

连续管密切割压裂工艺技术及其应用

侯景龙¹, 王传庆², 李玉东¹, 刘岩¹

(1. 大庆油田有限责任公司井下作业分公司, 黑龙江大庆 163453;

2. 大庆油田有限责任公司第七采油厂, 黑龙江大庆 163453)

摘要:大庆外围致密油扶余和高台子储层, 孔隙度低, 渗透率 <0.01 mD, 基质物性差, 常规完井后难以有效动用, 必须进行体积压裂改造才能开发。以往该类储层采用“水平井(水平段1600 m)+桥塞”多簇体积压裂方式, 针对性不强、施工时效低。针对以上储层特点以及开发过程中压裂工艺技术存在的问题, 研究了以“缝控储量最大化”为目标、利用连续管携带底封工具, 单簇单压、密切割连续管压裂工艺, 增加有效储层改造体积(SRV), 提高改造效果。该技术在173-86区块现场应用实践了4口井, 工艺获得显著提升, Q196-P2单井切割压裂完成118段, 是目前国内单井切割段数之最, 压后均套管自喷生产, 改造效果明显。

关键词:储层压裂改造; 密切割; 缝控; 连续管; 喷枪; 致密油

中图分类号: TE24 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)11-0042-07

Intensive cut coiled tubing fracturing technology and its application

HOU Jinglong¹, WANG Chuanqing², LI Yudong¹, LIU Yan¹

(1. Downhole Service Sub-Company of Daqing Oilfield Limited Company, Daqing Heilongjiang 163453, China;

2. No. 7 Production Company of Daqing Oilfield Limited Company, Daqing Heilongjiang 163453, China)

Abstract: The Fuyu and Gaotaizi tight oil reservoirs have the characteristic of low porosity with permeability less than 0.01mD, and poor reservoir property. As a result, conventional well completion cannot achieve the effective development, which can only be made possible by volume stimulation. In the past, this kind of reservoir was treated by SRV fracturing with the long horizontal section (1600m) plus the bridge plug, but it was not well targeted and the fracturing operation was inefficiency. In view of the properties of both reservoirs and the problems in fracturing technology, research was conducted on the new intensive cut coiled tubing fracturing technique with the maximization of the crack controlled reserve as the target and the coiled tube carrying the Y211 bottom hole assembly, and separate fracturing of each cluster. Application in four wells in Block 173-86 resulted in effective SRV, and improvement of the fracturing effect with significantly increased output. The well of Q196-P2 has been fractured up to 118 sections, setting a record in the cut section per single well in China. All the wells are producing by natural flows after fracturing measures, indicating obvious effect.

Key words: reservoir fracturing; intensive cutting; fracture control; coiled tubing; ejection gun; tight oil

0 引言

大庆外围分布致密油难采储层, 探明未动用储量4.14亿t, 多因致密常规压裂改造往往效果差, 形成的单一人工裂缝因动用距离有限, 导致有效距离外渗流阻力增加, 当渗流阻力等于生产压差时变成

间歇渗流, 无法实现连续渗流稳定产液。因此20世纪90年代初期发展了体积压裂, 通过多缝控制和缝网控制, 缩短渗流距离, 提高渗流速度, 增大渗流面积, 提高采油速度。图1展示了体积压裂工艺技术发展的3个阶段。

收稿日期: 2021-02-23; **修回日期:** 2021-06-29 **DOI:** 10.12143/j.ztgc.2021.11.007

作者简介: 侯景龙, 男, 汉族, 1974年生, 高级工程师, 石油工程专业, 硕士, 从事压裂增产改造技术方面的工作, 黑龙江省大庆市让胡路区龙十路, houjl74@163.com。

引用格式: 侯景龙, 王传庆, 李玉东, 等. 连续管密切割压裂工艺技术及其应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(11): 42-48.

HOU Jinglong, WANG Chuanqing, LI Yudong, et al. Intensive cut coiled tubing fracturing technology and its application[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(11): 42-48.

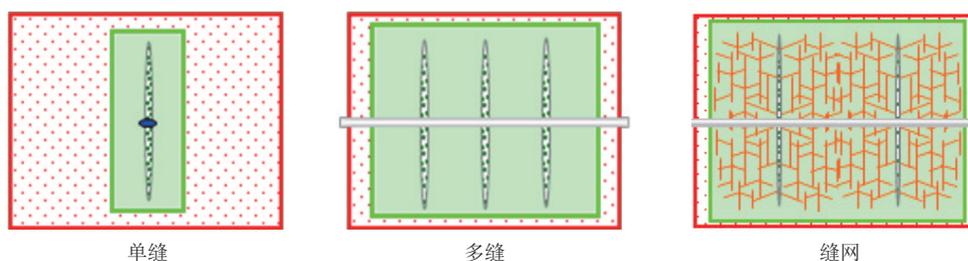


图1 体积压裂发展演化过程

Fig.1 Volume fracturing evolution

国内绝大多数采用双封单卡分段压裂、速钻桥塞分段压裂工艺(图2、图3)。双封单卡分段压裂配合防喷阀实现压后放喷,单趟管柱压裂17段,施工排量可达 $7\text{ m}^3/\text{min}$,加砂规模 490 m^3 ,时效和规模不高。桥塞体积压裂耐温 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 、耐压 70 MPa ,单段排量 $14\text{ m}^3/\text{min}$,针对性不强:多簇改造(单段2~3簇),裂缝不能均衡延伸,施工时效低^[1];需油管通洗井、电缆推塞射孔、连续管钻塞等多项工序,周期长、成本高;存在过量替挤、桥塞通过性不强易卡阻的风险。

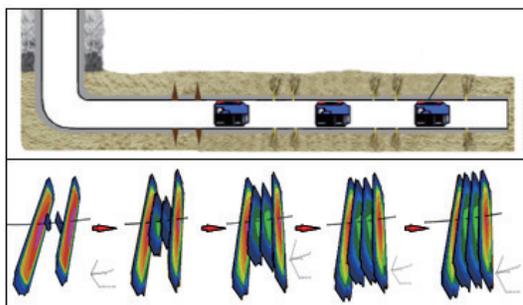


图2 水平井桥塞暂堵分段多簇压裂示意

Fig.2 Multi-cluster staged fracturing with the temporary plug in horizontal wells

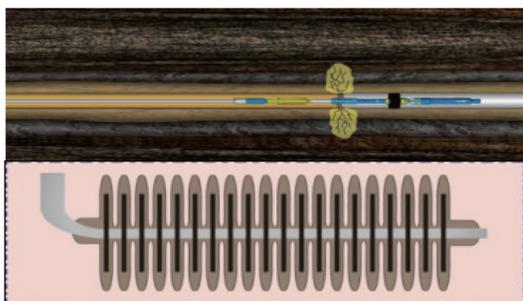


图3 水平井连续管密切割分段压裂示意

Fig.3 Intensive cutting with coiled-tubing staged fracturing in horizontal wells

随着国内连续管应用规模不断扩大和工艺不断成熟拓展,为精细精准的压裂改造创造了条件。特别是在体积改造上密切割工艺应用井数增多,工具配套完善,施工时效和效果不断显现。

1 连续管密切割压裂工艺技术

1.1 压裂方案优化

按照工程地质一体化优化设计思路,以地质甜点为目标,避免缝间干扰,最大范围缩短缝间距,形成了“细切割、大液量、大排量”为核心的密切割压裂设计方法,实现最优改造体积。该技术具有以下技术优势:单簇排量由 $4\sim 5\text{ m}^3/\text{min}$ 增加到 $8\sim 10\text{ m}^3/\text{min}$,改造针对性强,最小段间距 $<10\text{ m}$ 。图4是密切割体积压裂裂缝优化的一个实例^[2]。

173-86区块方案共设计油井15口,其中水平井5口,开发直井10口,动用地质储量 $127.6\times 10^4\text{ t}$,含油面积 4.85 km^2 。水平井设计井深 2634 m ,平均完钻井深 2593 m ,设计水平段长度 872 m ,完钻水平段长度 865 m ,钻遇砂岩长度 734 m ,含油砂岩长度 621 m ,砂岩钻遇率 85.2% ,油层钻遇率 70% ,油浸 96 m ,油斑 550 m 。最大水平主应力方向在 $50^\circ\sim 90^\circ$ 之间,平均为 75° ,为近东西向。5口水平井设计参数如表1所示。

Q196-P2井水平段长 950 m ,砂岩 816 m ,含油砂岩 740 m (油浸 45 m 、油斑 695 m),解释致密油II-1类 45 m ,致密油II-2类 473 m ,致密油III类 222 m ,干层 76 m ,最远距油层 0.5 m , 2623 m 处完钻。井眼轨迹如图5所示。根据起伏段的特征大致分为8个压裂控制大段,每个大段控制的水平段长度已经确定。

结合以往区块改造的结果和效果反演,遵循的优化设计原则为:

(1)缝间距:I类储层簇间距 $10\sim 15\text{ m}$ 、III类簇间距 $15\sim 18\text{ m}$;泥岩段簇间距 20 m ;

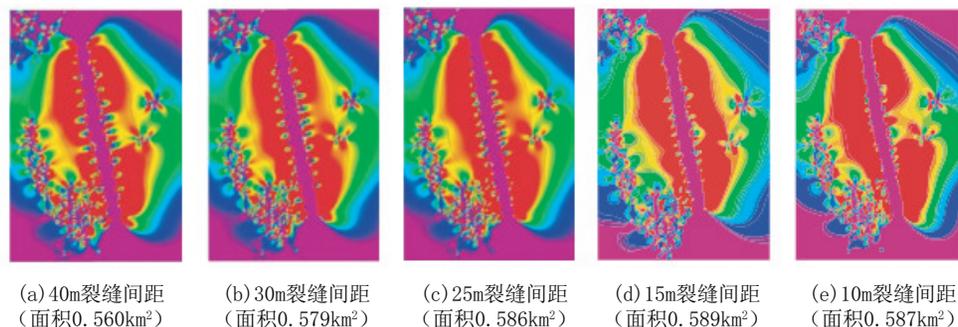
图4 密切割体积压裂裂缝优化^[3]

Fig.4 Intensive cut volume fracturing optimization

表1 173-86区块水平井设计参数

Table 1 Design parameters of horizontal wells in Block 173-86

序号	井号	设计层位	水平井设计方位/(°)	设计水平段长度/m	井控含油面积/km ²	井控地质储量/10 ⁴ t)
1	Q196-P1	FI2	NE51.2	910	0.83	18.01
2	Q196-P2	FI4	NE19.4	950	0.97	18.41
3	Q196-P3	FI6	NE42.6	876	0.75	14.24
4	Q196-P4	FI7	NE331.2	732	0.63	13.67
5	Q196-P5	FI7	NE331.7	990	0.87	14.75
合计/平均				892	4.05	79.08

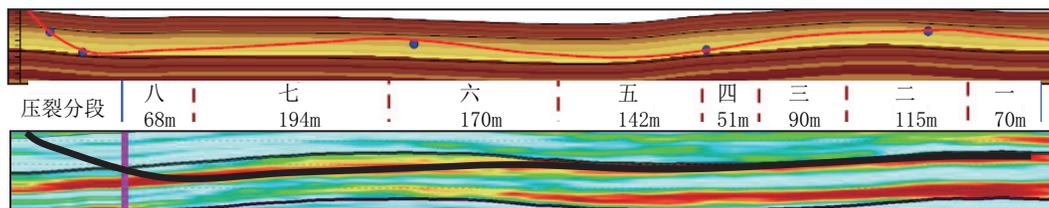


图5 Q196-P2井砂体剖面和反演剖面

Fig.5 Sand profile and inversion section in Q196-P2 well

(2)射孔点优选有利部位射孔,以“三高一低”为优选原则(电性高、孔渗高、脆性高、伽马低);

(3)加砂规模:I类砂量 50 m³,加砂强度 3.4 m³/m;II类砂量 45 m³,加砂强度 3.0 m³/m;III类、泥岩段砂量 40 m³,加砂强度 2.0 m³/m;

(4)支撑剂优选:采用 70/140 目+40/70 目+20/40 目多粒径组合,段塞+连续方式加入,确保多级裂缝有效支撑,见图6;

(5)采用滑溜水+缔合压裂液,有利于储层保护,便于现场组织施工。

为提高改造强度,在 Q196-P2 井开展缩短缝间距试验,增加段数加密切割,提高效果。最终优化结果为设计 118 簇。II-1 类储层簇间距 6 m,II-2 类储

层 7 m,III 类储层 8 m,泥岩穿层段 10 m,平均簇间距 7.6 m;II-1 类单簇砂量 32 m³,加砂强度 5.3 m³/m,II-2 类单簇砂量 27 m³,加砂强度 3.8 m³/m,III 类单簇砂量 23 m³,加砂强度 2.9 m³/m,穿层段单簇砂量 18 m³,加砂强度 1.8 m³/m。设计半缝长 220~270 m。

1.2 配套工具的研制

研制低坐封力新型 Y211 封隔器(图 7)^[4],复合式密封结构单胶筒,坐封力由 90 kN 降至 20 kN,满足连续油管低负荷坐封封隔器需要;改进胶料配方,提高抗拉强度残余变形率低于 3%,达到耐温 120℃、承压 70 MPa 指标。

工具呈现 2 方面特点:换向功能方面,采用短轨

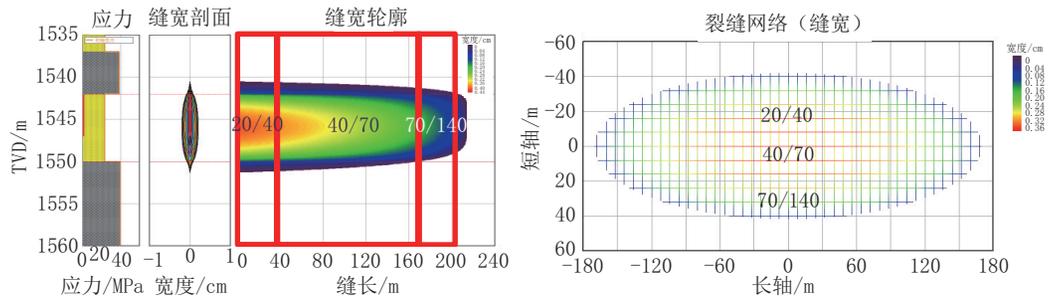


图 6 Q196-P2 井组合加砂剖面图

Fig.6 Combined proppant profile in Q196-P2 well



图 7 连续管密切割体积压裂新型封隔器

Fig.7 New packer for intensive cut staged coiled tubing fracturing

道设计,实现工具转向灵活;防卡方面,采用密闭式设计,转向槽被完全保护,解决了管柱解封、换向时砂卡问题;同时独特的卡瓦、锚定、坐封机构,坐封容易、解封可靠。

研制内嵌式硬质合金衬套喷枪(图 8),增加射孔段数,提升喷枪耐磨性能^[5]和加砂量。喷枪本体采用高频淬火工艺硬化处理,提高返溅区域外表硬度。对喷枪进行数值模拟,确定最优的喷嘴组合结构^[3]。

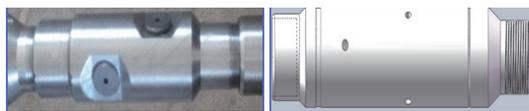


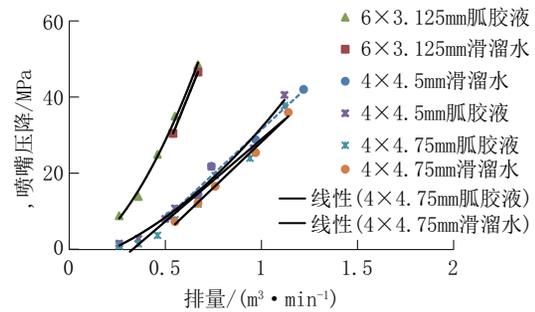
图 8 连续管密切割体积压裂喷枪^[6]

Fig.8 Ejection gun for intensive cut staged coiled tubing fracturing

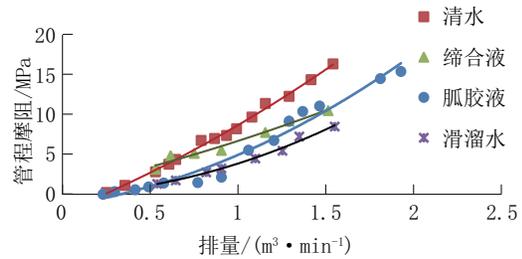
建立了射孔排量、时间、压力 3 个参数施工图版(图 9),形成了喷砂射孔控制技术,实现了对射孔关键参数实时有效控制,射孔砂量减少 50%,效率提高 1 倍,射孔成功率 100%。

1.3 配套工具的完善

针对体积压裂段数多的特点,对工具结构进行 5 项完善^[7],保证底封工具灵活可靠,通过不断改进,指标由最初的单趟管柱 15 段提高到 29、33 段、目前实现压裂 39 段突破,施工排量由 7 m³/min 达到 10 m³/min。



(a) 2^{3/8} in 连续油管的不同喷枪、液体的喷嘴压降



(b) 2^{3/8} in 连续油管的不同液体千米摩阻

图 9 喷嘴和连续油管内、环空摩阻图版

Fig.9 Pressure loss in the nozzle, and the inner and outer annulus coiled tubing

(1) 针对以往水平井施工喷枪上部易反溅问题,改进全硬质合金保护结构;增加了工具本体的耐磨性。如图 10(a) 所示。

(2) 针对工具卡井口问题,改变摩擦片尺寸,去除台阶,提高入井效率。如图 10(b) 所示。

(3) 针对封隔器换向、解封困难问题,调整中心管换向尖角设计,增加卡瓦箍环限位销钉,对轨道槽底部及周围倒角预处理等措施提高稳定性。

(4) 针对平衡阀不灵活问题,改进减小内套外径尺寸,防止砂子进入缝隙中导致平衡阀无法滑动失效。如图 10(c) 所示。

(5) 针对接箍定位器失效,无法有效精准定位问题,改进设计多种尺寸定位器,满足了常规套管扣校

深需求。

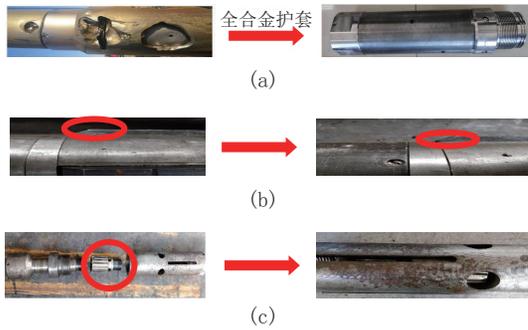


图10 配套工具改进措施

Fig.10 Modification of accessories

1.4 连续管环空加砂压裂工艺原理

利用连续管携带工具串,定位校深后座封;利用喷枪喷砂射孔^[8],通过环空实施加砂压裂,连续管带压逐层上提管柱,实现多段压裂。图11是连续管环空压裂工具组合^[9]。喷枪测试各种数据见表2。

1.5 工艺技术

根据该储层单簇改造技术需求,在保证工具精准定位和以往连油拖动底封水力注射环空加砂分段压裂技术^[10]的基础上,研究应用了以喷枪射孔^[11-12]、套管环空高排量注入、滑溜水造缝缔合液携砂为主的水平井连续管密切割压裂配套工艺技术。

该工艺参数特征:

(1)喷砂射孔排量0.7~1.5 m³/min,专用喷砂单层石英砂规模1.0 m³,尽量降低孔眼摩擦^[13],喷射压力维持在60.0 MPa;

(2)主裂缝压裂环空施工排量保持在7.5~10.0 m³/min,连管内补液排量0.6~1.2 m³/min;

(3)单段最大规模达到53 m³,单段规模25~50 m³,最高砂比45%;

(4)采用滑溜水携70~140目石英砂支撑微缝和主缝前端,占10%,主裂缝支撑剂组合粒径,分别为石英砂40~70目、20~40目,占比分别60%、30%。

1.6 现场工艺控制方法

连续管密切割压裂施工工序多、工况复杂,存在的难点主要有3个方面:一是BTC-JT-2、DLP-JT、梯形BGC扣型套管无缝隙,存在校深问题;二是长水平段工具摩阻大,连续管下入、坐封控制难;三是致密储层水力喷射射孔成功率低、射孔层段多,射孔液量及返出砂量大,需拉运。

根据以上难点制定了校深措施、坐封吨位控制、射孔参数优化、射孔液循环利用、更换管柱验封找点、减阻剂稳定坐封力、异常处理表等系列现场控制措施。

(1)采取油管探人工井底+连续管探底、拉漂浮,核算连续管深度误差,解决无缝隙套管定位问



图11 连续管环空压裂工具组合

Fig.11 Make-up of the coiled tubing annular multi-stage hydra jet fracturing tool

表2 水力射孔排量与地面压力

Table 2 Displacement and pressure loss during hydraulic perforation

喷嘴内径/ mm	喷嘴 数量	排量/ (m ³ ·min ⁻¹)	喷枪射速/ (m·s ⁻¹)	连续油管		摩阻/ MPa	节流压差/ MPa	油嘴节流/ MPa	地面压力 (加回压控制)/MPa
				直径/in	长度/m				
3.175	7	0.75	230	2 3/8	3350	22	16.5	8	38.5(46.5)
		0.75	230	2	4650	40	16.5	8	56.5(64.5)
4.75	3	0.75	230	2	6000	50	16.5	8	66.5(74.5)
4.75	4	1	230	2 3/8	3350	27	16.5	8	43.5(51.5)
4.5	4	0.9	230	2 3/8	3350	25	16.5	8	41.5(49.5)

注:1 in=25.4 mm

题,深度计算公式为:

坐封前连管显示深度=连管下压裂探底显示深度-(常规探底深度-设计射孔深度)+(常规探底深度-设计射孔深度)×(连管与常规探底深度差值-连管与设计漂浮深度差值)/(常规探底深度-漂浮深度)+喷枪中部到导向头距离+1 m

(2)应用软件模拟井身结构和连续管力学(图 12),确定指轻、下推力合理范围,使用金属减阻剂增加下推力,保证下压坐封吨位;水平段长、井身结构对下深影响显著,以往多次出现因管柱摩阻大,坐封后吨位反弹,下推力<30 kN 施工过程封隔器解封不够,导致工程问题。

制定的措施:超长水平井提前力学模拟,指导不同深度现场控制措施(下推力≥30 kN);根据软件预测,合理加大下压吨位,传递下推力不足时加减阻剂保持坐封力;水平段长≥700 m 时若下推力≤30 kN 加减阻剂,下压 80 kN;500 m≤水平段长<700 m 下压 70~80 kN;水平段长≤500 m 下压 40~60 kN。

(3)完善射孔工艺控制技术。通过对射孔参数的优化,提高射孔成功率,射孔成功率 100%。

优化射孔参数:优化不同的射孔时间(I类油层 20 min、II类油层 28 min),保证一次射孔成功率。

提高射孔效果:提高射速(I类油层 180 m/s、II

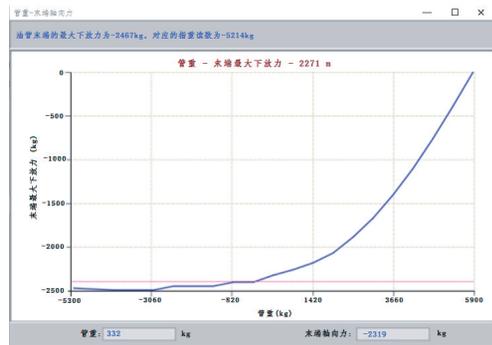


图 12 连续管下入深度下推力变化模拟曲线
Fig.12 Simulation Curve of push force vs setting depth of coiled tubing

类油层 210 m/s),增加喷射距离,突破水泥环及近井污染带,降低施工压力。

改变试挤方式:采用连续管内先压开,套管逐级提排量方式,降低套管损坏风险。

2 现场应用情况

173-86 区块实施 5 口井 321 段,平均单井压裂 64.2 段,加液 23797 m³,加砂 2548 m³,排量 8~10 m³/min,单趟管柱最多压裂 39 段。4 口井套管自喷生产中,平均单井初期日产油 20.1 t,目前日产油 18.8 t,计产 55 d,累计产油 986 t,详见表 3。

表 3 密切割体积压裂现场试验施工统计

Table 3 Summary of intensive cut coiled tube volume fracturing operations

序号	井号	水平段长度/m	钻遇砂岩长度/m	段数/段	段间距/m	砂量/m ³	液量/m ³	初期			目前			计产时间/d	累计产油/t
								日产液/t	日产油/t	含水/%	日产液/t	日产油/t	含水/%		
1	Q196-P2	900	816	118	7	2925	28506	21.0	18.5	12.0	21.0	18.5	12.0	11	203
2	Q196-P3	1050	985	66	15	3406	30119	31.0	28.2	9.0	30.0	27.8	7.2	22	611
3	Q196-P4	556	496	33	15	1577	16441	34.2	32.1	6.1	30.0	27.6	2.4	106	2894
4	Q196-P5	954	640	59	15	2750	28028	29.2	1.4	95.2	29.2	1.4	95.2	84	115
5	Q196-P1	691	451	45	15	2085	15893								
	平均	830.2	677.6	64.2	13.4	2548	23797	28.9	20.1	30.6	27.6	18.8	29.2	55	986

例如,Q196-P2 井目的层 FI4 压裂井段(见图 13):2568.0~1683.0 m,设计改造规模 2955.0 m³,总液 22672 m³,施工完成时共注入液体 28506 m³,加入石英砂 2925 m³,喷砂射孔压力 57.6 MPa,主压裂施工压力维持在 30.0 MPa 左右,停泵压力为 14.9 MPa。

3 结论及认识

(1)连续管密切割体积压裂工艺是连续管水力喷射环空加砂压裂有效拓展^[14],现场应用的实施完成,弥补了桥塞体积压裂的不足和缺点,同时探索出一套大庆外围致密油难采储层有效增产改造途径和手段^[15],进一步发挥了连续管设备的带压环保和自动化优势;

(2)目前该工艺还处于不断完善阶段,在施工

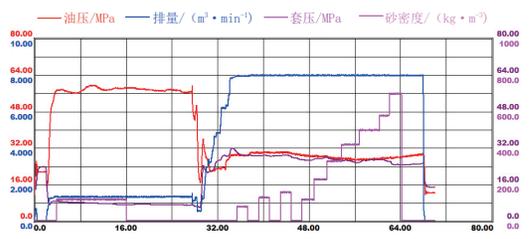


图13 Q196-P2井第13段压裂施工曲线

Fig.13 Curve of the No.13 fracturing section in Q196-P2 well

参数优化、适应储层类型等方面有待于在今后研究应用中进一步探索扩大试验井数,特别是在超长水平段以及深井和特殊储层中继续进行试验和应用;

(3)连续管密切割压裂无需下桥塞、射孔、钻桥塞,压后即可排液投产,与以往桥塞压裂相比缩短了单井施工周期,提高了施工时效,压裂改造的针对性更加精准,但工具的稳定性和性能指标方面还有进一步提升的空间,以满足更高增产改造工艺的需求。

参考文献(References):

- [1] 石孝志,张俊成,焦亚军,等.连续油管多簇喷砂射孔填砂暂堵分段体积压裂技术[J].钻采工艺,2020,43(6):35-37.
SHI Xiaozhi, ZHANG Juncheng, JIAO Yajun, et al. Multistage fracturing technology with coiled tubing mult-cluster hydraulic jet perforating and sand bridging in hydraulic fracturing for shale gas reservoirs [J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(6): 35-37.
- [2] 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]. Petroleum Journal, 2014, 35(4): 706-714.
- [3] 李宪文,樊凤玲,杨华,等.鄂尔多斯盆地低压致密油藏不同开发方式下的水平井体积压裂实践[J].钻采工艺,2016,39(3):34-36.
LI Xianwen, PAN Fengling, YANG Hua, et al. Volume fracturing practice of horizontal wells in low pressure compact reservoirs of Ordos Basin under different development modes [J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(3): 34-36.
- [4] 王丽峰,胡忠民,朱书仪,等.连续油管底封拖动水力喷射环空加砂分段压裂技术在九区石炭系水平井的应用[J].新疆石油天然气,2017,13(2):65-69.
WANG Lifeng, HU Zhongmin, ZHU Shuyi, et al. Application of annular multistage-hydrate-fracturing technology with coiled tubing carrying a single packer of the sidetracking horizontal wells in the 9-area, Karamay Oilfield [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2017, 13(2): 65-69.
- [5] 李智,胥云,王振铎,等.水力喷砂压裂工具喷嘴磨损分析[J].石油矿场机械,2010,39(11):25-28.
LI Zhi, XU Yun, WANG Zhenduo, et al. Analysis on nozzle

wear of hydraulic sandblast fracturing tools [J]. Oil Field Equipment, 2010, 39(11): 25-28.

- [6] 李智.井下水力喷射压裂工具结构优化设计研究[D].西安:西安石油大学,2011.
LI Zhi. Study on optimized design of downhole hydrate fracturing tool structures [D]. Xi'an: Xi'an Shiyu University, 2011.
- [7] 杜丙国,马清明.小直径管内水力切割器的研制与应用[J].石油钻采工艺,2012,34(6):112-113,116.
DU Bingguo, MA Qingming. Development and application of a small-diameter inside tube hydraulic cutter [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(6): 112-113, 116.
- [8] 李根生,沈忠厚.高压水射流理论及其在石油工程中应用研究进展[J].石油勘探与开发,2005,32(1):96-99.
LI Gensheng, SHEN Zhonghou. Advances in researches and applications of water jet theory in petroleum engineering [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1): 96-99.
- [9] 张照阳,韩田兴,周培尧,等.连续油管水力喷射环空压裂工艺研究及应用[J].内蒙古石油化工,2014,40(22):9-11.
ZHANG Zhaoyang, HAN Tianxing, ZHOU Peiyao, et al. Coiled tubing hydraulic fracturing ring jet research and application of space [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2014, 40(22): 9-11.
- [10] 王金友,许国文,李琳,等.连续油管拖动底封水力喷射环空加砂分段压裂技术[J].石油矿场机械,2016,45(5):69-72.
WANG Jinyou, XU Guowen, LI Lin, et al. Technology of coiled tubing abrasive perforating and annulus fracturing [J]. Oil Field Equipment, 2016, 45(5): 69-72.
- [11] 白艳伟.低渗透储层水力喷射压裂产能研究[D].西安:西安石油大学,2013.
BAI Yanwei. Productivity study of hydraulic fracturing in low permeability reservoir [D]. Xi'an: Xi'an Shiyu University, 2013.
- [12] 王佳,穆佳成,高京卫.水力喷砂射孔参数优化设计研究[J].内蒙古石油化工,2013,39(19):7-9.
WANG Jia, MU Jiacheng, GAO Jingwei. Design and research on parameter optimization of hydraulic perforating with sand [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2013, 39(19): 7-9.
- [13] 郭建春,杨立君,赵金洲,等.压裂过程中孔眼摩阻计算的改进模型及应用[J].天然气工业,2005,25(5):69-71.
GUO Jianchun, YANG Lijun, ZHAO Jinzhou, et al. Modified model and application of calculating perforation pressure loss during hydraulic fracturing [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(5): 69-71.
- [14] 韩继勇,逢仁德,王书宝,等.水力喷射环空压裂技术在长庆油田的应用[J].钻采工艺,2015,38(1):48-50.
HAN Jiyong, PENG Rende, WANG Shubao, et al. Application of hydraulic jet annular fracturing technology in Changqing Oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(1): 48-50.
- [15] 张全胜,李明,张子麟,等.胜利油田致密油储层体积压裂技术及应用[J].中国石油勘探,2019,24(2):232-240.
ZHANG Quansheng, LI Ming, ZHANG Zilin, et al. Application of volume fracturing technology in tight oil reservoirs of Shengli Oilfield [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 232-240.

(编辑 李艺)