

油井出砂监测技术现状及发展趋势

刘刚,刘澎涛,韩金良,陈超

中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛 266580

摘要 将出砂冷采技术应用到稠油油藏,虽然会大幅提高油井的产量,但实际生产中过度出砂或者过度防砂都会带来各类问题。为了在出砂生产和防砂之间寻求最优的解决方案,实现油井适度出砂,需要一套出砂监测系统进行实时监测,持续有效显示出砂信息,为出砂生产和防砂提供最优的策略。通过对国内外出砂监测技术的调研,总结了出砂监测的主要方法,介绍了出砂监测的主要设备,分析了监测信号的处理方法,指出了出砂监测的重要性及未来发展趋势。

关键词 适度出砂;出砂监测;信号处理

中图分类号 TE355

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.25.012

Status and Development Trends of Sand Monitoring Technology of Oil Wells

LIU Gang, LIU Pengtao, HAN Jinliang, CHEN Chao

School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong Province, China

Abstract Applying cold production to heavy oil reservoirs is one of the hottest technologies of the present oil exploration, which can improve the yield of oil wells substantially. However, excessive sanding can damage the production equipment while excessive sand prevention can decrease the efficiency of the yield. Both of them in actual production can bring problems. In order to seek the optimal solutions in sand production and sand prevention, and achieve sand management in oil wells, a set of sand monitoring systems for real time monitoring are needed to show sand information continuously and effectively to provide optimal strategy. According to the research of sand monitoring technology worldwide, different sand monitoring methods such as ultrasonic methods, ER methods, surface monitoring and underground monitoring, equipments such as ClampOn system, CorrOcean system and Landy system, and signal processing methods such as FFT, WT and EMD are introduced. Characteristics of these methods and facilities are analyzed, and the importance of sand monitoring and the development trends of sand monitoring are put forward.

Keywords sand management; sand monitoring; signal processing

0 引言

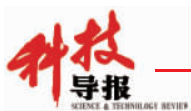
稠油开采已成为中国石油行业的重要组成部分,如果将出砂冷采技术应用到稠油开采,特别是海上稠油油田,会大幅提高油井的产量,但却面临许多问题^[1]。过量出砂会产生损坏油井生产设备,为地面后期的除砂带来困难等问题,过度防砂则会影响蚯蚓洞形成,降低油井产量^[2],需要在出砂和防砂之间寻找最佳方案。因此提出了适度出砂的生产方法^[3],其基本原理为:在易出砂储层或疏松储层的原油生产过程中,粒径不同的储层砂在原油的携带作用下发生运移,根据发生运移的储层砂的大小和分布,对大于或等于一定粒径的储层

砂进行有选择的阻挡;这些粒径的储层砂发生堆积形成一种滤砂屏障,进而会阻挡粒径更小的储层砂的运移,达到部分防砂的目的。在储层砂形成这种滤砂屏障前,由于允许储层砂中粒径更小的那部分随原油运移,改善了井眼附近的储层物性,使油层产能得到了充分的发挥。针对油井出砂量、出砂速度等参数,经常使用出砂趋势预测、油井出砂监测等方法。常用的预测油井出砂方法主要有现场观测法、经验法、实验室法、理论分析模型法和数值算法等^[4]。但是,由于引发砂原因具有复杂性和多变性,仅仅靠出砂预测不能满足生产需要,而油井出砂监测可以实时将出砂量、出砂速度等参数

收稿日期:2013-03-19;修回日期:2013-04-16

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05024-003-005)

作者简介:刘刚,教授,研究方向为油气井力学、信息与控制,电子信箱:lg87323@126.com



转化为监测信号,经过放大、滤波、转换后,分析监测信号即可计算出出砂参数。

1 国内外出砂监测方法现状

出砂监测方法按照原理可分为:超声波监测法、电阻(ER)监测法、振动监测法、X射线监测法、光纤声波监测法、声纳监测法等多种方法,最主要的是声测法和ER监测法^[1]。

按照监测位置可分为:地面监测法和井下监测法。

按照监测方式可分为:植入式监测法和非植入式监测法。

1.1 超声波监测法

出砂声测主要由超声传感器、信号处理电路及分析软件组成^[2]。将传感器贴在流动管道上,当油气井开采或测试时,流体中携带的粉碎性的固体颗粒撞击管壁,探头检测并接受超声信号,并将其转为电信号,然后信号经过滤波、放大、检波等信号预处理,再利用相关的信号处理分析技术,最后得到诸如出砂量、出砂密度等出砂信息,为评价出砂状况提供依据,如图1所示。

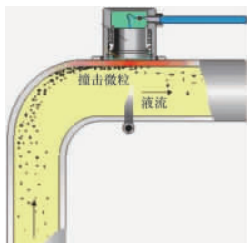


图1 超声波出砂监测法示意
Fig. 1 Ultrasonic sensor monitoring

国外大多数油井的出砂监测以声测量方法为主,它具有安装方便、测量精度高、测量范围宽、可实现实时监测等优点,并且可选用非植入的安装方式,但目前主要应用于气井出砂和稀油出砂的监测,在多相流中的应用效果不是很理想^[3]。

1.2 电阻技术监测法

采用ER的出砂监测是一种基于感应元件受冲蚀磨损来监测出砂的方法^[4]。当流体携带固体颗粒撞击感应探头时,传感器元件将被侵蚀,由此引发的电阻的增加就可以被持续地测量出来,并且感应元件厚度的减少也可以很容易地量化。

电阻技术监测法具有测量简单、适用范围广等优点,但它是一种植入式监测方法,安装时需要改变生产管道,且存在寿命短、监测延迟等问题^[5]。图2为ER出砂监测法示意图。

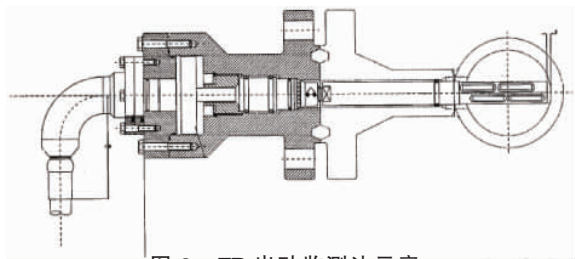


图2 ER出砂监测法示意
Fig. 2 Electric resistance monitoring

1.3 地面监测法

目前出砂监测的主要方式是地面监测,即监测法所使用的设备都在地面,将传感器贴于地面管汇或井口上,不用考虑井下的复杂环境,可以方便、快捷、低成本地对油井出砂进行检测,能够准确检测出砂速度、出砂量等信息。但是不能准确监测井下出砂点,所以对于防砂、修补作业起的作用较小。图3为胜利油田井口安装的超声传感器出砂监测系统,系统对普通抽油机及电潜泵井采油树均有较好的适应性^[6]。



图3 地面监测法示意
Fig. 3 Surface monitoring

1.4 井下监测法

地面出砂监测方法所使用的设备都在地面,不用考虑井下的复杂环境,可以方便、快捷、低成本地对油井出砂进行检测,但是只能监测出砂速度、出砂量等信息,不能准确检测井下出砂点的位置,也就不能对具体防砂措施的采取起重要作用。而井下检测方法是将被测元件下入井下,可以准确检测出砂点位置、出砂量、出砂速度等信息,为优化油井产能、选择合适的防砂措施、制定合理的生产措施和开发方案等提供可靠依据^[7]。图4为井下出砂监测法示意图。

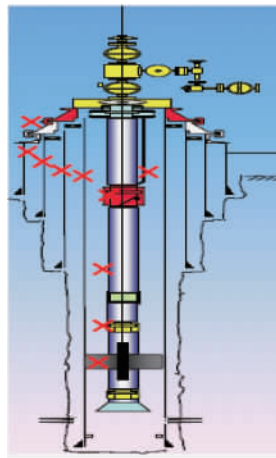


图4 井下出砂监测法示意
Fig. 4 Underface monitoring

1.5 植入式出砂监测法

植入式出砂监测法是指监测时改变现场流动管道,将一次仪表、监测装置植入到生产管道内,当原油流经植入设备时,起到放大信号,稀释稠油,提高监测精度等作用。但是植入设备需要改变原油流动路线,如果植入设备体积过大,也会为现场生产带来不便。图5为植入式出砂监测法示意图。

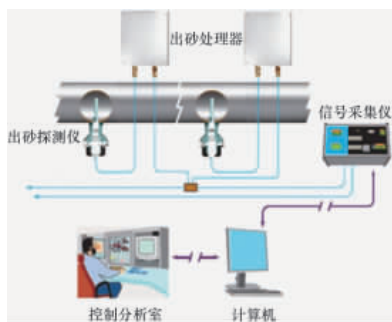


图 5 植入式出砂监测法示意
Fig. 5 Intrusive monitoring

1.6 非植入式出砂监测法

非植入式出砂监测法是指监测时不改变现场流动管道,将一次仪表、监测设备贴在管壁上,接受出砂信息,并传递给信号处理设备。非植入式出砂监测设备安装方便,体积较小,适合海上平台监测。但是监测信号特征较植入式不明显,精度较低,更适合气井和稀油井出砂监测。图 6 为非植入式出砂监测法示意图。

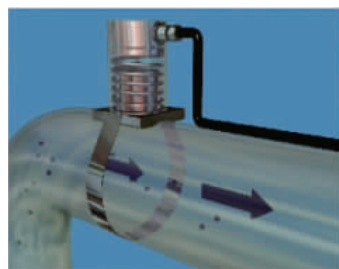


图 6 非植入式出砂监测法示意
Fig. 6 Non-intrusive monitoring

2 国内外出砂监测设备现状

国外的出砂监测技术的研究于 20 世纪 70 年代开始起步,主要是将出砂监测技术作为大量出砂导致砂侵事故时的预警设备,用于解决由于生产过程中大量出砂造成的停产事故;国内关于出砂监测动态信号的分析起步较晚,目前尚处于室内实验阶段。

国外监测设备在采集信号的时候已将其认为用不到的信号进行滤波处理,这样就会造成采集信号的误差,损失掉一部分有用的信号;国内采用的方法大多是先对数据进行现场采集,然后利用数据处理软件对数据进行后期处理。国外著名的出砂监测服务公司主要有 ClampOn 公司、CorrOcean 公司、Landy 公司、Norinco 公司、Regtron 公司,国内出砂监测研究单位主要有西安石油大学和中国石油大学(华东)。

2.1 ClampOn 出砂监测系统

ClampOn 的粒子监控器基于 ClampOn 超声波智能传感器技术,其自行设计的 SandQ™ 超声传感器,内部设置有流量监控能力和滤波技术,不需要借助外来的流量输入,本身就可以测量出砂速度与出砂量。安装在弯头之后的两倍管道直径处,此处,粒子冲击管道壁的内部,产生超生波脉冲。超声

波信号通过管壁传输,并且被声学传感器拾取。该信号在内部经过 DSP 引擎处理,并且在被送到顶部的计算机或者控制系统之前被滤波,从而可以实时评估该数据,实时监测出砂状况,维持生产井的高效生产^[2]。

该监测系统具有安装方便、测量精度高、测量范围宽、可实现实时监测等优点,并且可选用非植入的安装方式,但是其服务费用昂贵,在稠油油井上的应用较少。

2.2 CorrOcean 出砂监测系统

CorrOcean 主要向石油/天然气厂、岸上和海上平台提供出砂监测产品和服务,并已在该技术领域内获得行业领导者的地位^[3]。CorrOcean 系统的主要监测原理为 ER 技术法。CorrOcean 公司出品的出砂冲蚀传感器基于 ER 原理,能检测到 2 到 4 个独立的感应元件在被砂子磨蚀时的电阻变化,其测量精度可达±5nm,对于有意义的含砂量可做出即时反应。

2.3 Landy 出砂监测系统

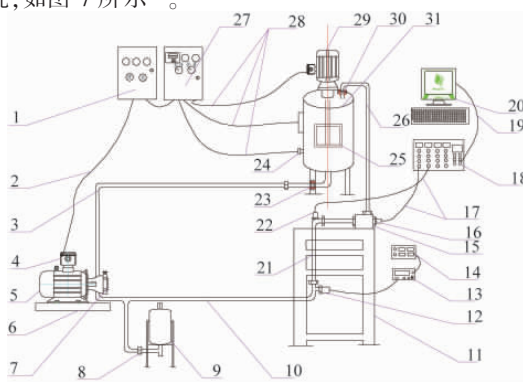
Landy 出砂监测系统是由 Landy 公司研制的超声波探砂仪,探砂仪由电缆下入井下,当砂粒撞击探测仪时,产生超声波信号,传感器探测到超声波信号时,压电晶体产生较低电流,数字信号处理器(DSP)对波谱进行处理,并抑制与出砂无关的信号,之后电信号由电缆传输到地面,进行处理、分析。探测时,油井可以保持生产、注入,也可以关井。

2.4 中国石油大学(华东)出砂监测系统

通过对出砂监测及信号处理的研究,中国石油大学(华东)实验室内先后建立了植入式与非植入式两套用于出砂监测的实验模拟装置。

2.4.1 植入式出砂监测系统

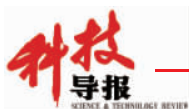
实验室设计了一套基于振动的植入式稠油井出砂监测系统,如图 7 所示^[4]。



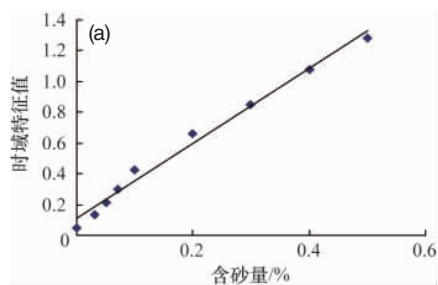
1—总电控供电箱;2,28—电缆线;3,10—高压软管;4—电机接线盒;5—电机;6—电机座;7—柱塞泵;8—双向外螺纹接头;9—空气压缩包;11—管线金属支架;12—压力传感器;13—数字显示器;14—24 伏电源;15—喷嘴;16,22—高频加速度传感器;17—数据信号线;18—数据采集仪;19—网线;20—电脑;21,26—不锈钢管线;23,30—法兰;24—温度传感器;25—搅拌器;27—加热搅拌罐控制箱;29—电机;31—加热搅拌罐

图 7 植入式出砂监测系统示意

Fig. 7 Intrusive sand monitoring system in laboratory



植入式出砂监测系统中,在不同含砂量下进行出砂实验,得到了含砂量与监测信号之间的关系,图8为信号时域特征



征值、自功率谱能量与含砂量的关系曲线,通过曲线可以看出,随着含砂量的提高,信号特征值逐渐增大。

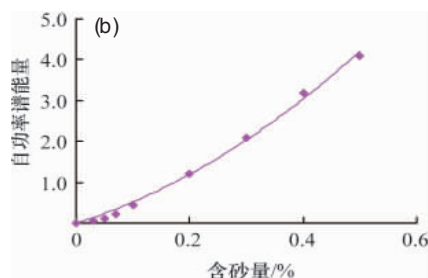


图8 信号时域特征值(a)和自功率谱能量(b)与含砂量的关系

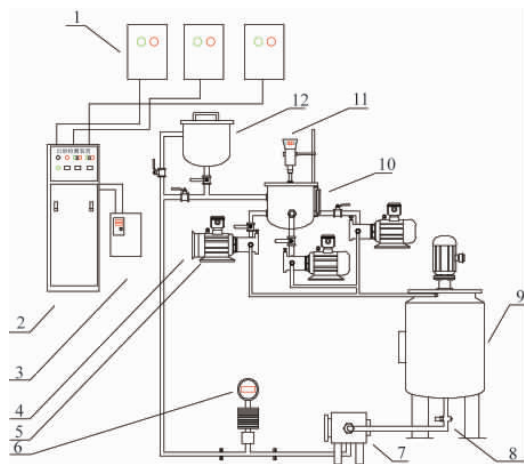
Fig. 8 Curves of time domain amplitude (a) and autopower spectrum (b) versus sand contents

另外,分别在不同出砂速度、出砂粒径、原油温度下进行实验。实验结果表明,随着出砂速度、砂粒粒径、油温的增大,信号特征值也逐渐增大。

2.4.2 非植入式出砂监测系统

植入式出砂监测系统可以放大监测信号,但是需要改变原有生产流程,为现场生产带来不便,因此课题组根据出砂监测的大量实验及分析,建立了一套非植入式出砂监测系统^[9]。该系统基于高频加速度传感器接收砂粒撞击信号,采用专门的采集仪及软件获取这种撞击信号,并对信号进行分析处理,得到含砂量、出砂粒径等出砂参数,为评价出砂状况提供依据。非植入式出砂监测系统如图9所示。

量0~0.5%,携砂流速3.5~10.5m/s的条件下完成稠油出砂监测实验,分析了实验结果,表明出砂监测信号的特征值随着砂粒粒径、含砂量、携砂流速的增大而增大,验证了非侵入式出砂监测实验方法的有效性。

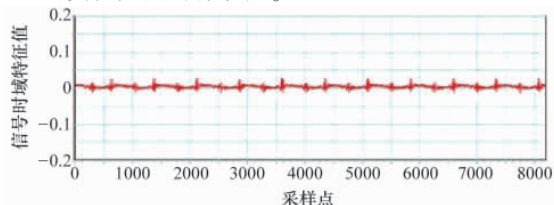


1—电源控制箱;2—实验装置控制柜;3—变频器控制器;4—变频器风机;5—电动机;6—靶式流量计;7—一次仪表装置;8—压力传感器、温度传感器;9—加热罐;10—油箱;11—搅拌器;12—油砂分离装置

图9 非植入式出砂监测系统示意

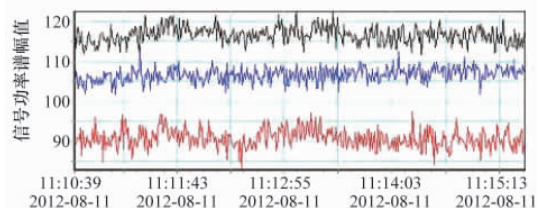
Fig. 9 Non-intrusive sand monitoring system in laboratory

有砂与无砂时监测信号特征如图10所示。图10(a)为无砂时信号时域特征值随采样点变化,图10(b)为信号功率谱幅值随时间变化,图10(c)为含砂时信号时域特征值随采样点变化,图10(d)为信号功率谱幅值随时间变化。功率谱图形中,红线代表0~10kHz频段,黑线代表10~20kHz频段,蓝线代表大于20kHz频段。



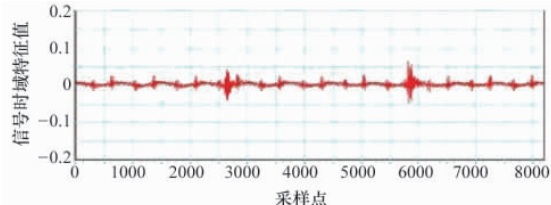
(a) 无砂时信号时域

(a) Curve of time domain amplitude without sand



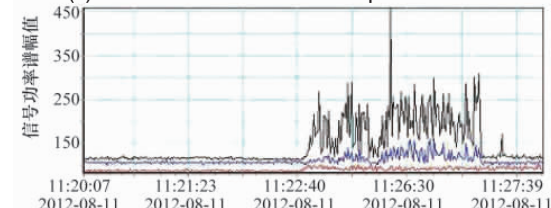
(b) 无砂时信号功率谱

(b) Curve of power spectrum without sand



(c) 含砂时信号时域

(c) Curve of time domain amplitude with sand



(d) 含砂时信号功率谱

(d) Curve of power spectrum with sand

图10 不含砂与含砂时出砂监测信号特征对比分析

Fig. 10 Comparison analysis of sand monitoring signal characters with sand and without sand

3 信号处理方法现状

傅里叶分析是最早研究频率的信号分析理论,也是目前发展最成熟的信号分析理论,具有较好的正交性和快速计算等特点,它建立了信号从时域到频域的变换桥梁,傅里叶反变换则是信号从频域到时域的变换桥梁,它们之间是对应的映射关系。因此在传统的信号分析预处理中,时域和频域构成了表征信号的两种主要方式。但是傅里叶变换是用全局的正弦波定义的,在整体上将信号分解为不同的频率分量,因而缺乏局域性信息。

为了分析和处理非平稳信号,半个多世纪以来,人们对傅里叶分析进行了推广,提出并发展了一系列新的信号处理理论,尝试用时间和频率的联合函数来表示非平稳信号,并对其进行分析和处理,这就是时频分析思想的来源。目前,主要的信号处理方法有短时傅里叶变换, Gabor 展开, Wigner-Ville 展开, 小波变换 (WT), 希尔伯特-黄变换 (HHT) 等^[6]。

4 油井出砂监测技术发展趋势

(1) 油井出砂监测向系统化发展。出砂监测逐渐集信号采集、信号处理、信号存储、信号分析于一体,实时监测,消除延迟。

(2) 油井出砂监测向多元化发展。此前最广泛的是超声波出砂监测法和 ER 监测法,但目前随着振动监测法, X 射线监测法等越来越多监测方法的出现,出砂监测呈现多元化趋势。

(3) 油井出砂监测向综合化发展。改变原有单一监测方法,植入式与非植入式结合,声测与 ER 监测结合,向综合监测发展。

(4) 油井出砂监测向便携式发展。考虑到生产现场空间狭小以及安装的方便,出砂监测系统逐渐向便携式发展。

(5) 油井出砂监测向多参数发展。出砂监测最多的是监测含砂量,但随着监测设备功能的提升,液流黏度、出砂速度、液相速度、气相速度等参数也被监测分析。

(6) 油井出砂监测向精确化发展。监测出砂粒径将越来越小,原油黏度将越来越大,出砂参数与监测信号间的关系将越来越精确。

5 结论与展望

总结了国内外出砂监测的监测方法、监测设备、信号处理方法,并提出了出砂监测的发展方向,为国内出砂监测的实现提供了初步参考。

为实现油井的适度出砂,达到有限度出砂和防砂目的,为后续防砂措施提供依据,油井出砂实时监测设备将起到越来越重要的作用。因此,需要加强对出砂监测设备的研究,提高监测技术水平,增加油井产能,得到最佳投入产出比。

参考文献 (References)

[1] 耿瑞平, 李相方. 油气井出砂信号的动态监测与处理[J]. 计算机测量与控制, 2003, 11(9): 655-657.
Geng Ruiping, Li Xiangfang. Computer Measurement Control, 2003, 11

- (9): 655-657.
- [2] 唐洪明, 王春华, 白蓉, 等. 适度出砂对储层物性影响的室内评价方法研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(2): 94-96.
Tang Hongming, Wang Chunhua, Bai Rong, et al. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2008, 30(2): 94-96.
- [3] 陆兆峰, 陈禾, 林立, 等. 压电式加速度传感器在振动测量系统的应用研究[J]. 仪表技术与传感器, 2007(7): 3-4, 9.
Lu Zhaofeng, Chen He, Lin Li, et al. Instrument Technique and Sensor, 2007(7): 3-4, 9.
- [4] 左星, 申军武, 李薇, 等. 油气井出砂预测方法综述[J]. 西部探矿工程, 2006, 128(12): 93-94.
Zuo Xing, Shen Junwu, Li Wei, et al. West-china Exploration Engineering, 2006, 128(12): 93-94.
- [5] 隋秀香, 郭旗, 李相方. 油气井测试出砂监测技术[J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 110-112.
Sui Xiuxiang, Guo Qi, Li Xiangfang. Natural Gas Industry, 2004, 24(5): 110-112.
- [6] Aldal D A, Instanes G, Dahl T. Sand management by using ultrasonic systems at deep and ultra deepwater installations [C]. Middle East Oil Show, Bahrain, June 9-12, 2003.
- [7] Brown G K. External acoustic sensors and instruments for the detection of sand in oil and gas wells [C]. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 5-8, 1997.
- [8] Braaten N A, Blakset T J, Morton D. Experience from topside and subsea use of the erosion based sand monitoring system [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, October 22-25, 1995.
- [9] Skavang K, Braaten N A, Sirnes G, et al. Erosion-based sand sensor: Subsea system developed for the tordis field [C]. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 2-5, 1994.
- [10] 任闽燕, 赵益忠, 宋金波, 等. 油井含砂在线监测技术研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2012, 34(1): 141-146.
Ren Minyan, Zhao Yizhong, Song Jinbo, et al. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(1): 141-146.
- [11] MacKay S, Lovell J R, Patel D R, et al. Completion design for sandface monitoring of subsea wells [J]. SPE Drilling & Completion, 2010, 25(2): 193-198.
- [12] Haugen S, Hodgson S, Upchurch J, et al. Clamp on ultrasonic instruments in subsea applications [C]. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, US, May 1-4, 1995.
- [13] Braaten N A, Blakset T, Johnsen R, et al. Field experience with a subsea erosion based sand monitoring system [C]. European Production Operations Conference and Exhibition, Stavanger, Norway, April 16-17, 1996.
- [14] 刘刚, 贾宗文, 牟哲林, 等. 稠油出砂监测系统设计与实验室评价[J]. 石油机械, 2011(1): 1-4, 95.
Liu Gang, Jia Zongwen, Mou Zhelin, et al. China Petroleum Machinery, 2011(1): 1-4, 95.
- [15] 刘刚, 韩金良, 陈超, 等. 一种能有效监测稠油出砂信号的室内实验装置设计[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(30): 7868-7871.
Liu Gang, Han Jinliang, Chen Chao, et al. Science Technology and Engineering, 2012, 12(30): 7868-7871.
- [16] 黄诚惕. 希尔伯特-黄变换及其应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
Huang Chengti. Study on Hilbert-Huang transform and its application [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.

(责任编辑 刘志远)