

# 油气井出砂在线监测技术

张涛<sup>1</sup>, 刘莉娟<sup>2</sup>, 郭玉廷<sup>3</sup>

1. 中国石油长庆油田分公司第七采油厂 甘肃庆阳 745700
2. 中国石油华北油田分公司第四采油厂 河北廊坊 065007
3. 中国石油华北油田分公司勘探开发研究院 河北任丘 163412

通讯作者:Email:11005772148@qq.com

引用:张涛,刘莉娟,郭玉廷. 油气井出砂在线监测技术[J]. 油气井测试,2021,30(3):45-51.

Cite: ZHANG Tao, LIU Lijuan, GUO Yuting. Online sand production monitoring scheme for oil and gas well testing [J]. Well Testing, 2021,30(3): 45-51.

**摘要** 为解决油气井开采过程中的出砂问题,延长油气井使用寿命,从油气井出砂监测技术的运行机理入手,对出砂监测技术的系统模型构建、技术优化、软件系统构成、监测技术测试与评价等方面进行系统化研究,形成了完善的油气井测试在线出砂监测方案。以监测数据为导向,完整的油气井测试分析机制可以对油气井出砂监测技术的调整方案进行系统分析。通过必要的测试评价手段,还可以对油气井出砂监测技术的实用性进行考量,实现对油气井出砂的准确监测与有效控制。完善的油气井测试在线出砂监测方案能够满足实际油气井生产要求,为现阶段油气井生产、管理创造条件。

**关键词** 动态监测; 油气井出砂; 在线监测; 监测软件; 监测方案; 效果评估

中图分类号:TE357 文献标识码:B DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.03.008

## Online sand production monitoring scheme for oil and gas well testing

ZHANG Tao<sup>1</sup>, LIU Lijuan<sup>2</sup>, GUO Yuting<sup>3</sup>

1. No. 7 Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Qingyang, Gansu 745000, China
2. No. 4 Oil Production Plant, PetroChina Huabei Oilfield Company, Langfang, Hebei 065007, China
3. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 065007, China

**Abstract:** In order to solve the problem of sand production in oil and gas well exploitation and prolong the service life of oil and gas wells, starting from the operation mechanism of sand production monitoring technology of gas wells, this paper systematically studies the construction of sand production monitoring technology system model, the optimization of technology, the composition of software system, the test and evaluation of monitoring technology, etc. a perfect online sand production monitoring scheme for oil and gas well testing is formed. Guided by the monitoring data, a complete oil and gas well testing and analysis mechanism can systematically analyze the adjustment scheme of sand production monitoring technology for oil and gas well testing. Through necessary testing and evaluation means, consider the practicability of oil and gas well sand production monitoring technology, so as to realize the accurate monitoring and effective control of sand production and meet the actual production requirements of oil and gas wells. The perfect monitoring scheme of oil and gas well testing online sand production can meet the actual production requirements of oil and gas wells, and create conditions for the production and management of oil and gas wells at present.

**Keywords:** dynamic monitoring; oil and gas well sand production; online monitoring; monitoring software; monitoring scheme; effect evaluation

随着油气井开采活动的深入进行,开采区域地质条件的不断变化,导致油气井内稳产层厚度逐渐降低,地层之中的砂石不断进入井筒之中,导致出砂的发生。从以往油气资源开采的经验看,我国胜利、辽河等油气田都出现过较为严重的出砂问题<sup>[1-2]</sup>。出砂是我国油气井开采过程中面临

的重大难题。目前,根据出砂的程度差异,可以将油气井出砂划分为不稳定性出砂、连续性出砂和突发性出砂等<sup>[3]</sup>。不同类别的出砂实际表现也有所差异。例如不稳定性出砂往往出现在油气井开采的初期阶段,出砂量随着开采时间的增长而出现减少情况;连续性出砂则出现在油气井生产阶

段,出砂量长期稳定增长。从油气资源开采的角度看,适量的出砂能够提升油气井的油气资源产量,降低开采的难度与开采成本。但是,出砂量如果超过某一极限,将危及油气井的地上、地下设备,增加设备故障发生机率,同时还会缩短油气井的使用寿命<sup>[4]</sup>。也即出砂量过大,将会导致砂沉积在油气分布区域,增加开采难度,造成油气井减产。同时,出砂也会使油管等生产设备出现卡堵情况,造成设备无法正常运转,产生额外的费用支出,破坏油气资源开采的连续性。为避免上述情况发生,有效应对出砂问题,越来越多研究人员尝试采用不同技术手段,对出砂量进行实时监测<sup>[5-6]</sup>。依据出砂监测数据,评估井下状态,制定合适的防砂、治砂方案,并采取相应措施保证油气井出砂量控制在合理范围内,在保证油气资源有序开采的同时,减少生产设备发生故障的机率,延长油气井服务年限。文章以出砂监测需求为出发点,借助现有技术手段,建立起出砂在线监测技术机制,并尝试对其监测结果进行测试,以确保监测技术的准确性,为监测技术的优化、应用,以及测试等工作的开展奠定基础。

## 1 监测技术机理及系统模型

油气井出砂监测技术主要是通过对砂粒在运动过程中与油气井管壁相互碰撞所产生的高频振动信号进行持续性监测,通过获取出砂量相关信息,满足监测需求。从砂粒运行的情况看,当砂粒进入到油气等流体中,受到重力、浮力等外力作用,

其运动轨迹表现出一定的特殊性<sup>[7]</sup>。目前,国内尚没有成熟的出砂测量装置,无法对油气井中存在的出砂情况进行准确评估。国外在出砂监测过程中,往往采用传感器等监测设备,对油气井中的砂粒数量、油气运移情况等进行分析。基于国外技术经验,我国油气井在出砂监测过程中,采取非侵入监测方式,使用探头对砂粒运动过程中产生的碰撞信号进行汇总。从实际情况看,砂粒在井下设备运动过程中,在不同的区域,运动速度变化较大,通过仿真流体评估,非侵入式探头能够有效捕捉油气井内砂粒的运行情况,为砂粒运行轨迹的模拟、浓度的有效判定提供数据支撑。

油气井出砂监测技术系统运行原理在于,通过传感器、非侵入式摄像头,准确判定油气井测试设备中砂粒自身的质量以及运动速度,计算出砂粒具有的动能。当砂粒运行到油气井井下管道的转弯位置,砂粒的运行速度进一步加快,砂粒从流体中分离出来,对井下管道产生冲击,引发连续、高频的脉冲信号,脉冲信号通过管道内置的传感器被获取,并通过传感器的处理,将信号进一步放大,放大信号在数据处理软件内,计算出油气井的出砂量和出砂率等,以此评估油气井出砂情况。从以往经验看,油气井内的出砂信号,其主要为超声波频段,具有的动能较大,表现出极强的穿刺性。基于这种特性,在出砂监测过程中,可以使用非侵入式设备,对出砂信号快速收集与处理,保证油气井出砂数据获取的实时性。为此,设计出砂信号监测系统模型如图1所示。

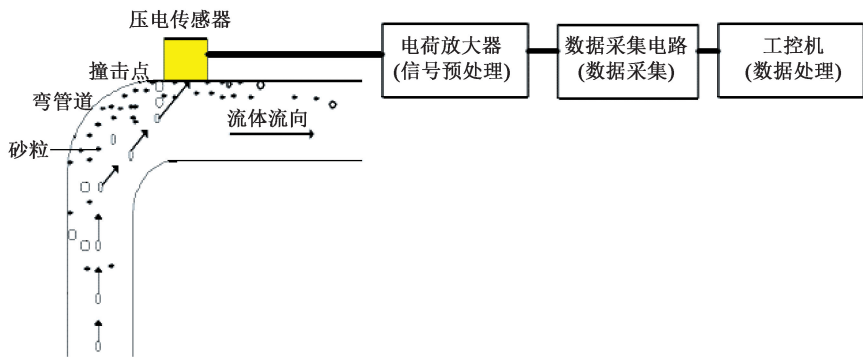


图1 出砂信号监测系统模型

Fig.1 Model of sand production signal monitoring system

当油气管道中的流体满足一定的流速、流量条件下,油气等流体携带的砂运移到弯管处,由于高速流动,砂从流体中被挤出,撞击管壁内壁,产生高频、连续的超声波脉冲出砂信号,信号通过管壁的传输,被安装在弯管的压电传感器拾取,通过电荷

放大器将信号转换为电压信号。该信号作为动态信号经过滤波、放大等预处理,实时地通过数据采集卡传递给工控机,工控机上的数据处理软件对该信号进行相应的滤波,识别提取有用砂信号,利用模型计算出砂率、出砂量等,并将信号及相应的出

砂率进行实时显示,判断出砂状况。

## 2 出砂信号的获取

根据前期的测量可知,出砂信号主要处于超声波频段,能量远大于同频段其他信号,还具有较高的穿透能力。因此,采用非侵入式的监测方法可以测量到出砂信号。

### 2.1 出砂信号在管壁中的传播特性

对砂粒撞击管壁进行力学分析,如图2所示。图中, $p_i$ 为A区域内入射超声波压强; $p_{Ar}$ 为A、B区域交界面处反射超声波压强; $p_{Bt}$ 为A区域透射到B区域超声波压强; $p_{Br}$ 为B、C区域交界面处超声波反射超声波压强; $t_p$ 为透过管壁超声波压强。

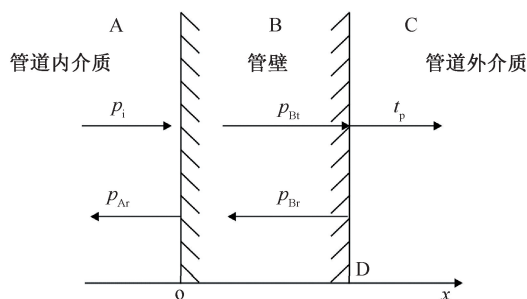


图2 出砂信号撞击管壁力学分析

Fig. 2 Mechanical analysis of sand production signal impacting on pipe wall

由现场可知,区域C、区域B、区域A的介质分别为空气、不锈钢、油或天然气。由 $\lambda = c_{\text{声速}}/f$ 可知,出砂信号的波长 $\lambda$ 要小于17 mm。根据已知条件,可以求出透射率,得到相应的损失能量,进行参数校正,确保信号更加准确。应使声波信号尽可能多地传递到传感器与管壁的界面,使能量损失最低。

采用三维声波传导有限元程序,对管壁材料杨式模量为 $2.06 \times 10^{11}$  Pa,泊松比为0.29,密度为 $7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$ 的弯管道进行超声波测试仿真实验,得到如图3所示不同壁厚对超声波能量消耗的影响。

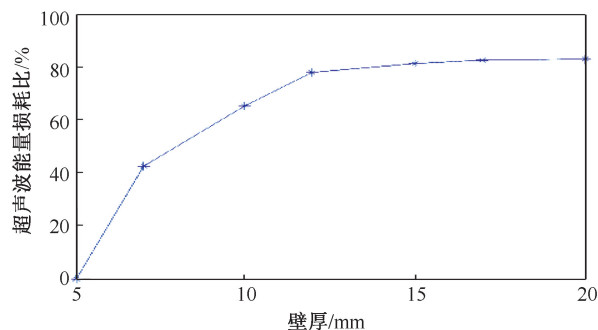


图3 弯管壁厚对超声波能量损耗

Fig. 3 Energy loss of ultrasonic wave caused by wall thickness of pipe bend

从图中可看出,弯管管壁越薄,对超声信号的影响越小。所以,建议在设计选用管壁时壁厚小于10 mm。

### 2.2 出砂信号的快速获取

为保证出砂信号的快速获取,传感器的选择、安装,以及角度等方面多加注意,以确保出砂信号获取的有效性<sup>[8]</sup>。考虑到油气井出砂监测技术的运行原理,在使用传感器进行出砂信号获取时,可以根据油气井实际情况,对传感器的安装位置进行微调,使传感器能够快速获取砂粒运行过程中对油气管道内壁产生的振动脉冲。经过研究发现,将传感器安装在砂粒与管壁撞击最为严重的区域,可以有效获取砂粒信号<sup>[9]</sup>。与此同时,借助于Fluent软件,模拟油气井管道模型<sup>[10]</sup>,将相应的数据输入到软件中,将砂粒在油气管道内的运行状态进行分析,可验证油气井出砂监测的最佳位置,实现出砂信号的有效获取。从验证情况来看,传感器安装最佳位置应当放在距离油气井弯道管2倍长度处。

实际应用中,需对传感器探头的安装角度进行微调处理,充分考虑砂粒超声波信号的衰减系数,以及管壁耦合度,以此来实现对超声波信号的有效处理<sup>[11]</sup>。

### 2.3 出砂监测去噪方案

油气井出砂信号受到油气井流体速度、砂粒直径,以及砂粒浓度等多种因素的影响。从实际情况来看,油气井流体速度对于出砂信号的强度有着较大的影响,在其他条件一定的情况下,油气井流体运动速度越快,砂粒速度也对应加快,其动能越大。

受到油气井流体运动速度的影响,油气井出砂信号中表现出工频噪音、流体噪音、白噪音等几种不同的类型(图4)。通过对不同类型噪音特性分析,可以在较短的时间内,去除噪音等干扰因素,实现出砂监测信号的准确收集<sup>[12]</sup>。工频噪音在状态上表现为正弦波,采用巴特沃斯滤波器去噪。从频谱分析结果来看,其噪音频率为50 Hz(图4a)。流体噪音由油气井管道振动引发,噪声振动频率幅度值要高于其他振动信号,并且在频谱分析过程中,表现出脉冲性(图4b)。白噪声作为环境声音,白噪音如果超过一定的范畴,其掩盖出砂信号(图4c)。

从相关研究机构公布的数据来看,白噪音的频率带宽呈现出无限性,对于整个出砂信号的收集工



作影响较大,导致出砂信号获取出现偏差,影响最终监测结果的准确性<sup>[13]</sup>。因此,在监测技术应用环节,需要对噪音做出去除工作,将噪音对于出砂信号的收集工作降到最低。在实际的去噪环节,可以使用相关设备,对噪音进行针对性处理,例如在工频噪音去除环节,可以使用高通滤波器,通过平衡值的调控,将脉冲信号控制在合理的范围之内<sup>[14]</sup>(图5)。

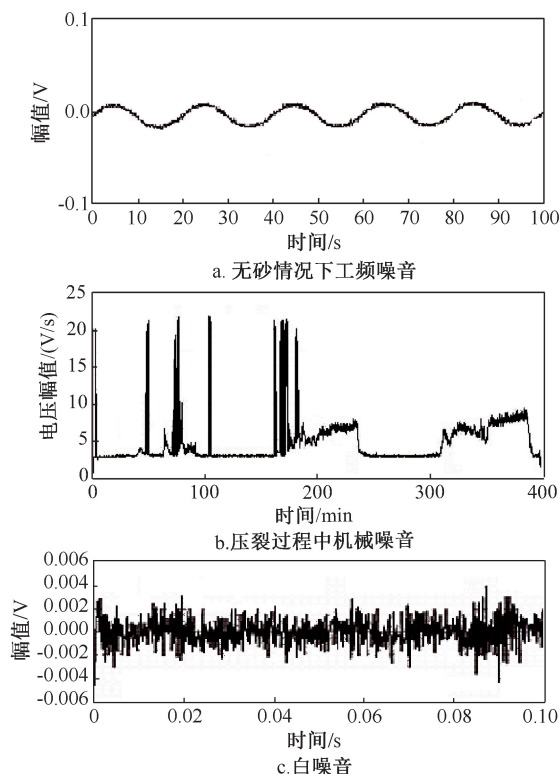


图4 几种噪音干扰信号图

Fig. 4 Several noise interference signal diagrams

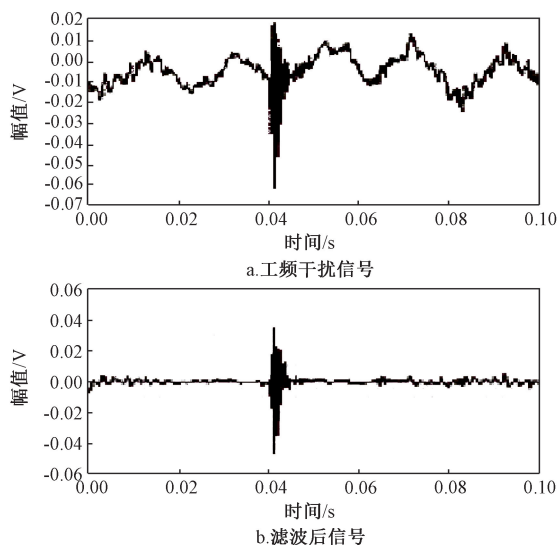


图5 加砂过程中信号图

Fig. 5 Signal diagram during sanding process

### 3 油气井出砂在线监测技术

通过油气井出砂分析方案的制定、油气井出砂数据处理机制的研究等,对油气井出砂在线监测技术进行优化。

#### 3.1 油气井出砂分析方案

针对不稳定性出砂、连续性出砂等不同的油气井出砂特点,在实际的出砂监测技术优化调整过程中,通过动态监测加速信号等手段,及时掌握出砂情况。当油气井发生出砂情况时,油气井内部气体、液体,以及颗粒物构成会发生明显的变化,通过了解这个变化,掌握出砂情况。为此,可以选用相应的传感器,对油气井内气体、液体变化情况进行实时监控,评估出砂情况<sup>[15]</sup>。目前应用频率较高的压电式传感器,这类传感器能够对油气井内气体、液体运动过程产生的振动进行敏锐的捕捉,并将捕捉到的振动信号,传输到计算机系统之中,由计算机对传感器获取的振动信号的概率密度,以及功率谱密度等进行全面的分析工作。在分析过程中,分析不同流体的频谱特性,判定出砂情况<sup>[16]</sup>。从实际使用情况看,这种出砂监测方案,实现了对原有出砂监测技术的优化调整,不仅能够快速、准确地获取各类振动信号,达到判定油气井出砂情况的目的,同时还在很大程度上,减少了噪音等外部因素对于整个出砂监测工作的影响<sup>[17]</sup>。在实际的技术应用环节,除了做好传感器类别的选择之外,还需对信号传输交互模式做好相应的优化工作。在传感器的作用下,出砂产生的振动信号转化为电信号,为保证电信号的完整,避免出现失真的情况,可以采用滤波或者放大的技术方案,对电信号进行调控,使得电信号能够真实地反映出油气井的出砂情况。

#### 3.2 油气井出砂数据处理机制

为保证油气井出砂数据的处理水平,在监测技术优化环节,对油气井出砂数据进行系统化处理<sup>[18]</sup>。从概率密度和功率谱密度两方面,对整个油气井出砂监测环节产生的数据进行相应处理,实现对出砂情况的合理化管控<sup>[19]</sup>。以某油气田为例,为提升出砂监测数据的准确性,获取油气井内气体流速、砂粒大小等具体参数,通过概率密度、功率密度等的测试,在较短时间内,完成单相气体测试、气砂测试等,通过对测试数据的分析、评估,准确获取出砂情况,并根据出砂量大小,制定治砂方案,将出砂量控制在合理的范围内,在保证油气田产量的基础上,减少了开采设备出现故障的机率,延长了油田的使用寿命。

3.3 油气井出砂在线监测软件

油气井出砂在线监测过程中,需要各类软件系统的支持,能够在短时间内完成监测信息的有效处理,将井下出砂的情况实时反馈。为保证监测软件的有效运转。需要做好软件参数的调整等方面的工作,以保证油气井出砂在线监测技术能够满足适应油气资源开采需求。

3.3.1 油气井出砂监测软件整体框架

为实现油气井出砂过程中出砂量的有效判定,实现出砂量的科学分析,推动防砂、控砂工作的顺利进行。在出砂监测技术应用过程中,有必要做好油气井出砂监测软件的优化工作,完善在线监测系统基本框架,理顺监测软件的功能模块,使其更加符合现阶段油气井出砂监测的相关要求,保证出砂监测过程中,数据的实时处理。其软件监测系统的构成如图 6 所示。

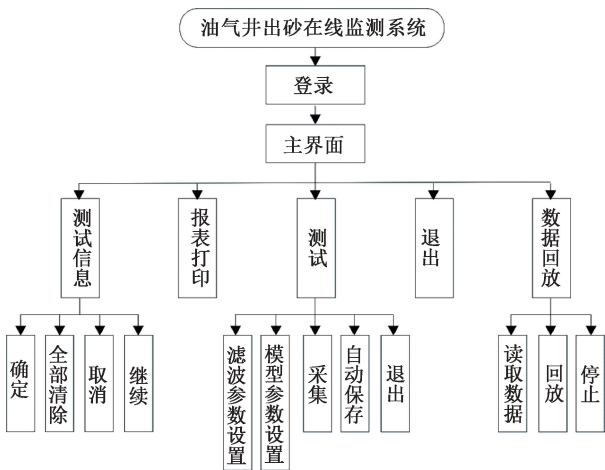


图 6 油气井出砂监测软件结构框图  
Fig. 6 Structure diagram of sand production monitoring software for oil and gas wells

出于油气井出砂监测工作的要求,可以从测试信息、测试技术、数据回放、报表打印等功能模块出发,对监测软件的功能进行深耕,使其充分满足油气井出砂监测要求。例如在出砂监测技术测试环节,为保证出砂监测的有效性、准确性,可以通过滤波参数、模型参数的有效设置,做好出砂数据的获取、筛选以及存储工作。

3.3.2 油气井出砂监测软件系统构成

(1)登录模块。授权使用该系统的操作人员通过用户名和密码进行操作,只有密码、用户名两者全部匹配才能进入主界面进行出砂监测的相关操作。该模块保证仅有拥有权限的操作人员才能操作此系统,提高系统安全性。

(2)主界面模块。用于对测试信息、测试等模块的选择,进入到相应的模块界面,进行相应操作。

①测试信息模块。用于记录测试的油田名称、井号、操作人员、流量等相关信息,做好测试日志工作,便于后期信息的查阅。

②测试模块。将数学模型、滤波方法用于对实际的出砂现象的监测,实现油气井出砂在线监测系统的监测功能,同时该部分自动保存数据,用于后期数据的处理分析。

③数据回放模块。回放采集的数据文件并对某段时间内的出砂量进行计算、显示。

④报表打印模块。生成相应报表,进行打印。

⑤退出模块。结束本次测试,退出系统。

3.4 油气井出砂监测技术测试与评价

在现有实验室条件下,模拟油气井出砂现场,对油气井出砂在线监测技术的运行效果进行评估。根据评估结果,对在线出砂监测技术机制进行必要的调整及优化。

在测试环节,为保证实验模拟的真实性,可以通过气泵、管道、电荷放大器、数采卡等设备,对模拟状态下,出砂情况进行必要的调整,使其真实地展现出油气井出砂时的相关状态。通过模拟,可以获得相关标准数据,为后续测试评价提供参考<sup>[20]</sup>。通过对测试数据的分析以及评估,掌握在线出砂监测技术的使用情况。

从最终的测试结果看,出砂在线监测技术能够很好地满足现阶段油气井出砂监测相关要求,在短时间内,准确反馈油气井的出砂情况,帮助技术人员快速制定防砂、治砂方案,在保持油气田连续稳定生产的同时,降低油气生产设备发生故障的几率。

4 实际应用

SP-2 井所处区域地质情况较为复杂,位于某盆地西南边缘,整个地区属于侵蚀山地,东北部为山地,所属区的地形结构较为复杂,整个区域呈现出一定的单斜结构,倾斜方向以东西向存在,倾斜角度在 7°到 15°之间,地质断层较为发育,共有 9 个断层,开采难度相对较大,砂粒松散且体量较大。为提高油层渗透能力,增加产油量,对该井进行加砂压裂。在压裂过程中,加砂量及其加砂浓度确定,通过出砂在线监测系统监测的出砂量与压裂过程的加砂量进行比较,对参数进行校准,为后期监测提供依据。

表 1 给出了 SP-2 井的泵注数据,监测到压裂过

程中出砂率变化趋势如图 7 所示。入井液量 343.7 m<sup>3</sup>,压裂加入总砂量 51.2 m<sup>3</sup>,软件计算累计出砂总量 55.8 m<sup>3</sup>,误差在 10%以内,精确度较高。

表 1 SP-2 井加砂压裂泵注数据

Table 1 Sanding fracturing pumping data of Well SP-2

时间	泵注程序	油管排量/ (m <sup>3</sup> /min)	砂量/ m <sup>3</sup>
09:52~10:02	前置液	0.00~5.70	1.1
10:03~10:05	携砂液	5.51~5.78	1.3
10:06~10:08	顶替液	5.50~5.68	0.0
10:09~10:18	投球	/	/
10:19~10:26	前置液	1.15~6.16	0.0
10:27~10:44	携砂液	3.97~6.17	19.0
10:45~10:47	顶替液	4.98~5.21	0.0
10:48~10:55	投球	/	/
10:56~11:01	前置液	1.20~5.73	0.0
11:02~11:21	携砂液	5.53~6.08	29.8
11:22~11:23	顶替液	5.93~6.04	0.0

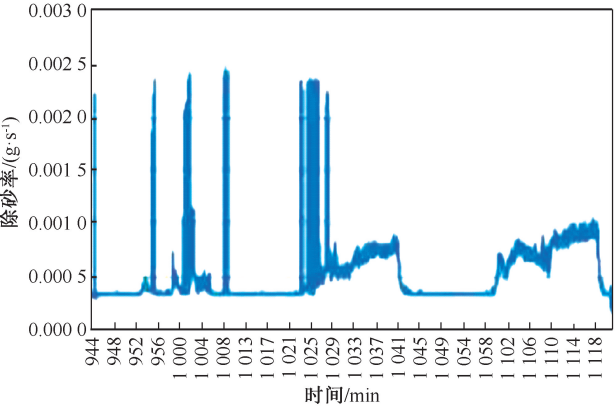


图 7 SP-2 井出砂监测曲线

Fig.7 Sand production monitoring curve of Well SP-2

从获取的出砂测量曲线可以看出,在线出砂监测技术能够更加准确地反映出出砂情况,由此可以辅助判定油气井生产状态。

5 结语

- (1)油气井出砂监测技术研发、应用以及测试工作,实现了对出砂的准确监测与有效控制,大幅度增强了油气开发的有效性,对我国油气资源开发有着极为深远的影响。
- (2)以在线出砂监测技术作为研究核心,系统分析油气井出砂监测技术优化调整方案,并通过必要的测试评价手段,对油气井出砂监测技术的实用性进行考量,为后续相关实践工作的开展提供了便利。
- (3)该项技术尚未完全成熟,无法适应多元场景下的监测要求。为更好的完善优化在线出砂量监测体系,需要在技术构成、数据分析等角度出发,着力推

- 进油气井出砂在线监测技术的智能化、信息化。
- 致谢:感谢长庆油田采油七厂同意本论文公开发表。
- 参考文献
- [1] 刘晋杰. 便携式油气井出砂地面监测系统研究[D]. 西安:西安石油大学,2017.  
LIU Jijie. The research of portable ground system for monitoring the sand from oil and gas wells [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017.
  - [2] 杨建平. 辽河油田稠油防砂实验研究与防砂工艺决策[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2007.  
YANG Jianping. Liaohe Oilfield experimental study on heavy oil sand control and sandcontrol technique decision [D]. Qingdao: China University of Petroleum (EastChina), 2007.
  - [3] 朱倩倩. 油气井出砂在线监测方法研究[D]. 西安:西安石油大学,2016.  
ZHU Qianqian. The research of the real-time sand-detecting method in oil and gas wells [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2016.
  - [4] 孙连坡,赵洪山. 稠油油井出砂对套管损坏的影响分析[J]. 西部探矿工程,2020,32(9):100-103.  
SUN Lianpo, ZHAO Hongshan. Analysis of the influence of sand production on casing damage in heavy oil wells [J]. West-China Exploration Engineering, 2020,32(9): 100-103.
  - [5] 姜海龙. 测试生产中不同渗流机理下油气井出砂量分析[J]. 石油化工应用,2018,37(6):21-28,36.  
JIANG Hailong. Sand production volume of wells for different seepage mechanism during testing and production [J]. Petrochemical Industry Application, 2018, 37 (6): 21-28,36.
  - [6] 方传新,张昕,刘洋志,等. 海上油气井出砂监测技术应用与实践[J]. 中国石油和化工标准与质量,2020,40(9):245-246,248.  
FANG Chuanxin, ZHANG Xin, LIU Yangzhi, et al. Application and practice of sand production monitoring technology in offshore oil and gas wells [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2020, 40 (9): 245-246,248.
  - [7] 李婧源. 地层出砂机理与防砂措施技术研究[D]. 大庆:东北石油大学,2018.  
LI Jingyuan. Research on mechanism of sand producing and technology of sand control measures [J]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018.
  - [8] 宋汐瑾,张丽娟,党博. 油气井出砂监测模拟实验方法研究[J]. 管道技术与设备,2018(1):4-6.  
SONG Xijin, ZHANG Lijuan, DANG Bo. Oil and gas well sand monitoring simulation test method research [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2018(1):4-6.
  - [9] 姜海龙. 测试生产中不同渗流机理下的油气井出砂量分析[J]. 石油化工应用,2018(6):96-97.

- JIANG Hailong. Sand output analysis of oil and gas Wells under different seepage mechanisms in test production [J]. Petrochemical applications, 2018 (6): 96-97.
- [10] 纪宏超,李耀刚,郑镭,等. 基于 fluent 的弯管流动模拟研究[J]. 河北联合大学学报(自然科学版),2013,35(1):73-76.
- JI Hongchao, LI Yaogang, ZHENG Lei, et al. The study on flow simulation based on the fluent bend pipe [J]. Journal of Hebei United University (Natural Science Edition), 2013,35(1):73-76.
- [11] 李军贤. 地层出砂井测试工艺优化[J]. 油气井测试, 2018,27(2):47-52.
- LI Junxian. Optimization of testing techniques for wells with formation sand production [J]. Well Testing, 2018, 27(2):47-52.
- [12] 韩冰,孙建伟,沈妮娜. 油井出砂治理技术与运用[J]. 石化技术,2018,25(5):145,129.
- HAN Bing, SUN Jianwei, SHEN Nina. Research and application of sanding treatment technology in oil wells [J]. Petrochemical Industry Technology, 2018,25(5): 145,129.
- [13] 周清泉. 油气井智能分层测量技术研究[J]. 化工管理,2018(1):214-215.
- ZHOU Qingquan. Research on intelligent stratification measurement technology for oil and gas wells [J]. Chemical Enterprise Management, 2018 (1): 214-215.
- [14] 姚先荣,扬成,晏凌,等. 高温高压天然气深井开采出砂预测模型优选[J]. 钻采工艺,2018,41(3):37-40.
- YAO Xianrong, YANG Cheng, YAN Ling, et al. Determination on optimum sand production prediction model for deep HPHT wells during production stage [J]. Drilling and Production Technology, 2018,41(3): 37-40.
- [15] 董晨,董晖山,郭怀清. 超深水平井砂卡油管解卡打捞技术[J]. 石化技术,2018,25(5):165-166.
- DONG Chen, DONG Huishan, GUO Huaqing. Application of unfreezing and fishing technology for sand sticking in oil pipe of super deep horizontal wells [J]. Petrochemical Industry Technology, 2018,25(5):165-166.
- [16] 隋义勇,林堂茂,刘翔,等. 交变载荷对储气库注采井出砂规律的影响[J]. 油气储运,2019,38(3):52-53.
- SUI Yiyong, LIN Tangmao, LIU Xiang, et al. The influence of alternating load on sand production law of injection/production wells of underground gas storages [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(3):52-53.
- [17] 罗杨,徐进杰,王建忠,等. 致密油水平井出砂机理[J]. 大庆石油地质与开发,2018,37(3):168-174.
- LUO Yang, XU Jinjie, WANG Jianzhong, et al. Sand producing mechanism for the horizontal wells in the tight oil [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018,37(3):168-174.
- [18] 姜海龙. 高温高压气井定产生出砂预测新模型及应用[J]. 石油化工应用,2018,37(5):34-39,42.
- JIANG Hailong. Modeling and application of sand prediction during a constant-rate production of a high pressure and high temperature gas well [J]. Petrochemical Industry Application, 2018,37(5):34-39,42.
- [19] 耿聪,刘雨薇,张京,等. 浅谈油井作业压裂酸化及防砂堵水技术研究[J]. 石化技术,2018,25(5):226.
- GENG Cong, LIU Yuwei, ZHANG Jing, et al. Study on fracturing acidification and sand control and water shutoff technology in oil well operation [J]. Petrochemical Industry Technology, 2018,25(5):226.
- [20] 韩雄,庞东晓,王峰. 油气井试油作业数字井筒建设实践[J]. 油气井测试,2018,27(2):34-40.
- HAN Xiong, PANG Dongxiao, WANG Feng. Construction of digital wellbore for well testing [J]. Well Testing, 2018, 27(2):34-40.

编辑 方志慧

**第一作者简介:**张涛,男,1983年10月出生,2007年毕业于中国地质大学石油工程专业,现从事油气田开发研究工作。电话:0934-8386870,17326412555;Email:1005772148@qq.com。通信地址:甘肃省庆阳市环县洪德乡长庆油田第七采油厂,邮政编码:745700。