

低渗油藏储层保护技术研究现状及发展趋势

孙雅诗*, 向 渊, 刘聪宁, 李洪杉, 黄体权

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年5月18日; 录用日期: 2025年6月26日; 发布日期: 2025年7月9日

摘 要

随着常规油气资源开发的减少, 低渗油气田等非常规油气田的高效开发在我国的能源安全体系的战略地位凸显。本文根据低渗储层孔喉细小、渗透率低等特点分析低渗储层伤害机理, 发现储层的保护技术具有必要性, 并从钻井完井保护技术、增产改造保护技术、注水开发保护技术三个方面梳理低渗油藏的保护技术研究现状, 展望其未来发展趋势, 以期低渗油藏经济有效开发提供技术指导。

关键词

低渗储层, 伤害机理, 保护技术, 低伤害钻井液, 屏蔽暂堵技术, 压裂液优化, 反排控制, 防膨剂, 发展趋势

Research Status and Development Trend of Reservoir Protection Technology for Low-Permeability Reservoirs

Yashi Sun*, Yuan Xiang, Congning Liu, Hongshan Li, Tiquan Huang

School of Petroleum and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: May 18th, 2025; accepted: Jun. 26th, 2025; published: Jul. 9th, 2025

Abstract

With the reduction of conventional oil and gas resources development, the efficient development of unconventional oil and gas fields, such as low-permeability oil and gas fields, has a prominent strategic position in China's energy security system. This paper analyzes the injury mechanism of low-permeability reservoirs according to the characteristics of small pore throat and low-permeability, and finds that the protection technology of reservoirs is necessary, and combs the current research

*通讯作者。

文章引用: 孙雅诗, 向渊, 刘聪宁, 李洪杉, 黄体权. 低渗油藏储层保护技术研究现状及发展趋势[J]. 矿山工程, 2025, 13(4): 698-704. DOI: 10.12677/me.2025.134079

status of the protection technology of low-permeability reservoirs from three aspects: drilling and completing protection technology, production improvement and reforming protection technology, and water injection and development protection technology, and looks forward to the development trend of the future, with a view to providing technical guidance for the economic and effective development of low-permeability reservoirs.

Keywords

Low-Permeability Reservoir, Damage Mechanism, Protection Technology, Low-Injury Drilling Fluids, Shielding Temporary Plugging Technology, Fracturing Fluid Optimization, Backdraft Control, Anti-Expansion Agent, Development Trend

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

当油气田储层岩芯的基质渗透率处于 1~50 mD 之间时,该储层可被定义为低渗储层[1]。我国的非常规油气田的资源储量占全国石油总资源量的三分之一,且随着常规油气资源开发量的减少,而鄂尔多斯盆地、松辽盆地等非常规油气田的开发,使得低渗油藏的战略地位日益凸显,提高低渗油藏的开发效益已成为国家能源安全供给的重要举措。然而低渗储层因受其孔隙结构细小、渗流能力低等特点的影响,在开发过程中极易产生水敏效应、固相侵入、应力敏感现象等损害,使得储层堵塞及渗透率降低,降低储层产量和油田的开发效率。做好低渗储层的保护工作,能够提高最终采收率和油田开发的经济效益,使我国石油行业的稳健发展[1],因此储层的保护技术具有必要性。本文主要从油藏开发的全过程对储层保护技术的研究进展进行讨论,重点分析在钻完井过程中、增产改造和注水保护方面的储层保护技术,以及对储层保护技术的发展趋势进行展望,为低渗油藏经济有效开发提供技术指导。

2. 低渗油藏储层损害机理

低渗储层损害机理可以分为物理损害和化学损害,物理损害包括固相颗粒堵塞和应力敏感等,化学损害包括水敏、结垢及润湿性反转等。

物理损害中的固相颗粒堵塞是指由于低渗储层孔道喉道狭小,在钻井过程中钻井液中的固相颗粒及地层中的岩石颗粒在正压差作用下侵入到储层深部之中造成孔喉堵塞,使得储层的渗透能力下降的损害[2]。应力敏感性伤害是指在钻井过程中钻井液与储层岩石颗粒接触时会产生力学作用及化学耦合作用,使得储层岩石的力学性质发生一定程度的减弱,再加之岩心自吸作用,外来流体会不断渗入到储层内部,使得储层岩石内部基质的力学性质降低。此外,若钻井液呈偏碱性,会与岩石表面的粘土矿物相互作用,形成侵蚀孔,降低储层的力学性质,使其表面的结构变得疏松[3]。在这种应力敏感性伤害的情况下,储层岩石力学性质降低,储层岩石表面的粘土颗粒很容易脱落,进而堵塞裂缝,使得储层渗透通道堵塞,渗透率下降。是制约储层开发的关键因素。

化学损害中水敏损害是指由于低渗储层中富含蒙脱石、高岭石、绿泥石等敏感性矿物,极易引发五敏伤害,其中以水敏问题最为突出,有相关文献研究显示,水敏造成的损害通常超 40%,严重时可达 80% 甚至更高[1]。结垢是指在油田的注水开发过程中,储层地层水与注入流体不配伍的混合作用引起了结垢,如地层水中含有钙离子,注入水中含有 CO_3^{2-} ,那么则会有 CaCO_3 结垢趋势。这种结垢多在晶体生长的过

程中形成,而晶体主要出现在孔隙与喉道中,由于低渗储层孔喉细小,即使很轻的结垢也会对储层造成损害[4]。

综上,低渗储层由于其特殊地层特征在开发过程中易受到损害,降低油藏开发效率,本文从低渗储层的损害机理研究储层保护技术。

3. 低渗油藏储层保护技术研究现状

3.1. 钻井完井保护技术

钻井完井作业作为储层保护重要的一环,其在作业过程中引发的损害是不可逆的。在钻井完井过程中,由于低渗储层具有的特殊性质,储层在钻井过程中易受损害影响开发经济效益,使得钻井过程中的储层保护工作也变得重要。近年来钻井完井过程中的储层保护技术主要集中在低伤害钻井液、屏蔽暂堵技术方面。

3.1.1. 低伤害钻井液

低伤害钻井液通常指无固相钻井液或改性聚合物钻井液等对储层伤害低的钻井液,能够有效降低储层的伤害,具有良好的储层保护效果。无固相钻井液具有无粘土、流变性良好的特点,能够降低储层被固相入侵的机率。刘程[5]等研究了一种新型无固相钻井液即甲酸盐钻井液,在防止储层污染、储层保护等方面具有优越性。尤源[6]等研制了一种由清水添加大约 1% (g/mL)复合而成无固相钻井液,其具有良好的井壁稳定性,且钻速高、成本低,并且能够很好地适用于低渗储层。张斌[7]等研究出了一种弱凝胶无固相钻井液技术,钻井液中分子缠绕形成网架结构具有良好的悬砂能力,并且能迅速形成致密滤饼,阻碍液相向储层的侵入,降低储层损害。改性聚合物钻井液则具有抗温抗盐、降滤失、强抑制等特性,在维护井壁稳定和储层保护方面有良好效果。杨枝等[8]研制了一种天然改性低分子聚合物钻井液,在胜利油田现场试用发现,该种钻井液良好的清洁性和井壁稳定性。李根[9]等人制备了一种环糊精改性纤维素聚合物,将其加入到钻井液之中通过实验发现其能够有效降低滤失,保护井壁稳定性。

3.1.2. 屏蔽暂堵技术

屏蔽暂堵理论是防止储层被液相和固相侵入的有效办法,结合低渗储层的特性,发展了一系列的技术,如理想充填暂堵、纳米暂堵剂等技术。纳米暂堵剂相较于普通暂堵剂以小粒径优势,能在储层微孔隙形成致密封堵,阻碍固相颗粒及流体对储层的侵入,有效封堵和保护储层。黎然[10]等通过半连续乳液聚合法以苯乙烯等为原料,合成了一种能够有效地封堵储层维护井壁稳定性且具有吸附性的纳米封堵剂 NanoZJS-1,具有良好的储层保护作用。倪晓骁[11]等合成的具有憎液性能的纳米封堵剂 SNP-1,能够反转毛管力,降低液相堵塞,防止压力传递。王建华[12]等合成了一种能有效封堵微裂缝的油基钻井液用纳米聚合物封堵剂。理想充填暂堵技术是通过匹配储层孔喉,对不同粒径的封堵颗粒按比例复配来实现封堵,较常规封堵方法效果更理想。其具体方法是通过压汞实验等方法测出最大孔喉直径 d_{90} ,将 d_{90} 与暂堵剂颗粒“累积体积百分数与 $\sqrt{d}$ ”的坐标原点相连得到“油保基线”,选择颗粒粒径与此线接近的暂堵颗粒暂堵效果越好[13]。吴江[14]等开发专用软件,优化 1000 目、600 目、100 目 CaCO_3 暂堵剂配比至 2:13:5,在吐哈油田提升产能超 45%;孟尚志[13]等基于该理论,在昆 2 井优化暂堵剂,使储层渗透率恢复超 85%,增强井壁稳定性。

3.2. 增产改造保护技术

3.2.1. 压裂液优化

压裂液优化是指通过科学调整液体成分和性能,实现高效、经济且环保的裂缝创建与支撑,目前主

要聚焦于低分子压裂液和 VES 清洁压裂液。低分子压裂液具有小分子、易破胶、残渣少、对储层伤害低等特点,是增产措施的主要手段。陈虎等[15]通过引入磺酸基团和第三种抗盐单体,研制了一种耐温、抗盐性的低分子清洁压裂液,并且对酰胺基团的水解具有抑制性,能在提升裂缝导流能力减少压裂液对储层的侵入伤害。李海娟[16]等着眼于提高压裂液的抗剪切性和流变性,通过实验得到了低分子聚合物压裂液体系的最佳配比,具有极佳破胶性能,能够很好地降低储层在压裂过程中的伤害。VES 清洁压裂液简单来说是一种粘弹性表面活性剂无聚合物压裂液体系,其作用机理是通过表面活性剂中的季铵盐在盐水中溶解形成的胶束结构使压裂液具有粘弹性,从而高效携带支撑剂[17]。董近兴[18]等选用了十六烷基三甲基氯化铵作为压裂液主剂,以水杨酸钠为辅助剂研制了一种 VES 清洁压裂液,经过性能评价发现其无明显滤饼产生,能够达到清洁压裂的效果储层保护效果良好。全少凯[19]等按照最佳配比浓度制备了一种纳米改性 VES 压裂液,其优秀的弹性力使该压裂液的稳定性和配伍性良好。结合低渗储层易受高分子聚合物残渣伤害的特点, VES 压裂液通过“无残渣、自破胶、低侵入”的技术路线,在降低储层孔隙和裂缝导流能力损害的同时,还能够避免水敏、盐敏等其他储层伤害。

3.2.2. 反排控制

在低渗油藏的开发过程中,返排控制是保障储层不受损害的关键环节,强制闭合技术作为返排控制的重要手段主要作用于压裂后的裂缝闭合阶段。在压裂作业完成后,裂缝处于张开状态且充满压裂液。若返排过程控制不当,支撑剂可能会随流体运移,导致裂缝内支撑结构失效,同时压裂液长时间滞留会与储层岩石发生复杂物理化学反应,损害储层。强制闭合技术通过精准调控井口压力和流量,使裂缝在合适时机快速闭合,减少压裂液在储层内的滞留时间,防止支撑剂回流,维持裂缝导流能力,从而提升油藏开发效率。李华[20]等研究表明,合理运用强制闭合技术,可使压裂后油井的产能提升幅度比常规反排方式高出 20%~30%。

3.3. 注水开发保护

3.3.1. 精细过滤

在低渗油藏注水开发进程中,因低渗油藏的特性极少量的杂质都有可能在狭小的孔隙喉道处形成堵塞,从而严重阻碍流体的渗流,因此对注入水的纯净度要求极为严苛。精细过滤并达到微米级水质标准是守护储层的核心要素。

微米级水质标准是对注入水中微米尺度的悬浮物、胶体、微生物以及溶解盐类等杂质进行严格把控,借助高精度的膜过滤装置、多层滤网过滤器以及滤芯式过滤器等设备,对注入水实施多级串联过滤,先通过粗滤去除较大颗粒,再经精滤处理,拦截微米级的细微杂质。冯明华[21]等指出,严格落实微米级水质标准,能够有效规避因杂质堵塞引发的储层渗透率衰减问题。研究表明,去除水中的钙、镁等有害离子,可显著降低其与储层岩石发生化学反应、生成沉淀的概率,避免化学堵塞,维持储层孔隙的畅通。而杀灭水中微生物,比如硫酸盐还原菌等,能防止微生物大量繁殖造成的生物淤堵,保障注水通道稳定运行。在胜利油田东辛采油厂莱 113 区块的实际应用中,遵循微米级水质标准的注水系统,其注水井的吸水指数波动明显减小,更为稳定,油藏的注水开发效果显著提升,油井产量有所提高,含水率降低,为低渗油藏的高效开采筑牢根基。

3.3.2. 防膨剂

防膨剂是防止粘土膨胀的粘土稳定剂,能够降低储层伤害,目前主要使用的有 KCl、聚季铵盐类防膨剂。KCl 防膨剂的原理是通过 K^+ 的运移,使其嵌入到蒙脱石间隔之中防止粘土水化膨胀,具有使用简单、成本低等特点,但其效果会随着土体环境的改变而减弱,在无机盐防膨剂中, KCl 防膨剂与 NH_4Cl

防膨剂对比发现 KCl 的防膨效果更好[22]。聚季铵盐类防膨剂是通过聚季铵盐离子水解进行吸附中和,达到防膨的目的[23]。王晨[24]等合成了一种以三乙烯四胺和 3-氯-2-羟丙基三甲基氯化铵为原料,通过加热后萃取水相再将水相减压 20 mmHg 180℃ 高温蒸馏的方法,调整用量制成了一种季铵盐防膨剂,测试得到在防膨剂具有良好防膨效果时,用量仅为 1%。冯浦涌[25]等以聚醚胺、季铵化试剂等为原料,通过控制聚醚胺与具季铵化试剂的反应温度,逐步加入 AM-DMDAAC 共聚物搅拌的方法制成了一种双季铵盐抑砂防膨剂,具有良好的防膨、缩膨功能。

4. 低渗储层保护技术发展趋势

从以上几个方面对低渗储层保护技术进行了研究,发现渗储层保护技术主要围绕着钻井液和钻井液中的添加剂进行,降低水敏、水锁、固相侵入等损害。但实际上低渗储层的保护应该是全方面全过程地进行,不仅是在钻完井过程还有后续的压裂过程等等都需要进行储层保护,因此储层保护技术的发展有如下趋势。

4.1. 全过程储层保护一体化技术

固相堵塞、水敏损害等各种损害储层的问题皆有对应的保护技术,然而实际上储层损害在油藏开发的全过程中均存在,但储层保护技术确实并不是贯穿始终的,即储层保护只在油气藏开发的某一个过程存在,并不连续。游利军[26]等提到,在钻完井过程中进行了储层保护,很可能在增产改造过程中产生新的储层伤害,这种伤害与钻完井过程中产生的损害叠加,会使得储层损害更严重,储层保护难上加难。蒋官澄[27]等提到,油气生产每个环节所产生的损害都会给另一个环节产生影响,同一岩心在流速达到一定时会产生弱速敏性损害,而在与盐水接触后变为强速敏性,因此提出了储层保护应具有全局性。因此,要在进行储层保护时提前预防储层伤害,而不是等伤害出现时再解决,要注重储层保护技术贯穿全过程,降低储层损害,提高油气藏产量。

4.2. 人工智能储层损害预测与智能保护技术

随着智能油气田的发展,储层保护技术的智能化也逐渐兴起。储层保护原本就是贯穿整个油气田开发的全过程,其内容复杂而多变。不同地区不同储层其损害机理不同,导致储层损害判断和储层保护技术的决策需要大量理论知识及经验。而提高这个决策的效率及准确性可以依靠人工智能技术进行。沐华艳[28]等提到了运用人工智能技术、决策系统等建立起储层保护智能决策系统,能够对储层损害机理等相关数据进行整合,建成高效储层保护数据库,构建一个能应对各种复杂情况的模型,建立起储层保护智能决策系统,从而可以得到最优的储层保护方案,提高储层保护技术决策的效率和精确性。但同时,该项技术也面临不少问题,如油藏环境差异大,其面对复杂效果时效果不一;或是配套软件的研发不够成熟,暂且无法配合软件落地等。但随着人工智能技术的发展及储层伤害预测评价体系的成熟,这种人工智能储层损害预测与智能保护技术会越来越成熟,能够更好地保护储层,提高油藏采收率。

4.3. 环保材料技术

随着我国环境保护意识的不断提升,低渗透油藏开发对环境友好型技术的需求正迅速增长。在这样的背景下,生物降解型处理剂因其环保和高效的双重优势,已成为低渗透油藏储层保护领域的研究焦点。刘忠卫[29]等人提出了一种以木质素、生物油脂和纳米 SiO_2 为原料的驱油剂,该驱油剂除了能够提高驱油效率,同时原料均对环境无害,并且废物利用具有较高的经济效益。特别是木质素和生物油脂作为可生物降解材料,在油田开采作业完成后,能在相应活性酶的作用下迅速分解,避免了传统化学驱油剂残留造成的长期污染,有效缓解了开发与生态保护之间的矛盾,并展示了生物降解型处理剂在环保低渗透

油藏开发中的应用潜力。尽管目前生物降解型处理剂的产业化仍面临诸多挑战,例如改性工艺成本高昂和微生物群落影响难以控制等问题,但从行业发展趋势来看,生物降解型处理剂的应用不仅满足了当前严格的环保法规要求,而且符合石油开采行业可持续发展的战略目标。随着材料科学与生物技术的深入融合,未来的研究将集中在原料配方的优化和制备工艺的创新上,以进一步提升处理剂的性能。这种技术革新将推动石油开采行业向更绿色、更高效的方向发展,为全球能源开发与生态环境保护的和谐共生提供新的范例和解决方案。

5. 结语

低渗、特低渗油田的逐渐被开发,由于其具有的孔喉细小、低渗透率特点,在开发过程中容易产生无法恢复的储层损害,因此也越来越需要储层保护技术的正确应用,以保护好储层。储层保护技术目前主要集中在钻井过程,而在其他过程则相对较少,但储层保护技术实际上是无时无刻存在的,各个阶段皆存在储层伤害。需尽快使储层保护技术一体化,减少储层伤害的叠加,提升油气藏的采收率。同时,随着智能油气田和人工智能的兴起,发展人工智能储层损害预测与智能保护技术已成为当下热点,并且该技术能提高储层保护决策的效率和精确性。

参考文献

- [1] 李秀灵,张海青,杨倩云,等.低渗透油藏储层保护技术研究进展[J].石油化工应用,2013,32(2): 10-12+15.
- [2] 梅青,唐洪明,赵峰.华北油田低渗透油藏储层保护技术研究[J].西部探矿工程,2010,22(4): 62-65.
- [3] 张慧娟.低渗储层钻井液-压裂液复合损害机理及保护对策研究[J].化学工程与装备,2024(7): 73-75.
- [4] 朱健.胜利油区低渗储层注水配伍性研究[J].中国科技信息,2008(17): 26+32.
- [5] 刘程,李锐,张光华,等.新型无固相钻井液体系研究新进展[J].天然气工业,2009,29(11): 64-66+142-143.
- [6] 尤源,张洁,赵向阳.一种无固相钻井液的研制及应用[J].天然气工业,2006(3): 78-80+165-166.
- [7] 张斌,杜小勇,杨进,等.无固相弱凝胶钻井液技术[J].钻井液与完井液,2005(5): 35-37+85.
- [8] 杨枝,许洋,王治法,等.天然改性低分子聚合物钻井液技术[J].特种油气藏,2015(5): 145-147.
- [9] 李根,王业众,温渊,等.环糊精改性纤维素聚合物的制备及在钻井液中的效果评价[J].科技创新导报,2020,17(27): 38-41.
- [10] 黎然,刘玉娥,张军,等.纳米封堵剂 NanoZJS-1 的合成与评价[J].石油化工,2021,50(9): 934-939.
- [11] 倪晓晓,蒋官澄,王建华,等.油基钻井液用憎液性纳米封堵剂[J].钻井液与完井液,2021,38(3): 298-304.
- [12] 王建华,李建男,闫丽丽,等.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(6): 5-8+91.
- [13] 孟尚志,鄢捷年,艾贵成,等.理想充填暂堵新方法在昆 2 井储层保护中的应用[J].天然气工业,2007(8): 79-81+138-139.
- [14] 吴江,鄢捷年,黄凯文,等.理想充填油气层保护技术在吐哈油田的研究与应用[J].油田化学,2015,32(2): 163-168.
- [15] 陈虎.低分子清洁压裂液的实验评价与应用[J].油气田地面工程,2012,31(10): 97.
- [16] 李海娟,宋吉锋.一种适于低渗油藏开发的低分子聚合物压裂液体系研究[J].承德石油高等专科学校学报,2020,22(6): 32-37.
- [17] 刘新全,易明新,赵金钰,等.粘弹性表面活性剂(VES)压裂液[J].油田化学,2001(3): 273-277.
- [18] 董近兴,张涛,任康江.VES 清洁压裂液的配制及性能评价[J].煤,2024,33(8): 1-5.
- [19] 仝少凯,岳艳芳,贾栋尧,等.纳米 ZnO 改性 VES 压裂液流变特性研究[J].当代化工,2023,52(12): 2941-2945+2954.
- [20] 李晓伟,吕艳丽.低渗油田注水过程中储层保护技术探讨[J].石化技术,2022,29(9): 85-87.
- [21] 冯明华,郝恒泽.低渗油藏注水保护技术研究[J].内蒙古石油化工,2012,38(7): 83-84.
- [22] 李丛妮,龚瑶,李芬芬,等.油气田用粘土稳定剂的发展及制备研究[J].应用化工,2020,49(5): 1256-1260+1265.

- [23] 孙崇伦, 童雄, 谢贤, 等. 黏土矿物的防膨技术研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(12): 3446-3451.
- [24] 王晨, 韩非, 常峰, 等. 季胺盐型防膨剂的制备及其性能评价[J]. 陕西科技大学学报, 2021, 39(5): 75-80+89.
- [25] 冯浦涌, 王贵, 胡红福, 等. 新型双季铵盐抑砂防膨剂性能评价及作用机理探讨[J]. 中国海上油气, 2017, 29(3): 73-77.
- [26] 游利军, 龚伟, 康毅力, 等. 致密/页岩油气储层保护技术研究进展与方向[J]. 断块油气田, 2025, 32(1): 27-34+152.
- [27] 蒋官澄, 程荣超, 谭宾, 等. 钻井过程中保护低渗特低渗油气层的必要性、重要性与发展趋势[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(4): 405-411.
- [28] 沐华艳, 蒋官澄, 孙金声, 等. 人工智能在储层保护中的研究现状与发展方向[J]. 石油科学通报, 2024, 9(6): 960-971.
- [29] 西安环博新材料科技有限公司. 一种用于低渗油藏开发用可降解型驱油剂[P]. 中国专利, CN202410821672.2. 2024-09-27.