

动态振动固井技术研究及现场试验

王恩合¹, 王学良¹, 王学成¹, 陈 杰¹, 王雪梅²

(1. 中国石油西部钻探工程有限公司钻井工程技术研究院, 新疆鄯善 838202; 2. 西南石油大学资源与环境学院, 四川成都 610500)

摘 要: 动态振动固井技术可以通过振动使水泥充分水化, 加快水与固相颗粒间的相对运动, 减小或消除水泥浆的静切力, 提高顶替效率, 补偿环空水泥浆在凝固过程的静液柱压力损失, 阻止地层流体窜入, 从而达到提高固井质量的目的。由于吐哈油田的雁木西区块经过多年注水开发, 地层压力系统变的越来越复杂, 形成了多套压力体系, 且层间压差大、隔层薄, 候凝过程中地层流体的扰动严重影响水泥浆正常凝固, 降低了目的层段水泥胶结质量, 导致固井合格率较低, 优质率则更低。为此, 在该区块的雁 6-66 井进行了动态振动固井技术试验, 结果表明, 与未应用动态固井技术的邻井相比, 固井质量有显著提高, 目的层段固井质量综合评价为优质。

关键词: 动态振动固井 固井质量 水泥浆 吐哈油田 雁 6-66 井

中图分类号: TE256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2011)04-0057-04

Research and Field Experiment of Dynamic Vibrating Cementing Technique

Wang Enhe¹, Wang Xueliang¹, Wang Xuecheng¹, Chen Jie¹, Wang Xuemei²

(1. Drilling Research Institute of Petroleum Engineering, Xibu Drilling Engineering Company Limited, CNPC, Shanshan, Xingjiang, 838202, China; 2. College of Resources and Environment, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China)

Abstract: The dynamic vibration cementing technique can make water hydrated, and the relative motion of solid-phase particles increased, reduce or eliminate the gel strength of cement slurry, raise the displace efficiency, compensate the loss of static fluid pressure in annular space, prevent formation fluid from channeling into annulus effectively, so as to get the aim of improving the cementing quality. Yanmuxi Zone in Tuha Oilfield formed many sets of pressure system, the formation pressure has been much more complex, and interlayer has higher differential pressure, adjoining layer is thin, the set of cementing slurry is interfered seriously by formation fluid in the course of waiting of cementing, the cementing quality has been affected at the target layer, led to lower cementing qualification rate, and the cementing perfection rate is much lower. This technique has been successfully applied in Well Y6-66 of Yanmuxi Zone. The result showed that compared with offset wells, cementing quality has been obviously improved, cementing quality in the target layers was evaluated as excellent quality.

Key words: dynamic vibration cementing; cementing quality; cement slurry; Tuha Oilfield; Well Yan6-66

注水开发的老油田, 为了提高开发效果和最终采收率而对油田进行加密, 钻调整钻井。由于长期的注水开采, 使地层压力变得非常复杂, 地层中含水量增多, 导致注水老油田新钻调整井的固井质量较差。注水区块调整井的固井质量已经成为制约老油田开发的瓶颈。为此, 中国石油西部钻探钻井工程研究院进行了适用于调整井固井的动态振动固井技术研究, 并在吐哈油田雁木西区块的雁 6-66 井进行了现场试验。

和水泥浆候凝过程中用机械振动、液压脉冲、水力冲击等手段产生振动波作用于套管、钻井液和水泥浆来改善固井质量的一项新技术。通过大量的试验研究发现, 振动可以有效改善水泥的均匀度和密实性, 提高黏性液体的流动性和水泥石的抗压强度, 可以缩短水泥浆稠化过渡时间, 并利于套管、水泥及井壁间的界面胶结, 有利于防止固井后窜槽^[1]。20 世纪 80 年代末期, 该技术得到迅速发展, 并在美国 and 苏

1 动态振动固井技术

1.1 动态振动固井技术主要机理

振动固井技术是在下套管、注水泥、顶替水泥浆

收稿日期: 2011-01-20; 改回日期: 2011-06-17。

作者简介: 王恩合(1979—), 男, 新疆哈密人, 2003 年毕业于西南石油学院应用化学专业, 工程师, 主要从事固井完井工程方面的研究工作。

联系方式: (0995)8374514, 28292862@qq.com。

联的一定范围内推广应用^[2-4]。20世纪90年代末期,我国辽河油田开始试验应用振动固井,使用的振动工具为水力脉冲式振动器,安装在套管脚部,在固井前的循环、注水泥、顶替钻井液过程中利用流体自身的能量来驱动转子,实现振动。

振动固井技术提高固井质量的机理很复杂,通过大量研究发现,振动固井技术主要通过以下几方面的影响和作用使固井质量得到了改善^[5-7]:

1) 振动使水泥充分水化,且使水泥浆密度均匀,有利于在油水井套管环空中形成坚硬而完整的水泥环。研究表明,通过振动水泥浆固化后的强度提高约20%^[7]。

2) 振动可以降低液体的黏度,有利于清除套管外壁的钻井液液膜和井壁上的浮滤饼,使顶替效率得到很大提高。

3) 振动可以加快水泥的水化,使水泥浆的稠化过渡时间缩短,易于早强,提高水泥浆的防窜性能。

4) 振动有助于破坏水泥浆颗粒间的粘结,加剧水与固相颗粒间的相对运动,减小或消除水泥浆的静切力,使环空水泥浆在凝固过程中由于体积收缩和静切力增大而造成的静液柱压力损失得以补偿,在水泥环第一、二界面形成较高的径向应力,提高两个界面的胶结强度,有效阻止地层流体窜入^[8-9]。

动态振动固井在常规振动固井技术的基础上进行了改进,动态振动是相对于传统固定位置条件下的振动而言的,是指振动器一边在套管中自上而下运动,一边在套管中振动,并在一定范围内传递振动波。固井施工过程中,在注水泥、顶替和候凝时,采用自发振动的激振器让振动波对套管、钻井液和水泥浆产生作用,提高固井质量。通过激振器在全井段中的运动,实现整个套管柱的阻尼共振响应,全面激活界面、钻井液和水泥浆,改善流体流动性,提高顶替效率、水泥石强度和界面胶结质量,防止活跃地层流体侵入环空,从而达到提高固井质量的目的。

1.2 套管柱的共振理论

1.2.1 简谐振动的表示方法

针对套管柱进行自由振动分析,通过数值模拟和数学公式确定套管柱的固有频率和振型,设计激振器的载荷谱,并通过室内试验验证载荷谱与套管柱的某几种固有频率是否重合,成为实现套管柱共振的基础条件。在一定的载荷谱和阻尼条件下,通过数值模拟的方法分析套管柱的振动响应,计算激振响应的范围和振动波在水泥浆中的传播衰减规律。

对于一个套管柱,振动量既是位置空间的函数,又是时间的函数。对于固定的测量点,则振动量只是时间的函数。简谐振动的三角函数表示式为:

$$x = X_m \sin \omega t \quad (1)$$

式中: x 为位移,mm; X_m 为振幅,mm; ω 为角速度,rad/s; t 为时间,s。

简谐振动的旋转矢量表示方式如图1所示。

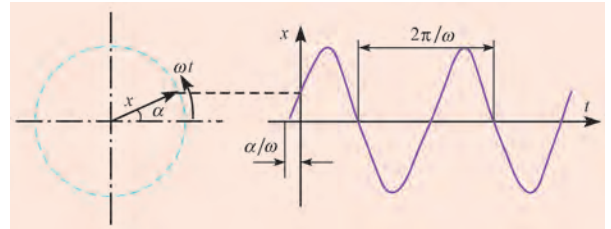


图1 简谐振动的旋转矢量表示方式

Fig. 1 Representation of simple harmonic motion of rotation vector

1.2.2 悬臂梁的振动特性

井眼内的套管柱可以简化为悬臂梁结构,如图2所示。其弯曲振动的运动方程为:

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + p(x, t) \quad (2)$$

式中: EI 为悬臂链的抗弯刚度; ρ 为材料密度; $p(x, t)$ 为外部载荷。

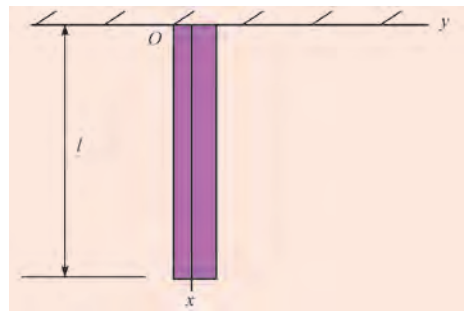


图2 井眼内套管柱的悬臂梁结构

Fig. 2 Cantilever structure of casing program

悬臂梁的边界条件为:

$$\begin{cases} X(0) = 0 \\ X''(l) = X'''(l) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

根据式(2)和式(3)可以求得悬臂梁第*i*阶的固有频率和振型函数分别为:

$$f_i = \beta_i^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho}} \quad (i \geq 3) \quad (4)$$

$$X(x) = \operatorname{ch} \beta_i x - \cos \beta_i x + \zeta_i (\operatorname{sh} \beta_i x - \sin \beta_i x) \quad (5)$$

当然,除了套管柱悬臂梁结构的弯曲振动,还存

在轴向振动和扭转振动,因此套管柱的固有频率还要包括:

$$\begin{cases} f_{zi} = \sqrt{\frac{EA}{\rho l}} \\ f_{ni} = \sqrt{\frac{GI_p}{Jl}} \end{cases} \quad (6)$$

在以上理论的基础上,根据具体的套管柱,就可以方便地计算出悬臂梁结构的固有频率分布特征。

分析计算套管柱的固有频率,对于激振器的共振设计是必要的准备。如果载荷频率与套管柱固有频率相重合或是其倍频,则套管柱会出现共振现象。合理利用套管柱自身的共振特征,是在狭小空间中发挥较大作用的基础。

1.2.3 激振器的设计

激振器的设计原则有 3 点:第一是需要狭小空间里设计足够的激振载荷,保证套管柱在振源附近能够响应振动;第二是需要建造套管柱共振的频谱段,使套管柱的响应能够放大;第三是需要控制共振频率不要过高,因为阻尼条件下的高频振动衰减得很快。

激振器除了提供振动能量外,还要具有水泥胶塞的功能。由于激振器橡胶裙边的振动位移约为 1.42 mm,因此设计橡胶裙边最大外径的公差上移 +1.42 mm,就能够起到胶塞的密封作用,其外形结构设计如图 3 所示。激振器内有电机、电源、偏心轮和控制电路。激振器除具有振动的基本功能外,还具有碰压自锁功能,防止碰压后水泥浆回流。

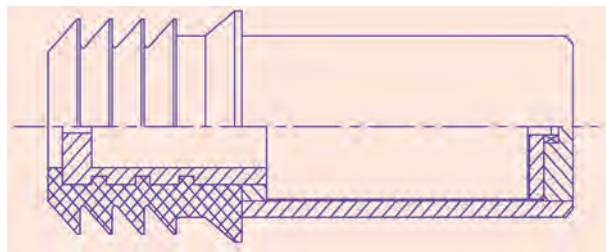


图 3 激振胶塞的基本结构

Fig. 3 Overall structure of vibrating cementing plug

1.3 动态振动固井施工工艺

因激振器与固井胶塞是一体的,所以,动态振动固井施工工艺与常规固井工艺兼容性较强,不需增加和改造现有的设备及工艺即可实现。激振器的状态通过无线电遥控,固井施工之前按照施工工艺流程提前设置振动程序,现场施工较为方便。施工工艺流程为:第一步,将激振器(固井胶塞)安装在固井

水泥头中,通过无线遥控器设置激振过程,准备固井施工;第二步,按照正常固井施工流程,试压,注前置液和水泥,激振器按照预置程序开始振动,在井口检测振动状态;第三步,压胶塞,激振器谐振替浆下行,自上而下振动套管串,激活套管、水泥及井壁的界面,下行至浮箍处小排量碰压自锁激振,检测回流,候凝过程中自动调整振频,实现阻尼共振,水泥凝固前关闭激振器,施工结束。

2 试验现场

2.1 雁 6-66 井概况

雁 6-66 井是吐哈盆地雁木西雁 6 区块的一口调整采油井,设计井深 1 675 m,完钻井深 1 680 m,主要目的层位是第三系的鄯善群,主要目的是完善第三系注采井网,改善区块开发效果。该井钻遇的桃树园上部地层和鄯善群下部地层中含有盐膏层,易垮塌。该井周围 300 m 内注采井多,为保证钻井安全,在开钻前周围雁 6-26 井等注水井停注。雁 6-26 井距该井 162 m,正常注水压力 21 MPa,停注后井口压力维持在 10.5 MPa。设计钻进生产层时的钻井液密度为 1.30~1.40 kg/L,为防止井涌、溢流和井漏等井下故障的发生,钻进过程中根据实际情况将钻井液密度调整为 1.60 kg/L。

2.2 雁 6-66 井固井难点

1) 雁木西区块地层压力系统复杂、隔层薄(厚度最小至 1 m),层间压力高,在水泥浆凝固过程中地层流体活跃,周围注水井压力未降至规定范围内,固井候凝过程中,如果不能压稳水层,将会发生水窜。另外,由于在水泥浆凝固过程中会出现“失重”现象,导致环空液柱压力下降,活跃地层流体在层间的移动会扰动水泥浆,严重影响目的层环形空间水泥浆正常凝固,降低目的层段水泥胶结质量,造成层间窜。

2) 桃树园上部地层和鄯善群下部地层中含有盐膏层,地层水矿化度一般为 100~200 g/L。钻井过程中一直伴随着井壁的垮塌、掉块,盐膏层溶解污染钻井液严重,高矿化度的钻井液又容易污染水泥浆,使水泥浆流动性变差,增大水泥浆流动阻力,导致固井时泵压异常,还容易造成环空堵塞,固井施工风险大。

3) 由于钻井过程中井壁垮塌掉块及盐膏层溶解,使该井形成了“糖葫芦”形不规则井眼,目的层段井径扩大率大,套管居中困难;盐膏层溶解及水侵入

染钻井液,使钻井液流动性变差,黏切和密度升高,造成虚泥饼增厚,循环压耗升高,顶替效率降低,严重影响固井质量。

2.3 施工概况

施工过程为:1)套管及其附件按设计和作业指令下至预定位置后,确认水泥头与固井管线和替浆管线等的连接符合施工要求;2)套管下到底后,先灌满钻井液,再接循环接头,先采用小排量顶通,然后逐步增大泵的排量至正常钻进排量,调整泵的参数,使循环排量达到 32 L/min,并连续循环两周;3)调整钻井液性能,降低黏切,黏度降至 50~60 s,停泵,接水泥头,注入密度为 1.80 kg/L 的重浆 15 m³,再注入井浆 10 m³。接好管线、水泥头做好施工准备工作后,压入振动胶塞,遥控设置振动胶塞状态,并上紧水泥头盖子;4)冲洗管线,通过排污管线出口观察管线冲洗情况,并按设计要求试压,以 1.0 m³/min 的排量注入前置液 4.0 m³;5)以 1.0 m³/min 的排量注入常规水泥浆 20.0 m³,领浆密度控制在 1.70~1.80 kg/L,主浆密度控制在 1.88~1.92 kg/L,激振器开始振动并检测其振动状态;6)打开胶塞挡销,注入压塞液 2.0 m³,以 2.0 m³/min 的排量替清水 15.0 m³,然后以 0.5 m³/min 的排量替浆 2.9 m³,求碰压,碰压压力控制在 20 MPa,时间 17.0 min;7)稳压 5.0 min,判断浮箍浮鞋密封良好;8)拆卸水泥头与固井替浆管线,关封井器,环空憋压 2 MPa,候凝 24 h 后检查固井水泥胶结质量。

该井注水泥浆 20 min 开始振动,替浆过程中振动胶塞自上而下振动,激发套管高频振动,碰压后继续振动 17 min 自动停止。激振器的安装、振动控制都在设计范围内,整个固井过程连续,泵压正常。

2.4 应用效果分析

候凝 24 h 后,CBL/VDL 测井显示,该井固井质量合格率 100%,水泥实际返高 923 m,优质封固井段占 66.8%,油层、水层隔离效果良好,综合评价固井质量为优质。

与未应用动态固井技术的邻井相比,雁 6-66 井固井质量显著提高,从后期开发情况看,未出现管外窜现象,证明动态振动固井技术可以提高固井质量。

3 结论与建议

1) 动态振动固井技术不改变现有的固井设备

和固井工艺,操作简单,是提高固井质量的一种有效技术手段。

2) 振动固井可以有效改善水泥浆性能,加快水泥水化进程,提高水泥石的抗压强度,在早期即可形成高质量的水泥环,有效防止早期油、气、水窜的发生。另外,振动处理后的水泥石更加致密,有利于提高水泥石封固油气水的能力。

3) 应进一步提高振动固井谐振器的密封性、耐压和耐温性能,以满足不同井眼固井需求。

参考文献

- [1] 练章华,李文魁,陈小榆.顶部水泥脉冲振动的数学模型[J].石油学报,2001,22(1):83-88.
Lian Zhanghua, Li Wenkui, Chen Xiaoyu. The mathematical models of top cement pulsation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(1): 83-88.
- [2] Haberman J P, Delestati M, Brace D G. Method and apparatus to improve the displacement of drilling fluid by cement slurries during primary and remedial cementing operations, to improve cement bond logs and to reduce or eliminate gas migration problems; US, 5377753[P]. 1995-01-04.
- [3] Haberman J P, Wolhart S L. Reciprocating cement slurries after placement by applying pressure pulses in the annulus[R]. SPE/IADC 37619, 1997.
- [4] Wojtanowicz A K, Manowski W. Pressure pulsation of cement for improved well integrity-field method and theoretical model: proceedings of the 10th Scientific & Technical Conference, New Methods and Technologies in Petroleum Geology, Drilling and Reservoir Engineering, Poland, Krakow, June 24-25, 1999[C].
- [5] 李玉海,赵立新,王军荣.振动固井技术综述[J].石油钻采工艺,1994,16(6):40-42,50.
Li Yuhai, Zhao Lixin, Wang Junrong. Vibration cementing technique[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1994, 16(6): 40-42, 50.
- [6] 韩玉安,孙艳龙,王洪潮,等.国内外振动固井技术的发展现状[J].钻采工艺,2000,23(4):27-30.
Han Yu'an, Sun Yanlong, Wang Hongchao, et al. Developing status quo of vibration cementing technique both in China and abroad[J]. Drilling & Production Technology, 2000, 23(4): 27-30.
- [7] 丁士东,高德利,王崎,等.脉冲振动处理对水泥石早期性能的影响[J].钻采工艺,2007,30(6):105-107.
Ding Shidong, Gao Deli, Wang Qi, et al. Influence of pulsating treatment on early properties of cementstone[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(6): 105-107.
- [8] Newman K, Wojtanowicz A, Brain C G. Cement pulsation improves gas well cementing[J]. World Oil, 2001, 222(7): 89-92.
- [9] Smith J R, Martin J N. Field evaluation of pre-job test protocol for cement pulsation "Waxy" MixturesTM; Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, June 11-13, 2002[C].