

选择性重复压裂工具关键技术

秦金立

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘要:为了在重复压裂过程中用水力喷射射孔替代火工品射孔,并延长水力喷射工具单趟管柱的使用寿命,同时解决常规扩张封隔器胀封承压后残余变形大、易卡管柱等问题,研制了选择性重复压裂工具。该工具的射孔通道和压裂通道分开设计,通过联作芯轴实现两个通道的转换;根据通道转换特性和施工工艺特征,设计了适时坐封跨接组合式封隔器;为提高承压能力、减小变形,跨接式封隔器胶筒两端均采用了嵌套弹簧式结构。通过室内测试和现场试验验证了选段性重复压裂工具封隔器的封隔性能和通道转换能力。研究表明,选择性重复压裂工具可以实现射孔、压裂自由转换、自由选择,减小单段喷嘴的过砂量,延长单趟管柱的使用寿命;封隔器可实现适时坐封解封,胶筒残余变形小且可靠,更易于封隔器的解封及管柱的起出。

关键词:重复压裂;封隔器;水力喷射;喷嘴;双封单卡

中图分类号:TE934⁺.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2018)04-0071-07

Key Techniques of Selective Refracturing Tools

QIN Jinli

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: This paper presents the key techniques of selective refracturing tools used in avoiding initiating explosive devices in refracturing, and in prolonging the service life of hydraulic injection tools in single-run string. It also addressed solving the problems of large residual deformation of conventional expansion packer under pressure as well as stuck pipe, etc. The perforation channel and the fracturing channel of the refracturing tools were designed respectively, and channel conversion was realized through the joint mandrel of perforation and fracturing. According to the characteristics of channel conversion and operation, an integrated packer was designed, which could duly set and bridge over. In order to improve the bearing capacity and reduce deformation, an inserted spring structure was adopted in the design of the two ends of the element of the straddle packer. Indoor experiments and fields tests were carried out to verify the sealing performance and channel conversion capability of the packer of the selective refracturing tools. The results showed that the perforation and fracturing of the selective refracturing tools could be freely converted and selected. As a result, the new approach could reduce the volume of sand flowing through the single nozzle and extend the service life of the single-run string. In addition, the packer could duly set and unset. The residual deformation of the element is small and the element is reliable, which further facilitates the unsetting of the packer and the pulling out of the string.

Key words: refracturing; packer; hydraulic jetting; nozzle; double-sealing and single-stick

油气藏开发过程中,随着开发时间增长,地层渗透率逐渐降低,导致初次压裂后的产油量不断降低。研究和现场实践表明,重复压裂是目前解决“三低”(低产、低效和低渗)问题比较有效的方法^[1-4]。目前,国内重复压裂方法主要有原有裂缝延伸、层内压出新裂缝和转向重复压裂^[5-6]。针对原有裂缝延伸

收稿日期:2018-04-01;**改回日期:**2018-07-05。

作者简介:秦金立(1979—),女,天津人,2003年毕业于江汉石油学院机械设计制造及其自动化专业,高级工程师,主要从事井下工具的设计与研发工作。E-mail:qinjl_sripe@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技攻关项目“水力射孔及喷砂联作重复压裂工具的研制”(编号:P15005)资助。

的重复压裂,一般下入双封单卡管柱进行压裂;层内压出新裂缝的重复压裂常规工艺是“射孔枪+火药射孔”,再下入双封单卡拖动管柱进行分隔,两趟作业增加了作业成本,也增加了双封单卡管柱的定位难度^[7-8]。另外,常用的双封单卡管柱中的封隔器一般选用重叠钢片或钢丝帘线等骨架内衬结构的K344/K341型封隔器,该封隔器在一定程度上改善了扩张胶筒在承压过程中的受力情况,但骨架内衬封隔器在坐封后承压时,骨架内衬会在压力作用下向背压端呈喇叭口翻卷,导致其重复坐封可靠性低、失封率高^[9-12]。针对重复压裂工艺存在的问题,笔者提出用水力喷射射孔替代火工品射孔,并研制了用于射孔压裂的选择性重复压裂工具,以期用一趟管柱既能延伸原有裂缝,又能在层内压出新裂缝,且能降低封隔器反复坐封的失封率。

1 选择性重复压裂工具的研制

1.1 选择性重复压裂管柱组成

选择性重复压裂工具可压老缝、造新缝,主要设计思路为:1)管柱内应具有造新缝工具、压裂工具及隔离已压裂层位的跨接封隔工具;2)造新缝工具和压裂工具可选择使用,当层内需要造新缝时,造新缝射孔通道开启,压裂工具的过流通道关闭,且管柱内能够聚积高压能,并通过喷嘴转换成动能,切割套管实现射孔造缝;延伸裂缝时,压裂工具的压裂通道开启,使裂缝延伸;3)跨接式封隔器应可以进行选择性坐封,射孔作业时跨接封隔器解封,压裂作业时封隔器坐封并隔离已压裂层位。

设计的选择性重复压裂管柱如图1所示。适时坐封跨接式封隔器由上封隔器和下封隔器组成,跨接在选择性射孔压裂工具的两端,实现适时坐封。选择性射孔压裂工具通过联作芯轴的轴向移动切换过流通道,分别实现射孔和加砂压裂。射孔时,跨接式封隔器处于解封状态;加砂压裂时,跨接封隔器坐封并隔离上、下初始裂缝。

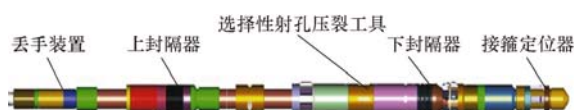


图1 选择性重复压裂工艺管柱

Fig.1 Selective refracturing string

1.2 选择性射孔压裂工具的结构

设计的选择性射孔压裂工具的基本结构如图2所示。选择性射孔或压裂是通过联作芯轴的轴向运动来实现过流通道的转换。选择射孔功能时,管内聚积高压能的同时,高压流体通过喷嘴转换成动能切割套管实现射孔造缝;选择压裂功能时,管内管外实现沟通,且过流通道远大于射孔通道,增大施工排量,缩短施工时间,减小射孔通道-喷嘴单段过砂量。

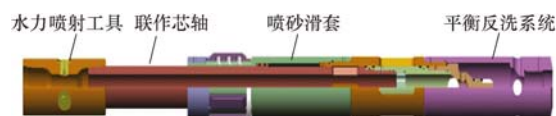


图2 选择性射孔压裂工具的结构

Fig.2 Structure of the selective refracturing tool

1.3 选择性重复压裂原理

选择性重复压裂工具既可以压开闭合的原有老缝(初始裂缝),又可在层内压出新裂缝(如图3所示),其原理是:将管柱下至预定射孔位置,开启射孔通道,向管内注入一定浓度的混合磨料,经过液体加压混合磨料液体通过喷嘴将高压能转换为动能,形成高速射流,射穿套管和近井地层,从而射开一定深度和直径的孔眼^[11-12];上提下放管柱可实现过流通道的转换,同时跨接式封隔器可适时坐封,隔离上、下初始裂缝,然后通过工具中的加砂通道将压裂液和支撑剂注入新裂缝,使新裂缝处于开启状态,进而提高地层渗流能力。施工结束后,泄压,上提管柱,解封跨接式封隔器,使选择性射孔压裂工具通道实现转换,拖到下一层段,继续进行射孔或压裂作业。

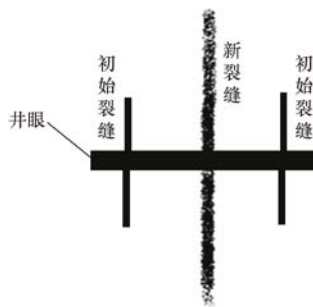


图3 层内压出新缝的重复压裂示意

Fig.3 Schematic diagram of refracturing new fractures

2 选择性射孔和压裂关键技术

2.1 水力喷砂射孔技术

影响水力喷射切割套管和岩石的因素主要有砂粒冲击速度、砂粒含量、砂粒磨料性质和套管材料性质,而砂粒的冲击速度取决于喷射压力及喷嘴直径等因素。其中,喷射压力是油管内液体形成的高压;喷嘴是高压水力喷射射流发生装置,其结构决定了喷嘴的耐磨性和射流能力^[13-16]。那么,关键是如何保证油管内密封及喷嘴的射流能力和耐磨性。为解决该问题,开展了选择性射孔和压裂关键技术研究。

2.1.1 高压密封技术

在喷嘴处形成高压流体的条件是油管内密封,而选择性射孔压裂工具要实现射孔及压裂的选择,联作芯轴上的密封组件需要往复运动且过孔。为保证密封组件的完整性、密封性并降低插拔阻力,设计了双密封装置,如图 4 所示。

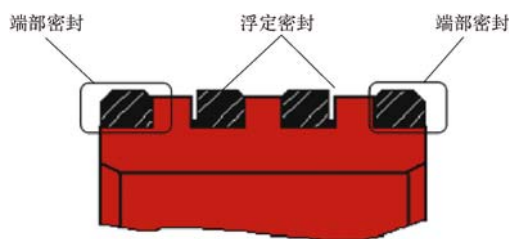


图 4 双密封装置示意

Fig. 4 Schematic diagram of double sealing device

研究表明,该双密封装置可降低胶圈过盈量和插拔阻力,提高轴向往复运动时密封的可靠性,降低橡胶剪切带来的失效概率,保证油管内密封及高压流体的形成。该双密封装置在进行 100 余次反复过孔试验后,在 30、50 和 70 MPa 压力下分别进行稳压试验,均未出现渗漏及压力下降现象(见图 5)。

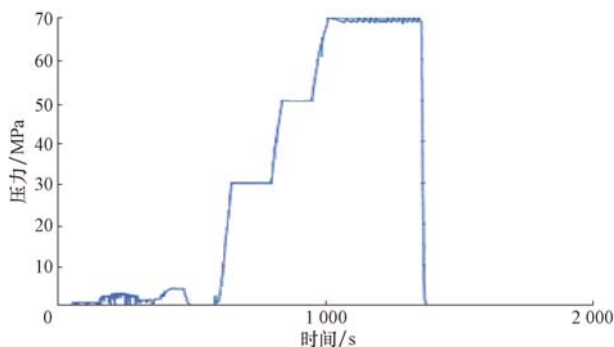


图 5 选择性射孔压裂工具密封压力曲线

Fig. 5 Sealing pressure curve of the selective perforating fracturing tool

2.1.2 喷嘴优化设计

喷嘴是水力喷砂射孔发生装置的执行元件。通过喷嘴内孔横截面的收缩,将高压水流的压能聚集并转化为动能,以获得最大的射流冲击力,然后作用于套管上进行切割^[17-20]。通过对比不同结构喷嘴的性能,优化喷嘴结构,优化的结构参数包括圆柱段长度 l 、收缩角 α 、入口直径 D 、出口直径 d 和喷嘴长度 L 等(如图 6 所示)。利用 Fluent 软件分析不同喷嘴直管段长径比(l/d)下的射流速度(如图 7 所示),以及不同收缩角条件下的流场分布(如图 8 所示)。通过上述方法,可以优选出喷嘴最佳的长径比和收缩角。

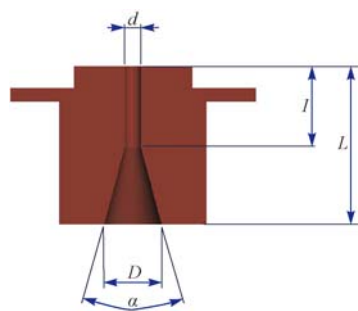


图 6 喷嘴结构示意图

Fig. 6 Nozzle structure diagram

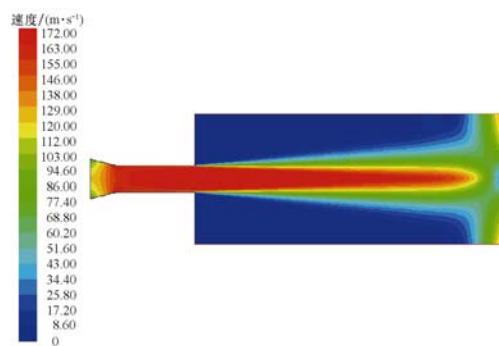


图 7 喷嘴直管段某长径比下的喷射流场分布

Fig. 7 Injection flow field distribution of nozzle straight pipe under some l/d ratio

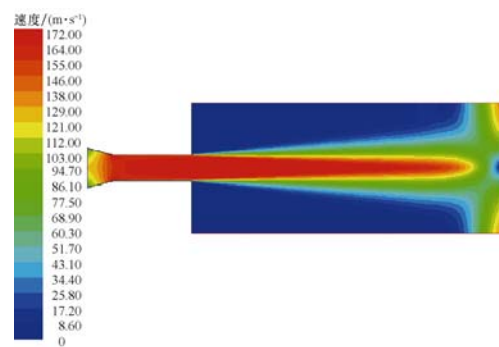


图 8 某收缩角条件下的流场分布

Fig. 8 Flow field distribution under some coverage angle α

喷射工具工作时喷嘴磨损严重,喷射返流会对喷射工具表面造成损伤,故不仅要优化喷嘴结构,还要选择合适的喷嘴材料,延长喷射工具的使用寿命。为提高喷嘴的耐磨性,延长其使用寿命,应选择硬度较高且韧性好的硬质合金材料。

2.2 射孔和压裂通道转换技术

通过转换过流通道选择射孔作业和压裂作业,而转换过流通道通过联作芯轴和摩擦机构来实现。联作芯轴控制压裂滑套过流通道的开启与关闭,选择射孔压裂工具上的扶正块(如图9所示)和下封隔器上的扶正一体化卡瓦装置(如图10所示)构成双摩擦机构,其在强力弹簧的作用下给外层套管一个正向压力,并与套管形成摩擦,产生足够的摩擦力,为通道转换提供保证。

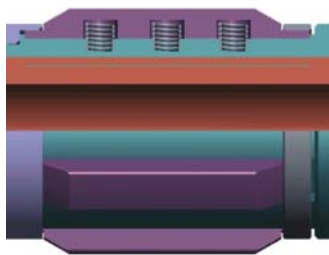


图9 扶正块摩擦机构

Fig. 9 Friction mechanism of centralizing block

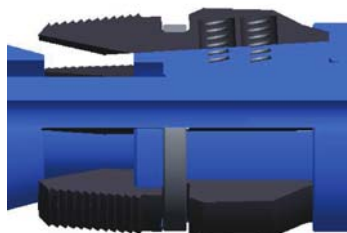


图10 下封隔器扶正一体化卡瓦

Fig. 10 Centralizing integrated slip of lower packer

2.3 选择封隔技术

跨接式封隔器用于隔离上、下已有裂缝,封隔器的封隔能力及重复坐封可靠性是保障重复压裂作业成功的关键。根据选择性射孔压裂工具的工作特点,优化跨接封隔器组合,下封隔器为常规机械式坐封封隔器,上封隔器为液压式可控坐封封隔器。同时,通过优化上、下封隔器胶筒结构,提高跨接封隔器重复坐封的可靠性,降低封隔器的残余变形。

2.3.1 上封隔器胶筒封隔技术^[7]

为避免钢丝骨架和重叠钢带等内衬式封隔器坐封可靠性低、失封率高等问题,上封隔器胶筒采用液压胀封无骨架式结构(如图11所示)。该封隔器胶筒内部不设任何骨架(称之为无骨架内衬适时扩张式封隔器),仅在两端嵌入弹簧,保护橡胶在压力作用下不被挤出,保证解封后顺利回缩。弹簧采用多层嵌套方式,以减小张开后的间隙,增强其对胀开胶筒端部的支撑力,提高封隔器整体的承压能力。



图11 上封隔器的封隔胶筒

Fig. 11 Sealing cartridge of upper packer

模拟分析不同内压和不同胶筒长度条件下胶筒与护体、弹簧接触区域的应变发现,不管内压和胶筒长度如何变化,变形最大区域均出现在胶筒两端,变形最大处为弹簧和护体接触处的587号单元(如图12所示)。由于弹簧和护体接触处是较为明显的薄弱环节,如果变形较大,橡胶会被撕裂,导致胶筒损坏,失去密封作用。

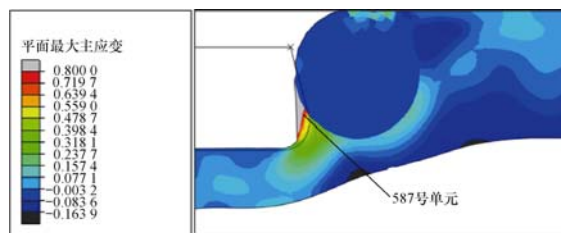


图12 胶筒与护体、弹簧接触区域的平面最大主应变

Fig. 12 The maximum horizontal principal strain in the contact areas among packer rubber, coating and spring

为控制胶筒两端的变形,防止胶筒损坏,模拟了不同内压和胶筒长度下587号单元的平面主应变,结果如图13所示。

从图13可以看出,内压小于28 MPa时,587号单元平面主应变随内压增加而迅速增大;内压超过28 MPa后增大趋势放缓,内压为70 MPa时应变达到最大;内压为70 MPa、胶筒长度分别为100和350 mm时,587号单元的平面主应变分别为0.86和

0.82;在相同内压下,胶筒长度小于 150 mm 时,两端的应变较大;胶筒长度大于 200 mm 时,随着胶筒长度增长,两端应变趋于定值。考虑到胶筒较短时下入封隔器时的安全性较高,因此确定胶筒长度为 200 mm,此时 587 号单元的最大应变为 0.80。

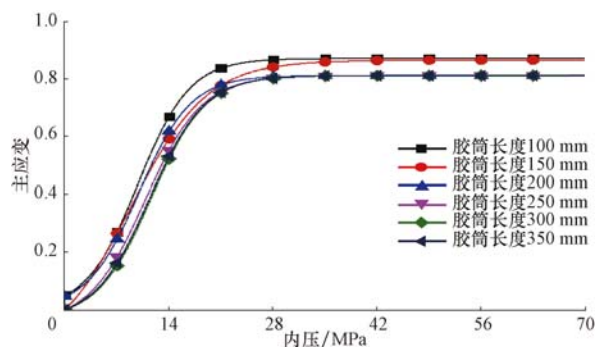


图 13 不同内压和胶筒长度下 587 号单元的平面主应变

Fig. 13 Principal strain of unit 587 under various internal pressure and packer rubber length

2.3.2 胶筒适时坐封控制技术

选择射孔造缝作业时,为保证管内的循环,上封隔器应处于解封状态,但上封隔器为液压胀封且进行射孔作业时,油管内又聚积高压能量。那么,如何保证管内高压封隔器仍不坐封,是选择射孔作业的关键。上封隔器设计了适时坐封控制机构,其由限位轴、外套、高强度复位弹簧和密封组件等组成,如图 14 所示。

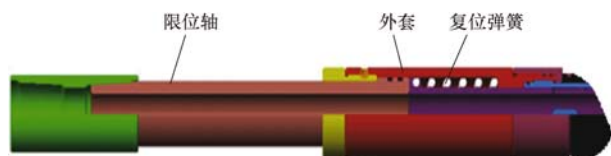


图 14 上封隔器适时坐封控制机构

Fig. 14 Control mechanism of upper packer timing setting

限位轴和高强度复位弹簧共同控制胶筒的进液通道,弹簧空间与管内连通,且上下截面相等,上提芯轴时,不论管内聚积了多大压力也不会使进液通道打开。待下压限位轴后,弹簧压缩,芯轴活动,进液通道打开,胶筒在节流压力小于 2 MPa 时即可实现封隔器的胀封。上封隔器的适时坐封,与选择射孔和压裂作业工具同步,能确保施工的安全性。

3 主要技术参数及地面性能测试

3.1 主要技术参数

以 $\phi 139.7$ mm 选择性重复压裂工具为例,其

技术参数:最小内径为 50.0 mm;管柱总长为 4 900.0 mm;射孔喷嘴过流面积为 0.58 cm^2 ;下封隔器坐封方式为上提下放管柱;下封隔器坐封力小于 20 kN;下封隔器封隔能力为 70 MPa;射孔压裂选择方式为上提下放管柱;压裂通道过流面积为 21.19 cm^2 ;下封隔器活动距离为 230.0 mm;上封隔器启动压力小于 2 MPa;上封隔器封隔能力为 70 MPa。

3.2 地面性能测试

为验证射孔通道及压裂通道的选择及转换能力、跨接式封隔器的适时坐封能力及射孔造缝时的能量聚积能力,进行了选择性重复压裂工具的功能测试。

测试套管柱组合为 $\phi 139.7$ mm 套管+压差式滑套(上、下封隔器胀封,滑套打开,释放压力)+ $\phi 139.7$ mm 套管。

将测试套管柱组合下入 $\phi 139.7$ mm 试验井内,并坐于井口;按选择性重复压裂管柱的结构连接各部件,并下入 $\phi 139.7$ mm 套管柱内;连接试验封头及钻井泵管线,上提试验管柱,开泵观察液体的流出位置,验证封隔器状态(试验流体在 $\phi 139.7$ mm 套管内循环,则上封隔器处于解封状态;试验流体在 $\phi 139.7$ mm 套管外循环,则上封隔器可能已坐封);下放管柱,使下封隔器坐封于 $\phi 139.7$ mm 套管内,同时下压 500.0 mm,并施加 20 kN 的力,以确保射孔通道与加砂通道实现转换,上封隔器处于进液状态;再次开泵,压差滑套明显打开,证明上、下封隔器完全坐封,且实现了射孔通道与加砂通道的转换。

测试结果表明,选择性重复压裂工具的射孔通道及加砂压裂通道可实现自由转换;射孔通道开启,压裂通道关闭时,跨接式封隔器均处于解封状态,且管内能够实现压力聚积;压裂通道开启时,管内再次憋压,井眼管柱中的压差滑套打开,表明跨接式封隔器已有效封隔。

4 现场试验

定 X 井是延长油田定边采油厂一口定向生产井,初次对长 8_上层(2 491.00~2 496.00 m 井段)射孔、压裂,产液量仅 143.0 m^3 且产油量仅有 75.0 m^3 ,为改善该井地层的渗透性和对近井地带的地层堵塞进行解堵,提高产量,对该井进行了再次压裂。

定X井完钻井深2 585.00 m,油层套管外径139.7 mm,钢级J55(抗内压36.7 MPa),井身结构及油层位置如图15所示。因油层套管承压低,既有新产层需要压裂(2 522.00~2 527.00 m井段),也有老缝延伸压裂(2 491.00~2 496.00 m井段),故选用选择性重复压裂工具对该井进行重复压裂。

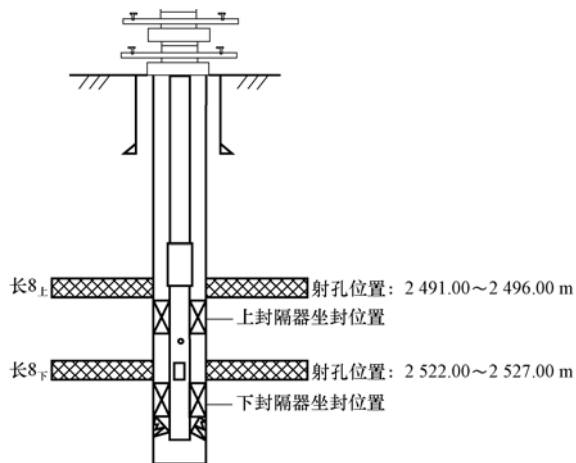


图15 定X井井身结构及油层位置

Fig. 15 Casing program of Well Ding X and production formation depth

选择性重复压裂工具管柱组合为导引头+下封隔器(机械式坐封封隔器)+选择射孔压裂工具+ $\phi 73.0$ mm 外加厚油管+上封隔器(适时液压扩张式封隔器)+水力锚+安全接头+ $\phi 73.0$ mm 外加厚油管至井口+250 型井口+油补距。

选择性重复压裂工具下至预定井深后,上提油管,选择射孔通道开启,压裂通道关闭,上封隔器处于解封状态。泵入射孔液,最大排量 $1.0 \text{ m}^3/\text{min}$,砂比7.4%,砂粒粒径20/40目,最高管内压力38.0 MPa。共计泵注射孔液20 min,其中携砂液 15.0 m^3 。外层套管为J55钢级套管,根据喷射速度和喷射时间判断已经射开,停泵。下放管柱,坐封下封隔器,转换过流通道,以 $1.0 \text{ m}^3/\text{min}$ 排量注入压裂液,坐封上封隔器(上、下封隔器形成跨接式封隔器),此时继续注液并对刚射孔的孔眼进行挤注压裂,注液 128.0 m^3 ,排量 $2.2 \text{ m}^3/\text{min}$,加砂 25.0 m^3 ,施工压力 $25.0 \sim 28.0 \text{ MPa}$,跨接式封隔器坐封显示明显(如图16所示)。压裂完成后,封隔器顺利解封,起出压裂管柱发现封隔器胶筒完好且具有较好的弹性,直径残余变形率不到1.0%;选择性射孔工具过流孔完好,未出现冲蚀损坏。

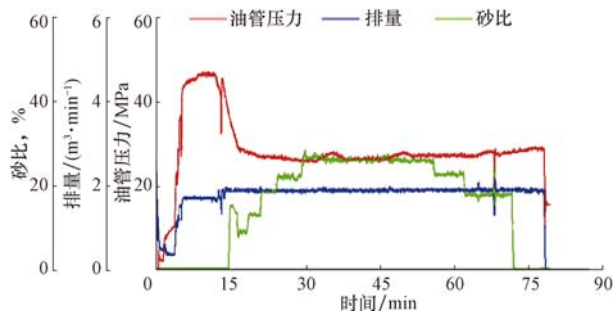


图16 定X井压裂施工曲线

Fig. 16 Fracturing construction curve of Well Ding X

5 结论与建议

1) 选择性重复压裂工具集水力射孔、压裂、适时封隔于一体,可根据产层特性选择老缝再延伸还是射孔造新缝再压裂。

2) 可实现射孔通道和压裂通道的自由转换和选择,降低射孔通道(喷嘴)的单段过砂量,进而提高单趟管柱的使用寿命。

3) 无骨架内衬适时扩张式封隔器内部采用高强度弹簧控制胶筒进液通道,保证了封隔器按要求胀封和解封;胶筒采用弹簧作为端部保护支撑结构,可以随胶筒端部同时扩张/收缩,提高了封隔能力,降低了胶筒的残余变形,避免了胶筒端部塞缝等问题。

4) 地面功能性测试和现场试验均验证了选择性重复压裂管柱的合理性,建议继续进行现场试验,以充分验证选择性重复压裂工具的可靠性。

参考文献

References

- [1] 潘有军,徐赢,吴美娥,等.“三低”砂岩油藏改善开发效果技术研究与实践[J].承德石油高等专科学校学报,2015,17(5):14-19.
PAN Youjun, XU Ying, WU Meie, et al. Research and practice of improvement and development effectiveness in “three lows” sandstone reservoir[J]. Journal of Chengde Petroleum College, 2015, 17(5): 14-19.
- [2] 达引朋,陆红军,杨博丽,等.低渗透老油田新型多缝重复压裂技术研究与应用[J].石油钻探技术,2015,43(3):65-70.
DA Yingpeng, LU Hongjun, YANG Boli, et al. Research and application of new refracturing technology in low permeability oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(3): 65-70.
- [3] 孟凡坤,苏玉亮,鲁明晶,等.长6特低渗透油藏重复压裂复杂缝网参数优化[J].石油钻采工艺,2015,37(4):87-91.
MENG Fankun, SU Yuliang, LU Mingjing, et al. A parameters

- optimization of complex fracture network under repeated fracturing for Chang 6 ultra-low-permeability oil reservoir[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(4): 87-91.
- [4] 唐述凯, 李明忠, 蔡民辉, 等. 重复压裂前诱导应力影响新裂缝转向规律[J]. 断块油气田, 2017, 24(4): 557-560.
- TANG Shukai, LI Mingzhong, QI Minhui, et al. Study of fracture reorientation caused by induced stress before re-fracturing[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24(4): 557-560.
- [5] 王振, 樊军. 重复压裂工艺现状及展望[J]. 机械工程与自动化, 2015(1): 222-223, 226.
- WANG Zhen, FAN Jun. Status and prospect of refracturing technology[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2015(1): 222-223, 226.
- [6] 杨金林, 许海东, 白振强. 重复压裂现状及分析[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2006, 8(1): 10-13.
- YANG Jinlin, XU Haidong, BAI Zhenqiang. On the analysis the present situation of refracturing[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2006, 8(1): 10-13.
- [7] 荣莽, 罗君. 页岩气藏水平井分段压裂管柱技术探讨[J]. 石油机械, 2010, 38(9): 65-67.
- RONG Mang, LUO Jun. Discussion on the technology of staged fracturing string in horizontal well of shale gas reservoir[J]. China Petroleum Machinery, 2010, 38(9): 65-67.
- [8] 闫建文, 张玉荣. 低渗透油田水平井压裂改造技术研究与应用[J]. 石油机械, 2009, 37(12): 91-93.
- YAN Jianwen, ZHANG Yurong. Research and application of horizontal well fracturing stimulation technique in low permeability reservoirs[J]. China Petroleum Machinery, 2009, 37(12): 91-93.
- [9] 刘阳, 秦金立. 无骨架内衬扩张式封隔器的研制与现场试验[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(5): 68-72.
- LIU Yang, QIN Jinli. Development and field test of non-lining inflatable packers[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(5): 68-72.
- [10] 张春辉. 连续油管结合双封单卡压裂技术应用[J]. 石油矿场机械, 2014, 43(5): 60-62.
- ZHANG Chunhui. Application of coiled tubing frac technique using double-sealing and single-strick[J]. Oil Field Equipment, 2014, 43(5): 60-62.
- [11] 杨晓龙, 刘丽娟, 张承武. 钢带封隔器胶筒护箍喇叭口优化设计[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(3): 161-163.
- YANG Xiaolong, LIU Lijuan, ZHANG Chengwu. Optimization design protector bell of steel packer rubber[J]. Machine Design and Research, 2015, 31(3): 161-163.
- [12] 张承武, 王兴建, 陈建刚. 分段压裂封隔器叠层钢片膨胀筒的密封机理[J]. 石油机械, 2007, 35(3): 5-7.
- ZHANG Chengwu, WANG Xingjian, CHEN Jiangang. Seal mechanism of the overlapped steel strip inflatable tube of step-wise fracturing packer[J]. China Petroleum Machinery, 2007, 35(3): 5-7.
- [13] 田守增, 李根生, 黄中伟, 等. 水力喷射压裂机理与技术研究进展[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(1): 58-62.
- TIAN Shouceng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Research on hydra jet fracturing mechanisms and technologies[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(1): 58-62.
- [14] 陈作, 王泽铎, 郑伟, 等. 水力喷砂分段压裂优化设计与施工[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(3): 72-75.
- CHEN Zuo, WANG Zeduo, ZHENG Wei, et al. Hydraulic sand blasting segregated fracturing optimization and operation technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(3): 72-75.
- [15] 曲海, 李根生, 黄中伟, 等. 水力喷射分段压裂密封机理[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 514-517.
- QU Hai, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Sealing mechanism of the gydrajet stepwise fracturing[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 514-517.
- [16] 田守增, 李根生, 黄中伟, 等. 油管水力喷射压裂技术[J]. 天然气工业, 2008, 28(8): 61-63.
- TIAN Shouceng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Hydrojet-fracturing technology with coiled tubing[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(8): 61-63.
- [17] 范薇, 胥云, 王振铎, 等. 井下水力喷砂压裂工具典型结构及应用[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(6): 74-77.
- FAN Wei, XU Yun, WANG Zhenduo, et al. Typical structure and application of downhole sand jet fracturing tools[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(6): 74-77.
- [18] 李根生, 牛继磊, 刘泽凯, 等. 水力喷砂射孔机理实验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2002, 26(2): 31-35.
- LI Gensheng, NIU Jilei, LIU Zekai, et al. Experimental study on mechanisms of hydraulic sand and blasting perforation for improvement of oil production[J]. Journal of the University of Petroleum, China, (Edition of Natural Science) 2002, 26(2): 31-35.
- [19] 欧阳梦迪. 水力喷砂射孔喷嘴的优化设计及实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- OUYANG Mengdi. Optimal design and experiments on hydraulic sandblasting perforation nozzle[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [20] 牛继磊, 李根生, 宋剑, 等. 水力喷砂射孔参数实验研究[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(2): 14-16.
- NIU Jilei, LI Gensheng, SONG Jian, et al. An experimental study on abrasive water jet perforation parameters[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(2): 14-16.