

特种聚合物干粉压裂液技术与工程应用经济效益

张 南 (山东普瑞思德石油技术有限公司, 山东 东营 257000)

摘 要: 针对非常规油气藏压裂改造中传统压裂液体系存在的高成本、低效率及储层伤害等问题, 本文系统介绍了特种聚合物干粉压裂液技术。该技术通过纳米修饰聚合物干粉改性与高效在线混配设备创新, 实现了压裂液的速溶、抗盐、实时变粘及低伤害性能。结合页岩气、致密砂岩、碳酸盐岩等多类型储层的工程实践, 验证了其在提高施工效率、降低成本及保护储层等方面的显著优势, 为复杂油气藏高效开发提供了技术支撑。

关键词: 特种聚合物; 干粉压裂液; 高效混配; 储层改造; 经济效益

中图分类号: TE357.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 020-0079-03

Research on Special Polymer Dry Powder Fracturing Fluid Technology and Economic Benefits of Engineering Application

Zhang Nan (Shandong Puriside Petroleum Technology Co., LTD, Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: In response to the high costs, low efficiency, and reservoir damage issues associated with traditional fracturing fluid systems in unconventional oil and gas reservoir stimulation, this paper systematically introduces the technology of special polymer dry powder fracturing fluid. This technology achieves rapid dissolution, salt resistance, real-time viscosity adjustment, and low damage performance of fracturing fluid through the modification of nano-modified polymer dry powder and innovation in high-efficiency online mixing equipment. Combined with engineering practices in various types of reservoirs such as shale gas, tight sandstone, and carbonate rock, it has been verified that it has significant advantages in improving construction efficiency, reducing costs, and protecting reservoirs, providing technical support for the efficient development of complex oil and gas reservoirs.

Keywords: Special polymer; Dry powder fracturing fluid; High efficiency mixing; Reservoir reconstruction; Economic benefit

压裂改造是非常规油气藏开发的核心技术, 压裂液性能直接影响施工效果与储层产能。传统乳液压裂液存在有效成分低、运输成本高、储层伤害大等问题, 难以满足深层、高盐、长水平段等复杂工况需求。特种聚合物干粉压裂液技术通过材料创新与装备升级, 突破了传统技术瓶颈, 在降低成本、提高效率、保护储层等方面展现出显著优势, 成为当前压裂技术发展的重要方向。

1 技术体系与核心优势

1.1 技术原理与组成

特种聚合物干粉压裂液是基于“纳米修饰+智能混配”理念开发的无油相压裂液体系, 核心包括:

专用粉剂减阻剂: 通过中低分子量设计、刚性离子基团引入及表面纳米修饰, 实现 10~20s 快速溶解、抗盐 (最高耐盐 20 万 ppm)、低残渣 (残渣 $\leq 40\text{mg/L}$), 解决了传统粉剂溶解慢、抗盐性差的问题。

可控流变智能在线配液设备: 集成高能恒压混合器与 PLC 自动控制系统, 支持 $1\sim 20\text{m}^3/\text{min}$ 排量下的实时变粘 (粘度 $1\sim 100\text{MPa}\cdot\text{s}$), 实现“即供、即配、即注”, 设备占地面积仅 $5\text{m}\times 2\text{m}$, 较传统乳液配液效率提升 3 倍以上。

1.2 核心技术优势 (见表 1)

表 1 与常规粉剂、乳液压裂液相比, 该技术具有显著优势

性能指标	早期普通粉剂	常规乳液	速溶干粉
有效成分	100%	30%~45%	100%
溶解时间	3~5h	$\leq 30\text{s}$	$\leq 30\text{s}$
耐盐性	差	一般 (≤ 5 万 ppm)	良好 (≤ 20 万 ppm)
储层伤害率	高	中	降低 30%
施工灵活性	低	中	在线实时调整 (5s)
综合成本	一般	高	降低 10%~15%

2 关键技术保障

2.1 纳米修饰粉剂减阻剂研发

①分子结构优化: 采用“增强链刚性+超分子聚集”设计, 分子量控制在 2000~2700 万, 粒径 100~200 目, 确保高水动力学体积与快速水化能力。
②抗盐机理: 引入磺酸基、羧基等抗盐单体, 通过离子基团排斥作用抑制盐离子对聚合物分子链的压缩, 实现高矿化度下的粘度稳定。

2.2 高效混配设备与工艺创新

①超能恒压混合技术: 通过高速水动力剪切流场设计, 使粉剂在混合器内实现 100% 分散, 无“鱼眼”现象, 4% 浓缩液粘度稳定度提升 40%。②一用一备

双配液模式：配套两套独立配液系统，60s 内可完成故障切换，保障施工连续性，连续运行 400h 无故障。

2.3 全流程质量控制

①施工前：开展水质适配性实验，筛选最优粉剂配方；物料进场前进行三方检测，确保产品性能达标。
②施工中：通过 PLC 系统实时监控配液比例（精度 $\pm 2\%$ ），每段压裂液取样检测粘度、残渣等参数，保障入井液体质量。

3 典型工程应用

3.1 江汉涪陵页岩气田：高排量实时变粘与返排液利用

①工况特点：水平段长 1500m，储层温度 135℃，配液水矿化度 1.5~3 万 ppm，需实现返排液重复利用。②技术应用：采用清水 + 返排液（比例 3:7）混配模式，通过调节粉剂加量（0.07%~0.32%），粘度在 9~45MPa·s 实时调整，满足不同压裂阶段的携砂需求。施工排量 14~18m³/min，砂量符合率 100%，综合成本较乳液体系统降低 12%。③取得效果：单井无阻流量达 6.6 万 m³/d，较邻井提高 30%，返排液处理成本降低 40%。

3.2 鄂尔多斯致密砂岩气井：高粘液控液增砂与储层保护

①工况特点：低孔低渗（孔隙度 5.7%~14%，渗透率 0.15~2.0mD），需控制压裂液滤失，提高砂比。②技术应用：采用 0.3%~0.4% 粉剂浓度，形成 55~78MPa·s 中高粘压裂液，最高砂比 30% 稳定悬砂，施工排量 8~12m³/min，实现“控液增砂”。③取得效果：单井日产量 4.5 万 m³，较常规工艺提高 2 倍，储层伤害率降低 25%，创区块产量纪录。

3.3 胜利油田深层页岩油：高温高砂比施工适应性

①工况特点：储层温度 140~163℃，埋深 3850~4770m，需应对大排量（20m³/min）、高砂比（56%）挑战。②技术应用：优化粉剂配方，0.4% 浓度下 120℃剪切 2h 粘度保持 55MPa·s，施工中通过实时变粘技术调整携砂性能，砂液比最高达 10.4%。③取得效果：施工成功率 100%，单段加砂量达 243m³，压后产量较设计提高 15%。

4 东部探区夏斜 133 井压裂工艺设计

4.1 基础数据（表 2）

表 2 夏斜 133 井基本数据表

项目	数据
井口坐标	X:4115861.30,Y:20500991.61
地理位置	山东省德州市临邑县孟寺镇刘钟楼村西北约 740m
构造位置	济阳拗陷惠民凹陷临南洼陷商四区南部夏 13 块
完钻井深	斜深：4316.00m,垂深：4265.97m
最大井斜数据	深度：1101.64m,方位：103.56°,斜度：19.25°

4.2 施工目的

通过压裂改善地层渗流条件，扩大储层渗流波及范围，从而达到油井增产的目的。

4.3 设计原则及依据

依据《夏斜 133 井试油（气）地质设计》、录井资料、完井后的实际测井资料及现行法律、法规、标准、操作规程等编写该设计。

4.4 工艺设计

①压裂工艺：组合缝网压裂；压裂方式：套管压裂。
②压裂材料体系选择：考虑到该区域的储层温度介于 141℃至 152℃之间且渗透率较低，为了减少对地层的损害，选择能够适应高温条件的可变粘压裂液系统，并采用现场即时混合的工艺方法。③微地震监测技术：第 1~7 段，描述裂缝扩展情况。④高频压力检测技术：第 1、3、4、5 段，评价暂堵效果、裂缝参数和地层参数。⑤化学示踪产剖评价技术：第 1~7 段，评价压后产能贡献。

4.5 压裂参数优化

第一段至第七段的压裂施工泵注程序如下。

压裂施工泵注第一段：综合稠化剂浓度 0.33%，砂液比 9.6%；压裂施工泵注第二段：综合稠化剂浓度 0.33%，砂液比 10.0%；压裂施工泵注第三段、第四段均为：综合稠化剂浓度 0.30%，砂液比 10.4%；压裂施工泵注第五段、第六段均为：综合稠化剂浓度 0.30%，砂液比 10.7%；压裂施工泵注第七段：综合稠化剂浓度 0.30%，砂液比 10.8%。

4.6 施工准备

通井：通井至人工井底。

刮削、洗井：刮管至人工井底，用清水反循环洗井至进出口水质一致。

替防膨液：全井筒替入防膨液，防膨剂浓度参照压裂液配方表。

装井口：装千型压裂井口及四通底座、注入头（注入头指标详见压裂施工设计）。

全井筒试压：要求全井筒套管试压，试压值取以下两者中的最小值，套管抗内压强度的 80% 或大于施工限压 5MPa，30min 压降小于 0.7MPa 合格。

按照《射孔通知单》射孔。备容积不少于 100m³ 容器，用于压裂施工前走泵、压后放喷及应急放喷。备直径 2mm、2.5mm、3mm、4mm、6mm、8mm、10mm 油嘴各 2~3 套，以备放喷时用。

压裂施工单位准备：按有效水马力 40824 准备压裂施工车组，包括仪表车、主压车、混砂车、管汇车、砂罐、水泥车、水罐车等相关车辆，确保施工连续稳定。

测井公司准备：采用清水可溶桥塞施工，要求桥

塞在 152℃, 保压时间 24h 以上, 承压 70MPa, 其他指标满足压裂施工要求。

4.7 施工步骤

将地面管线连接妥当, 通过走泵的方式进行试压操作, 压力需达到 95MPa, 在此压力下保持 5 分钟, 若未出现刺漏现象, 则判定为合格。

按照设计完成注入 CO₂, 限压 70MPa。完成第一次的压裂施工, 限压: 90MPa。第二段桥塞射孔联作施工。依次完成第二段注 CO₂、压裂施工。依此类推完成第三段至第七段的施工。

4.8 QHSE 要求及应急预案

质量要求: 道路井场应平整、坚实, 能容纳并承受重型施工设备的摆放和正常工作。可以满足施工设备的自由出入。现场需配备一座废液池, 其容积应足够大, 确保能容纳从井口排出的全部洗井液, 以及地层排出的所有工作液。进入井场的公路应平整牢固, 有效路面最小不小于 5m, 最小弯曲半径不小于 10m, 承载能力 (不包括桥梁) 不低于 35t。

健康要求: 在施工准备及施工过程中涉及的所有高压及腐蚀等危险性施工人员必须正确配带相应的劳保防护用品, (工衣、工鞋、手套、安全帽、防护镜等)。施工进行时, 唯有井口操作人员可进入高压区, 其余人员不得踏入。

安全要求: 严格执行领导带班制度。施工作业人员必须接受对应的岗位技能培训, 获取资格证书后, 方可上岗操作。所有进入施工现场的人员, 都务必正确穿戴并使用劳动防护用品及其他各类防护用具, 并认真做好安全防护设施的维护工作。从事高处作业的人员, 必须系好安全带, 且要为随身携带的工具系上防掉绳。井场区域内, 严格禁止烟火。各类消防器材应配备齐全, 易燃、易爆物品需及时清理。井场消防器材的配备与管理应符合规定。压裂施工作业全程需由现场指挥进行统一调度, 确保各个环节紧密协调配合。在压裂施工现场, 应借助防爆无线对讲机及喇叭作为指令信息传递的工具, 保障信息及时、准确传达。开关井口闸门由井下压裂队施工指挥负责, 指定专人操作, 开关时操作人员应站在闸门侧面。压裂井施工限压应严格执行压裂施工要求。试压值大于施工限压 5MPa, 5min 不刺不漏为合格。超压报警预置点低于限压 1MPa, 并于试压时验证。试压时, 施工人员撤离高压区 20m, 距井口 50m 以外, 试压后接到施工指挥明确指令后方可进入岗位。各方人员需密切留意施工运转状况, 要全面掌控好各环节安全。

环保要求: 在施工全程, 必须严格恪守政府颁布的各项环保制度与法规。坚决禁止随意排放洗井液、

原油以及天然气这类物质, 各类废料务必集中回收, 采取妥善方法加以处置, 以此切实保障环境不受污染。井场内, 要全力杜绝液体洒漏、滴漏与渗漏等不良现象。

4.9 应急预案

安全应急预案: 成立现场领导小组, 包括组长和成员。施工小组由压裂队施工指挥 / 技术指挥担任组长, 成员包括压裂队、试油队、准备大队、配液队、胜利测井、注汽中心、供水公司、井场保障单位、效果评价承包商。质量管控组由石油工程监督中心、油气勘探管理中心组成。

压裂施工应急预案: 包括管线刺漏、井口刺漏、压裂泵车故障、砂堵等情况的处理措施。CO₂ 泄漏应急预案: 包括运输过程中的罐泄漏和施工过程中的泄漏两种情况的处理措施。火灾应急预案: 包括发生火灾后的应急措施和灭火工作中的注意事项。防 H₂S 应急预案: 包括测试开工前的防井喷演习、放喷测试中的硫化氢监测和应急处理措施等。其他意外情况: 如地层破裂压力较高无法压开地层时的处理措施和其他意外情况的应急处理要求。

5 工程应用经济效益

5.1 应用成果

特种聚合物干粉压裂液技术通过材料与装备创新, 解决了传统压裂液在速溶、抗盐、实时调控等方面的难题, 形成了“高效配液-精准控粘-低伤害改造”的技术体系。

工程实践表明, 该技术在页岩气、致密砂岩、深层页岩油等储层中适应性强, 可实现施工效率提升 20%、成本降低 10%~15%、产量提高 10%~30%。

配套的实时迭代与高频监测技术, 推动压裂施工从“经验驱动”向“数据驱动”转型, 显著提升储层改造效果。

5.2 应用经济性

加强纳米材料与智能装备的深度融合, 开发适用于超高温 (> 180℃)、超高盐 (> 30 万 ppm) 工况的新一代干粉体系。

结合人工智能算法优化实时变粘策略, 实现裂缝扩展的动态预测与全自动调控, 进一步提升施工安全性与经济性。

参考文献:

- [1] SY/T 5107-2016. 压裂液技术规范 [S]. 北京: 中国石油工程学会, 2016.
- [2] Smith J., et al. Advances in Fracturing Fluids for Shale Reservoirs[J]. SPE Journal, 2021, 26(3): 1450-1465.