

# 油气井压力恢复试井解释关键技术

孙达

中国石油天然气股份有限公司吉林油田分公司钻井工艺研究院 吉林松原 138000

通讯作者:Email:sund-jl@petrochina.com.cn

引用:孙达. 油气井压力恢复试井解释关键技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(6): 73-77.

Cite: SUN Da. Key technologies for oil and gas well pressure buildup test interpretation [J]. Well Testing, 2018, 27(6): 73-77.

**摘要** 为提高油气井压力恢复试井解释结果的可靠性,提出了试井解释时需注意的数据预处理和模型诊断关键技术。在对比分析各个容易出现错误的双对数曲线形态基础上,归纳出数据预处理时,应剔除非点、选取初始点、加载生产时间、筛选数据点、适度“光滑化”导数曲线,保证试井曲线形态正确;模型诊断时,慎重选择试井解释模型,掌握大量试井曲线图形,并对图形进行分析和识别,使地层参数解释定量化,利用压力对时间的导数检验法,对试井资料进行诊断。此方法从2000年开始在吉林油气田试井解释中应用1000余井次,均达到预期效果。油气井压力恢复试井解释关键技术分析提高了地层参数的解释精度,为油藏动态描述提供可靠依据。

**关键词** 试井解释;数据预处理;模型诊断;双对数曲线;对比分析;压力恢复曲线

**中图分类号**:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.06.013

## Key technologies for oil and gas well pressure buildup test interpretation

SUN Da

*Drilling Technology Research Institute, PetroChina Jilin Oilfield Company, Songyuan, Jilin 138000, China*

**Abstract:** To improve the reliability of well test interpretation results of oil and gas wells, the key technologies of data preprocessing and model diagnosis that need to be paid attention to during well test interpretation were proposed. Based on comparative analysis of the log-log curve patterns that are prone to errors, removing the error points, selecting the initial point, loading the production time, sampling the data points and making the moderate derivative curve “smooth” should be done to guarantee correct well test curve shape during data preprocessing. During model diagnosis, carefully choosing the well test interpretation model, acquisition of a large number of well test curves and analysis and identification of them should be conducted to quantified the interpretation of formation parameters, and the pressure-time derivative method could be used to diagnose the well test data. Since 2000, this method has been applied in more than 1000 wells in Jilin oil and gas field, all of which have achieved the expected results. The key technologies analysis of oil and gas well pressure buildup test interpretation improves the interpretation accuracy of formation parameters and provides a reliable basis for reservoir dynamic description.

**Keywords:** well test interpretation; data preprocessing; model diagnosis; log-log curve; comparative analysis; pressure buildup curve

试井是动态监测的重要组成部分,是油气田勘探、评价、开发的“眼睛”。试井解释技术发展已经有90多年的历史。早在上世纪20年代,随着石油工业的发展,美国就已研制和使用最高读数压力计,测量井底最高压力,并把它作为地层压力应用于油藏工程研究之中。到30年代,麦斯凯特(Muskat)提出了用不稳定试井资料外推地层压力的理论和方法<sup>[1]</sup>。50年代,米勒(Miller)、戴斯(Dyes)和哈钦森(Hutchinson)以及赫诺(Horner)提出了单对数直线分析的理论和方法,即MDH法和

赫诺法<sup>[2-3]</sup>。1979年,Gringarten在前人基础上提出了双对数压力典型曲线分析法<sup>[4]</sup>。1983年,Bourdet又提出了压力导数典型曲线分析方法<sup>[5]</sup>。因此,Gringarten典型曲线与Bourdet压力导数典型曲线组合成复合图版<sup>[6]</sup>,成为了石油工业标准。90年代,又进一步将数值解法或油气藏数值模拟直接运用到资料解释过程之中,从而创建了崭新的“数值试井”方法<sup>[7-8]</sup>。2001年,Von Schroctet和Gringarten等把反褶积方法引入试井解释,使得试井解释模型的识别选择更加容易和准确<sup>[9-10]</sup>。

我国 20 世纪 40 年代,从国外引进井下压力计,在玉门油田进行测取地层压力的作业。到了 50 年代,克拉玛依油田推广使用不稳定试井方法,开展计算油藏参数及压力系统的研究。进入 20 世纪 60 年代,大庆石油会战中,对每一口探井都要做压力恢复,试井对大庆油田早期评价起到了很大作用。1985 年我国开始引进试井解释软件,与此同时各石油院校联合科技攻关,开发研究试井解释软件。随着不稳定试井解释技术的日益成熟,也迎来了电子测试仪表和电子计算机的应用<sup>[11]</sup>。

吉林油气区的试井资料分析技术始于 1972 年,先后经历了 1972–1983 年手工半对数曲线解释分析、1984–1994 年手工现代试井解释分析、1994–2018 年试井解释软件综合应用三个阶段<sup>[12–13]</sup>。

为了做好一口井的试井解释,首先要进行数据预处理工作,因为数据预处理是试井解释的前提和基础;其次应具备模型诊断的能力,因为模型诊断是试井解释的灵魂;再次是与地质情况相结合,因为与地质情况相结合是保证试井解释结果正确的必要手段,三者缺一不可。数据预处理技术包括剔除非点、初始点的时间和流压的选取、生产时间加载、压力恢复数据筛点,以及适度光滑化试井曲线等五项基础工作。通过这五项工作才能保证试井曲线形态真实性、合理性。它是对图形分析做出正确模型诊断的基础条件,也是必备条件。这样,才能最终通过拟合技术获得正确、合理的试井解释结果。

## 1 数据预处理

除了了解测试井、测试层基本情况和测试情况之外,试井解释之前首先是数据预处理工作<sup>[14]</sup>,因为数据预处理是保证试井曲线形态的一种必要手段。

### 1.1 剔除非点

剔除非点是试井解释之前的必要手段<sup>[15]</sup>。它是确保压力恢复数据在地层条件下真实反映、判断压力恢复数据正确与否的途径。例如:在液面恢复资料时,由于液面突然升降,使在折算压力时出现压力突然升高或降低,如图 1 中 A 区、B 区、C 区和 D 区。在压力计测试中由于压力计精度不足,也可能出现类似情况。

尽可能多地了解测试情况。特别是测试资料出现某些反常的情况时,弄清其原因,例如是否测试仪器故障,井身井口问题,施工过程中误操作情况等,以免把这些异常误认为是测试层(井)本身异

常特性的反映,使解释误入歧途。

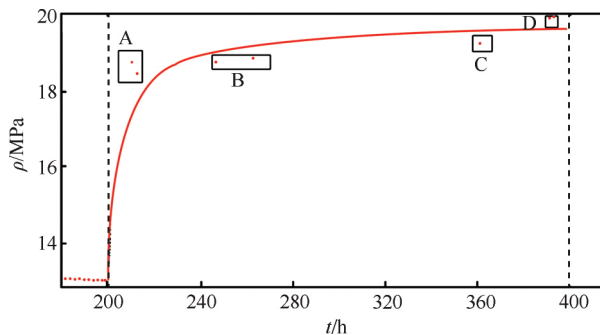


图 1 剔除非点示意图

Fig.1 Schematic diagram of error remove

### 1.2 初始点的选取

要对一口井进行试井解释,首先把测压数据调入试井解释软件进行分析流压的选取工作。测试阶段起始时间的确定很重要<sup>[16]</sup>,如果确定不准确,会造成压差和压力导数计算的错误,使压力及其导数曲线变形、失真,使解释变得困难。如在图 1 中错误选取 A 点为初始点,结果显示双对数的井筒储集阶段偏离 45°线,使导数上升在双对数上部(图 2)。它正确应该选取压力恢复开始的 B 点作为初始点,如果初始点选在压力恢复之后一段时间之内,会产生表皮系数降低<sup>[17–18]</sup>,所以在压力史和产量史图上,它们的变化应该互相对应或匹配,应据此准确地确定各个测试阶段的起始时间和结束时间<sup>[19]</sup>。

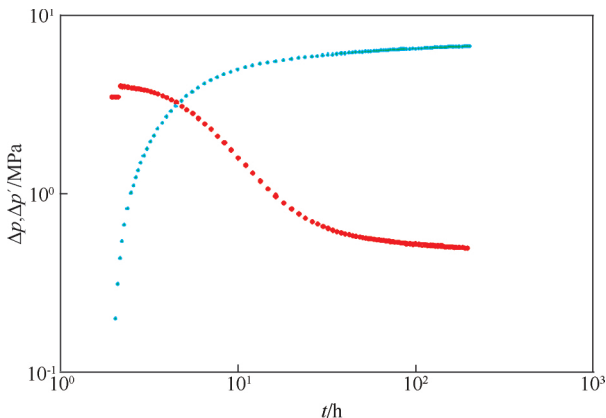


图 2 初始点选取错误示意图

Fig.2 Schematic diagram of the initial point selection error

### 1.3 生产时间加载

生产时间分为简单加载和实际生产时间加载,第一生产时间为简单加载,按前一个测试(或修井)到本次测试的总产量,除以本次测试的稳定日产量,乘以 24 h 的时间进行加载;第二实际生产时间加载,按照测试井历年的至少 6 个月实际生产历史进行加载。如果缺少加载生产时间,会使双对数图

出现错误,导致导数曲线在双对数曲线上部(图 3)。

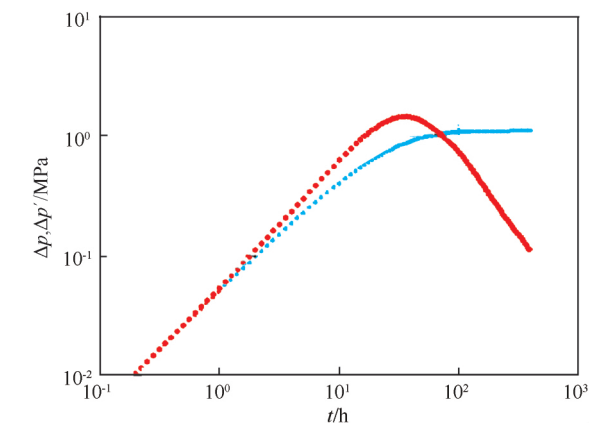


图 3 生产时间加载错误示意图  
Fig.3 Schematic diagram of production time loading error

为了验证该信息是否是真正的地层信息,采用附加导数中的压降导数和压力恢复导数进行对比,从曲线可以看出,后期压力恢复压恢导数和压降导数是否分离,来判断测试井是否受到了开井时间短的影响,如果压力恢复压恢导数和压降导数合二为一,说明测试井开井时间足够长(图 4);如果这两曲线分开,说明测试井开井时间不足(图 5),在下次测试时应该适当延长生产时间。

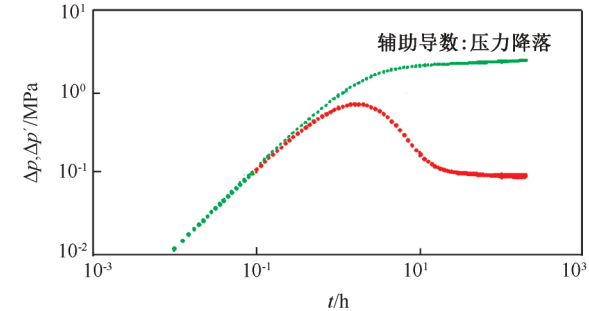


图 4 正常压降导数和压恢导数对比图  
Fig.4 Comparison of normal pressure drawdown derivative and pressure buildup derivative

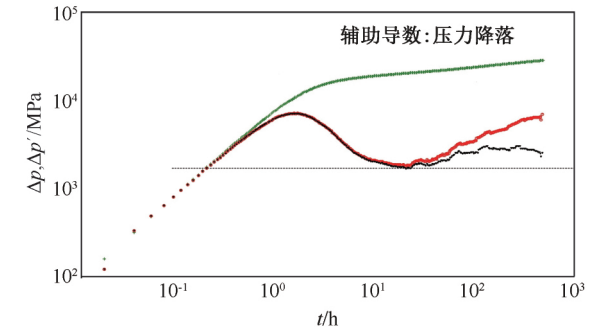


图 5 某井异常压降导数和压恢导数对比图  
Fig.5 Comparison of abnormal pressure drawdown derivative and pressure buildup derivative

1.4 压力恢复数据筛点

由于目前采用高精度电子压力计,采点密,数

据量增大,它不仅影响试井解释软件运行速度,也影响试井曲线形态,一般数据量为 10 000~100 000 (图 6)。图 6 为 15 500 个数据点的双对数图。保留 1 000~5 000 个点为好,也可按 1 个对数周期 200~500 点进行筛点,按对数周期进行筛点(图 7)。

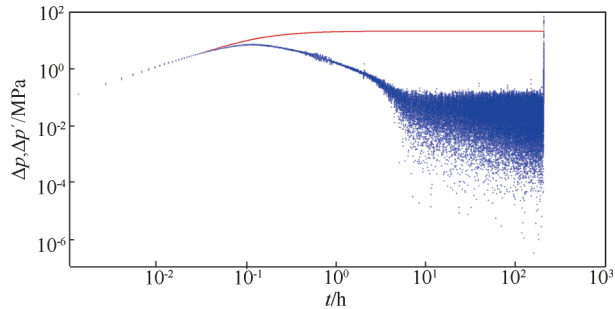


图 6 某井未对压力恢复数据筛点图  
Fig.6 Schematic diagram of non-sampled pressure buildup data of a well

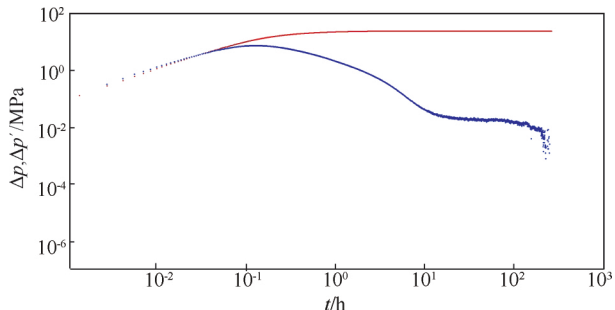


图 7 某井对压力恢复数据筛点图  
Fig.7 Schematic diagram of sampled pressure buildup data of a well

1.5 适度使用光滑化度

如果实测导数曲线的数据点很杂乱,可以考虑进行“光滑化”。但光滑化系数不要选得太高,以免使曲线失真。要注意曲线末端由于求导(特别是光滑化)产生的“末端效应”,这是由于在计算导数时,使用了窗长范围内两端的数据点,当接近整个解释阶段的末端、离末端的距离小于窗长时,末端的数据点将被反复用以计算所有各点的导数。特别是当光滑化系数选得较大时,末端效应可能使得末端相当大段曲线严重变形或失真。所以,如果确认末端的数据有较大的误差,特别是计算导数时又进行了光滑化,对于末端出现的曲线异常,应当非常慎重地考虑和处理,不要把末端效应误解为边界,也要结合剔除非点工作进行。

2 模型诊断

慎重选择试井解释模型,如果试井解释模型选择不正确,得到的解释结果必定不符合实际<sup>[20]</sup>,当然也不可能通过最后的半对数曲线拟合检验和压

力史拟合检验,而不得不重新进行解释。为了能够较准确地选择试井解释模型,必须熟悉不同试井解释模型和压力特征图形识别曲线,即不同试井解释模型诊断曲线。

## 2.1 压力对时间的导数检验法

在试井解释时,压力对时间导数有着很强的功能,均质油藏压降测试过程中各种流动阶。如井筒储集、线性流、双线性流、球形流、平面径向流、拟稳定流和稳定流等,可以看到,不管在哪个流动阶段,  $dp/dt$  都是时间的减函数。图 8 是实测压力对时间的一阶导数曲线。曲线自始至终都呈下降趋势,表明压力资料是正常的。

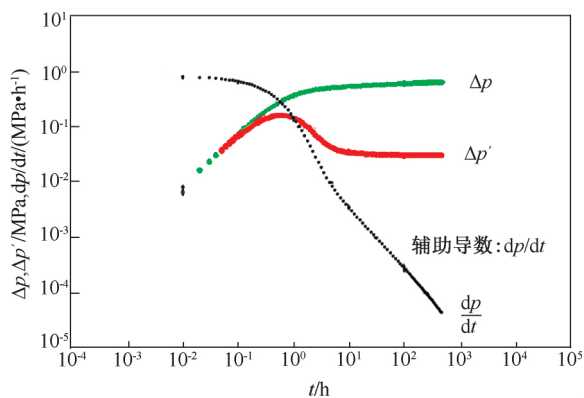


图 8 正常实测压力对时间一阶导数曲线  
Fig.8 First-order derivative curve of normal measured pressure versus time

在图 9 中,线 A 和 B 之间,  $dp/dt$  线却出现了明显上升的现象,表明压力资料出现了异常,或这段的数据点所反映的井底压力变化,并不是测试层的性质所引起的。此时应找出产生异常的原因。

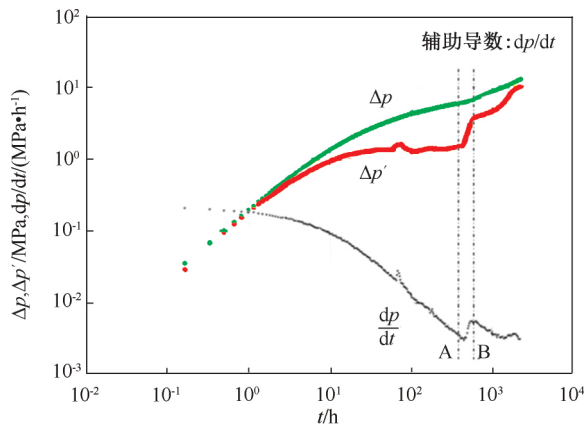


图 9 某井异常实测压力对时间一阶导数曲线  
Fig.9 First-order derivative curve of abnormal measured pressure versus time

常见的可能原因有:

(1) 气井生产中携带液体时,在井筒中出现了

相态的重新分布。从双对数曲线反映在关井 1.5~2.8 h 之间(图 10),双对数曲线开始下掉后又上升,有一个突然变化。当关井 1.5 h 时井筒内存在气体携带液体的续流流动,在关井 2.8 h 之间出现气液分离,液体发生沉降,此时在试井压力曲线上出现短暂突然上升。在试井解释时,内边界可采用变井筒储集模型。

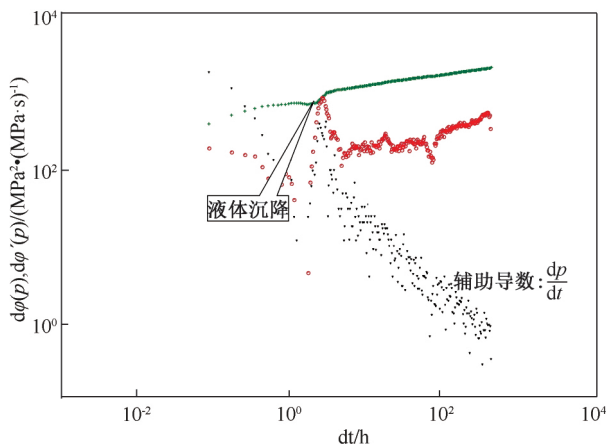


图 10 某气井产水井筒中出现相态重新分布双对图  
Fig.10 A log-log curve with redistribution of phase in water produced gas well

(2) 压力计故障,工作不正常,以至测得的数据有误。

由此可以看到,压力对时间的导数是一种非常有效而简单的诊断方法。有些试井解释软件,包含了这种诊断方法,很容易使用。

## 2.2 掌握大量试井曲线图形

随着现代试井理论的发展,测试技术的不断提高,可以运用试井资料绘制出多种图形来分析地层。在掌握大量试井曲线图形基础上,通过图形分析和图形识别可以把地层参数的解释量化。首先是压力展图分析,它可以判断井的生产能力,地层的供给能力,完井质量和井筒容积的影响等<sup>[21]</sup>;其次是半对数分析,其中有 Horner 法和 MDH 法最为典型;再次是双对数分析,它来源于图版拟合实测曲线求地层参数,最常用的有均质模型、均质模型+定压边界、均质模型+一条断层或不渗透边界模型、均质模型+两条垂直断层或不渗透边界模型、均质模型+两条平行断层或不渗透边界模型、复合油藏模型、均质无限导流性垂直裂缝模型、均质有限导流性垂直裂缝模型、双重孔隙介质模型、地层部分射开模型,以及水平井模型等等。应熟练掌握试井曲线图形是试井解释必备的条件。

此方法从 2000 年开始在吉林油气田试井解释



中应用1 000余井次,均达到预期效果。

### 3 结论

在试井解释时只有正确了解数据预处理、模型诊断等几个技术关键,才能保证试井曲线真实性、合理性。试井解释又具有多解性,在试井解释中,参考地质研究成果,结合地质、测井、射孔和周围井生产动态资料进行分析。将所有可以解释的测试阶段进行解释进行比较,对解释结果进行互相验证,同时从差异中取得很有价值的信息。通过试井数据预处理,选择正确模型,可求出准确地层参数。为油藏描述提供可靠依据,从而可制定合理的油气田开发和调整政策,提高油气田的最终采收率。

**致谢:**感谢吉林油田分公司勘探开发研究院天然气开发所高级工程师张英魁在试井解释方法给予的大力指导和帮助;感谢吉林油田分公司钻井工艺研究院各位领导大力支持。

### 参考文献

- [1] 《试井手册》编写组. 试井手册[M]. 北京:石油工业出版社,1991:66-68.
- [2] [美]李·约翰(著),王福松,董恩环(译). 试井[M]. 北京:石油工业出版社,1986:32.
- [3] [美]阿曼纳特 U. 乔德瑞(著),冉新权,刘海浪(译). 气井试井手册[M]. 北京:石油工业出版社,2008:255-263.
- [4] [美]阿曼纳特 U. 乔德瑞 著,张继红,张惠殊,孙喜寿(译). 油井试井手册[M]. 北京:石油工业出版社,2008:253-262.
- [5] [法]DOMINIQUÉ Bourdet(著),张义堂,李贵恩,高朝阳(译). 现代试井解释模型及应用[M]. 北京:石油工业出版社,2007:25-26.
- [6] 波雷达特(著),赵业卫,关志忠,催士斌(译). 试井解释方法[M]. 北京:石油工业出版社,2005:44-47.
- [7] 姚军,吴明录. 流线数值试井解释理论与方法[M]. 东营:中国石油大学出版社,2008:7-11.
- [8] 雷源,张建民,常会江,等. 数值试井技术在渤海河流相油田的应用[J]. 油气井测试,2015,24(6):14-17. LEI Yuan, ZHANG Jianmin, CHANG Huijiang, et al. Application of numerical well test technology in fluvial oilfields of Bohai Sea [J]. Well Testing, 2015,24(6):14-17.
- [9] 张建民,阳晓燕,张宏友,等. 反褶积试井技术在渤海复杂油气藏中的应用[J]. 油气井测试,2015,24(3):21-23. ZHANG Jianmin, YANG Xiaoyan, ZHANG Hongyou, et al. Application of deconvolution well test interpretation in Bohai complex oil & gas reservoir [J]. Well Testing, 2015,24(3):21-23.
- [10] 魏聪,陈宝新,刘敏,等. 基于反褶积技术的S气井不稳定试井解释[J]. 油气井测试,2018,27(1):73-78. WEI Cong, CHEN Baoxin, LIU Min, et al. Interpretation of pressure transient well testing data of S gas well based on deconvolution technique [J]. Well Testing, 2018,27

- (1):73-78.
- [11] 张英魁. 试井技术在吉林油区发展历程及应用前景[J]. 石油科技论坛,2011(1):15-17. ZHANG Yingkui. Development and applications of well testing techniques in Jilin oil province [J]. Oil Forum, 2011(1):15-17.
- [12] 王杰. 抽油机井测试资料试井解释方法[J]. 油气井测试,2016,25(2):22-24. WANG Jie. Well test interpretation method of pumping test data[J]. Well Testing, 2016,25(2):22-24.
- [13] 陈珺,马国梁,王保军. 姬塬油田长8层试井典型曲线分析及应用[J]. 油气井测试,2015,24(2):31-34. CHEN Jun, MA Guoliang, WANG Baojun. Typical curve analysis of well testing to Chang 8 layers in Jiyuan Oilfield and its application [J]. Well Testing, 2015,24(2):31-34.
- [14] 张英魁,张兆武,龚华立,等. 起泵测试对试井解释中模型诊断及解释结果的影响[J]. 油气井测试,2004,13(3):21-23. ZHANG Yingkui, ZHANG Zhaowu, GONG Huali, et al. Influence of pulling pump test to the model diagnoses and the interpretation results in well testing explanation [J]. Well Testing, 2004,13(3):21-23.
- [15] 张辉. 英台油田利用液面资料求取地层参数可行性研究[J]. 断块油气田,2007,14(6):84-85. ZHANG Hui. Feasibility research on reservoir parameter obtained by annulus liquid level data in Yingtai Oilfield [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2007,14(6):84-85.
- [16] 刘能强. 实用现代试井解释方法[M]. 北京:石油工业出版社,2008:329.
- [17] 廖作才,熊海灵. 保护油气层技术[M]. 北京:石油工业出版社,2012:140-142.
- [18] 张英魁. 利用试井技术对气层伤害综合评价研究[J]. 油气井测试,2000,9(3):41-46. ZHANG Yingkui. Study on the gas formation damage evaluation by using well testing technology [J]. Well Testing, 2000,9(3):41-46.
- [19] 孙达,夏平,张英魁,等. 坨17井生产数据动态分析与井控储量计算[J]. 油气井测试,2010,19(5):20-23. SUN Da, XIA Ping, ZHANG Yingkui, et al. Analysis of performance and calculation of reserves controlled by the well from production data of well Tuo17 [J]. Well Testing, 2010,19(5):20-23.
- [20] 庄惠农. 气藏动态描述和试井[M]. 北京:石油工业出版社,2004:161-226.
- [21] 《中国油气井测试资料解释范例》编写组. 中国油气井测试资料解释范例[M]. 北京:石油工业出版社,1994:31-34.

编辑 穆立婷

**第一作者简介:**孙达,男,1985年出生,工程师,2008年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,主要从事钻井工程工艺技术研究工作。电话:0438-6337663,13756784245; Email:sund-jl@petrochina.com.cn。通信地址:吉林省松原市宁江区长宁北街1546号,邮政编码:138000。