

超低密度泡沫水泥浆固井技术研究与应用

初永涛

1. 中国石化固井与完井重点实验室, 北京 102206
 2. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206
- DOI: 10.61369/ERA.12260

摘 要 : 针对恶性漏失井动态承压堵漏周期长、费用高、防漏效果不理想的难题, 利用压力平衡固井防漏、泡沫堵漏贾敏效应, 提出了泡沫水泥浆近平衡或欠平衡防漏固井技术, 成功避免承压堵漏作业并实现浅表层失返性漏失井的成功堵漏。该技术在现场应用 18 口井, 成功实现漏失井堵漏和固井作业, 提高了固井优良率, 完全可以代替分级与尾管固井工艺, 深层漏失井固井周期平均节约承压堵漏周期 7 天以上, 浅表层漏失井平均节约钻井周期 30 天以上。对解决深井、高温井固井漏失、浅表层漏失承压堵漏等难题具有重要借鉴意义, 具有持续性推广价值。

关 键 词 : 固井; 泡沫水泥浆; 防漏; 堵漏

Research and Application of Cementing Technology of Ultra-Low Density Foam Cement Slurry

Chu Yongtao

Sinopec Key Laboratory of Sidening and Completion, Beijing 102206
Sinopec Petroleum Engineering Technology Research Institute Co., LTD. Beijing 102206

Abstract: in view of malignant leakage loss well dynamic pressure plugging cycle is long period, high cost, leakage effect is not ideal, using pressure balance cementing, foam plugging Gu Min effect, put forward the foam cement slurry near balance or balance leakage cementing technology, successfully avoid pressure plugging operation and realize the success of superficial leakage well plugging. This technology has applied 18 Wells in the field, and successfully realized the plugging and cementing operation, improved the cementing rate, and completely replaced the classification and tail pipe cementing process. The cementing cycle of deep leakage well saves the average pressure plugging cycle of more than 7 days, and the average drilling cycle of shallow leakage Wells of more than 30 days. It has important reference significance to solve the problems of deep well, high temperature well cementing loss, shallow surface leakage loss and bearing pressure plugging, and has the value of continuous promotion.

Keywords: cementing; foam cement slurry; leakage prevention; plugging

泡沫水泥浆含有微小、独立气泡, 其具有低密度、高强度、膨胀性等优势, 粘度相对高, 清洗泥饼效果好, 固井顶替效果好, 能够有效提高固井封固质量, 在国内外浅井、易漏井、页岩气井中均有应用 [1-4]。针对恶性漏失井, 目前主要采取动态承压堵漏等措施来提高地层承压能力, 但效果不理想, 固井过程中面临着承压难度大、周期长、固井过程中依然存在漏失等问题, 后期往往需要挤水泥等补救作业^[5-6]。对于喀斯特地貌失返性漏失井, 常伴随地层垮塌、卡钻等问题, 常规水泥浆进入地层即被地下暗河冲走, 无法实现堵漏和固结井壁^[7]。

为此, 提出了近平衡泡沫水泥浆固井工艺技术和堵漏技术, 完全可以代替分级与尾管固井, 避免了固井前承压作业, 超低密度泡沫水泥浆固井井壁及堵漏, 解决高温深井固井漏失与失返性漏失地层堵漏等难题具有重要借鉴意义。

一、低密度泡沫水泥浆防漏机理及体系构建

(一) 防漏机理

恶性漏失地层往往安全密度窗口窄, 水泥浆密度与顶替排量设计不当, 易造成井眼易涌、易漏, 难以实现固井全过程的压力平衡, 同时, 顶替效率低, 甚至会出现漏失和井涌而导致固井作业失败。利用平衡压力固井防窜与泡沫贾敏效应防漏, 设计泡沫

水泥浆密度与钻井液密度相接近, 提出了泡沫水泥浆近平衡防漏固井技术。

1. 平衡压力防窜

要求固井全过程中环空液柱压力大于地层孔隙压力, 但不超过地层破裂压力, 流体密度设计尤其关键^[8]。与常规水泥浆密度难以调整不同, 泡沫水泥浆密度可以通过气量进行随时调整, 在固井前可以根据钻井液密度与循环排量情况, 设计泡沫水泥浆密度

等于或略低于钻井液密度，兼顾防漏与防窜。

2. 贾敏效应防漏

由于地层孔隙结构复杂，孔喉大小存在差异，当气体或气泡通过孔喉窄口时产生的附加阻力的现象称为贾敏效应。由于泡沫水泥浆中含有高压气泡，当流经漏失地层发生漏失时，液柱压力将降低，内部压缩的泡沫将急剧膨胀，堵塞孔道，增加水泥浆向地层漏失阻力，起到防漏作用。

3. 提高顶替效率

窄密度窗口下，固井顶替排量受限制，难以满足紊流顶替，导致环空中泥饼清洗不掉。泡沫水泥浆粘度高，较常规水泥浆体系能够明显降低水泥浆指进现象，可实现全井筒类似“活塞式”推进，在相对低的排量下，提高环空窄边顶替效率。

（二）水泥浆体系构建

1. 发泡剂研究

泡沫是不溶性（或微溶）气体分散于液体或熔融固体中形成的多相分散体系，其中液体是连续相（分散介质），气体是非连续相（分散相）^[9]。泡沫具有很大的表面自由能，在破泡之后体系液体的总表面积大大减少，即能量降低，属于热力学上不稳定体系。采用阴离子与两性离子复配，复配时采用冷溶工艺，称取7份水溶液，依次加入2份CYT-1与1份CYT-3，并加入少量醇，构建了发泡剂NB-2。

发泡剂NB-2采用多层粘膜囊结构，核内充满氮气，阻止液相溶解空气。有效防止液体析出和气体穿透液膜扩散，增加了泡沫液膜表面强度，提升了发泡剂稳定性，如图1，稳定时间大于3000秒，较普通发泡剂稳定周期提高了30%~200%。

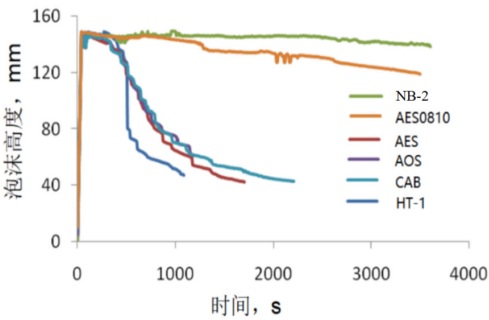


图1 发泡剂稳定性对比

2. 稳泡剂研究

基于纳米吸附与增粘稳泡作用机理^[10]，研制开发了具有独特的多层膜结构、双电子层排列的稳泡剂。创新引入纳米二氧化硅乳液，利用纳米颗粒界面吸附、颗粒间毛细管力及相互作用，有效阻止了气泡聚合，减少液膜排水，增强高温稳泡效果。基于纳米二氧化硅材料，采取高能球磨分散工艺制造了纳米稳泡液SB-2。

向5%浓度的发泡剂溶液中，分别加入不同浓度的BA10-乳液、SB-2有机增粘粉体、纳米复合粉体材料，经过150℃后测试其泡沫体系与析液半衰期测试结果如表1所示。从表中可以看出，BA10乳液有利于增加泡沫体积，其加量最大。添加SB-2有机增粘粉体，加量最小，由于溶液粘度增加明显，虽然稳定性增加，但是对泡沫体积影响较大。而纳米复合粉体稳泡剂，对泡沫体积

影响较小、析液半衰期相对较长，加量适中。

表1 三种稳泡剂对泡沫性能的影响

序号	稳泡剂类型	加量，%	泡沫体积，mL	析液半衰期，min
1	BA10乳液	2	890	12
		3	880	18
		5	850	20
2	XC 增粘剂	0.2	810	17
		0.3	750	21
		0.5	700	32
3	SB-2稳定剂	0.5	850	15
		1.0	830	27
		1.5	820	36

3. 泡沫水泥浆体系

通过室内测试评价，优选了高温降滤失剂、缓凝剂和增强剂，研发了低密度高强度弹性泡沫水泥浆体系。研选的降失水剂JLS具有优良的高温降滤失性，且有增粘稳泡效果，在150℃条件下能够有效控制滤失，加量范围为3%~6%。泡沫水泥石由于孔隙度高，抗压强度一般较低，因此选择无机颗粒材料作为泡沫水泥浆稳泡剂，测试结果见表2，乳液SCLS提高水泥石强度65%。最终形成泡沫水泥浆体系：800g水泥+4%降滤失剂JLS+5%SCLS增强剂+0.5%缓凝剂HNJ+45%水+2%发泡剂NB-2+1.5%SB-1。泡沫水泥浆密度范围0.7~1.6g/cm³。

表2 泡沫水泥浆基本性能

泡沫水泥浆密度，g/cm ³	泡沫体积分数，%	滤失量，mL	抗压强度，MPa
0.7	63	20	5.4
0.8	57	20	7
1.0	47	20	8
1.1	41	24	10.7
1.2	36	30	14
1.3	31	32	16.3
1.4	26	34	19.1
1.5	20	34	22
1.6	15	40	24

二、现场应用效果

（一）低承压井中的应用

JY107-21HF井是位于中国西南地区的一口页岩气井，该井完钻井深（TD）为5873.80米，垂深（TVD）为3884.0米，钻井液密度为1.27g/cm³。其固井难点如下：（1）钻井液最大漏失速率达42m³/h，钻井过程中的钻井液漏失增加了水泥浆漏失风险；（2）固井前循环钻井液时井内仍存在漏失，表明地层存在持续渗漏通道；（3）水泥浆密度需设计低于1.27g/cm³，以实现平衡固井，防止固井过程中水泥浆漏失；（4）JY107-21HF井循环时，钻井液密度为1.30g/cm³、排量1.6m³/min时，漏失速率为6m³/h，将密度降至1.29g/cm³、排量提至1.7m³/min后漏失停止，此时钻井液中已加入堵漏材料。

基于上述难题，设计本井的固井浆柱结构如表3所示。该井固井作业于2023年3月17日完成，全井固井质量优质率>95%（部分检测曲线见图2）。测井显示水泥环顶部位置为1127.6m，表明水泥浆凝固期间环空发生轻微漏失，但满足设计要求。生产运行

2年后未出现环空带压，标志着高漏失井平衡泡沫固井技术成功实施。

表3 JY107-21HF 井固井浆柱设计

正注	密度, g/cm ³	封固井段, m
先导浆	1.27	—
冲洗液	1.25	—
泡沫领浆	1.60 (1.25)	1000~2900
泡沫中浆	1.88 (1.50)	2900~3500
泡沫尾浆	1.88 (1.80)	3500~5160
	1.80	5160~5360

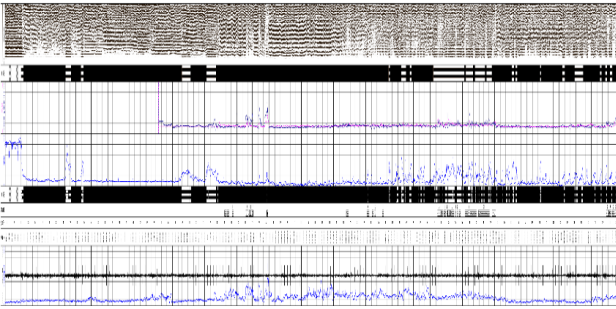


图2 JY107-21HF 井固井质量

(二) 堵漏应用

中国西南浅表层喀斯特地貌破碎带溶洞、裂缝发育，失返、井下持续掉块、卡钻，漏、垮、塌并存导致无法正常钻进（图3），造成了多口井被迫弃井重钻，钻完井周期延长30~60天。采用泡沫水泥浆技术，采用泡沫水泥浆堵漏技术，首先正注密度0.9~1.0g/cm³泡沫水泥浆，顶替井筒内钻井液及清洗井壁，提高界面胶结质量；然后反挤密度0.8~0.9g/cm³泡沫水泥浆，填充井眼及漏失地层，注浆过程中稠化并滞留在井筒及漏失地层内。

SY-1井强钻至中完井深845m，历经三次水泥塞堵漏施工，井口处于失返，通井只能至375m。通过采用0.5g/cm³前置液与0.7g/cm³泡沫水泥浆封堵体系封堵漏层并固井井壁370~845m。候凝48h后探塞，塞面274m，扫塞后保证能够继续钻进至845m，顺利下入表层套管固井。

SY-2井钻进至井深580m发生明显漏失，探液位208m。堵漏措施包括光钻杆下至707m，采用1.0g/cm³堵漏型泡沫水泥浆封堵体系封固0~770m。施工过程井口压力由1.88MPa升至2.33MPa，稳压0.56MPa，后续扫塞并钻进至856m，达到设计井深，成功堵漏和固结井壁。



图3 浅表层返出的掉块

三、结论

(1) 基于阴离子与两性离子复配研发了发泡剂NB-1，基于纳米二氧化硅材料和高能球磨分散工艺制造了纳米稳泡液SB-2，构建了密度范围0.7~1.6g/cm³的泡沫水泥浆体系。

(2) 形成的低密度泡沫水泥浆技术在低承压漏失井中提高了固井成功率和固井质量，现场应用效果显著；超低密度堵漏泡沫水泥浆成功解决失返性漏失井的垮塌和漏失问题，提高了区块的钻井速率和开发效率。

参考文献

[1] 刘彦学. 龙凤山气田易漏地层低密度固井技术[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(14): 192-194.

[2] 许树谦. 充气泡沫水泥浆固井技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 1998.

[3] 朱礼平. 液氮泡沫水泥固井工艺及施工技术研究[D]. 西南石油大学, 2007.

[4] 肖京男, 刘建, 桑来玉, 等. 充气泡沫水泥浆固井技术在焦页9井的应用[J]. 断块油气田, 2016, 23(6): 835-83.

[5] Odden, D. A., Lende, G., Rehman, K., Lilledal, L., Smyth, C., Diesen, M., ... Laget, M.. Use of Foam Cement to Prevent Shallow Water Flow on Three Wells in Norwegian Waters. International Petroleum Technology Conference. doi:10.2523/IPTC-19747-MS.2020.

[6] Ahmady, A., Turton, S., Lewis, S., Grant, M., & Murphy, B. Improved Channeling and Gas Migration Issues Using Foam Cement: Case History, Montney Formation. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/199614-MS.2020.

[7] Guillot, D. J. and E. L. Bastard. Learnings from Foamed Cement Job Simulations[C]. Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA, 2012.

[8] Torgeir Kjøfstedt. New methodology for laboratory mixing of foam cement to better reflect onsite mixing method[D]. Norway: University of Stavanger, 2011.

[9] GUILLLOT D J, Le BASTARD E. Learnings from foamed cement job simulations[R]. SPE 23666, 2012.

[10] DOOLY M, ELHANCHA A, de BRUIJN G, et al. Application of real-time process control and engineering software simulation in foam cementing[R]. SPE 168033, 2014.