

压裂后不稳定试井早期恢复压力拟合重建方法

王海兵¹, 陶静¹, 彭丽²

- 1. 中国石油青海油田分公司井下作业公司 青海茫崖 816400
- 2. 中国石油华北油田公司河北储气库分公司 河北廊坊 065000

通讯作者: Email: wanghbqhjx@petrochina.com.cn

引用: 王海兵, 陶静, 彭丽. 压裂后不稳定试井早期恢复压力拟合重建方法[J]. 油气井测试, 2023, 32(4): 68-73.

Cite: WANG Haibing, TAO Jing, PENG Li. Fitting and reconstruction method of early recovery pressure for unstable well testing after fracturing[J]. Well Testing, 2023, 32(4): 68-73.

摘要 低渗、特低渗油气藏在大规模压裂后的不稳定试井, 会因为关井不及时、井口漏失等原因, 造成早期压力恢复数据缺失、跳点等, 导致解释误差较大甚至不能解释。基于对压裂后不稳定试井早期压力恢复曲线变化规律的研究, 找出压裂后不稳定试井曲线形态特征, 简化数学模型; 对比拟合效果, 优选给出压裂排液关井早期井底恢复压力的经验公式, 对缺失或异常的早期压力恢复数据进行外插值重建修正。C904井采用重建后的早期压力恢复数据与压力恢复实测历史数据合并后进行地层参数解释, 整合后导入试井软件进行地层参数解释, 曲线拟合效果较好, 能较准确地解释出地层参数。该方法可较好地对压裂后存在异常的早期不稳定试井恢复压力进行重建, 对压裂抽汲后的不稳定试井恢复压力重建亦有较好的借鉴意义。

关键词 压裂; 不稳定试井; 压力恢复; 数据缺失; 跳点; 压力重建; 试井解释; 外插值; 最小二乘法

中图分类号: TE357 文献标识码: A DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.04.012

Fitting and reconstruction method of early recovery pressure for unstable well testing after fracturing

WANG Haibing¹, TAO Jing¹, PENG Li²

- 1. Downhole Operation Company of PetroChina Qinghai Oilfield Company, Mangya, Qinghai, 816400, China
- 2. Hebei Natural Gas Storage Company, PetroChina Huabei Oilfield Company, Langfang, Hebei 065000, China

Abstract: Transient well testing after large-scale fracturing in low and ultra-low permeability oil and gas reservoirs will lead to the loss of early pressure build-up data and jump point due to untimely shut-in and wellhead leakage, etc., and lead to difficulties or errors in model diagnosis. Based on the study of the variation law of the pressure build-up curve in the early stage of the unstable well test after fracturing, the morphological characteristics of the unstable well test curve after fracturing are found out, and the mathematical model is simplified, the empirical formula of early bottom hole build-up pressure is optimized, and the missing or abnormal early pressure build-up data are reconstructed and corrected by interpolation. By comparing the simulated C904 unstable well test data with the measured unstable well test data, the formation parameters are interpreted by combining the reconstructed early pressure build-up data with the measured historical pressure build-up data, the curve shape characteristic is obvious, the explanation result is more accurate. This method can be used to reconstruct the abnormal early instable well test recovery pressure after fracturing, and it can also be used for reference to reconstruct the instable well test recovery pressure after fracturing and swabbing.

Keywords: fracturing; transient well testing; pressure recovery; data missing; jump point; pressure reconstruction; well testing interpretation; interpolation; least square method

低渗和超低渗油气藏通过体积压裂的方式能在长、宽、高等三个方向实现储层的体积改造, 可高效改善地层渗透率、增加储层与裂缝的接触面积、缩短各方向油气从基质到裂缝的渗流移动距离^[1-2]。在大规模压裂后, 需要自喷、抽汲等方式进行排液、求产。自喷、抽汲排液、求产时间通常为

20~40 d, 然后下入高精度电子压力计至油层上界, 采用井口关井的方式进行压力恢复不稳定试井^[3-5]。

而在实际生产中, 会出现先关井、后下入高精度电子压力计, 所记录的压力恢复数据为不稳定试井中、后期数据, 而早期压力恢复数据没有录取; 部

分井在关井过程中,因井口闸门漏失、测试防喷管漏失等原因,造成不稳定试井早期压力恢复数据有跳点。用缺失早期压力恢复或有跳点或抽汲时间较长的实测历史数据进行地层参数解释,会导致双对数-导数曲线、霍纳分析曲线变异,诊断模型困难或错误,解释结果误差较大甚至不能解释^[6]。

袁冬蕊等^[7]针对压裂抽汲后不稳定试井压力恢复早期资料采用对勾函数进行拟合修正;张雁等^[8]针对常规抽汲求产对不稳定试井压力恢复曲线的影响采用划分多个流动段的方法,运用叠加原理对压力恢复曲线进行拟合分析,以期降低解释误差;刘洪等^[9]针对抽汲井极易井底压力变化,建立了考虑井筒储集效应和表皮系数的圆形封闭地层,并应用 Crank-Nicholson 格式离散后求解。但上述方法仍有局限,不能完善解释早期压力资料缺失或存在跳点的压裂后不稳定试井资料。本文通过分析压裂后不稳定试井曲线形态,对模拟不稳定试井数据和实测不稳定试井数据对比,从半对数特征曲线入手,采用多种函数拟合不稳定试井曲线,将外插值重建后的早期压力恢复数据与压力恢复实测历史数据合并后进行地层参数解释,曲线形态特征明显、解释结果更为准确。

1 压力恢复早期缺失数据的拟合重建方法

为了解释早期压力资料缺失或存在跳点的压裂后不稳定试井资料,需研究压裂后不稳定试井曲线形态特征,寻找简化数学模型、经验公式,给出插值算法,以拟合重建早期缺失的压力恢复数据,并使跳点变得光滑。

1.1 压裂后不稳定试井曲线形态

常规油气井的压力恢复不稳定试井半对数特征曲线可分为:续流段、恢复段、径向流段、边界反映段,如图1。在续流段,即关井早期,仍有原油、压裂残液、地层水等地层流体不断从储层流入油管 and 环空,但流量随井筒压力升高逐渐变小;在恢复段,续流基本结束;在径向流段和边界反映段,压力恢复曲线在双对数-导数图、半对数图上呈现特定形态。

而低渗、超低渗储层在大规模水力压裂过程中,当压裂液泵入地层以后,在垂直于地层最小主应力方向压开地层产生裂缝,裂缝沿地层最大主应力方向发育;停泵返排后,在地应力作用下裂缝开

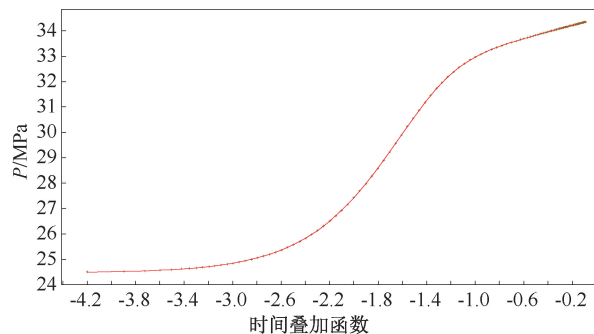


图1 常规油气井压力恢复不稳定试井半对数特征曲线
Fig.1 Semi-logarithmic characteristic curve of pressure build-up for a well with a fracture

始闭合,充填压裂砂的部分被保存下来,形成了支撑裂缝。即近井带渗透率显著提升,远井带依旧闭合,储层形成了因与井眼距离负相关的径向复合特征或双孔特征。地层流体在储层中的不稳定渗流可分为远井带到改造波及带、改造波及带到支撑裂缝、支撑裂缝到井筒等三个部分。

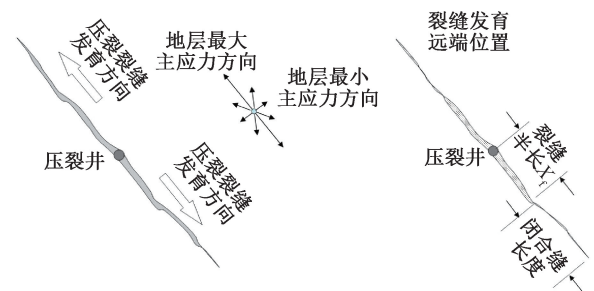


图2 压裂裂缝发育及存留机理示意图
Fig.2 Schematic Diagram of fracture development and retention mechanism

采用关闭井口闸门的方式进行压力恢复不稳定试井,由于水力压裂有效改变近井带储层渗流特征,使其压力恢复曲线形态与常规油气井的压力恢复曲线形态有很大区别。考虑井筒储集、表皮效应,关井后井底压力值可表示为

$$P_{wd} = \frac{uP_{(u)} + S}{u[1 + C_D u(uP_{(u)} + S)]} \quad (1)$$

式中: P_{wd} 为关井后井底无因次压力,无因次; $P_{(u)}$ 为压力,MPa; u 为拉式变量,无因次; S 为表皮系数,无因次; C_D 为无因次井筒储集系数。

在原始压力曲线和压力恢复双对数-导数曲线上,压裂后油气井不稳定试井早期曲线与常规油气井不稳定试井早期曲线无明显区别。但在半对数特征曲线上,压裂后不稳定试井与常规试井的曲线有明显区别,见图3,在关井早期的续流段后,由于近井带裂缝显示,曲线上翘,继续关井储层压力系统恢复平衡,即径向流段和边界反应段^[10-12]。

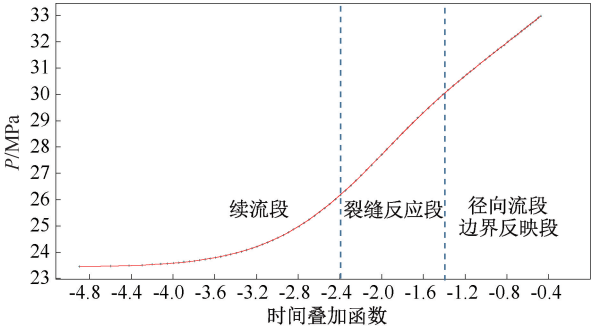


图3 压裂后油气井压力恢复不稳定试井半对数特征曲线
Fig.3 Semi-logarithmic characteristic curve of pressure build-up able well testing after fracturing

1.2 压裂后不稳定试井曲线简化数学模型

分析低渗、超低渗储层在大型水力压裂后油气井压力恢复不稳定试井半对数特征曲线,虽然后期曲线会因为地层、流体、边界等不同,反映为各类曲线^[13-14],但从数学上看,其早期续流段、裂缝反应段的压力恢复曲线可近似分为三段组成:续流段早期的近似直线、续流-裂缝反应段的过渡弧线、裂缝反应段的近似直线段。

其中续流段早期的直线趋近于

$$P = P_{ws}(0) \tag{2}$$

式中: $P_{ws}(0)$ 为初关井井底压力,MPa。

裂缝反应段的直线趋近于

$$P = P_i + m \times \lg t / (t + t_p) \tag{3}$$

式中: P_i 为地层原始压力,MPa; m 为有限传导垂直裂缝特征曲线斜率,无因次; t 为关井时间,h; t_p 为生产时间,h。

由续流段、裂缝反应段的压力曲线由两条近似直线和一条弧线组成,可将曲线简化近似为一条双曲线,曲线表达式为

$$\begin{aligned} [P - P_{ws}(0)] \times [(\lg t / (t + t_p) + A) \times \\ B - [P - P_{ws}(0)] \times C] = D \end{aligned} \tag{4}$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 为常数,是双曲线函数的待定系数。

式(3)中,在关井初始阶段, t 趋近于 0, $\lg t / (t + t_p)$ 趋近于 $-\infty$, $P - P_{ws}(0)$ 趋近于 0,即早期的直线趋近 $P = P_{ws}(0)$;在裂缝反应段,随着关井测压力恢复时间的延长, $\lg t / (t + t_p)$ 趋近 0, $P - P_{ws}(0)$ 趋近于斜率为 m 的直线、并与纵轴相交于点 $[0, P_i - P_{ws}(0)]$ 。所以用式(3)作为压裂后不稳定试井压力恢复早期压力的近似公式是合理的。

亦可用对勾函数、多项式函数、反正切函数、对数函数、水跃函数等各类函数拟合重建早期压力,只是待定系数等略有不同。表1 为各类函数拟合重建对比,通过对比优选双曲线函数作为拟合函数。

表1 各类函数拟合重建对比
Table 1 Comparison of function fitting and reconstruction

拟合方法	双曲线函数	对勾函数	二次多项式	三次多项式	反正切函数	对数函数	水跃函数
系数个数	4	4	4	5	3	3	5
自洽误差/kPa	2~5	17~20	11~18	9~13	31~52	84~412	38~235
重建误差/kPa	4~11	30~42	22~33	14~25	101~492	315~849	212~533
井储修正/%	3~8	30~40	20~30	15~25	40~50	50~60	45~55
备注	早期压力上翘,均需修正					修正较多,误差偏大	

1.3 储层压裂后不稳定试井早期压力重建和修正

将压力恢复不稳定试井实测压力、关井时间、生产时间代入式(3),得到系数 A 、 B 、 C 、 D 的超定方程组,运用最小平方 QR 分解法 (LSQR)^[15-16]、递推最小二乘法 (RLS)^[17-18]、最小均方法 (LMS)^[19] 等方法迭代解超定方程,即可确定双曲线函数的系数 A 、 B 、 C 、 D 。表2 为各迭代算法对比,通过对比,LSQR、RLS、LMS 等方法均能满足迭代解超定方程需求,只是迭代次数、计算时间稍有差距。

表2 各迭代计算方法对比
Table 2 Comparison of iterative computation methods

计算方法	LSQR	RLS	LMS
迭代次数	4	5	7
自洽误差/kPa	2~5	2~5	2~5
计算时长/ms	2	3	4

将关井时间代入确定系数的式(3),外插值重建压裂后不稳定试井早期压力。但在关井初期,初关井井底压力 $P_{ws}(0)$ 往往不够准确,需要通过井口压力、井内流体性质和密度、压力计下深等估算初关井井底压力 $P_{ws}(0)$ 的最小值和最大值,同时根据井筒储集阶段 $P_{ws}(t)$ 与 t 成正比,修正压裂后不稳定试井井筒储集阶段井底恢复压力。

1.4 储层压裂后不稳定试井早期压力重建步骤

采用双曲线拟合-外插值的方法重建储层压裂后不稳定试井早期压力恢复数据,由于受测试时各种因素的影响,可能会出现井筒储集阶段压力异常的情况,但只要关井时间准确,拟合压力误差约为 0.002~0.005 MPa,能较好满足压裂后压力恢复不稳定试井参数解释需要。拟合重建流程如图4,具

体拟合步骤为:

- ①收集原始资料;并根据生产制度、关井时间对原始压力数据进行数据变换;
- ②将变换后数据代入式(3),得到关于待定系数的超定方程;
- ③用 LSQR 方法迭代解超定方程,确定待定系数;
- ④利用回归后的式(3)对早期缺失数据进行外插值重建;
- ⑤利用 $P_{ws}(t)$ 与 t 成正比关系,修正井筒储集阶段井底恢复压力;
- ⑥检验初关井时间、初关井井底压力 $P_{ws}(0)$ 是否在估值范围内,如在估值范围内可进一步缩小误差后输出重建的早期压力恢复数据;如不在估值范围内,适当调整初关井时间、初关井井底压力 $P_{ws}(0)$ 后重新拟合,直至初关井时间、初关井井底压力 $P_{ws}(0)$ 在估值范围;
- ⑦将外插值构建后的早期压力恢复数据与实测压力恢复数据整合,输入试井软件进行地层参数解释。

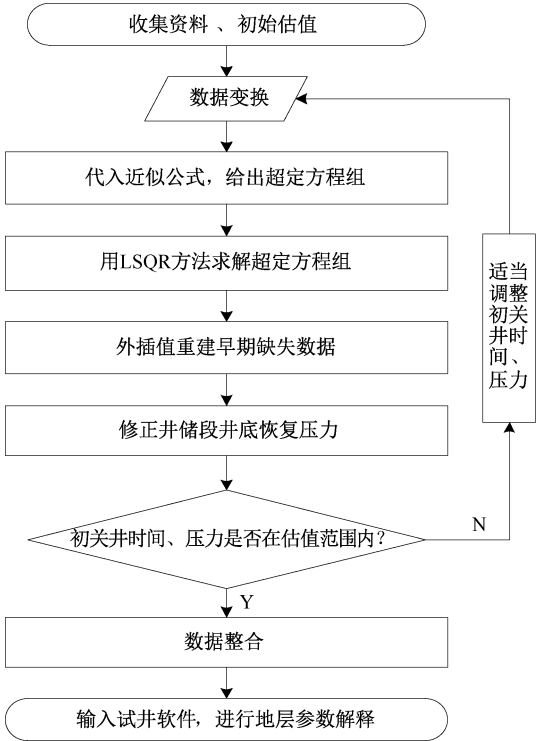


图 4 压裂后不稳定试井早期数据拟合、重建流程图
Fig. 4 Flow chart of early data fitting and reconstruction for transient well test after fracturing

2 应用实例

采用双曲线拟合-外插值的方法重建 C904 第 I

层组、Z105 第 I 层组等 2 井次压裂后不稳定试井早期压力恢复数据,均取得较好效果。

其中 C904 井是青海油田部署在柴达木盆地柴西坳陷的一口评价井。该井第 I 层组压裂施工后,采用自喷、抽汲、自喷的方式求产 32 d,后采用先关井、再下高精度电子压力计的方式进行压力恢复不稳定试井 18 d。从井口关井到压力计下至设计位置,压力恢复早期有 12.5 h 的压力历史数据未录取到。且关井后,井口闸门、测试防喷管多次漏失。从图 5 压力恢复早中期历史曲线放大图可以看出,压力恢复历史曲线多次跳点;从图 6 双对数-导数曲线形态可以看出,压力恢复曲线还处于恢复阶段向径向流阶段转换期,未出现系统径向流或拟径向流,无法进行地层参数解释。

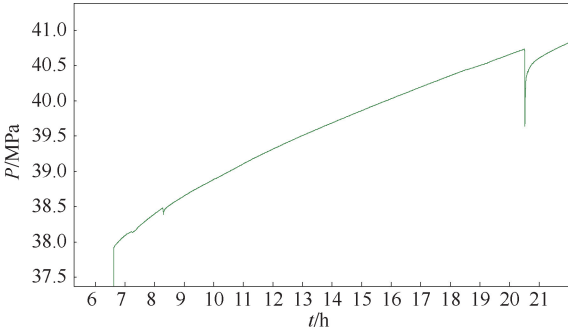


图 5 C904 井第 I 层组压力恢复早中期历史曲线放大图
Fig. 5 Enlarged Image of C904-1 formation enlarged history curve of early and middle stage pressure

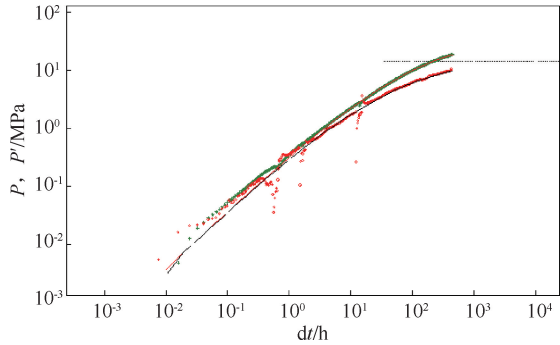


图 6 C904 井第 I 层组原始压力恢复双对数-导数曲线
Fig. 6 C904-1 formation dual logarithm-derivative curve of original pressure

采用双曲线拟合-外插值方法对 C904 井第 I 层组压裂后不稳定试井早期缺失压力数据进行重建、修正和整合,应用 Kappa Ecrin4. 01 软件对重建后的压力恢复数据进行地层参数解释,双对数-导数拟合图如图 7 所示、霍纳分析拟合图如图 8 所示。从图 7、图 8 可以看出,修正后的曲线出现了明显的裂缝特征、径向流及双孔显示,选择“变井储-有限传导垂直裂缝-双孔拟稳定-无限大”模型,解释出准

确的地层参数,具体解释结果见表 3。用表 3 数据拟合压力历史曲线(见图 9),压力历史曲线拟合效果较好。

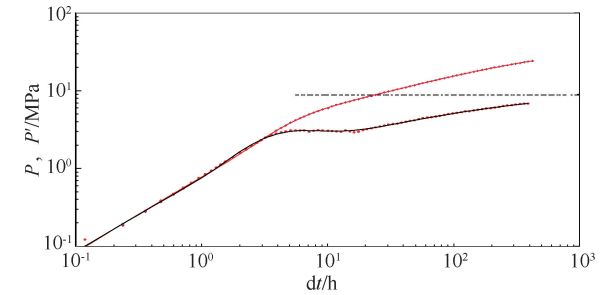


图 7 C904 第 I 层组压裂后重建压力恢复数据
双对数-导数曲线拟合图
Fig. 7 C904-1 double logarithm-derivative curve fitting
chart of pressure build-up data after fracturing

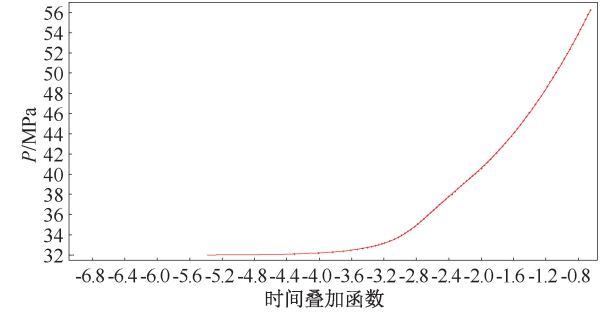


图 8 C904 第 I 层组压裂后重建压力恢复数据霍纳
分析拟合图
Fig. 8 C904-1 Horner analysis fit chart of pressure
build up data after fracturing

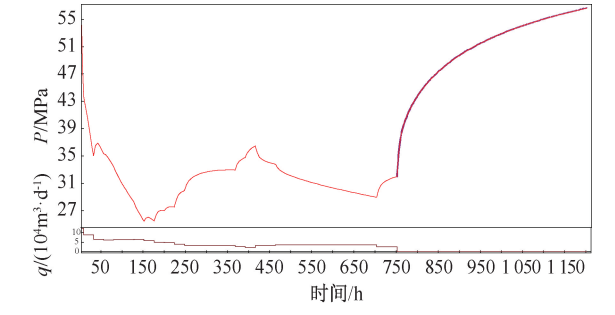


图 9 C904 第 I 层组压裂压力恢复历史曲线拟合图
Fig. 9 C904-1 history curve fitting of fracturing pressure
build-up

表 3 C904 第 I 层组压裂后重建压力恢复数据解释结果
Table 3 C904-1 interpretation results of pressure
build-up data after fracturing

参数名称	双对数分析结果
平均渗透率/(mD)	0.086 8
表皮系数	-6.35
井储系数/(m ³ MPa ⁻¹)	0.645
地层系数/(mD·m)	1.74
地层压力/MPa	68.103 3
裂缝半长/m	88.81

3 结论

(1)压裂后不稳定试井早期恢复压力拟合重建方法可较好地对压裂后存在异常的早期不稳定试井恢复压力进行重建,对压裂抽汲后的不稳定试井恢复压力重建亦有较好的借鉴意义。

(2)油气井压力恢复不稳定试井的测试早期数据是影响地层参数解释的关键环节,压裂后的不稳定试井非常因现场各种原因导致早期实测数据缺失或异常,本方法从压裂后不稳定试井压力恢复曲线的形态入手,给出了近似拟合关井后井底压力的公式、迭代回归及外插值方法。

(3)采用双曲线拟合压裂后不稳定试井压力重建早期压力恢复数据,整合后导入试井软件进行地层参数解释,曲线拟合效果较好,能较准确地解释出表皮系数、裂缝半长、地层原始压力等地层参数。

(4)压力恢复不稳定试井解释出的裂缝半长往往小于水力压裂参数模拟给出的裂缝半长,是因为水力压裂模拟的裂缝半长为压裂施工结束时的裂缝半长,经过放喷、抽汲等求产排液过程,远端裂缝地层逐渐闭合,裂缝半长因此缩短。

(5)建议在采用先下高精度电子压力计至设计井深、待地面流体稳定流动后再关井的方式进行压力恢复不稳定试井,同时强化井筒、井口、闸门、测试防喷管及连接处试压,以便录取完整的不稳定试井压力历史曲线,准确解释地层参数。

致谢:感谢青海油田勘探开发研究院、勘探事业部和现场施工队伍提供详细数据支持;感谢青海油田井下作业公司同意本文公开发表。

参考文献

[1] 吴奇,胥云,王晓泉,等.非常规油气藏体积改造技术——内涵、优化设计与实现[J].石油勘探与开发,2012,39(3):352-358.
WU Qi,XU Yun,WANG Xiaoquan, et al. Volume fracturing technology of unconventional reservoirs: connotation, optimization design and implementation [J]. Petroleum Exploration & Development, 2012;39(3):352-358.
[2] 吴奇,胥云,刘玉章.美国页岩气体积压裂改造技术现状对我国的启示[J].石油钻采工艺,2011;33(2):1-7.
WU Qi, XU Yun, LIU Yuzhang. The current situation of stimulated reservoir volume for shale in U. S. and its inspiration to China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011;33(2):1-7.
[3] 李波,蔡丽华.压裂井不稳定试井资料的分析应用[J].油气井测试. 2006(2):41-44.

- LI Bo, CAI Lihua. Analysis and application of able well test data in fractured well[J]. Well Testing, 2006(2): 41-44.
- [4] 王国先. 用不稳定试井资料研究油藏储集层流动系统模式:以准东油区为例[J]. 新疆石油地质, 1998, (1): 71-74.
- WANG Guoxian. Study on reservoir flow system model with able well test data: taking Zhundong oilfield as an example [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1998(1): 71-74.
- [5] 刘旭礼. 页岩气体压裂压后试井分析与评价[J]. 天然气工业, 2016, 36(8): 66-72.
- LIU Xuli. Well test analysis and evaluation after shale gas volume fracturing [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(8): 66-72.
- [6] 高炎, 汤传意, 张海涛, 等. 异常高压特低渗透油藏试井分析及应用[J]. 长江大学学报(自科版), 2016, 13(35): 47-52.
- GAO Yan, TANG Chuanyi, ZHANG Haitao, et al. Well test analysis and application in abnormal high pressure and ultra-low permeability reservoir[J]. Journal of Changjiang University, 2016, 13(35): 47-52.
- [7] 袁冬蕊, 陈恒, 张冕, 等. 非自喷油井压力恢复早期资料修正方法研究[J]. 油气井测试, 2014, 23(1): 20-23.
- YUAN Dongrui, CHEN Heng, ZHANG Mian, et al. Study on correction method of early data of pressure build-up in non-flowing oil wells [J]. Well Testing, 2014, 23(1): 20-23.
- [8] 张雁, 蒋凯军. 开井期间抽汲求产对压恢曲线试井分析的影响[J]. 油气井测试, 2005(5): 29-32.
- ZHANG Yan, JIANG Kaijun. Effect of swabbing production during well opening on well test analysis of pressure build-up curve[J]. Well Testing, 2005(5): 29-32.
- [9] 刘洪, 王新海, 王祖文, 等. 抽汲井测试资料数值试井分析[J]. 特种油气藏, 2007(3): 43-44.
- LIU Hong, WANG Xinhai, WANG Zuwen, et al. Numerical well test analysis of swabbing well test data [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2007(3): 43-44.
- [10] 陈晓明, 廖新维, 赵晓亮, 等. 直井体积压裂不稳定试井研究——双孔双区模型[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(26): 45-49.
- CHEN Xiaoming, LIAO Xinwei, ZHAO Xiaoliang, et al. Study on able well test of bfracturing in vertical wells —— two-hole and two-zone model[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(26): 45-49.
- [11] 王小鲁. 复杂储层压裂井不稳定渗流模型与试井分析方法研究[D]. 西南石油大学, 2015.
- WANG Xiaolu. Study on eady seepage flow model and well test analysis method of fractured well in complex reservoir[D]. Southwest Petroleum University, 2015.
- [12] 窦祥骥, 廖新维, 赵晓亮, 等. 确定致密气藏压裂井动态导流能力新方法[J]. 断块油气田, 2015, 22(5): 647-650.
- DOU Xiangji, LIAO Xinwei, ZHAO Xiaoliang, et al. A new method for determining dynamic conductivity of fractured wells in tight gas reservoirs[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(5): 647-650.
- [13] 陈昊枢, 廖新维, 高敬善, 等. 一种页岩油藏多段压裂水平井试井分析方法[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(3): 357-364.
- CHEN Haoshu, LIAO Xinwei, GAO Jingshan, et al. A well test analysis method for multi-section fracturing horizontal well in Shale Reservoir [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(3): 357-364.
- [14] 段永刚, 陈伟, 黄诚, 等. 有限导流垂直压裂井混合遗传自动试井分析[J]. 西南石油学院学报, 2000(4): 41-43.
- DUAN Yonggang, CHEN Wei, HUANG Cheng, et al. Automatic well test analysis of mixed genetic algorithm for vertical fracturing wells with finite conductivity[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2000(4): 41-43.
- [15] 何鹏辉, 李厚彪. 关于最小二乘 QR 分解算法 (LSQR) 的一个注记[J]. 计算数学, 2020, 42(4): 487-496.
- HE Penghui, LI Houbiao. A note on the least squares QR decomposition Algorithm (LSQR) [J]. Journal of Computational Mathematics, 2020, 42(4): 487-496.
- [16] 刘劲松, 刘福田, 刘俊, 等. 地震层析成像 LSQR 算法的并行化[J]. 地球物理学报, 2006(2): 540-545.
- LIU Jinsong, LIU Futian, LIU Jun, et al. Parallelization of LSQR algorithm for seismic tomography [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006(2): 540-545.
- [17] 王海宾, 王展青. 基于 RLS 的特征提取算法研究[J]. 电子测试, 2016(8): 36-37.
- WANG Haibin, WANG Zhanqing. Research on RLS based feature extraction algorithm [J]. Electronic Test, 2016(8): 36-37.
- [18] 杨铁军, 李军华. 基于 QR 分解的低复杂度 RLS 算法研究[J]. 机电设备, 2013, 30(4): 71-74.
- YANG Tiejun, LI Junhua. Low complexity RLS algorithm based on QR decomposition[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2013, 30(4): 71-74.
- [19] 李雅林, 谭立辉. 一种改进的归一化 LMS 算法[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2018, 36(5): 84-87.
- LI Yalin, TAN Lihui. Improved normalized LMS algorithm [J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2018, 36(5): 84-87.

编辑 邵振鹏

第一作者简介:王海兵,男,1983年出生,工程师,地球物理学学士,2006年6月毕业于成都理工大学地球物理学专业,主要从事试油试气、地层测试工作。电话 0937-8911187, 18997372891, Email: wanghbqhjx@petrochina.com.cn。通信地址:青海省海西州茫崖市花土沟镇井下作业公司办公小区,邮政编码:816400。