

页岩气微注压降测试方法

邹顺良

中石化江汉石油工程有限公司页岩气开采技术服务公司 湖北武汉 430074

通讯作者:zou.sl.osjh@sinopec.com

项目支持:中国石油石化集团公司重点科技项目“涪陵地区页岩气井流动特征研究”(JP15034)

引用:邹顺良. 页岩气微注压降测试方法[J]. 油气井测试, 2018, 27(1): 37-41.

Cite: ZOU Shunliang. Shale gas injection/fall off testing method [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 37-41.

摘要 微注压降测试方法可使超低渗透的页岩储层在短时间内出现拟径向流,可以解决传统压力恢复测试在页岩储层应用中难以达到拟径向流的难题,从而快速准确获取页岩储层原始地层压力、储层渗透率及地层可压性等参数,为压裂优化、产能评价等提供依据。通过对微注压降测试原理分析,针对涪陵页岩气井特点,开展了设备配套、工艺优化研究,并在涪陵页岩气田应用5井次,各井均在15 d以内出现了拟径向流,解释获取的储层参数与实验结果具有较好一致性,说明该测试方法适用于页岩储层测试评价,具有施工周期短、占用设备少的优点,是一种经济、高效、安全的试井测试手段。

关键词 页岩气;微注压降;试井测试;G函数;拟径向流;原始地层压力;渗透率;裂缝闭合

中图分类号:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.01.006

Shale gas injection/fall off testing method

ZOU Shunliang

Shale Gas Mining Technology Services Company, Sinopec Jiangnan Oilfield Service Co., Ltd, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract: The injection/fall off testing method can make the formation of ultra-low permeability shale reservoir reach pseudo-radial flow in a short time, which can solve the difficult problem of pseudo-radial flow in the formation of shale being difficult to appear by applying traditional pressure recovery testing. The parameters of initial formation pressure, reservoir permeability and fracability of shale reservoirs can be quickly and accurately obtained to provide basis for fracturing optimization and productivity evaluation. Through the analysis of the testing principle of mini injection/falloff, aiming at the characteristics of Fuling shale gas well, equipment matching and process optimization research were carried out. This method has been applied in 5 wells in the Fuling shale gas field, and all the wells reached pseudo-radial flow regime within 15 days. The results show that the injection/falloff testing method is suitable for the evaluation of shale reservoirs. At the same time, this testing method has short construction period and less equipment occupancy, so it is an economical, efficient and safe well testing method.

Keywords: shale gas; injection/fall off; well testing; G function; pseudo-radial flow; initial formation pressure; permeability; fracture closure

页岩气层具有超低渗透特征,流体流动极其微弱,难以形成拟径向流^[1],采用传统压力恢复测试^[2]方法求取储层原始地层压力、渗透率及地层可压性等参数非常困难^[3]。在涪陵页岩气开发初期的一些DST压力恢复测试中都未取得可信的测试结果。微注压降测试^[4]又称诊断性压裂注入测试(Diagnostic Fracture Injection Tests, DFIT),该方法是由Nolte^[5]在Horner压恢测试理论基础上改进推导出的压降理论发展而来,其与小压测试^[6]方法相似,但两者又存在一定区别^[7]。小压测试应用比较

普遍^[8],其着重关注于获取具体的压裂设计参数,如液体效率及滤失系数等^[9],而DFIT对其进行了进一步的拓展,可以获得原始地层压力、裂缝闭合压力、地层渗透率以及地层滤失类型等额外参数^[10]。微注压降测试以恒定的微小排量向储层持续注入一定量液体,使地层产生微破裂,并在井筒周围产生一个高于原始储层压力的分布区,然后关井,裂缝内的液体在压差下滤失到地层,并逐渐与原始储层压力趋于平衡^[11]。基于不稳定试井原理,分析压降变化曲线获取地层可压性、原始地层压力、有效渗透率等

参数。由于产生的微裂缝能够穿透近井筒的地层伤害区^[12],提供井筒与地层之间比较好的流动通道,使地层能够在较短的时间内出现拟径向流。

微注压降测试资料的分析分为裂缝闭合前和裂缝闭合后两部分来完成^[13]。裂缝闭合前分析^[14](Pre-Closure Analysis, PCA)使用特殊的差分方法和时间函数(G函数、平方根函数),主要用于辨识滤失特性和裂缝闭合参数等。裂缝闭合后分析^[15](After-Closure Analysis, ACA)和常规的压力传导试井分析流程相似,通过脉冲求导识别地层流动状态的方法来获取储层的渗透率和原始地层压力。

国内外虽有微注压降测试方法理论研究^[16],但实际应用案例较少,目前只在煤层气有所应用^[17],但和页岩等致密储层还有诸多差异^[18]。基于常规地层测试方法不再适用于页岩储层,亟需一种可行的地层测试方法。经过调研分析,结合涪陵页岩气采用空井筒压裂试气的开发工艺特点,论证了采用微注压降测试方法来快速求取相关地层参数的可行性,并配套相应的软硬件设备,组织实施了多口井的微注压降测试施工,成功取得了原始地层压力等储层参数,解决了页岩储层地层测试难题,为压裂优化、产能评价等提供可靠依据。

1 施工优化研究

页岩气储层渗透率范围多在 $0.000\ 1\times 10^{-3}\sim 0.01\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,依靠自身压力恢复,流体流动极其微弱,难以形成拟径向流。通过人为提高外部压力,使流体向地层渗透,可实现地层形成拟径向流。试井模拟显示,微注压降测试达到拟径向流的时间仅为压力恢复测试的1/10。

1.1 设备仪器的选择

使地层产生短时间可闭合的微裂缝,是成功实现微注压降测试的关键,因此,泵注过程的精确控制至关重要,需选择操作稳定可靠的双机双泵来实施泵注作业。

施工曲线的解释评价过程就是寻找压力与时间导数的细微变化。因此,对监测压力计的数据记录精度要求较高,常规压力计已不能满足要求,为此采用分辨率为 $2\times 10^{-4}\ \text{MPa}$ 的高精度压力计。根据经验,按以下采样密度即可满足解释要求:注入期间为1 s采样1个点;关井压降期间,6 h内为1 s采样1个点,6~20 h内为10 s采样1个点,20 h后为30 s

采样1个点。由于使用的压力计精度极高,任何压力波动都将使测试数据难以分析,甚至导致测试失败,因此,应避免压力计受到干扰,施工中需要地面和井下保持安静的环境才能取得理想的结果。

1.2 注入液体的选择

压裂时一般选用凝胶或其他非牛顿液体,而微注压降测试则应选取清水或柴油等牛顿非造壁性液体。原因分析如下:未受污染的岩石模型可以用恒压边界条件下的一维线性流模型来描述。远场孔隙压力为常数,裂缝面流体压力为时间的常量。最初阶段,压力梯度和滤失速率很高,随时间推移,流体深入储层,压力梯度和滤失速率逐渐降低。若注入液体具有一定的造壁性,则演变为一种组合滤失模型,大致包括高渗透率的远场储层区、近裂缝影响区和薄滤饼区。如果在裂缝面形成滤饼,压降在通过滤饼时将被消耗,这时基于滤失速率计算的远场压力梯度会偏小,闭合后分析得出的地层流动系数不准确。因此,直接选用清水作为注入液体即可满足DFIT测试,同时清水成本低,经济性好,如果地层水敏性较强,应使用KCl溶液,防止粘土膨胀,减少对地层的伤害。

1.3 施工参数的确定

在低注入排量条件下,达到拟径向流所需时间较短,在高注入排量条件下,将保持很长一段时间的拟线性流状态,因此达到拟径向流所需时间较长。根据经典不稳定压力试井理论,应使地层尽早出现拟径向流状态,故应使用低注入排量,但过低的注入排量可能使裂缝不能贯穿整个测试层厚度。在低渗透率条件下,可闭合裂缝的开启和延伸不需要大排量,可以用径向达西定律^[19]计算特定条件下的适合排量,即

$$q_{i,\max} = \frac{0.372Kh(p_{\max} - p_i)}{\mu\beta\left(\ln\frac{r_e}{r_w} + S\right)}$$

式中: $q_{i,\max}$ 为最大注入排量,L/min; K 为储层渗透率, $10^{-3}\ \mu\text{m}^2$; h 为储层厚度,m; p_{\max} 为地层破裂压力,MPa; p_i 为储层原始地层压力,MPa; μ 为流体黏度,MPa.s; β 为流体体积系数,无因次; r_e 为泄流半径,m; r_w 为井筒半径,m; S 为表皮系数,无因次。

液体的注入都有伤害储层的风险,应尽量减少注入量,但同时又需使储层产生适当裂缝,能够穿透

近井筒的地层伤害。根据相关研究,钻完井滤液污染半径大约为 $5\text{ m}^{[20]}$,因此,DFIT 形成的裂缝半长应不小于 5 m ,注入量可由以下公式计算。根据体积平衡方程,有

$$Q_{inj} = Q_L + Q_F$$

其中 $Q_L = 0.06Ap_{net}Kt/\mu$

$$Q_F = w_f A$$

$$A = 2x_f H$$

则 $Q_{inj} = (0.06Ap_{net}Kt)/\mu + 2x_f w_f H$

压裂过程中岩石的形变和水力裂缝宽度可由下面的方程描述:

$$w_f = \pi p_{net} H(1-\nu^2)/2000E$$

式中: Q_{inj} 为注入量, m^3 ; Q_L 为滤失量, m^3 ; Q_F 为裂缝中流体体积, m^3 ; p_{net} 为净压力,MPa; K 为储层渗透率, $10^{-3}\ \mu\text{m}^2$; μ 为液体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; t 为时间,h; H 为裂缝高度,m; ν 为地层岩石泊松比,无因次; E 为地层岩石杨氏模量, $10^4\ \text{MPa}$ 。

将上述公式联立,给定一个裂缝高度和裂缝半长,估算出大致的注入量,根据前述确定的注入排量,即可确定相应泵注时间。

理论分析和实践表明:在涪陵页岩储层渗透性($0.0001\times 10^{-3}\sim 0.0020\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$)条件下,排量为 $150\sim 500\ \text{L}/\text{min}$,地层破裂后持续泵注 $10\sim 30\ \text{min}$,泵注总量控制在 $5\sim 15\ \text{m}^3$,即可取得较好的测试效果。

2 应用实例

到 2017 年 2 月底,微注压降测试在涪陵页岩气示范区不同区块已成功应用 5 口井。施工成功率为 100%,均在 15 d 以内出现了地层拟径向流状态,并准确求取了裂缝闭合压力、原始地层压力、储层渗透率等重要参数。下面以涪陵页岩气田 A、B 两口页岩气井为例介绍测试过程及资料分析。

2.1 A 井实例

A 井测试点垂深为 $3361.57\ \text{m}$,测试层厚度为 $20\ \text{m}$ 。采用高精度电子压力计在井口监测微注压降测试全过程。施工中用双机双泵向该井 $\Phi 139.7\ \text{mm}$ 套管连续阶梯式注入密度为 $1.0\ \text{g}/\text{cm}^3$ 的清水 $9\ \text{m}^3$,关井测压降 308 h。施工泵注曲线如图 1 所示,从图中可以看出,地层破裂明显,地层破裂后,持续注入,泵压稳定。

如图 2 所示,G 函数中压力叠加导数曲线(Gdp/dG)从直线向下偏离,同时满足图 3 中 $t^{1/2}$ 函

数中压力导数曲线($dp/dt^{1/2}$)的最高位置,即为正确的裂缝闭合点。求出 A 井闭合时间为 $6.3\ \text{h}$,井口瞬间关井压力为 $32.3\ \text{MPa}$,井口闭合压力为 $28.9\ \text{MPa}$,计算净压力值为 $3.4\ \text{MPa}$,推算井底闭合压力为 $61.8\ \text{MPa}$ 。这些裂缝闭合的相关参数是传统试井无法得到的,可见 DFIT 测试可获得更为丰富的地层信息。

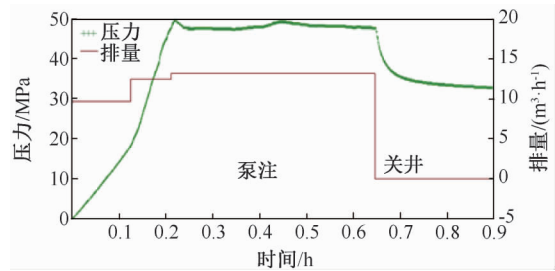


图 1 A 井微注压降测试泵注曲线
Fig.1 Pumping curve of injection/falloff testing curve of well A

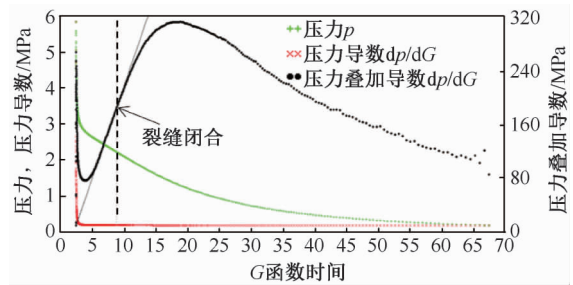


图 2 A 井微注压降测试 G 函数分析曲线
Fig.2 G-function analysis of injection/falloff testing of well A

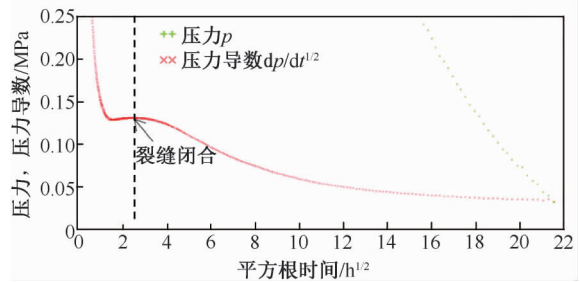


图 3 A 井微注压降测试 $t^{1/2}$ 函数分析曲线
Fig.3 $t^{1/2}$ Function analysis of injection/falloff testing of well A

在裂缝闭合后,选取闭合时间,进行 ACA 分析。ACA 曲线可用于确定裂缝闭合后可能的两种流动形态特征:拟线性流、拟径向流。拟线性流时,在 ACA 图中压差和半对数导数曲线呈现斜率为 $1/2$ 的特征;拟径向流时,压差曲线和半对数导数曲线重合,且呈现斜率为 1 的特征。由图 4 可知,A 井在裂缝闭合后 199 h 形成斜率为 1 的拟径向流,计算测试层地层压力为 $50.76\ \text{MPa}$,地层压力系数为 1.54。

根据拟径向流阶段计算地层流度为 $0.0381 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 / (\text{mPa} \cdot \text{s})$, 有效渗透率为 $0.000874 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

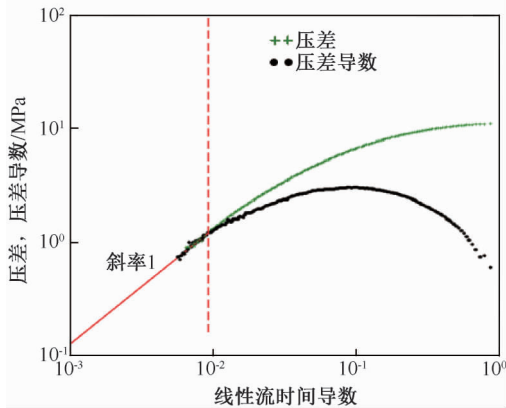


图4 A井ACA双对数分析图
Fig.4 ACA Log-log analysis diagram of well A

使用压降导数的典型双对数曲线,通过压降导数特殊斜率直线识别流型并求得地层参数。压差导数 $3/2$ 斜率直线表示裂缝闭合前地层拟线性流,压差导数 0 斜率直线表示裂缝闭合后地层拟径向流,压降导数 $-1/2$ 斜率直线表示裂缝闭合后地层拟线性流,压降导数 -1 斜率直线表示裂缝闭合后地层拟径向流^[21-22]。如图5双对数曲线诊断分析可知,在裂缝闭合前出现拟线性流,求解出裂缝半长为 16 m ,裂缝闭合后出现短暂拟线性流,之后出现明显的拟径向流,获取地层系数为 $0.01774 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$,计算平均有效渗透率为 $0.000887 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,与ACA分析结果一致。

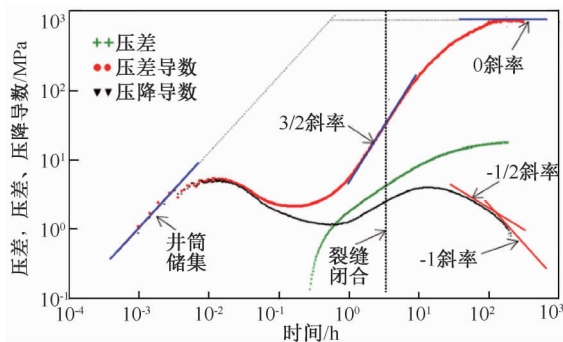


图5 A井双对数诊断图
Fig.5 Log-log diagnosis analysis diagram of well A

2.2 B井实例

B井测试点垂深为 2577.28 m ,测试层厚度为 15 m 。如图6所示,以排量 $0.22 \text{ m}^3 / \text{min}$,累计泵注清水 11.85 m^3 ,地层破裂压力低,破裂特征明显,具有较好可压性。总共关井测压降 302 h ,在关井 241.3 h 时出现拟径向流。

ACA分析如图7所示,B井在关井 241.3 h 开始出现拟径向流,且后期特征明显,计算测试层(斜深 4602.25 m /垂深 2577.28 m)压力为 41.764 MPa ,折算地层压力系数 1.652 ,属于高压系统。分析地层流度(K/μ)为 $0.01731 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 / (\text{mPa} \cdot \text{s})$,有效渗透率为 $0.00529 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

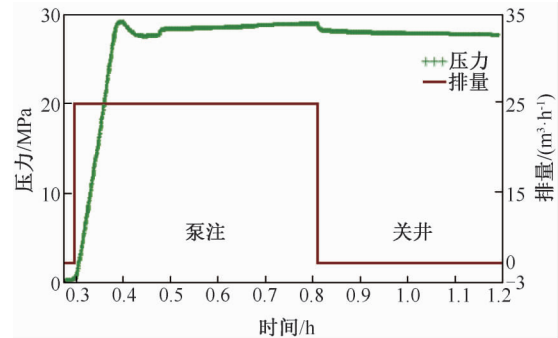


图6 B井微注压降测试泵注曲线
Fig.6 Pumping curve of injection/falloff testing curve of well B

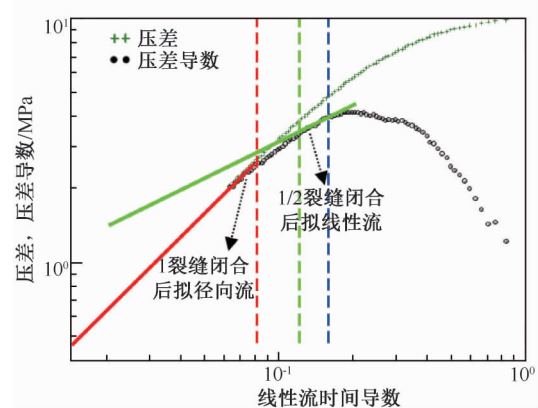


图7 B井ACA双对数分析图
Fig.7 ACA Log-log analysis diagram of well B

通过图8双对数分析,得出等效裂缝半长(x_f) 15.1 m ,地层系数(Kh) $0.128 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$,有效渗透率 $0.00512 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,与ACA分析结果一致。综合计算平均有效渗透率为 $0.00519 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

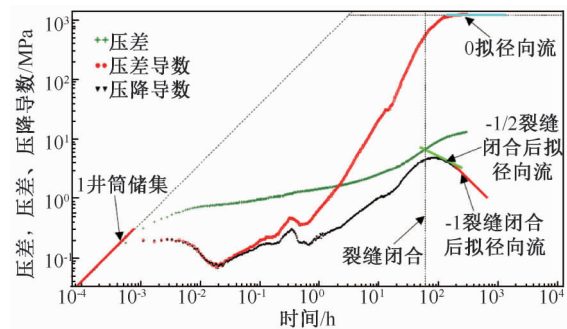


图8 双对数诊断图
Fig.8 Log-log diagnosis analysis diagram

实例分析结果与压后测静压值及物性实验值匹配度好,说明该测试方法适用于低渗透页岩储层。

3 结论

(1)DFIT 测试可以快速准确获取页岩储层原始地层压力、储层渗透率及地层可压性等参数,结果可靠,并能获取比传统压力恢复测试更为丰富的地层信息,为压裂优化、产能评价预测等提供依据。

(2)影响微注压降测试分析的两个关键因素为排量 and 总液量,必须精确记录泵注程序,以准确判断地层微破裂点的出现,严格控制排量和总液量。

(3)涪陵页岩气田 DFIT 测试的成功实施,说明该测试方法适用于涪陵超低渗透页岩储层,具有良好的应用推广价值。

致谢:感谢重庆涪陵页岩气勘探开发有限公司提供测试实例。

参 考 文 献

- [1] NOLTE K G. Fracture design considerations based on pressure analysis [C]. SPE10911, 1988.
- [2] HORNER D R. Pressure build-up in wells [J]. Proc Third World Pet Cong the Hague, 1951, 11(2):503-523.
- [3] NOLTE K G. Fracture pressure analysis for non-ideal behavior [C]. SPE20704, 1991.
- [4] CASTILLO J L. Modified fracture pressure decline analysis including pressure-dependent leak off [C]. SPE16417, 1987.
- [5] GODBEY J K, HODGES H D. Pressure measurements during formation fracturing operations [J]. Journal of Petroleum Technology, 1958, 213(3):65-69.
- [6] LEE W S. Study of the effects of fluid rheology on minifrac analysis [C]. SPE16916, 1987.
- [7] 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, 18(8):151-154. ZENG Bo, WANG Li, ZHANG Xiaowei. Application of minifrac analysis in the development of shale plays [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 18(8):151-154.
- [8] 黄琼冰.小型压裂技术的应用[J].油气井测试, 1998, 7(2):59-63. HUANG Qiongbing. Application of small scale fracturing technology [J]. Well Testing, 1998, 7(2):59-63.
- [9] 张旭东,陈勉,张国强,等.小型压裂压降分析新方法及其应用[J].江汉石油学院学报, 2002, 24(4):90-91. ZHANG Xudong, CHEN Mian, ZHANG Guoqiang *et al.* New method of minifrac pressure analysis and its application [J]. Journal of JiangHan Petroleum Insititute, 2002, 24(4):90-91.
- [10] NOLTE K G. Determination of fracture parameters from fracture pressure decline [J]. Applied Mechanics & Materials, 1979, 154(8):585-588.
- [11] NOLTE K G, MACK M G, LIE W L. A systematic method of applying fracture pressure decline [C]. SPE25845, 1993.
- [12] NOLTE K G. Application of fracture design based on pressure analysis [J]. Production Engineering, 1988, 3(1):31-42.
- [13] MEYER B R, HAGEL M W. Simulated mini-frac analysis [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1989, 28(5):63-73.
- [14] BARREE R D, BARREE V L, CRAIG D P. Holistic fracture diagnostics: consistent interpretation of prefrac injection tests using multiple analysis methods [C]. SPE107877, 2009.
- [15] NOLTE K G. Background for after-closure analysis of fracture calibration tests [C]. SPE39407, 1997.
- [16] BARREE R D, MUKHERJEE I I. Determination of pressure dependent leak off and its effect on fracture geometry [C]. SPE36424, 1996.
- [17] 黄天朋.煤层气注入/压降测试方法分析及应用[J].价值工程, 2010, 29(23):132-133. HUANG Tianpeng. Analysis and application of CBM injection/compression test methods [J]. 2010, 29(23):132-133.
- [18] 杨怀成,钱卫明,房国平,等.煤层气井注入/压降测试工艺技术与进展[J].油气藏评价与开发, 2012, 2(2):70-73. YANG Huaicheng, QIAN Weiming, FANG Guoping *et al.* Technology of CBM wells injection/falloff test and its progress [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2012, 2(2):70-73.
- [19] BARREE R D, MISKIMINS J L, GILBERT J V. Diagnostic fracture injection tests: common mistakes, misfires and misdiagnoses [C]. SPE169539, 2014.
- [20] NOLTE K G. A general analysis of fracturing pressure decline with application to three models [C]. SPE12941, 1986.
- [21] 赵润冬,王锦昌,周瑞立,等.大牛地气田分段压裂水平井压力恢复试井曲线特征[J].油气井测试, 2017, 26(4):22-24. ZHAO Rundong, WANG Jinchang, ZHOU Ruili *et al.* Curve characteristics of pressure build up welling test for staged fracturing to horizontal well in daniudi gas field [J]. Well Testing, 2017, 26(4):22-24.
- [22] 郝英芝,蒋凯军,郭权.利用生产资料分析水平井流动阶段[J].油气井测试, 2017, 26(4):30-32. HAO Yingzhi, JIANG Kaijun, GUO Quan. Using production data to analyze flow stage of horizontal well [J]. Well Testing, 2017, 26(4):30-32.

编辑 许兰婷

第一作者简介:邹顺良,男,1987年出生,工程师,2010年毕业于中国石油大学(北京)地质工程专业,现主要从事油藏评价工作。电话:17607192722; Email: zousl.osjh@sinopec.com。地址:湖北武汉东湖高新区大学园路18号,邮政编码:430074。