

龙凤山区块泡沫水泥固井技术的研究与应用

郝 震 冯丹阳 李万兴 (中石化华东石油工程有限公司工程技术分公司, 江苏 扬州 225009)

摘 要: 龙凤山区块是东北油气分公司的重点勘探区域, 固井存在易漏失的难点和固井质量差的现状。为解决该问题, 于该区块开展了机械注氮气泡沫水泥固井技术的研究, 通过设计泡沫水泥浆基浆, 研究并引进注氮气设备, 及制定配套技术措施, 形成了低密度泡沫水泥浆技术, 并于龙凤山区块北 220-1 等 9 口井进行了现场应用, 有效解决了该区块固井易漏失的技术难题, 显著提高了固井质量。同时改进了该区块固井工艺, 节约了勘探开发成本, 加速了勘探开发进程。

关键词: 龙凤山区块; 固井; 氮气; 泡沫水泥; 低密度水泥浆

松辽盆地中央凹陷南部龙凤山地区是中石化东北油气分公司这几年来重点勘探区域。2013 年预探井北 2 井试气获得工业油气流, 随后部署评价井北 201 井, 在营城组获得高产油气流。2015 年 11 月, 北 209 井的钻探获得了高产油气流, 种种迹象表明, 龙凤山地区营城组中蕴含着丰富的非常规油气资源: 天然气控制储量在 116.2 亿方, 凝析油储量 404.73 万 t。该区块泉头组及以上地层水敏性泥页岩发育, 成岩性差, 垮塌风险高, 营城组地层裂缝发育, 极易发生漏失。2018 年至 2019 年 11 月, 东北油气分公司在龙凤山区块共部署了 18 口井, 针对地层承压能力差的技术难点, 均采用尾管回接工艺配合漂珠低密度水泥浆体系固井, 但效果较差。统计固井质量发现, 18 口井仅 1 口井固井质量达到优秀。常规低密度水泥浆加入低密度材料减轻剂, 如漂珠、玻璃微珠、陶粒等, 特殊减轻剂材料 (如 3M 玻璃微珠等) 可以将水泥浆密度降低至 $1.20\text{g}/\text{cm}^3$, 但成本较高。受减轻剂成本限制, 一般该体系水泥浆密度为 $1.30\text{--}1.50\text{g}/\text{cm}^3$, 即便配合尾管固井减少一次性封固长度, 仍无法满足龙凤山区块固井防漏要求。

泡沫水泥浆是在水泥浆中混入一定比例的气泡形成泡沫, 以降低水泥浆密度, 发泡工艺主要有化学发泡和机械充气发泡 2 种方式。化学发泡工艺较为简单, 利用水泥外加剂中不同的水剂和粉剂在现场混合时发生化学反应产生气泡。但发泡量较小, 水泥浆密度降幅有限, 且无法实时控制发泡量, 难以随时调整密度。机械充气泡沫工艺发泡量大, 水泥浆密度降低幅度大, 尤其适用于长封固段、超低密度水泥浆固井。针对龙凤山区块的地层特点和固井技术要求, 选择引进机械充气泡沫固井工艺, 并开展研究和应用。

1 龙凤山区块固井技术难点

龙凤山区块油气井是一般采用三级井身结构的水平井。二开采用 (311.2mm) 钻头钻进至泉头组中完, 下入 (244.5mm) 技术套管; 三开采用 (215.9mm) 钻头钻进至火石岭组完钻, 下入 (139.7mm) 油层尾管, 本开次固井主要面临 2 大难点:

①井底温度高: 本区块目的层垂深 $3500\text{m--}3600\text{m}$; 低温梯度较高, 约 $3.16^\circ\text{C}/100\text{m}$; 井底温度约 125°C ; 高

温对水泥浆总体性能要求严格;

②该区块目的层为营城组, 营城组砂岩具有致密低渗、物性变化快、非均质性强的特征, 其底部与沙河子组呈假整合接触; 顶部的营 II 与营 I 组地层受不同程度的风化, 与上覆登娄组地层呈不整合接触, 接触面易发生裂缝漏失, 地层承压能力差, 且堵漏难度大。漏失风险大成为该区块固井的主要难点。

前期针对龙凤山区块漏失问题, 采用了低密度水泥浆体系配合尾管工艺固井, 但受常规低密度减轻材料成本限制, 固井过程中不可避免发生漏失, 已完成井的固井质量均不理想, 制约了勘探开发进程。因此, 需研究密度更低且经济高效的泡沫水泥浆, 以解决龙凤山区块的固井漏失问题。

2 氮气泡沫水泥浆研究

2.1 研究思路

选择使用漂珠 - 低密度水泥浆作为基浆, 根据地层压力变化, 充入定量氮气, 加入发泡剂, 使氮气在水泥浆中均匀分散, 形成泡沫, 同时使用稳泡剂保持泡沫稳定性, 形成不同密度的氮气泡沫水泥浆。根据注入氮气的量不同, 可产生不同密度的泡沫水泥浆, 以满足龙凤山区块固井防漏技术要求。

2.2 泡沫水泥浆制备原理及方法

首先采用油井 G 级水泥、漂珠、微硅、降失水剂等材料配置密度为 $1.50\text{g}/\text{cm}^3$ 的漂珠 - 低密度水泥浆作为基浆。在密闭环境中先后加入发泡剂 SCF、稳泡剂 SCW 及由液氮气化后的氮气。泡沫水泥浆密度由注入氮气的量决定, 最低可至 $0.5\text{g}/\text{cm}^3$ 。混合后的泡沫水泥浆面密度满足质量守恒原理。

利用气体体积的波义尔定律和质量守恒定律可计算出在一定井下压力下需要注入常压下氮气的量。此为计算氮气注入量的基本原理, 条件均在理想状态下。在实际生产中, 考虑到温度对气体体积的影响, 以及氮气的体积压缩系数常数, 通过室内试验和现场验证, 推导出泡沫水泥浆密度计算公式 (1):

$$\rho_f = \left(1 - \frac{V_n P_a R T_h}{V_n P_a R T_h + V_b P_h T_a}\right) \rho_b + \frac{V_n P_a R T_h}{V_n P_a R T_h + V_b P_h T_a} \rho_n \quad (1)$$

式中：

- ρ_f —泡沫水泥浆密度， g/cm^3 ；
 ρ_b —基浆密度， g/cm^3 ；
 ρ_n —井下压力温度条件下氮气密度， g/cm^3 ；
 V_n —常温常压下氮气体积， mL ；
 V_b —基浆体积， mL ；
 P_a —标准大气压， MPa ；
 P_h —井下压力， MPa ；
 T_h —井下温度， K ；
 T_a —标准状态下温度， K ；
 R —氮气体积压缩系数。

实际应用中，以此公式为基础，井下以微化分段方式处理，取每个微化单位中心点处的温度和压力；现场根据基浆注入速度，计算确定地面注气量。

2.3 泡沫水泥浆性能评价

泡沫水泥浆性能评价以室内评价基浆和加入发泡剂、稳泡剂的复合浆性能为主。模拟龙凤山区块井下条件（静止温度 125°C ，循环温度 100°C ，压力 40MPa ），分别对基浆和复合浆进行水泥浆的稠化时间、失水、流动性、稳定性及养护 48h 抗压强度进行试验（表 1）：

表 1 氮气泡沫水泥浆基浆室内试验性能

项目	密度	API 滤失量	48h 抗压强度	沉降 稳定性	稠化时间
	g/cm^3	mL	$\text{MPa}(93^\circ\text{C})$	g/cm^3	$\text{min}(70\text{Bc})$
基浆	1.50	34	18.4	+0.02	275
复合浆	1.50	32	18.0	+0.02	303

注：

基浆配方：450gG 级水泥 +60g 漂珠 +45g 微硅 +18g 降失水剂 +0.7g 缓凝剂。

复合浆配方：基浆配方 +0.2g 发泡剂 +0.2g 稳泡剂。

由表 1 看出，泡沫水泥浆基浆及加入发泡剂和稳泡剂后的复合浆浆体稳定性良好，失水和养护 48h 强度均能满足套管封固要求。

3 泡沫固井工艺研究

氮气泡沫固井工艺的核心是机械充氮气设备。龙凤山区块使用的泡沫固井充氮气设备由中石化工程技术研究院自主研发，主要由泡沫发生器、泡沫剂泵送系统、氮气压力控制系统和自动化远程控制模块组成。水泥基浆通过固井水泥压力车混拌后注入混合器，与发泡剂、稳泡剂混合。后流入泡沫发生器，与发生器产生的高压氮气混合形成泡沫水泥浆（图 1）。其中， -198°C 的液氮先依靠增压泵注入蒸发器，气化成高压氮气，再注入混合发泡剂、稳泡剂的基浆，随后将产生的高压泡沫水泥浆注通过水泥头注入井内。注入发泡剂和稳泡剂的线路上、混合后的线路上及注气线路上均装有流量计，监控注液量和注气量，采集的数据实时传输至监控系统，自动化远程控制模块根据水泥浆排量和密度设计要求调节氮气、发泡剂和稳泡剂的排量，实现泡沫水泥浆密度的实时控制。当不需要注泡沫水泥浆时，可直接关闭旁通阀两侧闸门，打开旁通阀，水泥浆可由固井压力车直

接注入井内，以实现固井连续作业。

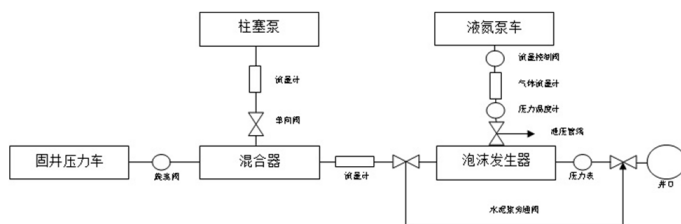
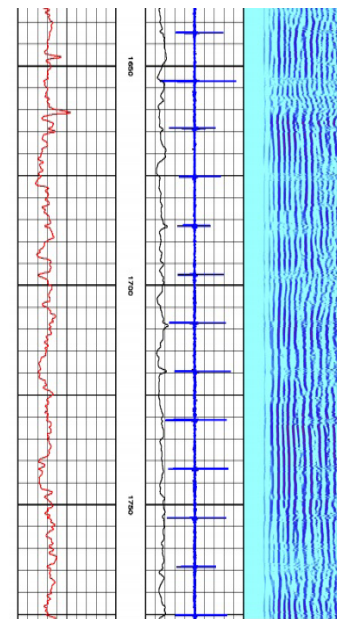
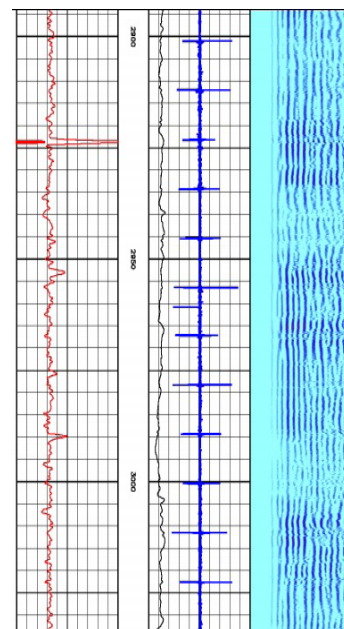


图 1 泡沫固井氮气注入示意图



(a) 1640m-1775m 固井质量



(b) 2900m-3030m 固井质量

图 2 北 220-1 井 CBL 声幅测井

4 泡沫水泥固井技术现场应用

针对龙凤山区块的地质特征，于北 210-1 井、北 220-1 井等井开展了氮气泡沫水泥固井技术的现场试验。通过 CBL 和 VDL 测井结果显示一、二界面胶结良好，固井质量较前期明显提高。

4.1 北 220-1 井固井施工情况

2020年10月16日下套管至井深4589m,开泵循环钻井液两周后坐挂(循环排量 $1.8\text{m}^3/\text{min}$,泵压 7.5MPa);坐挂结束继续节流循环 $1\text{h}30\text{min}$ (循环排量 $1.5\text{m}^3/\text{min}$,泵压 8MPa);于16:00开始固井,注入前置液 10m^3 ;注入密度为 $1.50\text{g}/\text{cm}^3$ 领浆 8m^3 (排量 $1.2\text{m}^3/\text{min}$,泵压 14MPa);注入密度为 $1.50\text{g}/\text{cm}^3$ 泡沫浆基浆 60m^3 (排量 $1.2\sim 1.0\text{m}^3/\text{min}$,压力 16MPa ,注氮气后泡沫浆密度 $1.15\text{g}/\text{cm}^3$);注入密度为 $1.85\text{g}/\text{cm}^3$ 的尾浆 35m^3 (排量 $1.5\text{m}^3/\text{min}$,压力 $16\sim 8\text{MPa}$);钻井泵替清水 30m^3 (排量 $1.7\text{m}^3/\text{min}$,压力 $0\sim 16\text{MPa}$);固井压力车替浆 20.3m^3 (排量 $0.8\sim 0.3\text{m}^3/\text{min}$,压力 $15\sim 22\text{MPa}$);碰压至 25MPa ;水泥浆返出地面。碰压后进行环空加压作业,环空注水泥 2.8m^3 ,注清水 0.5m^3 (排量 $0.2\text{m}^3/\text{min}$,压力 $4.8\sim 6.2\text{MPa}$)。固井施工顺利。

其中注入泡沫水泥浆基浆共 60m^3 ,形成泡沫水泥浆的氮气注入排量见表2:

表2 北 220-1 井氮气注入排量

级数	基浆, m^3	基浆排量, m^3/min	气体排量, m^3/m^3
1	10	1	20-30
2	10	1	35-50
3	10	1	50-70
4	10	1	60-80
5	10	1	70-90
6	10	1	80-90

4.2 北 220-1 井固井质量

通过 CBL 测井结果显示,该井 300m-3260m 泡沫水泥浆封固井段全井段声幅相对值小于 20%,固井质量优质(图2)。

4.3 龙凤山区块其他泡沫固井质量

至 2020 年底,龙凤山区块共使用泡沫固井技术固井 9 口,其中 7 口井固井质量优质(表3),较前期采用漂珠低密度水泥浆配合尾管固井的 18 口井,固井质量有了显著提升。

表3 龙凤山区块使用泡沫固井技术固井质量

井号	固井质量	固井方式
北 210-1	优秀	泡沫
北 213-9HF	合格	泡沫
北 210-2	优秀	泡沫
北 213-12HF	优秀	泡沫
北 5	优秀	泡沫
北 222	优秀	泡沫
北 217-2HF	优秀	泡沫
北 201-28HF	良好	泡沫
北 220-1 井	优秀	泡沫

5 泡沫水泥浆在龙凤山区块应用的经济效益

龙凤山区块前期采用尾管回接固井,固井前需要根据固井施工时预测井底压力当量密度进行动态承压堵漏,平均承压堵漏周期为 5 天;尾管固井及候凝时间为 2.5 天;候凝结束后需要探扫上塞、扫下塞、磨铣回接筒三趟钻,总计需要时间约 6 天;回接固井及候凝需 2.5

天;回接固井扫塞需 1 天。总计完井周期约 17 天(不含下套管时间)。而采用泡沫固井后,可实现一次性封固,省去了扫塞时间,只需固井候凝时间总计 4 天。累计可以节约完井周期 13 天,按 50 钻机作业一天综合成本约 10 万元计算,累计节约 130 万元。

增加泡沫固井作业费及材料费约 60 万元,节约 1 次固井施工作业费约 6 万元。

综上,单井使用泡沫固井产生的直接经济效益超过 70 万元;同时完井周期的减少加快了区块勘探开发进程;固井质量的提高对后期开采产量的提升及单井寿命的增加都有显著影响,其收益不可估量。

6 结论

①氮气泡沫水泥固井技术以漂珠低密度水泥浆作为基浆,采用机械注氮气的方式,有效解决了龙凤山区块固井漏失导致固井质量差的问题,证明了该技术的可靠性和有效性;

②通过节约完井周期,氮气泡沫水泥固井技术的应用能有效节约勘探开发成本,加快勘探开发进度;

③氮气泡沫水泥在龙凤山区块的成功应用,证明了该技术在解决固井一次性封固段长、易漏失等难题方面是有效可靠的,并且对提高固井质量有很大帮助。对解决其他区块存在类似固井难点的情况具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 江琦.长岭凹陷龙凤山气田营城组致密砂岩储层特征[D].成都:成都理工大学,2017.
- [2] 褚奇,李涛,王栋,等.龙凤山气田强抑制封堵型防塌钻井液技术[J].钻井液与完井液,2016,33(5):35-40.
- [3] 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):835-837.
- [4] DE ROZIERES J,FERRIERE R.Foamed-cement characterization under down-hole conditions and its impact on job design[J].SPE Production Engineering,1991,6(3):297-304.
- [5] 陈雷,杨红岐,肖京男,等.杭锦旗区块漂珠-氮气超低密度泡沫水泥固井技术[J].石油钻探技术,2018,46(3):34-38.
- [6] 殷洋溢.新型泡沫水泥固井技术的研究与应用[D].成都:西南石油学院,1998.
- [7] 田红.泡沫水泥浆固井技术在吐哈油田的研究与应用[J].断块油气田,2002,9(1):58-61.
- [8] 匡红,孙长征.新型泡沫水泥浆的研究与应用[J].今日科苑,2008(18):1.
- [9] 应建成.新型泡沫水泥浆体系在胜利油田莱州湾区块的应用[J].钻采工艺,2009,32(6):3.
- [10] 顾军,高德利,何湘清,等.泡沫水泥固井技术研究[J].天然气工业,2003(z1):3.

作者简介:

郝震(1988-),男,汉族,江苏扬州人,硕士,工程师中级职称,研究方向:钻完井工程。