

天然气井液锁防治及化学处理技术研究进展

杨改风¹, 李育林¹, 裴婉璐²

¹中国石化华北油气分公司采气一厂, 陕西 榆林

²陕西省页岩气勘探开发有限公司, 陕西 汉中

收稿日期: 2025年8月22日; 录用日期: 2025年11月18日; 发布日期: 2025年12月8日

摘 要

本文综述了天然气井液锁现象及其防治方法的研究进展, 重点探讨了液锁伤害的机理、传统解液锁方法的局限性以及新型多功能解液锁剂的研究现状。液锁现象是天然气开采过程中常见的问题, 严重影响气井的产能和经济效益。近年来, 随着对液锁机理的深入研究和表面活性剂技术的发展, 新型解液锁剂的研发取得了显著进展。本文总结了不同类型解液锁剂的特点及其作用机制, 并对未来研究方向提出了展望。

关键词

解液锁剂, 泡排, 氟碳表面活性剂

Research Progress on Liquid Lock Prevention and Control and Chemical Treatment Technology for Natural Gas Wells

Gaifeng Yang¹, Yulin Li¹, Wanjun Chang²

¹Sinopec North China Oil and Gas Branch Gas Production Plant 1, Yulin Shaanxi

²Shaanxi Shale Gas Exploration and Development Co., Ltd., Hanzhong Shaanxi

Received: August 22, 2025; accepted: November 18, 2025; published: December 8, 2025

Abstract

The paper summarizes the research progress on the fluid-lock phenomenon in natural gas wells and its prevention and control methods, focusing on the mechanism of fluid-lock injury, the limitations of the traditional methods of fluid-lock relief, and the current status of the research on new multifunctional fluid-lock relief agents. Liquid-lock phenomenon is a common problem in the process of

natural gas extraction, which seriously affects the capacity and economic benefits of gas wells. In recent years, significant progress has been made in the research and development of new anti-fluid locking agents with the in-depth study of the mechanism of fluid locking and the development of surfactant technology. The paper summarizes the characteristics of different types of fluid-locking agents and their mechanisms of action, and puts forward prospects for future research directions.

Keywords

Anti-Fluidic Locking Agent, Foam Discharge, Fluorocarbon Surfactant

Copyright © 2025 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

在天然气的开采过程中,液锁伤害会对天然气井的产能产生重大影响[1]。在实际生产过程中,液锁一般出现在生产阶段,当储层中渗入地层水或者井筒内积聚水相后,会阻碍天然气的正常流动,从而降低天然气井的产出效率。液锁不仅会影响产气能力,还可能会封堵气层,造成作业困难或是生产成本的增加。对于液锁问题,前期传统的解决办法包括泡排法、压裂法、热水解堵法以及化学药剂驱水法[2][3]等。泡排法是通过向井筒内注入泡排剂[4],生成泡沫后将水携带出井外,是目前应用非常广泛的解液锁方法。但是,传统的泡排法具有一定的局限性,通常只能对井筒附近区域起作用,不能深入至储层内部[5]。为此,研制出更加高效且具能兼顾井筒和储层两部分的解液锁技术,对于提高天然气井的开采效率具有重大意义。氟碳表面活性剂因其特殊的分子结构,表现出优异的疏水性[6],并且具有降低界面张力的作用。由于其具备的疏水性,氟碳表面活性剂能够降低水相在储层中的吸附性,促进水相的快速排出,从而解决储层内的液锁现象[7]。为进一步提高解液锁效果,克服传统解液锁方法的局限性,本文提出了储层-井筒清洁一体化药剂体系的概念。

这一体系结合了氟碳表面活性剂与多种功能性(如缓蚀、阻垢和低乳化等)药剂,通过多种药剂的协同作用,在储层和井筒两个层面实现高效的清洁与液锁解除。研发了三种药剂体系,分别为泡排-缓蚀体系、泡排-阻垢体系和泡排-低乳化体系,这三种药剂体系针对不同的作业需求和井筒环境,具备各自的优势,能够实现更加全面的液锁解除和井筒清洁:(1)泡排-缓蚀体系的研究:在气井开采过程中,水分的积聚不仅会导致液锁,还可能造成井筒材料的腐蚀,缩短井筒的使用寿命[8]。结合了氟碳表面活性剂和缓蚀剂,不仅可以有效排除积水,还能在气井井筒内部防止腐蚀发生,延长井筒设备的使用寿命;(2)泡排-阻垢体系的研究:在气井开采过程中,积水可能带入矿物质和溶解盐分,沉积在井筒内部,形成垢堵[9]。通过氟碳表面活性剂与阻垢剂的复配,能够有效抑制水中矿物质的沉积,防止垢物形成。这一体系的优势在于,不仅能够解除液锁,还能防止因水质问题导致的设备堵塞或损坏,从而确保了储层和井筒的畅通与高效产能;(3)泡排-低乳化体系的研究:气井开采过程中,由于泡排剂可降低液体表面张力,降低液锁伤害,所以会在生产过程中加入大量泡排剂,但是泡排剂的加入会导致水相和油相产生乳化现象[10],容易造成液体的流动阻碍。低乳化体系则能避免上述问题,使流体更易流动。氟碳表面活性剂和泡排低乳化复配体系的研究有助于提高解液锁效率,并且降低开采成本,对气田高效开发意义重大。

这三种不同的药剂体系可以满足不同工况的需求。泡排性能有助于药剂在井筒中有效排除井筒中的

积水, 恢复气流通道, 同时具备的改变储层表面润湿性的性能能够深入到储层深部, 促进水分的流动与排出。本文通过将储层清洁和井筒清洁两者结合, 能够全面解决液锁问题, 最大化地提升气井的生产能力和经济效益。

2. 液锁伤害

2.1. 液锁伤害研究进展

覃善团[11]分析了中江气田的天然气井产气能力低, 压力和产量递减迅速的原因, 采用加拿大学者 Bennion DB 所提出的 APTi 液锁数学模型, 对测试井和生产井的液锁伤害结果进行分析, 最终得出使用“酸 + 表面活性剂体系”具备优异的解液锁效果[12]。Cheng 等人研究了亲水圆柱形纳米孔中水/甲烷两相流动, 结果显示随着 S_w 的增加, 甲烷流量几乎呈线性下降, 直到 $S_w \geq 0.52$ 时突然停止。当 S_w 越大时, 液锁的形成时间越早, 液锁时间越长。同时, 并以液锁形成时水/气界面表面积持续减小和不同 S_w 存在最大水膜厚度这两个强有力的证据为依据, 提出了液锁模型及其形成机理, 表明了水/气界面的表面张力与水/壁界面的吸附之间的竞争控制了液锁的发展。孙婉娟[13]等人研制的配方可以使岩心表面接触角从 58.73° 增加到 130.81° , 岩心自吸水量降低了 74.8%, 气测渗透率恢复率在 80.6%到 88.7%之间。Wang [14]等人采用主表面活性剂 APG 与 CG-1、CG-2、WR 等表面活性剂复配产生协同效应。研制了致密气藏新型水解锁剂体系, 界面张力可以达到 9.61×10^{-4} mN/m, 表面张力为 18.2 mN/m, 注入防液锁剂后渗透率恢复率为 25.36%。王锦昌[15]等人构建了老井储层液锁评价模型, 明确了不同情况下的液锁伤害程度。在此基础上, 筛选出高效的 XH207C 型解液锁剂, 并建立了三种工况下的评价模型。

然而, 在实际的油气生产过程中, 情况远比理论研究复杂得多。液锁伤害固然是导致气井产量降低的关键因素, 但各类复杂工况的出现, 同样不可忽视, 它们也是造成气井低产的重要诱因。例如, 在一些特殊地质条件下, 井下的温度、压力变化剧烈, 不仅会加重液锁效应, 还会加速金属腐蚀[16]; 在另一些富含矿物质的地层中, 水垢的形成速度加快, 严重影响油气的渗流通道[17]; 而在天然气开采过程中, 产出的凝析油和水的乳状液[18]若不能及时有效处理, 会增加后续分离和加工的难度与成本。因此, 在后续的研究中, 如何在高效解除液锁伤害的同时, 兼顾解决开采过程中诸如金属腐蚀、水垢形成以及乳状液处理等一系列复杂问题, 无疑应当成为重点攻关方向。

2.2. 液锁伤害机理

天然气井在开采过程中, 外来工作液或地层水侵入储层孔隙, 在毛细管力作用下, 这些水在孔隙喉道处形成液阻。当液阻足够大, 阻碍天然气流动[19], 便产生液锁伤害。储层渗透率越低, 孔隙喉道越细小, 毛细管力越大, 越易发生液锁[20]。此外, 气相相对渗透率降低, 也使得气体渗流能力下降[21], 进一步加剧液锁影响, 导致天然气井产能降低, 严重影响开采效率与经济效益。

2.3. 液锁伤害及防治方法

天然气井中的液锁现象会对气井的生产和开发造成多方面危害。由于液锁的存在, 气井的压力和产量会出现波动[22], 难以准确预测和控制, 这不仅会影响气井的正常生产, 还可能导致设备的不必要损耗和维护成本增加。

气井解液锁的防治对于保障气井产能和开采效率至关重要, 可采取以下方法:

(1) 优化工作液体系: 在作业过程中, 使用具备较低表界面张力的药剂。

(2) 平衡压力操作: 在钻井时采用近平衡或欠平衡钻井技术, 避免因压力差导致工作液大量漏失进入地层[23]。

(3) 及时有效排液: 李洪雪[24]提出可以采用比如涡流排液或者加药剂泡沫排水的方法解除液锁伤害。排液需要在作业结束后尽快进行, 提高反排速度。

(4) 注入解液锁剂: 定期向气井注入解液锁剂, 其能有效降低界面张力, 改善气液界面性质, 恢复气井渗透率。

3. 解液锁剂

3.1. 解液锁剂分类

3.1.1. 表面活性剂

许园[25]等研发的短氟碳双子表面活性剂, 具备易生物降解、表面活性强的特点, 临界胶束浓度可以降低至 $3.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 。Lopez [26]等合成的新型非氟化苯并噁嗪单体可以将砂岩的强水润湿性转变成中等润湿, 并且在深层低渗透气藏中具备极好的耐温性。

3.1.2. 有机硅

有机硅具有减小表面张力和较好的润湿反转能力, 在压裂过程中会被用作压裂液添加剂, 其作用机理是减小储层孔道的表面对压裂液中高聚合物的吸附性[27], 但是如果使用过度会增加流体黏性, 导致外来流体的不易返排。

3.1.3. 纳米材料

金家锋[28]等合成的纳米二氧化硅颗粒, 粒径约 100 nm, 具有良好的气湿性, 0.3% 的浓度下可以使岩心表面从液湿性转变为超气湿。纳米材料的小尺寸使其能进入微孔并改变流体与岩石的相互作用, 从而降低表面张力, 提高流体流动性。比如纳米二氧化硅、纳米金属氧化物[29]等, 能够在岩石表面形成纳米级的吸附层, 改善岩石的润湿性, 解除液锁。

3.2. 解液锁剂作用机理

3.2.1. 降低表面张力

屈治华[30]研发了一种致密气储层的解液锁剂配方, 其表面张力可以降低至 26.47 mN/m, 与玻璃接触角为 62.3°, 向 6 井复产后日均日产气量增加 $0.38 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。原本由于表面张力较大而难以流动的水, 在表面张力降低后, 其流动性得到极大改善, 更容易被气体携带排出, 从而解除液锁对气体渗流的阻碍。

3.2.2. 改变岩石润湿性

减小液锁损害的有效途径是让岩石表面发生润湿反转[31]。王翔[32]研制的润湿反转剂不仅可以降低表面张力也具备疏水性, 水膜厚度和产水率分别可以降低 28.87% 和 55.55%, 产气率可以增加 5.31%。其作用机理是使岩石表面的润湿性发生反转, 由亲水状态转变为疏水状态, 水相便不会轻易附着在岩心表面[33], 降低了水相对气相流动通道的阻挡, 最终降低液锁损害。

3.3. 氟碳材料

氟碳表面活性剂是具表面活性的聚合物, 能在水和油间形成稳定界面活性层, 降低水在气层渗透、阻挡液锁。有学者针对致密裂缝型砂岩气藏液锁原因展开研究, 建立了集多种装置的物理模型研究装置和方法。冯春燕[34]等利用溶胶-凝胶法和氟烷基甲基丙烯酸共聚物修饰后, 使岩心表面出现气湿反转现象。实验表明处理后的气/水体系与油/气体系从液湿性转换成气湿性, 岩心中对于水的渗透率相比前期未处理时扩大了 4 倍。杜洋[35]等使用体积分数为 0.1% 的氟碳复配解液锁药剂后, 岩心疏水性和疏油性分别增加了 63.5% 和 30.0%, 岩心表面和地层水的接触角角度增加到 32.61°, 和凝析油的接触角角度增加到 5.15°。

氟碳化合物是氟原子替代碳链中的氢原子, 形成具有优越疏水疏油性、良好化学和热稳定性的氟碳链结构[36]。氟原子电负性大、键能强[37], 能将固体表面的润湿性由液湿转为气湿。氟原子半径略大于氢原子, 能够包裹全氟烷基中的碳链, 形成刚性棒状构型, 保护碳链。当含氟化合物吸附在固体表面时, 外层氟原子决定了表面性能, 降低表面自由能和张力。

然而, 氟碳材料也存在一定的局限性。一方面, 其成本相对较高, 这在一定程度上限制了其大规模应用。另一方面, 氟碳材料的加工难度较大, 对加工设备和技术要求较高, 这也给其应用带来了一定的挑战。但总体而言, 其卓越的疏水疏油性、良好的化学和热稳定性, 使其在众多领域具有不可替代的重要作用。在实际应用中, 通过优化材料配方和加工工艺, 可以有效克服其局限性, 充分发挥其优异性能, 从而实现更好的综合应用效果。

3.4. 泡沫排水研究现状

3.4.1. 泡排剂特点

跑排剂泡沫生成原理是表面活性剂分子在液体表面吸附, 降低表面张力, 使空气容易进入液体形成气泡。其亲水端溶于水, 疏水端伸向空气, 形成稳定的液膜结构, 阻止气泡内气体扩散, 从而产生并维持泡沫[38]。它们能迅速吸附并有序排列, 减少气液、液液和固液界面张力。这种降低表界面张力的能力, 让表面活性剂在洗涤、乳化、润湿等多种过程中发挥着关键作用, 极大地影响和改变了物质的表面和界面性质。在油田开发方面, 由于表面活性剂的众多种类及良好性能, 因此在生产过程中使用广泛。

3.4.2. 泡排剂类型

常用的气井泡沫排水表面活性剂包括离子型、非离子型、高分子聚合物、两性及复合型泡沫排水剂[39]。阳离子型性能好, 但价格较高, 限制了应用。阴离子型在油气生产中由于比较好的起泡性, 因此较为常用。非离子型稳定且来源广泛, 但起泡较弱。两性表面活性剂起泡能力也较弱, 但是通过复配进行多种主剂和助剂组合, 可以有效提高起泡性。

3.4.3. 井底积液的产生及危害

当天然气气井开采进度进入后期时, 井筒内温度降低, 天然气中部分气相冷凝成凝析液并积聚在井底。气井产气量不足时, 这些液体无法带出井筒, 导致积液, 严重时可能造成储层水淹, 影响气井产量。使用泡排剂注入井内能有效排出积液, 降低风险, 并提高产量和效率[40]。

3.4.4. 泡沫排水原理

地层水进入井筒后会因为重力作用下沉, 聚集在井筒底部, 阻止了天然气的正常流动[41], 会对气井产量产生影响。为了解决液锁问题, 泡沫排水技术被引入采气工艺中来, 由于泡沫密度远低于水相密度, 所以泡排剂产生的泡沫可以将井筒内水相携带至井筒外[42], 从而将井筒中的积液排出。这个过程中泡沫的稳定性极为重要, 如果泡沫稳定性较低, 容易破裂, 就会无法有效携带液体。因此, 选择性能优异的起泡剂是关键因素, 其需要在具备一定的泡沫稳定性的基础上, 可以将液体顺利带至井外。泡沫排水采气技术可以有效解决其经过产水量较大、井筒积液问题, 提高气井的采气效率和采收率, 延长气井的生产寿命, 是一种经济且有效的排水采气方法。

3.5. 多功能一体剂研究现状

3.5.1. 泡排缓蚀

近年来, 国内外研究者通过调整缓蚀剂分子的结构、优化其成分配比, 探索其在泡排系统中的应用。尤其是针对复杂油气井环境, 研究者通过设计具有多重功能的复合型泡排缓蚀剂, 如结合表面活性剂、

金属络合剂、腐蚀抑制剂等,使得缓蚀效果与泡沫性能能够得到有机结合。李宗蔓[43]等研发的缓蚀泡排剂的起泡高度达 190 mm,携液量为 135 mL,其临界胶束浓度为 0.5%,表面张力可以降低到 28.5 mN·m⁻¹。吴秋伯等开发的甜菜碱类缓蚀泡排剂在浓度为 0.31%时,泡沫体积可以达到 710 mL,半衰期是 420 s,腐蚀速率仅为 0.0659 mm/a。田伟[44]等研制的配方在老化前后和静置后的泡沫高度都符合《泡沫排水采气用起泡剂评价方法》(SY/T 6465-2000)的要求。现有的研究表明,这些缓蚀一体剂在高含水、含盐量较高的井下环境中,能够有效减少腐蚀速率,同时促进气体和水分的顺利排除,从而保障了油气开采作业的安全性。

3.5.2. 泡排阻垢

阻垢一体剂的研究重点主要集中在如何实现阻垢与泡排功能的有机结合。矿物质结垢常发生在水含量较高的油气井或水质较差的区域,因此研究者尝试通过加入改性聚合物、分散剂、聚合物表面活性剂等成分来达到抑制水中钙镁离子形成水垢的效果[45]。例如,某些含有聚羧酸类、聚磷酸盐类成分的阻垢剂能有效阻止钙、镁等离子与碳酸盐的反应,防止水垢形成。李农[46]等通过静态阻垢法测定 SPI-C11(D)型泡排剂的阻垢能力,实验证明泡排剂的阻垢能力良好,如表 1 所示。研究表明,采用高分子聚合物和功能性分散剂结合的方法,能够有效增强泡沫稳定性,并保持阻垢作用的持久性。

Table 1. Scale inhibition effect of bottom hole cleaning agent [46]

表 1. 井底净化处理剂的阻垢效果[46]

序号	多功能处理剂用量/mL	碳酸钠加量/g	氯化钙加量/g	滤纸残余物质量/g
1	15	0.5	0.1	0.0002
2	15	0.5	0.2	0.0002
3	15	0.5	0.3	0.0003
4	15	0.5	0.4	0.0003
5	15	0.5	0.5	0.0004
6	15 (清水)	0.5	0.5	0.4503

3.5.3. 泡排低乳化

在气井开采实施过程中,开采后期会向气井中放入许多泡排剂、缓蚀剂等药剂。但是注入的泡排剂会和气井内的一些固体颗粒形成油包水(W/O)、水包油(O/W)或者其他更复杂的乳状液[47]。这些乳液很难使用常规处理方法处理,所以会影响生产进度。因此,需要有效破乳,实现这些油水分离。吴杰[48]等通过试瓶法评估的 UP-2.1 破乳剂对于常规乳化凝析油的最佳浓度为 0.15%,破乳沉降时间为 6 小时;而对于凝析老化油,最佳添加量为 0.25%,破乳沉降时间为 12 小时。张跃宏[49]等对泡排剂和固体颗粒物在气田中形成的凝析油乳液作用机理进行了详细阐述,指出未来破乳技术的发展应侧重于高效节能、低成本环保、高普适性及多技术结合。现有的研究表明,在油气采出液中加入破乳剂后具有较好的油水分离效果,但是具有经济投入大、不环保、加药劳动强度大等缺点。而泡排-低乳化一体剂可以在泡沫排水时减少乳化液的生成,使油水分离,降低流体粘度,减少对气井生产的不利影响,使天然气能够更顺畅地通过井筒。同时,泡排破乳一体剂将两种功能集成于一体,简化了施工作业流程,减少了药剂的使用种类和用量,降低了生产成本。

4. 结论

天然气井液锁现象是影响气井产能和经济效益的常见问题,其防治一直是天然气开采领域的研究热

点。本文综述了液锁伤害的机理、传统解液锁方法的局限性以及新型多功能解液锁剂的研究现状,旨在为天然气井液锁防治提供理论支持和技术参考。

液锁伤害的机理研究表明,外来液体在储层孔隙中的毛细管力作用下形成液阻,阻碍天然气流动,导致气井产能降低。传统解液锁方法如泡排法、压裂法等虽有一定效果,但存在局限性,如作用范围有限、无法深入储层内部等。因此,研发新型解液锁剂成为解决液锁问题的关键。

近年来,氟碳表面活性剂因其优异的疏水性和降低界面张力的能力,成为研究热点。其通过改变储层表面润湿性,促进水相排出,有效解除液锁。同时,结合缓蚀、阻垢和低乳化等多功能药剂的复配体系,能够实现储层与井筒的协同清洁,克服传统方法的不足。例如,泡排-缓蚀体系可防止井筒腐蚀,延长设备寿命;泡排-阻垢体系能抑制矿物质沉积,防止垢堵;泡排-低乳化体系则可避免乳化现象,降低流体流动阻力。

本文总结了不同类型解液锁剂的特点及其作用机制,指出其在降低表面张力、改变岩石润湿性等方面发挥了重要作用。同时,针对复杂工况,多功能一体剂的研究取得了显著进展,为高效解除液锁提供了新的思路和方法。

未来研究方向应聚焦于进一步提高解液锁剂的性能,优化药剂配方,降低使用成本,并加强对新型解液锁剂在实际工况中的应用研究。此外,还需深入探索液锁机理,结合先进的实验技术和数值模拟方法,为液锁防治提供更精准的理论依据。通过持续的技术创新和应用研究,有望实现天然气井液锁问题的高效、经济解决,提升气井开采效率和经济效益。

基金项目

南宁市重点研发计划项目(2023JHYS03)。

参考文献

- [1] 杨智凯,汪婷,史跃凯,等. 苏里格c区气藏液锁伤害机理及解液锁效果评价[J]. 石油化工应用,2017,36(12): 41-43+57.
- [2] 张黄鹤,程兴生,李永平,等. 致密气藏压裂用防液锁剂的性能评价[J]. 油田化学,2023,40(3): 401-407.
- [3] Xiong, C.M., Cao, G.Q., Zhang, J.J., Li, N., Xu, W., Wu, J., *et al.* (2019) Nanoparticle Foaming Agents for Major Gas Fields in China. *Petroleum Exploration and Development*, **46**, 1022-1030.
[https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(19\)60259-4](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(19)60259-4)
- [4] 李智慧,张庆生,黄雪松,等. 天然气井排水采气用泡排剂的研究与应用[J]. 科技视界,2015(25): 68-70.
- [5] 王磊,杨丽秋,曹旭祥. 高温高盐油藏三次采油用氟碳表面活性剂-聚合物体系流变性能研究[J]. 能源化工,2023,44(1): 11-17.
- [6] 高春升,刘孟鹏,陈焱,等. 苏里格区块低压气井排液工艺优化研究[J]. 内蒙古石油化工,2024,50(7): 9-12.
- [7] Li, Y., Wang, Y., Guo, G., Wang, K., Gomado, F. and Zhang, C. (2018) The Effect of Fluorocarbon Surfactant on the Gas-Wetting Alteration of Reservoir. *Petroleum Science and Technology*, **36**, 951-958.
<https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1458110>
- [8] Chang, W., Hu, W., Wang, X., Gu, X., Chen, S. and Chen, G. (2024) Study on an All-in-One Foaming Agent with Corrosion Inhibition for Air Foam Flooding. *Tenside Surfactants Detergents*, **61**, 158-169.
<https://doi.org/10.1515/tsd-2023-2574>
- [9] 王瑞阳. 下古气井用缓蚀阻垢剂的研发和现场应用[J]. 石油化工应用,2024,43(6): 99-103.
- [10] 郭瑜. 某气田泡排乳化凝析油破乳方法及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆科技学院,2021.
- [11] 覃善团. 中江气田气井液锁诊断及治理研究与应用[J]. 中国石油和化工标准与质量,2024,44(17): 147-149.
- [12] 向丽,陈绍斌,林永茂. 川西防液锁压裂工艺技术研究及应用[J]. 天然气技术与经济,2013,7(5): 26-29+78.
- [13] 孙婉娟,杨欢,杨志成,等. 苏里格气田低渗储层解液锁剂的制备及性能评价[J]. 石油化工,2024,53(6): 878-883.
- [14] Wang, Z., Fu, X., Guo, P., Tu, H., Wang, H. and Zhong, S. (2015) Gas-Liquid Flowing Process in a Horizontal Well

- with Premature Liquid Loading. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **25**, 207-214. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.05.003>
- [15] 王锦昌, 杨易骏. 大牛地气田老井液锁伤害及解除技术研究[J]. 石油工业技术监督, 2024, 40(5): 53-59.
- [16] 董洁. 泡排-水合物防聚-缓蚀一体剂研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2023.
- [17] 王雨生. 新场须二气井采气流程结垢机理及阻垢技术[J]. 油气田地面工程, 2024, 43(3): 69-75.
- [18] 唐雷, 王浩儒, 张荣丽, 等. 气井井筒乳化污染治理技术[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(12): 189-192.
- [19] 陈存良, 梁艳, 刘向前, 等. 苏东地区气藏液锁机理分析及液锁判识[J]. 石油化工应用, 2019, 38(5): 54-60.
- [20] Alotaibi, M.B.B., Nasralla, R.A.A. and Nasr-El-Din, H.A.A. (2011) Wettability Studies Using Low-Salinity Water in Sandstone Reservoirs. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, **14**, 713-725. <https://doi.org/10.2118/149942-pa>
- [21] Ghosh, P. and Mohanty, K.K. (2018) Novel Application of Cationic Surfactants for Foams with Wettability Alteration in Oil-Wet Low-Permeability Carbonate Rocks. *SPE Journal*, **23**, 2218-2231. <https://doi.org/10.2118/179598-pa>
- [22] 王程伟. 致密气藏液锁伤害评价及解除方法研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021.
- [23] 张兴全, 丁丹红, 周英操, 等. 精细控压钻井技术在近平衡钻井中的应用[J]. 特种油气藏, 2016, 23(5): 141-143+158.
- [24] 李洪雪. 浅析低渗气藏液锁的伤害与防治[J]. 中外能源, 2019, 24(6): 65-69.
- [25] 许园, 唐永帆, 冷雨潇, 等. 以全氟己基为基础的环保型双子氟表面活性剂研究[J]. 石油与天然气化工, 2017, 46(5): 55-58.
- [26] Lopez, G.M.C., Myers, M.B., Xie, Q., *et al.* (2021) Wettability Alteration Using Benzoxazine Resin: A Remedy for Water Blockage in Sandstone Gas Reservoirs. *Fuel*, **291**, Article ID: 120189. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120189>
- [27] 张春祥. 徐深气井储层保护配套技术研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 大庆石油学院, 2007.
- [28] 金家锋, 王彦玲, 马汉卿. 气湿性纳米 SiO₂ 颗粒对岩心润湿反转及解液锁机理[J]. 钻井液与完井液, 2015, 32(6): 5-10+103.
- [29] 张双双, 王滨, 李志臻, 等. 二氧化硅纳米颗粒增强起泡剂性能及影响因素研究[J]. 化学研究与应用, 2020, 32(11): 1960-1966.
- [30] 屈治华. 低渗气藏反凝析污染及液锁伤害解除技术研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2024.
- [31] 李震宇. 苏里格气田关停井解堵解液锁剂性能与适用性评价及应用[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2023.
- [32] 王翔. 产水致密砂岩气藏润湿反转控水增气机理[J]. 钻采工艺, 2023, 46(4): 95-100.
- [33] Takahashi, S. and Kovscek, A.R. (2010) Wettability Estimation of Low-Permeability, Siliceous Shale Using Surface Forces. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **75**, 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2010.10.008>
- [34] 冯春燕, 孔瑛, 蒋官澄, 等. 凝析油气藏气湿反转解液锁的实验研究[J]. 钻井液与完井液, 2011, 28(5): 1-4+8+95.
- [35] 杜洋, 许剑, 赵哲军, 等. 中江低渗储层解液锁剂试验研究[J]. 能源化工, 2018, 39(4): 58-62.
- [36] Jin, J., Wang, Y., Ren, J., Nguyen, A.V. and Nguyen, T.A.H. (2016) The Effect of Fluoropolymer on Wettability Alteration of Sandstone at Elevated Temperatures. *Journal of Surfactants and Detergents*, **19**, 1241-1250. <https://doi.org/10.1007/s11743-016-1866-z>
- [37] Jin, J., Wang, Y., Wang, K., Ren, J., Bai, B. and Dai, C. (2016) The Effect of Fluorosurfactant-Modified Nano-Silica on the Gas-Wetting Alteration of Sandstone in a CH₄-Liquid-Core System. *Fuel*, **178**, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.03.040>
- [38] 贾印霜, 范振忠, 刘庆旺, 等. 磺基甜菜碱耐高温起泡剂的合成与性能评价[J]. 精细石油化工进展, 2020, 21(4): 1-5.
- [39] 姬文钰, 杨宏科, 程海宏. 气田泡排剂优选及配套工艺优化研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(20): 6-8.
- [40] 蒋泽银, 李伟, 罗鑫, 等. 页岩气平台井泡沫排水采气技术[J]. 天然气工业, 2020, 40(4): 85-90.
- [41] 高敏兰. 气井用泡排-防聚一体剂应用基础研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2021.
- [42] Zhang, Q., Wei, X., Liu, J., Sun, D., Zhang, X., Zhang, C., *et al.* (2012) Effects of Inorganic Salts and Polymers on the Foam Performance of 1-Tetradecyl-3-Methylimidazolium Bromide Aqueous Solution. *Journal of Surfactants and Detergents*, **15**, 613-621. <https://doi.org/10.1007/s11743-012-1342-3>
- [43] 李宗蔓, 陈世军, 马锐, 等. 新型耐温耐盐缓蚀泡排剂的研究[J]. 化工技术与开发, 2024, 53(12): 13-18.

-
- [44] 田伟, 惠艳妮, 李彦彬, 等. 长庆气田新型缓蚀型泡排剂的开发与性能研究[J]. 当代化工, 2021, 50(12): 2788-2792.
- [45] Mpelwa, M. and Tang, S. (2019) State of the Art of Synthetic Threshold Scale Inhibitors for Mineral Scaling in the Petroleum Industry: A Review. *Petroleum Science*, **16**, 830-849. <https://doi.org/10.1007/s12182-019-0299-5>
- [46] 李农, 刘承华, 艾天敬, 等. 泡排剂的阻垢防垢性研究[J]. 天然气工业, 2005(S1): 89-91+3.
- [47] Dong, J., Dong, S., Miao, Z., Wang, Q., Li, Y., Qu, C., *et al.* (2022) Development of a High Efficient Compound Surfactant for Foam Drainage in Gas Wells. *Petroleum Chemistry*, **62**, 1047-1054. <https://doi.org/10.1134/s0965544122090134>
- [48] 吴杰, 吴永春, 周超, 等. “泡排”乳化凝析油破乳剂筛选评价实验研究[J]. 石化技术, 2017, 24(5): 218-219.
- [49] 张跃宏, 王田田, 张振云, 等. 气田凝析油乳液的稳定性与破乳技术研究进展[J]. 石油化工, 2021, 50(12): 1349-1356.