

供给

阅读提示

责任编辑:李佳欣
电话:59963261
邮箱:jjx@sinopec.com
审校:张春燕
版式设计:巩宝贵



周“油”列国
油事精彩

传统储层改造如同“双刃剑”，在打开油气通道的同时，往往会造成渗透率下降，影响最终采收率。低伤害储层改造则通过精准诊断、应用智能材料、工艺优化等手段，将工程作业对储层的负面影响降至最低。本版专题展示中国石化在低伤害储层改造方面的实践成果，展现他们在微孔期间“穿针引线”，变“硬改造”为“柔唤醒”，让脆弱储层在精心呵护下释放产能。

低伤害储层改造： 变“硬改造”为“柔唤醒”



东北油气龙凤山气田大型压裂施工现场。张凯摄

专家视点

坚持保护与改造并举 构建全过程低伤害技术体系

□集团公司高级专家 王海波

当前，低伤害储层改造技术已由早期单一依赖压裂液降伤害，发展为涵盖储层伤害诊断、清洁压裂材料、少水/无水改造、解堵增产及返排效果评价等技术的完整体系。在此基础上，国内外技术进展各有侧重：国外相关研究与现场应用主要由国际大型油服公司推动，近年来重点发展了储层伤害修复、泡沫压裂及纳米强化等方面，在降低水耗、减少残渣伤害的同时提升返排效率；国内则面向非常规复杂油气藏，逐步形成低伤害压裂液体系、二氧化碳复合压裂等关键技术，实现储层保护与增产改造同优化。

聚焦国内实践，我国油气勘探开发持续向非常规领域纵深推进，低渗、致密的页岩油气储层已成为增储上产的主战场。然而，这类储层往往具有黏土含量高、孔隙半径小、润湿性复杂等特点，传统改造工艺易造成水锁、固相堵塞等不可逆伤害。针对上述挑战，中国石化坚持保护与改造并举的理念，构建了覆盖钻井、压裂、生产全过程的低伤害技术体系：在液体体系方面，研发低伤害钻井液、纳米改性压裂液等功能材料；在压裂工艺方面，创新技术经济一体化参数优化、全过程气体增能压裂、二氧化碳复合压裂等核心工艺；在措施作业方面，形成复合解堵技术，有效支撑生产并全生命周期管理。该技术体系也标志着储层改造技术向着精细化、绿色化方向迈进。

纳米改性低伤害压裂液是破解致密气藏“微孔喉液滞留伤害”的核心技术。该技术核心在于疏水型纳米封堵剂与吸附抑制剂的协同作用——纳米封堵剂在储层孔隙形成屏蔽层，阻止压裂液侵入喉道；吸附抑制剂则在孔喉内壁竞争占位，降低压裂液附着能力，促进其返排。目前，国内外对油田开发用的纳米材料研究主要集中在材料制备、伤害机理、注入参数优化等方面。与常规体系相比，该技术可显著降低侵入孔喉液量与吸附滞留量，储层伤害可降低50%以上。中国石化西南油气国内首创多种纳米改性核心处理剂，在西南、华北等工区应用57井次，返排效率提高30%，测试产量提高1.2~2倍，应用效果显著。下一步，将加强纳米材料与地层孔喉的精准匹配、混合润湿储层的适应性调控等技术研究，推进技术升级。

二氧化碳复合压裂技术是实现“低伤害、高造缝、强增能、助环保”多元功效一体化的绿色工艺。该技术充分发挥超临界二氧化碳低黏度、高扩散、酸溶性特性，通过前置注入二氧化碳降低破裂压力、激活天然裂缝，后续水基压裂液扩缝携砂，兼具保护储层、增能助排、置换油气、破封存等多重功能。中国石化聚焦胜利油田济阳页岩油、东北油气致密气藏等非常规油气区攻关，历经多年探索与技术迭代，形成了前置二氧化碳压裂、二氧化碳多元复合压裂等特色技术。截至2025年底，已在博兴、利津等页岩油井累计实施60余井次，峰值日产量气当量超100吨的井有30余口；二氧化碳多元复合压裂和泡沫压裂技术已在东北油气金山、龙凤山、查干花、聚宝山等多个气田推广应用，平均单井产量提升33.8%。当前二氧化碳干法压裂技术仍面临携砂能力差、施工摩阻大、全链条成本偏高等挑战，中国石化将深化二氧化碳压裂-驱油-封存一体化研究，攻关二氧化碳高效能压裂液体系研发与低成本工艺，推动CCUS(二氧化碳捕集、利用与封存)与压裂协同融合。

复合解堵技术就是恢复老气井产能的“靶向治疗”方案。针对水锁及有机无机垢形成的复合伤害，研究人员开发了分子直径小于50纳米的小分子生物酶复合净化剂，能高效溶解93%以上的各类顽固垢堵，在强力解堵的同时最大程度保护储层。在施工工艺上，构建“大流量注入、液氮强顶替、放喷促返排”定向清洗流程，形成完整精准解堵方案闭环。该技术已在川西、新场、洛带等气田成功应用，年增产天然气数千万立方米，为老井解堵增产提供了有效方案。

低伤害储层改造技术体系的应用成效显著，已成为非常规油气效益开发的重要支撑。下一步的技术攻关将聚焦三个方面：一是深化地质工程一体化智能决策技术，利用人工智能赋能压裂参数实时优化，做到从设计、施工源头降低储层伤害风险；二是攻关革命性减害提效工艺，降低技术成本，进一步促进低伤害材料体系、复合解堵剂、二氧化碳改造等技术的规模化应用；三是构建全生命周期储层健康管理体系，将保护理念从建井延伸至生产维护，形成钻压采一体化保护格局。随着技术迭代升级，低伤害储层改造将为保障国家能源安全、实现“双碳”目标作出更大贡献。

(曾皓 陈凯 李宁 整理)

研·把脉储层

储层伤害成因复杂，如何精准施策？科研人员像高明的医师，利用数字岩芯和AI算法，为储层伤害做权重分析，先“诊”后“治”，让储层改造从“凭经验”走向“靠数据”。

华北油气：精准诊断每一处“病灶”

□华北油气储层改造专家 姚昌宇

当前，大部分国内油气田已进入非常规开发阶段，主力油气田普遍进入开发中后期，老油田整体进入特高含水阶段，稳产难度大，需要依靠强化措施维持稳产，而储层改造是主要措施之一。面对鄂尔多斯盆地致密-低渗资源，华北油气采取低伤害储层改造来提升单井最终采收率、延长稳产期、降低全生命周期成本，从而应对资源劣质化，实现油气田可持续效益开发。

在鄂尔多斯盆地边缘，华北油气面对的是业内公认的难动用储量——致密、低压、高含水、强水敏。近年来，该公司大力展开低伤害储层改造研究，形成了一套以“机理研究为先导、防治结合为核心”的低伤害储层保护技术体系，在鄂尔多斯盆地多个区块实现关键突破。

造成储层伤害的原因不是单一的，而是物理、化学、生物、热力等多种作用叠加的复杂结果，也有地层本身特性存在的诱因。像鄂尔多斯盆地富县区块，黏土矿物含量高、伊蒙混层占比大，属于强水敏储层。同时，孔喉微小、排驱压力大，压裂液一旦进入，就像水锁一样很难排出。为此，华北油气工程技术人员对储层

保护进行系统研究，将地质工程一体化与数字化预测相结合，建立了室内与矿场结合的评价体系，创新利用数字岩芯技术与模糊数学预测方法，结合人工智能算法，建立储层伤害权重分析模型，对潜在伤害进行权重分析，预测不同储层的潜在伤害类型及权重，从而在施工前就优化保护方案，为后续针对性技术对策的制定奠定了坚实基础。

“十五五”期间，致密气效益开发面临储层品质更差、储层条件更复杂、极限加密间距(小于300米)、储层含水更高(含水饱和度55%~65%)、全流程成本管控压力大等问题，提产降本增效仍需加大工艺技术支撑力度，以及精准发力突破技术瓶颈。

下一步攻关主要聚焦三个方向：一是深化地质工程一体化智能决策，利用动态数据与人工智能，实现压裂设计从“静态方案”到“实时优化”的跨越；二是攻关革命性减害提效工艺，重点推进少水压裂、低成本石英砂大规模替代、纳米智能驱排剂的规模化应用，从材料和工艺源头降本减害；三是构建全生命周期储层健康管理体系，将保护理念从钻完井延伸至生产维护，通过精细注采调控预防垢堵、出砂等后期伤害。

压·绿色激活

压裂不是大水漫灌，既要压得开，又要伤得轻。利用二氧化碳独特物性，实现增能、造缝、减排的协同效益。

东北油气：用二氧化碳疏通“经脉”

□东北油气石油工程环保技术研究院院长 张冲

近年来，在松辽盆地致密气藏高效开发过程中，压裂技术不断迭代升级，正加速从传统水基压裂技术向低伤害、高导流、保长效技术方向演进，保障单井产能稳中有升。为实现这一目标，科研人员从工艺创新、液体性能、气体增能、参数优化等多维度进行优化，降低储层内液相滞留与二次伤害。通过多轮次攻关研究，二氧化碳多元复合压裂技术应运而生，以独特的多元协同机制，为破解这一难题提供了系统性方案。

致密砂岩气藏普遍具有孔喉微细、水敏性强、低压低渗等特点，传统水基压裂虽能造缝，却易引发严重水锁、黏土膨胀及反凝析伤害，大量入井液体滞留于储层，反而堵塞气路。对此，我们深入探索二氧化碳-驱油-封存一体化研究，攻关二氧化碳多元复合压裂技术，通过二氧化碳与氮气、泡沫或滑溜水等介质协同组合，大幅减少入井液量，实现少进液、多产气，从根本上降低储层二次伤害。

东北油气率先构建了覆盖“实验-模拟-设计-施工”全链条的二氧化碳多元复合压裂技术体系。通过大量岩芯流动实验与数值模拟，量化了二氧化碳不同注入比例及组合方式对孔隙结构改善、裂缝扩展效率及返排性能的影响，建立了适用于龙凤山、金山、聚宝山等气田的选井选层标准与工艺参数优化图版，推动压裂设计从经验判断迈向量化优选。目前，该技术已累计实施66井次，其中，龙凤山气田

B、C类储层见气周期缩短25.5%，排液速度提高68.9%；梨树地区低品位厚层储层单井产量平均提升23.5%。综合对比常规压裂井，实现增产天然气1.24亿立方米，走出了油气田绿色提产与效益开发协同并进的新路径。

二氧化碳多元复合压裂并非单一技术，而是一套可灵活组合的工具箱。在基质主导阶段，采用前置超临界二氧化碳处理，激活微孔渗流；在裂缝发育区，耦合二氧化碳泡沫体系，增强封堵与携砂能力；在凝析气藏，则强化二氧化碳-氮气混相增能效应。这种“因层施策、多元协同”的思路，显著提升了技术适应性。2025年以来，该技术在牛地、阔中等多个致密气田应用均收到良好效果，验证了其在不同地质条件下的可复制性。

展望未来，随着中国石化勘探开发不断向深层、超深层致密储层进军，对低伤害、高效率压裂技术的需求将愈加迫切。二氧化碳多元复合压裂不仅契合绿色低碳发展战略，更具备显著的工程经济价值——既是一种“治疗手段”，缓解储层伤害，也是一种“增能介质”，提升导流能力。从长远看，这项技术还可与CCUS协同发展，实现驱气与碳封存双赢。

下一步，科研人员将在现有基础上进一步细化二氧化碳-储层相互作用机理研究，优化多元介质配比、注入制度与相态控制策略，加快形成标准化、模块化的工艺包。同时，推动建立跨油田的二氧化碳多元复合压裂技术共享平台，促进成果在全系统规模化应用。

(张凯 宋宪实 整理)



西南油气技术团队讨论全过程增能压裂技术。

朱洪宇 摄

钻·温柔初探

钻井，是储层面对的第一次考验。新一代钻井液体系让“强攻”变为“智取”，从源头降低了伤害风险，为非常规储层的高效动用建起了第一道防线。

西南油气：给井筒穿上“防护服”

□西南油气油田化学专家 兰林

致密气作为西南油气天然气产量的压舱石，长期稳产具有重大意义。但随着开发逐渐深入，致密气资源“甜点”越来越少，储层孔隙越来越小，更易受到工程作业带来的伤害。钻井作为打开储层的第一道作业工序，使用的钻井液是含有大量固相颗粒的工作流体，作业时会产生固相堵塞和液相侵入，占据油气渗流通道，严重影响产量。

基于此，该公司研制了新一代钻井液体系，主要是利用特殊成膜材料给井筒穿上一层密实的防护服，减少固、液相的侵入。同时，研制的防水锁剂能显著降低钻井液表面张力，让进入储层的有害液体变为改善地层水流动的有益药剂，帮助流体整体返排。

这项钻井液技术最早在蓬萊镇组开展试验，应用井渗透率恢复率提高22个

百分点，压裂后日平均无阻流量6.3万方米，见到较好效果。在沙溪庙组，101HP井高效穿越泥岩段，水平段长达1006米，钻井周期较设计缩短近30%，压后在油压7.3兆帕下日产量10万方米，推广应用后为该井区建成多口工业气井奠定了坚实基础。在大邑107井须家河组的推广应用，经受住了盐水侵、二氧化碳污染等复杂工况的考验，钻井周期较设计缩短16%，较前期缩短55%。

目前，该技术已应用38口井，累计进尺超4万米，已经由浅入深完成从蓬萊镇组到沙溪庙组再到须家河组的全面推广，其可靠性和成熟度得到了充分验证。

下一步，我们将在区域地质认识的基础上，剖析漏失规律与快速堵漏的匹配关系，以功能材料研发(如研制可控降解的堵漏材料)为核心、工艺配套为手段，构建更为高效的低伤害钻井液技术。

(王峻峰 任茂 简高明 整理)

采·靶向治疗

气田开发后期，堵塞是老井的“通病”。“储层+井筒”一体化治理体系提供了从“病理分析”到“临床手术”的靶向方案，让老井重获新生。

西南油气：纳米酶为老井“延寿”

□西南油气石油工程技术研究院 采输工艺所主任师 许剑

对于川西致密砂岩气藏，一批中浅层老井如今正面临开发中后期的共性难题。一方面，地层水锁、化学药剂残留与堵塞液渣交织，导致近井带储层孔隙堵塞；另一方面，长年累月的垢质沉积于井筒，造成完井管柱流通通道缩径。双重堵塞叠加，致使气井产能持续下降，已成为制约老气田稳产增产的瓶颈。

针对近井带储层堵塞难题，我们首先通过岩芯伤害实验，确认了油水液锁伤害、入井工作液残渣、有机垢与无机垢复合污染是气井产能衰减的核心原因。传统治理净化剂穿透能力有限，难以深入储层基质。为此，我们确立了“温和唤醒、精准施治、深度净化”的技术思路，研发出小分子生物酶复合净化剂。该药剂分子直径为纳米级，可有效渗入岩石纳米级孔隙，对各类堵塞物的溶解效果好，且不破坏储层结构、无二次伤害，实现了对储层的高效净化。在工程工艺上，我们配套打造了“大流量注入、液氮强顶替、放喷促返排”的定向清洗流程，形成解堵与排出的完整技术闭环。

在解决储层堵塞的同时，我们同样关注完井管柱的畅通问题。随着气井长期生产，地层颗粒、无机盐和有机物在管壁上沉积结垢，导致流通面积逐渐缩小，严重时甚至造成井筒报废。针对这一挑战，我们采用“化学解堵为主、机械解堵为辅”的分级治理策略。优先采用化学药剂靶向解堵，根据水垢类型精准调配专用解堵液，温和溶解剥离垢质而不损伤管壁。对于顽固性硬垢，则采用连续油管机械解堵技术，将堵塞物打碎并循环带出。

西南油气立足提高老井采收率，通过持续技术创新构建起“储层+井筒”一体化老井治理技术体系。截至2025年底，该项技术已成功应用于川西100余口老井，措施效果显著，年增产天然气2000万方米以上。相关成果已推广至深层须家河组、川南页岩气等气田，为国内同类老气田的可持续开发提供了技术借鉴。

下一步，我们将重点围绕两个方面持续攻关：一是深化储层伤害机理研究，提升堵塞诊断的精准度；二是持续优化净化剂配方与施工工艺，探索与CCUS等新技术的融合应用，实现增气与减排的协同增效，以技术创新支撑老气田稳产增产。

(刘通 叶翠莲 整理)