

# 水泥浆失重对高压油气井固井质量的 影响分析及工艺对策

秦国宏, 覃毅, 尤凤堂, 程春红, 李沧波, 吴成坤  
(渤海钻探工程有限公司第一固井分公司, 河北任丘 062552)

**摘要:** 高压油气井由于存在高压地层, 在整个钻井工程中都引起了高度重视。有些高压油气井可能还存在低压易漏层。在固井候凝过程中, 水泥浆会产生失重, 进而降低了井筒内的液柱压力, 如果液柱压力低于失重井段的地层压力, 地层流体将会向环空侵入, 造成窜槽, 甚至会引发井控事故; 如果液柱压力高于地层(破裂)压力将引起地层漏失, 进而污染油气层, 造成水泥浆低返。因此, 处理好固井过程中井筒内动态压力和地层压力的关系以及制定相关的应急措施是高压油气井固井成败的关键。分析了水泥浆失重对高压油气井固井质量的影响因素, 提出了高压油气井油气水侵的预防措施和固井中相关风险的应急措施和机制。

**关键词:** 高压油气井; 水泥浆失重; 固井质量

**中图分类号:** TE256    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672 - 7428(2015)03 - 0033 - 04

**Analysis on the Impact of Weight Loss of Cement Slurry on Cementing Quality for High-pressure Oil and Gas Well and the Technical Countermeasures/QIN Guo-hong, QIN Yi, YOU Feng-tang, CHENG Chun-hong, LI Cang-bo, WU Cheng-kun** (No. 1 Cementing Company of Bohai Drilling and Exploration Engineering Company, Ltd., Renqiu Hebei 062552, China)

**Abstract:** The high-pressure formation has attracted high attention in the entire drilling engineering process of high-pressure oil and gas well, and there may be low-pressure thief zones in some of the high-pressure oil and gas wells. In the solidification period of cementing, cement slurry will have weight loss and fluid column pressure in the entire wellbore will be lowered. If the liquid column pressure is lower than the formation pressure in weightlessness well section, the formation fluid will invade the annulus to cause channeling, even lead to well control incidents; if the liquid column pressure is higher than strata (fracture) pressure, the formation leakage will occur, and further cause oil and gas reservoir pollution with less volume cement slurry returning. Therefore, proper handling the relationship between dynamic pressure and formation pressure and the formulation of relevant emergency measures are the key of success in high-pressure oil and gas well cementing.

**Key words:** high-pressure oil and gas wells; weight loss of cement slurry; cementing quality

## 0 引言

20 世纪 60 年代以来, 国内外对高压油气井固井技术进行了大量的研究和分析, 结果表明, 水泥浆失重是影响高压油气井固井质量的主要因素之一。固井候凝期间, 水泥浆水化速率加快, 静胶凝强度增加, 同时不断释放出自由水, 使得水泥浆传递地层压力的能力大幅降低, 最后降低到静水柱压力的过程, 叫做水泥浆失重。在高压油气井固井过程中, 水泥浆发生失重后, 当环空液柱压力低于地层压力时, 高压层的流体容易侵入环空, 形成窜流, 影响固井质量。因此, 研究水泥浆的失重机理和影响因素以及对高压油气井固井质量的影响, 对于提高固井质量、

解决固井难题具有较大意义。

## 1 水泥浆的失重机理及影响因素

水泥颗粒与水经过充分搅拌混合后, 在各种物理、化学作用下开始进行水化反应。根据前人对于水泥浆稠化、凝固机理的研究成果可知, 水泥浆在环空静止后, 水化反应生成的胶体开始沉降, 多余的自由水不断析出<sup>[1]</sup>。沉降的胶体在浆体内部逐渐形成不同类型的网状空间结构, 这种结构相互支撑, 形成静胶凝强度。研究表明, 水泥浆的静胶凝强度 < 48 Pa 时, 失重较小; 胶凝强度在 48 ~ 240 Pa 之间的过渡期内失重最严重。水泥浆的静胶凝使水泥浆逐

收稿日期: 2014 - 11 - 03; 修回日期: 2014 - 12 - 29

作者简介: 秦国宏, 男, 汉族, 1985 年生, 工程师, 从事固井技术研究和推广工作, 河北省任丘市北站路, 463022753@qq.com;

通讯作者: 覃毅, 男, 壮族, 1984 年生, 工程师, 从事固井技术研究和现场应用工作, 896028085@qq.com。

渐地失去流动性,多余的自由水形成静水液柱,造成水泥浆“失重”。

从水化开始到凝固结束,水泥浆柱的压力会逐渐降低,直至降低到水柱压力。在这个过程中,若上部液柱有效压力低于此处的地层压力,地层里的油气水就会侵入环形空间,造成窜槽。

室内实验研究表明,在其他条件一定的情况下,水泥浆的失重速度和程度随着井斜角的增大、环空间隙的减小而增大,随着套管居中度的提高、水泥浆失水量的减小而减小<sup>[2]</sup>。井斜角越大,水泥浆体中胶体沉降的不均匀性和不稳定性增加,自由水析出也较快,加速了失重速度;套管与环形空间间隙小或者套管居中度低时,在小间隙处压力很高,水泥浆会加速失水,迅速稠化,形成桥堵,阻止上部压力有效向下传递,引起失重,这也是小间隙井或套管居中度差的井容易引发窜槽的主要原因;水泥浆的失水和析水量小,浆体中的自由水就越少,浆体就越稳定,稳定的浆体其各向趋于均一性,具有较好的防窜能力。

## 2 高压油气井固井水泥浆失重过程中的油气水入侵预防措施

解决高压油气井固井环空油气水侵的基础就是在不压漏地层的情况下,保证固井施工前、施工中以及候凝期等各个阶段,环空液柱的有效压力始终大于地层压力。如图1<sup>[3]</sup>,固井过程中,环空液柱压力 $P$ 是动态变化的,地层压力 $C$ 和地层破裂压力 $F$ 可视为一个固定不变的压力,固井过程中的压稳原则即是:

$$C < P < F$$

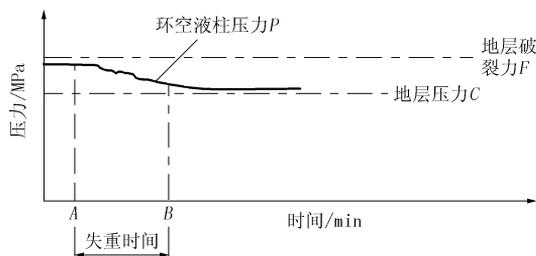


图1 水泥浆候凝失重过程中压力关系示意图

常用的方法有:(1)使用双凝或多凝水泥浆体系<sup>[4]</sup>,即下部水泥浆稠化凝固时上部水泥浆还处于流动状态,且有效压力大于地层压力。也可以优化前置液性能<sup>[5]</sup>,在注入前隔离液前注入加重钻井

液,其目的也是增大失重段以上的液柱压力。值得注意的是,在考虑压稳问题时不能单纯认为速凝水泥浆失重时缓凝水泥浆不失重,如前面提到的,水泥浆在环空静止后即发生胶体沉降和自由水的析出,只是缓凝水泥浆比速凝水泥浆进行的稍缓慢而已。(2)有些特殊的高压油气井(如井深较浅的高压井)或存在异常高压地层的井(如存在高压水层),即使采用双凝水泥浆体系可能也不能实现压稳,这时可考虑在高压油气层上部使用套管外封隔器,必要时可分段使用多个套管外封隔器。固井施工结束后将套管外封隔器涨开,产生径向膨胀,封隔环空,阻止油气水的侵入。另外,也可以采用环空憋压或者加压的方法,其原理和使用管外封隔器相似,即固井施工后关闭环空或者给环形空间加压,憋压候凝。(3)使用防窜水泥浆体系,减少水泥浆的失水和析水,提高浆体的稳定性,阻止油气水的扩散。(4)其他方法,如分级注水泥,膨胀型水泥浆,减小水泥浆的凝固过渡期等。

所以压稳计算必须首先计算水泥浆失重压力,来调整水泥浆液柱结构,或者优选其他措施来确保压稳。

因此,为减小水泥浆的失重速率,降低其失重程度,要保证合理的井眼结构,尽量避免小间隙固井。固井前要处理好泥浆,确保井眼干净畅通,以免形成沙堵、桥堵。要根据实际情况科学地选用扶正器类型,合理设计其数量和加放位置,保证套管的有效居中。另外,固井时要合理地选用水泥浆体系。

## 3 高压油气井固井应急措施及机制

### 3.1 详细了解井况

由于高压油气井的特殊性,给钻探工程带来了诸多难题,固井环节是整个钻探工程最重要的最后一道工序,要详细了解井况,为成功固井奠定基础。

包括该井的工程设计、地质设计、实钻资料、录井资料、测井资料,还应收集该区块地层资料、邻井资料等等。

通过基础资料的了解和掌握,摸清井下实际情况,分析地层压力特征和动态,为后续工作的进行提供依据。

### 3.2 进行风险识别

固井是一项系统的、多学科的、隐蔽性的工程,风险较大,特别是一些高压油气井,固井难度高,风

险大。在详细了解井况的基础上,要加强固井风险的有效识别。

井况的风险识别。如井身结构是否合理,是否利于下一步固井施工的进行;井下情况是否正常,有没有井涌、漏失、坍塌等复杂情况;有没有蠕动性地层或其他特殊岩性;有没有有毒有害气体和腐蚀性较强的地层流体;套管与地层之间环空间隙的大小、井径是否规则;钻井液性能是否符合固井要求。

地层温度压力风险识别。对于存在高压地层的井,分析其压力梯度的变化及其和地层破裂压力的关系,是否存在异常高压区,地温梯度是否正常,是否属于高温高压井,找出固井过程中压稳和压漏地层的临界条件。

相关设备的风险识别。高压油气井固井其施工压力是很高的,必须对相关的各种设备、工具、附件进行压力评估,满足施工要求。包括注水泥设备、供灰设备、供水设备、井口工具、套管、井下附件、井控设备、泵送设备,薄弱环节必须及时整改,消除不确定因素带来的隐患。

### 3.3 科学实施固井技术措施

利用现有的成熟的固井工艺技术,针对不同井况科学地优选固井工艺措施。

对于一般的高压油气井,如果目的层较短,可选用双凝水泥浆体系,必要时可使用加重钻井液进一步实现压稳;如果目的层较长,可选用多凝水泥浆体系或者分级注水泥工艺。

对于井深较浅的高压油气井,一般水泥返高较高,利用提高环形空间各种流体的密度来实现压稳是不可取的,可选用套管外封隔器封隔高压油气层。

对于存在漏失地层的高压油气井应根据漏失层和目的层的位置关系来确定相应的固井技术措施。如果易漏失层和高压产层都属于同一裸眼段,钻井液密度安全窗口非常窄,即压力稍高就漏,稍低则涌,一定要先堵漏,然后再进行下一步施工。下套管时可使用自动灌浆式浮鞋浮箍。可以采用分级注水泥的方法固井,或者用管外封隔器加分级注水泥工艺,即在高压易漏层上部安装管外封隔器进行一级注水泥,然后打开分级箍循环钻井液,待一级水泥凝固后再进行二级固井封固其他产层。

对于存在有毒有害气体的高压油气井,要选用气密性较好的抗腐蚀性套管;对于存在蠕动性地层的高压油气井,可采用膨胀型套管固井,并优选可膨

胀性水泥浆体系。

### 3.4 制定周密的应急措施和预案

(1)整个固井过程中要执行严格的监管措施,从下套管开始,到候凝结束的整个过程中,各个环节和岗位分派专人负责、专人值守,遇到情况及时发现及时沟通。涉及到的关键岗位,如泥浆、液控、司钻、机房等要执行坐岗制度。

(2)对于存在风险的各个环节要制定详细的技术预案,一有情况可以及时处理,控制事态进一步发展,避免不可控事故的发生。

## 4 固井现场实例

### 4.1 华北油田京367NX井固井

该井完钻井深1690 m,  $\varnothing 244.5$  mm表层套管下深501 m,  $\varnothing 215.9$  mm钻头钻至1690 m,完钻泥浆密度 $1.60 \text{ g/cm}^3$ ,  $\varnothing 139.7$  mm套管下深1689 m,设计水泥返高450 m。

固井时采用两凝水泥浆体系,经计算,在目的层水泥浆候凝失重后,环空液柱动态压力 $P$ 略大于地层压力 $C$ ,即可以实现压稳。固井施工后关封井器采用环空憋压候凝。

候凝接近2 h时,发现套压升高,所幸的是事先有准备预案,经过采取备用的技术措施,问题没有进一步恶化。后经检测,固井质量整体合格,但局部声幅值偏高。

通过这口井的实例,进一步证实了水泥浆失重对于整个固井工程的影响是巨大的。

(1)速凝水泥浆失重的同时,缓凝水泥浆也在发生不同程度的失重,只是缓凝水泥浆比速凝水泥浆进行的稍缓慢而已。压稳设计中,如果将动液柱压力设计为略高于地层压力而没有留足多余的压力量,那么将没有压力来抵消因缓凝水泥浆失重时造成的压力损失,导致环空动液柱压力小于地层压力,从而致使地层流体的侵入。

(2)由于该井较浅,地层压力高,泥浆密度也很高,若在压稳设计时留足多余的压力量,势必要进一步提高钻井液密度,显然,这种做法对于这样的浅井来说是不妥的。

(3)固井施工后关闭环空憋压候凝虽然可以防止固井候凝过程中发生地层流体恶性侵入事故,但却不能完全阻止流体的侵入,要有配套措施。

基于上述3点,现做以下分析。

如图2,按照速凝失重而缓凝完全不失重来计算液柱的动态压力为 $P_1$ ,失重时间为 $T_{AB}$ ,此时 $P_1$ 略大于地层压力 $C$ ,可以压稳地层,不会发生油气侵。但实际情况却与之不符,井口套压不断升高,说明发生了油气侵。所以, $P_1$ 不是实际的环空液柱动压力。

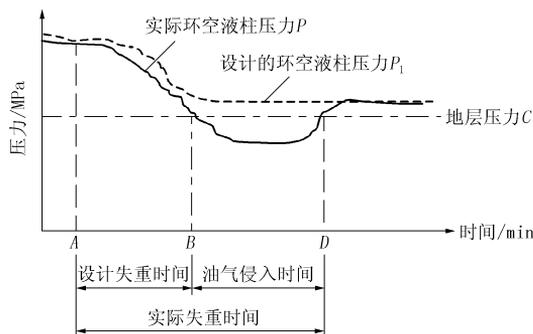


图2 实际失重和实际失重压力关系示意图

此时的环空液柱动压力应为图2中的 $P$ ,失重时间是 $T_{AD}$ 。在 $T_{AB}$ 阶段, $P$ 大于 $C$ ,地层流体不能向环空侵入,所以环空没有套压。

水泥浆继续候凝失重,到达 $B$ 点时,由于缓凝水泥浆也在发生失重,加上速凝水泥浆失重的进一步深化,使得 $P$ 开始小于 $C$ ,地层流体开始向环空侵入,环空出现套压,并逐渐升高。于是,出现了 $P$ 不断下降而环空套压不断上升的现象。 $T_{BD}$ 为油气侵入时间,实际的失重时间是 $T_{AD}$ 。

到达 $D$ 点时,速凝水泥浆完全失重,形成强度,地层流体不能再向环空侵入, $P$ 值趋于稳定。

#### 4.2 华北油田曹29X井固井

该井完钻井深3492 m,完钻泥浆密度 $1.35 \text{ g/cm}^3$ ,通井时后效严重,泥浆密度提高到 $1.40 \text{ g/cm}^3$ ,井下正常,套管下深3165 m,循环处理好泥浆后开始固井。

该井根据井下情况和水泥浆失重原理的分析,在压稳问题上采取了一些措施:为防止水泥浆在凝结期体积收缩,在水泥中加入膨胀剂;采用两凝水泥浆体系;注入前隔离液前注入高密度的重泥浆帽子;在高压地层上部加放套管外封隔器。得益于以上措

施的合理执行,该井取得了良好的固井效果。

## 5 结语

(1)影响水泥浆失重的因素很多,如环空间隙的大小、套管居中程度、井斜角大小、水泥浆体系的稳定性等。处理好水泥浆失重对固井质量的影响是高压油气井固井成败的关键。

(2)固井过程中一定要坚持固井前压稳、固井施工中压稳及候凝过程中的压稳,在使用多凝水泥浆体系计算压稳时,一定要过压力平衡,把上一级缓凝水泥浆的失重因素考虑进去。水泥浆在候凝过程中,速凝水泥浆失重的同时,缓凝水泥浆也在失重,只是失重的程度不一样。

(3)下套管前严格执行与套管尺寸相匹配的封井器芯子,方便整个固井过程中发现溢流时采取措施,有条件时还可以环空加压,提高固井质量,杜绝在候凝期间拆封井器;根据井况,高压油气井固井必须制定具体的应急措施和预案。

## 参考文献:

- [1] 张德润,张旭.固井液设计及应用(上)[M].北京:石油工业出版社,2005:21-26.
- [2] 柳亚芳,李玉勇,王言峰.水泥浆失重的影响因素实验研究[J].钻井液与完井液,2009,26(5):47-49.
- [3] 张明昌.固井工艺技术[M].北京:中国石化出版社,2009.
- [4] 覃毅,唐磊,王福新,等.苏北探区首口小井眼小间隙水平预探井尾管固井技术[J].中国石油和化工标准与质量,2013,(6):59.
- [5] 覃毅,连进报,肖龙雪,等.刘庄储气库注采气井177.8mm套管配套固井技术[J].科学技术与工程,2012,(8):1892-1894,1903.
- [6] 王乐顶,王长在,喻芬,等.固井冲洗液室内模拟评价方法研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(10):54-57.
- [7] 宋会光,李跃明,李良兵,等.对水泥浆失重规律的认识[J].西部探矿工程,2008,(12):114-117.
- [8] 高元,杨广国,常连玉,等.塔河油田桥古区块防气窜固井技术[J].石油钻采工艺,2013,(6):40-43.
- [9] 林强,胡萍,仵伟,等.低压易漏裸眼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.