

◀ 固井与泥浆 ▶

# 固井优化设计与施工监测

刘瑞文 宋洵成 邹德永

(中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 东营 257061)

**摘 要:** 合理的固井设计是保证固井质量的关键, 通过对设计方案的模拟分析, 可以确定固井施工过程中的环空动态压力、泵压和流量的变化情况, 了解顶替过程中各浆体通过关注层位的流态和接触时间等重要参数, 及时发现设计中可能存在的问题, 并对设计进行优化和完善。在优化设计的基础上, 通过固井实时检测系统, 可以监控固井的注替过程, 对可能发生的复杂情况进行监测和提示, 以保证固井质量和施工作业的安全。在理论分析的基础上, 结合 UPC-CDM 固井优化设计和监测系统, 对固井优化设计方法和实时监测系统的结构进行了介绍。

**关键词:** 固井质量; 监测系统; 数据分析; 优化设计

**中图分类号:** TE256<sup>+</sup>.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890 (2007) 01-0035-03

固井质量的优劣不仅影响到钻井过程的进行, 而且关系到油气井的安全生产和寿命。深井、超深井及高温、高压油气井等复杂地层条件下的固井作业, 由于封固井段长, 地层条件复杂并可能存在多套地层压力层系, 容易发生井下复杂情况<sup>[1-4]</sup>: 1) 下套管时容易压裂地层, 造成井漏; 2) 环空浆柱压力大, 采取高速顶替容易造成地层破裂和水泥浆的漏失, 影响了固井质量并对油气层造成污染; 3) 顶替过程中易产生较高泵压, 甚至出现憋泵现象; 4) 浆体性能和施工参数不合理会造成顶替效率低, 且易发生窜槽。

为保证深井和高压油气井的固井质量, 应根据待固井的地质、工程条件对环空浆柱结构和性能进行设计, 并对设计方案进行模拟分析, 根据模拟分析结果进一步优化设计方案。同时, 对注替过程进行监测, 以预防井下复杂情况和固井质量问题的发生<sup>[3]</sup>。

参数优选和模拟分析过程计算模式复杂, 为此, 国内外在不断研制开发相应的固井软件, 如 Schlumberger 公司的 CemCADE、Halliburton 公司的 CJOBSIM、Land Mark 与 Halliburton 联合开发的 Cementing-OptiCem 固井软件等<sup>[1,4]</sup>。

## 1 UPC-CDM 系统简介

笔者在参阅和借鉴国内外固井软件优点的基础上, 开发了 UPC-CDM 固井优化设计和监测系统, 其主要功能有: 固井优化设计、环空压力分析、防气窜性能分析、下套管和注水泥过程施工模拟、复杂工况参数计算、材料用量计算、固井施工监测、固井资

料查询分析和报告输出等, 结构如图 1 所示。

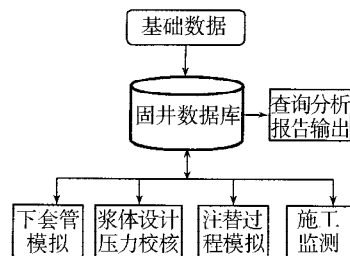


图 1 UPC-CDS 系统结构

## 2 环空浆柱结构设计

环空浆柱结构设计是固井设计的重要内容之一, 对固井质量的优劣起着至关重要的作用<sup>[2]</sup>。其主要内容是对前置液和水泥浆体系进行段长、密度和性能参数的设计, 并完成环空压力平衡校核和防气窜性能的分析, 确保不压漏地层和有效控制气窜。

为了方便现场应用, 在固井设计软件中, 对水泥浆体系, 在给定设计段长后, 系统根据井身结构和管柱结构自动计算出所需水泥浆的体积; 对前置液体系, 给定注入量后, 将自动确定其在环空中的段长和顶、底部位置, 并根据环空浆柱结构和水泥浆性能参

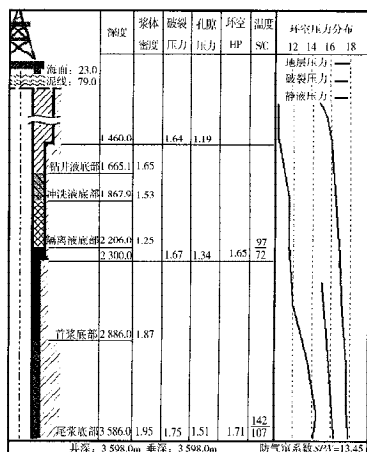
收稿日期: 2006-06-04; 改回日期: 2006-09-28

基金项目: 中国海洋石油总公司“十五”科技攻关项目“高温超压地层固井复杂情况处理技术研究(编号:1506-02-04)”部分内容

作者简介: 刘瑞文 (1961—), 男, 山东鄄城人, 1984 年毕业于华东石油学院钻井工程专业, 2002 年获石油大学油气井工程专业博士学位, 副教授。

联系电话: (0546) 8396897

数给出环空压力平衡校核结果、内外压差和水泥浆体系的防气窜性能(如图2示)。当环空压力小于孔隙压力或大于破裂压力时,系统给出提示,此时,需要对前置液的注入量或水泥浆参数进行调整。



2 环空浆柱结构设计及压力校核

水泥浆在水化凝固过程中会出现失重现象,对产层的作用压力降低,可能造成产层气体的上窜。因此必须对水泥浆体系的防气窜性能进行评价,通过调节水泥浆的性能或改变体系结构达到防气窜的目的。系统中采用了 Halliburton 提出的气窜潜力系数法和目前常用的 SPN 值法<sup>[5]</sup>来评价水泥浆的防气窜性能。

### 3 固井施工模拟分析

根据待固井的地质和工程条件,模拟分析下套管过程中的波动压力、注水泥过程中的泵压、环空动压力、顶替流态及接触时间等,动态显示整个固井施工过程中各种参数的变化规律,分析和发现可能存在的设计问题。设计人员可根据模拟结果对设计方案进行优化,以保证固井作业安全和固井质量。模拟结果可使施工人员对整个注替过程中的泵压及出口流量的变化情况有所了解,以便在实际施工时对井下情况做出正确的判断。其主要功能包括:

- 1) 根据井眼条件和钻井液性能,模拟分析下套管过程中井下压力的变化,推荐合理的下套管速度,以预防井漏;
- 2) 计算注替过程中套管内可能出现的最大真空段长度;
- 3) 计算注替过程中环空动态压力、泵压和流量的变化情况,了解顶替过程中各浆体通过关注层位的流态、接触时间等重要参数,并对可能发生的复杂情况和固井质量问题进行报警。

#### 3.1 模拟方法

固井施工模拟的基本模型为环空动压力平衡的 U

形管模型。在注水泥过程中,套管或环空内有多种性能的浆体(钻井液、冲洗液、隔离液、领浆、尾浆等)存在,且每种浆体的高度及其对应的流道参数随时间不断发生变化。因此,静液柱压力和流动阻力也在不断变化,某一时刻,压力平衡模型为:

$$p_s + \sum_{i=1}^m (9.81 \times 10^{-3} \rho_i H_i - p_{li}) = \sum_{k=1}^n (9.81 \times 10^{-3} \rho_{ak} H_{ak} + p_{lak}) \quad (1)$$

式中,  $p_s$  为泵压, MPa;  $\rho_i$ 、 $\rho_{ak}$  分别为管内第  $i$  种和环空第  $k$  种浆体的密度, kg/L;  $H_i$ 、 $H_{ak}$  分别为管内第  $i$  种和环空第  $k$  种浆体的垂高, m;  $p_{li}$ 、 $p_{lak}$  分别为管内第  $i$  种和环空第  $k$  种浆体的流动阻力, MPa;  $m$ 、 $n$  分别为某时刻管内和环空的浆体种类数。

当管内外流体的静液柱压力之差大于流动阻力时,就会产生“U形管效应”。此时出口流量  $Q_{out}$  (井内实际流量) 不等于泵入排量  $Q_{in}$ , 从而在管内上部形成真空段。当真空段存在时,地面压力  $p_s = 0$ 。根据压力平衡模型,采用迭代方法可以确定某时刻的出口流量  $Q_{out}$ , 在  $\Delta t$  时间所形成的真空体积为:

$$\Delta V_c = (Q_{out} - Q_{in}) \Delta t \quad (2)$$

在注替过程中,真空段体积是由小到大,然后又逐渐消失的过程,因此,在某时刻的真空体积为:

$$V_c = \sum_{i=1}^n \Delta V_c = \sum_{i=1}^n (Q_{out} - Q_{in}) \Delta t_i \quad (3)$$

当出口流量和真空体积确定后,即可求出各种浆体流过关注点深度处的流态、接触时间以及真空段长度、关注层位的动态压力随时间的变化等参数。

#### 3.2 模拟结果

根据井眼条件、浆体性能参数和施工排量计划,得到的模拟结果如图3~5所示。根据模拟结果可以对浆柱设计和施工计划的可行性进行分析。

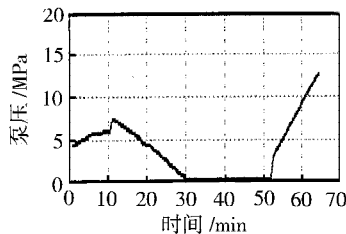


图3 泵压变化模拟结果

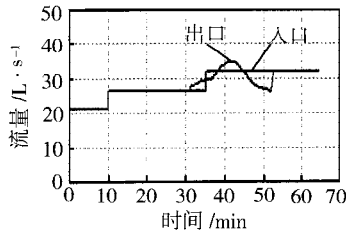


图4 流量变化模拟结果

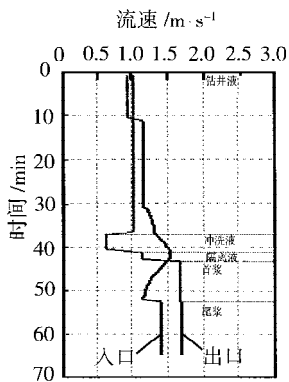


图 5 层位浆体流态

## 4 施工监测

在固井作业中，由于各种原因，时常出现水泥浆顶替不到位、替空或顶替过程中压漏地层等情况，从而造成管内水泥塞过长、管外无水泥封固或水泥返高达不到设计要求。为此，开发研制了固井实时监测系统，该系统可实时监测流量、浆体密度、注入量和入口压力，为固井的注替全过程提供监控手段，对可能发生的复杂情况进行监测和提示。

固井监测系统的结构如图 6 所示。考虑到现场需要和成本因素选用了高压电磁流量计和低压密度检测仪。方便了现场的应用，制做了集 USB-7822 多功能数据采集卡、信号处理器、传感器供电电源于一体的接口箱，接口箱外部采用快速航空接头，防水、防爆，连接方便。

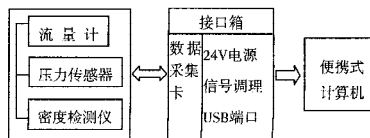


图 6 固井监测系统结构

根据实时采集参数，软件系统可模拟显示井下注替的动态过程，对各种浆体的液面位置、环空动压力

变化、顶替流态及紊流接触时间等参数进行动态显示，施工人员可根据现场情况及时调整施工方案，以保证固井作业安全和固井质量。该系统在某油田进行了 3 口井的试验，平均监测误差小于 1%。图 6 为某井替浆时的监测结果，由图 6 中的压力曲线可知，该井在顶替过程中碰压前发生了井漏。根据压力的下降大小和时间间隔可以定性地判断漏失量的大小，以便采取相应措施。

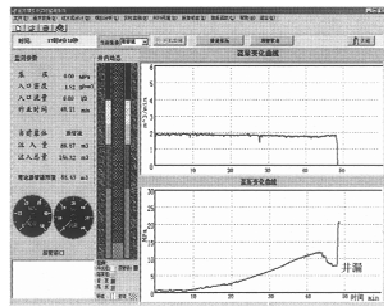


图 7 固井监测界面

## 5 结 论

1) 严格的固井设计是保证固井质量的关键，对长封固井段和复杂地质条件下的固井作业，施工前应进行优化设计和模拟分析。

2) 固井监测系统为提高固井质量，预防出现井下复杂情况提供了监测手段。

### 参 考 文 献

- [1] 王保记. 平衡压力固井优化设计与实时监测技术 [M]. 北京：石油工业出版社，1999.
- [2] 王保记, 陈元顿. 注水泥动态过程的计算机模拟 [J]. 石油学报, 1994, 15 (1): 128-134.
- [3] 夏宏南, 陶谦, 杨明合. 准噶尔盆地深井长封固段固井技术研究 [J]. 西部探矿工程, 2005, 17 (4): 63-65.
- [4] 刘崇建, 黄柏宗, 徐同台, 等. 油气井注水泥理论与应用 [M]. 北京：石油工业出版社，2001.
- [5] 周仕明, 丁士东, 曲中启. 利用修正 SPN 值预测环空气窜 [J]. 石油钻探技术, 2001, 29 (5): 31-32.

[审稿 毛克伟]

## Cementing Work Optimization and Implementation Monitoring

Liu Ruiwen Song Xuncheng Zou Deyong

(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Dongying, Shangdong, 257061, China)

**Abstract:** Reasonable cementing design plays an important role in cementing quality control. Through analyzing the design, annular dynamic pressure, pump pressure, and flow rates during cementing process can be determined; the important parameters such as flow type and contact time, etc. can be estimated; the potential problems can be identified on time and the design can be optimized and improved. Based on the optimized design, through real-time monitoring system, the cementing process can be monitored. The complicated situations possibly happened can be monitored and alarmed to assure the cementing quality and implementation safety. The method of cementing optimization design and ministering system are introduced based on theoretical analysis and UPC and CDM cementing optimization design and ministering system.

**Key words:** cementing quality; monitoring system; data analysis; optimizing design