

防气窜固井分段设计方法

周仕明^{1,2}, 李根生¹, 初永涛²

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘 要:为指导防气窜固井压稳设计,避免过压稳或欠压稳,研究了防气窜固井分段设计方法。基于环空水泥浆液柱中不同深度的水泥浆因温度不同导致静胶凝强度增长速度不同,以及不同深度的压力损失也不同的实际情况,对环空水泥浆的液柱压力损失进行分段计算。设定水泥浆液柱静胶凝强度的增长自上而下是线性增长,通过调整水泥浆性能控制分段水泥浆静胶凝强度的发展,使尾浆静胶凝强度达到 240 Pa 时,领浆平均静胶凝强度小于 48 Pa,建立了水泥浆液柱压力损失精确计算模型,提出了分段设计方法和压稳判定方法。在川东北地区 100 多口气井固井施工设计中应用该方法,固井防气窜成功率达到 100%。该方法为防气窜固井环空设计提供了理论计算模型。

关键词:固井 水泥浆 胶凝强度 气窜 分段

中图分类号:TE256⁺.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2013)05-0052-04

Sectional Design for Anti-Gas Channeling Cementing

Zhou Shiming^{1,2}, Li Gensheng¹, Chu Yongtao²

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineer, Beijing, 100101, China)

Abstract: To guide anti-gas channeling cementing design, and avoid circulation loss or underbalanced gas channeling, sectional design method for anti-gas channeling cementing was developed. Since the slurry temperature in annulus varies with depth, the build-up of gel strength and pressure drop are different at different depths, the hydraulic pressure loss of slurry column is calculated in sections. By adjusting slurry performance and setting the growth of gel strength to be linear from top to bottom of slurry column, and making gel strength of tail slurry up to 240 Pa, the average gel strength of lead slurry is less than 48 Pa. An accurate calculation model of hydraulic pressure loss of slurry was established, and sectional design and balanced cementing methods were developed. The methods have been used to cementing design in more than 200 gas wells in northeastern Sichuan province, the success rate of anti-gas channeling has been 100%. The method provides an effective calculation model for anti-gas channeling cementing design.

Key words: well cementing; cement slurry; gel strength; gas channeling; section

国内外大量研究和实践表明,固井气窜主要发生在水泥浆候凝过程中。注水泥结束后,环空中水泥浆静胶凝强度不断增强,水泥浆静液柱压力逐渐降低,当作用于气层的液柱压力低于气层压力时,气体会逐渐进入环空间隙发生气窜。

对于气窜危险性的预测,比较典型的有潜气窜因子法(GFP)和综合因子法(CCGM)。GFP 是 Sutton^[1]提出的,GFP 为水泥浆液柱最大压力损失与初始过平衡压力的比值。GFP 小于 1 时,不会发生气窜;

1≤GFP<3 时,气窜风险较小;3≤GFP<7 时,具有中等气窜风险;GFP 大于 7 时,气窜风险大。

收稿日期:2013-02-17;**改回日期:**2013-08-19。

作者简介:周仕明(1972—),男,安徽和县人,1993 年毕业于石油大学(华东)钻井工程专业,2003 年获石油大学(北京)油气井工程专业硕士学位,教授级高级工程师,主要从事固井工艺与材料研究。

联系方式:(010)84988220,zhouism.sripe@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”之专题“海相油气井固井技术”(编号:2011ZX05005-006-004)部分研究内容。

CCGM^[2]是把地层因素(FF)、液体静压系数(HF)、水泥浆性能系数(SPN)^[3]和动态钻井液清除系数(MF)等 4 个因素在现场统计规律的基础上回归成一个表达式。CCGM 的评价标准: $0 \leq \text{CCGM} \leq 10$, 防气窜效果很好; $10 < \text{CCGM} < 15$, 防气窜效果中等; $\text{CCGM} \geq 15$, 防气窜效果差。CCGM 使用起来比较困难, 有些因素很难量化, 如水泥浆的顶替效率、油气层的渗透率及厚度事先很难确定。

上述两种方法只是对气窜的风险进行评估, 而不能直接指导如何针对实际井况进行固井防气窜设计。而且在计算水泥浆液柱压力损失时, 通常将把环空的水泥浆液柱当成一个整体, 但事实并非如此, 水泥浆液柱不同的位置对应不同的温度, 水泥浆的水化进程也是不一样的^[4]。一般来说, 自上而下水泥浆随着温度的升高水化速度越来越快, 静胶凝强度的发展也是自上而下越来越快。所以不同深度的水泥浆静胶凝强度发展不同, 产生的压力损失也不同^[5]。基于这种考虑, 笔者提出对水泥浆进行分段分析, 根据不同段水泥浆的水化状态, 来计算静胶凝强度发展的临界值, 然后计算各段的静液压力损失, 累积后计算水泥浆液柱对气层的压稳系数。

1 水泥浆液柱静胶凝强度与压力损失分析

1.1 水泥浆液柱静胶凝强度确定

水泥浆静止后就会产生静胶凝强度(p_{sgs}), 水泥浆液柱温度随井深增加而升高, 井深越深, 静胶凝强度的增长越快, 所以自上而下静胶凝强度是单调增长。如何确定每一个位置在同一时间的静胶凝强度, 从理论上可以通过试验测得, 但实际上不具备操作性。假设水泥浆液柱 p_{sgs} 的增长自上而下是线性增长, 则任意位置的水泥浆静胶凝强度为:

$$p_{\text{sgs}} = \frac{p_{\text{dsgs}} - p_{\text{tsgs}}}{L_c} L + p_{\text{tsgs}} \quad (1)$$

式中: p_{sgs} 为水泥浆静胶凝强度, Pa; p_{tsgs} 为水泥浆液柱顶端静胶凝强度, Pa; p_{dsgs} 为水泥浆液柱底端静胶凝强度, Pa; L_c 为水泥浆液柱长度, m; L 为水泥浆液柱任意点到顶部的距离, m。

F. L. Sabins 等^[6]研究认为, 水泥浆静胶凝强度增长的过渡期是固井后发生气窜危险期。如果环空液柱压力大于气层压力, 水泥浆静胶凝强度在 48 Pa 之前基本没有气窜的风险, 增长到 240 Pa 以后就有足够的阻力阻止气体运移。所以研究环空气窜主要

集中静胶凝强度在 48 到 240 Pa 的过渡期。

1.2 水泥浆液柱压力损失计算

引起水泥浆液柱压力损失有多种因素, 如由静胶凝强度、失水和体积收缩等^[6]。随着水泥浆添加剂技术的发展, 水泥浆失水和体积收缩得到了很好的控制, 由这两者引起的压力损失很小, 因此笔者主要考虑由静胶凝强度引起的液柱压力损失。

水泥浆在环空静止后, 水泥浆液柱的静胶凝强度就处于一个增长过程, 静胶凝强度会阻止液柱压力的传递, 导致液柱压力损失, 其表达式为^[4]:

$$\Delta p_c = 10^{-4} \frac{4p_{\text{sgs}}L_c}{D_h - D_p} \quad (2)$$

式中: Δp_c 为水泥浆液柱压力损失, MPa; D_h 为井眼直径, cm; D_p 为套管外径, cm。

将水泥浆液柱分成若干小段, 水泥浆液柱的压力损失为:

$$\Delta p_c = 10^{-4} \int_0^{L_c} \frac{4p_{\text{sgs}}}{D_h - D_p} dL \quad (3)$$

将式(1)代入式(3), 并整理得:

$$\Delta p_c = 10^{-4} \frac{2(p_{\text{dsgs}} + p_{\text{tsgs}})}{D_h - D_p} L_c \quad (4)$$

2 防气窜分段设计

2.1 设计原则

判断固井后是否发生气窜, 需要计算水泥浆静胶凝强度 p_{sgs} 在达到 240 Pa 后环空静液柱压力与气层压力的差值。差值为正表示能压稳, 气窜风险小; 如果为负值, 则表示不能压稳, 气窜风险大。如果整个水泥浆液柱的 p_{sgs} 都达到 240 Pa 后再计算环空液柱压力, 那么压力损失将非常大。实际上只要气层处的水泥浆静胶凝强度达到 240 Pa, 而气层上部的水泥浆静胶凝强度较低, 保持一定的液柱压力, 就可以保持对气层的压稳。

从式(2)、式(3)很难得到水泥浆液柱压力损失的精确解析解, 因此对水泥浆的静胶凝强度进行分段简化。通常设计防气窜水泥浆时采用领浆和尾浆, 那么可以通过调整稠化时间和延迟静胶凝强度来设计领浆和尾浆, 使尾浆静胶凝强度达到 240 Pa 时, 领浆保持较低的静胶凝强度^[7-8]。那么可以设定, 尾浆在平均静胶凝强度达到 240 Pa 时, 领浆的平均静胶凝强度为 48 Pa, 将这一时刻作为进行压稳计算的临界点。因此防气窜分段设计可遵循以下

原则:

- 1) 环空水泥浆液柱当量密度应小于地层的破裂压力或最低漏失压力;
- 2) 前置液的液柱压力按钻井液液柱计算;
- 3) 气顶以下的水泥浆液柱不计算有效压力,只计算气顶以上的钻井液、领浆和尾浆的液柱压力。

2.2 压稳计算步骤

2.2.1 分段计算水泥浆液柱压力损失

根据设计原则,在临界点时环空液柱压力损失组成为:

$$\begin{aligned}\Delta p_c &= \Delta p_{c1} + \Delta p_{c2} \\ &= 10^{-4} \left(\int_0^{L_{c1}} \frac{4 \times 48}{D_h - D_p} dL + \int_0^{L_{c2}} \frac{4 \times 240}{D_h - D_p} dL \right) \\ &= 10^{-4} \frac{196L_{c1} + 960(L_{c2} + B)}{D_h - D_p} \quad (5)\end{aligned}$$

式中: Δp_{c1} 为领浆压力损失,MPa; Δp_{c2} 为尾浆压力损失,MPa; L_{c1} 为领浆段长,m; L_{c2} 为尾浆段长,m; B 为气顶至井底的距离,m。

式(5)的计算结果有可能会出尾浆的最大液柱压力损失超出了水泥浆的最初静液柱压力。水泥浆液柱失重后最低的当量液柱压力是静水压力,所以当式(5)计算的压损失大于该段水泥浆的最初液柱压力时,液柱压力损失以最初的液柱压力减去这一段静水压力^[9],即:

$$\Delta p_{c2} = (\rho_{c2} - 1) \frac{L_{c2} - B}{100} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)得:

$$\Delta p_c = 10^{-4} \frac{196L_{c1}}{D_h - D_p} + (\rho_{c2} - 1) \frac{L_{c2}}{100} \quad (7)$$

式中: ρ_{c2} 为尾浆密度,kg/L。

2.2.2 确定环空净液柱压力

初始环空液柱压力减去水泥浆液柱压力损失即为环空净液柱压力。环空初始液柱压力指水泥浆静止瞬间所有液体的静液柱压力之和,这时水泥浆还没产生由静胶凝强度引起的压力损失。

初始环空液柱压力 p_i 等于钻井液液柱压力 p_m 加上气顶以上水泥浆液柱压力 p_c ,即:

$$p_i = p_m + p_c = \frac{\rho_m L_m + \rho_{c1} L_{c1} + \rho_{c2} (L_{c2} + B)}{100} \quad (8)$$

式中: L_m 为钻井液长度,m; ρ_m 为钻井液密度,kg/L; ρ_{c2} 为尾浆密度,kg/L。

环空净液柱压力 p_{ns} 为:

$$p_{ns} = p_i - \Delta p_c = \frac{\rho_m L_m + \rho_{c1} L_{c1} + \rho_{c2} (L_{c2} + B)}{100} - 10^{-4} \frac{196L_{c1} + 960(L_{c2} + B)}{D_h - D_p} \quad (9)$$

或

$$p_{ns} = \frac{\rho_m L_m + \rho_{c1} L_{c1} + \rho_{c2} (L_{c2} + B)}{100} - 10^{-4} \frac{196L_{c1}}{D_h - D_p} - (\rho_{c2} - 1) \frac{L_{c2}}{100} \quad (10)$$

式中: p_{ns} 为环空静液柱压力,MPa。

2.2.3 压稳判定

环空净液柱压力除以气层压力称为压稳系数,即:

$$F_p = \frac{p_{ns}}{p_g} \quad (11)$$

式中: F_p 为压稳系数; p_g 为气层压力,MPa。

如果 $F_p \geq 1$,则说明气层能够被压稳,气窜风险小, F_p 越大气窜的风险越小。如果 $F_p < 1$,则说明气层不能够压稳,有气窜风险,而且 F_p 越小,气窜的风险越大^[10-12]。

3 应用实例

目前,防气窜固井分段设计方法已在川东北地区普光气田、元坝气田和通南巴区块的100多口气井技术套管与油层套管固井施工设计中进行了应用,固井防气窜成功率达到100%。同时,使水泥浆液柱结构得到优化,水泥浆密度设计更为合理,减少了因过压稳而造成的水泥浆漏失。以某气井 $\phi 193.7$ mm尾管固井为例介绍该方法的应用情况。该井井深5 002 m,钻井液密度2.36 kg/L,平均井径226.0 mm, $\phi 193.7$ mm尾管自井深4 022.00 m下至井底,水泥浆密度2.36 kg/L,气层压力110 MPa,领浆段长638.00 m,尾浆段长342.00 m,气顶至井底140.00 m。

根据式(8)计算出气顶以上的初始环空液柱压力 p_i 为114.83 MPa。利用式(5)和式(7)计算出尾浆静胶凝强度达到240 Pa时水泥浆液柱压力损失分别为9.86和6.70 MPa。由于气顶以上尾浆段的静液柱压力只有4.85 MPa,而如果按静胶凝强度240 Pa计算尾浆压力损失将达到6.54 MPa,因此水泥浆液柱的压力损失不能取9.86 MPa,只能取6.70 MPa。

利用式(9)计算出环空静液柱压力为108.13 MPa,

将其带入式(11)中计算出压稳系数为0.983。由于计算出的压稳系数小于1,有发生气窜风险。在实际固井过程中,该井采用环空加压的方式弥补环空液柱压力的不足,避免了气窜的发生。当然在设计时也可以调整领浆和尾浆的段长及密度,再按分段设计的步骤计算压稳系数,直到压稳系数不小于1。

川东北地区的气井在进行固井设计时,普遍采用了防气窜分段设计方法进行防气窜设计和校核,起到了良好的防气窜效果。

4 结 论

1) 防气窜分段设计的前提是通过调整稠化时间和延迟静胶凝强度来设计领浆和尾浆,使尾浆静胶凝强度达到240 Pa时领浆的平均静胶凝强度小于48 Pa。

2) 防气窜进行分段设计比较符合实际情况。在试验充分的条件下,通过调整水泥浆静胶凝强度的发展,可以将水泥浆液柱设计成多段。

3) 分段防气窜设计方法不仅能够比较真实地预测固井后环空气窜的危险性,而且能够指导防气窜固井压稳设计,避免盲目过压稳或欠压稳。

参 考 文 献

References

- [1] Bonett A,汪海阁. 探索固井时气侵的根源[J]. 国外钻井技术, 1999,14(4):52-62.
Bonett A, Wang Haige. Exploring the source of gas migration during cementing job[J]. Foreign Drilling Technology, 1999,14(4):52-62.
- [2] Sutton D L, Ravi K M. New methods for determining downhole properties that affect gas migration and annular sealing[R]. SPE 19520, 1989.
- [3] 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.
- Zhou Shiming, Ding Shidong, Qu Zhongqi. Predicting gas cut in annulus with modified coefficient-SPN[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2001,29(5):31-32.
- [4] 孙展利. 水泥浆的沉降失重研究[J]. 石油钻采工艺, 1997, 19(2):31-36.
Sun Zhanli. Study on weight loss of cement slurry due to precipitation[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1997, 19(2):31-36.
- [5] 牛新明, 张克坚, 丁士东, 等. 川东北地区高压防气窜固井技术[J]. 石油钻探技术, 2008,36(3):10-15.
Niu Xinming, Zhang Kejian, Ding Shidong, et al. Gas migration prevention cementing technologies in northeast Sichuan Area [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008,36(3):10-15.
- [6] Sabins F L, Tinsley J M, Sutton D L. Transition time of cement slurries between the fluid and set state[R]. SPE 9285, 1982.
- [7] 刘乃震, 王廷瑞, 刘孝良, 等. 水泥浆防气窜性能设计及合理的浆体组成研究[J]. 天然气工业, 2002,22(3):49-52.
Liu Naizhen, Wang Tingrui, Liu Xiaoliang, et al. Gas-channeling prevention performance design of cement slurry and reasonable slurry composition[J]. Natural Gas Industry, 2002,22(3):49-52.
- [8] Shipley S E, Mitchell B J. The effect of hole inclination on gas migration[R]. SPE 20432, 1990.
- [9] 张兴才. 水泥浆网架结构胶凝悬挂失重机理研究[D]. 南充: 西南石油学院石油工程学院, 2002.
Zhang Xingcai. Research of mechanism of pressure loss caused by grid structure in cementing slurry[D]. Nanchong: School of Petroleum Engineering, South Petroleum Institute, 2002.
- [10] 李铁成, 周仕明. 普光气田整体固井工艺[J]. 石油钻探技术, 2011,39(1):78-82.
Li Tiecheng, Zhou Shiming. Overall cementing technology for Puguang Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(1):78-82.
- [11] 王春江, 杨玉坤, 翟建明. 普光“三高”气田安全钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2011,39(1):12-17.
Wang Chunjiang, Yang Yukun, Zhai Jianming. Safe drilling techniques applied in Puguang HPHT sour gas field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011,39(1):12-17.
- [12] 隋梅. 胜利油田深探井固井技术难点与对策[J]. 石油钻探技术, 2013,41(3):73-79.
Sui Mei. Technical difficulties and countermeasures in cementing of deep exploration well in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013,41(3):73-79.

[编辑 刘文臣]

欢迎订阅 2014 年《石油钻采工艺》

《石油钻采工艺》创刊于1979年,是由中国石油天然气集团公司主管、华北油田分公司和华北石油管理局主办的科技期刊,是中文核心期刊、中国科技核心期刊,被中国科学引文数据库(CSCD)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《化学文摘》(CA)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)等国内外著名检索机构收录,多次荣获中国石油天然气集团公司和河北省优秀期刊称号。

本刊设有钻井完井、油气开采、新能源开发、交流园地、探讨争鸣、要闻简讯等栏目。主要报道国内石油钻井、采油的新工艺、新技术、科研成果和先进的生产管理经验,并适当介绍与其有关的国外发展水平、综述和动态。

本刊为双月刊,大16开,公开发行。国际标准连续出版物号:ISSN 1000-7393,国内统一连续出版物号:CN 13-1072/TE,邮发代号:18-121,每期每册定价24.00元,全年144.00元。欢迎广大读者订阅。联系人:张冬梅,电话:(0317)2723370。E-mail:syzc@vip.163.com。