

引用格式:夏海帮,包凯,王睿.页岩气井用新型无限级全通径滑套压裂技术先导试验[J].油气藏评价与开发,2021,11(3):390-394.

XIA Haibang, BAO Kai, WANG Rui. Pilot test of new infinite stage and full-bore sliding sleeve fracturing technology in shale gas wells [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3):390-394.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.03.014

页岩气井用新型无限级全通径滑套压裂技术先导试验

夏海帮,包凯,王睿

(中国石化华东油气分公司,江苏南京 210019)

摘要:水平井分段压裂工艺是页岩气开发的关键技术之一。随着中国页岩气开发向常压领域的不断拓展,压裂工艺的提速提效变得迫切,现有的泵送桥塞射孔联作工艺存在泵送时间长、工具易遇卡、固井投球滑套压裂段数有限、连油拖动封隔器压裂规模受限等各种局限。基于新型无限级全通径滑套压裂技术,阐述了滑套工具的结构原理与工艺技术特点,并在南川页岩气田开展了2井次16段滑套压裂先导试验。试验表明该技术通过预置滑套替代泵送射孔与连续油管钻塞,滑套开启成功率100%,压裂段数无限制且施工过程连续,单段压裂平均耗时3.5 h,完成了单日7段压裂施工,是一种快速、安全、高效的分段压裂技术,为我国页岩气井压裂作业提速提效提供了新的技术手段。

关键词:无限级;全通径滑套;分段压裂;页岩气;先导试验

中图分类号:TE377

文献标识码:A

Pilot test of new infinite stage and full-bore sliding sleeve fracturing technology in shale gas wells

XIA Haibang, BAO Kai, WANG Rui

(Sinopec East China Oil and Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210019, China)

Abstract: Staged fracturing for horizontal wells is one of the key technologies for shale gas development. As the shale gas development in China extends to normal pressure fields, it is urgent to enhance the speed and efficiency of fracturing technology. The existing plug and perf operation technology has many limitations, including long duration of pumping, easiness to stuck tools, limited number of fracturing stages for ball-actuated sliding sleeves, and limited fracturing scale for packers dragged by coiled tubing. For the new infinite stage and full-bore sliding sleeve fracturing technology, the structure principle of the sliding sleeve as well as its technological characteristics are explained, and a pilot test has been carried out in 16 fracturing stages of two wells in Nanchuan Shale Gas Field. This technology replaces perforation and coiled tubing drilling plugs by preset sliding sleeves. All the sliding sleeves are opened successfully. The number of fracturing stages is unlimited and the operation is continuous. The average time of single stage fracturing is 3.5 h and it can finish seven fracturing stages per day. As a fast, safe and efficient staged fracturing technology, it provides a new technical means for enhancing speed and efficiency of fracturing technology for shale gas wells in China.

Key words: infinite stage, full-bore sliding sleeve, staged fracturing, shale gas, pilot test

水平井多级分段压裂工艺是页岩气开发的关键。泵送桥塞射孔联作分段压裂技术、多级滑套封隔器分段压裂技术和水力喷射分段压裂技术作为三大主流技术系列^[1],为页岩储层增大改造效果、规模

化有效动用提供了强有力的技术支撑。目前国内外页岩气主要的分段压裂模式为泵送桥塞射孔联作,以满足其大液量大排量的施工需求。泵送射孔压裂段数无限制,可进行大规模加砂压裂,但施工耗时较

收稿日期:2020-12-18。

第一作者简介:夏海帮(1974—),男,硕士,高级工程师,主要从事非常规天然气勘探开发工作。地址:江苏省南京市建邺区江东中路375号金融城9号楼,邮政编码:210019。E-mail: 112439883@qq.com

基金项目:国家科技重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(2016ZX05061)。

长,地面交叉作业复杂^[2-3]。现场单段泵送射孔时间一般为3~4h,工具遇阻遇卡时易发生电缆断裂、工具落井事故,造成同步压裂、拉链式压裂无法顺利实施,大大影响压裂施工效率^[4-5]。多级滑套封隔器分段压裂技术在水平段固井时随套管下入滑套工具,通过连续油管拖动或投球打开滑套进行每一级压裂。连续油管拖动的无限级压裂滑套虽能实现全通径,但由于受到压裂时井筒内连续油管与封隔工具尺寸的限制,压裂施工排量有限^[6-9]。投球滑套分段压裂由于球座级差的存在使得滑套越向下越缩径,导致压裂级数有限^[10-11]。近年来国外多家公司研制不同类型滑套工具广泛应用于滑套压裂,包括液压式、计数式、无线射频等多种开启方式,然而国内仍处于试验研究阶段^[12-13]。水力喷射分段压裂工艺在作业时井口压力高,施工安全风险大,排量和加砂规模有限^[14-16]。

随着中国页岩气开发向常压领域的不断拓展,压裂工艺提速提效的需求越来越迫切。为了提高页岩气压裂作业效率,保证井筒全通径、无限级压裂,特引进新型无限级全通径滑套,配合页岩气滑套压裂技术,在南川页岩气田开展2井次16段压裂先导试验,滑套打开成功率100%,实现了单日压裂7段、密切割改造的施工效果。

1 新型无限级全通径滑套压裂技术

1.1 技术原理

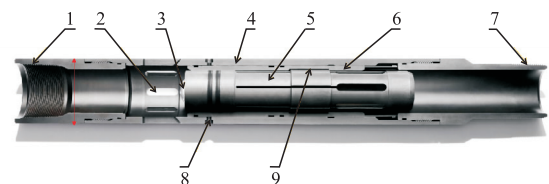
新型无限级全通径滑套分段压裂技术是在常规套管封隔滑套分段压裂完井管柱的基础之上,采用全通径滑套及同一尺寸的可溶性压裂球进行分段压裂。该技术工艺原理与常规套管封隔滑套分段压裂类似^[17-19]:在页岩气井完钻后,下入套管串及连接的滑套本体后固井,使滑套于设计的压裂层位固定。压裂施工时,先对第1段滑套以下的地层采取连续油管射孔或趾端滑套方式进行压裂,并建立起后续滑套压裂中泵送夹筒所需的引流通路。第1段压裂结束后,将与井下滑套相对应的夹筒和可溶球组合投入井筒进行泵送,夹筒到达与其相匹配的内滑套后,打压打开滑套连通套管及地层,进行压裂施工。压裂完成后继续投入下一级夹筒带可溶球进行下一段压裂施工,直至完成全部分段压裂。理论上,单井下入的滑套数量不受限制,可实现无限级

压裂。同时,与常规投球滑套相比,滑套无级差,投入夹筒内径大,近似全通径,经工具打捞后可实现井筒全通径。

1.2 工具结构

新型无限级全通径滑套压裂技术所采用的工具主要包括3个部分:滑套本体、夹筒和可溶球。其中滑套本体由内滑套和外滑套组成,通过内滑套的滑动来开关位于外滑套上的12条压裂孔。初始状态下,外滑套上的压裂孔被内滑套封闭,并依靠销钉固定,滑套处于关闭状态。内滑套内壁上的凹槽与泵入的夹筒外表面上的凸台一一匹配对应,夹筒作为开启滑套的钥匙。可溶球坐封于夹筒的上端面,用以封闭下部已压裂段,其材质为镁铝合金,在高氯返排液环境下能够自行溶解,压裂结束后即可放喷投产^[20]。滑套工具结构见图1。

滑套工具工作原理如图2所示,压裂前按照对应滑套序号投入夹筒带可溶球,泵送至滑套位置,夹筒依靠凹凸型面配合与内滑套实现井下定位。继续打压,内、外滑套之间的固定销钉在压力作用下剪断,可溶球、夹筒与内滑套组合相对于外滑套向下滑动,压裂孔开启完成坐封,滑套打开,井筒成为临时的密闭腔体。滑套成功开启后,继续泵入压裂液,压力瞬时增高,高压流体通过压裂孔击碎滑套外的固井水泥环,并穿透地层,实现套管和地层的连通,达到类似射孔的效果。随后即可实施对应地层的压裂施工。对于下入多段滑套的井,可重复以上滑套打开过程,逐段投入对应滑套夹筒。由于每个夹筒外表面上有3组凸台型面与内滑套凹槽型面进行匹配,只有所有型面全部匹配,夹筒才能在对应滑套落座;当有1组及以上凸台型面不匹配时,夹筒会滑过滑套,继续下滑,直至到达对应匹配滑套位置,实施自下而上的多级压裂。



1.内螺纹;2.压裂孔;3.可溶球;4.外滑套;5.夹筒;6.内滑套;7.外螺纹;
8.剪切销钉;9.夹筒与内滑套配合型面

图1 滑套工具结构

Fig. 1 Sliding sleeve structure

1.3 工具性能参数

滑套及配套工具性能参数如下:

适用套管外径:139.70 mm;适用套管内径:115.02 mm。

滑套外径:165.10 mm;滑套内径:109.52 mm;滑套长度:1.16 m。

夹筒外径:112.78 mm;夹筒内径:97.59 mm。

可溶球直径:101.60 mm。

工作温度:不超过177 ℃。

工作压力:70~100 MPa。

1.4 技术特点

新型无限级全通径滑套分段压裂与常规泵送桥塞射孔分段压裂、投球滑套压裂相比,具有以下技术特点:

1) 滑套与夹筒匹配设计消除投球级差,可以实现无限级压裂,且压裂规模不受限制。

2) 滑套单段单簇作业方式实现水平段密切割精细压裂。

3) 压裂施工连续高效。每段压裂后,投入球和夹筒,打开滑套后即可转到下一段的压裂施工,极大提高压裂施工时效。

4) 压裂改造后即可投产,提高采气效率。投入的可溶球随返排逐步溶解,套管井筒实现大通径低阻力生产,后期可用连续油管带工具捞出夹筒,实现全通径。

5) 滑套打开连通地层方式替代电缆射孔作业,可溶材料无需连续油管钻塞,大大减少地面配套设备,降低施工风险。

2 现场应用情况及分析

2.1 DS-6、DS-2井压裂方案

DS-6、DS-2井是南川页岩气田针对五峰组—龙

夹筒与滑套不匹配,通过滑套



到达匹配滑套,夹筒工具入座,打压滑套开启

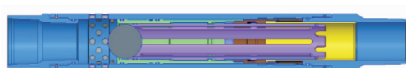


图2 滑套工具工作原理

Fig. 2 Sliding sleeve working principle

马溪组页岩气开发的水平井。DS-6井完钻井深4 800 m,水平段长1 480 m,共进行18段压裂,其中第2、3段采用新型滑套,2个滑套各定位于井深4 751 m和4 513 m处;DS-2井完钻井深5 039 m,水平段长1 816 m,共进行30段压裂,其中第2~15段(井深4 354~4 989 m)采用新型滑套进行单段单簇压裂,段长44~46 m。第16~30段(井深3 151~4 289 m)使用常规泵送桥塞射孔联作工艺,段长64~94 m,3~6簇射孔,簇间距10~30 m。

2.2 压裂施工情况

DS-6井在第1段压裂结束后,进行第2段压裂(即第1个无限级滑套压裂)。立即投入夹筒带可溶球,以小排量泵送工具,耗时25 min夹筒到位坐封,水泥环成功击穿,套管和地层通道连通,压力呈现出典型的滑套打开压力曲线。压裂液持续进入地层,滑套成功打开。之后逐渐提排量至16 m³/min进行压裂施工,地层出现破裂显示,破裂压力75 MPa。本段压裂累计用液2 050.6 m³,最大排量18 m³/min,加砂80 m³,最大砂比12%,施工最高压力80 MPa。该段压裂施工曲线见图3。

现场8.2 h完成DS-6井两段无限级滑套压裂施工,单段滑套压裂自投入夹筒开始至施工结束平均耗时约3.5 h,总体施工过程较为顺利,施工排量14~18 m³/min,实现了大排量、大液量、高砂比的压裂改造。然而在进行第2段压裂时由于前置酸液腐蚀可溶球,泵送液量远超井筒容积而未起压,重新投球使用清水泵送后成功打开滑套开始压裂。

DS-2井第11段压裂结束随即投入夹筒带可溶球,11 min泵送液量51.7 m³,夹筒到位起压94.0 MPa,超压立即停泵,滑套打开,之后排量提至12 m³/min进行压裂,成功完成此段施工压力78.9~80.9 MPa、压

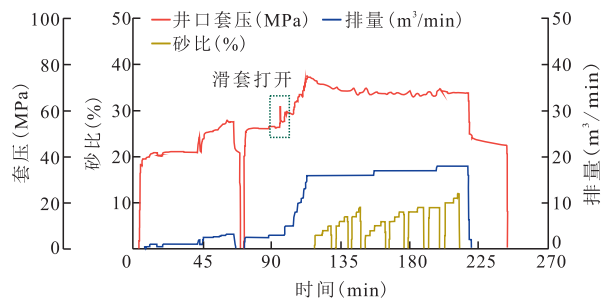


图3 南川页岩气田东胜区块DS-6井第2段压裂施工曲线
Fig. 3 Fracturing curve of 2nd stage of Well-DS-6 in Dongsheng Block of Nanchuan Shale Gas Field

裂液量 1 141.0 m³、加砂 74.8 m³、最大砂比 14 % 的压裂。压裂结束后继续投球进行该井第 13 段压裂。图 4 为该井第 12 段压裂施工曲线。

在 DS-2 井滑套分段压裂施工中, 14 段滑套均成功打开, 顺利完成压裂, 证明了无限级滑套工具的可靠性和适用性。滑套压裂技术替代泵送射孔工艺, 每段平均 20 min 送球, 打开滑套后, 随即进行常规压裂。以 24 h 施工计算, 实现单日 7 段连续压裂施工。

2.3 应用效果分析

DS-6、DS-2 井滑套分段压裂施工中, 16 段滑套打开成功率 100 %。可靠性好, 开启时间短, 作业效率高, 表现出很强的现场适用性。压裂作业连续无间断, 施工过程连贯。同时工艺也完全满足体积压裂所需的大液量、大排量、高砂比等要求, 充分证明了新型无限级全通径滑套压裂工艺技术可以适用于页岩气井的压裂作业。DS-2 井经压裂改造后, 初期试采产气量 11.15×10⁴ m³/d, 超过了同平台其他井的平均产量, 压裂效果显著。

表 1 对比了滑套压裂技术与泵送射孔分段压裂技术的特点。由于滑套压裂技术省略桥塞泵送射孔环节, 同时无需压后钻塞作业, 提高了工作效率, 使得压裂施工时间大大缩短。现场试验表明: 单段滑套压裂自投入夹筒打开滑套至施工结束平均耗时约 3.5 h, 实现单日压裂 7 段, 而且由于地面作业设备的减少, 施工风险与开发成本也大幅降低。

滑套打开方式是通过井筒憋压, 打开瞬间依靠

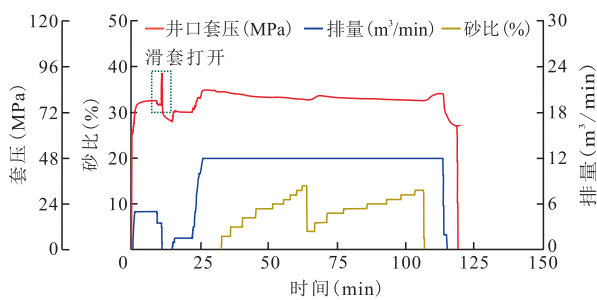


图4 南川页岩气田东胜区块DS-2井第12段压裂施工曲线

Fig. 4 Fracturing curve of 12th stage of Well-DS-2 in Dongsheng Block of Nanchuan Shale Gas Field

高压力击穿水泥环, 因此, 较高的打开压力是滑套压裂技术的主要问题^[21]。DS-2 井先导试验时, 滑套打开压力为 81.0 ~ 100.3 MPa。由于滑套打开压力受地应力、固井质量和开孔方位等因素影响, 无法采取穿透型射孔方式减小页岩破裂压力^[22], 只能通过坐封瞬间快降排量甚至停泵方式防止超压, 因此, 对于地面设备管线性要求更高。此外滑套打开过程需要有合适的送球排量, 排量过小打开工具无法落座, 排量过大夹筒则有一定概率冲过滑套导致该段无法压裂。目前现场送球排量仍处于经验探索阶段。值得注意的是若水平段支撑剂沉降形成砂桥, 也会造成夹筒不易落座影响滑套开启。

3 结论与建议

1) 新型无限级全通径滑套压裂技术工艺简单, 可实现全通径、无限级、密切割、连续压裂, 是一种较为先进的页岩气井分段压裂工艺方法。

2) 滑套压裂技术通过预置滑套替代电缆射孔、可溶材料省略连续油管钻塞, 极大简化压裂施工工序。南川页岩气田 DS-2 井先导试验已实现单日 7 段的压裂施工, 极大提高了压裂效率。

3) 较高的打开压力是滑套压裂技术的主要问题, 建议滑套开启阶段时刻关注送球液量与起压变化, 降低超压风险。此外每段压裂顶替阶段推荐使用胶液段塞顶替, 防止水平段沉砂影响滑套开启。

参考文献

[1] 王永辉, 卢拥军, 李永平, 等. 非常规储层压裂改造技术进展及应用[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.

[2] 周德华, 焦方正, 贾长贵, 等. JY1HF 页岩气水平井大型分段压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 75-80.
ZHOU Dehua, JIAO Fangzheng, JIA Changgui, et al. Large-scale multi-stage hydraulic fracturing technology for shale gas horizontal well JY1HF[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1): 75-80.

[3] 雷林, 张龙胜, 熊炜, 等. 武隆区块常压页岩气水平井分段压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(1): 76-82.

表 1 滑套压裂与泵送射孔分段压裂技术对比

Table 1 Comparison between sliding sleeve fracturing and pumping-perforation staged fracturing

压裂方式	施工时间(h/段)	压裂段簇	地面设备	施工风险	钻塞作业
滑套压裂	3.5	单段单簇	无	夹筒遇阻、超压	无
泵送射孔分段压裂	6 ~ 7	单段多簇	测井车、吊车	泵送遇阻遇卡、工具落井	连续油管钻塞

- LEI Lin, ZHANG Longsheng, XIONG Wei, et al. Multi-stage fracturing technology of normally pressured shale gas in horizontal wells in the Wulong Block[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(1): 76-82.
- [4] PATEL H, CADWALLADER S, WAMPLER J. Zipper fracturing: Taking theory to reality in the Eagle Ford Shale[C]// Paper URTEC-2445923-MS presented at the SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, 1-3 August, 2016, San Antonio, Texas, USA.
- [5] 张骏,宋杰.多级分簇射孔桥塞联作技术在新疆油田应用与异常处理方法[J]. *钻采工艺*, 2016, 39(4): 57-59.
ZHANG Jun, SONG Jie. Application of multi-stage clustered perforation segmented bridge plug and its abnormal treatment methods in Xinjiang Oilfield[J]. *Drilling & Production Technology*, 2016, 39(4): 57-59.
- [6] 赵铭,王伟佳,刘洪彬,等.国外页岩气井连续油管固井滑套压裂完井方式研究[J]. *钻采工艺*, 2017, 40(2): 59-62.
ZHAO Ming, WANG Weijia, LIU Hongbin, et al. Study on well completion by coiled-tubing fracturing and cementing sliding sleeves in shale gas wells[J]. *Drilling & Production Technology*, 2017, 40(2): 59-62.
- [7] 龙明顺.无限级滑套分段压裂技术在涪陵页岩气的应用[J]. *江汉石油科技*, 2019, 29(1): 51-53.
LONG Mingshun. Application of infinite stage sliding sleeve multi-stage fracturing technology in Fuling shale gas field[J]. *Jianghan Petroleum Science and Technology*, 2019, 29(1): 51-53.
- [8] 张光生,王筱,张红丽.无限级套管滑套多层压裂技术研究[J]. *石油化工应用*, 2018, 37(4): 27-31.
ZHANG Guangsheng, WANG Xiao, ZHANG Hongli. Study on the multi-layer fracturing of infinite cascade casing sliding sleeve [J]. *Petrochemical Industry Application*, 2018, 37(4): 27-31.
- [9] LEE P, WENDTE J, GIL I, et al. Coiled tubing frac sleeve application in the Eagle Ford Shale - An optimization of shale completions[C]// Paper URTEC-2445515-MS presented at the SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, 1-3 August, 2016, San Antonio, Texas, USA.
- [10] 裴晓含,魏松波,石白茹,等.投球滑套分段压裂用可分解压裂球[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(6): 738-741.
PEI Xiaohan, WEI Songbo, SHI Bairu, et al. Disintegrating fracturing ball used in ball injection sliding sleeve for staged fracturing[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(6): 738-741.
- [11] 刘秉谦,张遂安,李宗田,等.压裂新技术在非常规油气开发中的应用[J]. *非常规油气*, 2015, 2(2): 78-86.
LIU Bingqian, ZHANG Suian, LI Zongtian, et al. New stimulation technology for unconventional oil & gas development[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2015, 2(2): 78-86.
- [12] CHAUFFE S, PENCE N, HARRIS M. Frac sleeve designed for multi-zone cemented laterals[C]// Paper SPE-174075-MS presented at the SPE Western Regional Meeting, 27-30 April, 2015, Garden Grove, California, USA.
- [13] 刘清友,张安琪,黎伟.射频识别技术在井下工具中的应用与发展[J]. *石油矿场机械*, 2015, 44(11): 61-66.
LIU Qingyou, ZHANG Anqi, LI Wei. Application and development of petroleum downhole tools based on radio frequency identification technology[J]. *Oil Field Equipment*, 2015, 44(11): 61-66.
- [14] 李宪文,赵文轸.水力射孔射流压裂工艺在长庆油田的应用[J]. *石油钻采工艺*, 2008, 30(4): 67-70.
LI Xianwen, ZHAO Wenzhen. Application of hydraulic perforation jet fracturing technology in Changqing Oilfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2008, 30(4): 67-70.
- [15] 唐颖,唐玄,王广源,等.页岩气开发水力压裂技术综述[J]. *地质通报*, 2011, 30(2/3): 393-399.
TANG Ying, TANG Xuan, WANG Guangyuan, et al. Summary of hydraulic fracturing technology in shale gas development[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(2/3): 393-399.
- [16] 曹阳,陈琛,史雪枝,等.川西致密气藏裸眼水平井分段压裂技术[J]. *石油钻探技术*, 2012, 40(3): 13-17.
CAO Yang, CHEN Chen, SHI Xuezi, et al. Multi-stage fracturing techniques for open hole horizontal wells in western Sichuan tight gas reservoirs[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2012, 40(3): 13-17.
- [17] 董云龙,唐世忠,牛艳花,等.水平井套管固井滑套分段压裂完井存在问题及对策[J]. *石油钻采工艺*, 2013, 35(1): 28-30.
DONG Yunlong, TANG Shizhong, NIU Yanhua, et al. Problems and measurements of sliding sleeve staged fracturing completion in casing cementing horizontal wells[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2013, 35(1): 28-30.
- [18] SHAW J. Benefits and application of a surface-controlled sliding sleeve for fracturing operations[C]// Paper SPE-147546-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 October-2 November, 2011, Denver, Colorado, USA.
- [19] RAVENSBERGEN J E. Cased-hole multistage fracturing: A new coiled-tubing-enabled completion[C]// Paper SPE-143250-MS presented at the SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference and Exhibition, 5-6 April, 2011, The Woodlands, Texas, USA.
- [20] 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.
- [21] 杨焕强,王瑞和,周卫东,等.滑套固井压裂起裂压力及影响因素[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(6): 78-84.
YANG Huanqiang, WANG Ruihe, ZHOU Weidong, et al. Fracture initiation pressure and its influencing factors during sliding sleeve fracturing in cemented wells[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, 38(6): 78-84.
- [22] 王海洋,卢义玉,夏彬伟,等.射孔水压裂缝在层状页岩的扩展机制[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(2): 95-101.
WANG Haiyang, LU Yiyu, XIA Binwei, et al. Propagation mechanism of hydraulic fracture of perforation in laminated slate[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2018, 42(2): 95-101.

(编辑 王隽)