

# 福山油田绳结暂堵转向压裂工艺

张智勇<sup>1</sup>, 邓校国<sup>2</sup>, 付杰<sup>2</sup>, 杜建洪<sup>2</sup>, 李凯<sup>1</sup>, 张大年<sup>1</sup>

1. 北京斯迪莱铂油气技术有限公司 北京 102600

2. 中国石油南方石油勘探开发有限责任公司 海南海口 570216

通讯作者: Email: zhiyongzhang@stimlab.com.cn

引用: 张智勇, 邓校国, 付杰, 等. 福山油田绳结暂堵转向压裂工艺[J]. 油气井测试, 2024, 33(2): 44-50.

Cite: ZHANG Zhiyong, DENG Xiaoguo, FU Jie, et al. Rope-knotting temporary plugging and diverting fracturing technique in Fushan oilfield[J]. 2024, 33(2): 44-50.

**摘要** 海南福山油田储层主要特点薄互层发育, 油层厚度小, 隔层泥质含量高, 使用可溶球和颗粒暂堵剂实现层间暂堵转向, 存在暂堵压力响应不明显, 颗粒暂堵剂堵塞压裂泵车柱塞阀的问题。通过对暂堵材料、暂堵工艺的改进, 使用新型绳结暂堵球, 取代了以往的可溶球和颗粒暂堵剂; 同时在室内开展了薄互层射孔优化、携砂液对孔眼冲蚀规律分析、绳结暂堵球直径大小和数量与射孔孔眼的匹配研究, 形成了适应福山油田储层特征的绳结暂堵转向压裂工艺。经福山油田应用 17 口井 27 层, 暂堵转向有效率 82%, 单井平均日增油 4.28 t/d, 取得较好增产效果。该工艺进一步提高了薄互层压裂改造效率, 具有良好的推广应用价值。

**关键词** 福山油田; 薄互层; 压裂; 暂堵转向; 暂堵剂; 绳结暂堵球; 封堵性能; 优化设计**中图分类号**: TE357 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.02.008

## Rope-knotting temporary plugging and diverting fracturing technique in Fushan oilfield

ZHANG Zhiyong<sup>1</sup>, DENG Xiaoguo<sup>2</sup>, FU Jie<sup>2</sup>, DU Jianhong<sup>2</sup>, LI Kai<sup>1</sup>, ZHANG Danian<sup>1</sup>

1. Beijing Stimlab Oil and Gas Technology Co., Ltd., Beijing 102600, China

2. China Southern Petroleum Exploration and Development Co., Ltd., Haikou Hainan 570216, China

**Abstract:** The main characteristics of the reservoirs in Hainan Fushan Oilfield include the development of thin interlayers, small oil layer thickness, and high mud content in the interlayers. Temporary plugging and diverting between layers can be achieved by using soluble balls and granular temporary plugging agents. However, issues such as unclear response to plugging pressure and blockage of fracturing pump truck plunger valves by granular temporary plugging agents were encountered. Through improvements in plugging materials and techniques, a new type of rope-knotting temporary plugging ball was selected to replace the traditional soluble balls and granular temporary plugging agents. Additionally, indoor research, such as optimization of perforation in thin interlayers, analysis of erosion patterns of perforations by sand-carrying fluids, the matching of rope-knotting temporary plugging ball diameter and quantity with perforation holes, were performed, forming a rope-knotting temporary plugging and diverting fracturing technique adapted to the reservoir characteristics of the Fushan Oilfield. The technique was applied to 27 layers in 17 wells in Fushan Oilfield, achieving an effective diverting rate of 82% and an average daily oil production increase of 4.28 t/d per well, demonstrating significant production enhancement. This technique further improves the efficiency of fracturing in thin interlayers and holds considerable significance for widespread application.

**Keywords:** Fushan oilfield; thin interlayers; fracturing; temporary plugging and diverting; temporary plugging agent; rope-knotting temporary plugging ball; sealing performance; optimization design

福山油田为复杂断块凝析油气藏, 主要含油气层为下第三系流沙港组和涠洲组碎屑岩储层, 主要岩性为岩屑砂岩和不等粒砂岩, 粒径变化大, 岩石含粗砂、中砂、细砂、粉砂等。储层以中孔低渗、低孔低渗透为主, 储层物性垂向差异较大, 且孔渗匹

配性较差, 部分储层致密, 储层孔隙度 8.9% ~ 13.6%, 渗透率 0.03 ~ 9.4 mD, 有效储层平均孔隙度 10.3%, 平均渗透率 1.1 mD<sup>[1]</sup>。储层在纵向上表现出砂泥岩薄互层的特点, 油气层层厚 0.7 ~ 5.8 m, 平均层厚 1.7 m, 且油气层纵向上跨度大、连续性差、

非均质性强<sup>[2-3]</sup>。

福山油田自1999年开始实施压裂提产增效,针对薄互层压裂在2021年之前主要采取的是前置液投球分层压裂工艺,以及复合颗粒暂堵剂暂堵转向压裂工艺,鄢雪梅等<sup>[4]</sup>针对海南福山复杂断块储层压裂,提出“前置液投球分层+变排量控缝高”组合压裂工艺技术,提高了压裂施工成功率和有效率。魏凯等<sup>[5]</sup>针对海南流沙港组致密砂岩体积压裂,提出了层间暂堵转向工艺,通过使用可膨胀颗粒暂堵剂封堵炮眼和近井裂缝,颗粒暂堵剂见水后不断膨胀,表面溶解增黏,起到封堵作用。在暂堵剂有效承压的基础上提高施工净压力从而压开新的裂缝,达到段内裂缝分流转向的目的,实现不同物性、不同地应力储层的均匀改造。吴国涛等<sup>[6]</sup>针对提高暂堵转向有效性问题,提出复合暂堵技术,介绍了三种不同尺寸大小的颗粒暂堵剂及其性能参数,提出了针对不同暂堵工艺类型的复合暂堵方式,并通过实验给出了不同尺寸暂堵剂的最优使用比例,最后选择东北某油田一口井进行暂堵转向压裂加以验证。王玉霞<sup>[7]</sup>针对炮眼暂堵转向压裂改造效果逐年变差的问题,采用复合暂堵转向压裂技术,探索了提高转向压裂效果的有效手段。金智荣等<sup>[8]</sup>针对暂堵转向压裂工艺中暂堵剂类型多,转向效果差异大等问题,在暂堵剂封堵机理分析基础上,利用自主设计的动态暂堵评价装置,测定多种暂堵剂封堵承压能力,优化暂堵剂类型及其组合,认为使用复合颗粒或颗粒/纤维组合,相比于单一颗粒能够得到更高的封堵承压能力。郭建春等<sup>[9]</sup>采用可视化水力裂缝内暂堵实验装置,开展了不同携带液排量、黏度条件下,不同粒径、不同浓度的暂堵颗粒在水力裂缝中的封堵实验,分析了暂堵颗粒在水力裂缝中的封堵行为特征与封堵层的形成条件。

在现场实际应用过程中由于储层条件的差异、封堵材料性能的差异、暂堵转向工艺设计的差异,都会影响暂堵转向的有效性,并经常出现暂堵压力响应不明显,颗粒暂堵剂影响压裂泵车泵校,甚至堵塞压裂泵车柱塞阀的问题,祝道平等<sup>[10]</sup>针对福山油田压裂施工井的砂堵情况分析,得出储集层泥质含量高,暂堵转向有效性差,近井筒地带易形成多裂缝,以及压裂目的层与上下隔层地应力差值小、缝高失控是导致福山油田复杂断块油气藏砂堵的主要原因。金智荣等<sup>[11]</sup>针对因井筒条件或隔层封

挡能力达不到机械分层压裂要求的薄互层油藏,提出用暂堵转向分层压裂工艺来实现非均质油层逐层充分改造的难度,包括进行暂堵转向压裂施工排量选择时,要考虑暂堵球不仅能坐落射孔炮眼,还要保证暂堵球在施工过程中不脱落。压裂油层越厚,保证暂堵球有效封堵射孔炮眼所需排量越高,有效封堵的难度也越大。葛婧楠等<sup>[12]</sup>针对暂堵压裂工艺适用性分析及效果评价,认为暂堵分段工艺存在分段不明确、改造不彻底等缺点。段内暂堵转向工艺封堵裂缝系统存在一定的不可控性。刘彝等<sup>[13]</sup>针对暂堵转向压裂中暂堵不明显,有效性低的问题,优化暂堵材料,引入有机硅单体,胶束聚合了一种强变形凝胶,通过剪切、造粒、烘干和粉碎后得到不同粒径强变形可膨胀缝口(缝内)暂堵剂,并通过缩合反应,粉末型缝内暂堵剂在高温下自动固化成滤饼,提高缝内暂堵的可行性。综合以往暂堵转向方面的研究成果,以往的投球暂堵转向、复合暂堵转向等工艺在现场实施过程中,还存在封堵有效性较低、暂堵起压不明显、可控性较差的问题,同时对孔眼磨蚀对封堵的影响考虑较少,因此为了进一步提高层间暂堵转向效果,探索开展了新型绳结暂堵转向压裂工艺研究,在暂堵剂材料和结构、封堵有效性、封堵可控性、考虑孔眼磨蚀等方面得到进一步改善,并在现场进行了试验应用。

## 1 绳结暂堵转向作用机理

使用新型绳结暂堵球,取代以往的可溶球和颗粒暂堵剂,即采用高强度、柔性可降解纤维材料编织成包含结状、散状尾翼的内核,在外围包裹一层可溶解材料做成球状,现场应用时通过旁通、投球器等特定设备,随流体泵入井筒,泵入过程中,外包裹材料破裂溶解,暴露出绳结内核,并随流体进入射孔通道,通过绳结结状结构和散状尾翼的共同作用,封堵孔眼,进而实现暂堵分流的作用。施工结束后,绳结在要求的规定的时间内降解,射孔孔眼流通通道恢复。

## 2 绳结暂堵球特点

绳结暂堵球的内核主要是高强度、柔性、可降解纤维材料,通过打结等方式编织成主体为结扣、末端为散状的“绳结”状,长度5~10 cm,绳结大小可以根据射孔孔眼大小调节,常用的有15 mm、18 mm、20 mm、22 mm、25 mm。

绳结暂堵球的外壳主要是可溶材料石蜡,用于包裹住绳结,做成球状,注入过程中可迅速破裂、溶解从而释放绳结内核,便于泵送,具体实物见图1。

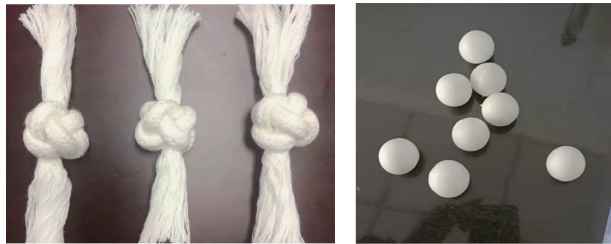


图1 绳结暂堵球内核及外壳

Fig. 1 The core and shell of the rope knot temporary plugging ball

绳结暂堵球主要优点是自适应高效暂堵,封堵可靠率高,封堵承压大,用量少,使用简单,低温可全降解,无污染。

(1)“流苏状”两翼结构能够实现绳结在井筒内悬浮旋转运动,更容易封堵不同相位角的射孔孔眼。

(2)绳结结构对射孔孔眼具有更好的附着力,可嵌入不同形状孔眼,尤其是支撑剂磨蚀后的不规则孔眼,且越压越实,解决了常规可溶球封堵不严和易脱落的难题。

(3)根据射孔孔眼数量、孔眼磨蚀大小,可以优化设计绳结暂堵球的数量和大小,实现精准封堵,提高封堵可靠率。

### 3 绳结暂堵转向压裂工艺

一个成功的暂堵转向压裂施工,除了需要性能优良的暂堵剂产品以外,科学合理的暂堵转向工艺设计也是至关重要的。

#### 3.1 薄互层射孔参数设计

薄互层压裂的重点就是要实现纵向各小层的均衡扩展和延伸,通过减少单簇射孔数的限流压裂,有利于提高各簇改造均匀性、降低各簇进液量的差异性,但容易产生较高的孔眼摩阻和地面施工压力。综合考虑福山油田主力油气层层间应力差异(2.1~4.4 MPa),为了确保所有射孔簇都能进液扩展,有效孔眼摩阻一般要求大于5 MPa,根据孔眼数与摩阻关系图版(见图2),为保证较好的限流效果,每段射孔孔眼数36~48孔,因此针对射孔层厚度 $\geq 3$  m的井,优化射孔孔密12孔/m,相位角 $60^\circ$ ;针对射孔层厚度 $< 3$  m的井,优化射孔孔密16孔/m,相位角 $60^\circ$ 。

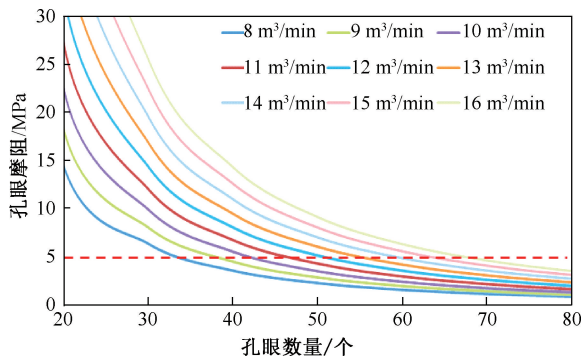


图2 孔眼数与孔眼摩阻关系图版(139.7 mm 套管、孔径10 mm)

Fig. 2 Diagram of the relationship between the number of holes and the friction resistance of holes (139.7 mm casing, 10 mm diameter)

#### 3.2 绳结暂堵球用量设计

根据测井资料对压裂目标层进行地应力剖面分析,结合目标层内各射孔簇油层物性及地应力差异预测各簇压裂开启顺序,并根据各簇射孔孔眼数量进行绳结暂堵球用量优化设计,为保障暂堵转向效果,绳结暂堵球用量一般按照需要封堵的孔眼数量的1.0~1.5倍设计<sup>[14-15]</sup>。

#### 3.3 绳结暂堵球大小设计

通过其它油田现场试验和井下电视监测成果表明,加砂时支撑剂对射孔孔眼有很强的磨蚀作用,会导致孔眼尺寸变大,平均孔径由10.5 mm增大到15.8 mm<sup>[16]</sup>,为了保证绳结暂堵球封堵成功率,通过携砂液对孔眼冲蚀规律分析,以及加砂规模与绳结暂堵球尺寸、孔眼尺寸的匹配研究<sup>[17-18]</sup>,冲蚀孔眼直径大小( $\phi$ ,单位 mm)与加砂浓度( $C$ ,单位  $\text{kg}/\text{m}^3$ )、液体流速( $\mu$ ,单位  $\text{m}/\text{s}$ )、冲蚀时间( $t$ ,单位 s)、套管钢材密度( $\rho$ ,单位  $\text{kg}/\text{m}^3$ )具有一定的经验相关式: $\phi = 5.49 \times 10^{-7} \times C \times \mu^{1.71} \times t/\rho$ ,考虑到福山油田常用的射孔弹为DK34RDX21-2和DP43RDX45-2型,射孔孔眼直径分别是11.7 mm和12.5 mm,按照平均施工排量 $10 \text{ m}^3/\text{min}$ ,平均加砂浓度 $320 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,平均冲蚀时间3 600 s估算冲蚀后的孔眼直径大约18.36~23.02 mm,因此现场实际采用三种尺寸(15 mm、20 mm、25 mm)的复合绳结暂堵球,三种尺寸绳结暂堵球的比例主要根据暂堵前过砂量确定,如果暂堵前过砂量较小(小于 $30 \text{ m}^3$ ),就相应增加小尺寸绳结暂堵球的占比(2:2:1)。如果暂堵前过砂量较大(大于 $30 \text{ m}^3$ ),就相应增加大尺寸绳结暂堵球的占比(1:1:2),现场还可以根据实际的压力响应情况进行绳结暂堵球大小和投放比例的调整。



### 3.4 绳结暂堵球现场投放流程

(1) 施工前在地面高压管线上安装侧翼旁通(见图3),作为绳结暂堵球预置使用。

(2) 待上一级施工结束井筒内支撑剂完全顶替进入地层后,停泵关井,地面管线泄压。

(3) 关闭旋塞阀1、旋塞阀2、旋塞阀3,在旁通处投入相应数量的绳结暂堵球,然后井口打备压,开井口,恢复到施工状态。

(4) 打开旁通侧翼旋塞阀2、旋塞阀3,压裂车启泵,将排量提至 $1\text{ m}^3/\text{min}$ ,待绳结暂堵球进入井筒后,提排量至 $4\sim 5\text{ m}^3/\text{min}$ ,将绳结暂堵球送入井底,观察井口压力响应,待压力平稳后再进行后续的压裂施工。

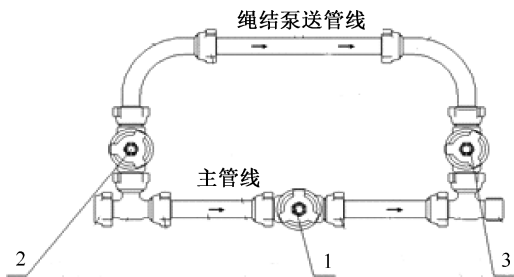


图3 现场施工投放绳结暂堵球的管柱示意图

Fig.3 Schematic Diagram of rope knot temporary plugging ball during on-site construction

### 4 暂堵转向有效性的判断

暂堵转向有效性判断最直观的办法是通过微地震监测、光纤监测等手段,可以直观的看出暂堵前后裂缝开启和延伸情况,但是现场实际出于成本考虑,不能每口井都实施裂缝监测,更多的井还是需要通过井口压力响应来判断<sup>[19]</sup>,即通过暂堵转向压力差、暂堵前后施工压力差判断(见图4)。

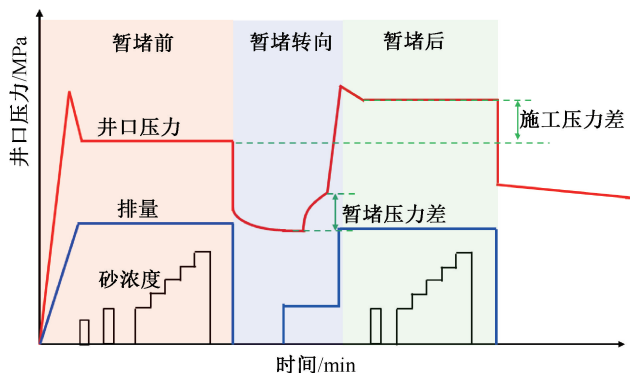


图4 暂堵转向压裂施工曲线示意图

Fig.4 Schematic diagram of temporary plugging diversion to fracturing construction curve

(1) 在井筒中泵送绳结暂堵球过程中,当绳结暂堵球到达射孔孔眼位置时,井口压力会出现明显上升,此处的压力增加是暂堵形成的标志,是实现暂堵转向的必要条件。

(2) 在后一级压裂施工过程中,暂堵转向施工前后两级在同样的施工排量下,施工压力出现提升,暂堵后施工压力高于暂堵前施工压力是暂堵长期有效的典型特征。

因此针对没有实施裂缝监测的压裂井,现场人员可根据暂堵压力响应与暂堵前后施工压力对比两项标准,对暂堵转向有效性进行判断,如果两处压力都得到了显著提升,可以判断暂堵转向有效;如果只有一处压力得到提升,可以判断暂堵转向基本有效;如果两处压力都没有得到有效提升,可以判断暂堵转向基本无效。

### 5 现场应用

福山油田从2021年开始现场试验应用绳结暂堵转向压裂工艺,目前已累计实施17口井27层(见表1),取得较好的暂堵转向效果和增产效果,暂堵转向有效率82%,平均日增油 $4.28\text{ t/d}$ 。

由于H107-93X井压裂时进行了光纤监测,因此以该井作为典型井进行阐述。H107-93X井压裂井段 $3\,335.0\sim 3\,347.7\text{ m}$ ,射孔 $3.5\text{ m}/5\text{ 簇}$ ,射孔孔密 $12\text{ 孔}/\text{m}$ ,相位角 $60^\circ$ ,射孔孔径 $11.7\text{ mm}$ 。压裂累计用液 $535\text{ m}^3$ ,累计加砂 $32.5\text{ m}^3$ ,施工排量 $9.2\sim 9.5\text{ m}^3/\text{min}$ ,施工压力 $28.7\sim 51.2\text{ MPa}$ ,在第一级加砂 $20\text{ m}^3$ 后投入绳结暂堵球32个(15 mm绳结暂堵球13个,20 mm绳结暂堵球13个,25 mm绳结暂堵球6个),从压裂施工曲线(见图5)可以看出,绳结暂堵球到位后,井口施工压力由 $31.95\text{ MPa}$ 升高到 $37.42\text{ MPa}$ ,压力升高 $5.47\text{ MPa}$ ,且暂堵前施工压力也由 $41.23\text{ MPa}$ 升高到 $49.29\text{ MPa}$ ,压力升高 $8.06\text{ MPa}$ ,压力响应明显,证明实现了很好的暂堵转向效果,同时该井压后统计生产180 d,平均日产油 $5.8\text{ t/d}$ ,最高日产油 $11.5\text{ t/d}$ ,累计产油 $1\,044\text{ t}$ ,取得良好的增产效果。

从光纤监测结果也直观的证明了很好的暂堵转向效果(见图6),主要原理是通过DAS分布式声波光纤传感系统来识别不同射孔簇的进液情况。在暂堵前第1、2、5簇加砂进液响应较强,暂堵后第3、4簇进液响应开启,有效实现了簇间转向,相对而言第4簇整体进液响应较弱,第1、2、3、5簇改造效果较好。

表 1 绳结暂堵转向压裂试验井统计表  
Table 1 Statistical table of rope knot temporary plugging diversion to fracturing test well

井号	压裂井段/m	射孔厚度/ 簇数/m	孔眼 数/个	绳结暂 堵球用 量/个	暂堵球到位前后 施工压力/MPa			暂堵前后 施工压力/MPa			暂堵转向 有效性 判断	压后 日增油 t/d
					前	后	压力差	前	后	压力差		
H107-93X	3 396.0~3 417.0	3.9 m/6 簇	47	35	32.77	36.57	3.80	38.78	45.84	7.06	有效	5.80
	3 362.0~3 382.8	5.0 m/6 簇	60	45	29.77	41.76	11.99	40.74	50.56	9.82	有效	
	3 335.0~3 347.7	3.5 m/5 簇	42	32	31.95	37.42	5.47	41.23	49.29	8.06	有效	
H107-96X	3 449.5~3 472.1	4.5 m/8 簇	54	43	35.03	37.01	1.98	36.81	40.05	3.24	基本有效	4.43
	3 425.0~3 441.2	4.0 m/4 簇	48	45	30.35	60.00	29.65	38.19	53.26	15.07	基本有效	
	3 399.3~3 418.1	4.5 m/6 簇	54	43	33.83	38.80	4.97	39.19	45.62	6.43	有效	
	3 379.0~3 393.6	4.5 m/5 簇	54	43	36.83	40.21	3.38	41.21	49.40	8.19	有效	
H107-97X	3 407.2~3 439.0	6.0 m/7 簇	72	48	33.93	37.57	3.64	40.63	45.25	4.62	有效	4.05
H107-103X	3 485.9~3 518.2	4.5 m/5 簇	54	43	40.83	60.00	19.17	41.10	53.26	12.16	基本有效	3.61
	3 460.2~3 478.2	5.5 m/6 簇	66	40	34.32	37.61	3.29	43.19	48.84	5.65	有效	
H107-108X	3 658.8~3 678.9	4.5 m/5 簇	54	36	33.90	37.06	3.16	37.83	48.20	10.37	有效	3.93
H107-112X	3 730.3~3 761.6	4.5 m/6 簇	54	40	29.87	30.81	0.94	37.59	41.80	4.21	基本有效	1.48
H107-64X	3 539.2~3 560.1	5.8 m/9 簇	70	52	31.36	34.95	3.59	35.97	41.42	5.45	有效	5.08
	3 490.0~3 505.0	4.5 m/4 簇	54	54	36.05	39.15	3.10	39.87	47.30	7.43	有效	
H107-94X	3 345.2~3 368.5	5.0 m/6 簇	60	72	35.59	50.41	14.82	40.16	48.75	8.59	有效	4.51
	3 305.5~3 333.3	6.5 m/7 簇	78	56	31.73	36.09	4.36	36.15	40.83	4.68	有效	
H107-102X	3 475.6~3 490.5	5.0 m/5 簇	60	48	39.62	60.00	20.38	/	/	/	无效	1.61
H107-106X	3 631.0~3 655.7	4.0 m/6 簇	48	45	33.78	36.96	3.18	40.73	52.27	11.54	有效	2.91
Y27X	4 635.3~4 668.2	7.0 m/6 簇	84	63	62.6	62.91	0.31	68.64	70.57	1.93	无效	0.50
H30AX	3 442.4m~3 470.4	7.0 m/5 簇	84	108	40.89	60.00	19.11	41.21	56.18	14.97	基本有效	3.80
C17X	2 912.6~2 944.6	6.0 m/5 簇	72	54	27.35	30.56	3.21	31.12	34.66	3.54	有效	7.60
H140X	3 660.8~3 697.6	8.1 m/5 簇	130	96	43.24	47.21	3.97	44.16	48.52	4.36	有效	16.10
H7-11X	4 125.6~4 145.0	5.7 m/4 簇	68	51	49.70	50.50	0.80	54.12	58.42	4.30	无效	1.32
	4 090.5~4 113.5	7.0 m/4 簇	84	63	42.86	44.13	1.27	45.58	48.69	3.11	基本有效	
	4 060.4~4 079.6	7.0 m/4 簇	84	63	46.58	47.03	0.45	50.07	52.67	2.60	无效	
H139X	2 815.0~2 840.0	6.8 m/7 簇	108	85	26.97	30.57	3.60	28.77	33.13	4.36	有效	5.90
HD15X	3 403.6~3 417.2	4.6 m/4 簇	74	37	28.53	29.83	1.30	37.88	40.38	2.5	无效	0.10

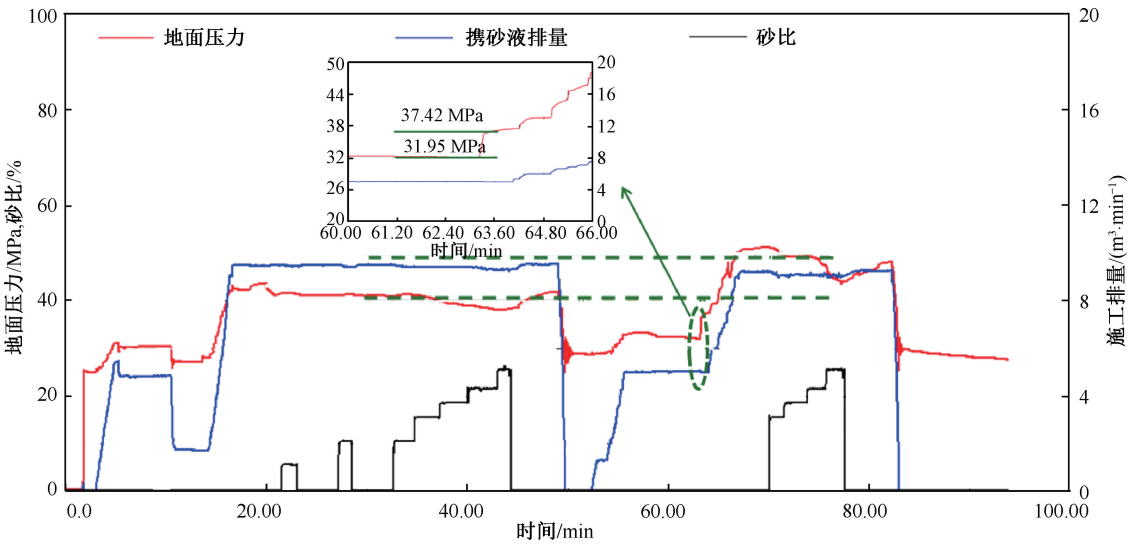


图 5 H107-93X 井压裂施工曲线图  
Fig. 5 Fracturing construction curve of H107-93X well

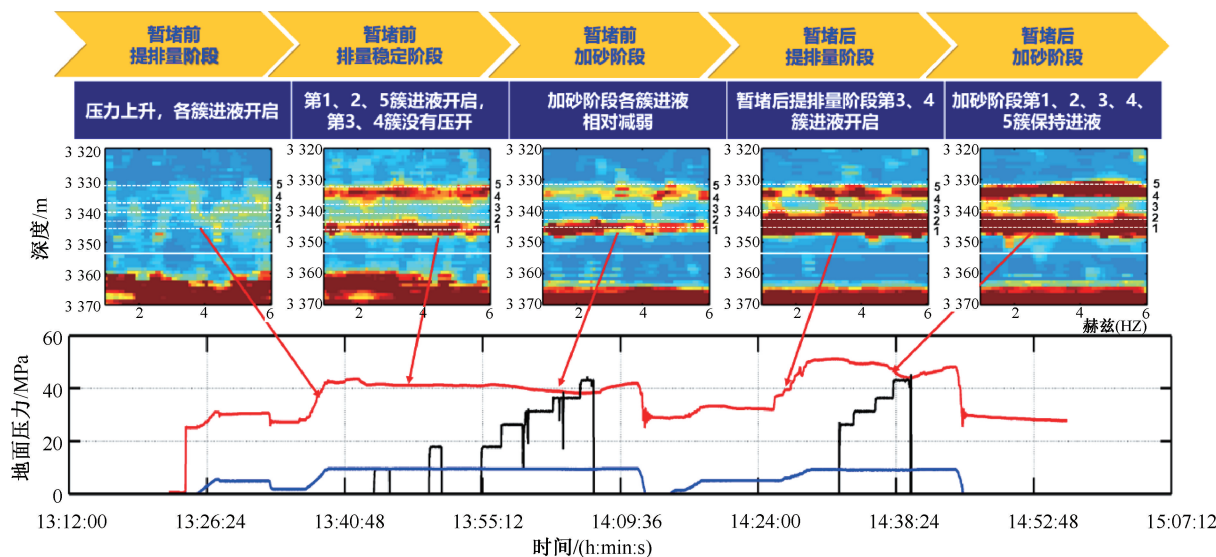


图6 H107-93X井光纤监测结果图

Fig. 6 Optical fiber monitoring results of H107-93X well

## 6 结论

(1) 新型绳结暂堵球具有自适应高效暂堵, 封堵可靠率高, 封堵承压大, 用量少, 使用简单, 低温可全降解, 无污染的优点, 为进一步提高层间暂堵转向效果提供了新的手段, 在暂堵转向压裂中具有很好的推广应用价值。

(2) 现场使用绳结暂堵球进行暂堵转向压裂过程中, 部分井也存在过度封堵, 导致井口施工压力超压, 甚至引发后续施工排量受限, 说明在绳结暂堵球类型优选、绳结暂堵球大小和数量优化、绳结暂堵球投放时机等方面, 还有进一步深化研究的空间。

(3) 暂堵转向有效性判断, 除了直观的微地震监测、光纤监测等手段, 现场根据暂堵压力响应与暂堵前后施工压力对比也是可信度比较高的方法。

**致谢:** 感谢中国石油勘探开发研究院压裂酸化技术服务中心杨战伟、王辽给予的指导和帮助, 也感谢渤海钻探井下作业公司张伟辉对本研究的大力支持。

### 参考文献

[1] 王世磊. 福山凹陷流沙港组低渗储层特征研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2018: 1-89.  
WANG Shilei. Research on characteristics of the low permeability reservoirs of the Liushagang formation in Fushan sag [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018: 1-89.  
[2] 冯丹. 福山凹陷薄互层压裂改造工艺技术研究[D]. 成

都: 西南石油大学, 2016: 1-84.

FENG Dan. Research on fracturing technology for thin interbedded layer in Fushan sag [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016: 1-84.

[3] 周武, 孟元林, 刘思琪, 等. 福山花场地区流一段储层非均质性研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2017, 34(4): 78-83.

ZHOU Wu, MENG Yuanlin, LIU Siqi, et al. Research on reservoir heterogeneity of the first member of Liushagang formation of the Huachang field in the Fushan Sag [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2017, 34(4): 78-83.

[4] 鄢雪梅, 李素珍, 祝道平, 等. 海南福山复杂断块储层压裂技术研究[J]. 油气井测试, 2016, 25(2): 37-40.

YAN Xuemei, LI Suzhen, ZHU Daoping, et al. Fracturing technology research of complicated fault reservoir in Fushan Block of Hainan [J]. Well Testing, 2016, 25(2): 37-40.

[5] 魏凯, 邓校国, 付杰, 等. 海南流沙港组致密砂岩体积压裂工艺研究及应用[J]. 钻探工程, 2022, 49(5): 194-201.

WEI Kai, DENG Xiaoguo, FU Jie, et al. Volume fracturing technology for tight sandstone reservoir stimulation in Liushagang Formation in Hainan [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5): 194-201.

[6] 吴国涛, 薛世杰, 王永贤, 等. 复合暂堵剂暂堵技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(6): 51-56.

WU Guotao, XUE Shijie, WANG Yongxian, et al. Research on temporary plugging technology of composite temporary plugging agent [J]. Well Testing, 2018, 27(6): 51-56.

[7] 王玉霞. 复合暂堵转向压裂工艺在低渗透油田中的应用[J]. 化学工程与装备, 2020, 20(2): 101-103.

WANG Yuxia. Application of compound temporary blocking and turning fracturing technology in low permeability oilfield

- [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2020, 20(2): 101-103.
- [8] 金智荣, 吴林, 何天舒, 等. 转向压裂用复合暂堵剂优选及应用[J]. 钻采工艺, 2019, 42(6): 54-57.
- JIN Zhirong, WU Lin, HE Tianshu, et al. Optimization and application of composite temporary blocking agent for divert fracturing[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(6): 54-57.
- [9] 郭建春, 詹立, 路千里, 等. 暂堵颗粒在水力裂缝中的封堵行为特征[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 409-414.
- GUO Jianchun, ZHAN Li, LU Qianli, et al. Plugging behaviors of temporary plugging particles in hydraulic fractures[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 409-414.
- [10] 祝道平, 王辽, 李素珍, 等. 福山油田复杂断块油气藏压裂砂堵原因分析及对策[J]. 录井工程, 2016, 27(3): 31-35.
- ZHU Daoping, WANG Liao, LI Suzhen, et al. Analysis and countermeasures for fracturing sand plug cause in complex fault block oil-gas reservoirs in Fushan Oilfield[J]. Mud Logging Engineering, 2016, 27(3): 31-35.
- [11] 金智荣, 包敏新, 李升芳, 等. 暂堵转向分层压裂工艺在薄互层油藏中的应用研究[J]. 复杂油气藏, 2019, 12(4): 76-78.
- JIN Zhirong, BAO Minxin, LI Shengfang, et al. Application of temporary plugging and diversion separate layer fracturing in thin interbedded reservoirs[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2019, 12(4): 76-78.
- [12] 葛婧楠, 李然, 舒东楚, 等. 暂堵压裂工艺适用性分析及效果评价[J]. 当代化工, 2020, 49(9): 2028-2032.
- GE Jinnan, LI Ran, SHU Dongchu, et al. Suitability analysis and effect evaluation of temporary plugging fracturing process[J]. Contemporary Chemical Industry, 2020, 49(9): 2028-2032.
- [13] 刘彝, 杨辉, 吴佐浩. 强变形暂堵转向压裂技术研究及应用[J]. 钻井液与完井液, 2022, 39(1): 114-120.
- LIU Yi, YANG Hui, WU Zuohao. Study and application of self-diverting fracturing fluid containing highly deformable temporary plugging agents[J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 2022, 39(1): 114-120.
- [14] 刘宇凡, 王荣, 邹国庆, 等. 层间暂堵转向工程模拟可视化实验研究及应用[J]. 钻采工艺, 2017, 40(5): 66-69.
- LIU Yufan, WANG Rong, ZOU Guoqing, et al. Experiment research on visualized in ter-layer temporary plugging and divering engineering stimulation and its application[J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(5): 66-69.
- [15] 周福建, 袁立山, 刘雄飞, 等. 暂堵转向压裂关键技术与进展[J]. 石油科学通报, 2022, 7(3): 365-381.
- ZHOU Fujian, YUAN Lishan, LIU Xiongfei, et al. Advances and key techniques of temporary plugging and diverting fracturing[J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7(3): 365-381.
- [16] 臧传贞, 姜汉桥, 石善志, 等. 基于射孔成像监测的多簇裂缝均匀起裂程度分析[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 395-402.
- ZANG Chuazhen, JIANG Hanqiao, SHI Shanzhi, et al. Analysis of the uniformity of multi-fracture initiation based on downhole video imaging technology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 395-402.
- [17] 吴宝成, 周福建, 王明星, 等. 绳结式暂堵剂运移及封堵规律实验研究[J]. 钻采工艺, 2022, 45(4): 61-66.
- WU Baocheng, ZHOU Fujian, WANG Mingxing, et al. Experimental study on migration and plugging pattern of knot temporary plugging agent[J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(4): 61-66.
- [18] 张锋. 水平井多簇水力压裂过程射孔孔眼冲蚀预测[D]. 西安: 西安石油大学, 2023: 1-96.
- ZHANG Feng. Prediction of perforation erosion during multicluster hydraulic fracturing in horizontal Wells[D]. Xi'an: Xi'an Petroleum University, 2023: 1-96.
- [19] 林庆祥, 张晓峰, 何剑, 等. 致密油水平井暂堵转向压裂工艺研究与应用[J]. 采油工程, 2022, 20(3): 36-42.
- LIN Qingxiang, ZHANG Xiaofeng, HE Jian, et al. Research and application of temporary plugging and diverting fracturing technology in tight oil horizontal wells[J]. Oil Production Engineering, 2022, 20(3): 36-42.

编辑 方志慧

第一作者简介: 张智勇, 男, 1976年出生, 硕士, 高级工程师, 毕业于长江大学石油工程专业, 现从事压裂酸化工艺技术研究 and 现场技术服务。电话: 18811126776, Email: zhiyongzhang@stimlab.com.cn。通信地址: 北京市大兴区亦庄开发区永昌八号科技广场 8507B, 邮政编码: 102600。