

冀中地区致密油井无限级精准滑套压裂技术

孙宇晗¹, 吴刚², 李红¹, 冯汉斌², 刘其伦², 何伟平³

1. 中国石油渤海钻探工程有限公司井下作业分公司 河北任丘 062552

2. 中国石油华北油田公司勘探部 河北任丘 062552

3. 中国石油华北油田公司第二采油厂 河北霸州 065700

通讯作者: Email: 994705461@qq.com

项目支持: 中国石油华北油田“2023年重点探区页岩油(致密油)压裂提效配套研究及压裂效果评价”(HBYT-2023-JS-115)

引用: 孙宇晗, 吴刚, 李红, 等. 冀中地区致密油井无限级精准滑套压裂技术[J]. 油气井测试, 2025, 34(2): 54-59.

Cite: SUN Yuhan, WU Gang, LI Hong, et al. Infinite-stage precise sliding-sleeve fracturing technology for tight oil wells in the Jizhong area [J]. Well Testing, 2025, 34(2): 54-59.

摘要 针对冀中束鹿凹陷砾岩体致密油藏储层基质渗透性差、传统压裂技术效率低且难以精准控制改造范围的问题, 研究无限级精准滑套压裂技术对储层高效改造的可行性。通过采用无限级滑套技术, 将滑套与套管集成下井, 结合远程遥控方式逐一开启压裂孔。通过投放“螺卡+可溶球”装置, 精确控制压裂孔的开启, 并使用变黏滑溜水体体系, 确保每一簇压裂的连续性和有效性; 配套螺卡定位监测系统实时追踪井下动态, 优化裂缝扩展参数。SY302X井成功完成了26段压裂, 螺卡开启成功率96.2%, 压裂时效提高了约63%。进液强度提升至 $780\text{ m}^3/\text{m}$, 段间距缩短至 1.16 m , 总改造体积 $540\times 10^4\text{ m}^3$, 日产油 24.1 m^3 , 日产水 11.4 m^3 , 有效动用储层甜点区。该技术实现了致密油藏精准分层改造、全口径连续施工与实时监测, 显著提升压裂效率和储层动用率, 为同类油藏高效开发提供重要技术支撑。

关键词 束鹿拗陷; 致密油气藏; 无限级滑套; 精准压裂; 分层改造; 螺卡定位监测; 实时监测

中图分类号: TE357

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2025.02.009

Infinite-stage precise sliding-sleeve fracturing technology for tight oil wells in the Jizhong area

SUN Yuhan¹, WU Gang², LI Hong¹, FENG Hanbin², LIU Qilun², HE Weiping³

1. Downhole Services Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Renqiu, Hebei 062552, China

2. Exploration Department of PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 062552, China

3. No. 2 Oil Production Company of PetroChina Huabei Oilfield Company, Bazhou, Hebei 065700, China

Abstract: To address the challenges posed by low matrix permeability and the inefficiency of traditional fracturing techniques in precisely controlling stimulation coverage in the conglomerate-based tight oil reservoirs in the Shulu sag, Jizhong area, the feasibility of infinite-stage precise sliding-sleeve fracturing technology for efficient reservoir stimulation was investigated. By integrating sliding sleeves with the casing for downhole deployment, the technology enables sequential activation of fracturing ports via remote control. Using a combination of “threaded anchors + dissolvable balls,” the opening of fracturing ports can be precisely controlled. A variable-viscosity slickwater system ensures the continuity and effectiveness of each fracture cluster, while a threaded anchor positioning and monitoring system enables real-time tracking of downhole conditions and optimization of fracture propagation parameters. In Well SY302X, 26 fracturing stages were successfully completed with a 96.2% port-opening success rate, achieving a 63% increase in operational efficiency. Fluid injection intensity reached $780\text{ m}^3/\text{m}$, stage spacing was reduced to 1.16 m , and the total stimulated reservoir volume reached $540\times 10^4\text{ m}^3$. Daily oil and water production reached 24.1 m^3 and 11.4 m^3 , respectively, effectively tapping the sweet spot zones of the reservoir. This technology enables precise layered stimulation, full-bore continuous operations, and real-time monitoring, significantly improving fracturing efficiency and reservoir utilization degree, and offers a strong technical support for the efficient development of similar tight oil reservoirs.

Keywords: Shulu sag; tight oil reservoir; infinite-stage sliding sleeve; precise fracturing; layered stimulation; threaded anchor positioning monitoring; real-time monitoring

近年来, 随着全球致密油藏开发需求的增长, 水平井多段压裂技术已成为提高单井产量的核心

手段。传统工艺如泵送桥塞射孔联作^[1]、可溶桥塞分段压裂^[2-3]、水力喷射压裂^[4],虽在一定程度上实现了储层改造,但仍存在显著瓶颈。例如,泵送桥塞工艺需多次起下管柱,施工效率低(平均1~2段/d),且多簇压裂时支撑剂分布不均,导致30%以上层段未有效动用^[5-6];水力喷射压裂受限于排量,难以满足大液量体积改造需求;而投球滑套压裂需按顺序投放压裂球^[7],非全通径结构易造成后期生产通道堵塞。国内相比国外压裂工艺有显著差距,北美分段压裂以速钻桥塞为主,钻塞工具、工艺成熟配套,最快钻磨时间4 min/只,分段压裂作业6~8段/d^[8]。针对上述问题,国内外学者逐步探索新型压裂技术,提出全通径滑套设计,通过取消投球实现连续施工,但未解决精准定位问题^[9];研发可溶球滑套,虽降低钻塞成本,但溶解速率受流体环境影响大,易引发排量异常^[10];尝试键槽式滑套技术,但其机械复杂度高,故障率超过15%^[11]。综合来看,现有技术仍面临三大挑战:(1)施工效率与精准控制的矛盾;(2)储层非均质性导致的改造盲区;(3)工艺复杂性与经济性的平衡。

基于此,以冀中束鹿凹陷砾岩体致密油藏为研究对象^[12-13],提出“无限级精准滑套压裂技术”^[14]。该技术通过以下创新点突破传统局限:其一,采用“螺卡+可溶球”双级触发机制^[15-17],通过远程遥控逐级开启预制压裂孔(单段长度1.16 m),实现全通径连续施工,避免桥塞钻磨及管柱起下;其二,配套螺卡定位监测系统,实时追踪井下压力变化,优化裂缝扩展参数(缝长误差<5%);其三,结合变黏滑溜水体系(砂比8%),提升支撑剂运移效率。相较于束鹿凹陷前期桥塞压裂工艺(段间距>100 m,液量强度230.5 m³/m),本技术将段间距缩短至1.16 m,液量强度提升至780.4 m³/m,单日施工段数达4段,效率提升62.96%^[18-20]。

1 无限级滑套压裂工艺

无限级滑套压裂技术通过集成滑套与套管下井固井的创新设计,结合远程控制与精准定位手段,突破传统压裂工艺的局限性。其核心在于利用“螺卡+可溶球”逐级开启预制压裂孔,实现单段单簇连续施工,同时依托实时监测系统优化裂缝扩展参数。该工艺以全通径、高效率、低风险为特征,显著缩短段间距并提升储层改造针对性,为致密油藏的水平井压裂提供了全新的技术路径。现从基本

原理、技术特点及工具组成三方面系统阐述其工艺内涵。

1.1 工艺原理

无限级压裂滑套主体与套管连接,入井后采用常规方式进行固井,滑套上预制一圈压裂孔(12个6.45 cm²缝孔),通过“泵入螺卡+可溶球”打开滑套。泵入一个螺卡,打开一个指定的滑套,可以实现全通径、无限级的单段单簇压裂。

1.2 工艺特点

无限级滑套压裂工艺通过多维技术集成与创新,形成以下核心工艺特征:其一,结构集成化,滑套与套管一体化设计实现全通径井筒结构,彻底摒弃传统射孔、桥塞分段工艺,简化作业流程并保障井筒完整性;其二,精准控制性,基于机械触发与智能监测协同机制,实现毫米级定位及逐级精准启裂,确保裂缝扩展方向与储层地质条件高度适配;其三,缝网高密度化,通过超短段间距优化和流体性能动态调控,突破常规压裂缝网密度极限,显著扩大储层有效改造体积;其四,安全可靠,全通径结构消除井筒残留风险,机械触发系统稳定抗干扰,施工压力动态平衡控制。该技术以工艺链精简性、控制智能化和改造针对性为核心,系统性破解传统压裂效率受限、层间干扰显著、作业风险突出等难题,为复杂储层精细化改造提供革新性解决方案。

1.3 施工程序

地面准备:确定滑套下入顺序,对套管进行清洁、通径,安装上下接头,丈量记录,根据要求安装销钉,气密性试压测试。

地面组装:将压裂滑套预紧至套管上,按工序列编号摆放整齐,连接至套管。

管柱入井:通过旋转下套管工具/套管钳,对套管施加扭矩,完成上扣,按顺序连接入井。

安装井口:根据压裂滑套入井记录确认对应螺卡位置,螺卡发射器下端与井口上端通过法兰连接,按压裂滑套入井顺序,放置对应各级螺卡+可溶球。

正式压裂:图1为无限级滑套管柱结构,从中可以看出地面打压开启第1段趾端滑套的压裂阀,按照设计进行压裂施工第1段;第一段压裂完成后投送第2段的对应螺卡,地面泵注加压将螺卡推至第2段滑套后打开滑套压裂孔进行第二段压裂;第二段压裂完成后投送第3段的对应螺卡,以此类推连续压完后续层段。

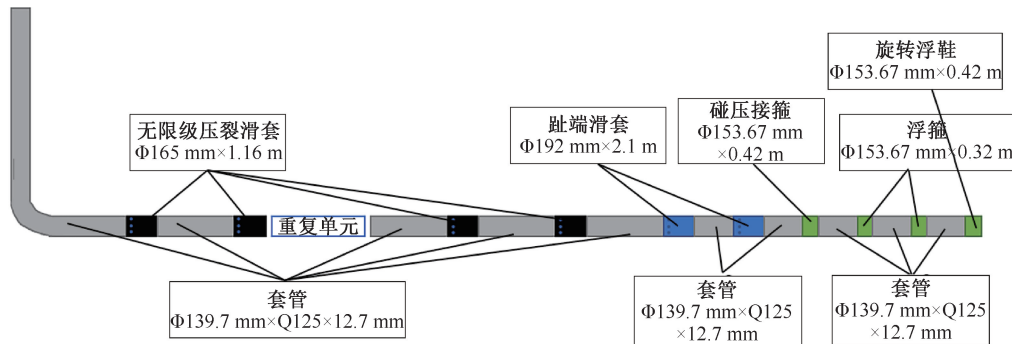


图1 无限级滑套管柱结构

Fig. 1 Infinite-stage sliding sleeve casing string structure

1.4 井下工具

(1) 无限级滑套内部结构分为两部分,与套管连接的滑套部分和螺卡+可溶球部分,如图2所示。



图2 无限级滑套内部结构

Fig. 2 Internal structure of infinite sliding sleeve

无限级滑套:与套管装配在一起,用装常规固井方式下入指定位置,固井作业后进行压裂作业,减少射孔作业,可避开不利断层,以小段距在储层有利段密集布置压裂点。滑套分为外滑套和内滑套两部分,外滑套预制12个压裂孔(每孔 6.45 cm^2),外滑套与常规 139.7 mm 套管连接的滑套通体外径为 165 mm ,外滑套内径 114 mm ,内滑套内径为 109.5 mm ,最大开启压 18.2 MPa 。

螺卡+可溶球:通过独特设计,螺卡外部螺纹与内滑套一一对应。螺卡长 $0.45\sim 0.61\text{ m}$,外径 109.4 mm ,内径 96.5 mm ,与可溶球安装在一起,泵入地层,穿行过非目标滑套,入座对应目标滑套后锁定,继续加压剪断滑套销钉,内滑套下移露出12个压裂孔开启滑套,持续加压压开水泥环和地层进行后续压裂作业,可溶球可在清水、卤水、压裂液中溶解。

(2) 螺卡发射器:从图3可以看出发射器一次装载24组螺卡+可溶球,井口带压远程投放螺卡,可实现不停泵连续施工。

(3) 螺卡定位监测系统:高精度压力检测系统,实时定位螺卡在井下位置,精准判断压裂施工状态。泵入螺卡后,根据螺卡驱动液的体积噪声、判断螺卡在地下的位置,确定其与压裂位点的位置关系,指导施工。本系统是一种高精度的压力检测装

置,通过监测螺卡在井筒内的压力变化、实时定位同时监测井下复杂工况。



图3 螺卡发射器

Fig. 3 Screw card transmitter

2 SY302X 井现场应用情况

SY302X井作为无限级滑套压裂技术的典型应用案例,旨在验证该工艺在砾岩体致密油藏水平井中的实际效能与适应性。通过集成高精度螺卡定位、可溶球动态溶解及实时裂缝监测系统,该技术实现了对 $1\ 160\text{ m}$ 水平段26段密集压裂的精准控制,并同步优化了施工效率与储层改造范围。本文从井身基础参数、施工工艺设计、压裂效果及存在问题等方面,系统分析该工艺在复杂地质条件下的技术表现,为致密油藏高效开发提供实践依据。

2.1 基本情况

SY302X井位于冀中束鹿凹陷,旨在评价中洼槽 E_{s3} 下层序II砾岩体致密油气藏,落实储量并提升产能。该井为三开水平井,完钻井深 $5\ 391\text{ m}$,水平段长 $1\ 160\text{ m}$,储层钻遇率 95.6% ,显示层钻遇率 64.6% 。采用外径 139.7 mm 、抗内压 110.7 MPa 的Q125V钢级套管完井。测井解释沙三下段发育油层 $130\text{ m}/25$ 层、油水同层 $18\text{ m}/4$ 层及差油层 $697\text{ m}/59$ 层,证实了致密油藏的有效性。

2.2 施工简况

本井采用高排量、小粒径、中低砂比,变黏滑溜水体系相结合的方式,以表1第14段压裂参数为

例,本井压裂平均单段注入液量 840 m^3 ,平均加砂 40 m^3 ,平均砂比 8%,施工排量 $8 \sim 10 \text{ m}^3/\text{min}$,螺卡入座压力 83 MPa,打开压裂孔压力 93 MPa,压裂孔

开启压差约 10 MPa,压裂液注入压力 $90 \sim 100 \text{ MPa}$,破裂压力 100 MPa,停泵压力 70 MPa,顺利完成预期目标。

表 1 第 14 段压裂参数

Table 1 The fracturing parameters for Stage 14

阶段	施工时间	施工液量/ m^3	施工砂量/ m^3	平均砂比/%	油压/ MPa	排量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$
循环试压	7:05-7:21	11.54	0	0	52.50	0.00
洗井	7:21-7:35	9.37	0	0	52.51~92.13	0.13~2.97
送螺卡	7:35-8:00	55.03	0	0	54.19~100.25	0.6~3.05
前置液	8:00-8:28	249.21	6.10	2.48	69.99~90.73	0.31~10.13
携砂液	8:28-9:12	443.71	34.04	8.00	88.45~91.55	10.04~10.15
顶替液	9:12-9:19	62.89	0	0	73.26~92.20	0~10.14
停泵	9:19				73.26	
合计		831.75	40.14			

2.3 存在问题及对策

存在两个问题及其相应解决方法分别为:①第 17 段螺卡开启滑套后,储层压不开,采取连油射孔后施工;②螺卡泵送过程中,未精准设计和泵注 KCl 盐水,在储层压不开的层段,1 d 内可溶球未在清水中溶解,无法建立排量,可溶球的溶解速率还有待进一步提升。

3 压裂效果评价

束鹿凹陷页岩油储层流度低、启动压裂梯度高,前期实施的井平均段间距超 100 m,平均簇间距超 50 m。模拟表明较大簇间距导致缝间存在大量未动用储量,加密布缝可实现全动用。本井层段 1400 m,分段 26 段,每段射孔厚度 1.16 m。通过套管滑套精细分层,针对各层段的岩性、物性、裂缝发育程度采用“一段一策”的改造方式,提高改造针对性。段总净液量 $23\ 786.42 \text{ m}^3$,总砂量 965.6 m^3 ,一般施工压力 90 MPa,一般施工排量 $8 \sim 10 \text{ m}^3/\text{min}$ 。刷新了冀中地区单井压裂施工段数最多、入井液量最多、砂量最多三项纪录。对比同区块其他压裂工艺,用无限级滑套施工的 SY302X 井在施工规模以及施工速率上都有全方位的提升。

3.1 压裂效果对比

无限级滑套压裂技术通过工艺集成创新,在施工效率、成本控制、风险规避和改造效果四个维度实现系统性突破,为致密油藏经济有效开发提供了全新解决方案(见表 2、表 3)。相较于常规桥塞工艺,该技术施工效率提升至 4 段/d,段间转换时间由常规工艺的 3.5 h 缩短至 25 min,主要得益于螺卡发射器的带压连续投送机制和全通径结构设计,消除桥塞钻磨工序累计节约作业时间 104 h。在成本控

制方面,单井综合成本降低 28.6%,源于预制压裂孔替代射孔作业(单段节省 1.2 万元)、连续油管作业量减少 92%(仅异常段需补救射孔)以及可溶球用量降低 65%等技术突破。工艺革新使井控风险下降 53%,套变发生率由 9.1%降至 3.0%,得益于精准缝高控制(平均 15 m)和实时压力监测系统对裂缝扩展的动态优化。储层改造方面,段间距由常规 100 m 缩短至 1.16 m,液量强度提升至 $780.4 \text{ m}^3/\text{m}$ (常规 $230.5 \text{ m}^3/\text{m}$),支撑剂铺置浓度达 $5.8 \text{ kg}/\text{m}^2$ (常规 $3.2 \text{ kg}/\text{m}^2$),裂缝监测显示盲区占比由 34%降至 7%,单段改造体积提升至 $20.8 \times 10^3 \text{ m}^3$,实现甜点区高效动用。经济指标显示,单井日产油量稳定在 8.3 m^3 ,累产油量达 4005 m^3 ,较同区块常规工艺提升 2.3 倍,验证了该技术在超低渗砾岩储层中的技术经济可行性。

3.2 裂缝监测结果分析

SY302X 井监测检波器采用星形布设的方案,随着压裂段的变化进行调整,共计设置 70 个坐标点,每个坐标点之间间隔 60~100 m。单个 WIFI 通讯距离在 100~300 m 之间,传输速率为 11 Mbit/s,并采用一台无线 WIFI 管理 20~30 个无线无缆地震仪组网模式,满足压裂裂缝实时监测的需求。压后裂缝整体走向近东西方向,平均缝长 200 m,平均缝宽 75 m,缝高 15 m,总改造体积 $5\ 404\ 939 \text{ m}^3$,整体裂缝波及体积较大,改造较为充分。

3.3 产能分析

该井压后排液产量较为稳定,初期套单 2 mm 放喷排液,套压 16.12~14.14 MPa,日产油 24.1 m^3 ,日产水 11.4 m^3 ;目前套单 2.5 mm 放喷进站,套压 8 MPa,日产油 8.3 m^3 ,日产水 14.5 m^3 ,累产油 $4\ 005 \text{ m}^3$,累产水 $9\ 822 \text{ m}^3$ 。

表2 施工对比

Table 2 Construction comparison

项目	ST1H	ST2X	SY3井	SY1井	SY302X井	
井层	井型	水平井	大斜度井	直井	水平井	
参数	层段长度/m	340	1 280	274	642	1 400
改造	分压工艺	速钻桥塞+分簇射孔+体积改造	速钻桥塞+分簇射孔+体积改造	速钻桥塞+分簇射孔+体积改造	可溶桥塞+分簇射孔+体积改造	无限级滑套压裂
措施	分压段数(簇)	3段(8簇)	7段(31簇)	5层(22簇)	9层(23簇)	26段
施工参数	排量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	9.1~12.7	5.6~8.27	6.8~9.7	6.0~12	8.0~10
	液量/ m^3	4 620	8 826	4 815	14 421	23 786.42
	砂量/ m^3	128.9	69.3	94.8	888.5	965.6
	加砂强度/($10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	1.98	1.18	2.4	17.7	32
	用液强度/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$)	40.4	58.6	99.4	230.5	780.4
	压裂时效/($\text{段} \cdot \text{d}^{-1}$)	0.75	1	0.71	1	4

表3 压裂效果对比

Table 3 Construction comparison

对比项目	泵送桥塞工艺	可溶桥塞工艺	无限级滑套工艺
施工效率/($\text{段} \cdot \text{d}^{-1}$)	1.0	1.0	4.0(↑300%)
段间耗时/min	210	180	25(↓88.1%)
单段综合成本/万元	48.6	42.3	30.2(↓28.6%)
裂缝长度误差/%	18	15	4.80
支撑剂浓度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	3.2	4.1	5.8(↑81.3%)
储层盲区占比/%	34	27	7(↓79.4%)
套变发生率/%	9.10	6.80	3.0(↓67.0%)
返排周期/d	21	18	12(↓42.9%)

4 结论

(1)无限级滑套压裂技术通过“螺卡+可溶球”精准开启机制与微地震实时监测,解决了传统泵送桥塞压裂效率低(提效63%)、段间距大导致储层动用不充分、施工周期长等问题,适用于冀中束鹿凹陷等砾岩体致密油藏的水平井多段精准改造。

(2)其全通路连续施工特性避免了钻塞作业,综合成本降低且油层污染风险小。然而,该技术对纵向非均质性强的储层适应性不足(如第17段压裂失败需补射孔),且可溶球溶解速率不稳定可能导致排量异常(如清水溶解失效)。

(3)未来需优化螺卡定位精度、可溶球溶解可控性及配套监测技术,以提升复杂储层条件下的工艺可靠性,拓展其在多层多段致密油气开发中的应用范围。

致谢:感谢华北油田勘探事业部和中油测井华北测试分公司同意本文公开发表。感谢中油测井华北测试分公司在论文修改方面做出的贡献。

参考文献

[1] 赵民,廖强,陈超,等. 泵送桥塞-射孔联作工艺的应用

[J]. 石化技术,2021,28(10):61-62.

ZHAO Min, LIAO Qiang, CHEN Chao, et al. Pumping bridge plug-perforation application process[J]. Petrochemical Industry Technology, 2021,28(10):61-62.

[2] 王伟佳. 页岩气井无限级固井滑套压裂技术[J]. 油气井测试,2018,27(5):38-41.

WANG Weijia. Infinite-stage cementing sleeve fracturing technology for shale gas wells [J]. Well Testing, 2018,27(5):38-41.

[3] 张再华,韩婧. 固井滑套压裂工艺在大牛地气田的应用[J]. 广东化工,2016,43(5):71-73.

ZHANG Zaihua, HAN Jing. The application of well cementing sliding sleeve fracturing technology in Daniudi gas field [J]. Guangdong Chemical Industry, 2016,43(5):71-73.

[4] 张玉昂. 水力喷射分段压裂技术施工工序与关键研究[J]. 中国石油和化工标准与质量,2022,42(8):15-17.

ZHANG Yu'ang. Construction procedures and key research of hydraulic jet staged fracturing technology [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2022,42(8):15-17.

[5] 孙晓博. 页岩气,致密油水平井泵送桥塞射孔联作工艺对标[J]. 国外测井技术,2020,41(6):99-103.

SUN Xiaobo. Benchmarking of combined process of pumping bridge plug perforation in shale gas and tight oil horizontal wells [J]. World Well Logging Technology, 2020,41(6):99-103.

[6] 朱和明. 可开关压裂滑套关键技术研究与应用[J]. 石油矿场机械,2020,49(3):58-64.

ZHU Heming. Research and application of key technologies for switchable fracturing sliding sleeve [J]. Oil Field Equipment, 2020,49(3):58-64.

[7] 杜永军,胡卫,宋树林,等. 新型投球滑套式可变径球座的研究与设计[J]. 机械设计与制造工程,2020,49(5):10-14.

DU Yongjun, HU Wei, SONG Shulin, et al. Development of the new sliding sleeve variable diameter ball seat [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2020,49

- (5): 10-14.
- [8] 徐建鹏. 低渗透油藏直井多段压裂开发技术优化研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017: 1-86.
XU Jianpeng. The optimization research of multi-stage fracturing in vertical wells for low permeability reservoirs [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017: 1-86.
- [9] 夏海帮, 包凯, 王睿. 页岩气井用新型无限级全通径滑套压裂技术先导试验 [J]. 油气层评价与开发, 2021, 11(3): 390-394.
XIA Haibang, BAO Kai, WANG Rui. Pilot test of new infinite full bore sliding sleeve fracturing technology in shale gas wells [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 390-394.
- [10] 冯长青, 邵媛. 水平井多级滑套压裂工艺中的压裂球返排规律 [J]. 断块油气田, 2018, 25(4): 545-548.
FENG Changqing, SHAO Yuan. Returning mode of fracturing ball used by horizontal well multi-sleeve fracturing technology [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(4): 545-548.
- [11] 朱玉杰, 赵建军, 魏辽. 新型等通径键槽式滑套压裂技术 [J]. 特种油气藏, 2018, 25(6): 140-144.
ZHU Yujie, ZHAO Jianjun, WEI Liao. A new fracturing technology with equal-diameter keyseat sliding-sleeve [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(6): 140-144.
- [12] 张锐锋, 陈柯童, 朱洁琼, 等. 渤海湾盆地冀中坳陷束鹿凹陷中深层湖相碳酸盐岩致密储层天然气成藏条件与资源潜力 [J]. 天然气地球科学, 2021, 32(5): 623-632.
ZHANG Ruifeng, CHEN Ketong, ZHU Jieqiong, et al. Tight gas reservoir forming condition and resource potential in the lacustrine carbonate in the middle-deep layer of Shulu sag of Jizhong depression, Bohai bay basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(5): 623-632.
- [13] 祗淑华, 洪晶, 吕鹏, 等. 束鹿凹陷致密油储层可压裂性评价方法 [J]. 测井技术, 2019, 43(5): 536-541.
DI Shuhua, HONG Jing, LYU Peng, et al. Method for fracturability evaluation of tight oil reservoirs in Shulu sag [J]. Well Logging Technology, 2019, 43(5): 536-541.
- [14] 赵腾. 无限级精准滑套压裂技术在沧东凹陷孔二段致密油水平井中的设计与研究 [J]. 石油石化物资采购, 2021(9): 93-94.
ZHAO Teng. Design and research of infinite precision sliding sleeve fracturing technology in horizontal wells of tight oil in Kong2 of Cangdong sag [J]. Petroleum & Petrochemical Material Procurement, 2021(9): 93-94.
- [15] 戴文潮, 姚辉前, 崔晓杰. 多级滑套压裂管柱套管内胀封事故分析与处理措施 [J]. 钻采工艺, 2017, 40(3): 117-119.
DAI Wenchao, YAO Huiqian, CUI Xiaojie. Analysis and treatment measures for internal expansion and sealing accidents in multi-stage sliding sleeve fracturing string casing [J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(3): 117-119.
- [16] 王兴. 无限级滑套压裂技术在徐深气田的应用分析 [J]. 化学工程与装备, 2017(2): 121-123.
WANG Xing. Application analysis of infinitesliding sleeve fracturing technology in Xushen gas field [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2017(2): 121-123.
- [17] 曲庆利, 刘言理, 王晓梅, 等. 键槽编码多簇固井滑套分段压裂完井技术研究与应用 [J]. 石油工业技术监督, 2021, 37(3): 48-51.
QU Qingli, LIU Yanli, WANG Xiaomei, et al. Study and application of multi-cluster cementing sliding sleeve fracturing completion technology with keyway coding [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2021, 37(3): 48-51.
- [18] 王冀川, 白宇杉, 张光波, 等. L型套管压裂水平井压裂改造技术研究及应用 [J]. 中国煤层气, 2022, 19(3): 16-20.
WANG Jichuan, BAI Yushan, ZHANG Guangbo, et al. Research and application of fracturing technology for L-shaped casing fracturing horizontal well [J]. China Coalbed Methane, 2022, 19(3): 16-20.
- [19] 王智君, 邱玲. 基于全通径无级滑套的体积压裂技术优化——以中江气田沙溪庙组气藏为例 [J]. 天然气技术与经济, 2021, 15(5): 22-27.
WANG Zhijun, QIU Ling. Optimizing volumetric fracturing technology based on full-bore infinite sliding sleeve: examples from gas reservoirs of Shaximiao formation, Zhongjiang gasfield, Sichuan basin [J]. Natural Gas Technology and Economy, 2021, 15(5): 22-27.
- [20] 吴奇, 胥云, 张守良, 等. 非常规油气藏体积改造技术核心理论与优化设计关键 [J]. 石油学报, 2014, 35(4): 706-714.
WU Qi, XU Yun, ZHANG Shouliang, et al. The core theories and key optimization designs of volume stimulation technology for unconventional reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 706-714.

编辑 吴志力

第一作者简介: 孙宇晗, 男, 1990年出生, 工程师, 本科, 2015年毕业于长江大学资源勘查工程专业, 现主要从事油气田开发相关的技术管理工作。电话: 13663179109, Email: 994705461@qq.com。通信地址: 河北省任丘市会战南道井下作业分公司, 邮政编码: 062552。