

新型稳砂工艺在渤海油田的应用及经济效益分析

刘 鹏 王伟军 陈治中 黄 杰 黄文奥（中海油田服务股份有限公司，天津 300459）

摘要：海上油田疏松砂岩储层微量出砂问题对油气经济开发形成双重制约：一方面，出砂导致油井减产甚至停产，直接影响油田营收现金流；另一方面，传统化学固砂工艺存在渗透率损伤大、维护成本高等经济性短板。据统计，我国海上油田因出砂造成的年产量损失达数十万吨，单井治理成本最高超千万元。在此背景下，新型稳砂技术的研发成功显著提升了油气开发的经济效益。

关键词：海上油田；疏松砂岩；微量出砂；化学稳砂；经济效益

0 引言

海上疏松砂岩油藏以其优越的物性条件，通常作为优质储层进行开采开发，这为油田带来了可观的初期经济效益。这些油藏较高的孔隙度和渗透率使得原油能够相对顺畅地流入井筒，开采成本相对较低，产出的原油产量可观，为地区经济发展提供有力的支撑。

但该类储层长期注水生产过程中，由于疏松砂岩胶结性较差，粘土组分占比比较高原因，极易发生粘土成分及细粉砂等脱离岩石骨架，进而导致地层出砂等现象，严重影响油田高效生产^[1-4]。同时，在面对地层发生堵塞现象，不可避免的会进行酸化解堵等措施，同样会破坏岩石骨架，导致地层出砂现象。化学固砂通常应用于地层出砂量大的场景，且固砂后会大幅度降低地层的渗透率，影响油气的再生产，甚至堵塞地层^[5-7]。相较于常规化学固砂措施，新型稳砂工艺仅针对出砂量小，微量出砂油气井。且新型稳砂剂不会发生固结现象，保证了井筒作业安全。

作为早期发现地层微量出砂后的特定工艺措施，新型稳砂工艺能将近井地带细粉砂拖拽至远端，并重新凝聚游离砂，形成絮凝状砂团，牢牢吸附在周围岩石骨架上（图1）。在不损失地层渗透率的同时，重新稳定岩石骨架，保障油气井的高效生产。

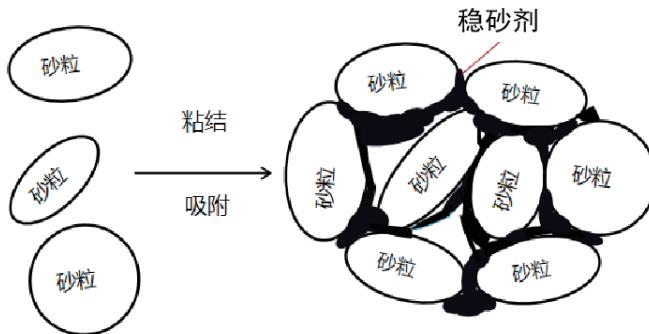


图1 稳新型砂剂作用示意图

1 稳砂作用机理

新型化学稳砂剂由两部分组成，稳砂剂主体为B剂，主要成分为丙烯酰胺共聚物、甲壳素及其衍生物壳聚糖的提取物，其分子链节含有多个阳离子基团，进入地层后吸附在岩石表面离子交换点上，压缩膨胀粘土，扩散双电层。大分子在地层形成网状修复膜，改变油藏润湿性，增油控水。

另一部分则为催化促进剂（A剂），保证稳砂主体提取物在地层中通过分子间作用力、氢键和Si-NH₂键将松散的颗粒桥接起来，将不稳定的颗粒絮凝固定形成“砂栓”，起到控砂、稳砂的作用。

2 新型稳砂剂性能评价

2.1 实验仪器

电子天平（型号 BSA224S）、离心管、100mL量筒、100mL烧杯、250mL分液漏斗、移液管、铁架台、填砂管（25×20mm/30MPa/300℃）、恒温水浴锅（型号 WNB7）、高压转样装置（型号 HBZY-70/泵腔体积 500mL/工作压力≤70MPa/150℃）等。

2.2 浓度优选评价

将40目、80目、320目石英砂按2:2:1的比例混合成模拟砂，并装填压制25×20mm填砂管中；新型稳砂剂具有较好的水溶性，将其按5%、10%、15%、20%不同浓度与清水混合配制稳砂B剂，并向填砂管内以相同驱替速率饱和不同浓度稳砂B剂1PV后，再次向填砂管内饱和1PV稳砂A剂，常温下静置2h；向经过上述处理后的填砂管驱替清水，并不断提高驱替流速，观察填砂管在不同浓度B剂下处理后的初始出砂流量。

由结果可知，未经过稳砂剂处理的填砂管，当驱替流量达到2000ml/h时发生出砂现象；5%浓度稳砂剂处理后，填砂管于3500ml/h的流量下发生出砂现象，且随着稳砂剂使用浓度的增大，相同注入体积下，填

砂管出砂时间更为滞后，填砂管抗冲刷能力逐渐增强。结合经济效益，推荐稳砂剂的使用浓度为 10%。

2.3 反应时间优选

以 2.1 中模拟砂装填砂管，并向填砂管中饱和 10% 稳砂 B 剂 1PV，饱和稳砂 B 剂 1PV，并置于 60℃下水浴不同时间；反应一段时间后，水驱观察出砂初始流量。

结果显示，当 60℃下水浴 1h，驱替流量达到 4800ml/h 时，填砂管发生出砂现象，随着反应时间的增长，稳砂效果越好，出砂时间越晚。且当稳砂剂反应 6h 后即可达到最佳的稳砂效果，为保证稳定的稳砂效果，将反应时间定为 8h。

2.4 耐温性能测定

将饱和 10% 浓度新型稳砂剂的填砂管分别放置于 20~140℃环境下反应 8h，并以不同速率对处理后的填砂管进行驱替，记录填砂管初始出砂流量。

结果可知，新型稳砂剂在 20~100℃温度下均有较好的防砂效果，且当温度为 80℃左右时，稳砂效果最佳；当温度超过 100℃后，稳砂效果大幅度降低。

2.5 防膨性能测定

配制 5%、10%、15% 浓度的新型稳砂 B 剂，用移液管量取 10mL 不同浓度稳砂 B 剂溶液于离心试管中待用；准确称取 0.50g 膨润土（精确至 0.01g）加入离心管中，混匀；在 60℃下静置 2h 后，以 1500r/min 转速离心 15min。读取膨润土膨胀后的体积 V₂，同时进行水和煤油的空白实验，读取膨润土在水中的体积 V₀，膨润土在煤油中的体积 V₁。以下列公式计算防膨率：

$$W = \frac{V_0 - V_2}{V_0 - V_1} \times 100\%$$

由表 1 可知，不同浓度稳砂 A 剂有较好的防膨效果，其防膨率均在 70% 以上，且随着浓度的增大，防膨效果越好。

表 1 不同浓度稳砂 A 剂防膨率测定

编号	新型稳砂 A 剂浓度	防膨率
1#	5%	70.6
2#	10%	72.3
3#	15%	73.8

2.6 稳定性测定

①配置水对稳砂性能的影响：以清水、5%KCL 溶液、地热水、不同矿化度液配置 10% 浓度的稳砂 B 剂后，分别向填砂管内正向饱和配置好的稳砂 B 剂

1PV，再饱和稳砂 A 剂 1PV，置于 60℃水浴下 8h，连接反驱流程，记录填砂管出砂初始流量。

结果显示，新型稳砂剂具有较好的矿化度耐受性，200000mg/L 矿化度及配置液类型对稳砂效果几乎无影响，鉴于现场施工便捷性，可用井上生产水或地热水进行稳砂剂的配置（表 2）。

表 2 配置液对新型稳砂剂稳砂效果影响

配置液	初始出砂流量	折算 8 寸半井眼米产液量 (m³/m·d)
	(mL/min)	(m³/m·d)
清水	116.7	100.5
5%KCL 溶液	120	103.6
地热水	116.7	100.5
配制水	0	113.3
矿化度 (mg/L)	2500	115
	5000	116.7
	10000	116.7
	20000	116.7
	50000	116.7
	100000	116.7
	150000	115
	200000	115

②新型稳砂剂与地层流体配伍性研究：分别取 10% 浓度的稳砂 B 剂，按 1:3 的比例与地热水及地层原油混合均匀，并置于 60℃中水浴 2h，观察实验现象。

由结果可知，新型稳砂剂与地层流体不发生反应，性质稳定，不会产生沉淀及絮状物，油水界面清晰，无乳化现象。

2.7 耐冲刷性能评价

耐冲刷性能测定实验：选取不同目数的石英砂混配压制填砂管，并向填砂管中分别正向饱和 10% 浓度的新型稳砂剂、10% 浓度的普通稳砂剂 1PV，以清水作为空白组，并在 60℃下水浴 8h 后，接入驱替流程并进行反驱，记录填砂管出砂初始流量。

相对于普通稳砂剂来说，新型稳砂剂对不同粒径的砂粒均有较强的稳定作用，且耐冲刷性强，按 8 寸半井眼米产液量进行折算，能够满足油气井大排量生产。

2.8 岩心渗透率伤害实验

实验用地层油砂装填 1#、2# 填砂管，分别以 1ml/min 恒速测试填砂管初始水相、油相渗透率水驱测渗透率。模拟现场施工程序，向填砂管内正向饱和并清洗 2PV，置于 60℃水浴锅中 2h；依次正驱清水 2PV、稳砂 B 剂 2PV，清水 2PV，稳砂剂 A 剂 2PV，并于 60℃水浴 8h，连接驱替流程，反向驱水驱，油驱（煤油）测水相、油相渗透率变化。

反驱过程中，同等驱替速度下，填砂管压差变化较小，整个驱替过程中并无发生出砂现象，且计算稳砂后水相、油相渗透率保持率均在 90% 以上，充分说明新型稳砂剂对地层渗透率伤害小，能保证油流正常产出，不会造成地层堵塞。

3 现场应用及经济效益分析

近年来，随着油田开发进入中后期，地层出砂问题日益突出，严重影响油井生产。效率和经济效益。针对这一技术难题，新型稳砂剂的规模化应用取得了显著成效。根据区块 5 口井的作业数据统计（表 3），该技术不仅有效解决出砂问题，更通过增产增效创造了可观的经济价值。

从技术效果看，稳砂措施实施后全井出砂现象完全消除，措施有效期超过行业平均水平，持续保障了油井稳定生产。其中 A4 井表现尤为突出，在维持同等泵频工况下，日产液量提升 241.92m^3 ，日产油量增加 30.23m^3 ，折算年增油量可达 1.1 万吨。按当前原油价格 4000 元 / 吨估算，单井年增收超过 4400 万元，扣除稳砂剂材料及施工成本约 120 万元后，净收益达 4280 万元，投资回报率高达 35.6 倍。即使效果较弱的 A2 井，虽因稳砂半径不足（0.4m）导致产液量未达预期，但通过泵频优化仍具备 15% 的增产潜力。

经济效益测算表明，四口井整体实施后日均增油量达 62.5m^3 ，按 90% 有效生产天数计算，年创收约 1.35 亿元。相较于传统防砂工艺，新型稳砂剂的应用使单井作业成本降低 18%，维护周期延长 2.3 倍，全生命周期可节约防砂费用约 800 万元 / 井。特别是在油藏保护方面，该技术通过抑制粘土膨胀、稳定储层结构，使含水上升率降低 4.2 个百分点，按 A 区块平均单井可采储量 5 万吨计算，预计可增加采收率 1.2%，相当于新增可采储量 6000t，潜在经济价值 2400 万元。

4 结论

①新型稳砂剂由 A、B 剂组成，通过分子间作用力及链键将不稳定颗粒吸附固定形成“砂栓”，从而

起到控砂、稳砂的作用。

②新型稳砂剂具有较强的适温性，稳定性强，不与地层流体发生反应，且防止粘土膨胀效果较好；配液方便，配置水矿化度几乎不影响其稳砂效果；同时新型稳砂剂不会发生固结，保证井筒安全，且避免堵塞地层，对油水相渗透率保持率高，充分保证油流通道。

③现场应用效果较好，进行稳砂措施作业井，均不再出砂，稳砂成功率 100%，且有效期长；产液产油量均有一定程度的提升，具有较强的应用推广价值。

④相较于传统防砂工艺，新型稳砂剂的应用使单井作业成本降低 18%，按 A 区块平均单井可采储量 5 万吨计算，预计可增加采收率 1.2%，相当于新增可采储量 6000t，潜在经济价值 2400 万元。

参考文献：

- [1] 任杨,毛庆凯,刘成林,匡腊梅,马喜超,黄泽超.海上疏松砂岩储层解堵工艺效果室内评价[J].当代化工,2023,52(07):1636-1640.
- [2] 张子之,程垚,刘宇龙,熊青山.渤海某油田油井出砂原因分析及现场解决措施[J].当代化工,2022,51(01):123-128.
- [3] 黄文奥;彭正强;田延妮;韩放;郭靖;池伸.新型固砂剂在渤海油田的防砂效果及影响因素研究[J].石油化工应用,2024,43(05):47-51.
- [4] 袁伟伟,张启龙,陈彬,徐涛,贾立新.渤海某油田油井出砂及筛管冲蚀分析[J].科学技术创新,2022(25):193-196.
- [5] 王玉功,李勇,唐冬珠,武龙,杨发.高强度树脂堵剂技术现状研究[J].内江科技,2022,43(09):18-19+36.
- [6] 宋开飞.乳液型低伤害化学防砂体系研究[D].中国石油大学(华东),2018.
- [7] 魏子扬,朱立国,张艳辉,孟科全,左清泉,胡雪.疏松砂岩油藏用化学稳砂剂室内性能评价[J].精细石油化工,2025,42(01):1-4.

表 3 部分生产井稳砂效果统计表

井号	作业时间	处理半径 (m)	作业前			作业后			有效期 (d)
			日产液量 (m^3/d)	日产油量 (m^3/d)	频率 (Hz)	日产液量 (m^3/d)	日产油量 (m^3/d)	频率 (Hz)	
A1	2023.09.24	1.1	268.21	36.19	48	343.48	43.7	40	> 504
A2	2023.10.09	0.4	320.53	16.72	50	285.06	11.33	46	> 490
A3	2024.02.16	1.3	292.61	27.35	50	481.43	29.84	46	> 367
A4	2024.03.01	0.75	184.91	13.87	34	426.83	44.1	34	> 345
A5	2024.4.29	1.4	379.29	41.67	48	382.42	43.61	42	> 283