

页岩气侧钻水平井油基泥饼固化剂性能评价与现场试验

尹德灿

中国石油化工股份有限公司勘探分公司, 四川 成都
Email: yindc.ktnf@sinopec.com

收稿日期: 2021年3月19日; 录用日期: 2021年4月16日; 发布日期: 2021年4月23日

摘要

为进一步解决页岩气侧钻水平井环空带压难题, 介绍了一种适用于油基钻井液条件下的油基泥饼固化剂 GOS。性能评价结果表明: 1) 养护条件为 $105^{\circ}\text{C} \times$ 常压和油基泥饼厚度为 0.3 mm 时, 随着养护时间的延长, 采用油基泥饼固化剂的页岩气侧钻水平井固井二界面胶结强度增大且达到了 $0.1002\sim 0.3974\text{ MPa}$, 而未采用油基泥饼固化剂的页岩气侧钻水平井固井二界面胶结强度则基本为 $0.0042\sim 0.0082\text{ MPa}$, 即前者较后者的固井二界面胶结强度提高了 $19.44\sim 53.43$ 倍; 2) GOS与油基钻井液和水泥浆具有良好的相容性, 满足页岩气侧钻水平井固井作业要求。4口页岩气侧钻水平井的现场试验结果表明, 固井质量合格率 100% , 固井一界面胶结质量优良率 90% 以上, 固井二界面胶结中等以上的超过 80% 。其中, T1侧钻水平井目前已完成体积压裂测试, 页岩气产量 7.5013 万方/日, 页岩油产量 9.87 方/日, 且油层套管与表层套管之间环空压裂前后均未出现带压, 为页岩油气的高效勘探开发提供了良好的井筒保障。

关键词

页岩气侧钻水平井, 环空带压, 油基泥饼固化剂, 性能评价, 现场试验

Performance Evaluation and Field Test of Oil-Based Mud Cake Solidification Agent for Shale Gas Sidetracking Horizontal Wells

Decan Yin

Exploration Company, SINOPEC, Chengdu Sichuan
Email: yindc.ktnf@sinopec.com

Received: Mar. 19th, 2021; accepted: Apr. 16th, 2021; published: Apr. 23rd, 2021

Abstract

In order to further solve the problem of annular pressure in shale gas sidetracking horizontal wells, an oil-based mud cake solidification agent (GOS), which is suitable for the condition of oil-based drilling fluid, is introduced. The results of performance evaluation show that: 1) when the curing condition is 105°C under normal pressure and the thickness of oil-based mud cake is 0.3 mm, with the prolongation of curing time, the cementing strength of the cement-formation interface in shale gas sidetracking horizontal wells with oil-based mud cake curing agent increases and reaches 0.1002~0.3974 MPa, while that in shale gas sidetracking horizontal wells without oil-based mud cake curing agent is basically 0.0042~0.0082 MPa. It means that the former is 19.44~53.43 times higher than the latter. 2) GOS has good compatibility with oil-based drilling fluid and cement slurry, which meets the cementing requirements of shale gas sidetracking horizontal wells. The field test results of four shale gas sidetracking horizontal wells show that the qualification rate of cementing quality is 100%, and the excellent and good rate of cementing quality of the cement-casing interface is more than 90%, more than 80% of medium cementation of the cement-formation interface. Among them, sidetracking horizontal well TY1 has completed volume fracturing test. The production of shale gas is $7.5013 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ and the production of shale oil is $9.87 \text{ m}^3/\text{d}$. There is no pressure in the annulus between the production casing and the surface casing before and after fracturing, which provides a good wellbore guarantee for the efficient exploration and development of shale gas.

Keywords

Shale Gas Sidetracking Horizontal Well, Annular Pressure, Oil-Based Mud Cake Solidification Agent, Performance Evaluation, Field Test

Copyright © 2021 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

环空带压(环空气窜)是国内外页岩气开发普遍存在且亟待解决的一个瓶颈难题[1]-[6],它严重影响页岩气井的产量,降低页岩气采收率,弱化压裂改造效果,以致于花巨资建成的页岩气井丧失其应有的功能。国内外研究认为,就固井工程而言,环空带压的主要原因是固井质量差和压裂等后续作业对水泥环的伤害[2][7]。鉴于此,针对侧钻水平井(均采用油基钻井液[6][8])和体积压裂是目前勘探开发页岩气的主体技术[9][10],而采用驱油前置液(解决油基钻井液条件下的固井质量问题)和弹韧性(或韧性或柔性)防气窜水泥浆体系(预防体积压裂对水泥环的伤害)是现今页岩气侧钻水平井固井的主要技术。实践表明,现行的页岩气水平井固井技术虽可显著提高其测井固井质量,但却尚不能有效解决环空气窜问题(压裂前环空带压),也难以完全满足体积压裂的要求(压裂后环空带压)[11][12][13]。因此,为进一步解决页岩气侧钻水平井环空带压难题,笔者介绍了一种油基泥饼固化剂,评价了其相关技术性能,给出了4口井现场试验效果。

2. GOS 的性能评价

2.1. 实验材料

实验用钻/完井液取自 T1 侧钻水平井,其所用的油基钻井液配方为 83%基液(95%柴油:5% CaCl_2 盐

水) + 3%乳化剂 + 1%润湿剂 + 2%增黏剂 + 8% CaO + 4%有机土 + 3%降滤失剂 + 5%高效封堵剂 + 3%超细碳酸钙 + 其它添加剂(加重剂等), 完钻油基钻井液性能见表 1。GOS 型油基泥饼固化剂[中国地质大学(武汉)研制], 它分为 GOS-I 型油基泥饼固化剂、GOS-II 型油基泥饼固化剂和 GOS-III 型油基泥饼固化剂。水泥浆体系为 T1 侧钻水平井固井实际使用的水泥浆体系, 即弹性防气窜水泥浆体系。自制仿地井筒的渗透率和孔隙度模拟 T1 侧钻水平井水平段, 分别为 $0.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 4.5%, 内筒直径为 33 mm, 外筒直径为 100 mm。

Table 1. Oil-based drilling fluid performance of T1 sidetracking horizontal well completion

表 1. T1 侧钻水平井完钻油基钻井液性能

密度(g/cm ³)	粘度(s)	初切/终切(Pa)	泥饼(mm)	滤失(mL/30min)
1.42	68	3/5	0.5	1.8
固含(%)	塑粘(mPa·s)	动切(Pa)	破乳电压(V)	油水比
25	33	9	960	83:17

2.2. 实验条件

鉴于页岩气侧钻水平井固井胶结质量检测时间一般为 3 d 左右, 固井二界面胶结强度实验条件确定为: 样品养护时间为 3 d、5 d、7 d、10 d、15 d 和 30 d, 养护方式为浴养, 养护温度为 105℃, 养护压力为常压(通常为 0.1 MPa), 泥饼厚度为 0.4~0.5 mm, GOS-I 型油基泥饼固化剂和 GOS-II 型油基泥饼固化剂与油基泥饼的接触时间均为 80 s, 而 GOS-III 型油基泥饼固化剂与油基泥饼的接触时间为 160 s, 接触顺序为 GOS-I 型油基泥饼固化剂、GOS-II 型油基泥饼固化剂和 GOS-III 型油基泥饼固化剂。根据真页 1 侧钻水平井实测温压情况, GOS 与油基钻井液和水泥浆的相容性实验条件确定为: 温度为 90℃, 压力为 85 MPa, 升温时间为 60 min。流变性实验条件为 90℃ × 常压。

2.3. 实验方法

固井二界面胶结强度实验方法见参考文献[14] [15], 而 GOS 与油基钻井液和水泥浆的相容性实验方法按 API 规范 10 进行。

2.4. 评价结果与分析

2.4.1. GOS 提高固井二界面胶结强度的效果

为了验证 GOS 对改善固井二界面胶结强度的实际效果, 基于参考文献[14] [15]的方法开展了相关模拟实验, 实验操作流程如图 1 所示。实验结果见表 2。

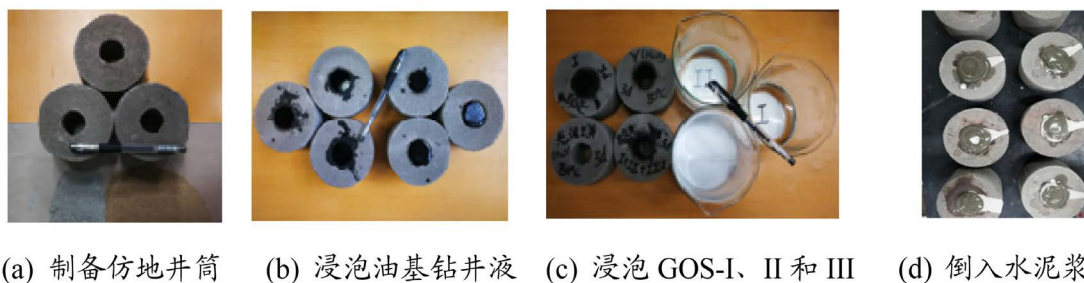


Figure 1. Experimental operation flow chart

图 1. 实验操作流程

Table 2. Experimental results of the cementing strength of the cement-formation interface**表 2.** 固井二界面胶结强度实验结果

项目	原浆/固化	养护时间(d)					
		3	5	7	10	15	30
固井二界面胶结强度(MPa)	原浆	0.0049	0.0042	0.0066	0.0093	0.0082	0.0073
	固化	0.1002	0.1050	0.2075	0.3523	0.3542	0.3974
提高率(%)		1944.90	2400.00	3043.94	3688.17	4219.51	5343.84

从表 2 可以看出,随着养护时间的延长,采用油基泥饼固化剂的页岩气侧钻水平井固井二界面胶结强度增大且达到了 0.1002~0.3974 MPa,而未采用油基泥饼固化剂的页岩气侧钻水平井固井二界面胶结强度则基本为 0.0042~0.0082 MPa,即前者较后者的固井二界面胶结强度提高了 19.44~53.43 倍。

2.4.2. GOS 与油基钻井液和水泥浆的相容性

为了考察 GOS 与页岩气侧钻水平井用油基钻井液和弹韧性防气窜水泥浆体系的相容性,基于 API 规范 10 的方法进行了相关室内实验。

1) GOS 对流变性的影响

由表 3 可以看出,GOS 对页岩气侧钻水平井用油基钻井液和弹韧性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 86.42%~87.95%,即更有利于提高页岩气水平井水平段的顶替效率。

Table 3. Experimental results of the influence of GOS on rheology**表 3.** GOS 对流变性影响的实验结果

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	69	48	39	30	15	11	0.523
油基钻井液:I型:II型:III型:水泥浆	20:20:20:20	58	25	17	9	2	2	0.983
I型:II型:III型:水泥浆	10:20:30:40	57	29	22	16	5	4	0.975

2) GOS 与稠化时间的影响

由表 4 可以看出,GOS 对页岩气侧钻水平井用弹韧性防气窜水泥浆的稠化时间没有影响。

Table 4. Experimental results of the influence of GOS on the thickening time**表 4.** GOS 对稠化时间影响的实验结果

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	153 min	已稠化	66.2
水泥浆	100	158 min	已稠化	71.2
油基钻井液:I型:II型:III型:水泥浆	20:20:20:20	308 min	未稠化	6.3
油基钻井液:I型:II型:III型:水泥浆	20:20:20:20	353 min	未稠化	3.6
I型:II型:III型:水泥浆	10:20:30:40	419 min	未稠化	3.6
I型:II型:III型:水泥浆	10:20:30:40	315 min	未稠化	5.7

由表 2 和表 3 可以看出,GOS 与页岩气侧钻水平井用油基钻井液和弹韧性防气窜水泥浆具有良好的相容性,完全能够满足固井施工要求。

3. 油基泥饼固化与界面交联的证据

3.1. GOS 作用前后固井二界面胶结对比图

GOS 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 of cementation at cement-formation interfaces before and after the use of GOS

图 2. 采用 GOS 前后固井二界面胶结情况对比图

从图 2 的上图可看出，未采用油基泥饼固化剂的油基泥饼潮湿、疏松，起开的水泥柱被潮湿油基泥饼包裹，即水泥柱与仿地井筒之间呈分离状，即固井二界面胶结强度仅为 0.0042 MPa 显而易见，这也印证了沈忠厚院士等学者“泥饼的存在会导致水泥浆与地层无法实现完全胶结，使得固井二界面胶结强度很低”的结论[16]。显然，这易引起页岩气沿固井二界面发生气窜而致环空带压。

但从图 2 的下图可看出，采用油基泥饼固化剂的油基泥饼已固化且水泥柱 - 固化油基泥饼 - 仿地井筒已大部分交联，即水泥柱承压 0.3459 MPa 的大部分压脱剖面的水泥柱、固化油基泥饼、仿地井筒三者已相互交联，起开的水泥柱表面和撕离部分清晰可见，且固化油基泥饼干燥、致密，使固井二界面胶结

强度提高到了 19.44~53.43 倍，即有利于防止环空气窜和环空带压。

3.2. GOS 作用后油基泥饼固化和界面交联的 SEM 图

GOS 作用后养护 3 d 的油基泥饼固化和界面交联 SEM 测试结果见图 3。

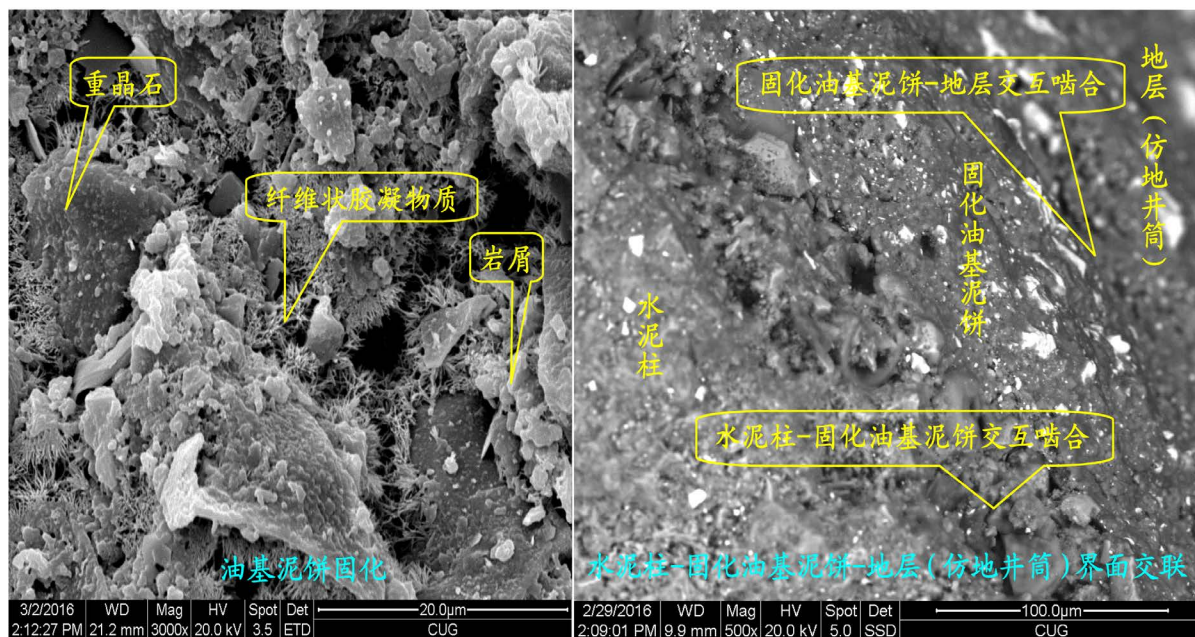


Figure 3. SEM diagram of oil-based mud cake solidification and cross-linking at cement-formation interfaces after the use of GOS

图 3. 采用 GOS 后固井二界面油基泥饼固化和界面交联的 SEM 图

从图 3 的左图可以看出，油基泥饼中岩屑和重晶石之间生成了大量的纤维状胶凝物质，它们像“浆糊”把这些固相颗粒粘联在一起构成一个整体，即油基泥饼固化。从图 3 的右图可以清晰地看到，固化油基泥饼与水泥柱和仿地井筒的两个界面之间均有细柱状或片状胶凝物质生成，且彼此之间互相缠绕，两个界面区过渡平整，即水泥柱 - 固化油基泥饼 - 仿地井筒界面交联，使得固井二界面胶结强度大幅度提高已是不言而喻。

4. 现场试验

4.1. 现场工艺技术

原固井工艺及水泥浆体系、油基钻井液体系均不变，只需：

- 1) 采用 GOS-I 型油基泥饼固化剂 2 m^3 作前置液(确保其与井壁油基泥饼的接触时间达到 80 s 以上即可)。
- 2) 采用 GOS-II 型油基泥饼固化剂 2 m^3 作前置液(确保其与井壁油基泥饼的接触时间达到 80 s 以上即可)。
- 3) 采用 GOS-III 型油基泥饼固化剂 4 m^3 作前置液(确保其与井壁油基泥饼的接触时间达到 160 s 以上即可)。
- 4) 固井施工顺序：----油基钻井液----现用前置各种流体----► GOS-I 型油基泥饼固化剂 2 m^3 ► GOS-II 型油基泥饼固化剂 2 m^3 ► GOS-III 型油基泥饼固化剂 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. 现场试验效果

通过总结分析前期两口先导性现场试验情况的基础上, 改进了油基泥饼固化剂及其现场使用方法和工艺。2020年8月开始, 先后在位于重庆市丰都县的 T1 侧钻水平井、重庆市綦江区的 D4 侧钻水平井、重庆市忠县的 F1 侧钻水平井和贵州省道真县的 Z3 侧钻水平井(均为油基钻井液)完井固井中进行了现场试验, 效果显著(表 5): 固井质量合格率 100%, 固井一界面胶结质量优良率 90%以上, 固井二界面胶结中等以上的超过 80%。其中, T1 侧钻水平井目前已完成体积压裂测试, 页岩气产量 7.5013 万方/日, 页岩油产量 9.87 方/日, 且油层套管与表层套管之间环空压裂前后均未出现带压现象, 其它 3 口井尚待进行体积压裂测试。现场试验结果初步表明: 1) 油基泥饼固化剂可有效提高页岩气侧钻水平井的固井质量, 且现场施工工艺简单, 安全可靠; 2) 油基泥饼固化剂具有优良的防气窜效果和环空封隔能力, 有利于提高页岩气水平井固井完整性, 满足页岩气水平井体积压裂需要。

Table 5. Field test of oil-based mud cake solidification agent for shale gas sidetracking horizontal well

表 5. 页岩气侧钻水平井油基泥饼固化剂现场试验情况

序号	试验井井号	井深 (m)	GOS-I 型(m ³)	GOS-II 型(m ³)	GOS-III 型 (m ³)	固井质量	体积压裂前后是否环空带压	备注
1	T1 侧钻水平井	4327.00	2	2	4	良好	前: 不带压 后: 不带压	已压裂测试
2	D4 侧钻水平井	5587.00	2	2	4	优质	前: 不带压 后: 待压裂	待压裂测试
3	F1 侧钻水平井	4367.00	2	2	4	优质	前: 不带压 后: 待压裂	待压裂测试
4	Z3 侧钻水平井	4005.00	2	2	4	良好	前: 不带压 后: 待压裂	待压裂测试

5. 结论

1) 随着养护时间的延长, 用 GOS 的页岩气侧钻水平井固井二界面胶结强度也增大, 而未用 GOS 的则基本为 0.0042~0.0082 MPa, 即前者较后者的固井二界面胶结强度提高了 19.44~53.43 倍。

2) GOS 对页岩气侧钻水平井用油基钻井液和弹韧性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 86.42%~87.95%, 即更有利于提高页岩气水平井水平段的顶替效率。

3) GOS 对页岩气侧钻水平井用弹韧性防气窜水泥浆的稠化时间没有影响。

4) 微观结构测试结果表明, GOS 作用后油基泥饼已固化和界面已交联, 这就是 GOS 作用后固井二界面胶结强度提高了 19.44~53.43 倍的原因。

5) 4 口井现场试验结果初步表明, 油基泥饼固化剂可有效提高页岩气侧钻水平井的固井质量, 且其具有优良的防气窜效果和环空封隔能力, 有利于提高页岩气水平井固井完整性, 满足页岩气水平井体积压裂需要。

基金项目

国家自然科学基金项目(51774258, 41972326)。

参考文献

- [1] 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*, Denver, 25-27 August 2014, 1-10. <https://doi.org/10.15530/urtec-2014-1913405>
- [2] 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. *The SPE Well Integrity Symposium*, Galveston, June 2015, SPE-174525-MS. <https://doi.org/10.2118/174525-MS>
- [3] 赵常青, 谭宾, 曾凡坤, 冷永红, 段敏. 长宁-威远页岩气示范区水平井固井技术[J]. 断块油气田, 2014, 21(2): 256-258.
- [4] 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>
- [5] 辜涛, 李明, 魏周胜, 王小娜, 李早元, 刘小利, 郭小阳. 页岩气水平井固井技术研究进展[J]. 钻井液与完井液, 2013, 30(4): 75-80.
- [6] 陆辉, 卞晓冰. 北美页岩气开发环境的挑战与应对[J]. 天然气工业, 2016, 36(7): 110-115.
- [7] 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.
- [8] 王建华, 李建男, 闫丽丽, 徐显广, 赵雄虎. 油基钻井液用纳米聚合物封堵剂的研制[J]. 钻井液与完井液, 2013, 30(4): 75-80.
- [9] 邱正松, 高宏松, 黄维安. 页岩气钻探开发技术研究进展[J]. 西部探矿工程, 2012, 27(6): 66-69.
- [10] 周德华, 焦方正, 贾长贵, 蒋廷学, 李真祥. JY1HF 页岩气水平井体积压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 75-80.
- [11] 蒋可, 李黔, 陈远林, 郭雪利, 付永强, 李军. 页岩气水平井固井质量对套管损坏的影响[J]. 天然气工业, 2015, 35(12): 77-82.
- [12] 刘洋, 严海兵, 余鑫, 冯予淇, 范伟华. 井内压力变化对水泥环密封完整性的影响及对策[J]. 天然气工业, 2014, 34(4): 95-98.
- [13] 孙赞成, 贾承造, 李相方. 非常规油气勘探与开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 1008-1009.
- [14] 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)
- [15] 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>
- [16] 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.