



DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2022.02.07.02

文章编号: 1674-5086(2022)03-0224-11

中图分类号: TE348

文献标志码: A

带开关功能的无限级滑套研制及应用

胡丹*, 胡顺渠, 陈晨, 侯治民, 周怡君

中国石化西南油气分公司石油工程技术研究院, 四川 德阳 618000

摘要: 致密砂岩气藏储层岩石致密, 自然产能低, 水平井无限级压裂是高效开发的必要手段。常用的投球滑套分段级数受限、管柱缩径, 难以实施储层评价、井筒维护等措施作业, 泵送桥塞工艺虽可实现无限级分段, 但施工不连续、作业成本高; 同时, 上述压裂装置均存在功能单一, 无法满足生产控水等需求。根据气藏开发对工具“无限级、全通径、可开关、工序联作”的功能需求, 创新全通径无限级滑套设计方法、提出环状凸齿与凹槽唯一配对的无限级实现方式, 设计出具有复合弹片-多功能球笼的开启组件以及带选位槽和内藏胶筒的滑套本体, 形成了全通径无限级可开关的滑套结构。工具系统已在川西中浅层致密砂岩气藏近 200 口推广应用, 与国内外同类技术相比, 作业效率可提高 50%; 成功在 DS103-2 等井实施选择性开关作业, 为致密砂岩气藏高效开发提供了全新的工具系统。

关键词: 滑套; 无限级; 可开关; 评价测试; 现场试验

Development and Application of Non-limited Sliding Sleeve with Switch Function

HU Dan*, HU Shunqu, CHEN Chen, HOU Zhimin, ZHOU Yijun

Petroleum Engineering Technology Institute of Southwest Petroleum Branch, SINOPEC, Deyang, Sichuan 618000, China

Abstract: Tight sandstone gas reservoirs is characterized by tightly rocks and low natural productivity. Infinite staged fracturing technology for horizontal wells is the necessary means of high efficient development for this gas reservoirs. It is difficult to implement measures such as reservoir evaluation and wellbore maintenance due to the limited segmented stages of ball throwing sliding sleeve and pipe string shrinkage, although the plug and perforation can achieve infinite stages, but the construction is not continuous, operating costs are high. Meanwhile, those fracturing tools have single function, which cannot meet the needs of water control of production wells. According to the function requirement of “non-limited, full-bore, switchable, combined operation” gas reservoir, the theory of full-bore non-limited design is innovated, the open assembly with compound shrapnel-multi-function ball cage structure and the sliding sleeve body with position selection slot and inner rubber cylinder are designed, and the full-diameter sliding sleeve structure with infinite stage is formed. The tool system has been used to nearly 200 wells in tight sandstone gas reservoirs in Western Sichuan Basin. Compared with the same technology at home and abroad, the operating efficiency can be improved by 50%, the selective switch operation is successfully carried out in production wells such as Well DS103-2. It provides a new tool system for efficient development of tight sandstone gas reservoirs.

Keywords: sliding sleeve; unconstrained stages; switchable; evaluation test; field test

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1718.TE.20220530.1434.008.html>

胡丹, 胡顺渠, 陈晨, 等. 带开关功能的无限级滑套研制及应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2022, 44(3): 224-234.

HU Dan, HU Shunqu, CHEN Chen, et al. Development and Application of Non-limited Sliding Sleeve with Switch Function[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2022, 44(3): 224-234.

* 收稿日期: 2022-02-07 网络出版时间: 2022-05-31

通信作者: 胡丹, E-mail: hudan.xnyq@sinopec.com

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05021-005-006HZ)

引言

天然气作为优质燃料和清洁化石能源,在中国能源结构优化调整中发挥着重要作用^[1]。中国致密砂岩气资源丰富,地质资源量为 $22.88 \times 10^{12} \text{ m}^3$,技术可采资源量为 $11.26 \times 10^{12} \text{ m}^3$,2020年,全国致密砂岩气产量 $474 \times 10^8 \text{ m}^3$,占天然气总产量的25%,是接替、支撑天然气规模上产的重要力量。但致密砂岩气藏储集层致密、物性差、非均质性强、自然产能低、稳产难度大、经济效率差^[2-6],一方面,需要通过多级分段压裂,对储层细分切割,提高储集层的渗透性和流体的流动性,提升气井单井产能;另一方面,该类气井生产过程中通常伴随着地层水产出,气水同产时对气井产能抑制明显,严重时将导致过早水淹而停产,影响气井长期稳产及气藏最终采收率,在多个产层段中准确判断出水点并实施有效定点关闭作业对于气井稳产意义重大。

基于致密砂岩气藏地质情况及开发需求,水平井无限级分段压裂工艺是致密砂岩气藏有效开发的必要手段^[7-10],同时,为提高气井的采收率,需在采气过程对气井多层段实施有效的堵水控水。常用的压裂工具为投球滑套,分段压裂管柱内通径逐级变小,气体流动阻力大,分段能力有限^[11-16],且生产过程中井下工具难以下入,无法开展生产测井等储层评价及井筒维护作业;而泵送桥塞虽然能实现无限级分段,但施工不连续、作业周期长、成本高。上述分段压裂装置均功能单一,分段压裂、完井投产、生产控水各环节均需要采取不同的工具装置分步实施,而不同功能装置的配合应用,协调匹配性较差,工序流程复杂、作业周期增加,可靠性也难以得到有效保障。

为满足致密砂岩气藏开发对压裂工艺及工具“分段不受限、管柱全通径、单段可开关、作业全连续”的需求,西南油气分公司自主研发了一种全新的带开关功能的无限级压裂工具系统。工具在压裂施工前随管柱一趟下入井中,提前预置;压裂施工过程中投入开启工具开启匹配的滑套,可在不动管柱条件下实现无限级分段压裂且连续施工;压裂施工后,管柱自动实现全通径,为连油解堵、冲砂、钻磨、监测等措施维护作业提供井筒空间。工具具备重复开关功能,对于生产井出水层段可定点关闭,保障气井平稳生产,实现油气井全生命周期内产气通道的灵活控制;工具同时满足高温、高压、大排量、大砂量等恶劣工况下可

靠作业需要,助力致密气藏高效开发。

1 工具设计

1.1 无限级方式设计

1.1.1 无限级结构设计

压裂滑套的无限级分段可通过机械式分级或电动控制^[17],机械式分级方式设计相对于电子式、泵送桥塞等分级方式可不动管柱、可靠性高,但常规投球滑套采用球与球座匹配,通过球与球座尺寸变化来实现,由于球体球形特征,只能通过变化球直径这个单变量来区分各级滑套,在给定径向空间、给定球座级差的条件下,能实现的级数有限。采用投同一尺寸飞镖或球与变化型球座这种匹配方式理论上可实现无限级,但对工具系统要求高、存在工具失效不能有效作业甚至丢失产层的风险。为实现无限级分段、同时降低工具失效风险,应降低各级滑套依次开启的相互制约性。

基于不动管柱施工及现有滑套工具分级方式优缺点分析,提出了通过环形凹槽与凸齿啮合实现匹配(图1)、改变凹槽与凸齿群参数以实现无限级匹配的方法。该方法可在保持工具内径不变的前提下通过轴向位置、宽度、深度及在圆周上角度等参数变化实现多种匹配(图2),结构简单、可靠性较高。

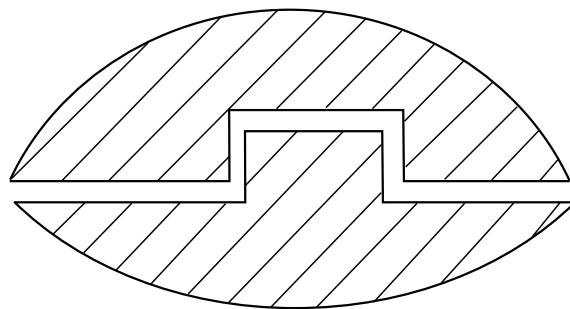
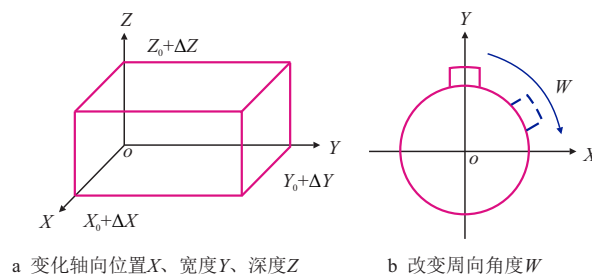


图1 滑套工具凹槽和凸齿设计模型

Fig. 1 Schematic diagram of design model for groove and convex tooth of sliding sleeve tool



a 变化轴向位置X、宽度Y、深度Z

b 改变周向角度W

图2 无限级设计模型

Fig. 2 Non-limited design model

1.1.2 无限级结构参数优化模型构建

为实现各级滑套有效开启,确保每级滑套的凹槽与凸齿一一对应,同时避免各级滑套凹槽与凸齿间互相混淆、干扰,考虑齿和槽的力学强度与稳定性,确定关键编码参数的约束条件,建立无限级结构参数优化模型。

$$\begin{cases} a \leq x_n \leq L \\ a \leq x_n + \Delta x_n \leq L \\ a \leq x_n + 2\Delta x_n \leq L \\ \vdots \\ a \leq x_n + N_n \Delta x_n \leq L \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} b \leq y_{n-1} \\ b \leq y_{n-1} + \Delta y_{n-1} \\ b \leq y_{n-1} + 2\Delta y_{n-1} \\ \vdots \\ b \leq y_{n-1} + M_{n-1} \Delta y_{n-1} \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n (x_i + l_i \Delta x_i) + \sum_{i=1}^{n-1} (y_i + m_i \Delta y_i) \leq L \quad (3)$$

式中:

a —最小齿长, mm;

x_n —第 n 个齿齿长, mm;

Δx_n —第 n 个齿齿长调整的变化量, mm;

N_n —第 n 个齿齿长调整变化量的倍数;

b —齿与齿之间的最小间距, mm;

y_{n-1} —第 n 个齿与 $n-1$ 齿之间的齿间距, mm;

Δy_{n-1} —第 n 个齿与 $n-1$ 齿齿间距调整的变化量, mm;

M_{n-1} —齿间距调整变化量的倍数;

x_i —第 i 个齿长, mm;

y_i —第 i 齿和第 $i+1$ 齿之间的齿间距, mm;

Δx_i —第 i 个齿齿长调整的变化量, mm;

l_i —齿长变化量的倍数;

Δy_i —第 i 个齿与 $i+1$ 齿齿间距调整的变化量, mm;

m_i —齿间距变化量的倍数;

n —齿的数量, 个;

L —轴向长度, mm。

通过设定最小齿长、最小齿间距,在工程允许的轴向长度范围内,优化组合凹槽与凸齿各特征参数,开展无限级参数组合模拟计算。计算表明,在最小齿长 10 mm、齿长及齿间距的变化量为 10 mm、轴向

长度为 100 mm 内,改变两个参数可实现 36 个序列、120 组参数组合。同时,在其他参数取值相同条件下,参数组合数随轴向长度呈指数递增关系。因此,在给定工程长度范围内可设计出需要的参数组数,实现在受限空间内结构参数组合的无限级。

1.2 可开关结构设计

1.2.1 结构设计

为实现油气井寿命期内对井筒流体的灵活控制,滑套需具备可重复开关功能。可开关功能的实现有液压操作、无线控制及机械式等方式,机械式的实现方式结构相对简单、可靠性高^[18-20]。

考虑滑套工具内通径设计需与管柱一致,创新设计一种“滑套外筒内壁专用环槽+弹性限位件+内筒外壁专用约束槽”的重复开关结构。其核心组件为弹性开关件及其限位机构,通过在滑套工具内筒与外筒间设置弓形弹片、弹性球笼等机构,在滑套外筒的内壁设置限位件专用环槽,内筒外壁设计凹槽,实现对弹性件的轴向和径向的约束限位。同时,通过内筒外壁凹槽的轴向距离设计来确保其约束的有效性。使弹性件在轴向力作用下能产生弹性变形,完成其出槽与进槽动作,实现弹性件在滑套“开位”与“关位”之间的顺利切换(如图 3、图 4 所示)。

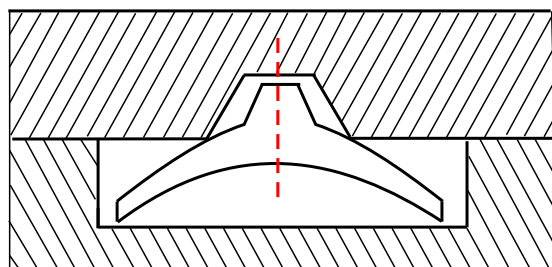


图 3 弓形弹片在卡槽内,滑套关闭

Fig. 3 The bow-shaped shrapnel is in the clip slot and the sliding sleeve is closed

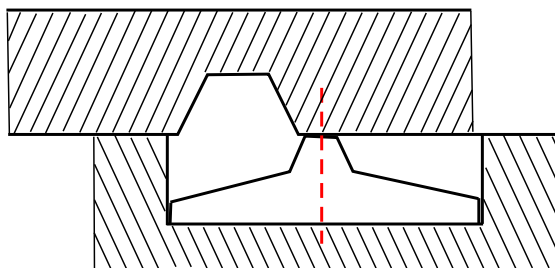


图 4 弓形弹片离开卡槽,滑套开启

Fig. 4 The bow-shaped shrapnel leaves the card slot and the sliding sleeve is opened

1.2.2 弹性失稳分析

基于滑套需要重复多次开关动作,弹性件在进

出限位槽运动过程中,会受到较大的轴向力,若产生塑性变形,将影响弹性件在开关位的可靠转化。选用高强度、高韧性的合金钢为弹性件材质,建立弹性件有限元分析模型,开展弹性件的弹性失稳分析。

图5为弓形弹片的弹性受力有限元模拟分析结果,从图5可以看出,弹片受正向载荷沿内筒轴

向移动过程中,将产生较大应力,弹片顶部局部区域可能发生塑性变形;当弹片再次受到反向载荷,弹片沿内筒轴向移动重新进入外筒卡槽时,若弹片前期发生塑性变形,重新进入外筒卡槽后应力会明显降低,不能完全达到初期状态,结果如图6所示。

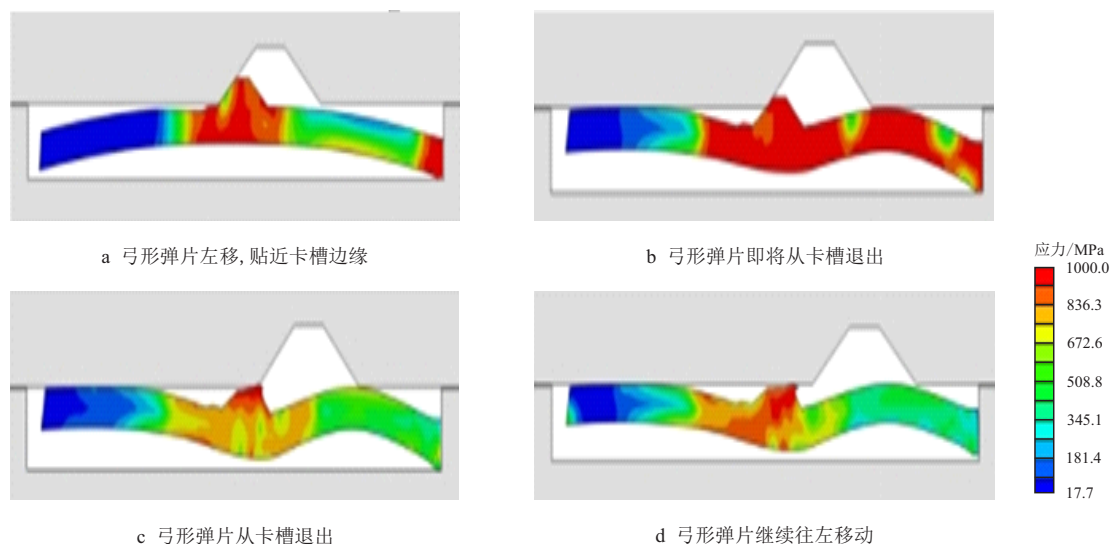


图5 弓形弹片出槽应力云图(向左移动)

Fig. 5 Stress nephogram of bow-shaped shrapnel entering groove (move to the left)

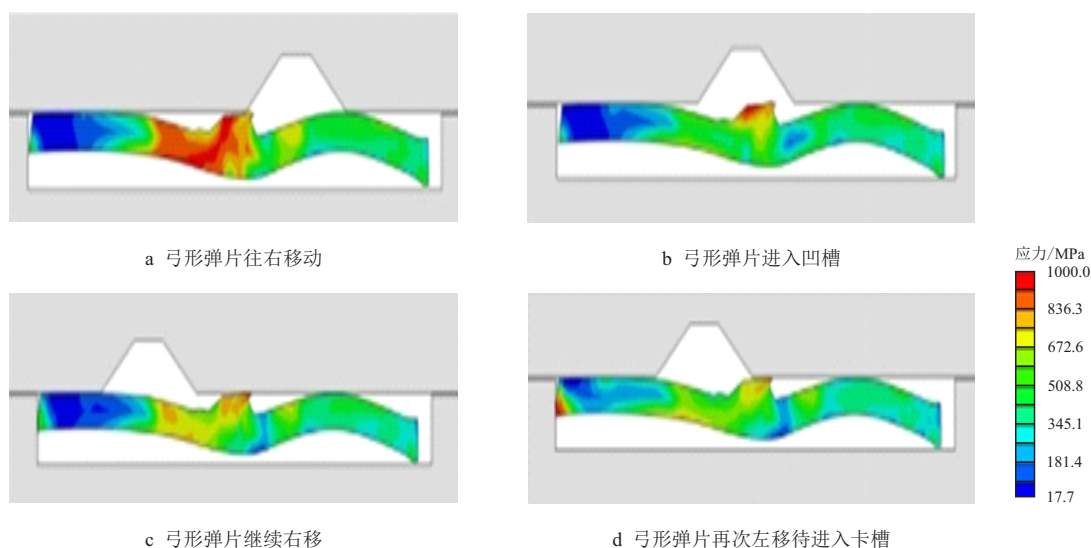


图6 弓形弹片入槽应力云图(向右移动)

Fig. 6 Stress nephogram of bow-shaped shrapnel exit groove (move to the right)

优化弓形弹片为整体球笼式弹性机构,机构由2 mm宽、24组割缝形成8~9 mm宽的弹片组成。开展弹力机构的有限元应力校核及屈曲分析,分析其在特定载荷下的稳定性及结构失稳的临界载荷;开展多项位移计算,校核其在受力运动时,运动姿态及运动

量是否超过设计空间及影响其他组件。

图7为应力校核及屈曲分析结果,可以看出,整体球笼式限位机构工具的屈服应力为设计开关力的2.2倍,在实际作用工况及预设安全系数1.5的情况未出现结构失稳,失稳值远大于设计值;图8为

位移计算校核结果,可以看出,在受额定开关力作用下工件位移在安全范围内。整体球笼式限位机构的开关可靠性高于弓形弹片机构。

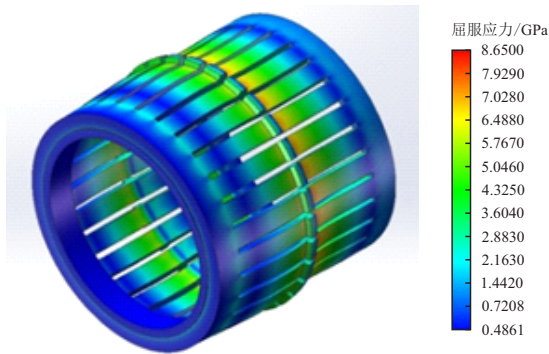


图 7 应力校核及屈服计算
Fig. 7 Stress check and yield calculation

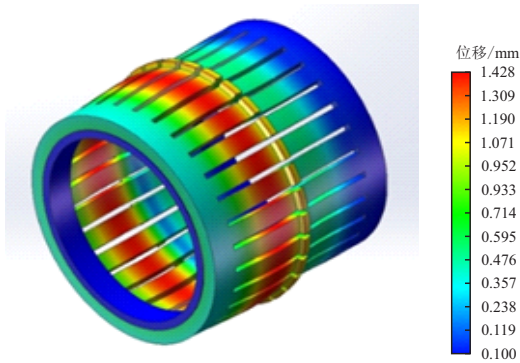


图 8 多项位移计算
Fig. 8 Multi-term displacement calculation

1.3 配套工具设计

为了实现滑套的开关功能,结合可开关滑套的设计思路及结构原理,考虑工具简单、可靠、方便的原则,设计出了一种具有自动定位、防卡解挂等功能的机械式自匹配滑套重复开启工具、关闭工具。

(1) 滑套关闭工具设计

滑套关闭工具由上接头、挡环、丢手销钉、外筒、锁紧头、关闭齿形件、启动销钉及下接头等组成,如图 9 所示。

关闭工具的关闭齿形件上部设置可自由收拢、弹开的弹片,弹片上设置有一个或多个凸齿,关闭工具的外筒下端布置有沿轴向的槽,槽的数量与关闭齿形件弹片数量匹配,关闭齿形件可在槽里滑动。

当需要关闭某一滑套时,通过连续油管带滑套关闭工具下入到预定滑套位置,关闭齿形件弹开并进入滑套内筒凹槽,向下加载启动销钉剪断, C 形棘齿环与关闭齿形件内壁的棘齿啮合,关闭齿形件的弹片沿着外筒轴向槽滑动,锁紧头下部进入关闭齿形件弹片的尾部,上提工具并加载关闭滑套。待滑套关闭后继续加大上提载荷剪断丢手销钉,锁紧头脱离关闭齿形件弹片尾部,关闭齿形件弹片收拢并从滑套内筒脱出,关闭工具提出井筒。

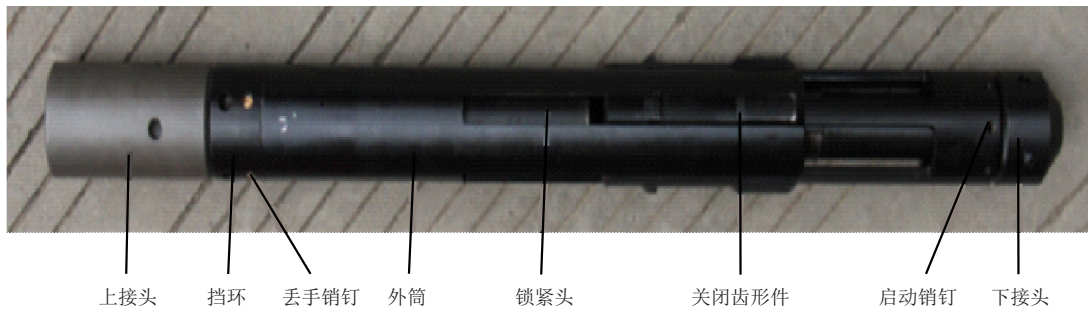


图 9 滑套关闭工具实物图
Fig. 9 Closure tool of sliding sleeve

(2) 滑套重复开启工具结构设计

滑套重复开启工具由上接头、开启齿形件、连接器、销钉及下接头组成,如图 10 所示。

重复开启工具的开启齿形件上部设置有一组可自由收拢、弹开的弹片,弹片上设置有一个或多个凸齿, C 形棘齿环从工具下端与连接器连接,连接器沿轴向设置内外相通的长槽,开启齿形件的弹片

可在长槽里滑动。在油气井压裂后排液或生产过程中,通过连续油管带滑套开启工具下入预定滑套位置,开启齿形件进入配套的滑套凹槽,下震击或下压将滑套开启,然后继续向下加载剪断销钉,连接器带动下接头、 C 形棘齿环、上接头一起相对开启齿形件向下运动,开启齿形件尾部收拢从滑套内筒凹槽中脱出,开启工具提出井筒。

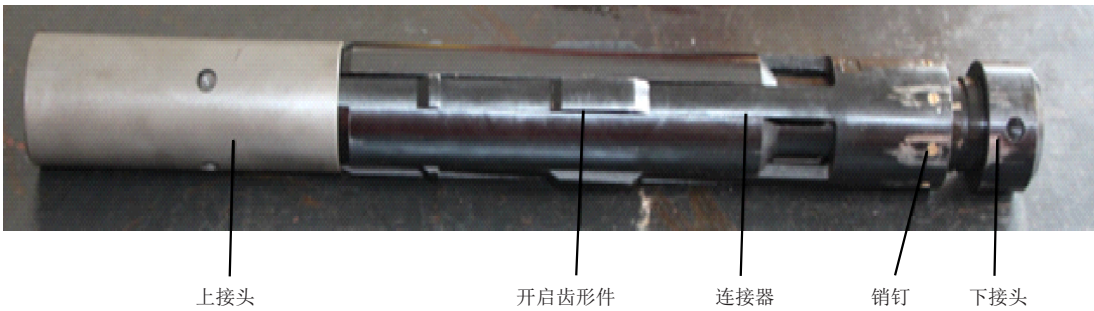


图 10 滑套重复开启工具实物图
Fig. 10 Slide-out repeat-open tool of sliding sleeve

2 工作原理及主要技术参数

2.1 工作原理

无限级滑套随完井管柱一趟下入井筒,滑套下入的数量根据压裂层段决定,滑套下入的位置即为压裂层段中心,滑套的下入顺序按编码顺序决定。

压裂施工时,通过趾端滑套或者连续油管射孔建立管柱与地层通道后进行第一层段压裂施工;第一段压裂施工结束后从井口投入与第二段滑套编码匹配的开启工具,并采用泵送方式将开启工具泵送至目标滑套位置,憋压开启滑套后进行第二层段压裂施工,如此重复完成所有层段压裂施工,压裂施工结束后,开启工具自动溶解,形成全通径采气通道。

在采气过程中,若出现部分层段出水等情况需要关闭滑套,可通过连续油管连接滑套关闭工具并下入到目标滑套位置,滑套关闭工具定位齿与开关锁定环内的槽卡定,通过上提连续油管带动滑套内筒组件整体移动,直到内筒完全密封外筒上的导流孔为止。当滑套需再次打开时,可通过连续油管连接滑套重复开启工具至目标滑套位置,滑套重复开启工具定位齿与开关锁定环内的槽卡定,通过继续下放连续油管带动滑套内筒组件整体移动,直到内筒移动到完全露出外筒上的导流孔为止。

2.2 主要技术参数

无限级滑套已形成 73 型、89 型及 101 型等多型号系列化产品,具体尺寸参数见表 1,可满足不同气藏不同完井方式(裸眼井、套管井)、不同井型(直井、水平井)的完井改造需求。

表 1 无限级滑套系列工具参数
Tab. 1 Parameters of non-limited sliding sleeve tool

规格型号	油管公称尺寸/mm	钢级	外径/mm	内径/mm	长度/mm	压力/MPa	温度/℃
73 型	73.0	P110	111	61	1 200	70	120
89 型	88.9	P110	130	75	1 200	70	120
101 型	101.6/114.3	P110	144	87	1 300	70	150

3 工具评测

3.1 强度评测

3.1.1 高温疲劳强度检测

针对全通径无限级压裂工具多级压裂过程中,工具系统会反复经受加压、泄压,存在疲劳损坏的风险,同时考虑井筒温度对强度的影响,开展工具高温疲劳强度检测。

将滑套放入能升温且反复加载、卸载的超高温模拟实验井筒内,如图 11 所示,设定实验装置升温至 120 ℃保持实验期间温度不变,通过气动高压泵

对滑套内腔加压至压裂施工时可能承受最大压差 70 MPa,稳压 1 h(模拟每一级滑套压裂施工时间),观察滑套内腔压力变化(判断滑套是否存在泄漏),然后泄压;泄压后继续对滑套内腔加压至 70 MPa,稳压 1 h,观察滑套内腔压力变化,然后泄压。重复加压、泄压的次数不低于设计的滑套施工级数。

工具系统在 120 ℃下,反复加载 70 MPa、稳压 1 h 后卸载共计 120 次,工具系统无泄漏情况(部分实验记录见图 12),证明工具系统具备在温度 120 ℃下、反复承压 70 MPa 的能力,能满足现场施工要求。

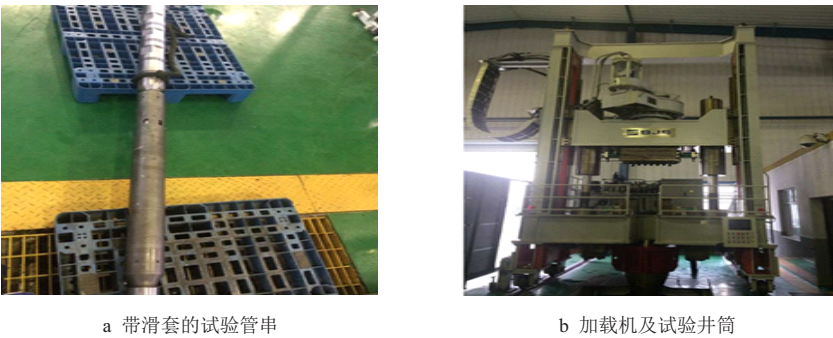


图 11 疲劳强度评测实验装置
Fig. 11 Fatigue strength testing device

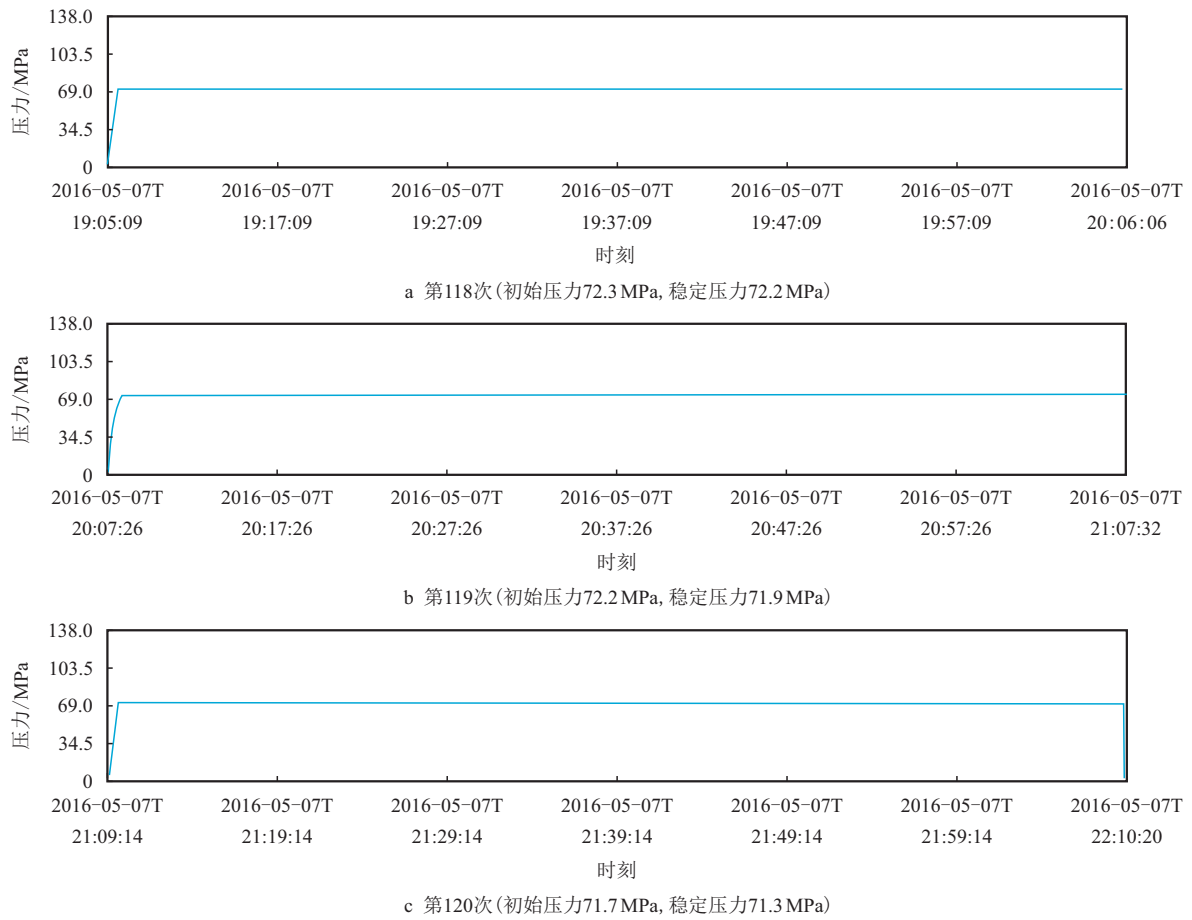


图 12 疲劳强度实验记录曲线
Fig. 12 Fatigue strength test record curve

3.1.2 抗拉强度检测

无限级滑套管柱在压裂施工期间,由于管柱的膨胀效应及封隔器活塞效应,管柱会产生拉伸作用,若滑套抗拉强度存在薄弱点,可能会存在拉断风险,导致管柱短路甚至施工失败,为此开展工具系统抗拉强度检测。

将滑套两端固定在拉力实验台架上,通过拉力实验台架对滑套进行加载,首先,将拉力加载至设

计强度,卸载观察滑套丝扣及本体是否损坏,然后,将拉力加载至设计强度的 1.2 倍,卸载观察滑套丝扣及本体是否损坏,最后,将拉力实验后的滑套进行整体承压 70 MPa 实验,验证滑套抗拉强度是否满足现场施工的需要。

实验表明,工具系统经拉力实验后整体 70 MPa 承压无泄漏,研制的全通径无限级压裂工具抗拉强度满足设计要求。

3.2 开关功能评测

为评价滑套反复开关对设计弹性机构可靠性的影响,开展工具系统开关功能评测。

结合使用工况条件,将滑套装配在专用实验台架上,评价滑套在相对理想实验条件下(常温、无杂质等因素干扰)及恶劣工况条件下(滑动件存在大量压裂砂)的开启、关闭动作的有效性 & 加载力大小。模拟理想工况条件开展两次反复开、关实验(如图 13 所示),模拟井筒有砂条件开展两次实验(如图 14 所示),具体实验数据见表 2。

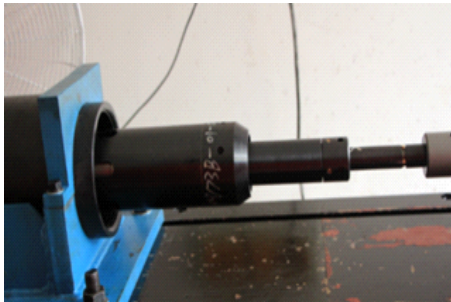


图 13 模拟理想工况的滑套开关实验
Fig. 13 Test of sliding sleeve switch simulating under ideal working condition



图 14 模拟含砂工况下的滑套开关实验
Fig. 14 Test of sliding sleeve switch simulating under working condition with sand

表 2 无限级滑套开关作业实验数据表
Tab. 2 Switch operation test data sheet of non-limited sliding sleeve tool

工况条件	实验方式	实验次数	开启力/ MPa	丢手力/ MPa	关闭力/ MPa
理想工况	开滑套	1	4.0	6.4	
		2	4.1	6.5	
	关滑套	1	2.3	6.5	4.3
		2	2.1	6.8	4.5
有砂工况	开滑套	1	4.9	6.9	
		2	4.6	6.8	
	关滑套	1	2.7	7.2	4.9
		2	2.6	7.1	4.9

实验结果表明,含砂工况下滑套的开启和关闭实验数据相对理想工况略有上涨,但相差不大,不

影响滑套开启和关闭作业。滑套开关弹性件设计合理,抗疲劳性强,在高强度、高频率的开、关上,能保持稳定的弹力及合格的机械性能。

3.3 开启性能评测

为验证无限级滑套的系统可靠性,建立包含地面评价流程、储液系统、泵送系统等无限级滑套地面实验场站,系统评价滑套工作可靠性。将 50 级无限级滑套按编码顺序依次排列连接在地面实验场站的流程管线上,调整泵送系统,设置不同的作业排量。按编码顺序依次泵送开启工具,评价无限级滑套在压裂工况条件下逐一开启可靠性。

经实验验证,带开关功能的无限级滑套在不同的作业排量(0.4~2.0 m³/min)下均依次通过不匹配滑套,顺利开启目标滑套,如图 15 所示,滑套逐一开启可靠性高,具备入井应用的条件。



图 15 无限级滑套地面实验开启瞬间
Fig. 15 Opening moment of non-limited sliding sleeve ground test

4 现场应用

截至 2021 年 12 月,滑套工具系统已在川西中浅层致密砂岩气藏成功应用近 200 井次、2600 余套,压裂分段数增加一倍,实现了储层密切割,压裂施工效率提升 50%,促进气藏的高效开发;开关功能在 DS103-2 井、WX102 井等 10 余口井应用,最多实现了 4 开 3 关,成功关闭水层。

(1) 典型井 1——JS33-45HF 井

JS33-45HF 井为川西中浅层致密砂岩气藏的一口开发水平井,采用 101 型无限级滑套工具系统,顺利完成 26 段分段压裂施工,施工排量最高达 15 m³/min,砂量达 1 852.8 m³,总液量 13 310.6 m³,施工时间为 30.2 h。邻井 JS33-46HF 井采用 114.3 mm 套管+桥塞分段压裂,压裂施工总

液量 9 285.7 m³, 施工时间为 42 h, JS33-45HF 井与 JS33-46HF 井压裂施工效率为 0.004 50 h/m³, 对比表明, 不限级滑套压裂施工效率比桥塞分段提高 50%。

JS33-45HF 井的压裂施工效率为 0.002 27 h/m³,

表 3 JS33-45HF 井与 JS33-46HF 井压裂施工参数对比

Tab. 3 Comparison of fracturing operation parameters between Well JS33-45HF and Well JS33-46HF

井号	完井方式	管柱尺寸/ mm	分段数	总液量/ m ³	加砂强度/ (m ³ ·m ⁻¹)	总砂量/ m ³	施工排量/ (m ³ ·min ⁻¹)	施工时间/ h
JS33-45HF	一体化建井	101.6	26 段	13 310.6	2.2	1 852.8	12.0~15.0	30.2
JS33-46HF	套管射孔	114.3	8 段 46 簇	9 285.7	2.2	1 380.0	15.5~18.0	42.0

(2) 典型井 2——DS103-2 井

DS103-2 井为川西中浅层致密砂岩气藏的一口开发井, 为验证滑套系统的重复开关可靠性, 在该井进行现场重复多次开关验证试验。可开关滑套作为压裂滑套设置于第 2 段(Jp₂³: 1 046~1 049 m),

如图 16 所示。滑套之上未设置顶封, 可通过油套连通情况判断滑套是否开关。

不限级滑套在 DS103-2 井顺利完成 4 开 3 关, 具体开关压力变化见表 4, 验证了不限级滑套开关功能在现场应用中的可靠性。

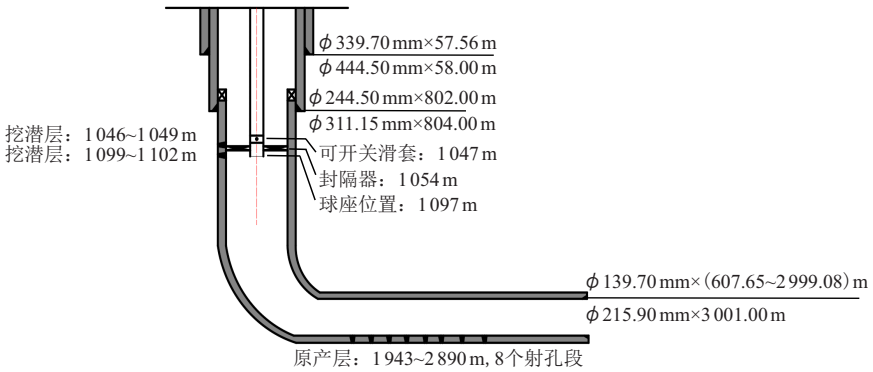


图 16 DS103-2 井管柱示意图

Fig. 16 Schematic diagram of string for Well DS103-2

表 4 DS103-2 井滑套开关油、套压力参数变化情况

Tab. 4 Variation of pressure parameters of sliding sleeve tubing and casing in Well DS103-2

开次	油压/MPa	套压/MPa	备注
一开	8.1 ↓ 5.2	5.3 ↓ 3.4	泄套压
一关	5.2 ↑ 5.8	5.6 ↓ 0.2	泄套压
二开	4.0 ↓ 2.0	0.2 ↑ 1.0	
二关	2.0 ↓ 0	1.0 ↑ 5.8	泄油压
三开	0 ↑ 5.4	5.8 ↓ 5.2	
三关	5.0 ↓ 1.0	5.2 ↓ 5.0	泄油压
四开	1.0 ↑ 1.8	4.8 ↓ 3.8	

复可开关系统及配套工具, 保证了不限级压裂工具具备可重复选择开关功能, 实现对油气井全生命周期内产气通道的灵活控制。

(3) 经地面试验验证, 研制的不限级压裂工具开关功能可靠、开启可靠性高, 抗高温疲劳能力强, 整体承压满足 70 MPa 工况需求。

(4) 不限级压裂工具系统已在川西中浅层致密砂岩气藏成功规模应用, 实现了 4 开 3 关作业, 成功关闭生产井水层, 助力致密砂岩气藏高效开发。

5 结 论

- (1) 创新提出了以凹槽和凸齿啮合为匹配原理、以轴向及周向等多参数组合变化为编码方法的无限级设计方法, 确保滑套开启工具与滑套匹配的一一对应, 实现受限空间内滑套工具无限级。
- (2) 发明“弹力限位元件+机械识别选位槽”重

参考文献

[1] 汪红, 范旭强. 加大我国天然气勘探开发力度的挑战与对策[J]. 中国石化, 2021(10): 29-34. doi: 10.3969/j.issn.1005-457X.2021.10.009

WANG Hong, FAN Xuqiang. Challenges and countermeasures for strengthening natural gas exploration and development in China[J]. China Petroleum and Chemical In-

- dustry, 2021(10): 29–34. doi: 10.3969/j.issn.1005-457X.-2021.10.009
- [2] 孙龙德, 邹才能, 贾爱林, 等. 中国致密油气发展特征与方向[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6): 1015–1026. doi: 10.11698/PED.2019.06.01
- SUN Longde, ZOU Caineng, JIA Ailin, et al. Development characteristics and orientation of tight oil and gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1015–1026. doi: 10.11698/PED.2019.06.01
- [3] 胡顺渠, 戚斌, 侯治民, 等. 全通径无级滑套研制及应用[J]. 钻采工艺, 2018, 41(4): 73–76. doi: 10.3969/J.-ISSN.1006-768X.2018.04.23
- HU Shunqu, QI Bin, HOU Zhimin, et al. Development of full bore infinite sliding sleeve and application[J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(4): 73–76. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2018.04.23
- [4] 陈建军, 翁定为. 中石油非常规储层水平井压裂技术进步[J]. 天然气工业, 2017, 37(9): 79–84. doi: 10.3787/j.-issn.1000-0976.2017.09.010
- CHEN Jianjun, WENG Dingwei. CNPC's progress in horizontal well fracturing technologies for unconventional reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(9): 79–84. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2017.09.010
- [5] 余淑明, 刘艳侠, 武力超, 等. 低渗透气藏水平井开发技术难点及攻关建议——以鄂尔多斯盆地为例[J]. 天然气工业, 2013, 33(1): 54–60. doi: 10.3787/j.issn.-10000976.2013.01.008
- YU Shuming, LIU Yanxia, WU Lichao, et al. Technical difficulties and proposed countermeasures in drilling horizontal wells in low-permeability reservoirs: A case study from the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(1): 54–60. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2013.01.008
- [6] 段永明, 张岩, 刘成川, 等. 川西致密砂岩气藏开发实践与认识[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(7): 1352–1359. doi: 10.11764/j.issn.1672-1926.2016.07.1352
- DUAN Yongming, ZHANG Yan, LIU Chengchuan, et al. Practice and understanding of tight sand gas reservoir development in western Sichuan, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(7): 1352–1359. doi: 10.11764/j.issn.-1672-1926.2016.07.1352
- [7] 屈静, 刘斌. 水平井全通径分段压裂工艺的研究和应用[J]. 天然气与石油, 2014, 32(5): 61–63. doi: 10.-3969/j.issn.1006-5539.2014.05.016
- QU Jing, LIU Bin. Research and application of horizontal well full bore segregated fracturing technology[J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32(5): 61–63. doi: 10.3969/j.issn.1006-5539.2014.05.016
- [8] 丁庆新, 侯世红, 杜鑫芳, 等. 国内水平井压裂技术研究进展[J]. 石油机械, 2016, 44(12): 78–82. doi: 10.-16082/j.cnki.issn.1001-4578.2016.12.017
- DING Qingxin, HOU Shihong, DU Xinfang, et al. Advance of horizontal well fracturing technology in China[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(12): 78–82. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2016.12.017
- [9] 王永辉, 卢拥军, 李永平, 等. 非常规储层压裂改造技术进步及应用[J]. 石油学报, 2012, 33(S1): 149–158.
- WANG Yonghui, LU Yongjun, LI Yongping, et al. Progress and application of hydraulic fracturing technology in unconventional reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S1): 149–158.
- [10] 张永飞, 闫钰琦, 李璐. 水平井压裂工艺技术现状及展望[J]. 化学设计通讯, 2020, 46(6): 278–279. doi: 10.3969/j.issn.1003-6490.2020.06.177
- ZHANG Yongfei, YAN Yuqi, LI Lu. Status and prospect of horizontal well fracturing technology[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2020, 46(6): 278–279. doi: 10.3969/j.issn.1003-6490.2020.06.177
- [11] 兰乘宇, 刘巨保, 杨明, 等. 单槽式全通径不动管柱多级压裂技术及其应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 88–96. doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2021.03.010
- LAN Chengyu, LIU Jubao, YANG Ming, et al. Research and application of multistage fracturing technology using an immobile string in full wellbore with falcon grooves[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(3): 88–96. doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2021.03.010
- [12] 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[J]. 石油工业技术监督, 2021, 37(3): 48–51. doi: 10.3969/j.issn.1004-1346.2021.03.013
- 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. doi: 10.3969/j.issn.1004-1346.2021.03.013
- [13] 刘涛, 侯治民, 胡顺渠, 等. 水平井用无限级压裂滑套研制及应用[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(9): 75–77. doi: 10.3969/j.issn.1001-3482.2016.09.017
- LIU Tao, HOU Zhimin, HU Shunqu, et al. Development and application of unlimited-stages fracturing sliding sleeve on horizontal well[J]. Oil Field Equipment, 2016,

- 45(9): 75–77. doi: 10.3969/j.issn.1001-3482.2016.09.017
- [14] 张道鹏, 谢明, 李斌, 等. 无限级套管滑套分段压裂工具研制与应用[J]. 钻采工艺, 2020, 43(4): 82–84, 88. doi: 10.3969/J.ISSN.1006768X.2020.04.23
- ZHANG Daopeng, XIE Ming, LI Bin, et al. Development and application of stage fracturing tool for casing sliding sleeve of infinite stage[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(4): 82–84, 88. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2020.04.23
- [15] 刘巨保, 黄茜, 杨明, 等. 水平井分段压裂工具技术现状与展望[J]. 石油机械, 2021, 49(2): 110–119. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2021.02.017
- LIU Jubao, HUANG Xi, YANG Ming, et al. Current status and prospects of horizontal well staged fracturing tools and technologies[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(2): 110–119. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2021.02.-017
- [16] 关皓纶, 王兆会, 刘斌辉. 分段压裂固井滑套的研制现状及展望[J]. 石油机械, 2021, 49(11): 84–92. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2021.11.013
- GUAN Haolun, WANG Zhaohui, LIU Binhui. The technical states of cementing sliding sleeve for staged fracturing[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(11): 84–92. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2021.11.013
- [17] 谷磊. 智能完井关键技术进展及应用[J]. 海洋工程装备与技术, 2020, 7(3): 152–156. doi: 10.12087/oect.2095-7297.2020.03.03
- GU Lei. Progress and application on key technology of intelligent completion[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2020, 7(3): 152–156. doi: 10.-12087/oect.2095-7297.2020.03.03
- [18] 陈智, 丛强, 胡强法, 等. 一种弓形弹簧的设计与应用[J]. 石油机械, 2010, 38(8): 71–73.
- CHEN Zhi, CONG Qiang, HU Qiangfa, et al. Design and application of a bow spring[J]. China Petroleum Machinery, 2010, 38(8): 71–73.
- [19] 罗懿, 周勤. 水平井分段压裂可开关滑套的研制及应用[J]. 特种油气藏, 2013, 20(4): 131–133. doi: 10.-3969/j.issn.1006-6535.2013.04.033
- LUO Yi, ZHOU Qin. Development and application of switchable sliding sleeve for staged fracturing in horizontal wells[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(4): 131–133. doi: 10.3969/j.issn.1006-6535.2013.04.033

- [20] 赵博. 连续油管开关套管滑套压裂工艺的应用探讨[J]. 云南化工, 2021, 48(5): 85–87. doi: 10.3969/j.-issn.1004-275X.2021.05.30

ZHAO Bo. Discussion on application of sliding sleeve fracturing technology of coiled tubing switch casing[J]. Yunnan Chemical Technology, 2021, 48(5): 85–87. doi: 10.3969/j.issn.1004-275X.2021.05.30

作者简介



胡丹, 1981 年生, 女, 回族, 四川南溪人, 高级工程师, 硕士, 主要从事井下工具设计研发方面的工作。E-mail: hudan.xnyq@sinopec.com



胡顺渠, 1977 年生, 女, 汉族, 四川渠县人, 研究员, 硕士, 主要从事井下工具设计研发工作。E-mail: hushunqu.xnyq@sinopec.com



陈晨, 1988 年生, 男, 汉族, 四川洪雅人, 助理工程师, 主要从事井下工具设计研发工作。E-mail: chenchen2.xnyq@sinopec.com



侯治民, 1973 年生, 男, 汉族, 四川阆中人, 副研究员, 硕士, 主要从事井下工具设计研发工作。E-mail: houzhimin.xnyq@sinopec.com



周怡君, 1985 年生, 女, 汉族, 四川巴中人, 高级工程师, 主要从事井下工具设计研发工作。E-mail: zhouyijun.xnyq@sinopec.com

编辑: 牛静静

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>