

页岩气井产量递减分析方法选择研究

陈强¹, 王怒涛¹, 阮开贵², 张梦丽¹

(1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500; 2. 中国石油西南油气田蜀南气矿, 四川 泸州 646000)

摘要:页岩气藏开发递减规律有 Arps 模型、SEPD 模型、Duong 模型以及它们之间的组合模型等。Arps 递减规律是气井产量递减分析的主要方法。递减规律模型的选择主要有两种方法: 第一种是单一的转化为线性关系, 利用线性回归, 选择相关系数高的作为分析方法。第二种组合递减模型, 可以组合成多种模型, 主要利用非线性回归, 选择相关系数高的作为分析方法。提出一种新的选择产量递减分析方法, 利用各种递减规律的线性组合, 分析每种递减规律与实际生产数据的关联程度, 根据关联程度的高低排序选择递减分析方法, 该方法通过实际生产数据分析, 生产数据拟合精度高, 为递减分析方法选择提供依据。

关键词:产量递减; Arps 模型; SEPD 模型; Duong 模型; 组合模型

中图分类号: TE328 **文献标识码:** A

Selection of production decline analysis method of shale gas well

Chen Qiang¹, Wang Nutao¹, Ruan Kaigui² and Zhang Mengli¹

(1. School of Oil and Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. South Sichuan Gas Field of Southwest Oil and Gas Field Company, PetroChina, Luzhou, Sichuan 646000, China)

Abstract: There are several methods of the production decline analysis during the shale gas reservoir development, such as the Arps model, the SEPD model, the Duong model and their composition models. Among them, the Arps model is the main method. There are two main choices of the appropriate decline methods. One is to transform the data into the linear relationship and the method with high correlation coefficient can be deemed as the better model. The other is to use the non-linear regression by the combination of the above models and choose the analysis method with high correlation coefficient. Then we proposed a new method to choose the production decline analysis model, and obtained the relation degree by comparing the linear combination of the different decline analysis models with the practical production data, furthermore, according to the degree of correlation in order, selected the production decline analysis method. This method is validated by the high fitting precision between the calculated results and the production data, which provides a reliable and reasonable way to choose the production decline models.

Key words: production decline, Arps model, SEPD model, Duong model, composition model

产量递减主要影响因素除单井控制储量大小与含水上升等因素外, 还受采气速度、井网等人为因素影响, 其中采气速度大小是影响产量递减规律的主要因素。其实 Arps 递减规律本身是一种经验关系, 适用所有气井的产量递减, 并不是对页岩气井不适用, 而是因为页岩气井控制储量小, 刚开始的采气速度比较高, 产量递减很快, 所以 Arps 递减不适用。利用 Arps^[1-5] 双曲递减模型分析页岩气井产量递减时, 很多情况下出现递减指数 $n > 1$ 的情况, 造成累计产

量无限大的不合理性^[6]。并不是因为 Arps 递减模型适合于达到拟稳定状态的流动, 而页岩气井生产很难达到拟稳定状态, 如果页岩气井采气速度很低, Arps 递减规律仍然适用。因此, 国内外学者 L Mattar^[7], D S Fulford^[8] 等提出通过改变 Arps 模型中的递减指数加以修正的方法; 还有学者提出了一些新模型, 如 SEPD 模型^[9-14, 18]、Duong 模型^[15-18] 和组合模型^[19-22] 等。这些模型在实际应用时, 如何选择这些模型进行产量递减分析, 究竟是选择单一的递减模型还是

收稿日期: 2017-04-25。

第一作者简介: 陈强(1991—), 男, 在读硕士研究生, 油气藏工程动态分析及试井研究。

基金项目: 国家科技重大专项“亚太及南美地区复杂油气田渗流机理及开发规律研究”(2011ZX05030-005-06)。

选择递减组合模型?针对以上问题,笔者提出线性分析方法选择产量递减规律。

1 线性分析方法选择产量递减规律

页岩气井产量递减模型许多,目前主要有以下几种模型:

$$\text{SEPD模型: } q = q_i e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^n} \quad (1)$$

$$\text{Duong模型: } q = q_i t^{-m} \quad (2)$$

$$\text{Arps模型: } q = \frac{q_i}{(1 + D_i n t)^{1/n}} \quad (3)$$

式中: q_i 为最大或初始产量, m^3/d ; q 为某时刻的产量, m^3/d ; D_i 为递减率; t 为生产时间, d ; τ 为时间常数; m 、 n 为指数系数。

(1)、(2)、(3)式这些单一的递减方法选择,主要是根据递减规律方程线性化,即将(1)、(2)、(3)式转化为以下形式。

SEPD模型:

$$\ln \left[-\ln \left(\frac{q}{q_i} \right) \right] = n (\ln t - \ln \tau) \quad (4)$$

Duong模型:

$$\ln \left(\frac{q}{q_i} \right) = -m \ln t \quad (5)$$

Arps模型:

$$\left(\frac{q_i}{q} \right)^n = 1 + D_i n t \quad (6)$$

其中多余2个未知参数的递减方程需要多次线性回归,例如(6)式中存在初始递减产量、递减指数、初始递减率三个参数,含有两个未知数的方程直接线性回归即可,也可以采用图版拟合方法选择递减类型,图1所示,将实际生产产量归一化,看实际生产

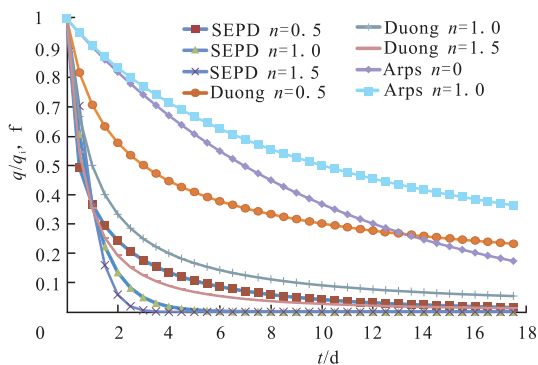


图1 递减规律典型图版

Fig. 1 Chart of typical diminishing law

规律与哪种递减规律拟合程度高,就选择哪种方法,不足之处是不可能将所有参数的图版做出来,还需要人工识别参数。这种方法对于组合递减模型就不适用了。

2 最优化分析方法选择产量递减规律

文献^[20-22]讨论了3种组合模型: Duong+Arps模型、SEPD+Arps模型以及SEPD+Duong模型。这些组合递减模型不论以递减率相等点组合,还是以产量相等点组合,都要分析哪种组合模型更优,一般是建立式(7)产量历史拟合最优化模型,根据历史拟合相关系数的高低来选择组合模型。

$$E = \min \sum_{i=1}^n (q - q^*) \quad (7)$$

式中: q 为某时刻的产量 m^3/d ; q^* 为理论产量 m^3/d ; E 为某时刻产量和理论产量最小误差之和。

这种产量组合是怎样分配,以前的文献也没有论述,什么时间段以什么递减类型为主也没有论述。既然两种递减模型可以组合,那么三种以及三种以上的递减模型也可以组合,因此,提出一种新的产量组合模型即线性组合法。

3 线性组合法选择产量递减模型

将前面介绍最常用的(1)、(2)、(3)式递减规律线性组合在一起,引入分配系数 c_1 、 c_2 和 c_3 ,建立如下线性组合递减模型:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 \quad (8)$$

$$q_1 = c_1 q_{i1} e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^n} \quad (9)$$

$$q_2 = c_2 q_{i2} t^{-m} \quad (10)$$

$$q_3 = c_3 \frac{q_{i3}}{(1 + D_i n_3 t)^{1/n_3}} \quad (11)$$

将产量归一化,SEPD模型产量分配系数为 $\alpha = q_1/q$, Duong模型产量分配系数为 $\beta = q_2/q$, Arps模型产量分配系数为 $\gamma = q_3/q$,根据产量分配系数的大小可以确定哪个阶段以哪种递减类型为主,如果某一分配系数接近于零,说明这种递减类型在组合模型中的作用很小,可以不考虑该模型的组合,如果某一分配系数超过90%,说明递减模型可以用单一的递减类型分析。

4 实例分析

利用上述各种递减模型分别对川庆威远气藏页岩井生产历史进行拟合,其拟合效果见图2,笔者所提出的新线性组合方法,拟合曲线相关系数达到0.925 9,是所有模型中相关系数最高的(表1),其中新的组合模型拟合的各种递减模型产量百分比比例见图3。从图3中可以看出,短时间生产主要以 Duong 模型与 SEPD 模型为主,从长时间拟合看,时间越长,SEPD 与 Arps 模型产量占的比例越来越少,几乎趋近于零,说明该井后期生产主要以 Duong 递减模型为主递减类型。因此,对于页岩气井产量递减规律早期最好选用 SEPD 与 Duong 组合模型,后期选择 Duong 模型即可。

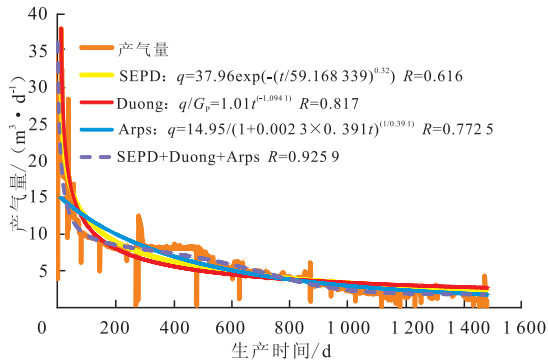


图2 新的组合拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves of new combination

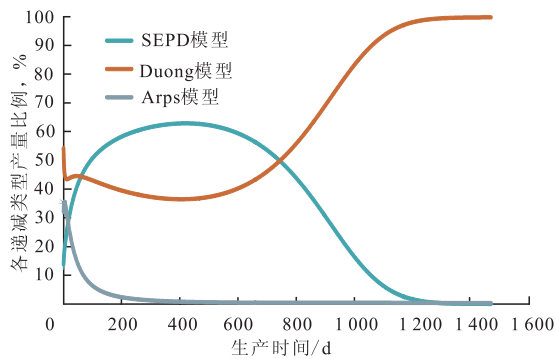


图3 组合模型中各模型产量百分比

Fig. 3 Percentage of each composition model

表1 各种递减模型计算对比

Table 1 Calculation comparison of each decline model

模型	拟合相关系数	可采储量/亿方
Arps 模型	0.722	1.05
SEPD 模型	0.616	1.7
Duong 模型	0.817	5.56
本文组合模型	0.925 9	2.577

5 结论

1) 对于页岩气井产量递减模型中, Duong 模型与 SEPD 模型适合于早期递减, Arps 递减模型不适用于页岩气井产量递减。

2) 线性组合递减模型更能描述各个阶段递减类型,为后期递减模型的选择提供依据。

3) 线性组合模型的组合方式可以推广到其他更多的递减模型中去。

4) 这种组合递减规律预测也不可能作长期预测,因为在生产过程中经常改变工作制度或实施措施,递减规律可能发生变化,因此,只能作为短期预测。

参考文献

- Arps J J. Analysis of decline curves[J]. Petroleum transactions, 1945, 160(1): 228-247.
- 姚猛, 胡嘉, 李勇, 等. 页岩气藏生产井产量递减规律研究[J]. 天然气与石油, 2014, 32(1): 63-66.
- 白玉湖, 陈桂华, 徐兵祥, 等. 页岩气产量递减典型曲线模型及对比研究[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(5): 96-102.
- 齐亚东, 王军磊, 庞正炼, 等. 非常规油气井产量递减规律分析新模型[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(4): 772-778.
- 张荻荻, 李治平, 苏皓. 页岩气产量递减规律研究[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(6): 138-144.
- 雷丹凤, 王莉, 张晓伟, 等. 页岩气井扩展指数递减模型研究[J]. 断块油气田, 2014, 21(1): 66-68.
- Mattar L, Moghadam S. Modified power law exponential decline for tight gas[C]// paper PETSOC-2009-198 presented at the Canadian International Petroleum Conference, 16-18 June 2009, Calgary, Alberta, Canada.
- Fulford D S, Blasingame T A. Evaluation of time-rate performance of shale wells using the transient hyperbolic relation[C]// paper SPE-167242-MS presented at the SPE Unconventional Resources Conference, 5-7 November 2013, Calgary, Alberta, Canada.
- Valko P P. Assigning value to stimulation in the Barnett Shale: a simultaneous analysis of 7 000 plus production histories and well completion records[C]// paper SPE-119369-MS presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 19-21 January 2009, The Woodlands, Texas, USA.
- Can B, Kabir S. Probabilistic production forecasting for unconventional reservoirs with stretched exponential production decline model[J]. Spe Reservoir Evaluation & Engineering, 2012, 15(1): 41-50.
- 曾宪兵, 李晓明. 产能递减分析方法在气田动态分析中的应用[J]. 石油化工应用, 2013, 32(5): 5-7.

- [12] 白玉湖,陈桂华,徐兵祥,等.页岩气产量递减典型曲线模型及对比研究[J].中国石油勘探,2016,21(5):96-102.
- [13] B.Can,张亚雄,芦鸯梅,等.概率法预测非常规油气藏产量的广延指数递减模型[J].石油地质科技动态,2012,31(4):1-18.
- [14] Valko P P, Lee W J. A better way to forecast production from unconventional gas wells[C]// paper SPE-134231-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 19-22 September 2010, Florence, Italy.
- [15] Duong A N. An unconventional rate decline approach for tight and fracture-dominated gas wells[C]// paper SPE-137748-MS presented at the Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, 19-21 October 2010, Calgary, Alberta, Canada.
- [16] Zhang M Y, Ambastha A K. New insights in pressure-transient analysis for stress-sensitive reservoirs[C]// paper SPE-28420-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 25-28 September 1994, New Orleans, Louisiana, USA.
- [17] Vairogs J, Rhoades V W. Pressure transient tests in formations having stress-sensitive permeability[J]. Pressure transient tests in formations having stress-sensitive permeability, 1973, 25(8): 965-970.
- [18] Yu Shaoyong, Lee W J, Miocevic D J, et al. Estimating proved reserves in tight/shale wells using the modified SEPD method[C]// paper SPE-166198-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 September- 2 October 2013, New Orleans, Louisiana, USA.
- [19] Yu S. Best practice of using empirical methods for production forecast and EUR estimation in tight/shale gas reservoirs[C]// paper SPE-167118-MS presented at the SPE Unconventional Resources Conference Canada, 5-7 November 2013, Calgary, Alberta, Canada.
- [20] 马青,龚文平.一种新的产量递减阶段产量预测模型[J].石油天然气学报,2006,28(6):150-152.
- [21] 刘传斌,姜汉桥,李俊键,等.预测页岩气产量递减组合模型的研究[J].断块油气田,2015,22(4):481-483.
- [22] 刘传斌,姜汉桥,李俊键,等.页岩气产量递减变化组合模型的探讨[J].断块油气田,2015,22(6):770-772.

(编辑 尹淑容)

(上接第75页)

最大约为 $54\ 671\ \text{mm}^3$,对应的实验条件为压力 25 MPa,喷头直径 4 mm,磨料浓度 6.6%,结果反映出压力与喷头直径对孔体积有明显作用。

5 结论

1) 喷射所得孔为圆形截面和 V 形垂面组成的倒锥形的孔;各参数对孔深的影响程度由大到小依次为泵压、磨料浓度和喷嘴直径;对孔径的影响程度由大到小依次为喷嘴直径、磨料浓度和泵压。

2) 随着泵压的增大,孔深近似地成线性增加,而孔径却几乎不受影响;随着喷嘴直径的增加,孔径近似地成线性增长,而孔深变化不大;随着磨料浓度的增加,孔深先增大后减小,存在一个最佳磨料浓度值,孔径随之增大。

3) 为了能够得出现场适用的水力喷射成孔工

艺参数,更好地体现出各参数对成孔形态的影响,引入了孔体积这一参数来更好地表征成孔效果,最终优选出一组施工参数为泵压 25 MPa,喷嘴直径 4 mm,磨料浓度 6.6%。

参考文献

- [1] 饶孟余,杨陆武,张遂安,等.煤层气多分支水平井钻井关键技术研究[J].天然气工业,2007,27(7):52-55.
- [2] 李根生,牛继磊,刘泽凯,等.水力喷砂射孔机理实验研究[J].石油大学学报(自然科学版),2002,26(2):31-34.
- [3] 林晓东,卢义玉,汤积仁,等.基于 SPH-FEM 耦合算法的磨料水射流破岩数值模拟[J].振动与冲击,2014,33(18):170-176.
- [4] 廖华林,李根生,易灿,等.围压对射流破岩特性影响的试验研究[J].石油钻探技术,2007,35(5):46-48.
- [5] 王建明,宫文军,高娜.基于 ALE 法的磨料水射流加工数值模拟[J].山东大学学报(工学版),2010,40(1):49-52.

(编辑 尹淑容)