

# 龙凤山气田大通径免钻桥塞分段压裂先导试验

周小林,高志华,张冲

中国石油化工集团公司东北油气分公司石油工程技术研究院 吉林长春 130062

通讯作者:Email:Zhouxl.dbsj@sinopec.com

项目支持:中国石油化工集团公司东北油气分公司项目“龙凤山气田水平井分段压裂技术研究”(2016-LY-09)

引用:周小林,高志华,张冲. 龙凤山气田大通径免钻桥塞分段压裂先导试验[J]. 油气井测试, 2018, 27(1): 62-67.

Cite: ZHOU Xiaolin, GAO Zhihua, ZHANG Chong. Pilot tests of staged fracturing involving large-diameter drill-free bridge plugs in the Longfengshan gas field [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 62-67.

**摘要** 龙凤山气田是以特低孔、特低渗储层为主的构造—岩性气藏,水平井分段压裂改造中采用的可钻桥塞通径小,压裂结束后需将桥塞钻掉,既延长投产周期,又增加施工风险。大通径免钻桥塞配套可溶球的分段压裂技术中,大通径桥塞拥有足够大的流通通道,可溶球在压裂阶段具有可靠的密封性,压裂完较短时间内可形成流道,允许桥塞留在井筒内,不干扰后期放喷或生产。室内开展了可溶性球在不同温度清水、原胶液和返排液中的溶蚀实验,发现可溶球在清水中几乎不溶解,在原胶液或返排液中均可溶解,在95℃返排液中完全溶解需要约90h,完全满足分段压裂时间的需要。在龙凤山气田3口井进行了大通径免钻桥塞射孔联作分段压裂先导试验,压裂注入总液量15 078 m<sup>3</sup>,最高泵注压力66.9 MPa,停泵压力15~34 MPa,平均注入排量7.8 m<sup>3</sup>/min,压后日产气14.16×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,日产油22t,与易钻桥塞工艺相比节约施工时间6d,节省费用43万元。该技术施工后可直接进行放喷投产,充分发挥了压裂投产一体化优势,在致密低渗气藏开采中具有一定的推广价值。

**关键词** 构造—岩性油气藏;大通径免钻桥塞;可溶球;分段压裂;先导试验;龙凤山气田;水平井

中图分类号:TE353

文献标识码:B

DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.01.010

## Pilot tests of staged fracturing involving large-diameter drill-free bridge plugs in the Longfengshan gas field

ZHOU Xiaolin, GAO Zhihua, ZHANG Chong

*Petroleum Engineering Technology Research Institute, Northeast Oil and Gas Company, Changchun, Jilin 130062, China*

**Abstract:** Longfengshan Gas Field is featured by structural-lithologic gas reservoirs, mainly with ultra-low porosity and ultra-low permeability. The diameter of the drill-able bridge plug that is used in horizontal well staged fracturing is so small that the bridge plug must be drilled after the fracturing. This not only lengthens the period before production but also increases the risk during operation. However, the large-diameter drill-free bridge plug used with dissolvable ball can provide an enough flow path while the dissolvable ball can keep the excellent sealing performance during the fracturing and leave a flow path in a short time after fracturing. Then, the bridge plug is left in the wellbore and does not influence the open flow or the production. The dissolution experiment of the dissolvable ball was conducted in fresh water, gel liquid and the fracturing flow-back fluid. It was found that the ball cannot dissolve in fresh water but can do in gel liquid and the fracturing flow-back fluid. The time for the ball entirely to dissolve in fracturing flow-back fluid should cost 90 hours, which can effectively satisfy demands for fracturing operations in horizontal wells during effective acting time. Pilot tests were conducted in three wells in the Longfengshan Gas Field, with total volume of fracturing fluids of 15 078 m<sup>3</sup>, the maximum pumping pressure of 66.9 MPa, pump-off pressure of 15 - 34 MPa and average fluid pumping rate of 7.8 m<sup>3</sup>/min. Productivity was enhanced significantly with the total gas production rate of 14.16×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d and the total oil production rate of 22t/d. Compared with the drill-able bridge plug, this technique can save operational time of 6d and cost of 430 000 RMB. The research results show that the staged fracturing involving large-diameter drill-free bridge plugs can provide suitable solutions for the deeply-buried reservoirs in the Longfengshan Gas Field, where the plug drilling via coiled tubing in long horizontal section is difficult and low in time efficiency. With the advantage of integral fracturing and production, this technique can be promoted more extensively in development of tight low-permeability gas reservoirs.

**Keywords:** Structural lithologic reservoir; large-diameter drill-free bridge plug; dissolvable ball; staged fracturing; pilot test; Longfengshan Gas Field; horizontal well

龙凤山气田位于松辽盆地南部长岭次凹南缘,主力油气层为下白垩统营城组<sup>[1]</sup>,发育南部物源的扇三角洲前缘分流水道砂体,纵向上根据测井旋回特征划分为7个砂组,其中营IV砂组是主力产气层。营IV砂组埋深3 000~3 200 m,具有砂泥薄互层特征,单砂体厚度3~5 m,储层平均孔隙度5.6%,渗透率 $0.26 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,属于低孔、低渗类致密砂岩储层<sup>[2]</sup>。随着气田开发的持续深入,如何提高单井产能和最终采收率一直是制约龙凤山气田上产和稳产的关键因素。针对此类低渗透储层,钟显彪<sup>[3]</sup>提出了采取超前注水达到异常高压油藏,不仅可以提高单井产能,还可以延长油井稳产期及低含水开发期。蒋廷学等<sup>[4]</sup>认为水平井体积压裂技术是有效开发低渗致密油气藏的关键技术,初步建立了水平井体积压裂技术系统,包括井工厂压裂开发多参数协同优化方法、平面射孔技术、裂缝扩展物模及多尺度造缝技术、多尺度裂缝有效充填技术、井下分段压裂工具及低伤害压裂液体系、同步破胶剂压后返排优化技术、体积裂缝诊断及效果综合评估技术等。对于同样具有特低渗特征的页岩气储层,国际石油界普遍认为,水平井钻完井工艺和水平井分段压裂及试气技术的应用是美国页岩气取得成功的主要推动因素<sup>[5-6]</sup>。因此,前期实践证明,应用水平井分段压裂改造是开发此类气藏的有效手段<sup>[7]</sup>。水平井分段压裂改造涉及的多级滑套分段压裂技术<sup>[8]</sup>、泵送桥塞射孔分段压裂技术<sup>[9]</sup>和连续油管底封拖动压裂技术<sup>[10]</sup>等新型的压裂技术得到了较快的发展,投球式滑套<sup>[11]</sup>、可打捞滑套<sup>[12]</sup>、可反复开关滑套<sup>[13]</sup>、液平衡滑套<sup>[14]</sup>、易钻桥塞<sup>[15]</sup>、大通径桥塞和可溶解桥塞<sup>[16]</sup>等一大批压裂工具逐渐在国内各大油气田进行了先导试验和工业化推广。为了增加单井开采产量,气井水平段也在不断加长,目前可钻桥塞水平井分段压裂由于球笼式桥塞通径小,压裂结束后需要将桥塞全部扫掉,后续钻塞作业中将存在一些问题,如杨海波等人<sup>[17]</sup>提出钻塞对分级箍和套管造成磨损或破坏,易形成渗漏,钻塞后内壁留有毛刺,易损坏酸洗皮碗等后期作业工具等难题;又如陈海力等人<sup>[18]</sup>提出在压裂后桥塞钻磨阶段面临着套管变形、钻磨周期长、工程费用高等问题。为了进一步优化后期水平井综合治理,充分发挥压裂投产一体化优势,在龙凤山气田开展了3井次大通径免钻桥塞射孔联作分段压裂先导试验,通过现场适应性分析,该技术有效解决了大排量压裂与井筒畅通的矛盾,

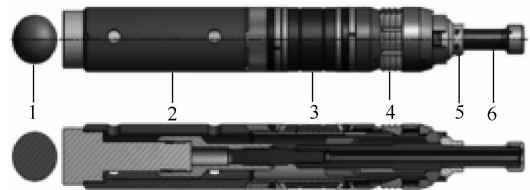
形成了适合于龙凤山气田大通径免钻桥塞及配套压裂技术,压后增产效果显著。

## 1 工艺概况

从工艺原理、工艺特点和工艺流程介绍大通径免钻桥塞分段压裂技术。

### 1.1 工艺原理

大通径免钻桥塞分段压裂技术利用免钻式桥塞与配套可溶球分隔各个目标层,采用分簇射孔分段压裂的方式进行,适用于套管固井完井水平井。大通径桥塞内部安装通芯式应力丢手工具,采用单卡瓦结构(图1),内部拥有足够大的流通通道。可溶球主体采用轻质高强度可溶合金材料,桥塞坐封后,投入可溶球<sup>[19]</sup>。由于其固有暂堵性能够保障在压裂完的较短时间内形成流道,在压裂阶段强度和密封性不会降低,允许桥塞留在井筒内,不干扰后期放喷返排或生产阶段油气的正常产出。



1-可溶球;2-坐封筒;3-胶皮;4-卡瓦;5-剪切销;6-应力杆

图1 大通径桥塞坐封连接示意图

Fig.1 Connecting diagram of the plug of the chase bridge

### 1.2 工艺特点

(1)压裂改造针对性强<sup>[20]</sup>。通过射孔实现定点起裂,裂缝排布位置精确,特别适合大排量、大规模压裂改造。

(2)封隔器可靠性高。通过桥塞实现下层封隔,通过试压可判断出是否存在窜层的可能性。

(3)压后井筒完善程度高。桥塞内通径一般在55~77 mm,桥塞的内通道可满足直接完井投产的要求,特别适用于不易钻除、钻磨难度大的深井、长水平段井,若后续修井作业需要,可采用(连续)油管进行钻除、打捞。

(4)受井眼稳定性影响相对较小。采用套管固井完井,井眼失稳段对桥塞坐封影响较小,优于裸眼封隔器分段压裂工艺。

(5)分层压裂级数不受限制<sup>[21]</sup>。通过逐级泵入桥塞进行封隔,与多级滑套投球技术相比,分级级数

不受限制,理论上可实现无限级分层压裂。

(6)下钻风险小,施工砂堵容易处理。与裸眼封隔相比,管柱下入风险相对较小;施工砂堵发生后,压裂段上部保持全通畅,可直接进行连续油管冲砂作业。

(7)适应性广<sup>[22]</sup>。可应用于 114.3~177.8 mm 各类型套管内坐封,耐温 150 °C,耐压差 70 MPa。

### 1.3 工艺流程

(1)第一段采用油管传输射孔、套管压裂,射孔方式为加压起爆方式。

(2)后续层段将定位仪、射孔枪以及复合桥塞等串联在一起,采用电缆输送方式进行射孔+复合桥塞联作施工,水平段采用泵送方式将射孔枪及桥塞输送到目的层,通过电缆地面点火动作完成桥塞坐封与分簇射孔作业(图2)。



图2 泵送桥塞分段压裂工具示意图

Fig.2 Schematic diagram of segmental fracturing tool for pumping bridge plug

(3)压裂液泵送配套可溶球至桥塞球座处暂时封堵,进行压裂。

(4)如此循环即可对整个水平层段完成分段射孔与压裂。

(5)压裂完成后,可溶球逐渐完全溶解,桥塞内大通道可直接完井投产。

## 2 可溶球溶解实验

为了保证可溶解球在压裂过程中的密封性和压裂后的快速溶解,在室内评价了可溶球的溶解性能。实验采用的可溶解球样品由高强度的电解纳米金属材料(CEM)制成,其溶解速率可以基于盐度和温度测定。

### 2.1 实验设备

本次实验使用的实验设备主要有 DCW 系列卧式低温恒温槽(南京舜马仪器设备有限公司),分析天平(上海赞维衡器有限公司),ADS-X010-

01500 游标卡尺(安帝斯(北京)测控技术有限公司),GDW-50 恒温箱(南京泰斯特试验设备有限公司)。

### 2.2 实验方法

本次实验采取实验前后称重,持续加温等方法,具体如下:

(1)根据实验样品选择合适的烧杯。

(2)实验前,使用干燥剂,确保样品干燥。

(3)溶解时间在 24 h 内,每隔 4 h,进行称重,超过 24 h,每隔 10 h,进行称重。

(4)称重前,将实验样品擦拭干净,去除附着物,放置在烘箱内烘干,烘干温度 60 °C,持续 20 min,然后用干燥剂冷却 30 min,再进行称重。

(5)参数测量,称重后,用游标卡尺对外形尺寸,进行测量,做好记录。

(6)每组实验称重、测量后,记录数据,并计算损失量。

(7)对每组实验进行统计分析。

### 2.3 实验方案

为了验证可溶解球的溶解速率,保证可溶球有效作用时间内能够满足压裂作业要求,选取了 7 只可溶解球样品,分别在不同温度的清水、原胶液和返排液中做了溶解速率试验,旨在模拟压裂球在井下各种工况下的溶蚀情况(表1)。

表1 可溶球溶解实验所用介质

Table 1 Solution medium used for dissolution experiment

序号	所用介质
介质 1	现场清水
介质 2	原胶液,参照工区成熟配方配置,包括基液: 0.45% 速溶胍胶 +0.2% 杀菌剂+0.3% 复合醇醚+0.2% 破乳剂+0.05% 氢氧化钠,交联液,中温交联剂,交联比为 100:0.35,破胶剂: 胶囊 0.01%~0.04%
介质 3	返排液,取自龙凤山气田施工现场

从表1可以看出,可溶球溶解实验所用的介质包含了压裂之前投球时所用的现场清水压井液、压裂过程中的原胶液和压裂后的返排液。用现场清水和原胶液作为溶解介质是为了保证在压裂过程中能够保持较好的密封性,而用返排液作为溶解介质是为了评价压裂完成后可溶球能否逐渐完全溶解。

### 2.4 实验结果

可溶球的溶解实验结果如图3所示。

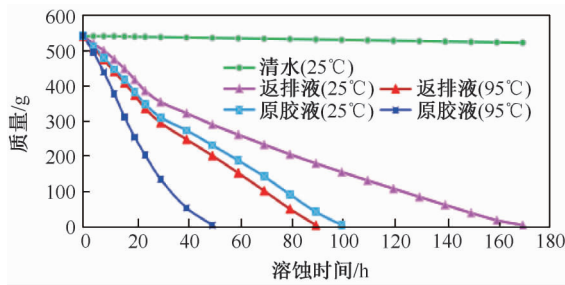


图 3 可溶解球溶蚀实验曲线  
Fig.3 Dissolution test curve of soluble ball

从图 3 可以看出,可溶球溶蚀速度主要受温度、矿化度的影响,在清水中几乎不溶解,在原胶液或返排液中均可溶解,随着温度增高,溶蚀速率逐渐加快,在 95 °C 返排液中完全溶解需要约 90 h,溶解后残余物呈浆糊状,完全可满足目前分段压裂时间的需要。

### 3 现场应用及效果分析

以龙凤山气田 3 口水平井为例,根据气井的基本情况优化施工参数,分析压后增产效果,对比分析 3 口井采用免钻桥塞和常规桥塞时的时效和费用。

#### 3.1 X 井基本情况

X1、X2、X3 三口井部署在松辽盆地长岭断陷北镇正断阶带龙凤山圈闭,是以营城组为主要目的层的开发水平井,水平段在 650~1 000 m,垂深 3 200~3 400 m,完井方式为套管固井完井(139.7 mm 套管固井)。根据该井储层物性条件、岩石力学性质等参数,综合考虑压裂数值模拟及气藏极限渗流半径,X1、X2、X3 井压裂分段级数分别设计为 6 段、7 段、10 段。

#### 3.2 射孔参数

根据 3 口井的不同情况,确定射孔优化原则,优化射孔方式及射孔参数。

##### 3.2.1 射孔优化原则

根据压裂地质方案选点位置,结合纵向上测井解释结果选取射孔段。主要考虑以下几点:岩屑录

井有显示,残余烃体含量高的砂岩储层;裂缝发育,在测井曲线上表示为微球曲线值急剧变小;低自然伽马低泥质含量高孔隙度;剖面上相对低地应力区;根据 X3 井目的层地质设计要求和重点改造层段,最大限度提高纵向上的改造程度,为了保证压裂顺利实施,第 2~10 段采用 89 枪:外径 89 mm,耐压 105 MPa,孔密 20 孔/m,相位 60°螺旋布孔。SDP40HMX25-1 射孔弹:耐温 160 °C/48 h,API 检测孔径 10 mm,穿深 936.7 mm。

##### 3.2.2 射孔方式及射孔参数

X3 井采用每段 1 簇射孔,每簇 2.0 mm,孔径 10 mm。第一段采用油管传输射孔,采用 102 枪 127 弹深穿透,后续压裂段采用电缆泵送桥塞射孔坐封联作方式射孔,射孔参数见表 2。

表 2 X3 水平井射孔参数表

Table 2 X3 horizontal well perforation parameter table

分段序号	射孔簇数	每簇长度 /m	射孔长度 /m	孔密 孔/m	相位角 /(°)	枪型
1	1	2	2	16	60	102
2-10	1	2	2	20	60	89

#### 3.3 大通径桥塞与可溶球优选

根据龙凤山气田水平井开发工艺和模式,结合 X3 井实际井况特点,选择射孔与大通径桥塞联作工艺完成各段的射孔与桥塞封堵作业。

该井完井套管为 139.7 mm,内径 121.3 mm,优选匹配的大通径桥塞与可溶球的相关技术参数如下:适用套管 139.7 mm,桥塞外径 111.3 mm,内通径 69.9 mm,长 560.1 mm,耐压差 70 MPa,工作温度 150 °C,配套可溶球 82.5 mm。

#### 3.4 作业效果

优化形成的大通径免钻桥塞分段压裂技术在龙凤山气田进行了 3 口井先导试验,压裂注入地层总液量 15 078 m<sup>3</sup>,最高泵注压力 66.9 MPa,停泵压力 15~34 MPa,液体平均注入排量 7.8 m<sup>3</sup>/min,3 口井的压后效果见表 3。

表 3 大通径免钻桥塞压裂先导试验结果

Table 3 Pilot test results of fracturing using drill-free large diameter bridge plug

井号	分段数	射孔簇数	簇间距 /m	总液量 /(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	支撑剂量 /m <sup>3</sup>	施工排量 /(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	产气量 /(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	产油量 /(t·d <sup>-1</sup> )	油压 /MPa
X1	6	6	57~266	4 101	354	7.5~8.0	31 215	14.5	16.0
X2	7	7	48~70	4 600	474	7.0~8.4	46 814	6.7	13.8
X3	10	10	67~115	6 378	650	7.0~8.0	63 583	0.8	20.5

从表3中可以看出,压后X1井、X2井和X3井合计日产气 $14.16 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,日产油22 t,增产效果显著。

### 3.5 时效性分析

3口井采用免钻桥塞和常规桥塞时的时效和费用对比分析见表4。从表4可以看出:

(1)3口试验水平井完成了全部23段射孔与压裂作业,坐封大通径桥塞20个,桥塞一次性坐封成功率与射孔发射率均为100%。与常规先射孔再下管柱压裂的方法相比,电缆泵送桥塞射孔联作平均单段用时3.5 h,最短用时2.5 h,大幅提高了作业时效。

(2)与裸眼封隔器分段压裂工艺相比,该工艺直接采用套管压裂,节省了入下预置管柱和入下压裂管柱的时间,同时消除了滑套打不开无法对设计层段进行改造的风险。

(3)与快钻桥塞分段压裂工艺相比,该工艺压裂完成后可直接进行放喷求产,节约单井投资,缩短投产周期,实现水平井的高效经济投产。

表4 免钻桥塞与常规钻塞时效费用对比

Table 4 Comparison of the cost of drill-free bridge plug and conventional drilling plug

分段方式	钻塞用时/d	钻塞服务费/万元	钻塞材料费/万元	工具及劳务费/万元	配合费用/万元	费用合计/万元
易钻桥塞	6	45	8	45	5	103
免钻桥塞	0	0	0	60	0	60
对比	6	45	8	-15	5	43

备注:水平井分6段压裂,采用连续油管钻塞。

现场实践表明,采用大通径桥塞与可溶球技术作为分段封堵工具,其固有的压裂暂堵和免钻特性,可很好的解决目前龙凤山气田埋藏深、长水平段连续油管钻塞困难、时效低等作业难题,安全高效地完成了龙凤山气田大规模压裂改造施工的任务。无论从压裂效果、施工成本,还是作业周期上,该工艺在龙凤山气田水平井具有广阔的应用前景,同时也对其他地区水平井类似致密砂岩储层压裂改造具有借鉴和指导意义。

## 4 结论

(1)大通径免钻桥塞通过投送可溶球,实现了压后无需钻塞,直接放喷投产,大大节约了作业时间和钻塞费用,特别适合大排量、大规模水平井压裂施工,在龙凤山气田水平井得到了规模应用。

(2)可溶球实验揭示压裂球可在有效作用时间内满足水平井压裂作业需求,并在较短时间内形成流道。通过在X井的现场应用试验,表明了该桥塞

的适用性,具有良好的推广应用前景。

(3)针对目前大通径桥塞和可溶球压裂技术,应做好现场应用与评价工作,收集施工中所存在的问题并进行针对性分析,包括地层吸液困难、泵送桥塞中途遇阻等。同时制定防范解决措施,为后期推广应用提供宝贵的经验。

致谢:感谢东北油气分公司石油工程技术研究院提供研究平台;感谢高春华提供的大量室内实验数据和照片。

### 参 考 文 献

- [1] 范婕, 蒋有录, 刘景东, 等. 长岭断陷龙凤山地区断裂与油气运聚的关系[J]. 地球科学, 2017, 42(10): 1817-1829.  
FAN Jie, JIANG Youlu, LIU Jingdong *et al.* Relationship of fault with hydrocarbon migration and accumulation in Longfengshan area, Changling faulted depression[J]. Earth Science, 2017, 42(10): 1817-1829.
- [2] 李瑞磊, 杨勤林, 田建华, 等. 松辽盆地龙凤山气田致密砂岩含气性预测研究[J]. 石油物探, 2017, 56(6): 874-881.  
LI Ruilei, YANG Qinlin, TIAN Jianhua *et al.* Tight sandstone gas prediction in the Longfeng mountain gas field of Songliao basin china [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(6): 874-881.
- [3] 钟显彪. 对低渗透油藏提高单井产能与渗透率表征等技术的新思维[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(6): 86-88.  
ZHONG Xianbao. New thought about technologies of single well production improvement and permeability description [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(6): 86-88.
- [4] 蒋廷学, 王海涛, 卞晓冰, 等. 水平井体积压裂技术研究与应用[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(2): xx-xx. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1195.TE.20180305.1225.002.html>  
JIANG Tingxue, WANG Haitao, BIAN Xiaobing *et al.* Volume fracturing technology for horizontal well and its application [J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(2): xx-xx. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1195.TE.20180305.1225.002.html>
- [5] 曹明. 页岩气压裂试气工程技术进展[J]. 中国矿业, 2017, 26(增刊2): 359-362.  
CAO Ming. The development of fracturing and gas testing technology in shale gas resources [J]. China Mining Magazine, 2017, 26(S2): 359-362.
- [6] 陈勉. 页岩油气高效开发专题·编者按[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47(11): 114600.  
CHEN Mian. Special topic: fundamentals of efficient oil and gas recovery in shale·Editor's note [J]. Sci Sin: Phys Mech Astron, 2017, 47(11): 114600.
- [7] 曲庆利, 关月, 聂上振, 等. 水平井大通径可捞式免钻塞筛管完井技术应用[J]. 石油矿场机械, 2014, 43(12): 55-58.  
QU Qingli, GUAN Yue, NIE Shangzhen *et al.* Large drift

- diameter salvageable and non-drilling plug screen completion technology application in horizontal wells [J]. *Oil Field Equipment*, 2014, 43(12): 55-58.
- [8] 陈建军, 翁定为. 中石油非常规储层水平井压裂技术发展[J]. *天然气工业*, 2017, 37(9): 79-84.  
CHEN Jianjun, WENG Dingwei. CNPC's progress in horizontal well fracturing technologies for unconventional reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(9): 79-84.
- [9] 张永成, 郝海金, 李兵, 等. 煤层气水平井泵送桥塞射孔压裂技术应用研究[J]. *煤炭技术*, 2017, 36(10): 193-195.  
ZHANG Yongcheng, HAO Haijin, LI Bing *et al.* Study on application of pumping bridge plug and clustering perforation in fracturing for coalbed methane horizontal well [J]. *Coal Technology*, 2017, 36(10): 193-195.
- [10] 周鹏遥, 杨向同, 刘会锋, 等. 连续油管带底封喷砂射孔环空分段压裂技术在塔里木和田河气田的应用[J]. *油气井测试*, 2015, 24(5): 49-51.  
ZHOU Pengyao, YANG Xiangtong, LIU Huifeng *et al.* Application of annulus staged fracturing technology with bottom sealed sandblast perforating by the coiled tubing in the Tarim and Tianhe gas field [J]. *Well Testing*, 2015, 24(5): 49-51.
- [11] 李斌, 郑旭, 张作鹏, 等. 裸眼分段压裂投球滑套的密封性研究[J]. *应用力学学报*, 2017, 34(6): 1134-1139.  
LI Bin, ZHENG Xu, ZHANG Zuopeng *et al.* Study on sealing properties of ball-actuated sleeve for open hole staged fracturing [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2017, 34(6): 1134-1139.
- [12] 王迁伟, 何青, 陈付虎, 等. 可打捞滑套分段压裂技术在红河油田的应用[J]. *石油钻采工艺*, 2013, 35(3): 78-79.  
WANG Qianwei, HE Qing, CHEN Fuhu *et al.* Application of separate layer fracturing with salvage sliding sleeve in Honghe oilfield [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2013, 35(3): 78-79.
- [13] 马金良, 平恩顺, 李金凤. 可反复开关投球滑套的研制[J]. *油气井测试*, 2017, 26(3): 49-53.  
MA Jinliang, PING Enshun, LI Jinfeng. Development of the repeatable and switchable dropping sliding sleeve [J]. *Well Testing*, 2017, 26(3): 49-53.
- [14] 韩峰, 王建全, 薛占峰, 等. 致密油气藏水平井全通径压裂技术[J]. *中国海洋平台*, 2017, 32(3): 12-17.  
HAN Feng, WANG Jianquan, XUE Zhanfeng *et al.* Multi-stage full-bore fracturing technology for horizontal well in tight reservoirs [J]. *China Offshore Platform*, 2017, 32(3): 12-17.
- [15] 任勇, 叶登胜, 李剑秋, 等. 易钻桥塞射孔联作技术在水平井分段压裂中的实践[J]. *石油钻采工艺*, 2013, 35(2): 90-93.  
REN Yong, YE Dengsheng, LI Jianqiu *et al.* Application of drillable bridge plug and clustering perforation in staged fracturing for horizontal well [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2013, 35(2): 90-93.
- [16] 魏辽, 马兰荣, 朱敏涛, 等. 大通径桥塞压裂用可溶解球研制及性能评价[J]. *石油钻探技术*, 2016, 44(1): 90-94.  
WEI Liao, MA Lanrong, ZHU Mintao *et al.* Development and performance evaluation of dissolvable balls for large borehole bridge plug fracturing [J]. *Petroleum Drilling Technologies*, 2016, 44(1): 90-94.
- [17] 杨海波, 余金陵, 魏新芳, 等. 水平井免钻桥塞筛管顶部注水泥完井技术[J]. *石油钻采工艺*, 2011, 33(3): 28-31.  
YANG Haibo, YU Jinling, WEI Xinfang *et al.* Research on plug-drilling-free screen top cementing technology for horizontal well completion [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2011, 33(3): 28-31.
- [18] 陈海力, 邓素芬, 王琳, 等. 免钻磨大通径桥塞技术在页岩气水平井分段改造中的应用[J]. *钻采工艺*, 2016, 39(2): 123-125.  
CHEN Haili, DENG Sufen, WANG Lin *et al.* Application of drill-free large borehole bridge plug in staged stimulation for shale gas horizontal well [J]. *Drilling & Production Technology*, 2016, 39(2): 123-125.
- [19] 王海东, 唐凯, 欧跃强, 等. 大通径桥塞与可溶球技术在页岩气X井的应用[J]. *石油矿场机械*, 2016, 45(4): 78-81.  
WANG Haidong, TANG Kai, OU Yueqiang *et al.* Application and technology of big diameter bridge plug and dissolvable ball in X well of shale gas [J]. *Oil Field Equipment*, 2016, 45(4): 78-81.
- [20] 申贝贝, 何青, 张永春, 等. 水平井段内多裂缝压裂技术研究与应用[J]. *天然气勘探与开发*, 2014, 37(1): 64-67.  
SHEN Beibei, HE Qing, ZHANG Yongchun *et al.* Multi-fractures fracturing technology for horizontal well section [J]. *Natural gas exploration & development*, 2014, 37(1): 64-67.
- [21] 姚昌宇, 王迁伟, 高志军, 等. 连续油管带底封分段压裂技术在涇河油田的应用[J]. *石油钻采工艺*, 2014, 36(1): 94-96.  
YAO Changyu, WANG Qianwei, GAO Zhijun *et al.* Application of sectional fracturing technique with coiled tubing and bottom packer in Jinghe Oilfield [J]. *Oil drilling & production technology*, 2014, 36(1): 94-96.
- [22] 刘威, 何青, 张永春, 等. 可钻桥塞水平井分段压裂工艺在致密低渗气田的应用[J]. *断块油气田*, 2014, 21(3): 394-397.  
LIU Wei, HE Qing, ZHANG Yongchun *et al.* Application of drillable bridging plug staged fracturing technology for horizontal well in low permeability and tight gas field [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2014, 21(3): 394-397.

编辑 刘振庆

第一作者简介:周小林,男,1987年出生,工程师,2010年毕业于西安石油大学石油工程专业,现主要从事油气储层改造工作。电话:0431-88531852,18686485654;Email:Zhouxl.db-sj@sinopec.com。地址:吉林省长春市绿园区和平大街660号,邮政编码:130062。