

Discussion on low-density cement slurry cementing technology

Tianxi Zou Hongpu Gong Yaguang Wu Baoqin Chen Hongwei Wang

China National Petroleum Group Bohai Drilling No. 1 Cementing Branch, Renqiu, Hebei, 062000, China

Abstract

In the context of the rapid economic and social development of our country, the complexity and depth of geological conditions faced by oil extraction projects are increasing, which puts forward higher requirements for cementing technology. Low-density cement slurry cementing has been increasingly used as a technology that integrates the advantages of cost and cementing quality, and storage protection. Based on this, this paper first elaborates on low-density cement slurry based on relevant research and practice, and then discusses the application points of this technology, including material selection, thickening time management, pressure monitoring, water loss ratio control and annulus mud replacement for reference.

Keywords

oil extraction; low-density cement slurry; cementing technology; Apply; investigate

低密度水泥浆固井技术的探讨

邹天喜 巩红甫 吴亚光 陈宝钦 王宏伟

中国石油集团渤海钻探第一固井分公司, 中国·河北任丘 062000

摘要

在我国经济社会迅猛发展背景下, 石油开采工程所面临地质条件复杂性以及深度不断加大, 这就给固井技术提出了更高的要求。而低密度水泥浆固井作为一项集成本优势、固井质量以及储存保护众多优点的技术得到了日益广泛地应用。基于此, 本文结合相关研究及实践先就低密度水泥浆进行阐述, 随后针对该项技术探讨其包括物料选择、稠化时间管理、压力监控、失水比控制以及环空泥浆置换等几方面应用要点, 以供参考。

关键词

石油开采; 低密度水泥浆; 固井技术; 应用; 探讨

1 引言

低密度水泥浆固井技术中的固井是指通过套管, 将水泥浆注入井下, 至井底后, 沿着套管和底层间的环空上返。经过一段时间固化, 泥浆逐步形成水泥环。开展该技术的主要目的是固定井内套管, 利用水泥加固套管之外的环形空间, 避免井壁出现窜通现象。研究低密度水泥浆固井技术, 有利于提高相关项目的技术质量, 提高水泥加固效果。

2 低密度水泥浆概述

石油开采中, 低密度水泥浆是指密度小于普通 Portland 水泥浆 200kg/m³ 的固井浆液, 其密度介于 1.60-1.85g/cm³ 之间。由于能降低环空静压, 防止对地层裂缝的激活而被广泛应用到高渗透带、裂缝敏感层和煤层气层等复杂地层等项目固井施工中。其特征是采用比重小的掺合料(如膨润土、膨胀珍珠岩、发泡剂、中空微珠)加入缓凝剂、流变调节剂等,

使低密度水泥浆具有足够的凝结强度, 并通过稠化时间和失水率的严格控制来保证泵送时的稳定性。同时再通过严格控制浆液滤失和加重剂的比例, 避免因其他原因造成的井壁破裂^[1]。

3 低密度水泥浆固井技术应用

3.1 配制体系优化与现场校正措施

在我国西部油气田地层普遍表现出高温低压或地层破裂压力梯度低的复杂环境下, 低密度水泥浆固井技术的应用需从配制体系优化与现场校正两方面同步推进以满足井下安全与固井质量双重要求。首先, 配制体系中需选用膨润土-轻质骨料复合体系以实现目标密度控制, 其中膨润土质量分数控制在 3.5%-5.0%, 轻质材料优选空心微珠(密度 0.4-0.6 g/cm³)并按质量比 25%:35% 添加, 通过高速剪切分散设备控制剪切速率在 5000-7000 rpm, 并保持连续剪切时间不低于 15 min, 确保浆液体系分散性与均匀性; 其次, 出于提高体系抗高温能力及控制稠化行为, 在其中加入 0.4~0.6% 的缓凝剂(二乙醇胺)、有机硅交联剂复合调控稠化曲线形, 在此条件下浆体于 150℃时应具有 90~120min

【作者简介】邹天喜(1972-), 男, 中国河南信阳人, 高级技师, 从事固井专业施工研究。

的初凝时间。随后将完成的实验室配方在现场进行液体密度和流变性能微调,使用静态、动态密度计对浆液密度变化区间持续测量,并根据地层压力剖面对比试验地层的压力情况,通过地面密度调整来保持井底压力和地层孔隙压力差值在安全窗口之内(一般宜小于0.2~0.4MPa)^[2]。此外,为提高泡沫浆稳定性,可控制发泡剂质量分数为0.7%~1.2%,并且配合使用泡沫稳定剂(如十二烷基硫酸钠)来使泡径分布均匀,有利于浆液在流动过程中的结构完整性。现场取样按每5min测一次密度、流变参数及初凝时间,按API标准流变仪控制浆液在25~35Pa·s范围内流动,以满足浆液输送的稳定性及井下顶替效果。最后,浆体注入前通过井口温控设备测量入井温度并结合井深温度剖面进行校正,从而实现对实验室稠化时间误差予以修正。

3.2 稠化时间实时控制与施工泵送方案

在低密度水泥浆固井施工中,为适应中国油田高地温和裂缝发育地层的井况,需构建以稠化时间实时调控为核心的施工泵送方案。配浆阶段应依据井深预测地层温度剖面与静态压力分布,制定缓凝剂优化配比,采用多组分缓凝体系并进行梯度升温试验,获取高温条件下稠化时间—温度响应曲线,并根据井下温度实际剖面修正曲线阈值,形成可指导现场施工的配方模型。泵送实施前,设置高灵敏度热电偶与井筒壁温监测探头,结合地层热传导模型对井下实时温度场进行动态拟合,以实时校准稠化窗口变化。正式泵注阶段采取双阶段注入模式,前置短段低密度浆液作为稠化响应探测段,结合高频压力回放系统监测其黏度增长趋势与泵压波动,判断反应启动点后立即切换全井段泵注。同时在环空密封的密度层次需求上,配置轻质浆与加重浆双系统,先以低密度段封隔上部环空,随后无停顿切换至加重浆段实施下部致密充填,并注意保持该过程中密度转换处泵压稳定防止出现界面紊乱。为实时监测稠化过程中的异常变化,在泵送主段过程中同步布设井口与井下电子压力传感器,结合井底温度探头形成联动监测系统,实时记录浆体受温固化进程与泵压响应曲线,一旦发现压力突变、返浆速率异常或温度曲线偏移,立即暂停泵送操作,快速调整缓凝剂投加比例或浆体密度至修正区间。全流程中需严格控制浆体流动时间与环空置换效率,确保稠化时间窗口内完成井筒空间完整充填与有效封隔,提升固井质量与地层适应性。

3.3 环空泥浆置换与浆帽建设技术

受石油井况复杂影响,在低密度水泥浆固井时必须做好环空泥浆的高效置换和稳定的浆帽构建以保证固井质量。鉴于井筒下方很容易造成地层不稳定,所以在钻进作业的时候,应先用高密度预封浆进行前置泵注,这样能对环空泥浆和初始封隔界面起到稳定作用,同时抑制环空泥浆扰动与界面紊流。接下来就是低密度水泥浆泵注,该环节流速要严格控制,具体根据井筒的结构以及井下的温度和压力环境作为基础来进行分析计算确定一个速度梯度曲线,以保证流速不

会导致环空中残留泥浆或者是剪切混合。同时借助于橡胶管柱塞辅助体系引浆液转化界面,以使浆液两个部分之间的流动状态与边界清晰、浆帽界面的剪切扰动降至最低,从而增强浆帽外形完整度和稳定性。在增加环空的悬浮刚性和抗沉降能力上需要注入质量分数可调的抗沉降剂-缓凝剂复配体系,同时借助于密度差来确定浆帽的最优高度区间,从而让浆帽在井下具有良好的静态固化过程。在泵送末端,通过设置井口并配备高精度的在线密度监测装置读取循环出砂的密度曲线信息,将低密度浆液返出时所对应的位置精确识别出来,以判别置换的完成情况。在泵送末端停止后,在水泥初凝前利用井口静压法和微压干扰检测法进行检测,并根据实测的压力响应变化曲线,得到浆帽胶凝高度以及封隔的完善程度。此外,若石油开采时面对地层渗透性差异大或存在双产层、断裂带分布的复杂井筒,应采取分层分点注入联合可控偏心管汇系统开展多段位变速注浆,在达到分区精准置换及浆帽多点构建同时避免水泥浆窜槽与层间互溶。

3.4 失水比控制与过滤特性管理

在我国石油复杂地层条件下开展低密度水泥浆固井作业时,针对高渗透性层段失水特性控制应基于滤失调控剂体系的定向优化,优先采用羟丙基瓜尔胶与聚阴离子纤维素(PAC)复配体系,通过调节高分子分散度及粒径分布,实现滤失量控制在API标准15mL以内,同时确保浆液流变性能匹配井段排布结构;实验阶段利用中压滤失仪进行动态滤失曲线模拟,构建时间—滤失体积标准曲线并结合井段渗透率模型进行参数修正,校核滤失变化在稠化临界前后时段内的敏感节点;施工过程中部署在线失水监测单元,实时记录浆液循环过程中的滤失率与泵压变化趋势,结合随钻地层压力资料进行数据拟合,识别突发滤失异常位置;当监测数据表明滤失率突破设定上限,采用提高膨润土分散稳定度与增配钠型膨润土比例措施,在不影响静水压梯度前提下提升滤失屏障效果;对于裂缝发育或微裂隙强渗段,在后置浆中掺加短切聚丙烯纤维或微膨胀型有机封堵颗粒,借助流固耦合渗透机制填充微裂缝通道并构建滤饼结构层;特殊井段则使用渐变式滤失调控工艺,前段水泥浆密度设计为10.5~11.0lb/gal范围内,滤失控制剂比例维持高水平,至后段根据井眼倾角与井筒返排特性适度降低封堵剂掺量,以平衡滤失控制与返排效率;现场以动态滤失杯进行浆液滤失效果快速验证,确保浆液体系滤失性能与井下地层渗透性高度匹配,避免环空压降诱发井壁坍塌或环空循环阻断现象的发生^[3]。

3.5 静压与环空压力监测与校核

低密度水泥浆固井技术应用中实时监测、校核静压与环空压力是非常重要的环节。首先,在施工前要依据地层测井资料和控压钻井参数进行多个层段的静压分布建模,然后根据预计循环压力以及回压计算出设计泵压、尾压和地层破裂压力的安全裕度,最后通过水泥浆密度和排量的控制程序

来进行相应的优化。其次,在泵送时要在套管外环空安装2个或更多的石英压阻式压力传感器,布置位置分别为产层顶界、弱层及井眼扩大部分,当浆液前沿进入到不同的层段时就会实时记录环空的压力变化值以及与理论静压梯度之间的差距,如果在某一部位发现存在局部超压现象,就立刻要调节泵速、稠化时间和转用低密度掺气浆液体系,以实现压力回控^[4]。为应对非预期压增,应在地层弱点段设计泄压孔道或配置机械式放压阀,设定最大压力门限值,当触发阀门动作后,通过环空泄压实现井壁保护。固井结束后,应持续开展静态压力降监测,利用压力数据的自然回落速率与稳定性分析胶结体体积稳定性及顶替效率是否达到设计预期,并识别潜在微环隙发育迹象。随后封闭管柱进行24小时以上静压保压测试,校验封隔器密封性与返排通道完整性;测试期间要求每10分钟采集一次压力数据,并分析其稳定性曲线。施工全部结束后,应使用井下程控压力记录仪获取连续压力数据曲线,结合施工时采集的泵压、排量、密度等参数,重新回代至地层压力模型,开展多参数校核计算,确认施工全过程中环空压力始终处于安全控制窗口内,从而验证低密度水泥浆体系设计与操作参数的匹配性与合理性。

3.6 温度梯度适应与胶结质量提升措施

受油气井固井所面临地层温度梯度达80~120℃/km等恶劣高温环境影响,低密度水泥浆易出现的早期稠化和胶结失效情况下,需要通过综合的手段来提高其温度适应性和胶结质量的稳定性。首先,在实验室环境下需要根据目标井段的地层温度剖面,采用相应的热梯度控制高温高压稠化试验系统,在稠化曲线上应用线性升温控温装置模拟井深热环境,对稠化曲线进行温度修正,保证实验数据与井下实际情况一致。其次,现场施工中在井口处加装套管加热器给水泥浆的输送进行预热补偿、或向浆液内加入相变储热材料(例如:聚乙烯醇复合材料)来迟缓浆体温升速率,防止因过早稠化造成的膨胀破坏。另外,在低密度水泥浆的配制中采用具有较高热稳定性的环氧改性硅酸盐类复合掺合料,借助其在高温环境内能够生成空间网状结构而提高胶体间的结合

强度、抑制游离水的析出以及有利于界面密实性的改善^[5]。除此之外,在对水泥浆拌合后的高温段泵送过程中也需要及时根据温度参数的变化来调节缓凝剂(例如:磷酸酯类、有机羧酸盐类)的添加量,同时利用PLC自动加药装置以使加药量比例得到准确地控制,以免由于浓度过大而导致水泥石强度下降。最后,在井下设置热电偶阵列开展多点温度实时监测,并根据稠化时间预测模型调整泵送节奏以及浆液流变性。同时低密度水泥浆入井静置环节须确保套管内压稳定,以防止由于热膨胀诱发微裂缝形成影响胶结界面连续性。

4 结语

本文针对我国石油开采工程中低密度水泥浆固井技术,结合陆上与海上油田的真实井况,选取配制体系、稠化控制、环空置换、失水管理、压力监测与高温适应六项关键技术进行系统探讨。每项技术均依据专业施工实践提供详细操作流程,力求步骤清晰、逻辑严谨。通过上述技术的严格实施,能够在保障环空压力可控、胶结质量稳定以及施工安全的前提下,提升固井工程整体可靠性。本文所述方法可供国内石油工程技术人员在类似复杂地层与精细施工条件下参考应用。

参考文献

- [1] 杨威,刘仕康,薛雷.渤海浅层大位移井固井水泥浆技术[J].石油化工应用,2023,42(12):37-41.
- [2] 马力平.浅析低摩阻耐压防漏低密度水泥浆固井技术[J].石化技术,2025(5).
- [3] 尹剑宇.低失水低密度水泥浆体系的研究与性能评价[D].东北石油大学,2021.
- [4] 秦江,宋凯,文华,等.纳米低密度水泥浆体系在页岩油水平井固井中的应用[J].长江大学学报(自然版)理工卷,2021(002):018.
- [5] 卢海川,王琼,郭秋实,赵烁森,安少辉,高继超.国内外固井低密度水泥浆体系研究综述[J].精细石油化工进展,2020,21(4):5.