

鄂尔多斯盆地水平井多级滑套分段压裂技术

秦金立¹, 陈 作¹, 杨同玉², 戴文潮¹, 吴春方¹

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 2. 中国石化华北分公司, 河南郑州 450006)

摘 要: 鄂尔多斯盆地大牛地气田和红河油田长水平段裸眼水平井分段压裂时, 存在长水平段一次性分隔、裂缝发育与井径扩大井段的有效封隔等问题, 针对其地质条件、裂缝发育情况及井眼轨迹与井径变化情况, 研制了裸眼水平井多级滑套分段压裂工具, 形成了裸眼水平井多级滑套分段压裂技术。该技术在鄂尔多斯盆地 20 余口水平井进行了应用, 共完成了 200 段的压裂施工。应用结果表明: 包含裸眼水平井多级滑套分段压裂工具的完井管柱下入顺利, 封隔器封隔有效, 滑套打开成功率 100%, 压裂后增产效果良好。这表明裸眼水平井多级滑套分段压裂技术可以解决大牛地气田和红河油田长水平段裸眼水平井分段压裂中存在的问题, 可在鄂尔多斯盆地进行大规模推广应用。

关键词: 水平井 滑套 封隔器 分段压裂 鄂尔多斯盆地 红河油田 大牛地气田

中图分类号: TE254 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2015)01-0007-06

Technology of Staged Fracturing with Multi-Stage Sleeves for Horizontal Wells in the Ordos Basin

Qin Jinli¹, Chen Zuo¹, Yang Tongyu², Dai Wenchao¹, Wu Chunfang¹

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 2. Sinopec Huabei Company, Zhengzhou, Henan, 450006, China)

Abstract: During open-hole staged fracturing operation in horizontal wells of Daniudi Gas Field and Honghe Oilfield in the Erdos Basin, there were challenges such as the separation of long horizontal sections in one trip, the development of natural fractures and ineffective isolation due to hole enlargement. Considering the geological conditions, well trajectory and hole diameter changes in both fields, the staged fracturing tools with multi-stage sleeves for open hole in horizontal wells were developed and relevant operation techniques were established. The tools were applied in more than 20 wells in the Erdos Basin with totally 200 stages fractured. Field applications achieved good results, including the smooth running of the completion string of the staged fracturing tools with multi-stage sleeve for open hole in horizontal wells, effective sealing of packer, sleeve opening with high success rate, and dramatic increase of production after fracturing. These proved that these tools could solve the problems that occurred in open hole staged fracturing operations in Daniudi Gas Field and Honghe Oilfield, and are appropriate for intensive application in the Erdos Basin.

Key words: horizontal well; sleeve; packer; staged fracturing; Erdos Basin; Honghe Oilfield; Daniudi Gas field

大牛地气田位于鄂尔多斯盆地东北部, 储量丰富, 发育下石盒子组、山西组和石炭系太原组等 7 套气层, 气层物性差, 岩心渗透率低于 1.0 mD, 孔隙度 7%~10%, 自然产能低或无自然产能, 属于典型的低孔、低渗、低压气藏^[1]。红河油田位于鄂尔多斯盆地天环坳陷带南部, 储层为辫状河三角洲沉积, 主要开发三叠系延长组的长 6、长 8 和长 9 等油层组, 平

均孔隙度 11.9%, 渗透率 0.85 mD, 属于典型的低

收稿日期: 2014-11-15; 改回日期: 2015-01-04。

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, 主要从事固井、完井工具的研究工作。

联系方式: (010)84988850, qjl@shelfoil.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“φ127 多级滑套分段压裂工具的研制与应用”(编号: P11048) 部分研究内容。

孔、低渗、低产的“三低”油藏。两油气田为改善开发效果,均选用了水平井分段压裂技术^[2],其中,预置裸眼水平井多级滑套分段压裂完井是鄂尔多斯盆地油气井最主要的完井方式。大牛地气田和红河油田均属致密砂岩油气藏,但二者水平井的水平段长度、裂缝发育程度以及井径扩大率等方面存在明显的差异,而裸眼水平井多级滑套完井工具可解决长水平段一次性分隔、裂缝发育与井径扩大井段的有效封隔等问题。因此,为降低压裂成本,提高鄂尔多斯盆地致密油气的开发效益,以大牛地气田和红河油田的储层特征与水平井井眼情况为研究对象,研制了与之相适应的水平井多级滑套分段压裂技术,并在现场进行了应用。

1 水平井多级滑套压裂工具的研制

1.1 水平井对多级滑套分段压裂工具的要求

大牛地气田与红河油田水平井的水平段为 $\phi 152.4$ mm 井眼,水平段长度多超过1 000.00 m,需要分10段以上进行压裂,而多级滑套压裂工具应具备一次压裂10段以上的能力。此外,大牛地气田与红河油田的储层特性不同,对工具的下入和封隔也提出了不同的要求:大牛地气田地层岩性致密,微裂缝不发育,水敏性弱,水平井井眼轨迹较规则,主要考虑分段压裂工具外径与刚度等性能是否满足入井要求^[1];红河油田钻遇地层的承压能力自上而下均较低,部分地层结构疏松,水敏性极强,易吸水膨胀,发生井壁坍塌、掉块等现象,也易形成“大肚子”或“糖葫芦”井段^[3],这要求裸眼封隔器具有封隔不同井径的能力。为了降低裸眼水平井预置滑套分段压裂的成本,一般将完井管柱悬挂在上层套管上,这便需要一个悬挂工具,但为了防止完井管柱在轴向上发生移动,悬挂工具-插管封隔器应具有双向锚定能力。

1.2 多级滑套分段压裂工具

1.2.1 完井管柱

预置裸眼水平井分段压裂完井是通过裸眼封隔器将水平段分隔成需要的段数,通过滑套建立管内外管的过流通道,控制压裂液进入油气层进行压裂;利用插管封隔器将整个预置管柱锚定在上层套管上,防止管柱在轴向上发生移动。水平井多级滑套分段压裂完井管柱由浮鞋、隔离阀、压差式滑套、裸

眼封隔器、投球式滑套、双向锚定插管封隔器及送入工具等组成(见图1)^[4]。

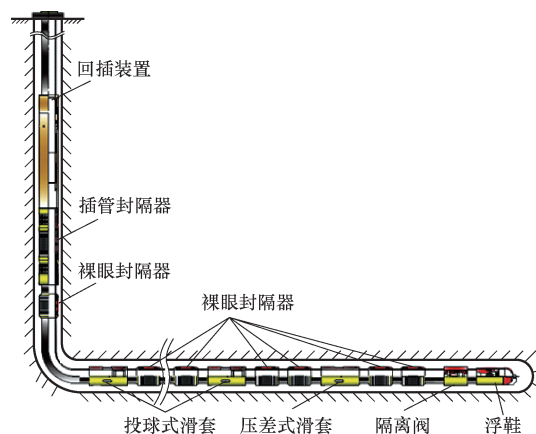


图1 预置裸眼水平井多级滑套分段压裂完井管柱

Fig. 1 Pre-set completion string of the staged fracturing tool with multi-staged sleeve for open hole in horizontal wells

1.2.2 多级滑套

水平井分段压裂完井管柱中,多级滑套是建立压裂液过流通道和压裂级数的关键工具。鄂尔多斯盆地各区块水平井的水平段长度不同,但为了满足最长水平段(大于1 000.00 m)的需求,开发了 $\phi 114.3$ mm、级差为3.175 mm的多级滑套,其在 $\phi 152.4$ mm裸眼井内可实现20段的压裂。多级滑套分为压差式滑套和投球式滑套。

压差式滑套(见图2(a))与完井管柱中的裸眼封隔器、插管封隔器都具有一定的压力等级,待隔离阀封堵后,管柱内形成密闭容腔,在压力小于30 MPa条件下坐封裸眼封隔器和插管封隔器。待压裂时,管柱密闭容腔内再重新建立压力直至打开滑套,建立压裂液过流通道。

投球式滑套(见图2(b))内部设有球孔成等差数列的球座,待憋压球(见图2(c))与球座复合密封后,憋压打开滑套,形成压裂液过流通道^[4]。在压裂过程中,球与球座的密封承压能力大于地层破裂压力才能保证临近地层不被压开。压裂施工结束后,为建立采油过流通道,球座孔应畅通,憋压球在放喷时应能返排。采油后期可能因出水严重、裂缝闭合造成产能递减,需通过下入工具采取堵水、二次压裂等技术措施进行改造,如滑套内部大小不等的球座不可钻,会导致后续作业管柱无法下入,无法采取堵水、重复压裂等措施。针对上述问题,开展了球座与憋压球结构的优化设计、球座的冲蚀机理分析、冲蚀

性能评价及球座的可钻性研究,级差 3.175 mm 的投球式滑套在 $\phi 114.3$ mm 油套管柱内可实现 20 级的压裂;优选的高分子憋压球密度轻、强度高,与球座的密封能力大于 70 MPa。球座的锥角经过优化、表面经过硬化处理后,在 HH36P101 井进行了冲蚀评价试验,球座在压裂液排量 $3.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 冲蚀 10 h (加砂量达 233 m^3) 后,与低密度憋压球的密封能力仍大于 70 MPa。球座可钻性强,单球座钻除时间少于 10 min。

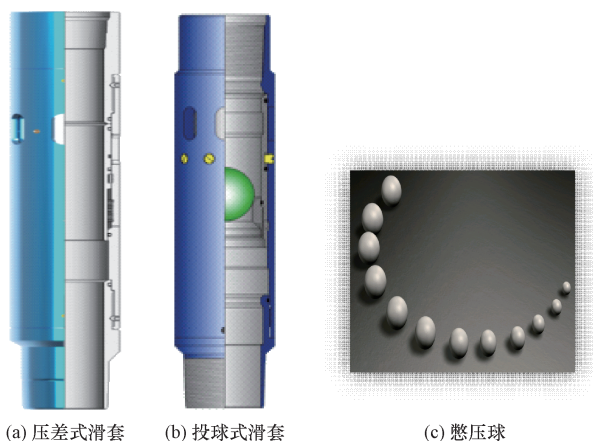


图 2 多级滑套

Fig. 2 Multi-stage sleeve

1.2.3 裸眼封隔器

水平井分段压裂完井管柱中,裸眼封隔器将水平段分隔成若干井段,其在入井过程中及压裂过程中均起着至关重要的作用。管柱入井过程中会面临井壁坍塌、掉块的问题,裸眼封隔器在井壁摩擦及管内液柱压力的作用下,其胶筒不仅容易损坏,而且容易提前坐封。如提前坐封,完井管柱入井时的摩擦力会增大,这将进一步加重裸眼封隔器胶筒磨损程度,甚至会导致完井管柱无法下至设计位置。完井管柱在下至设计位置后,由于存在井径变化大、井壁不规则的情况,可能会出现裸眼封隔器坐封不完全、封隔压力低或层段间穿层等问题,这将直接影响压裂效果^[3-4]。因此,防提前坐封、封隔井径适应性强、封隔压力高的裸眼封隔器在预置裸眼水平井多级滑套分段压裂完井管柱中至关重要。通过优化橡胶的配方,分析影响其膨胀性能的因素及膨胀封隔机理,优化设计封隔器膨胀胶筒单元、防退锁紧机构及防突机构,评价封隔器封隔性能,研制了压缩式裸眼封隔器和自膨胀封隔器^[5]。岩层致密、水敏性弱、井眼较规则的大牛地气田采用单一压缩式裸眼封隔器(见图 3(a))。压缩式裸眼封隔器的外径小,整体长

度短,结构紧凑,能降低完井管柱的刚度,提高其通过性,降低胶筒损坏的风险及避免下入受阻等问题^[6];该封隔器的胶筒随压力增大,膨胀率增大,封隔能力随之增强;该封隔器的封隔能力大于 70 MPa,耐温能力大于 150°C 。红河油田由于部分地层结构疏松,水敏性强,易吸水膨胀,井径扩大率大,采用由压缩式裸眼封隔器和自膨胀封隔器组成的组合式裸眼封隔器(见图 3(b))。组合式裸眼封隔器具有自修复功能,在胶筒受损的情况下不影响其密封能力,胶筒吸水后,膨胀率最大可达 1 000%,膨胀时间可根据需求可在 5~30 d 调整,封隔性能达 10 MPa/m,耐温达 150°C 。 $\phi 114.3$ mm 组合式裸眼封隔器的封隔井径最大可达 175 mm。

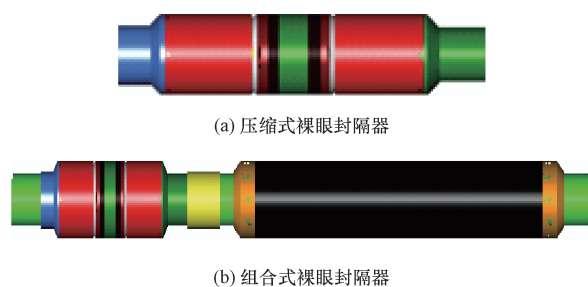


图 3 裸眼封隔器

Fig. 3 Open hole packer

1.2.4 插管封隔器及插入装置

水平井分段压裂完井管柱中,插管封隔器将管柱双向锚定在上层套管上,防止管柱发生轴向移动^[7]。同时,为提高完井管柱下入的成功率,采用钻柱送入。送入钻具与插管封隔器既要具有一定锁紧能力,以防止中途脱开,又要具有一定的密封能力,以确保裸眼封隔器胀封、悬挂器坐挂及压差式滑套打开等,还要能够顺利丢手。为此,需要能与插管封隔器形成一体、防脱、密封及可丢手的工具,即插入装置(见图 4(a))。插管封隔器由插管(见图 4(b))与双向锚定的封隔悬挂器(见图 4(c))组成。插管连接在封隔悬挂器的上部,用于与插入装置连接、锁紧,保证完井管柱顺利下入及与压裂管柱回插后的高压密封。

双向锚定封隔悬挂器的上下两个整体式卡瓦在液缸的推动下沿锥体上行实现坐挂,从而使整个完井管柱锚定在上层套管内的预定位置上,防止完井管柱在压裂过程中因承受高压而发生轴向移动。卡瓦间的胶筒在液缸向上移动的同时压缩胀封,实现尾管重叠段环空的高压封隔。内部锁紧防退机构及

卡瓦的锚定机构可防止胶筒坐封后回弹,确保环空封隔的有效性及其作用时长。

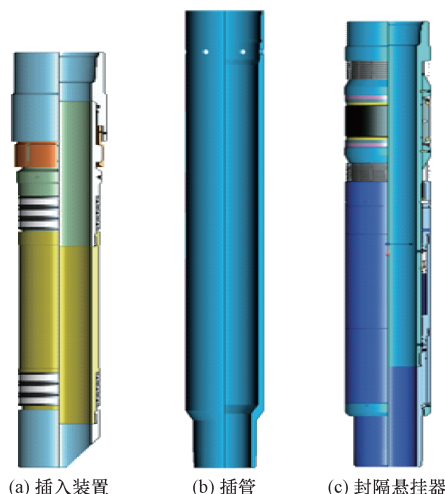


图4 插管封隔器及插入装置

Fig. 4 Bayonet-tube packer hanger and inserting device

插入装置在完井管柱下至预定位置后,可通过倒扣实现丢手,将送入钻具提出。待需要压裂时,插入装置与压裂管柱连接,再一次插入到插管内形成锁紧密封,满足分段压裂的高压作业。压裂作业结束后,需要起管柱时,插入装置可再一次完成丢手,将压裂管柱提出井口。

1.2.5 其他

为保证水平井分段压裂完井管柱顺利下入,在管柱止端设计具有导向功能、循环功能及防回压功能的浮鞋和隔离阀。浮鞋用来引导套管柱沿井筒顺利下到井内,防止套管鞋插入井壁岩层,降低入井阻力。浮鞋内部设有单向阀,管内液体可向管外环空中流动、循环,而管外液体却不能反向流动,可避免管柱入井过程中出现井涌、井喷等井下故障。隔离阀连接于浮鞋的顶部,内部设计有循环孔,其随管柱下入过程中是常开状态,便于灌浆和循环;管柱下至设计位置后,投球与内部球座匹配,关闭循环孔,实现管内、管外完全隔离,为管内建立压力及止端压裂提供条件。

2 多级滑套分段压裂工具作业技术

水平井多级滑套分段压裂增产改造中,分段压裂工具是基础,作业技术是保障。针对水平井多级滑套分段压裂完井特点及作业风险,研究了一套合理的作业技术,包括井筒准备、管柱入井、油管回接及滑套打开等。

2.1 井筒准备

裸眼分段压裂完井管柱顺利送至预定位置是多级滑套分段压裂技术实施的先决条件,而良好的井眼状况是完井管柱顺利送至预定位置的重要保障。

2.1.1 套管段

水平井多级滑套分段压裂完井管柱中的工具全部需要通过套管段,尤其是插管封隔器需要悬挂在套管段,为保证工具能顺利下入,套管段应减少泥饼结块的存在。为此,采用刮管钻具组合对套管段进行刮削。其中,在插管封隔器坐挂处反复刮削,同时分段进行钻井液循环,以保证坐封、坐挂套管内壁处无泥饼粘结,降低坐挂、坐封失效的风险。

2.1.2 裸眼段

水平井多级滑套分段压裂完井管柱中除插管封隔器均需要进入裸眼段,由于完井管柱中工具多、井眼直径小,环空过流面积小、下入风险大,如井眼不平滑、缩径,管柱就很难送至预定位置。为此,采用单螺旋稳定器或双螺旋稳定器的钻具组合在水平井裸眼段进行通井作业(必要时进行多次通井),在钻具组合到底后钻井液循环两周以上,直到井口振动筛无坚硬颗粒物返出为止,以保证井眼规则、平滑,利于完井管柱在水平裸眼段推送。

2.2 预置完井管柱入井作业技术

采取油套管送入完井管柱,连接次数多、施工时间长,特别是完井管柱进入水平裸眼段会因不断滞留而出现遇阻现象,又因为油套管强度比较弱,遇阻难处理,故一般采用钻柱和送入装置将完井管柱送至预定位置^[8]。

2.2.1 入井前准备

分段压裂工具入井前均需进行检查,包括连接螺纹是否有损伤、工具内部是否有杂物、性能参数是否满足作业要求、浮鞋凡尔是否灵活、隔离阀是否为常开、投球式滑套是否与编号匹配等。同时,测量工具的尺寸并按顺序将工具摆放好,以便于设计管柱及下入工具。

配备齐全井口设备,如套管钳、吊卡、吊环等;配制好完井液;检查压力表工作是否正常,泵车及管线是否准备到位。核实地面套管(油管)数量、尺寸及钻台上钻具的数量,以保证施工顺利进行。

2.2.2 完井管柱入井作业

按照设计的完井管串结构,连接压裂工具及油套管等并依次下至井内。连接工具或油套管时,在公扣端均匀涂抹丝扣油,按最佳扭矩上扣。下入过程中,避免磕碰,尤其保护好橡胶、卡瓦等易破损部件;清除井口异物,严防落物。插管封隔器入井后,锁死转盘,禁止旋转下部管柱。

管柱入井过程中,需控制下放速度、及时灌浆。完井管柱出套管前,应顶通;进入裸眼段,不得长时间停顿。完井管柱下至预定位置,管柱内灌满钻井液,上提下放管柱,记录管柱到底时的悬重及下压力,调整方余,复核钻杆及套管(油管)数据。

2.2.3 完井管柱坐封、坐挂作业

预置完井管柱下至预定位置后,替浆,使完井管柱内外均充满完井液。采用泵送方式投隔离阀坐封球,球入座前适当降低排量,慢慢送至球座,直至管柱内起压形成密闭容腔。加压、实现裸眼封隔器的胀封、插管封隔器的坐挂(锚定)、坐封,并通过悬重的变化判断锚定力。通过环空试压,验证环空封隔能力。

2.2.4 丢手作业

将钻杆调至中和点以上,正转 20 圈左右、试提丢手,若无法成功丢手,再适当上提钻具,继续进行上述操作,直至送入装置与插管封隔器的插管部分脱开,实现送入工具的丢手。上提送入管柱至 1 根,正循环完井液,直至井口返出的流体全部为完井液为止,观察无溢流,起钻。

2.3 油管回接及滑套打开作业技术

2.3.1 油管回接

回接装置(送入装置)及油管回接数量满足要求后,准备入井。连接回接装置、油管等时,在公扣端均匀涂抹丝扣油,按最佳扭矩上扣。下入过程中,清除井口异物,严防落物。待下至接近插管时,记录上提下放的悬重,观察悬重变化,缓慢下放管柱,直至悬重开始下降进行插入作业,再通过上提下放悬重变化验证回接锚定情况。确认回接锚定密封后,连接管线、进行油管内及油套环空试压作业,以验证密封效果。

2.3.2 滑套打开作业

按设计安装压裂井口、补球器、放喷与节流管线

等,试压合格后,进行滑套打开及压裂作业。

完井管柱内形成密闭容腔,憋压,通过压差面作用,打开压差式滑套(第 1 段),建立压裂液过流通道,泵送压裂液并加砂,实施第 1 段压裂。核对憋压球直径,使其与入井滑套球座的排序一致,依次投球打开对应的投球式滑套,建立压裂液过流通道,泵送压裂液并加砂,实施压裂。

3 现场应用与效益分析

3.1 现场应用

2012 年以来,水平井多级滑套分段压裂技术在鄂尔多斯盆地 20 余口井进行了应用,完井管柱下入顺利,封隔器封隔良好,最大封隔井径达 175 mm,滑套打开成功率 100%,单井最大压裂段数达 12 段,最大单井加砂量 492.8 m³(见表 1),最高施工压力达 64 MPa。红河油田的 HH36P107 井压裂后最高日产油量达 18.33 t,大牛地气田的 DPS-63 井压裂后最高日产气量达 4.92×10⁴ m³。

表 1 水平井多级滑套分段压裂技术在鄂尔多斯盆地部分应用情况

Table 1 Application of staged fracturing technology with multi-stage sleeve for open hole in horizontal wells in the Erdos Basin

井号	水平段长/m	压裂段数/段	压裂规模/m ³
HH37P57	570.00	8	121.0
HH36P101	798.00	9	150.9
HH36P107	956.00	10	286.0
HH36P24	974.00	10	287.1
HH74P9	643.00	9	226.2
DPH93	1 000.00	10	414.0
DPS-63	1 201.00	12	489.0
DPS202	1 070.00	10	383.5
DPS67	1 173.68	12	492.8
DPS-64	1 202.00	11	482.0
DPS-65	1 010.00	10	406.9

3.2 效益分析

随着国产水平井多级滑套分段压裂工具在鄂尔多斯盆地的成功应用,缩短了国内外水平井多级分段压裂技术的差距,促进了国内水平井分段压裂技术的进步,为国内“三低”油气田的开发提供了技术支撑。同时,随着国产水平井多级滑套分段压裂工具的日益成熟,应用规模的扩大,迫使国外同类工具

的价格不断下降,大大降低了油气田的压裂成本,提高了开发效益。

4 结论与认识

1) 鄂尔多斯盆地大牛地气田和红河油田均属于低孔、低渗、低产油气田,但不同的储层特性和裸眼水平段特性对多级滑套压裂工具性能的要求也不同。

2) 小级差多级滑套能确保在有限空间内的压裂级数,且投球式滑套的低密度、高强度憋压球与耐冲蚀、易钻球座的密封能力大于 70 MPa,能避免窜层问题,可满足大牛地气田长水平段水平井分段压裂的要求。

3) 组合式裸眼封隔器封隔井径的适应性强,封隔能力高,能满足红河油田井眼轨迹复杂水平井分段压裂的要求。

4) 插入装置与封隔悬挂器之间的锁紧机构既能保证完井管柱顺利下入,又能保证送入工具与完井管柱有效脱开;密封机构可确保完井管柱形成密封腔,实现滑套打开、封隔器胀封、悬挂器坐挂及压裂作业等。封隔悬挂器的双向锚定功能确保管柱有效悬挂,也能防止压裂过程中管柱发生轴向移动。

5) 研制的水平井多级滑套分段压裂工具在鄂尔多斯盆地 20 余口水平井进行了应用,证明了工具的可靠性及作业技术的合理性,可在类似油气藏大规模推广应用。

参 考 文 献

References

- [1] 陈作,何青,王宝峰,等. 大牛地气田长水平段水平井分段压裂优化设计技术[J]. 石油钻探技术,2013,41(6):82-85.
Chen Zuo, He Qing, Wang Baofeng, et al. Design optimization of staged fracturing for long lateral horizontal wells in Daniudi Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(6): 82-85.
- [2] 王越,陈付虎,张永春,等. 红河油田水平井分段压裂技术研究[J]. 延安大学学报:自然科学版,2014, 33(1):70-73.
Wang Yue, Chen Fuhu, Zhang Yongchun, et al. Research of horizontal well staged fracturing technology in Honghe Oilfield[J]. Journal of Yan'an University: Natural Science Edition, 2014, 33(1): 70-73.
- [3] 田绘杰. 红河油田水平井井身结构优化技术探讨[J]. 长江大学学报:自科版,2014, 11(16):43-44, 53.
Tian Huijie. Research on well structure optimization for horizontal wells in Honghe Oilfield[J]. Journal of Yantze University: Nature Science Edition, 2014, 11(16): 43-44, 53.
- [4] 秦金立,吴姬昊,崔晓杰,等. 裸眼分段压裂投球式滑套球座关键技术研究[J]. 石油钻探技术,2014, 42(5):52-56.
Qin Jinli, Wu Jihao, Cui Xiaojie, et al. The key technology research and experiment on ball-activated sleeve for open hole staged fracturing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5): 52-56.
- [5] 马兰荣,王德国,韩峰,等. 遇水膨胀封隔器关键技术研究[J]. 石油钻探技术,2014, 42(4):27-31.
Ma Lanrong, Wang Deguo, Han Feng, et al. Research on key technology of water-swellaable packer[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(4): 27-31.
- [6] 詹鸿运,刘志斌,程智远,等. 水平井分段压裂裸眼封隔器的研究与应用[J]. 石油钻采工艺,2011, 33(1):123-125.
Zhan Hongyun, Liu Zhibin, Cheng Zhiyuan, et al. Research on open hole packer of staged fracturing technique in horizontal wells and its application[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(1): 123-125.
- [7] 朱和明,魏辽,张亚洲,等. 插管封隔悬挂器在镇泾油田分段压裂中的应用[J]. 石油机械,2013, 41(6):81-84.
Zhu Heming, Wei Liao, Zhang Yazhou, et al. Application of bayonet-tube packer hanger in staged fracture[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(6): 81-84.
- [8] 朱正喜,李永革. 水平井裸眼完井分段压裂技术研究[J]. 石油矿场机械,2011, 40(11):44-47.
Zhu Zhengxi, Li Yongge. Study of multistage fracturing of horizontal bare hole wells[J]. Oil Field Equipment, 2011, 40(11): 44-47.

[编辑 刘文臣]