

# 泡沫水泥固井施工参数优化设计

朱礼平<sup>1</sup> 杨 雄<sup>2</sup> 刁 素<sup>1</sup> 李群生<sup>1</sup> 廖忠会<sup>3</sup>

(1. 中国石化西南油气分公司 工程技术研究院, 四川 德阳 618000; 2. 中原石油勘探局 钻井一公司, 河南 濮阳 457300; 3. 中国石油大学(北京) 石油天然气工程学院, 北京 昌平 102249)

**摘要:** 泡沫水泥具有密度低、强度大、渗透率低、无游离液和防气窜能力强等特点, 在国内外油田长封固井段或低压易漏地层固井施工中得到了广泛应用。现场通常采用“穿鞋戴帽”的固井方式, 在关键封固井段使用泡沫水泥浆, 其余井段使用常规水泥浆进行封固。当前泡沫水泥固井施工设计, 主要是在忽略泡沫水泥浆流动摩阻的基础上, 利用环空候凝状态压力平衡关系进行计算, 使施工参数设计缺乏一定的合理性。为此, 笔者在分析泡沫水泥浆多相流动摩阻损耗后, 建立了泡沫水泥浆流动压降计算模型; 同时引入了固井施工中存在的 U 形管效应, 基于平衡压力固井施工原则, 建立了泡沫水泥固井施工参数优化设计方法。并通过现场试验验证了该施工参数优化设计方法的实用性。

**关键词:** 泡沫水泥; 固井; 井漏; 施工参数; 优化设计

**中图分类号:** TE256. +1    **文献标识码:** B    **文章编号:** 1001-0890(2009)02-0045-03

泡沫水泥是由气、液、固三相组成, 具有高度分散性的多相体系。与常规水泥相比, 泡沫水泥是一种超低密度水泥, 具有强度大、渗透率低、无游离液、体系稳定和防气窜等特点, 现已作为空气钻井配套技术在国内外许多油田得到了广泛使用, 其中主要应用在长封固井段或低压易漏地层的固井施工中<sup>[1-6]</sup>。现场通常采用“穿鞋戴帽”的固井方式, 即只在关键封固井段采用泡沫水泥, 其余井段仍采用常规水泥浆进行固井施工<sup>[7-9]</sup>。当前在泡沫水泥固井施工设计时, 通常只是利用环空候凝状态下的压力平衡关系, 求出施工过程中对应的施工参数, 如水泥浆、气体排量及施工时间等<sup>[10]</sup>; 与实际固井过程对比可知, 由于忽略了固井过程中沿井深方向的摩阻压降, 使求出的固井施工参数缺乏一定的合理性。为此, 笔者引入了固井施工中存在的 U 形管效应, 在考虑流体流动摩阻压降损耗的基础上, 建立了泡沫水泥浆流动压降计算模型; 基于平衡压力固井施工原则, 即在漏失层位置处环空流动压力不大于地层破裂压力条件下, 建立了泡沫水泥固井施工参数优化设计方法, 并在现场进行了试验。

## 1 基本假设

机械充气泡沫水泥固井施工时, 通常将定/变排量两种注气方式结合使用。在现场施工设计时, 将

泡沫水泥浆在封固段内沿井深轴线方向分为 2~3 小段, 然后对每一小段采用离散方法划分成多个微段, 可理解为每个微段内使用定排量注气, 不同小段间使用变排量注气。在每个微段单元内, 除了对各种描述参数取平均值外, 还需对整个固井施工过程作如下假设: 1) 泡沫水泥浆中的气泡在顶替和候凝过程中不发生集聚、漂移或逸出; 2) 泡沫水泥浆的流动为一维均相气液两相流动; 3) 气体等熵变化, 使用真实气体状态方程描述; 4) 忽略倒换档、开档销和顶胶塞等各种操作时间的影响, 认为是连续时间。

## 2 流动模型分析

在泡沫水泥固井施工中, 由于地面管线与井筒相比较短, 可忽略其对整个井筒内流道的影响, 因此只需建立泡沫水泥浆在井筒轴线方向上的流动单元模型。选用垂直流道上的单元(如图 1 所示), 进行受力分析后可得出单元内的连续性方程和运动方程。

**收稿日期:** 2008-01-21; **改回日期:** 2009-01-06

**作者简介:** 朱礼平(1981—), 男, 四川威远人, 2004 年毕业于西南石油学院石油工程专业, 2007 年获西南石油大学油气井工程专业硕士学位, 助理工程师, 主要从事石油钻井、固井设计方面的工作。

**联系电话:** (0838) 2552745

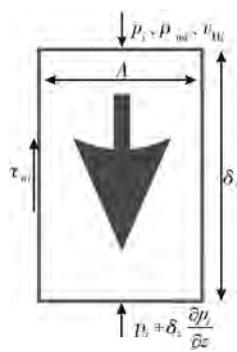


图 1 单元示意

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{mi}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_{mi}v_{Hi}) = 0 \quad (1)$$

运动方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{mi}v_{Hi}) + \frac{\partial}{\partial z}(-p_i + \rho_{mi}v_{Hi}^2) = \rho_{mi}g - \frac{\tau_{wi}P_{pi}}{A} = 0 \quad (2)$$

式中,  $\rho_{mi}$  为混合密度, kg/L, 下标 m 表示混合;  $v_{Hi}$  为混合平均速度, m/s, 下标 H 表示平均;  $A$  为流道截面积,  $m^2$ ;  $p_i$  为单元内压力, Pa, 下标 i 表示不同小段;  $\tau_{wi}$  为剪切力, Pa, 下标 w 表示单元体周界;  $P_{pi}$  为通道周界, m, 下标 p 表示压力。

### 3 模型求解过程

考虑到泡沫水泥在井筒内作稳定流动, 同时又可忽略运动方程中的加速压降项, 因此可将式(1)、(2)简化为:

$$\begin{cases} \rho_{mi}v_{Hi}A = M \\ \frac{\partial p_i}{\partial z} = \rho_{mi}g\mu \frac{f_{mi}\rho_{mi}v_{Hi}^2}{2r_w} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, 套管内取“-”, 环空内取“+”。分析该式可知, 模型求解过程中主要对单元内的摩阻系数进行计算, 其主要步骤为: 1) 计算出单元内的混合平均密度  $\rho_{mi}$ ; 2) 由质量方程  $\rho_{mi}v_{Hi}A = M$  求出单元内的混合平均流速  $\bar{v}_H = M/(\rho_{mi}A)$ ; 3) 计算出单元内的雷诺数, 然后判断流态, 从而选用对应经验公式求出摩阻系数  $f_{mi}$ 。

此外在泡沫水泥固井施工中主要有钻井液、前置液、顶替液、常规水泥浆和泡沫水泥浆等多种流体, 以开始注泡沫水泥浆时刻为界, 可将整个固井施工过程划分为单相和气液两相流动。由井筒 U 形管效应可知, 每一时刻套管内和环空两流道在井底连通, 存在如下关系:

$$p_d + p_{mc} + p_{fc} = p_a + p_{ma} + p_{fa} \quad (4)$$

式中, 下标 d 表示立管; c 表示套管; f 表示摩擦力; a 表示套管-井壁环空。

由式(4)计算出井口立压的变化规律, 然后再结合常规水泥浆和泡沫水泥浆流动模型对环空内各参数进行计算, 从而为计算泡沫水泥固井施工参数提供理论参考, 其对应的计算流程见图 2。

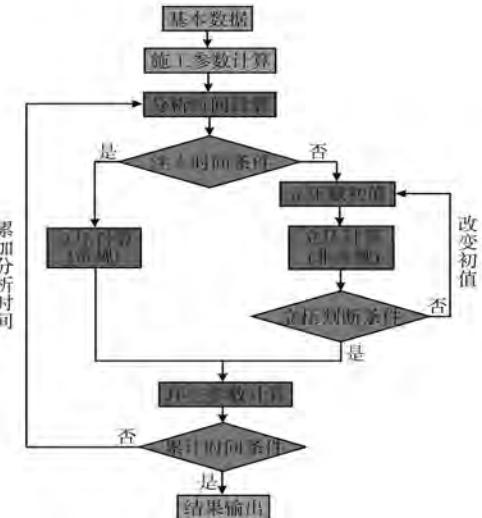


图 2 计算流程示意

### 4 实例分析

A 井基本情况: 采用泡沫水泥浆封固低压易漏易垮裸眼井段, 为下步钻进创造井筒安全条件; 漏层井深 1 300 m, 破裂压力 20 MPa, 安全系数 1.05; 0 ~ 1 000 m 井段采用 1.45 kg/L 微硅低密度水泥, 1 000 ~ 1 600 m 井段采用 1.20 kg/L 泡沫水泥, 1 600 ~ 1 890 m 井段采用 1.82 kg/L 常规水泥; 钻头直径 215.9 mm, 扩眼系数 1.10; 套管内径 152.5 mm, 外径 177.8 mm, 下深 1 888.24 m; 水泥塞高度 20 m; 井口温度 20 °C, 回压 0.1 MPa, 地温梯度 0.03 °C/m; 前置液密度 1.05 kg/L, 基浆密度 1.82 kg/L, 计算精度 5%, 泡沫水泥分 3 段; 微硅低密度水泥、基浆和常规水泥浆的流性指数分别为 0.50、0.70 和 0.70; 微硅低密度水泥、基浆和常规水泥浆的稠度系数分别为 0.14、0.16 和 0.16 Pa · s<sup>n</sup>; 钻井液、顶替液和前置液的塑性黏度分别为 50、50 和 40 mPa · s; 钻井液、顶替液和前置液的动切力分别为 0.40、0.40 和 0.30 Pa; 基浆有效黏度 80 mPa · s。

采用编制的泡沫水泥固井施工参数计算软件, 对 A 井进行了施工参数设计, 其对应泡沫水泥固井施工参数设计和实际对比结果见表 1, 漏失层位置处环空压力变化曲线见图 3。

表1 泡沫水泥固井施工参数设计和实际结果

固井段	排量/ m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup>	气体排量/ m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup>	时间/ min	体积/m <sup>3</sup>		气体体积/m <sup>3</sup>	
				设计	实际	设计	实际
前置液	0.6	0	3.33	2.00	2.0	0	0
低密度水泥	0.6	0	32.45	19.47	20.2	0	0
泡沫水泥 第1段	0.3	20.33	8.58	2.57	2.6	174.47	180
泡沫水泥 第2段	0.3	23.37	8.51	2.55	2.6	198.80	200
泡沫水泥 第3段	0.3	26.08	8.46	2.54	2.6	220.56	224
常规水泥	1.0	0	6.01	6.01	6.2	0	0
顶替液	1.0	0	34.16	34.16	34.8	0	0

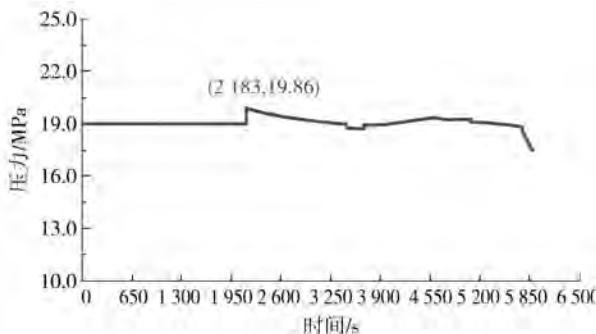


图3 漏失层位置处环空压力变化曲线

分析表1、图3和A井的固井资料可知：

1) 泡沫水泥浆分3段,每小段水泥浆体积基本不变,气体体积沿井深方向逐渐增加,符合实际施工要求;水泥浆和气体实际体积与设计值基本相符合,满足固井施工要求;

2) 漏失层位置处最大环空压力19.86 MPa,小于破裂压力(20 MPa),符合平衡固井施工原则;

3) 按设计参数进行施工,A井水泥浆返出地面,未发生漏失,固井质量优秀,满足下开次钻进固井质量要求。

## Optimization of Cementing with Foamed Cement Slurry

Zhu Liping<sup>1</sup> Yang Xiong<sup>2</sup> Diao Su<sup>1</sup> Li Qunsheng<sup>1</sup> Liao Zhonghui<sup>3</sup>

(1. Engineering Technology Research Institute, Southwest Petroleum Branch, Sinopec, Deyang, Sichuan, 618000, China; 2. First Drilling Company, Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, Puyang, Henan, 457300, China; 3. School of Oil & Gas Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Changping, Beijing, 102249, China)

**Abstract:** Foamed cement slurry with the characteristics of low density, high strength, low permeability, no free liquid and preventing gas channeling, etc. is widely used in long interval isolation and low-pressure leakage formation at home and abroad. At drilling site, critical sections are usually cemented with foamed cement slurry and the other sections with conventional cement. At present, cementing parameters are designed based on pressure balance during waiting on cement and ignoring pressure loss of foamed cement slurry, which makes the cementing variables unreasonable. Therefore, a foamed cement flow pressure drop model was developed considering the foamed cement slurry friction. The U-tube effect was introduced. The cementing operation optimization method was developed. The field application results proved this method is practical.

**Key words:** foam cement; well cementing; lost circulation; construction parameter; optimizing design

## 5 结论

1)笔者介绍的泡沫水泥固井施工参数计算方法解决了常规设计中缺乏合理性的问题,可对固井施工实际过程进行优化设计。

2)通过对A井泡沫水泥固井施工参数的设计和现场应用结果的分析,说明了泡沫水泥固井施工参数计算方法的正确性和实用性,能为泡沫水泥固井施工提供更合理的技术指导。

## 参 考 文 献

- [1] 黄柏宗,姜向东.90年代新兴的几种固井技术[J].石油钻探技术,1996,24(2):51-53.
- [2] 屈建省,杜慧春,黄柏宗.泡沫水泥的研究与应用[J].钻井液与完井液,1994,11(5):1-7.
- [3] Garcia Jr H, Maidla E E, Onan D L. Annular pressure predictions throughout foam cement operations[R]. SPE 25439, 1993.
- [4] Ruslan Busiov, Towler B F, Amian A V. Calculation of pressures for foams in well completion processes[R]. SPE 36490, 1996.
- [5] Degni C D, Tecpetrol S A, Fuller G A, et al. Successful liner application using foamed cementing technology for low-pressure, naturally fractured formations[R]. SPE 69489, 2001.
- [6] 王小兵,孙玉明,李洪乾,等.泡沫水泥浆固井技术在草桥地区的应用[J].石油钻探技术,2002,30(4):32-33.
- [7] 卞先孟,王铭,唐威,等.欠平衡钻井泡沫水泥浆静液柱压力分析[J].钻采工艺,2006,29(2):28-29,36.
- [8] 侯绪田.多相流井筒压力分布规律探讨[J].石油钻探技术,2004,32(4):32-34.
- [9] 朱礼平,刘绘新,杨胜军,等.泡沫水泥压力计算分析研究[J].石油钻探技术,2007,35(3):40-42.
- [10] 朱礼平,徐峰,尹红斌,等.泡沫水泥固井施工参数计算方法研究[J].西南石油大学学报,2007,29(4):99-101.

[审稿 毛克伟]