

引用格式:王孝刚,史雪枝,朱敏.深层页岩气井压后井筒堵塞解除技术——以WY23-1HF井为例[J].油气藏评价与开发,2021,11(2):230-234.
WANG Xiaogang, SHI Xuezhi, ZHU Min. Plugging removal technology of wellbore after fracturing in deep shale gas wells: A case study of Well-WY23-1HF[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(2): 230-234.
DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.02.013

深层页岩气井压后井筒堵塞解除技术

——以WY23-1HF井为例

王孝刚,史雪枝,朱敏

(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:深层页岩气井大规模体积压裂后,面临井筒堵塞影响长期生产的问题,需借助连油或钻杆进行解堵处理,处理方式较为单一,对于复杂变径井筒、混合堵塞物问题的处理缺乏针对性。以WY23-1HF井为例,该井受邻井压裂影响无法正常生产,地层垮塌,岩屑进入井筒造成了严重堵塞,同时,堵塞段存在轨迹上翘、套管变形等复杂情况。解堵复产措施包括:钻磨管柱、钻磨工序、压井液设计等方面。现场实施情况表明,针对水平井多段压裂,应尽量采用同一类型桥塞减少变径影响,确保轨迹平滑和防止堵塞物堆积,避免井筒条件复杂化,同时,结合该井可溶桥塞与大口径非易钻桥塞混合使用的情况,采用连油带笔尖冲洗+钻杆带钻头(或磨鞋)的管柱组合,进行通磨钻扫相结合成功实现复产,为类似的页岩气井提供借鉴。

关键词:钻磨桥塞;堵塞;解堵;复产;水平井;页岩气

中图分类号:TE37

文献标识码:A

Plugging removal technology of wellbore after fracturing in deep shale gas wells: A case study of Well-WY23-1HF

WANG Xiaogang, SHI Xuezhi, ZHU Min

(Research Institute of Petroleum Engineering, Sinopec Southwest China Oil and Gas Company, Deyang, Sichuan 618000, China)

Abstract: After large-scale volume fracturing of deep shale gas wells, there comes the difficulty of wellbore plugging, which affects long-term production. The common methods to remove the wellbore plugging by coiled tubing and drill pipe are simple. It lacks of the pertinence measures to treat the diameter shaft and the mixed stemming. For example, Well-WY23-1HF can not produce normally due to the fracturing of adjacent well. The formation collapses and the cuttings enter the wellbore, causing serious plugging. The trajectory of its plugging section is of the complex situation of warped, casing deformation and so on. The measures of plugging removal and resuming production are drill-grinding string, drill-grinding process, well killing fluid design, etc. The field application shows that the same type of bridge plug should be used to reduce the impact of tapering, ensure the smooth trajectory, prevent the accumulation of plugging material, and avoid the complication of wellbore conditions for multi-stage fracturing of horizontal wells. At the same time, combined with the comprehensive application of soluble bridge plug and large diameter non-easy-to-drill bridge plug, the combination of pipe string with oil flushing with nibs+drill pipe with bit (or milling shoe) is adopted to remove plug, and the recovery of production is successfully achieved. This technology provides a reference for similar shale gas wells.

Key words: drilling bridge plug, plugging, plugging removal, recovery production, horizontal well, shale gas

页岩气开发实践表明,套变和地层返出物堵塞是影响页岩气压后长期生产的主要原因^[1-4]。为了防

止页岩气井改造丢段,常规做法是优选套管^[5-7],优化钻完改工艺^[8-10],尽量减少套变发生。对于已套变井

收稿日期:2020-11-05。

第一作者简介:王孝刚(1979—),男,硕士,高级工程师,主要从事气井完井测试及井下作业的设计和科研工作。地址:四川省德阳市旌阳区石油工程技术研究院,邮政编码:618000。E-mail: 463848973@qq.com

基金项目:中国石化科技部项目“深层页岩气高效钻完井技术”(P18058-2)。

的井筒处理,郑瑞等^[11]介绍了采用套管整形工具,成功钻磨剩余桥塞的案例,马骏骥^[12]、袁涛^[13]、魏佳等^[14]、胡尊敬^[15]提出了连续油管进行页岩气冲砂、解堵等井筒处理措施。在页岩气水平井井筒清洁等方面,张华礼等^[16]通过研发针对大通径桥塞处理的套磨打捞一体化工具、优化冲洗液等措施进行井筒冲洗与钻磨;杨小城等^[17]和王林等^[18]研发了可降解桥塞;陈海力等^[19]推荐采用免钻大通径桥塞进行分段施工;胡英才等^[20]研制的快钻电缆桥塞,降低了后期施工作业难度。然而,对于页岩气井筒套变、堵塞、多种桥塞并存的复杂井况,单一处理方式难以实现有效解堵,需要探索新的解决思路。通过WY23-1HF井井筒堵塞原因分析及复产技术实践,为类似的页岩气井提供借鉴。

1 WY23-1HF井基本情况

威荣页岩气田是中国石化继焦石坝页岩气田之后发现的又一大型页岩气田。中国石化西南油气分公司于2014年开始川南海相页岩气勘探工作,在威远—荣县区块部署实施了第一口页岩气井——WY1HF井,目的层位为志留系龙马溪组,直导眼完钻井深4 788 m。在目的层龙一段钻遇的优质页岩厚度为49.5 m,实施水平段长1 005 m的水平井,经过16段压裂改造,在井口压力为26.2 MPa时,测试获天然气产量 $17.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,实现了盆内负向构造带深层页岩气的重大突破。

自2016年以来,先期实施完成了5台5井,其中,WY23-1HF井完钻层位为志留系龙马溪组,地层温度约135 ℃,地压梯度为1.9 MPa/hm, $\phi 215.90 \text{ mm}$ 井眼完钻,套管完井。完钻井深5 555 m,水平段长1 500.54 m。采用三开制井身结构,造斜点:3 490 m; A靶点:4 054.46 m/3 838.60 m(斜深/垂深); B靶点:5 329.38 m/3 824.88 m(斜深/垂深)。油层套管全

井采用 $\phi 139.7 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$ 125V型气密扣套管,抗内压强度为137 MPa,抗外挤强度为156.7 MPa。三开 $\phi 139.7 \text{ mm}$ 套管固井质量总体较差,压裂层段4 000~5 508.15 m,第一界面和第二界面固井质量差的井段长度分别为1 087.3 m和1 035.8 m,合格率分别为24.1%和27.7%。WY23-1HF井钻遇地层上部为灰绿色页岩,中部为深灰色页岩,下部为灰黑色、黑色页岩。在钻井施工过程中,为减少漏失和坍塌等复杂情况,加强水平段岩屑的携带防止岩屑床的形成,造斜段和水平段采用油基钻井液体系(密度为1.9~1.95 g/cm³)。该井测井解释评价页岩气储层共6层(1 677.2 m),其中,I类页岩气层3层(1 348.3 m),II类页岩气层2层(259.5 m),III类页岩气层1层(69.4 m)。气体组分以甲烷为主,占96%~98%,氮气占0.46%~2.40%,二氧化碳占0.2%~1.2%,不含硫化氢。

WY23-1HF井在工程上先后经历了改造过程的套变、丢段,生产过程中受邻井压裂影响而发生井筒堵塞,实施气举、顶通的复产措施等情况,于2017年6月压裂施工,历时37 d,完成20段压裂。该井采用泵送桥塞分段改造工艺,井口选择140 MPa实施超高压施工,进行了20段45簇分段压裂,最高泵压为120 MPa,最高排量为20 m³/min,总液量为48 020 m³、陶粒为1 428.15 m³。WY23-1HF井压裂施工中,在第3段、第13段、第19段发生套变(表1),遇阻位置分别为4 997.5,4 493,4 159,4 148 m,造成3段5簇丢段。

WY23-1HF井于2017年10月完成测试,在井口压力为35.4 MPa时,测试获天然气产量 $26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,WY23-1HF井于2017年12月6日开始正式管输试采,在配产 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 条件下,生产稳定。2019年7月,受同平台邻井压裂影响,发生井筒堵塞无法重新开井生产。2019年11月,该井成功实施了井筒解堵,复产作业至今。

表1 WY23-1HF井套变位置的变形量统计
Table 1 Casing deformation rate of Well-WY23-1HF

井号	施工段	遇阻位置(m)	遇阻情况	变形量(mm)
WY23-1HF	第3段	4 997.5	2#103.2 mm桥塞+射孔枪	11.1
		4 493(第一次)	12#103.2 mm桥塞+射孔枪	19.3
	第13段	4 493(第二次)	单独泵送95 mm全可溶桥塞	19.3
		4 159	泵送95 mm全可溶桥塞+射孔枪	19.3
	第19段	4 148	第1次压裂后,单独泵送95 mm全可溶桥塞	19.3

2 WY23-1HF井筒堵塞原因分析

WY23平台采用1台6井模式,其中,WY23-1HF井、23-2HF井、23-6HF井位于WY23平台的同侧,WY23-1HF井与WY23-2HF井水平距离为378 m,WY23-1HF井与WY23-6HF井水平距离为435 m。井区周围微裂缝高度发育,其中,高渗条带横跨WY23-1HF和WY23-2HF井(图1)。

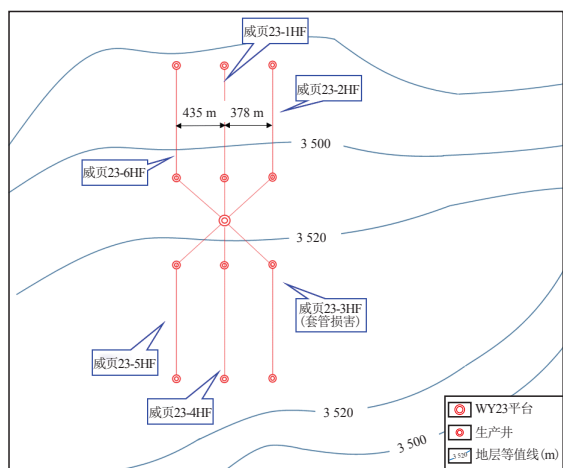


图1 WY23-1HF井井位部署

Fig. 1 Location deployment of Well-WY23-1HF

2019年7月12日WY23-2HF和WY23-6HF井开始压裂后,WY23-1HF井的产气量呈现剧烈线性递减趋势,从1800 m³/h下降到900 m³/h。7月15日,WY23-1HF井的产气量从900 m³/h陡降到300 m³/h(图2)。8月2日12点,油套压剧增2.5 MPa,结合微地震监测情况发现,WY23-1HF井前期压裂改造缝网覆盖WY23-2HF井,判定邻井WY23-2HF井压窜,导致压裂液进入WY23-1HF井,现场进行了3次氮气气举和2次油套连通机动解堵,判断油套连通,下部井段存在堵塞,放喷口产出黑液,且固相砂粒为地层返吐物。

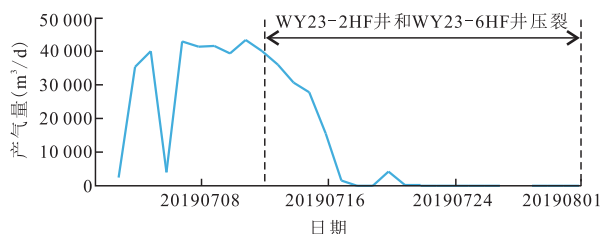


图2 WY23-2HF井和23-6HF井压裂期间WY23-1HF井的产气量变化曲线

Fig. 2 Gas production curve of WY23-1HF during fracturing of adjacent wells

3 解堵复产方案及实施情况

连续油管在页岩气井钻扫桥塞、冲砂解堵、落物打捞等作业中得到应用^[1-2]。前期,针对中国石化页岩气区,在YY5-1HF井成功进行了连油过桥塞解堵作业(桥塞最大外径为109.55 mm,通径为76.2 mm),对YY7HF、YY4-1HF等多口可溶桥塞分段井进行了连油通井作业,因此,连续油管解堵技术相对成熟。然而,与使用单一类型桥塞不同,WY23-1HF井可溶桥塞与大通径桥塞混合使用,共使用桥塞19只,其中,大通径桥塞7只(非易钻桥塞)、可溶桥塞12只,可溶桥塞与大通径桥塞混合使用。桥塞从上到下的使用情况为:第19号至第12号为可溶桥塞,第11号至第7号为大通径桥塞,第6号至第2号为可溶桥塞,第1号为大通径桥塞,生产期间未进行通井解堵作业。

根据前期认识,可溶桥塞在压后返排期间均不同程度地存在井筒堵塞造成的排液困难,而WY23-1HF井水平段轨迹存在上翘14 m的情况,长时间生产不能确保可溶桥塞溶解粉末和非金属不溶物完全排出井筒,因此,在邻井压裂液进入本井后,存在镁铝合金残留物、地层返吐物、卡瓦牙等桥塞不溶物在井筒内,尤其是变径部位的混合堵塞,以及中上部套管发生套变、桥塞混合使用等复杂情况,连油作业施工风险高。同时,连续油管内径小,冲洗排量受限,携砂效果差,容易在变径位置积砂,造成连油下入困难。因此,选择油管作为大通径桥塞以上解堵作业管柱,油管磨铣通井制定如下作业程序:①采用冲洗头探塞面、冲砂,循环脱气并压井至平稳;②连接螺杆马达带磨鞋(或钻头)的管柱进行通扫或钻磨;③根据进尺和钻头磨损情况加工套铣筒,进行钻扫—打捞一体化作业,进而处理大通径桥塞上部井段;④替喷测试后,决定连油过桥塞解堵。

由于长期生产后存在压力亏空,堵塞发生时关井压力为0 MPa,无法折算井底压力,若压井泥浆密度过高可能造成产层污染,而采用清水或低密度压井液进行钻磨解堵,解堵瞬间易出现底部压力释放造成井控风险。因此,制定的解堵方案为:压返液条件下采用 $\phi 73$ mm油管冲洗、钻磨、打捞相结合的方式,处理11号大通径桥塞以上井筒;在管柱上及井口处分别安装内防喷工具,一旦出现溢流,立即采取关闭防喷器、抢接防喷工具等井控措施,并进行应急压井。

现场实施过程采用的管柱组合: $\phi 73$ mm \times 5.51 mm

P110NU油管+单流阀+笔尖,井深3 740.44 m时探得砂面,冲砂至井深3 770.02 m无进尺,冲砂期间出口返出大量岩屑约50 kg(龙马组灰褐色页岩),直径约0.5~3 cm,且喷口多次出现较大喷势,证实为地层垮塌岩屑进入井筒造成井筒堵塞,并在下部产层内形成圈闭气层。若继续采用压返液进行冲砂或钻磨解堵,则存在较大的井控及管柱卡埋的风险,因此,将井内压返液替换为泥浆压井平稳后起出油管作业管柱。根据钻磨进尺和返出物情况,多次优化钻扫管柱,先采用 $\phi 89$ mm合金齿短套铣筒进行处理,由于套铣过程中频繁出现整钻现象(钻压为5 kN,转盘转速为20 r/min),反复上提下放多次(上提时有挂卡现象),开动转盘扭矩较大,多次套铣无进尺,难以有效通过遇阻点,于是更换 $\phi 60.32$ mm钻杆带3种磨鞋(平底、领眼、西瓜皮)配合铅模打印模式进行调整,最后控制钻压为10~20 kN,转速为35~40 r/min,排量为 $0.35\text{ m}^3/\text{min}$,泵压为26~27 MPa,在保证进出口泥浆密度一致的前提下,使用三翼刮刀钻头管柱组合($\phi 89\text{ mm}\times 0.3\text{ m}$ 三翼刮刀+ $\phi 89\text{ mm}\times 1.93\text{ m}$ 短钻铤+ $\phi 60.3\text{ mm}\times 7.11\text{ mm}$ G105钻杆+ $\phi 73\text{ mm}\times 9.19\text{ mm}$ G105钻杆)进行钻扫作业,使WY23-1HF成功复产。

该井需解除可溶桥塞、非易钻桥塞、地层返出物混合堵塞情况,为提高处理能力、降低作业风险,采用修井机配合,压井泥浆下冲洗管柱、刮刀钻头钻磨相结合,成功实现复产,对类似的页岩气井堵塞处理具有借鉴意义。

4 结论及认识

1) 地层垮塌,岩屑进入井筒造成WY23-1HF井筒堵塞而停产,采用钻杆带钻头(或磨鞋)的管柱组合进行钻扫作业能够成功复产,对于此类堵塞严重井具有借鉴意义。

2) WY23-1HF井所属区块套变问题突出,可溶桥塞的不溶物和大通径桥塞的通径限制加大了井筒堵塞后的处理难度。另外,由于井内变径多、轨迹上翘等因素,后期仍存在再次堵塞的可能。因此,同一口井应避免混合使用不同类型的桥塞。

参考文献

[1] LV Z G, WANG L, DENG S F, et al. China shale gas exploration: early Sichuan Basin Longmaxi Shale Gas stimulation and completion case study[C]// paper SPE-166746-MS presented at the SPE Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition, 7-9 October 2013, Dubai, UAE.

[2] LIAN Z H, YU H, LIN T J, et al. A study on casing deformation failure during multi-stage hydraulic fracturing for the stimulated reservoir volume of horizontal shale wells[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 23: 538-546.

[3] 田中兰,石林,乔磊.页岩气水平井井筒完整性问题及对策[J].天然气工业,2015,35(9):70-76.
TIAN Zhonglan, SHI Lin, QIAO Lei. Research of and countermeasure for wellbore integrity of shale gas horizontal well[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(9): 70-76.

[4] 于浩,练章华,徐晓玲,等页岩气直井体积压裂过程套管失效的数值模拟[J].石油机械,2015,43(3):73-77.
YU Hao, LIAN Zhanghua, XU Xiaoling, et al. Numerical simulation for casing failure during volumetric fracturing of shale gas vertical wells[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(3): 73-77.

[5] 田中兰,石林,乔磊.页岩气水平井井筒完整性问题及对策[J].天然气工业,2015,35(9):70-76.
TIAN Zhonglan, SHI Lin, QIAO Lei. Research of and Countermeasure for Wellbore Integrity of Shale Gas Horizontal Well[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(9): 70-76.

[6] SUGDEN C, JOHNSON J, CHAMBER M, et al. Special consideration in the design optimization of the production casing in high-rate, multistage-fractured shale wells[J]. SPE Drilling & Completion, 2012, 27(4): 459-472.

[7] DIEGO B, SHAHRI M P, WAGNER R, et al. Impact of cyclic pressure loading on well integrity in multi-stage hydraulic fracturing[C]// paper URTEC-2902463-MS presented at the SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, 23-25 July 2018, Houston, Texas, USA.

[8] ADAMS N J, MITCHELL R F, EUSTES A W, et al. A causation investigation for observed casing failures occurring during fracturing operations[C]// paper SPE-184868-MS presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, 24-26 January 2017, The Woodlands, Texas, USA.

[9] 杨毅,刘俊辰,曾波,等.页岩气井套变段体积压裂技术应用及优选[J].石油机械,2017,45(12):82-87.
YANG Yi, LIU Junchen, ZENG Bo, et al. Application and optimization of SRV fracturing technology for casing deformation section of shale gas well[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(12): 82-87.

[10] 廖仕孟,桑宇,宋毅,等.页岩气水平井套管变形影响段分段压裂工艺研究及现场试验[J].天然气工业,2017,37(7):40-45.
LIAO Shimeng, SANG Yu, SONG Yi, et al. Research and field tests of staged fracturing technology for casing deformation section in horizontal shale gas wells[J]. Nature Gas Industry, 2017, 37(7): 40-45.

[11] 郑瑞,杜建平,李兆丰,等.页岩气水平井修井工艺技术应用[J].化工管理,2019,25(9):207-208.
ZHENG Rui, DU Jianping, LI Zhaofeng, et al. Application of workover technology for Shale gas horizontal well[J]. Chemical Industry Management, 2019, 25(9): 207-208.

[12] 马骏骥.连续油管作业在页岩气开发中的应用分析[J].化学工程与装备,2018,13(1):97-98.
MA Junji. Application analysis of coiled tubing operation in shale gas development[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2018, 13(1): 97-98.

- [13] 袁涛. 浅议页岩气井油管连续油管冲砂技术[J]. 江汉石油职工大学学报, 2016, 29(4): 54-56.
YUAN Tao. On coiled tubing sand washing technology used in shale gas wells[J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2016, 29(4): 54-56.
- [14] 魏佳, 辛勇亮. 页岩气压裂施工砂堵原因与策略研究[J]. 中国石油石化, 2017, 20(9): 95-96.
WEI Jia, XIN Yongliang. Study on sand plugging causes and strategies in shale gas fracturing construction[J]. China Petrochem, 2017, 20(9): 95-96.
- [15] 胡尊敬. 页岩气井带压作业中冰堵的产生及解决措施[J]. 石化技术, 2017, 24(2): 71.
HU Zunjing. Causes and solutions of ice blockage in snubbing operation of shale gas well[J]. Petrochemical Industry Technology, 2017, 24(2): 71.
- [16] 张华礼, 杨盛, 刘东明, 等. 页岩气水平井井筒清洁技术的难点及对策[J]. 天然气工业, 2019, 39(8): 82-87.
ZHANG Huali, YANG Sheng, LIU Dongming, et al. Wellbore cleaning technologies for shale-gas horizontal wells: Difficulties and countermeasures[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(8): 82-87.
- [17] 杨小城, 李俊, 邹刚. 可溶桥塞试验研究及现场应用[J]. 石油机械, 2018, 46(7): 94-97.
YANG Xiaocheng, LI Jun, ZOU Gang. Dissolvable bridge plug test and field application[J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(7): 94-97.
- [18] 王林, 王恩顺, 张建华, 等. 可降解桥塞研制及其承压性能试验[J]. 石油机械, 2017, 45(2): 64-67.
WANG Lin, WANG Enshun, ZHANG Jianhua, et al. Development and pressure bearing performance experiment of the degradable bridge plug[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(2): 64-67.
- [19] 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 non drill-grinding large diameter bridge plug technology in segmentation of shale gas horizontal wells[J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(2): 123-125.
- [20] 胡英才, 杨康敏, 李家明, 等. 快钻电缆桥塞的研制与应用[J]. 石油机械, 2017, 45(3): 90-93.
HU Yingcai, YANG Kangmin, LI Jiaming, et al. Development and application of fast drill cable bridge plug[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(3): 90-93.

(编辑 余聪)

(上接第222页)

- 工程管理的思考与建议[J]. 天然气工业, 2019, 39(4): 1-7.
LIU He, MENG Siwei, SU Jian, et al. Reflections and Suggestions on technology development and engineering management of Shale gas fracturing in China[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(4): 1-7.
- [9] CAO X J, WANG M G, KANG J, et al. Fracturing technologies of deep shale gas horizontal wells in the Weirong Block, southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry B, 2020, 7(1): 64-70.
- [10] 张瑞典, 吕永科, 闫亚蕾. 喷砂射孔砂塞分段压裂工艺技术应用[J]. 化学工程与装备, 2019, (7): 63-69.
ZHANG Ruidian, LYU Yongke, YAN Yalei. Application of sand blasting perforation sand plug fracturing technology[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2019, (7): 63-69.
- [11] 李军龙, 李德旗, 朱炬辉, 等. 复杂页岩气井无限级砂塞分段压裂先导性试验[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(5): 633-637.
LI Junlong, LI Deqi, ZHU Juhui, et al. Pilot test on infinite-order sand plug staged fracturing of complex shale gas wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(5): 633-637.
- [12] 肖勇军, 何先君, 刘望, 等. 裂缝暂堵—控藏体积压裂技术在长宁区块的应用[J]. 钻采工艺, 2020, 43(4): 39-42.
XIAO Yongjun, HE Xianjun, LIU Wang, et al. Application of fissure temporary plugging-controlled reservoir volume fracturing technology in Changning block[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(4): 39-42.
- [13] 梁兴, 朱炬辉, 石孝志, 等. 缝内填砂暂堵分段体积压裂技术在页岩气水平井中的应用[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 82-89.
LIANG Xing, ZHU Juhui, SHI Xiaozhi, et al. Staged fracturing of horizontal shale gas wells with temporary pluggingby sand filling[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 82-89.
- [14] 郭建春, 赵志红, 赵金洲, 等. 水平井投球分段压裂技术及现场应用[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(6): 86-88.
GUO Jianchun, ZHAO Zhihong, ZHAO Jinzhou, et al. Horizontal well ball staged fracturing technique and field application[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(6): 86-88.
- [15] 肖晖, 李洁, 曾俊. 投球压裂堵塞球运动方程研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(5): 162-167.
XIAO Hui, LI Jie, ZENG Jun. Study on ball motion equation with ball fracturing and plugging[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science and Technology Edition), 2011, 33(5): 162-167.
- [16] 王兴文, 杨建英, 任山, 等. 堵塞球选择性分层压裂排量控制技术[J]. 钻采工艺, 2007, 30(1): 75-76.
WANG Xingwen, YANG Jianying, REN Shan, et al. Study on control technology of selective stratified fracturing for blocking ball[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(1): 75-76.
- [17] 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.
HU Shunqu, QI Bin, HOU Zhimin, et al. Development and application of full size stepless sliding sleeve[J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(4): 73-76.
- [18] 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.
LIU Tao, HOU Zhimin, HU Shunqu, et al. Development and application of open-ended fracturing sleeves for horizontal wells[J]. Oil Field Machinery, 2016, 45(9): 75-77.
- [19] 刘洪涛, 沈新普, 刘爽, 等. 高温高压气井多封隔器管柱完整性分析方法及应用实例[J]. 天然气工业, 2020, 40(7): 89-89.
LIU Hongtao, SHEN Xinpu, LIU Shuang, et al. Integrity analysis method of multi-packer string in HTHP gas wells and its application cases[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(7): 89-89.
- [20] HASAN R, IZGEC B, KABIR S. Sustaining production by managing annular-pressure buildup[J]. SPE Production & Operations, 2010, 25(2): 195-203.

(编辑 尹淑容)