

# 泡沫固井水泥浆密度与环空液柱压力变化规律研究

李明忠, 蒋新立, 李德红, 刘福, 李季  
(中石化华北石油工程有限公司技术服务公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 超低密度泡沫水泥浆是解决低漏失压力井固井漏失, 提高固井质量的有效措施。除泡沫水泥浆体系的开发与性能优化外, 掌握泡沫水泥浆在环空内产生的静液柱压力随井深的变化规律, 是成功实施该工艺技术的前提。借助实际气体状态方程, 考虑温度、压力变化对充入氮气的影响, 建立了静液柱压力和水泥浆密度与井深之间的数学模型, 以迭代法编程求解该隐函数方程, 并借助 VB 语言实现程序运算。分析了含气量变化、井深等因素对泡沫水泥浆密度及静液柱压力的影响规律, 并提出了泡沫水泥浆“防漏”与“压稳”固井浆柱结构设计思路, 为该工艺平衡压力固井设计提供了一定的参考和理论依据。该设计方法经现场应用, 证实其运算结果的可靠性。

**关键词:** 泡沫水泥浆; 固井; 含气量; 静液柱压力; 水泥浆密度

**中图分类号:** TE256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)11-0030-05

**Study on Change Rules of Foam Cementing Slurry Density and Annular Static Liquid Column Pressure/LI Ming-zhong, JIANG Xin-li, LI De-hong, LIU Fu, LI Ji (SINOPEC Huabei Oilfield Service Corporation, Technology Service Company, Zhengzhou Henan 450000, China)**

**Abstract:** Ultra-low density foam cement slurry is an effective technical measure to solve cementing leakage and improve cementing quality for low leakage pressure well. In addition to the foam cementing slurry development and the performance optimization, confirming static liquid column pressure (SLCP) at different annulus depth is necessary for foam cementing slurry application. With the help of real gas state equation, taking the influence on N<sub>2</sub> filling volume by the variation of temperature and pressure into account, a mathematical model of SLCP and density of foam cement slurry together with the well depth was established, the implicit function is solved by iterative method and the program operation is realized by using VB language. The influence rules of gas content variation and well depth on foam cementing slurry density and SLCP are analyzed; the cementing slurry column structure design ideas for foam cement slurry are given for cementing leakage prevention and pressure stability which can be reference and theoretical basis for balanced pressure cementing design. This design method has been proved to be reliable by field application.

**Key words:** foam cement slurry; cementing; gas content; static liquid column pressure; density

## 0 引言

固井是油气井建井过程中的一个重要环节, 固井质量直接影响到下开次的安全钻进, 影响该井后期投产的采收能力及寿命<sup>[1]</sup>。但目前提高低漏失压力井的固井质量一直是固井工作者面临的技术难题。地层承压能力低, 水泥浆发生漏失, 造成环空内的水泥浆返高达不到设计要求; 固井前钻井液性能无法调整或难以调整至固井需要, 同时为防漏而采取控排量替浆技术, 牺牲了部分顶替效率<sup>[2-4]</sup>; “反挤”措施存在“正注”段与“反挤”段水泥浆难以有效衔接, “反挤”段混浆严重等问题, 均对低漏失压力井的固井质量造成不利影响。

采用超低密度水泥浆体系, 显著降低环空液柱

压力, 为顶替技术提供足够的安全压力“窗口”, 是解决低漏失压力井固井难题的有效措施<sup>[5]</sup>。目前, 降低水泥浆密度的方法主要有提高水灰比、加入减轻材料和充入惰性气体<sup>[2,6]</sup>。但对于密度 1.0~1.2 g/cm<sup>3</sup> 的超低密度水泥浆体系, 通过提高水灰比和加入普通减轻材料难以实现, 或是目前固井低成本运作现状所不允许。通过化学或机械方法在水泥浆中充气, 以发泡剂和稳泡剂稳定泡沫保证浆体性能稳定, 开发了系列超低密度水泥浆体系。氮气的来源广泛, 价格低且为安全性强的惰性气体, 常作为充入气体<sup>[7-9]</sup>。但该体系应用于固井施工时, 由于井下温度和压力的影响, 水泥浆密度随井深变化<sup>[10-12]</sup>。若密度设计不合理, 将会破坏与地层压力的平衡关

收稿日期: 2017-06-08; 修回日期: 2017-08-24

作者简介: 李明忠, 男, 汉族, 1988年生, 硕士, 油气井工程专业, 从事固井工程施工和固井技术研究等工作, 河南省郑州市中原区淮河西路23号新蒲大厦8层818室, petroleumupc@163.com。

系,直接影响水泥浆的封固位置和固井质量。因此,准确预测不同含气量下的泡沫水泥浆密度及其静液柱压力沿环空井深的变化规律,对实现泡沫水泥浆的防漏失固井以及提高固井质量具有重要的意义。

### 1 泡沫水泥浆密度计算模型建立

泡沫水泥浆由于浆体密度低,不容易引发漏失,有利于平衡压力固井,而且利用气体的弹性对提高“大肚子”处钻井液顶替效率和防止环空窜流具有一定作用。为方便分析泡沫水泥浆段密度和液柱压力在井内变化情况,为充气方式以及含气量设计提供参考和依据,本文借助气体状态方程开展了泡沫水泥浆密度与环空静液柱压力沿井深变化规律的研究。为研究方便,进行如下假设:在环空内,气体以均匀分散的形式(泡状流)充入水泥浆中,浆体为连续相,气体为分散相;忽略基浆的压缩性,不考虑气体质量,如图1所示。

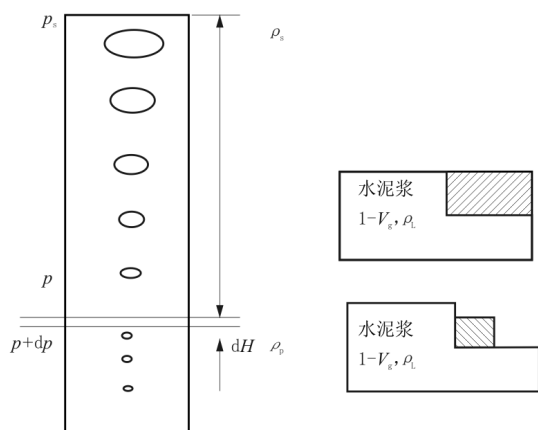


图1 泡沫在环空内的形态分布和单位体积泡沫水泥浆组分组成

为计算方便,取单位体积泡沫水泥浆,泡沫水泥浆的地面密度为  $\rho_s$ :

$$\rho_s = \rho_l(1 - \alpha) + \rho_g \alpha \quad (1)$$

式中:  $\rho_l$ ——泡沫水泥浆基浆密度;  $\rho_g$ ——气体密度;  $\alpha$ ——含气量,取值0~1,无量纲参数,即在地面温度、常压下泡沫水泥浆中所含气体体积与泡沫水泥浆体积的比值。由于  $\rho_g \ll \rho_l$ ,由式(1)得  $\rho_s = \rho_l(1 - \alpha)$ 。

在井下实际条件下,氮气的温度、压力、体积均随井深发生变化。根据热力学原理<sup>[13]</sup>,在井深  $H$  处的气体体积为:

$$V = \frac{\rho_s \alpha}{T_s} \cdot \frac{T_s + \lambda H}{p} \quad (2)$$

则在该深度处的泡沫水泥浆总体积为  $V_H$  为:

$$V_H = \frac{\rho_s \alpha}{T_s} \cdot \frac{T_s + \lambda H}{p} + (1 - \alpha) \quad (3)$$

由质量守恒进而可得到该深度处的泡沫水泥浆密度:

$$\rho_p = \frac{\rho_s}{\frac{\alpha \rho_s (T_s + \lambda H)}{T_s p} + (1 - \alpha)} \quad (4)$$

式中:  $p_s$ ——地面压力,MPa;  $T_s$ ——地面温度,K;  $H$ ——环空井深,m;  $p, V, T$ ——分别为单位体积泡沫水泥浆中的气体在井深  $H$  处的压力、体积和温度,有  $T = T_s + \lambda H$ ,  $\lambda$ ——地温梯度,  $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。

在井深  $H$  处的静液柱压力采用微分方法进行计算:

$$dp = 0.00981 \rho_p dH \quad (5)$$

将式(4)代入式(5),且令  $b = \alpha \rho_s / (1 - \alpha)$ ,  $m = b \lambda / T_s$ ,  $n = 0.0098 \rho_l / m$  有:

$$mn \frac{dH}{dp} = 1 + \frac{b + mH}{p} \quad (6)$$

对该一阶线性微分方程进行原函数求解,边界条件:  $p = p_0 = p_s + 0.0098 \rho_m h$  ( $H = h$ ),其中  $h$  为泡沫水泥浆设计返高,  $\rho_m$  为环空内泡沫水泥浆顶界以上的静液柱压力当量密度。因此,式(6)的最终解为:

$$b + mH = \frac{p}{n - 1} + \left[ (b + mh) p_0^{1/n} - \frac{p_0^{1 - 1/n}}{n - 1} \right] p^{1/n} \quad (7)$$

式(4)和(7)包括了温度和压力变化对泡沫水泥浆密度的影响。  $p$  是关于  $h$  的隐函数,使用迭代法求解  $p$ <sup>[14]</sup>,得到  $p$  后可由式(4)得到不同井深处的泡沫水泥浆密度。进而通过积分式(8)得到不同井深处的静液柱压力当量密度  $\rho_{\text{静}}$ :

$$\rho_{\text{静}} = \frac{p_s + 0.0098 \left[ \rho_m h + \int_h^H \rho_p(h) dh \right]}{0.0098 H} \quad (8)$$

为方便泡沫水泥浆固井设计,借助 VB 编程语言,完成泡沫水泥浆密度计算的程序设计,部分程序界面如图2和图3所示。

### 2 计算实例及现场工艺

为适应低漏失压力井固井需要(如鄂尔多斯盆地某区块刘家沟组地层承压能力仅为  $1.06 \text{ g}/\text{cm}^3$ )设计泡沫水泥浆的基浆密度  $1.55 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,基浆为



图2 泡沫水泥浆环空密度与静液柱压力计算界面

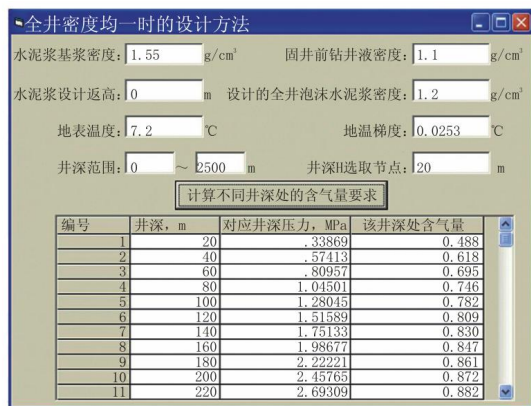


图3 泡沫水泥浆实现井内密度均一的计算界面

漂珠、微硅和水泥进行复配的低密度体系,基本配方案为:G级水泥+11.4%漂珠+2.9%微硅+6%低密增强剂+0.26%分散剂+0.4%缓凝剂+1.7%降失水剂。

固井前环空钻井液密度为 1.1 g/cm<sup>3</sup>,泡沫水泥浆作为领浆封固至井口,地表平均温度 7.2 °C,地温梯度 2.53 °C/100 m,泡沫水泥浆封固井深为 2500 m。取不同含气量 α,分别为 0.96、0.94、0.92、0.90、0.88 和 0.85。分别计算了在上述条件下,泡沫水泥浆在不同井深处的密度以及泡沫水泥浆在不同井深处的当量密度。计算结果分别如图4、图5所示。

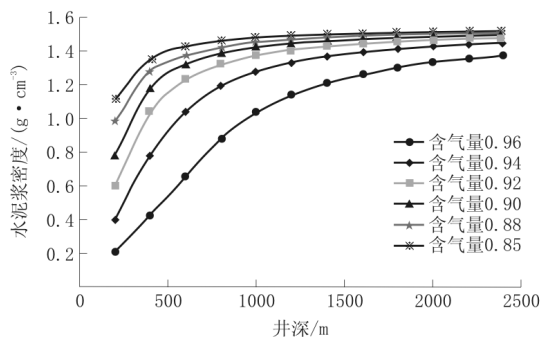


图4 氮气含气量对不同井深处的泡沫水泥浆密度影响

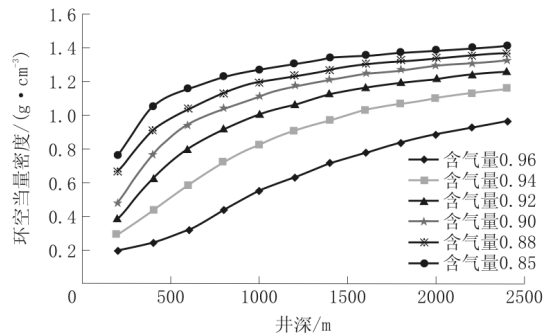


图5 氮气含气量对不同井深处的环空静液柱压力当量密度影响

若全井在不同井深处从井口注入相同的氮气体量,泡沫水泥浆密度随井深增大而逐渐增大。由图4可见,在上部封固段(如含气量 0.92~0.96,井深 < 1000 m 时),随井深增大,泡沫水泥浆密度增加速率较快;随井深进一步增大,泡沫水泥浆密度增加速率变慢;最终,泡沫水泥浆密度基本保持不变,接近水泥浆基浆密度。不同含气量条件下的泡沫水泥浆密度沿环空井深变化趋势一致,但含气量越大,对深部井段密度降低效果愈加显著。研究表明,低密度泡沫水泥浆的密度受温度影响并不明显<sup>[15]</sup>,上述现象主要是由环空静液柱压力增大造成的。在同一井深处,随着含气量的增大,泡沫水泥浆密度降低。当含气量 > 0.9,含气量变化对泡沫水泥浆密度的影响程度显著增大。

图5给出了在不同含气量情况下,泡沫水泥浆在任意井深处的静液柱压力当量密度。根据易漏层位的地层承压能力,在满足液柱压力小于地层承压能力的要求下设计合适的氮气注入量。

在某些情况下,为追求井内泡沫水泥浆密度均一,可通过适时调整氮气的注入量。借助式(4),以上述参数进行计算,若为获得泡沫水泥浆密度为 1.2 g/cm<sup>3</sup>,在不同井深处的基浆含气量 α 与井深关系如图6(方式一)所示。如图6可知,在井深较浅时,为获得设计的泡沫水泥浆密度,氮气的注入量

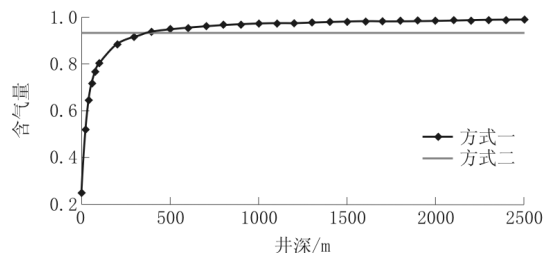


图6 两种注气方式对比

较少,这主要是由低液柱压力对泡沫的压缩程度较小、泡沫体积大造成的;随着井深增加,随着静液柱压力对泡沫的压缩程度逐渐增大,氮气设计注入量迅速增大;当井深达到一定深度,氮气设计注入量基本不再变化。

现场固井施工时,保证环空内泡沫水泥浆对易漏层位的液柱压力低于其地层承压能力,可采用2种注气方式,如图6所示。

方式一为恒密度法:连续变化氮气注入排量,获得全井段环空密度均一的泡沫水泥浆体系;

方式二为恒气量法:稳定氮气注入排量,追求全井段环空当量密度小于地层承压能力。

比较上述2种注气方式,两者所需的氮气总量差别小。区别在于恒密度法在上部井段充气量小,形成的水泥石强度高,但现场施工控制难度大;恒气量法施工易于控制,在井底可以获得密度较高,强度较大的水泥封固段;但恒气量法因封固上部井段的泡沫水泥浆充气量大,水泥浆密度低,容易造成上部井段气泡发生聚结或破裂逸出而滑脱上窜,并且水泥石强度低,不满足封堵隔离的要求,以及下部目的层压稳当量密度不满足要求。因此,在实际固井施工时,可结合常规低密度水泥浆与泡沫水泥浆使用。常规低密度水泥浆稠化时间大于泡沫水泥浆,在上部环空进行压稳,防止泡沫低密度水泥浆滑脱上窜;泡沫水泥浆以分段密度的形式设计氮气注入量,井内泡沫水泥浆密度最大值比恒密度法小,上部水泥浆密度最小值比恒气量法大,最终保证作用在易漏失层位上的静液柱压力当量密度小于地层承压能力。固井施工时配套井口节流管汇控制回压,碰压后立即下放芯轴式套管头座封井口关井候凝。若固井发生漏失,则在井内灌满钻井液后关井候凝。

### 3 应用实例

鄂尔多斯杭锦旗区块首次应用泡沫水泥浆固井技术于三开结构水平井JP-3X1井技术套管固井上。该井在钻进与下套管前通井时,刘家沟组均发生漏失,常规防漏固井技术难以达到防漏目的。地层承压能力动态测试表明,该井刘家沟组地层承压能力不足 $1.27 \text{ g/cm}^3$ ,与该区块已完钻邻井基本相同。按照上述方式,该井低密度水泥浆浆柱结构分三段设计,在400~2600 m井段处以泡沫水泥浆充填,平均密度为 $1.18 \text{ g/cm}^3$ ;保证作用在刘家沟组底

部2600 m处的静液柱压力当量密度 $\geq 1.24 \text{ g/cm}^3$ 。分段注气具体设计如下:

(1)井段0~400 m,泡沫水泥浆基浆,密度 $1.55 \text{ g/cm}^3$ ,保证油气层压稳和避免气泡滑脱上升;

(2)井段400~1500 m,泡沫水泥浆,折算至地面温度压力(20 °C/1 atm)下,充入氮气与泡沫基浆体积比 $38 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ( $\alpha=0.97436$ );

(3)井段1500~2600 m,泡沫水泥浆,折算至地面温度压力(20 °C/1 atm)下,充入氮气与泡沫基浆体积比 $78 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ( $\alpha=0.98734$ )。具体氮气注入设计见表1。

表1 JP-3X1井泡沫固井分段注气设计

井段/m	泡沫基浆 体积/ $\text{m}^3$	注氮比例/ ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )	氮气排量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	氮气体积/ $\text{m}^3$
0~400	6.5	0	0	0
400~1500	17	38	19	646
1500~2600	17	78	39	1326

按照该加气方式设计的泡沫水泥浆,泡沫水泥浆密度沿井深变化规律以及静液柱压力沿井深变化规律如图7所示。

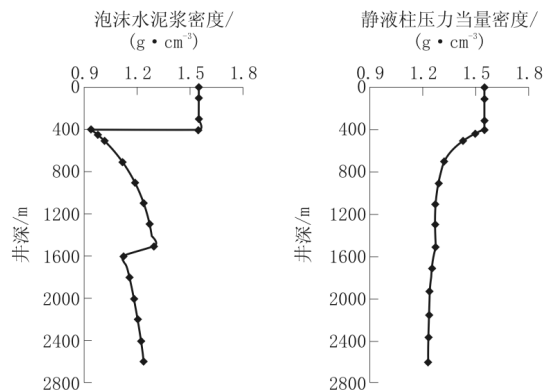


图7 JPH-3X1井泡沫水泥浆密度与静液柱压力当量密度沿井深变化规律

通过优化现场配套技术,在JP-3X1井实施了机械充气方式的泡沫水泥浆固井技术;与鄂尔多斯使用的 $1.30 \text{ g/cm}^3$ 常规漂珠低密度水泥浆相比,将作用在刘家沟以上的静液柱压力当量密度降低了 $0.06 \text{ g/cm}^3$ ,且为提高顶替效率而采用大排量顶替技术提供了条件。现场施工过程连续,水泥浆顺利返出地面。CBL和VDL测得泡沫水泥浆封固段80%以上声幅值小于20%。对比地层承压能力,借助该模型进行的泡沫固井设计满足了区块的固井防漏需要。在J128、JP-35Y、JP-32Z等井进行推广应用,充分发挥了泡沫水泥浆在提高固井顶替效率

和固井防漏方面的优势,有效提高了水泥返高,减少了因“反挤”补救造成的空套管段长。

#### 4 结论与认识

(1)低密度泡沫水泥浆是解决低漏失压力井固井漏失的有效技术措施。确定泡沫水泥浆在环空内的静液柱压力分布特征,并进行平衡压力设计,是泡沫水泥浆固井技术成功使用的基础和保证。

(2)借助气体状态方程,建立了表征泡沫水泥浆在环空内的密度以及静液柱压力特征的数学模型。通过迭代法进行求解,分析了含气量变化、井深等因素对泡沫水泥浆密度及静液柱压力的影响规律。

(3)比较分析了“恒密度法”和“恒气量法”优缺点,提出了固井浆柱结构“防漏”与“压稳”的设计思路,为泡沫水泥浆平衡压力固井设计提供了一定参考和理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 管志川,刘希圣. 钻井工程理论与技术[M]. 山东东营:中国石油大学出版社,2006:249-251.
- [2] 李明忠,李正国,王亚青. 低压易漏失长裸眼段固井防漏工艺技术概述[J]. 承德石油高等专科学校学报,2014,16(6):9-13.
- [3] 谭元铭,徐璧华,朱亮. 影响水平井注水泥顶替效率主要因素的数值分析研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(4):6-12.
- [4] 姚晓,周保中,赵元才,等. 国内油气田漏失性地层固井防漏技术研究[J]. 天然气工业,2005,25(6):45-48.
- [5] 王瑞和,李明忠,王成文,等. 油气井注水泥顶替机理研究进展[J]. 天然气工业,2013,33(5):69-76.
- [6] 林强,胡萍,作伟,等. 低压漏失井井段技术套管固井技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(7):10-12.
- [7] E. K. Kunhanandan, Nambiar K. Ramamurthy. Models for strength prediction of foam concrete [J]. Materials and structures, 2008, (41):247-254.
- [8] Revil P, Jain B. A new approach to designing high-performance lightweight cement slurries for improved zonal isolation in challenging situations [J]. SPE 47830,243-248.
- [9] 王楚峰,王瑞和,杨焕强,等. 煤层气泡沫水泥浆固井工艺技术及现场应用[J]. 煤田地质与勘探,2016,44(2):116-120.
- [10] 胡伟. 泡沫水泥浆体系的研究与应用[D]. 黑龙江大庆:东北石油大学,2012.
- [11] 朱礼平. 液氮泡沫水泥固井工艺及施工技术研究[D]. 四川成都:西南石油大学,2007.
- [12] 姚晓,周保中,赵元才,等. 国内油气田漏失性地层固井防漏技术研究[J]. 天然气工业,2005,25(6):45-48.
- [13] 朱明善,刘颖,林兆庄,等. 工程热力学[M]. 北京:清华大学出版社,1995:45-55.
- [14] 李庆扬,王能超,易大义. 数值分析[M]. 北京:清华大学出版社,2008:22-35.
- [15] 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.