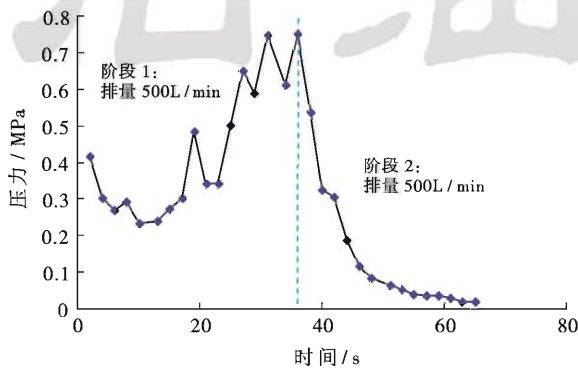


图 3 1# 筛管内压力变化

Fig. 3 Variation of inside pressure of No. 1 screen

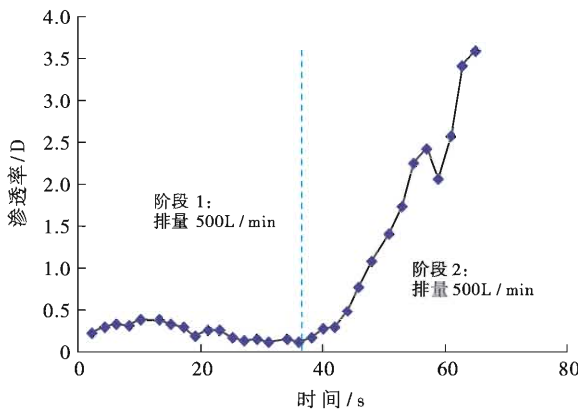


图 4 1# 筛管渗透率变化

Fig. 4 Variation of screen permeability of No. 1 screen



图 5 1# 筛管末端解堵后流动情况

Fig. 5 Photograph of No. 1 screen after plug removing experiment

2.2 2# 筛管解堵实验

在 2# 筛管解堵实验中,解堵喷射器分别停留于 4 个不同位置并更换不同排量。筛管内压力及渗透率变化曲线如图 6、图 7 所示。实验分为 4 个阶段进行:

阶段 1(位置 A, 0~700 s),排量为 400 L/min,初始筛管断面反作用力较大,解堵器固定困难,压力和渗透率变化无规律,基本无解堵效果。阶段 2(位置 B, 700~1400 s),排量为 400 L/min,筛管内压力缓慢下降,渗透率缓慢回升(由 0.6 D 升至 0.9 D)。阶段 3(位置 C, 1500~1850 s),此时将排量提高到 550 L/min,筛管内压力迅速提高,随后,筛管内压力较迅速降低,渗透率也快速由 0.9 D 升至 1.8 D。阶段 4(位置 D, 2000~2500 s),更换新的解堵位置,继续保持 550 L/min 排量。在到达新的堵塞位置时,筛管内压力迅速提高,随着解堵继续,筛管内压力同样以较快的速度降低,渗透率也快速恢复。由此可得,排量 550 L/min 时的解堵效果明显好于排量 400 L/min 时的解堵效果。

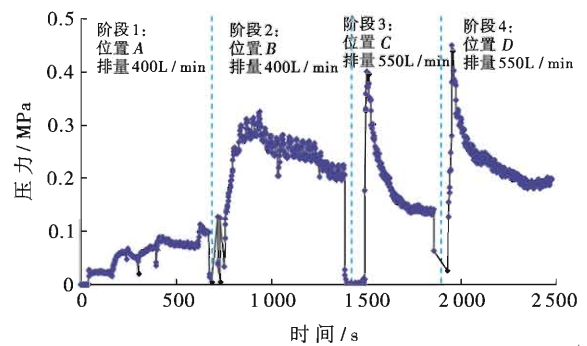


图 6 2# 筛管内压力随时间变化

Fig. 6 Variation of inside pressure of No. 2 screen

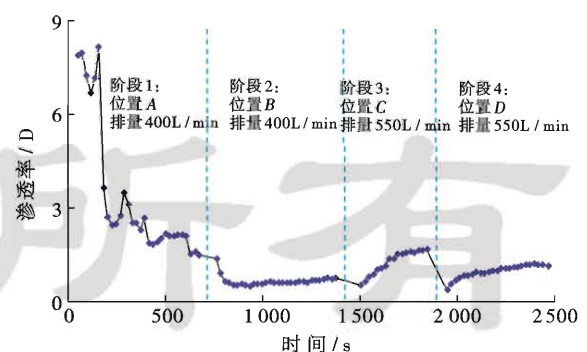


图 7 2# 筛管渗透率变化

Fig. 7 Variation of screen permeability of No. 2 screen

图 8 为位置 C 处解堵后的水流情况,少数孔眼解堵情况较好。由于筛管各孔眼的堵塞程度不一,一旦堵塞较轻的孔眼被解除堵塞后,筛管内压力迅速下降,对其它堵塞孔眼将很难再起到解堵作用。此时,应及时将解堵器移至下一位置。



图8 2#筛管喷头停留处筛管出水情况

Fig. 8 Photograph of No. 2 screen after plug removing experiment

2.3 3#和4#筛管解堵实验

3#、4#筛管解堵实验曲线如图9、图10所示。在解堵过程中,3#、4#筛管内压力一直处于较低状态,说明这2个筛管的堵塞程度较轻,其压力变化曲线受解堵器移动和堵塞程度的影响更大一些。因此,对于堵塞程度较轻的筛管,旋转水射流喷射解堵的效果并不明显,该方法更适用于堵塞程度较重的水平井。

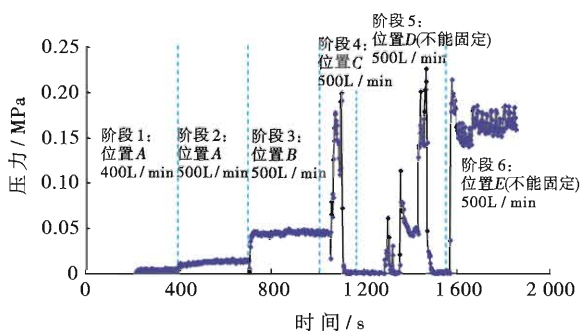


图9 3#筛管内压力随时间变化

Fig. 9 Variation of inside pressure of No. 3 screen

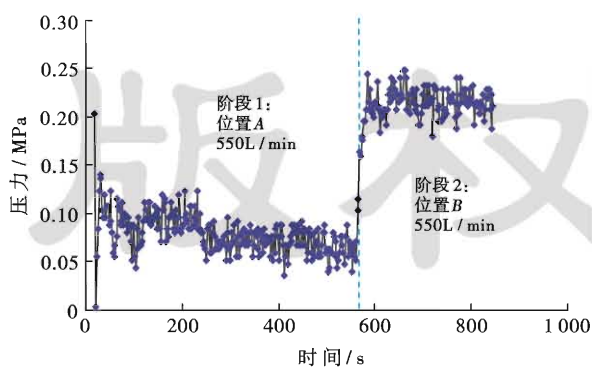


图10 4#筛管内压力随时间变化

Fig. 10 Variation of inside pressure of No. 4 screen

2.4 5#筛管解堵实验

在5#筛管解堵实验中使用了复合酸解堵液,排量为500 L/min,往返4次,耗时约40 min。解堵完毕

后筛管的渗流情况如图11所示。使用复合酸解堵液,解堵过程中渗透率恢复速度更快,筛管流通情况比清水解堵更均匀。复合酸解堵液能将筛管堵塞物中的泥质、铁锈及部分碳酸盐垢等溶解,加上射流作用,具有双重解堵效果^[11-15],因此复合酸液比清水具有更好的解堵效果。



图11 5#筛管复合酸解堵后筛管流通情况

Fig. 11 Photograph of No. 5 screen after plug removing experiment using complex acid

3 影响因素及参数优化

3.1 移动方式对解堵效果的影响及移动方式优化

在水平井解堵施工中,通常是将解堵器匀速移动,往返多次进行解堵。通过解堵实验表明,解堵器在移动过程中,对筛管的解堵作用并不明显。当解堵器位置固定时,旋转水射流对当前位置能起到较好的解堵作用。因此,在水平井解堵施工中建议将“匀速推进”方式改为“阶段推进停留”的工作方式,即解堵器在某一位置停留,喷射解堵一段时间后继续推进到下一位置继续解堵,每次推进距离为1.5~2 m。

3.2 解堵时间对解堵效果的影响及解堵时间优化

图12是2#筛管解堵实验中C、D两处渗透率随时间的变化关系曲线。在解堵过程中,初期筛管渗透率迅速升高,随后逐渐趋于平缓,即解堵效果在初始停留阶段显著,之后逐渐降低。因此,应用“阶段推进停留”方式进行解堵时,每个位置停留时间不宜过长,2~4 min即可。

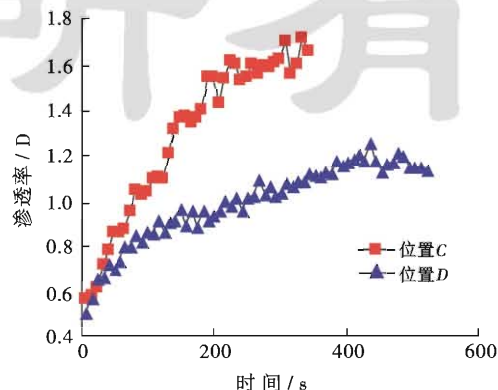


图12 2#筛管解堵渗透率随时间的变化

Fig. 12 Variation of permeability of No. 2 screen with time

3.3 排量对解堵效果的影响及排量优化

对比不同排量的实验曲线(图6、图7)可知,解堵时渗透率在小排量时恢复速度较慢,而在大排量时恢复速度较快;压力曲线在小排量时下降缓慢,而在大排量时下降较快,因此高排量下的解堵效果较好。在实际水平井解堵施工中,为了达到较好的解堵效果,建议施工排量不低于550~600 L/min。

3.4 解堵液及初始堵塞程度对解堵效果的影响

对比复合酸与清水的解堵效果可知,复合酸解堵液具有冲蚀、溶解双重解堵效果。因此,复合酸液比清水能发挥更好的解堵作用,建议现场采用复合酸进行解堵,但必须注意避免对地层产生伤害。

对比1#、2#和3#、4#筛管的解堵实验可知,对于初始堵塞较严重的1#、2#筛管,筛管渗透率恢复明显,解堵效果较好。而对于堵塞程度较轻的3#、4#筛管,旋转水射流解堵基本没有效果。因此,现场施工中不建议对堵塞较轻的井进行解堵作业。

4 结论与建议

(1) 通过研制水平井解堵效果评价地面实验装置,使用实际堵塞筛管进行水平井解堵工艺参数优化实验,得到了解堵效果与解堵液类型、解堵时间、施工排量、移动方式等施工参数间的定性关系。

(2) 解堵器在移动过程中对筛管介质的解堵作用并不明显,当其位置固定时,较短时间即可起到解堵效果。因此以“阶段推进停留”取代以往的“匀速推进”解堵方式,每次推进距离1.5~2 m,即可达到良好的解堵效果。

(3) 在“阶段推进停留”解堵方式下,筛管渗透率开始恢复较快,之后变缓,最后趋于不变。因此解堵器喷射解堵时停留时间不宜过长,2~4 min即可得到良好的解堵效果。

(4) 施工排量越大,解堵效果越好。推荐解堵施工排量不低于550~600 L/min,且使用复合酸解堵可得到更均匀的解堵效果。

(5) 筛管的解堵效果与初始堵塞程度直接相关。堵塞程度较轻的筛管,解堵效果较差;而堵塞越严重的筛管,解堵效果反而越好。因此,在旋转水射流解堵施工中,应选择堵塞较为严重的井进行解堵。

参 考 文 献

[1] 董长银. 油气井防砂技术[M]. 北京:中国石化出版社,2009:47-55.
Dong Changyin. Sand control technology in oil and gas wells [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2009: 47-55.

[2] 董长银,贾碧霞,刘春苗,等. 机械防砂筛管挡砂介质堵塞机制及堵

塞规律试验[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(5): 82-88.

Dong Changyin, Jia Bixia, Liu Chunmiao, et al. Blocking mechanism and blocking laws experiments of sand retention media in mechanical screens[J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2011, 35(5): 82-88.

[3] 胡才志,裴柏林,李相方,等. 砾石充填井堵塞机理实验研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,2004,28(3):40-42.

Hu Caizhi, Pei Bolin, Li Xiangfang, et al. Laboratory research on plugging mechanism in gravel packed well[J]. Journal of the University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2004, 28(3): 40-42.

[4] 刘东,李丽,周承诗,等. 注聚区油井防砂层堵塞原因与解堵措施[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(2):78-81.

Liu Dong, Li Li, Zhou Chengshi, et al. Plugging mechanism and plug removing of sand control area in polymer injection well[J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2010, 34(2): 78-81.

[5] 关德,杨寨,张勇,等. 渤海两油田油井堵塞原因分析及化学解堵试验[J]. 西南石油学院学报,2002,24(2):35-37.

Guan De, Yang Zhai, Zhang Yong, et al. Diagnosis of reasons for oil well plugging and chemical remedial treatment tests at two oilfields in Bohai bay[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2002, 24(2): 35-37.

[6] 张贤松,孙福街,冯国智,等. 渤海稠油油田聚合物驱影响因素研究及现场试验[J]. 中国海上油气,2007,19(1):30-32.

Zhang Xiansong, Sun Fuxie, Feng Guozhi, et al. A research on influence factors of polymer flooding and its field testing in Bohai heavy oil fields[J]. China Offshore Oil and Gas, 2007, 19(1): 30-32.

[7] 毛晶,迟森,黄丽敏,等. 高压水旋转射流解堵工艺技术在吉林油田的应用[J]. 油气井测试,2002,11(3):35-37.

Mao Jing, Chi Sen, Huang Limin, et al. Application of technology and techniques of HHJ for broken down in Jilin oilfield[J]. Well Testing, 2002, 11(3): 35-37.

[8] 黄中伟,李根生,罗洪斌,等. 水平井防砂管内旋转射流冲砂解堵机理与试验[J]. 石油钻采工艺,2008,30(3):93-96.

Huang Zhongwei, Li Gensheng, Luo Hongbin, et al. Mechanisms and field test of rotating jets removing sands and plug in horizontal screens[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(3): 93-96.

[9] 李根生,马加计,沈晓明,等. 高压水射流处理地层的机理及试验[J]. 石油学报,1998,19(1):96-99.

Li Gensheng, Ma Jiaji, Shen Xiaoming, et al. A study on mechanisms and effects of plug removal near wellbore with high pressure water jet[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(1): 96-99.

[10] 黄中伟,马家骥,李根生,等. 高压旋转射流解除井下防砂管柱的堵塞[J]. 石油钻采工艺,2004,26(6):65-67.

- Huang Zhongwei, Ma Jiaji, Li Gensheng, et al. Removing the blockage of slotted tubings with high pressure rotary water jet [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2004, 26(6): 65-67.
- [11] 李根生, 黄中伟, 张德斌, 等. 高压水射流与化学剂复合解堵工艺的机理及应用[J]. 石油学报, 2005, 26(1): 96-100.
- Li Gensheng, Huang Zhongwei, Zhang Debin, et al. Block-removing technus using high pressure water jets combined with acidization[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(1): 96-100.
- [12] 王志强, 南庆义, 王海军, 等. 高压旋转射流与化学剂联合解堵技术及应用[J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(1): 37-42.
- Wang Zhiqiang, Nan Qingyi, Wang Haijun, et al. Plug removal technology and application of combining pressure rotary fluidics and chemicals [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2001, 23(1): 37-42.
- [13] 张荣军, 蒲春生. 振动-土酸化复合解堵室内实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 114-116.
- Zhang Rongjun, Pu Chunsheng. Vibration-mud acidization treatment broken down experiment [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5): 114-116.
- [14] Li Gensheng, Huang Zhongwei, Zhang Debin, et al. Study of treatment of near well-bore formation processed with high pressure rotating water jets [J]. Petroleum Science and Technology, 2002, 20(9/10): 961-972.
- [15] 黄中伟, 李根生, 刘全国, 等. 振荡-酸化深部复合解堵机理与应用 [J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(5): 618-621.
- Huang Zhongwei, Li Gensheng, Liu Quanguo, et al. Mechanisms and applications of removing blockage with oscillating jet and acid [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(5): 618-621.
- (收稿日期 2012-12-31 改回日期 2013-03-04 编辑 宋 宁)

《石油学报》2013 年第 5 期部分文章预告(II)

碳酸盐岩气藏类型划分及其开发特征	贾爱林等
大庆油田聚合物驱后微观剩余油分布规律	白振强等
致密砂岩气藏水平井分段压裂优化设计与应用	曾凡辉等
碱液侵蚀: 一种泥页岩井壁失稳新机理	俞杨烽等
基于统一强度理论的石油套管柱抗挤强度	赵均海等
深水钻井隔水管-导管系统波激疲劳分析	刘秀全等
基于三电极系的救援井与事故井连通探测系统	李 翠等
中国石油公司海外油气资源战略	穆龙新等
从工程技术角度浅析页岩气的开采	李文阳等