

# 致密气生产井微型压裂诊断技术

张超<sup>1</sup>, 郝明慧<sup>1</sup>, 杨国通<sup>1</sup>, 王小波<sup>2</sup>, 刘鑫<sup>1</sup>, 周冲<sup>1</sup>

1. 中海油能源发展股份有限公司山西分公司 山西晋中 030600

2. 中国石油吐哈油田分公司鄯善采油厂 新疆吐鲁番 838202

通讯作者: Email: zhangchao39@cnooc.com.cn

引用: 张超, 郝明慧, 杨国通, 等. 致密气生产井微型压裂诊断技术[J]. 油气井测试, 2020, 29(4): 51-55.

Cite: ZHANG Chao, HAO Minghui, YANG Guotong, et al. Micro-fracturing diagnosis technology for tight gas producing wells [J]. Well Testing, 2020, 29(4): 51-55.

**摘要** 针对致密储层小型压裂测试耗时长、用液多等问题, 提出在主压裂开始之前以较低排量和较少液量的微型压裂对地层进行快速诊断, 获取地层闭合压力和重张压力, 估算地层水平最大主应力。LX区块一口致密气生产井中应用微型压裂, 施工排量  $1.0 \text{ m}^3/\text{min}$ , 注入  $1.3 \text{ m}^3 2.0\% \text{ KCl}$  溶液, 确定地层闭合压力为  $28 \text{ MPa}$ , 估算地层水平最大主应力为  $32.3 \text{ MPa}$ , 主压裂施工期间油压维持在  $38.2 \sim 44.5 \text{ MPa}$ , 调整压后返排油嘴切换时机为油压  $13.2 \text{ MPa}$ 。微型压裂有效地指导了压裂施工参数优化及压后返排, 提高了施工安全性。压后采用压裂软件分析, 验证了微型压裂估算闭合压力的准确性。

**关键词** 致密气井; 微型压裂; 小型压裂测试; 用液量; 闭合压力; 施工压力; 压后返排**中图分类号**: TE357 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.04.009

## Micro-fracturing diagnosis technology for tight gas producing wells

ZHANG Chao<sup>1</sup>, HAO Minghui<sup>1</sup>, YANG Guotong<sup>1</sup>, WANG Xiaobo<sup>2</sup>, LIU Xin<sup>1</sup>, ZHOU Chong<sup>1</sup>

1. Shanxi Branch of CNOOC Energy Development Co., Ltd., Jingzhong, Shanxi 030600, China

2. Shanshan Oil Production Plant, PetroChina Tuha Oilfield Branch, Turpan, Xinjiang 838202, China

**Abstract:** To solve the problems of small fracturing test in tight reservoirs, such as long time consuming and more fluids using, it is proposed to quickly diagnose the formation with low-displacement and less-fluid micro fracturing before the main fracturing, and then estimate the maximum horizontal principal stress of the formation after obtaining its closure pressure and reopening the pressure. Micro fracturing was applied to a tight gas producing well in LX block. The operating displacement was  $1.0 \text{ m}^3/\text{min}$ , and  $1.3 \text{ m}^3 2.0\% \text{ KCl}$  solution was injected. The closure pressure was determined to be  $28 \text{ MPa}$ , and the maximum horizontal principal stress was estimated to be  $32.3 \text{ MPa}$ . The oil pressure was maintained at  $38.2 \sim 44.5 \text{ MPa}$  during the main fracturing period. The tubing pressure was determined to be  $13.2 \text{ MPa}$  when adjusting switching timing of flowback choke after fracturing. Micro fracturing effectively guides the optimization of fracturing operating parameters and backflow after fracturing, which improves operating safety. The fracturing software is used for analyzing after fracturing, which verifies the accuracy micro-fracturing closure pressure estimated.

**Keywords:** tight gas wells; micro fracturing; small-scale fracturing test; fluid volume used; closure pressure; operating pressure; flowback after fracturing

小型压裂测试是指在主压裂施工前利用与主压裂相同工作液进行的小规模压裂试验<sup>[1-3]</sup>。通过小型压裂测试可以确定地层闭合应力大小等参数, 并根据测试结果调整主压裂施工参数以及施工规模, 达到优化施工的目的。刘建安<sup>[4]</sup>基于理论模型分析方法, 编写解释软件求取参数来优化主压裂施工设计, 并通过实际案例应用说明该方法能够改善施工效果。杨泽超等<sup>[5]</sup>利用关井前的数值解和裂缝模型近似解求取裂缝参数, 通过关井后的线弹性

理论来计算缝宽。赵志红等<sup>[6]</sup>利用小型压裂测试、试井方法分析了裂缝闭合后的压降数据, 可得到更准确的储层渗透率, 从而提高压裂施工效果, 实用性较高。周自武等<sup>[7]</sup>利用控缝高技术和 GOHFER 压裂软件避免压开水层, 并结合小型压裂测试对施工参数优化, 解决了储层疏松且低渗的问题。蒋建方等<sup>[8]</sup>利用 Fracpro PT 软件进行测试压裂分析掌握地层特性, 并利用分析结果优化现场候选井施工方案, 压裂效果十分显著。梁冲等<sup>[9]</sup>认为压前测试评

价能得到准确的地层参数,了解储层特性、裂缝延伸特性和滤失特性,对主压裂施工能起到指导作用。曾博等<sup>[10]</sup>根据  $G$  函数曲线特征,分析测试压裂数据得到渗透率、裂缝闭合压力、闭合时间等,并通过测井、岩性分析等方法的对比验证现场应用的合理性。但小型压裂测试存在以下缺点:首先,地层渗透率越小,要求的小型压裂测试时间越长<sup>[11]</sup>;其次,小型压裂测试一般用液量较多。临兴致密气区块 LX-1 井目的层渗透率 0.0125 mD,小型压裂测试用液量 24.8 m<sup>3</sup>,耗时 4.0 h<sup>[12]</sup>;吐哈油气田武 1 井目的层渗透率 0.1 mD,小型压裂测试用液量 41.1 m<sup>3</sup>,耗时 0.5 h<sup>[13]</sup>;鲁卜哈里油田 X-2S 井目的层渗透率 0.013 mD,小型压裂测试用液量 684.0 m<sup>3</sup>,耗时 7.0 h<sup>[9]</sup>;神木致密气区块 SM-7 井目的层渗透率 0.21 mD,小型压裂测试用液量 20.2 m<sup>3</sup>,耗时 1.0 h<sup>[14]</sup>;苏北油气田 J1 井目的层渗透率 0.004 mD,小型压裂测试用液量 110.23 m<sup>3</sup>,耗时 1.5 h<sup>[15]</sup>;西北油气田 A 井目的层渗透率 1.2 mD,小型压裂测试用液量 207.88 m<sup>3</sup>,耗时 1.25 h<sup>[16]</sup>;某页岩气田 Z 井目的层渗透率 0.083 mD,小型压裂测试用液量 170.0 m<sup>3</sup>,耗时 12.0 h<sup>[10]</sup>;赵庄煤层气田 ZX-U 井目的层渗透率 0.442 mD,小型压裂测试用液量 86.0 m<sup>3</sup>,耗时 1.0 h<sup>[17]</sup>。统计显示,以上 8 个不同的油气田的平均渗透率为 0.258 mD,小型压裂测试平均用液量在 83.3 m<sup>3</sup>,平均耗时 3.5 h。不难看出,小型压裂测试普遍存在用液量大和耗时长等缺点。

对于中海油某致密气区块,地层渗透率一般在 0.1~1.0 mD,且使用黏度较高的瓜胶压裂液,小型压裂测试测压降需要 1.5~5.0 h,压降曲线才会显示出闭合特征。部分井甚至要在主压裂前专门抽 0.5 d 时间来进行小型压裂测试及分析,时效极低。该区块小型压裂测试用液量达 15.0~50.0 m<sup>3</sup>,压前需专门备水备料。且作为开发近十年的区块,目前压裂设计很少考虑小型压裂测试,对于个别资料获取较少的井区,常缺乏参考性较好的资料、数据。这些特点导致开展小型压裂测试的针对性较差,需要一种更加快速而不失精确的诊断测试地层的方法。张健等<sup>[14]</sup>建立了快速测试中压降的数学模型,结合特征曲线分析等方法,提高了快速测试的解释精度,并在现场成功应用。张逸群等<sup>[18]</sup>又将快速测试成功应用到了页岩气压裂中。事实证明,快速测试可以准确取得地层闭合应力,且用液量少,测试

时间短,甚至无需压前做专门准备。在常见的快速测试方法中,微型压裂( $\mu$ HF)出现较早,应用较多,是压裂诊断的有效手段<sup>[19-20]</sup>。

1 微型压裂技术

与小型压裂测试一样,微型压裂也是在主压裂开始之前,以一定排量、一定液量压开地层,然后记录瞬时停泵压力及压降曲线,最后通过分析停泵和压降曲线获取地层参数(表 1)。但微型压裂要求的排量更小,用液量更少,无需事先专门准备,且应在地层出现破裂迹象后立即停泵。停泵后压力下降一般先快后慢,压力曲线上会出现一个明显的转折点(图 1)。该点的压力即粗略地认为是地面闭合压力。由于采用低黏度的 KCl 溶液,停泵压降极快,转折点一般在停泵后数分钟内出现。微型压裂用液量越少,地面闭合压力估算越精确。出现地面闭合压力后,再次启泵,将排量控制在第一次注入的水平,记录重张压力。压后可根据记录的应力数据估算地层水平最大主应力,此参数对该区块后期开展体积压裂非常重要<sup>[21]</sup>。

表 1 小型压裂测试与微型压裂测试对比表  
Table 1 Comparison of small-scale fracturing test and micro-fracturing test

区别项	小型压裂测试	微型压裂诊断
排量	一般要求达到主压裂设计排量	1.0 m <sup>3</sup> /min 左右
液量	约 10.0~100.0 m <sup>3</sup>	不超过 2.0 m <sup>3</sup>
耗时	0.50~12.00 h	约 0.25 h
停泵时机	适当造缝后逐渐降低排量、停泵	地层破裂后即停泵
是否需要专门准备	需要	不需要

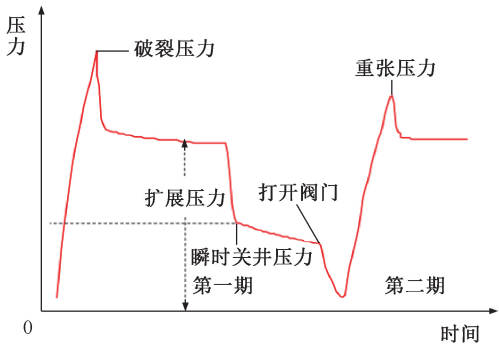


图 1 微型压裂一般施工曲线示意图  
Fig. 1 General operating curve of micro fracturing

地层岩石抗张强度近似等于破裂压力与重张压力的差值<sup>[19]</sup>,即

$$\sigma_t = p_f - p_r \tag{1}$$

式中: $\sigma_t$  为地层岩石抗张强度,MPa; $p_f$  为地层破裂压力,MPa; $p_r$  为地层重张压力,MPa。

根据下述公式,求得水平最大主应力,即

$$\sigma_H = 3\sigma_h - p_f - p_p + \sigma_t \tag{2}$$

式中: $\sigma_H$  为地层水平最大主应力,MPa; $\sigma_h$  为地层水平最小主应力,即地层闭合应力,MPa; $p_p$  为地层孔隙压力,MPa。

2 现场应用

A 井是中海油某区块的一口致密气生产井,井型为定向井,井深 2 275.0 m,垂深 1 878.04 m,测井最大井斜 43.63°,所在深度为 1 100.00 m,目的层盒 6 段,测深 1 761.5~1 765.2 m,垂厚 2.7 m,孔隙度 10.7%,渗透率 0.83 mD,含水饱和度 41%,泥质含量 5.6%。压裂施工管柱为 139.7 mm 套内下 73.0 mm 油管,光油管压裂。由于钻完井期间发生事故,该井井深 384.5 m 处套管破损,后经膨胀管补贴,并试压 30 MPa 经 1 h 压力降 0.3 MPa。考虑到压裂施工压力有可能高于 30 MPa,膨胀管补贴有效性和施工安全性无法保证,前期井下事故还导致目的层附近固井质量较差。

现场分析认为存在如下压裂施工风险:①膨胀管在压裂过程中部分或完全失效,压裂液沿环空上返,进入套管破损处。若这种情况发生在携砂液阶段,则极可能发生埋管等事故。②压裂液沿套管外壁窜至其他层位,导致滤失加大,甚至砂堵。

因此,压裂中对施工压力的把握就显得极为重要。该井压裂设计并未考虑小型压裂测试,邻井资料可参考性较差,施工现场也未准备多余压裂液。现场准备实施微型压裂,对施工压力进行快速诊断。

A 井微型压裂(环空)地面破裂压力 30.9 MPa,地面瞬时停泵压力 19.3 MPa,地面裂缝扩展压力 20.7 MPa,地面重张压力 23.1 MPa,施工排量 1.0 m<sup>3</sup>/min,总共注入 1.3 m<sup>3</sup> 的 2.0%KCl 溶液,测压降 71 s,现场通过辅助线找到了压降曲线的转折点(图 2)。然后提排量至 1.1 m<sup>3</sup>,测量重张压力,随后进入正式压裂。

从压裂曲线上读取地面闭合压力 13.2 MPa,目的层处静液柱压力 14.8 MPa,故现场取 28.0 MPa 为地层闭合压力,近井摩阻(经验) 3.0 MPa,3.5 m<sup>3</sup>/min 下油管摩阻 9.0 MPa/km,据此估算合理的净压力为 5.0 MPa,地面施工压力 37.0 MPa(图 3)。

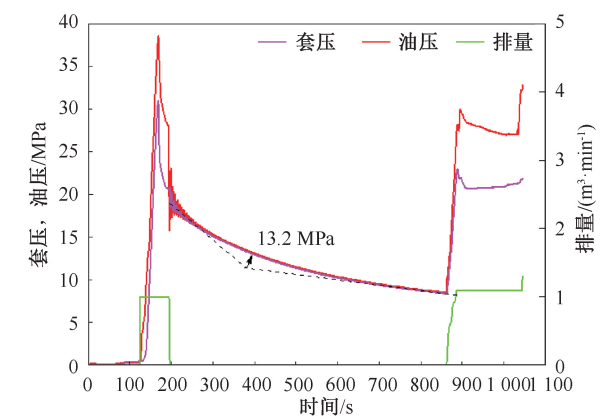


图 2 A 井微型压裂施工曲线图  
Fig. 2 Micro-fracturing operating curve of Well A

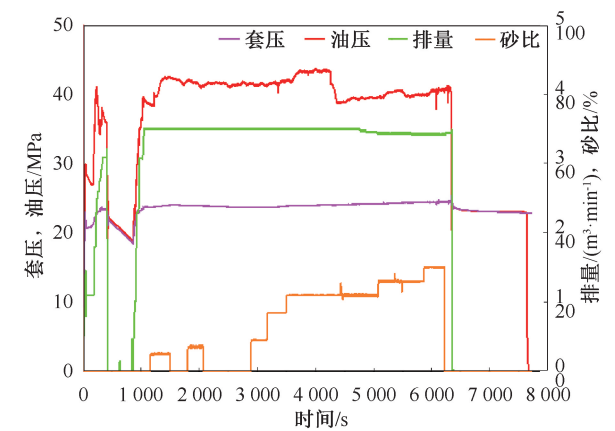


图 3 A 井主压裂施工曲线  
Fig. 3 Main fracturing operating curve of Well A

经计算,正式压裂施工时,排量达到 3.5 m<sup>3</sup>/min 后,施工压力应不低于 37.0 MPa。故正式压裂前设定了两个“警戒线”,即当油压低于 37.0 MPa,或环空压力低于 20.7 MPa 时,认为地层滤失偏大,可能已发生窜层或膨胀管失效,应考虑停止施工。其中 A 井盒 6 段抗张强度 7.0 MPa,地层压力 13.0 MPa,最大地层水平主应力估算结果为 32.3 MPa。

整个主压裂施工期间,油压维持在 38.2~44.5 MPa(油压明显高于估算值,是由于伴注液氮的影响);环空压力维持在 21.3~24.5 MPa 的“安全区间”。

由于地面闭合压力已确定,现场对压后返排程序也进行了调整(表 2)。将原本油嘴调整时机由压裂设计的油压 17.7 MPa 变更为 13.2 MPa。

表 2 改进后的 A 井放喷油嘴选择表  
Table 2 Selecting list of relief choke of Well A after improving

油压/MPa	油嘴/mm	油压/MPa	油嘴/mm
>13.2	2	13.2~8.0	3~5
8.0~6.0	5~8	6.0~4.0	8~10
<4.0	10~12	/	/

### 3 准确性验证

压后将 A 井微型压裂施工压力、排量等参数导

入 GOHFER 压裂软件进行处理,绘制小型压裂压降  $G$  函数特征曲线,以获取裂缝闭合点<sup>[22]</sup>,结果如图 4 所示。

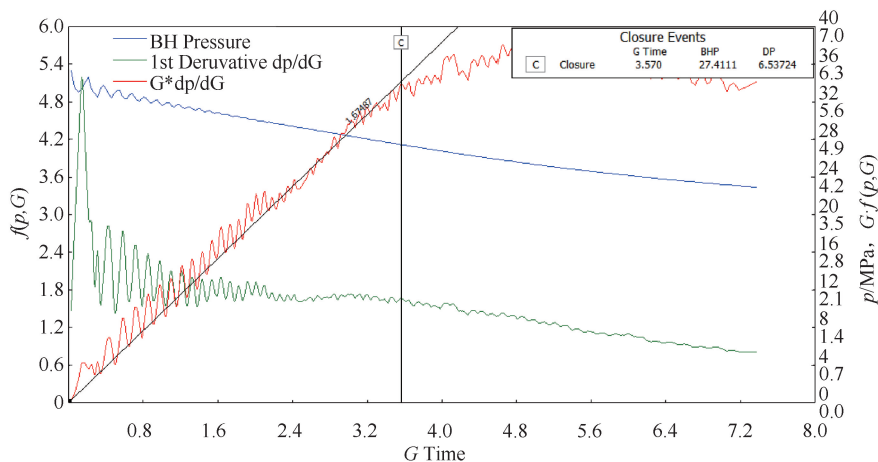


图 4 A 井微型压裂  $G$  函数分析

Fig. 4 Analysis of micro-fracturing  $G$  function in Well A

通过  $G$  函数曲线分析可知,目的层闭合压力为 27.4 MPa,与现场通过读取转折点获取的闭合压力仅相差 0.6 MPa,误差率 2.2%。同时,分析显示,微型压裂虽然采用黏度较低的 2.0% KCl 溶液,但压裂液效率仍达到 64.1%。这说明本井储层渗透性的确较差,若采用小型压裂测试,耗时将较长,微型压裂快速诊断的优势非常明显。

### 4 结论

(1) 微型压裂相较于小型压裂测试具有用液少、耗时短和无需做专门施工准备等优点,适用于现场快速诊断。

(2) 微型压裂估算的地层闭合压力,与压裂软件分析结果较接近,精确度高。

(3) 微型压裂可用于估算施工压力,制定合适的压后返排程序等,对提高施工安全性具有重要意义,建议在致密气压裂中推广。

致谢:感谢中联煤层气公司晋西分公司对微型压裂技术现场应用的支持。

#### 参考文献

- [1] 陈超峰,朱雪华,杨晓儒,等. 低压裂缝性储层小型测试压裂改造技术[J]. 油气井测试,2018,27(4):35-41.  
CHEN Chaofeng, ZHU Xuehua, YANG Xiaoru, et al. Small-scale test fracturing technology for low-pressure fractured reservoirs [J]. Well Testing, 2018,27(4):35-41.
- [2] 李蕴哲,任泽,王永刚. 小型压裂测试在海上探井压裂的应用与分析[J]. 油气井测试,2017,26(5):53-55,59.  
LI Yunzhe, REN Ze, WANG Yonggang. Application and

analysis of minifrac test in offshore exploratory well [J]. Well Testing, 2017,26(5):53-55,59.

- [3] 王晓泉,王振铎,雷群,等. 小型压裂与主压裂对比分析及对裂缝垂向延伸规律研究[J]. 天然气工业,2004,24(4):36-37.  
WANG Xiaoquan, WANG Zhenduo, LEI Qun, et al. Comparison of mini-fracturing and main-fracturing and the fracture vertically extending law [J]. Natural Gas Industry, 2004,24(4):36-37.
- [4] 刘建安. 小型压裂解释方法研究与应用[D]. 西安:西安石油大学,2004.  
LIU Jian'an. The study and application of the minifrac interpretation procedure [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2004.
- [5] 杨泽超,王兴文. 温度影响的压后压力降落分析[J]. 油气井测试,2007,16(1):8-10.  
YANG Zechao, WANG Xingwen. Analysis for pressure falling down at post fracture influenced by temperature [J]. Well Testing, 2007,16(1):8-10.
- [6] 赵志红,郭建春,岳迎春. 利用小型压裂测试确定储层渗透率[J]. 石油地质与工程,2007,21(6):56-58.  
ZHAO Zhihong, GUO Jianchun, YUE Yingchun. Determination of permeability by using small scale fracturing testing [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2007,21(6):56-58.
- [7] 周自武,王海勇,翟洪冬,等. 雁木西疏松砂岩油藏压裂充填试验[J]. 钻采工艺,2004,27(3):41-44.  
ZHOU Ziwu, WANG Haiyong, ZHAI Hongdong, et al. The fracturing pack test of loose sandstone reservoir in Yanmuxi Oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2004,27(3):41-44.
- [8] 蒋建方,王晓东,刘建安,等. 基于小型测试对压裂地质

- 特征分析的现场施工[J]. 石油钻采工艺, 2007, 29(1): 61-64.
- JIANG Jianfang, WANG Xiaodong, LIU Jian'an, et al. On site construction of fracturing geologic characteristic analysis on small scale test [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007, 29(1): 61-64.
- [9] 梁冲, 尚会昌, 卢拥军, 等. 压前测试评价在异常高压致密气藏应用研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2011, 33(1): 95-101.
- LIANG Chong, SHANG Huichang, LU Yongjun, et al. Application and research of pre-frac testing technology in abnormal high pressure tight gas reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011, 33(1): 95-101.
- [10] 曾博, 王莉, 张晓伟. 小型压裂测试分析方法在页岩气开发中的应用[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(8): 151-155.
- ZENG Bo, WANG Li, ZHANG Xiaowei. Application of mini-frac analysis in the development of shale plays [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(8): 151-155.
- [11] 方伟. 一种确定低渗油藏合理试井测试时间的方法[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(10): 38-39.
- FANG Wei. A method to determine the reasonable well test time of low permeability reservoir [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2018, 38(10): 38-39.
- [12] 敬季昀, 郭布民, 王杏尊, 等. 致密储集层小型压裂压降分析方法的改进与应用[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(3): 371-375.
- JING Jiyun, GUO Bumin, WANG Xingzun, et al. Improvement and application of pressure drop analysis method for mini-fracturing in tight reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(3): 371-375.
- [13] 陈作, 孟祥燕, 杜长虹, 等. 异常高地应力致密砂岩储层压裂技术研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(12): 92-94.
- CHEN Zuo, MENG Xiangyan, DU Changhong, et al. Fracturing techniques of tight sand reservoirs with abnormal high earth stress [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(12): 92-94.
- [14] 张健, 敬季昀, 王杏尊. 利用小型压裂短时间压降数据快速获取储层参数的新方法[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(4): 133-139.
- ZHANG Jian, JING Jiyun, WANG Xingzun. New method for obtaining reservoir parameters with a short time of pressure drop after mini-fracturing [J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(4): 133-139.
- [15] 陈挺, 邹清腾, 卢伟. 海安凹陷阜二段致密油藏体积压裂技术[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(3): 375-380.
- CHEN Ting, ZOU Qingteng, LU Wei. Volumetric fracturing technology for the tight oil reservoir in Fu 2 formation of the Haian sag [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(3): 375-380.
- [16] 罗攀登, 王洋, 李春月, 等. 小型压裂测试技术在探井中的应用[J]. 新疆石油天然气, 2014, 10(2): 57-60.
- LUO Pandeng, WANG Yang, LI Chunyue, et al. The application of mini-frac technology in exploration wells [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2014, 10(2): 57-60.
- [17] 张永成, 赵祉友. 松软低渗储层煤层气水平井小型压裂测试技术应用[J]. 煤炭工程, 2017, 49(9): 130-133.
- ZHANG Yongcheng, ZHAO Zhiyou. Application research on mini-frac test in soft and low permeability coal seam in horizontal well [J]. Coal Engineering, 2017, 49(9): 130-133.
- [18] 张逸群, 余刘应, 张国锋. 基于微注入压降测试的页岩气储层快速评价方法[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(3): 107-112.
- ZHANG Yiqun, YU Liuying, ZHANG Guofeng. Rapid evaluation of shale reservoirs based on pre-frac injection/falloff diagnostic test [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(3): 107-112.
- [19] 万仁溥, 罗英俊. 采油技术手册(修订本)第九分册[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 49-50.
- [20] 黄琼冰, 鹿天柱, 寇永强, 等. 小型压裂技术的应用[J]. 油气井测试, 1998, 7(2): 59-63.
- HUANG Qiongbing, LU Tianzhu, KOU Yongqiang, et al. Application of small scale fracturing technology [J]. Well Testing, 1998, 7(2): 59-63.
- [21] 张旭, 蒋廷学, 贾长贵, 等. 页岩气储层水力压裂物理模拟试验研究[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(2): 70-74.
- ZHANG Xu, JIANG Tingxue, JIA Changgui, et al. Physical simulation of hydraulic fracturing of shale gas reservoir [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(2): 70-74.
- [22] NOLTE K G. Determination of fracture parameters from fracturing pressure decline [C]. SPE 8341, 1979.

编辑 刘振庆

第一作者简介: 张超, 男, 1986 年出生, 工程师, 2009 年毕业于中国石油大学(北京)石油工程专业, 现从事压裂设计、工艺技术及现场指挥工作。电话: 18102312075; Email: zhangchao39@cnooc.com.cn。通信地址: 山西省吕梁市临县白文镇秦家坪村中海油能源发展股份有限公司山西分公司压裂基地, 邮政编码: 033299。