

低渗透气藏压裂水平井试井曲线特征及影响因素

常宝华¹, 强小龙², 杨亚涛³, 曹 雯¹, 任超峰³, 袁春晖¹

1. 中国石油勘探开发研究院 河北廊坊 065007

2. 中国石油长庆油田公司第二采气厂 陕西榆林 719002

3. 中国石油长庆油田公司长北作业分公司 陕西西安 710021

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

项目支持: 国家自然科学基金“致密砂岩微纳米孔喉系统对储层含气性及气水运移的控制机理”(51704326)

引用: 常宝华, 强小龙, 杨亚涛, 等. 低渗透气藏压裂水平井试井曲线特征及影响因素[J]. 油气井测试, 2018, 28(2): 1-6.

Cite: CHANG Baohua, QIANG Xiaolong, YANG Yatao *et al.* Well testing curves of fractured horizontal wells in low-permeability gas reservoirs: characteristics and influencing factors [J]. Well Testing, 2018, 28(2): 1-6.

摘要 针对低渗透气藏压裂水平井的实测试井曲线与理论曲线在流态特征及曲线形态方面存在一定差异的问题, 基于数学模型绘制试井理论曲线图版, 分析了水平段长度、裂缝半长及裂缝条数对试井曲线的影响, 结合矿场实例探讨了实测试井曲线与理论曲线差异的原因。研究结果表明, 压裂水平井流态可划分为双线性流、径向流、储层线性流、过渡流及系统径向流等5个阶段, 与水平井相比, 压裂水平井在第一个径向流特征段出现之前具有明显的裂缝双线性流或线性流特征段; 压裂裂缝半长越大, 前期线性流及裂缝径向流差异明显; 水平段越长, 裂缝径向流段出现越晚, 后期系统径向流段一致。综合分析认为, 压裂液对近裂缝储层的污染和近井形成的连通缝网是导致现场实测试井曲线与理论曲线差异的主要原因。该分析为压裂水平井试井解释模型的选用提供了依据。

关键词 低渗透气藏; 压裂水平井; 试井解释; 流态; 裂缝半长; 水平段长度; 表皮系数; 实例分析

中图分类号: TE353 文献标识码: A DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.02.001

Well testing curves of fractured horizontal wells in low-permeability gas reservoirs: characteristics and influencing factors

CHANG Baohua¹, QIANG Xiaolong², YANG Yatao³, CAO Wen¹, REN Chaofeng³, YUAN Chunhui¹

1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang, Hebei 065007, China

2. No.2 Gas Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company Limited, Yulin, Shaanxi 719002, China

3. Changbei Operation Company, PetroChina Changqing Oilfield Company Limited, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract: For fractured horizontal wells in low-permeability gas reservoirs, actual curves and theoretical curves of well testing are different in flow regime and shape. Accordingly, in this paper, theoretical type curves were generated using the mathematical model to highlight the impacts of length of horizontal section, fracture half-length and number of fractures on well testing curves. Based on case studies, root causes for differences between actual curves and theoretical curves were analyzed. The study results show that flow regimes in fractured horizontal well can be classified into 5 stages: bilinear flow, radial flow, reservoir linear flow, transitional flow and system radial flow. Compared with conventional horizontal wells, fractured horizontal wells display clear features of fracture bilinear flow or linear flow before the characteristics of the first radial flow are observed. Moreover, the longer the fracture half-length is, the more apparent the differences in initial linear flow and fracture radial flow are; the longer the horizontal section is, the later the fracture radial flow occurs, while system radial flow displays uniform regime in the late stage. In conclusion, contamination of near-fracture reservoir by fracturing fluids and inter-connected fracture networks formed in near-wellbore zones are key causes for differences between actual curves and theoretical curves of well testing. The result can provide an evidence for selection of the optimal model for interpretation of well testing data in horizontal wells.

Keywords: low permeability; gas reservoir; fractured horizontal well; well testing data interpretation; flow regime; fracture half-length; length of horizontal section; skin factor; case study

以鄂尔多斯盆地为主的低渗透气藏蕴含着我国大部分的天然气储量, 也是重要的产量来源。随着

水平井和水力压裂技术的结合与发展,低渗透气藏的开发规模、效益有了大幅提高。压裂水平井技术具有增大泄流面积、提高单井产量等优点,可以有效增加地质储量的动用程度,也是特低渗-低渗气藏稳产、上产的重要手段。压裂水平井试井分析主要是在水平井试井分析的基础上,着重考虑压裂裂缝的影响,进行储层参数的解释分析。理论上,由于多段人工压裂裂缝切割了近井储层,使得近井区域的流态明显不同于水平井。但是,实际上矿场实测的压裂水平井试井曲线与理论分析结果存在较大差异,导致这些差异的原因、矿场解释时模型如何选择以及解释结果如何解读,这些问题都需要进一步研究。

国外压裂水平井技术起步较早且发展迅速,尤其是在美国和加拿大,该技术已成为石油工业的主流技术,其相应的试井模型及解释方法也趋于完善。压裂水平井模型是以水平井模型为基础, Daviau 等^[1]最早提出均质无限大水平井渗流模型,并利用源函数法求取了压降解。Odeh^[2]首次将水平井看做均匀条带进行常规分析,并划分了早期径向流、早期线性流、晚期拟径向流及晚期线性流等四个阶段。Issaka^[3]推导了封闭油藏水平井渗流模型的各流动期的无因次压力表达式,并做出无因次压力及压力导数曲线。Ozkan^[4]给出了箱式水平井模型在考虑不同边界类型、均质或双重孔隙介质储层类型情况下的拉氏空间解。基于这些水平井的模型, Giger^[5]最早涉及水平井压裂的渗流场及压降问题。Horne^[6]分析了穿透地层的横向裂缝水平井的不稳定压力特征,并明确了具有多条横向压裂裂缝的水平井压力特性。Raghavan^[7]在 Ozkan 解析解的基础上,研究了平行六面体油藏中的多裂缝压裂水平井不稳定压力,并求取了拉氏空间解。Karcher^[8]利用数值模拟方法研究了无限导流能力裂缝的压裂水平井,以及带有若干条横向裂缝水平井的试井及产能特征。Brown^[9]对比了稳态渗流下压裂水平井产量和压裂直井产量。Norris^[10]给出了具有多条有限导流能力裂缝水平井产量图版。Hegre^[11]建立了有效井筒半径与裂缝导流能力、裂缝条数及尺寸、井筒半径、裂缝间距之间的换算公式。在模型求解方面,相对简单的压裂水平井模型采用解析解法,而复杂的模型更多采用半解析解法。

国内压裂水平井试井技术起步相对较晚,在学习国外先进技术的基础上,也发展了部分适用于国

内实际情况的技术。陈伟等^[12]针对压裂水平井建立了无限导流多裂缝渗流的半解析数学模型,讨论了裂缝线性流、裂缝拟径向流、系统线性流及系统拟径向流的特征。李笑萍^[13]建立了均质油藏中带有垂直裂缝压裂水平井的渗流模型,并给出井底压力计算公式。廉培庆等^[14]应用 Green 函数和 Newman 积原理,推导了垂直裂缝压裂水平井的非稳态渗流压降公式,提出摩阻和水平井的水平段长度对压裂水平井生产动态有一定影响。刘振宇等^[15]分析了穿越多条裂缝的水平井的压力公式,认为早期的井底压力特征与垂直裂缝井情况近似。吕红磊等^[16]建立了复杂边界条件下考虑井储和表皮的多级压裂水平井不稳定渗流解析模型,并绘制了理论图版。耿文爽等^[17]推导出复杂边界条件下考虑井储和表皮的多级压裂水平井试井解释模型拉氏空间解析解,并编制了软件。欧阳伟平^[18]采用视渗透率方法建立了压裂水平井 3D 非线性渗流模型,求解获得了新的试井理论曲线及产量递减 Blasinggame 曲线,成功用于苏里格气田致密气藏储层动态评价。

综上所述,压裂水平井数学模型复杂,试井模型研究相对困难,国内外学者已经探索了部分压裂水平井的试井模型及解释方法,但主要集中在模型及规律的理论研究,对于模型及方法的应用、实测资料的解释、解释模型的适用条件等方面的研究相对较少。

1 理论模型及求解方法

考虑不同因素的压裂水平井数学模型较多,基础模型为均质储层压裂水平井模型,如王贵生^[19]建立的压裂水平井模型,简化模型如图 1 所示。

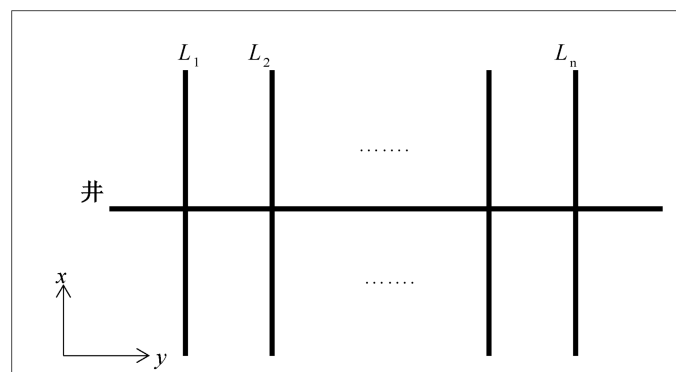


图 1 压裂水平井物理模型

Fig.1 Physical model of fractured horizontal well

基本假设:(1)均质储层,各向异性,厚度为 h ,水平井距气藏底面距离为 z_w ,水平段长度为 L ;(2)裂缝条数为 n ,半长为 L_n ,裂缝等间距。

基础渗流方程组如(1)~(4)式:

控制方程:

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial \varphi_D}{\partial r_D} \right) + \frac{1}{r_D} \lambda_{\varphi BD} = \frac{\partial \varphi_D}{\partial t_D} \quad (1)$$

初始条件:

$$\varphi_D(r_D, z_D, t_D = 0) = 0 \quad (2)$$

内边界条件:

$$\lim_{r_D \rightarrow 0} r_D \left(\frac{\partial \varphi_D}{\partial r_D} + \lambda_{\varphi BD} \right) = -1 \quad (3)$$

外边界条件:

$$\varphi_D|_{r_D \rightarrow \infty} = 0 \quad (4)$$

无因次定义:

$$r_D = \frac{r}{L}; \quad \varphi_D = \frac{Kh}{0.01273 q_{sc} T} (\varphi_0 - \varphi)$$

$$t_D = \frac{3.6 K t}{\varphi \mu C_L L_n^2}; \quad \lambda_{\varphi BD} = \frac{KhL}{0.01273 q_{sc} T} \lambda_{\varphi B}$$

裂缝内渗流方程组如下:

$$\frac{\partial^2 \varphi_{fD}}{\partial x_D^2} + \frac{2}{F_{fD}} \frac{\partial \varphi_{fD}}{\partial z_D} \bigg|_{z_D=0} = 0, (0 < x_D < L_{fD}) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varphi_{fD}}{\partial z_D} \bigg|_{z_D=0} = -\frac{\pi}{2} q_{fD}(x_D) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varphi_{fD}}{\partial x_D} \bigg|_{x_D=0} = -\frac{\pi}{s F_{fD}} \quad (7)$$

其中

$$F_{fD} = \frac{K_f w_f}{KL_f}$$

式中: K 为储层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; h 为储层有效厚度, m ; q_{sc} 为标准条件下产量, m^3/d ; T 为储层温度, K ; t 为压力恢复时间, h ; φ 为储层有效孔隙度, 小数; μ 为流体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; C_L 为综合压缩系数, MPa^{-1} ; r 为井径, m ; K_f 为储层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; w_f 为裂缝缝宽, m ; L_f 为裂缝缝长, m 。

对于上述复杂的偏微分方程组, 解法相对比较复杂, 目前主要的求解方法有拉普拉斯变换、格林函数变换、正交函数变换及点源函数变换等, 联立方程组求解, 可得到有限导流裂缝水平井方程组, 通常可进行数值求解。

2 试井曲线特征分析

以上述理论模型为基础, 对比分析压裂水平井与水平井试井曲线特征, 并针对裂缝半长、水平段长度及表皮系数进行敏感性分析。

2.1 典型试井曲线对比

以长庆某低渗气藏储层参数为基础进行理论计

算, 气藏平均孔隙度为 6%, 平均渗透率为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 含气饱和度为 70%, 平均地层温度为 67°C , 原始地层压力约为 24 MPa, 储层有效厚度 20 m, 水平段长度为 600 m, 水平段至储层底部的距离为 10 m, 人工压裂裂缝条数 5 条, 裂缝半长为 80 m, 裂缝导流能力为 $1500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$; 压裂水平井及水平井的双对数曲线如图 2、图 3 所示。

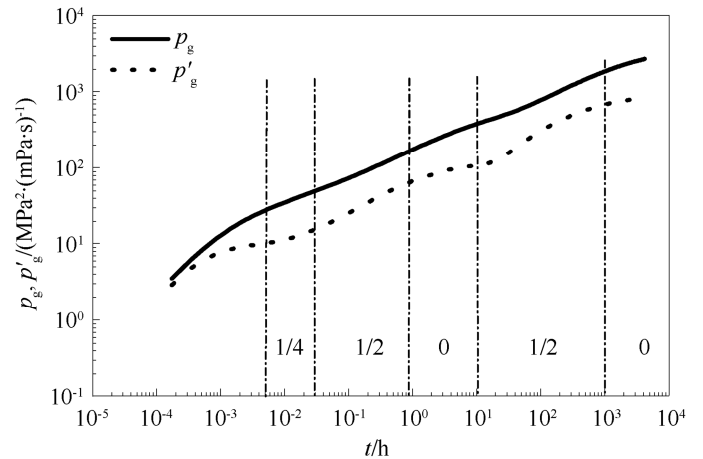


图 2 压裂水平井双对数曲线

Fig.2 Double logarithmic curve of fractured horizontal well

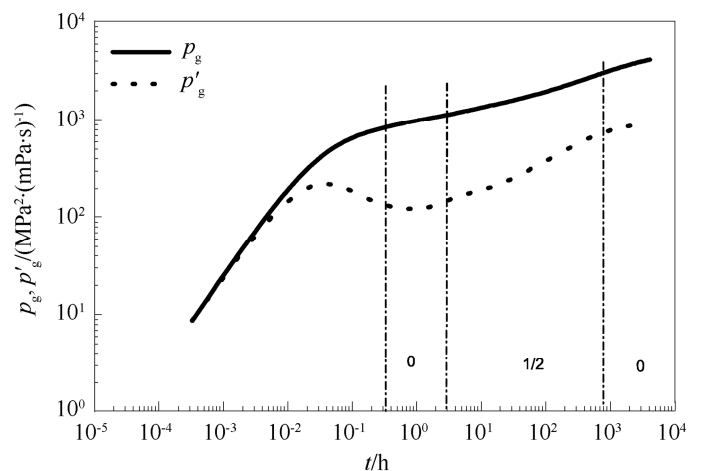


图 3 水平井双对数曲线

Fig.3 Double logarithmic curve of horizontal well

理论试井曲线与流态分析相对应, 水平井压力导数曲线主要包括 3 个明显特征段: (1) 早期径向流阶段, 在关井早期储层内围绕水平段井筒的径向流阶段, 表现为第一个压力导数曲线斜率为 0 的水平段, 与储层有效厚度有关; (2) 储层线性流阶段, 压力波传递至储层上下界面, 并向储层延伸方向传递, 则流体由储层向近井区域补充, 形成了流线方向垂直水平段井筒的储层线性流阶段, 压力导数曲线呈斜率为 1/2 的直线段; (3) 后期径向流阶段, 沿着储层方向围绕水平段的径向流阶段, 压力导数曲线斜率为 0 的水平段, 表征储层渗透率的阶段。压裂水平井压力导数曲线主要包括 5 个明显的特征段:

(1) 双线性流阶段, 裂缝内向井筒的线性流及储层向裂缝的线性流, 压力导数曲线呈斜率为 $1/4$ 的直线段; (2) 线性流阶段, 在裂缝间距较大的情况下, 双线性流后期出现压力导数曲线呈斜率为 $1/2$ 的线性流阶段, 该线性流是垂直于裂缝方向上的线性流; (3) 径向流阶段 (裂缝附近), 储层内流体向各裂缝内流动, 压力波及范围逐渐扩大, 压力导数曲线呈斜率为 0 的水平直线段; (4) 线性流阶段 (系统), 压力逐渐波及至储层远处, 出现系统线性流, 流线方向垂直于水平井筒, 压力导数曲线呈斜率为 $1/2$ 的直线段; (5) 拟径向流阶段 (系统), 储层内流体向井及裂缝周围流动, 压降漏斗呈椭圆形扩大, 该阶段压力导数曲线呈斜率为 0 的水平段。

水平井与压裂水平井都存在两个径向流特征段, 但是压裂水平井在第一个径向流特征段出现之前, 具有明显的裂缝双线性流或线性流特征段, 人工压裂裂缝越复杂, 流动形态及试井特征越复杂。

2.2 影响因素分析

应用上述参数分析裂缝半长、水平段长度对压裂水平井双对数曲线的影响, 不同裂缝半长时的双对数曲线如图 4 所示, 裂缝半长越大, 前期线性流及裂缝径向流差异明显; 但后期的系统径向流一致, 当解释储层平均渗透率时需要达到系统径向流阶段, 故裂缝半长对试井解释的渗透率没有影响。不同水平段长度时的双对数曲线如图 5 所示, 水平段越长, 第一径向流段出现越晚, 前期线性流及系统径向流基本一致。

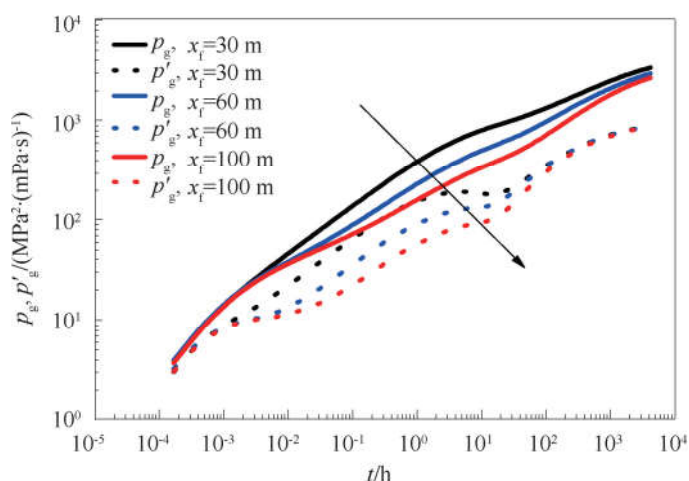


图 4 不同裂缝半长时双对数曲线

Fig.4 Double logarithmic curves with different crack lengths

上述理论计算表皮系数为 0 , 不同表皮系数时双对数曲线如图 6 所示, 表皮系数越大, 早期的压力

和压力导数曲线差异越明显, 可以看出与表皮为 0 时的理论曲线差异较大; 表皮系数、裂缝条数及裂缝半长不同的双对数曲线如图 7 所示。

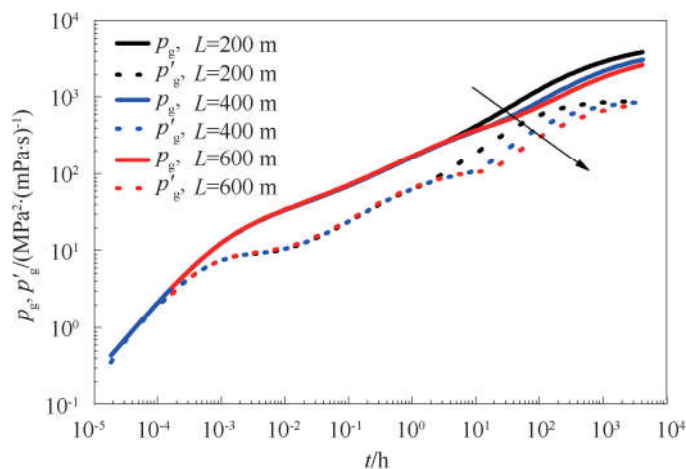


图 5 不同水平段长度时双对数曲线

Fig.5 Double logarithmic curves for the length of different horizontal segments

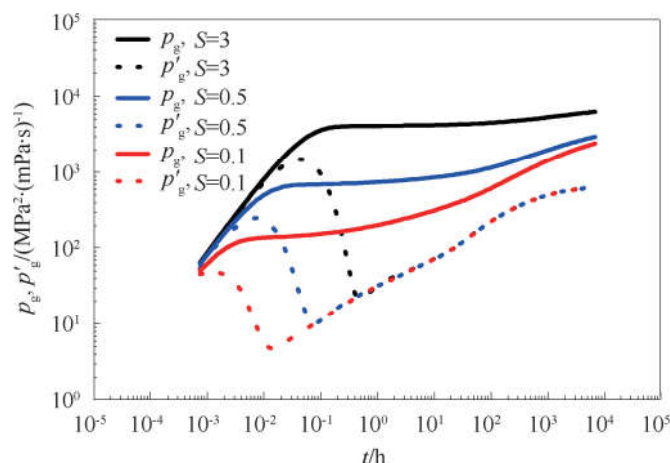
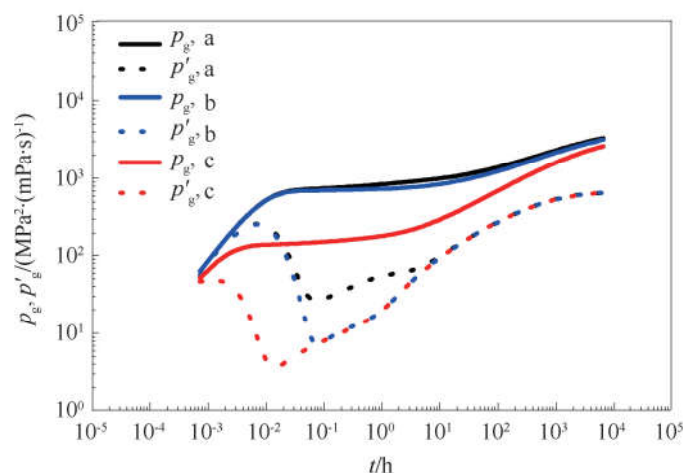


图 6 不同表皮系数时双对数曲线

Fig.6 Double logarithmic curves for different skin factors



a: $S=0.1, n=20, x_f=20$; b: $S=0.5, n=20, x_f=20$;

c: $S=0.5, n=20, x_f=10$.

图 7 不同参数时双对数曲线

Fig.7 Double logarithmic curves for different parameters

图 7 可以看出, 不同参数组合时对后期的压力导数曲线影响较小, 表明表皮及裂缝参数对系统径

向流阶段基本没有影响。

3 矿场实例分析

对比分析长庆油田某低渗透气藏实测试井曲线与理论曲线的差异及引起差异的原因。

3.1 矿场实测曲线

长庆油田某区块是以山₂层为主的低渗透气藏,储层中部深度 2 820.0 m,储层平均孔隙度 6%,渗透率在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,含气饱和度平均 70%,平均有效储层厚度 20 m,A 井是 7 级压裂水平井,裂缝等间距,B 井是 5 级压裂水平井,裂缝非等间距。A 井于 2015 年 8 月进行关井压恢测试,双对数拟合曲线和压力史拟合曲线如图 8、图 9 所示,解释模型为压裂水平井+均质+矩形边界,裂缝表皮系数为 0.3, Kh 值为 $6.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$,裂缝半长为 35.0 m。测试数据的双对数曲线与理论计算曲线存在明显差异,主要表现在过渡段后下凹明显,表明储层污染相对严重,而实际该井的压裂液返排率不到 80%,较多的压裂液存留在裂缝周边储层,造成一定程度的污染。

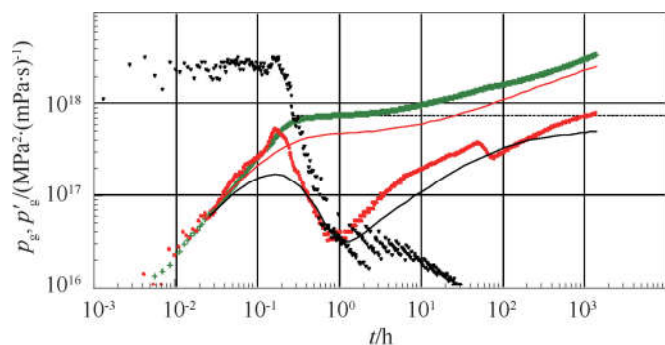


图 8 A 井双对数拟合曲线

Fig.8 Double logarithmic fitting curves of well A

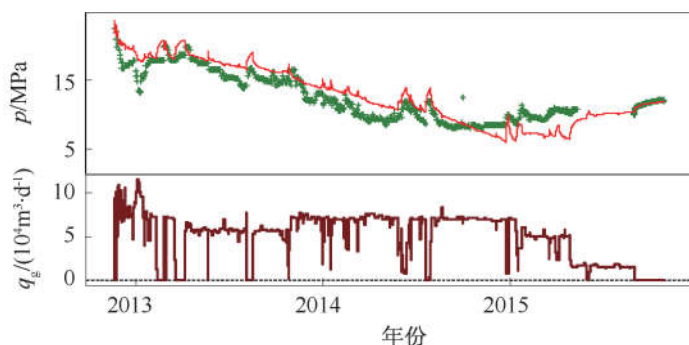


图 9 A 井压力史拟合曲线

Fig.9 Pressure fitting curve of well A

B 井是分 5 段进行压裂的水平井,于 2011 年 10 月进行关井压力恢复测试,关井前日产气 $8 \times 10^4 \text{m}^3$,双对数拟合曲线和压力史拟合曲线如图 10、图 11 所示,采用压裂水平井+均质+矩形条带边界模型解

释,裂缝表皮系数为 0.1, Kh 值为 $5.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$,裂缝半长为 25 m;测试数据的双对数曲线后期表现出平行边界特征,曲线前段存在一定程度下凹段,表明储层存在一定程度的污染,条带状边界特征与储层污染可能是造成实测曲线与理论计算曲线存在差异的原因。

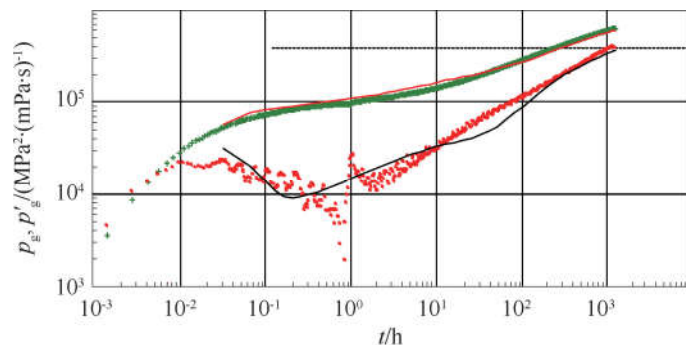


图 10 B 井双对数拟合曲线

Fig.10 Double logarithmic fitting curves of well B

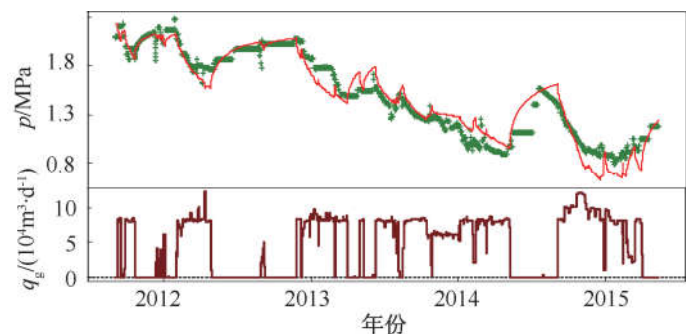


图 11 B 井压力史拟合曲线

Fig.11 Pressure fitting curve of well B

3.2 理论与实测曲线差异原因分析

通过理论计算和实测曲线分析,完井改造时压裂液侵入裂缝前端地层,形成污染表皮区,导致裂缝表皮系数较大,是压裂水平井实测双对数曲线前段没有明显双线性流、线性流及径向流阶段的主要原因。从矿场压裂液的返排率统计结果看,该区块的返排率在 65%~85%之间,相对较低,较大的压裂液量留存在储层中,造成一定程度的污染。在压裂水平井模型中,多参数共同作用也是导致矿场实测双对数曲线与理论曲线存在差异的重要原因。

另一方面,在天然裂缝相对发育的区块,经过大规模人工压裂改造,在多级压裂水平井周边的人工改造裂缝可能相互干扰,在近井区域形成高渗缝网,在流态上与理论上多级压裂水平井存在很大差异,更接近于水平井钻遇复合地层的情况,水平井近井缝网控制区域渗透率较高,远井区域渗透率较低,形成双对数曲线前段下凹特征,没有明显双线性流、线性流及径向流阶段,这种情况下,更适合使用水平井

钻遇复合储层的模型进行试井解释。

4 结论

(1) 在分析压裂水平井数学模型的基础上, 划分出5个主要流动阶段, 明确了各阶段压力导数曲线特征。与水平井对比, 压裂水平井在第一个径向流特征段出现之前, 具有明显的裂缝双线性流或线性流特征段。

(2) 通过理论计算, 分析表皮系数、水平段长度及裂缝半长等参数对压裂水平井试井曲线的影响; 结合现场实例分析引起压裂水平井实测试井曲线与理论曲线差异的主要因素。

(3) 明确了压裂水平井与水平井试井曲线的典型区别, 为试井解释模型的选用提供依据。针对压裂水平井试井曲线的敏感性分析可以为试井解释提供一定的指导。多级裂缝相互连通对压裂水平井试井曲线的影响还需进一步研究。

致谢: 感谢中国石油勘探开发研究院对本文发表的支持, 并已通过单位保密审查。

参 考 文 献

- [1] DAVIAU F, MOURONVAL Q BOURDAROT G *et al.* Pressure analysis for horizontal wells [J]. SPE Formation Evaluation, 1988, 3(4): 716-724.
- [2] ODEH A S, BABU D K. Transient flow behavior of horizontal wells pressure drawdown and buildup analysis [J]. SPE Formation Evaluation, 1990, 5(1): 7-15.
- [3] ISSAKA M B, AMBASTHA A K. Drawdown and buildup pressure derivative analyses for horizontal wells [J]. SPE Rocky Mountain Regional Meeting. Society of Petroleum Engineers, 1992: 155-166.
- [4] OZKAN E, RAGHAVAN R, JOSHI S D. Horizontal-well pressure analysis [J]. SPE Formation Evaluation, 1989, 4(4): 567-575.
- [5] GIGER F M. Low-permeability reservoir development using horizontal wells [C]. SPE 16406, 1987.
- [6] HORNE R N, TEMENG K O. Relative productivities and pressure transient modeling of horizontal wells with multiple fractures [C]. SPE 29891, 1995.
- [7] CHEN C C, RAJAGOPAL R. A multiply-fractured horizontal well in a rectangular drainage region [J]. SPE Journal, 1997, 2(4): 455-465.
- [8] KARCHER B J, GIGER F M. Some practical formulas to predict horizontal well behavior [C]. SPE 15430, 1986.
- [9] BROWN J E, ECONOMIDES M J. An analysis of hydraulically fractured horizontal wells [C]. SPE 24322, 1992.
- [10] NORRIS S O, HUNT J L, SOLIMAN M Y *et al.* Predicting horizontal well performance: a review of current technology [C]. SPE 21793, 1991.
- [11] HEGRE T M, LARSEN L. Productivity of multifractured horizontal wells [C]. SPE 28845, 1994.
- [12] 陈伟, 严小勇, 段永刚. 压裂水平井试井解释模型研究 [J]. 油气井测试, 2013, 22(6): 5-8.
CHEN Wei, YAN Xiaoyong, DUAN Yonggang. Investigation of multifractured horizontal well model for well test interpretation [J]. Well Testing, 2013, 22(6): 5-8.
- [13] 李笑萍. 穿过多条垂直裂缝的水平井渗流问题及压降曲线 [J]. 石油学报, 1996, 17(2): 91-97.
LI Xiaoping. Fluid flow through pay zones in relation to draw-down profiles in a horizontal well intersecting several vertical fractures [J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(2): 91-97.
- [14] 廉培庆, 程林松, 何理鹏, 等. 气藏压裂水平井非稳态流动分析 [J]. 计算力学学报, 2011, 28(4): 579-583.
LIAN Peiqing, CHENG Linsong, HE Lipeng *et al.* Analysis of transient flowing model for fractured horizontal well in gas reservoir [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, 28(4): 579-583.
- [15] 刘振宇, 方亮, 安艳明, 等. 穿越多条裂缝水平井的井底压力变化特征 [J]. 新疆石油地质, 2003, 24(4): 341-344.
LIU Zhenyu, FANG Liang, AN Yanming *et al.* Pressures behavior of horizontal well with multiple transversal fractures [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(4): 341-344.
- [16] 吕红磊, 张雁, 马华丽. 多级压裂水平井试井分析方法研究及应用 [J]. 油气井测试, 2014, 23(4): 15-17.
LYU Honglei, ZHANG Yan, MA Huali. Research on well testing analysis method to multi-stage fracture horizontal well and its application [J]. Well Testing, 2014, 23(4): 15-17.
- [17] 耿文爽, 杨二龙, 赵跃军, 等. 多级压裂水平井试井解释软件的研究及应用 [J]. 油气井测试, 2013, 22(4): 6-9.
GENG Wenshuang, YANG Erlong, ZHAO Yuejun *et al.* Development of well test interpretation software for multi-stage fracturing of horizontal and application [J]. Well Testing, 2013, 22(4): 6-9.
- [18] 欧阳伟平. 致密气藏分段压裂水平井的不稳定压力与产量综合分析方法 [J]. 油气井测试, 2018, 27(1): 14-21.
OUYANG Weiping. Comprehensive analysis method for transient pressure and production of multistage fractured horizontal well in tight gas reservoirs [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 14-21.
- [19] 王贵生, 聂仁仕. 多段压裂水平井试井曲线特征分析 [J]. 石油化工应用, 2014, 33(8): 9-11.
WANG Guisheng, NIE Renshi. Well test type curve analyzing for horizontal well with multi-fractures [J]. Petrochemical Industry Application, 2014, 33(8): 9-11.

编辑 穆立婷

第一作者简介: 常宝华, 男, 1986年出生, 博士, 工程师, 2013年毕业于中国科学院大学流体力学专业, 现主要从事气藏动态分析及试井相关工作。电话: 010-83596646, 13581891320; Email: changbaohua@petrochina.com.cn。地址: 河北省廊坊市广阳区万庄44#信箱, 邮政编码: 065007。