

一种天然气井用泥饼固化剂的性能评价与现场应用

高航献

中国石油化工股份有限公司勘探分公司, 四川 成都

收稿日期: 2023年12月4日; 录用日期: 2024年1月10日; 发布日期: 2024年1月18日

摘要

为了提高元坝地区天然气井固井二界面胶结质量, 介绍了一种适用于水基钻井液条件下的泥饼固化剂GJM。室内实验结果表明, 在温度压力为 $120^{\circ}\text{C} \times 0.01 \text{ MPa}$ 、泥饼厚度为0.5 mm的条件下, 采用GJM的固井二界面胶结强度较未采用GJM的提高了8~10倍。GJM与水基钻井液和水泥浆具有良好的相容性, 满足天然气井固井作业要求。5口天然气井的现场应用结果表明, 固井一、二界面胶结质量合格率100%, 优良率100%。其中, YL12井目前已完成压裂测试, 天然气产量77.17万方/日, 且压裂前后环空均未出现带压, 为高压天然气的高效勘探开发提供了良好的井筒保障。

关键词

天然气井, 胶结质量, 泥饼固化剂, 性能评价, 现场应用

Performance Evaluation and Field Application on a Mud Cake Solidification Agent for Natural Gas Wells

Hangxian Gao

Exploration Company, SINOPEC, Chengdu Sichuan

Received: Dec. 4th, 2023; accepted: Jan. 10th, 2024; published: Jan. 18th, 2024

Abstract

To improve the cementing quality of the cement-formation interface in natural gas wells in Yuan-

nba area, a mud cake solidification agent (GJM) is introduced. It is suitable for the condition of water-based drilling fluid. The results of laboratory experiments show the bonding strength of the cement-formation interface using GJM is 8~10 times higher than that without GJM under the condition of 120°C × 0.01 MPa and 0.5 mm of the mud cake thickness. GJM has good compatibility with water-based drilling fluid and cement slurry, which meets the cementing requirements of natural gas wells. The field application results of five natural gas wells show that the qualification rate of cementing quality at the casing-cement and cement-formation interfaces is 100%, and the excellent and good rate is 100%. Among them, natural gas well YL12 has completed the fracturing test. The natural gas production reached $77.17 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$. There is no pressure in the annulus before and after fracturing, which provides a good wellbore guarantee for the efficient exploration and development of natural gas.

Keywords

Natural Gas Well, Cementing Quality, Mud Cake Solidification Agent, Performance Evaluation, Field Application

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水泥与地层胶结面(固井二界面)封隔质量差和后续压裂作业对水泥环的损害是油气井环空带压(环空气窜)的一个重要原因[1]-[9]。研究表明,导致固井二界面封隔失效的主要因素是泥饼不能固化和界面不能交联,结果是固井二界面胶结强度降低[9] [10],原因是固井二界面水泥环、泥饼、地层三者不能实现整体固化胶结[8]。泥浆转化为水泥浆(MTC)方法通过把钻井液转化为水泥浆可以实现了泥饼固化和界面交联[10] [11] [12] [13],但MTC固化体存在严重的脆裂问题;泥饼仿地成凝饼(MTA)方法通过改性钻井液但不改变水泥浆也可实现泥饼固化和界面交联[14] [15],但囿于钻井液性能要求和井下温度条件的限制,而只能应用于2500 m以内的浅井。因此,为了提高元坝地区高压天然气井固井二界面胶结质量,室内实验评价了一种泥饼固化剂[16]的有效性和实用性,分析了元坝地区5口井使用这种泥饼固化剂的现场应用效果。

2. GJM 的性能评价

2.1. 实验材料

实验用钻井液取自元坝地区的YB211井,该井所用的水基钻井液配方为3%~4%膨润土 + 0.2%~0.3%聚丙烯酸钾 + 2%~3%天然高分子降失水剂 + 3%~4%磺化酚醛树脂-2 + 3%~4%磺化褐煤树脂 + 2%~3%双保型纳米乳液 + 2%~3%多软化点封堵防塌剂 + 2%~3%聚合醇防塌剂 + 0.5%~1%非渗透处理剂 + 2%~3%无荧光液体润滑剂 + 其它添加剂,井内实际使用的钻井液性能如表1所示。室内评价所用泥饼固化剂包括GJM-I型和GJM-II型两种,由中国地质大学(武汉)研制。水泥及其添加剂取自YB211井(胶粒型防气窜水泥浆配方)。根据YB211井封固段地层的渗透率和孔隙度实际情况,自制仿地井筒的渗透率为 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度为3.5%,内筒直径为33 mm,外筒直径为100 mm。

Table 1. The water-based drilling fluid performance from well YB211
表 1. YB211 井水基钻井液性能

密度(g/cm ³)	粘度(s)	初切/终切(Pa)	泥饼(mm)	滤失(mL/30min)
2.15	67	5/7	0.5	4.5
C _s (%)	塑粘(mPa·s)	动切(Pa)	pH	MBT (g/L)
0.4	42	13	11	23

2.2. 实验条件

元坝地区天然气井声波变密度测井一般为 3 d 左右, 结合 YB211 井实测温压情况, 室内评价固井二界面胶结强度的样品养护时间分别为 3 d、7 d 和 15 d, 泥饼厚度均为 0.5 mm, 温度压力为 120℃ × 常压, 采用水养方式。泥饼固化剂 GJM-I 型和 GJM-II 型与水基泥饼的接触时间分别为 80 s 和 160 s。泥饼固化剂 GJM-I 型和 GJM-II 型的相容性(稠化时间)实验温度为 95℃, 实验压力为 100 MPa, 而 GJM 对流变性的影响实验温度为 95℃, 实验压力为常压。

2.3. 实验方法

根据参考文献[6] [10]的实验方法进行固井二界面胶结强度测试, 按 API 规范 10 进行泥饼固化剂 GJM-I 型和 GJM-II 型的相容性(稠化时间)的相容性实验。

2.4. 评价结果与分析

2.4.1. GJM 提高固井二界面胶结强度的效果

采用 GJM 型泥饼固化剂提高固井二界面胶结强度的实验操作步骤和实验测试结果如图 1 和表 2 所示。

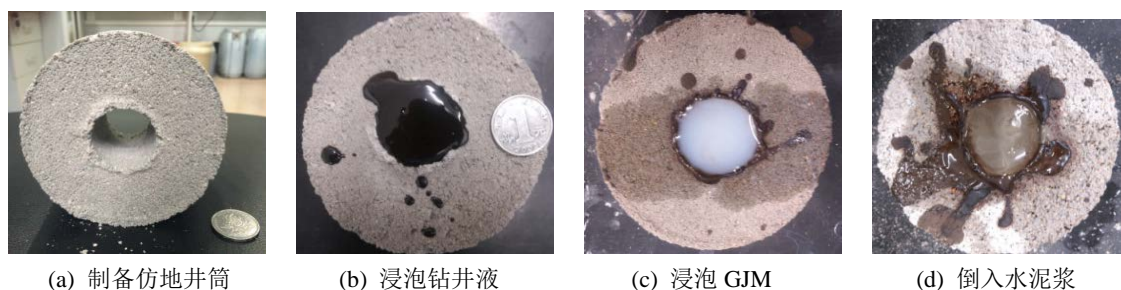


Figure 1. Diagram of experimental operation steps
图 1. 实验操作步骤图

Table 2. The experimental test results of bonding strength at the cement-formation interface
表 2. 固井二界面胶结强度实验测试结果

养护时间(d)	提高率均值(%)	原浆(MPa)			泥饼固化(MPa)		
		平均	最大	最小	平均	最大	最小
3	907.16	0.0335	0.0441	0.0297	0.3374	0.4262	0.2887
7	829.57	0.0629	0.0781	0.0382	0.5847	0.6628	0.5238
15	988.45	0.1039	0.1290	0.0847	1.1309	1.2402	1.0584

由表 2 可知, 泥饼固化后的天然气井固井二界面胶结强度随着养护时间的延长而逐渐增大, 且当养护时间为 15 d 时, 其平均值更是达到了 1.1309 MPa, 而泥饼未固化的天然气井固井二界面胶结强度平均值则仅为 0.1039 MPa, 即采用泥饼固化剂后的固井二界面胶结强度较采用前的提高幅度约 8~10 倍。

2.4.2. GJM 与水基钻井液和水泥浆的相容性

1) GJM 对水基钻井液流变性的影响

由表 3 可以看出, GJM 对天然气井用水基钻井液和胶粒型防气窜水泥浆的流变性不仅没有影响, 而且流性指数增大了 60.85%~64.90%, 即更有利于提高高压天然气井固井的顶替效率。

Table 3. The influence of GJM on the rheological properties of water-based drilling fluid

表 3. GJM 对水基钻井液流变性的影响

混合浆体配方	体积百分比(%)	Φ600	Φ300	Φ200	Φ100	Φ6	Φ3	流性指数
水泥浆	100	67	45	37	29	16	12	0.567
钻井液: I 型: II 型: 水泥浆	20:20:20:20	60	27	19	10	3	2	0.912
I 型: II 型: 水泥浆	20:30:40	59	31	24	15	6	3	0.935

2) GJM 与稠化时间的影响

由表 4 和表 5 可以看出, 无论是小样(即室内配方样品)或是大样(即现场配方样品), GJM 对 YB211 井用弹性防气窜水泥浆的稠化时间均无影响。

Table 4. The influence of GJM on the thickening time of indoor samples

表 4. GJM 对小样稠化时间的影响

混合浆体配方	体积百分比(%)	稠化时间(min)	实验状态	稠度(Bc)
水泥浆	100	249	已稠化	67.0
水泥浆	100	246	已稠化	70.0
II 型: 水泥浆	50:50	480	未稠化	8.5
II 型: 水泥浆	30:70	493	未稠化	7.5
II 型: 水泥浆	10:90	498	未稠化	2.0
钻井液: I 型: II 型: 水泥浆	25:25:25:25	487	未稠化	6.3
钻井液: I 型: II 型: 水泥浆	20:20:20:40	483	未稠化	3.6
I 型: II 型: 水泥浆	33.3:33.3:33.3	479	未稠化	6.5
I 型: II 型: 水泥浆	20:40:40	540	未稠化	2.5
I 型: II 型: 水泥浆	20: 30:50	489	未稠化	7.5

Table 5. The influence of GJM on the thickening time of on-site samples

表 5. GJM 对大样稠化时间的影响

混合浆体配方	体积百分比(%)	稠化时间(min)	实验状态	稠度(Bc)
水泥浆	100	255	已稠化	70.0
II 型: 水泥浆	50:50	480	未稠化	3.6

续表

II 型: 水泥浆	15:85	480	未稠化	0.3
I 型: II 型: 水泥浆	33.3:33.3:33.3	480	未稠化	9.3
I 型: II 型: 水泥浆	20: 30:50	480	未稠化	3.1

3. 泥饼固化与界面交联的证据

3.1. GJM 作用前后固井二界面胶结对比图

GJM 作用前后养护 3 d 水泥柱承压(压脱)后起开的照片见图 2。

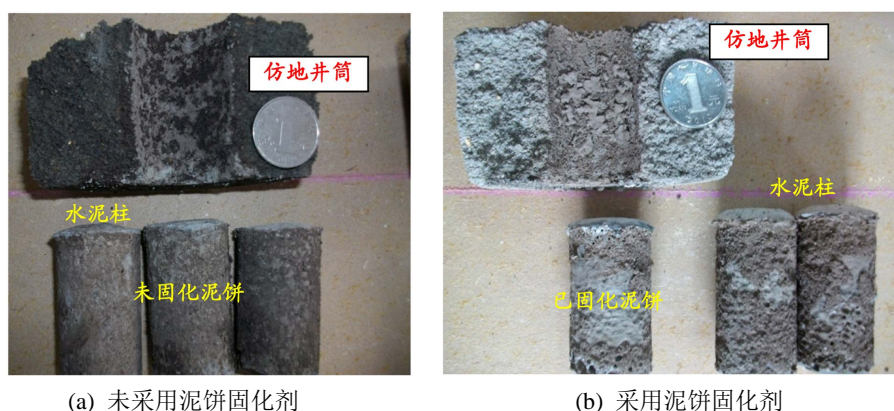


Figure 2. Comparison diagram of the interface bonding before and after GJM
图 2. 采用 GJM 作用前后界面胶结对比图

由图 2 的可知, 未固化泥饼的表面疏松、粗糙, 而固化泥饼的表面致密、光滑, 这不仅是后者的固井二界面胶结强度较前者的提高约 8~10 倍的主要原因, 而且前者因地层流体更易浸入溶蚀泥饼而引起天然气沿固井二界面发生气窜, 即后者则有利于防止天然气井发生环空气窜和环空带压。

3.2. GJM 作用后泥饼固化和界面交联的 SEM 图

GJM 作用后养护 3 d 的泥饼固化和界面交联 SEM 测试结果见图 3。

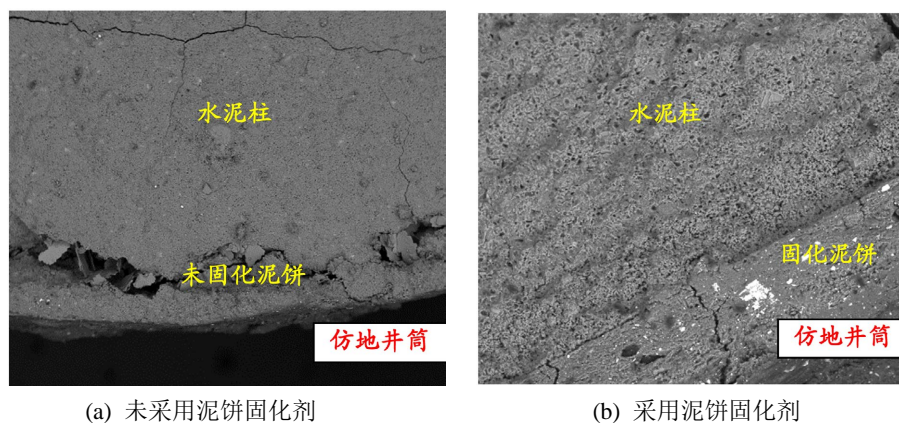


Figure 3. Comparison diagram of the interface cross-linking before and after GJM
图 3. 采用 GJM 前后界面交联示意图

由图3可知,左图因未采用GJM,固井二界面各组分呈现分离的状态,且存在较大的周向裂缝,结果是固井二界面胶结强度低,而右图因采用了GJM,固井二界面各组分显然已相互交联,且未出现周向裂缝,结果是固井二界面胶结强度高,进而可大幅度提高天然气井筒完整性,有利于防止环空带压。

4. 现场应用

4.1. 现场工艺技术

天然气井内钻井液、现用前置各种流体保持不变,只需把GJM-I型泥饼固化剂和GJM-II型泥饼固化剂作为固井前置液使用:

1) 将密度为 1.11 g/cm^3 、容量为50 L的GJM-I型泥饼固化剂现场配制为 2 m^3 备用。

2) 将密度为 1.06 g/cm^3 、容量为50 L的GJM-II型泥饼固化剂现场配制为 4 m^3 备用。

3) 固井流体依次注入程序:---先导浆(新鲜钻井液)►现用各种冲洗液►泥饼固化剂GJM-I型 2 m^3 ►泥饼固化剂GJM-II型 4 m^3 ►设计密度水泥浆(包括低密度水泥浆或高密度水泥浆)►---

4.2. 现场应用效果

GJM-II泥饼固化剂前期在元页HF-1井等进行了先导性现场试验,根据现场试验情况对泥饼固化剂及其现场使用方法进行了改进。随后在位于四川省广元市苍溪县元坝地区的5口高压天然气井固井中进行了现场应用,效果显著(表6):固井一、二界面胶结质量合格率100%,优良率100%,且均为发生压裂前环空气窜和压裂后环空带压的现象。其中,YB211井被评为中石化西南石油工程有限公司“示范工程”,而YL12井天然气产量77.17万方/日。5口高压天然气井的现场应实践表明:1)采用泥饼固化剂可大幅提高元坝地区天然气井的固井质量,尤其是固井二界面胶结质量,而且其工艺简单,安全可靠;2)采用泥饼固化剂可显著提高天然气井筒完整性,满足元坝地区天然气井大型压裂要求。

Table 6. The actual application situation of GJM in natural gas wells in Yuanba area

表 6. 元坝地区天然气井泥饼固化剂现场应用情况

序号	试验井井号	井深(m)	GJM-I型(m^3)	GJM-II型(m^3)	固井质量	大型压裂前后是否环空带压	备注
1	YB211井	4754.96	2	4	优质	前:不带压 后:不带压	已压裂测试
2	YL20井	3117.00	2	4	优质	前:不带压 后:待压裂	已压裂测试
3	YB107井	5075.00	2	4	优质	前:不带压 后:不带压	已压裂测试
4	YL18井	5025.00	2	4	良好	前:不带压 后:待压裂	已压裂测试
5	YL32井	5080.00	2	4	优质	前:不带压 后:待压裂	已压裂测试

5. 结论

1) 当养护时间为15 d时,采用GJM的固井二界面胶结强度平均值可达 1.1309 MPa ,而未采用GJM的平均值则仅为 0.1039 MPa ,即采用GJM的较未采用的提高了约8~10倍。

2) GJM 与水基钻井液和胶粒型防气窜水泥浆的相容性完全能够满足高压天然气井的固井安全作业。

3) 未固化泥饼的表面疏松、粗糙，而固化泥饼的表面致密、光滑，这不仅是后者的固井二界面胶结强度较前者的提高约 8~10 倍的主要原因。

4) 5 口井现场实践表明，泥饼固化剂可显著提高元坝地区天然气井的固井质量，且其防气窜效果和环空封隔能力显著，有利于提高元坝地区天然气井的井筒完整性，满足页岩元坝地区天然气井大型压裂需要。

参考文献

- [1] 顾军, 高德利, 石凤歧, 陈道元, 李泽林. 论固井二界面封固系统及其重要性[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(2): 7-10.
- [2] McDaniel, J., Watters, L. and Combs, N. K. (2014) Zonal Isolation Assurance: Relating Cement Mechanical Properties to Mechanical Durability. Proceedings of the 2nd Unconventional Resources Technology Conference, Colorado, 25-27 August 2014, 132-141. <https://doi.org/10.15530/urtec-2014-1913405>
- [3] 石榆帆, 张智, 肖太平, 周晓昱, 汪鹏. 气井环空带压安全状况评价方法研究[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2012, 14(1): 97-99.
- [4] Landry, G., Welty, R.D., Thomas, M., Vaughan, M.L. and Tatum, D. (2015) Bridging the Gap: An Integrated Approach to Solving Sustained Casing Pressure in the Cana Woodford Shale. *SPE Well Integrity Symposium*, Galveston, June 2015, 1-31. <https://doi.org/10.2118/174525-MS>
- [5] 郭辛阳, 沈忠厚, 步玉环, 李娟. 固井微环空成因研究进展及解决方法[J]. 钻采工艺, 2009, 32(5): 1-3.
- [6] Gu, J. and Qin, W.Z. (2010) Experiments on Integrated Solidification and Cementation of the Cement-Formation Interface Using the Mud Cake to Agglomerated Cake (MTA) Method. *Petroleum Exploration and Development*, **37**, 226-231. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(10\)60028-6](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(10)60028-6)
- [7] Gu, J., Gao, H.X., Gan, P., Zeng, P.H., Chen, J.H. and Hao, H.Y. (2020) Preventing Gas Migration after Hydraulic Fracturing Using Mud Cake Solidification Method in HTHP Tight Gas Well. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, **23**, 450-473. <https://doi.org/10.1504/IJOGCT.2020.106150>
- [8] Landry, G., Welty, R.D., Thomas, M., Vaughan, M.L. and Tatum, D. (2015) Bridging the Gap: An Integrated Approach to Solving Sustained Casing Pressure in the Cana Woodford Shale. *SPE Well Integrity Symposium*, Galveston, June 2015, 1-31. <https://doi.org/10.2118/174525-MS>
- [9] Bassett, J., Watters, J., Combs, K. and Nikolaou, M. (2013) Lowering Drilling Cost, Improving Operational Safety, and Reducing Environmental Impact Through Zonal Isolation Improvements for Horizontal Wells Drilled in the Marcellus Shale. *Unconventional Resources Technology Conference*, Denver, 12-14 August 2013, 1-9. <https://doi.org/10.1190/urtec2013-104>
- [10] Gu, J., Zhong, P., Shao, C., Bai, S., Zhang, H. and Li, K. (2012) Effect of Interface Defects on Shear Strength and Fluid Channeling at Cement-Interlayer Interface. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **100**, 117-122. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.11.021>
- [11] 徐滨. 矿渣 MTC 固井技术在大港油田的应用[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(4): 23-24.
- [12] 黄河福, 步玉环, 田辉. MTC 固井液二界面胶结强度实验研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(6): 46-50.
- [13] 丁士东, 高德利, 胡继良, 杨红岐. 利用矿渣 MTC 技术解决复杂地层固井难题[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(2): 5-7.
- [14] 顾军, 杨亚馨, 张鹏伟. MTA 防窜固井技术原理及现场应用分析[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(1): 17-21.
- [15] 顾军, 何吉标, 谯世均. MTA 方法防气窜固井技术在涩北气田的应用[J]. 天然气工业, 2014, 34(4): 83-89.
- [16] 杜建平, 顾军, 张辉. 有效提高页岩气井固井质量的泥饼固化防窜固井技术[J]. 2015, 35(9): 89-94.