

# 三项式产能方程中启动压力梯度影响因素分析

王峰<sup>1,2</sup> 李崇喜<sup>3</sup>

1.中国科学院地质与地球物理研究所 2.中国石油吉林油田公司 3.中国石油吉林油田公司采油工艺研究院

王峰等.三项式产能方程中启动压力梯度影响因素分析.天然气工业,2012,32(10):52-54.

**摘 要** 在计算低渗透气藏的产能时,如果不考虑启动压力梯度将导致计算结果偏差较大。启动压力梯度受众多因素的影响,为了明确影响因素的主次关系并据此得到较为准确的产能计算结果,特进行三项式产能方程中启动压力梯度影响因素分析。通过正交实验,分析了地层孔隙度、渗透率、地层岩石黏土含量、地层岩石天然裂缝发育程度及气体黏度等因素对三项式产能方程中启动压力梯度的影响。结果表明:随着天然裂缝密度的增加启动压力梯度呈降低趋势;启动压力梯度随着地层黏土含量的增加呈迅速上升趋势;启动压力梯度随着地层孔隙度的增加呈递减趋势;气体黏度对启动压力梯度的影响不具有规律性;启动压力梯度随储层渗透率增加呈递减的趋势。以长岭气田下白垩统登娄库组致密砂岩气藏为例,其启动压力梯度影响因素顺序为:黏土含量、孔隙度、渗透率、天然裂缝密度、气体黏度。该结果为分析低渗透气藏启动压力提供了一种有效手段。

**关键词** 低渗透气藏 启动压力 梯度 影响因素 正交试验 分析 长岭气田 早白垩世 致密砂岩气藏

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2012.10.012

在低渗透气藏中,气体需要克服启动压差才能流动。目前,针对低渗气藏气井的产能,比较有价值的理论研究得到了发展应用。王富平等<sup>[1]</sup>针对压裂气井推导了考虑启动压力梯度的三项式产能方程;李闽等<sup>[2]</sup>建立了考虑启动压力梯度的拟稳态三项式产能方程,给出了低渗透气藏气井无阻流量的计算公式;李伟等<sup>[3]</sup>提出了一种简单的方法来确定气井三项式产能方程的基础上,利用线性回归法,可以确定三项式产能方程;郭晶晶等<sup>[4]</sup>基于 Forchheimer 提出的高速非达西渗流方程,推出的考虑启动压力梯度的三项式产能方程可以用来分析气井产能,且可以求出拟启动压力梯度;胥洪成等<sup>[5]</sup>应用一点法对气藏产能方程进行了分析;高海红等<sup>[6]</sup>认为低渗气藏水平井产能计算需要考虑启动压力梯度;陈元千<sup>[7]</sup>认为线性流的启动压力梯度不能用于平面径向流方程;董大鹏等<sup>[8]</sup>认为相对渗透率计算需要考虑启动压力梯度。在三项式产能方程中,启动压力梯度受地层各种性质的影响较大。马飞等<sup>[9]</sup>认为渗透率降低导致启动压力增加;王尤富等<sup>[10]</sup>认为启动压力梯度随岩石渗透率的减小和原油黏度的上升而增

大。为了使产能方程能够较准确的预测吉林油田长岭气田的产能,特进行启动压力梯度影响因素分析。

## 1 考虑启动压力梯度的三项式产能方程

对于常规气藏气井,基于 Forchheimer 渗流规律,考虑启动压力梯度的高速非达西渗流规律得到的三项式产能方程为:

$$p_e^2 - p_{wf}^2 - [2p_{wf} \lambda_b (r_e - r_w) + \lambda_b^2 (r_e - r_w)^2] = a q_{sc} + b q_{sc}^2 \quad (1)$$

式中  $a$ 、 $b$  分别为产能方程系数,无因次;  $p_e$  为气藏地层压力,MPa;  $p_{wf}$  为井底压力,MPa;  $q_{sc}$  为标准状态下产气量,  $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $r_e$  为泄气半径,  $\text{m}$ ;  $r_w$  为井筒半径,  $\text{m}$ ;  $\lambda_b$  为拟启动压力梯度,MPa/m。

## 2 影响启动压力梯度因素分析

### 2.1 正交试验分析

基于吉林油田长岭气田致密砂岩气藏储层及天然气特征,考虑天然裂缝密度、黏土含量、孔隙度、气体黏度、渗透率等 5 个参数的 4 个水平值(表 1)对启动压

**基金项目** 国家重点基础研究发展计划(973 计划)“二氧化碳减排、储存和资源化利用的基础研究”(编号:2011CB707306)。

**作者简介** 王峰,1967 年生,教授级高级工程师,博士;从事油气地质及开发研究及管理工作,现任中国石油吉林油田公司总工程师。地址:(138000)吉林省松原市宁江区沿江东路 1219 号。电话:(0438)6258012。E-mail:wang-feng@petrochina.com.cn

表 1 参数水平值表

水平值	天然裂缝密度/条·m <sup>-2</sup>	黏土含量	孔隙度	气体黏度/ mPa·s	渗透率/ mD
1	0.4	20%	14%	0.020	0.24
2	0.3	15%	12%	0.015	0.18
3	0.2	10%	10%	0.010	0.12
4	0.1	5%	8%	0.005	0.06

力梯度的影响,保持除所考虑参数之外的其他参数不变,通过 Topaze 产能分析软件模拟得到 16 种方案所对应的启动压力梯度(表 2)。

表 2 16 种方案对应的启动压力梯度表

方 案	天然裂缝密度/条·m <sup>-2</sup>	黏土含量	孔隙度	气体黏度/ mPa·s	渗透率/ mD	启动压力 梯度/MPa·m <sup>-1</sup>
1	0.1	5%	8%	0.005	0.06	0.013 8
2	0.1	10%	10%	0.010	0.12	0.011 0
3	0.1	15%	12%	0.015	0.18	0.010 1
4	0.1	20%	14%	0.020	0.24	0.009 7
5	0.2	15%	10%	0.020	0.06	0.014 5
6	0.2	20%	8%	0.015	0.12	0.010 9
7	0.2	5%	14%	0.010	0.18	0.010 6
8	0.2	10%	12%	0.005	0.24	0.009 0
9	0.3	20%	12%	0.010	0.06	0.015 1
10	0.3	15%	14%	0.005	0.12	0.011 2
11	0.3	10%	8%	0.020	0.18	0.010 2
12	0.3	5%	10%	0.015	0.24	0.009 7
13	0.4	10%	14%	0.015	0.06	0.015 4
14	0.4	5%	12%	0.020	0.12	0.012 5
15	0.4	20%	10%	0.005	0.18	0.010 7
16	0.4	15%	8%	0.010	0.24	0.008 8

由表 3 直观分析得到各参数极差排序为  $R(\text{黏土含量}) > R(\text{孔隙度}) > R(\text{渗透率}) > R(\text{天然裂缝密度}) > R(\text{气体黏度})$ 。由此可以看出,储层黏土含量是影

表 3 各参数极差表

参 数	天然裂缝密度	黏土含量	孔隙度	气体黏度	渗透率
$m_1$	0.011 2	0.014 7	0.010 9	0.011 2	0.011 8
$m_2$	0.011 3	0.011 4	0.011 5	0.011 4	0.011 4
$m_3$	0.011 5	0.010 4	0.011 7	0.011 5	0.011 1
$m_4$	0.011 8	0.009 3	0.011 7	0.011 7	0.011 6
$R$	0.000 6	0.005 4	0.000 8	0.000 5	0.000 7

响启动压力梯度的主要因素,储层的孔隙度是影响启动压力梯度的次要因素。5 个因素对缝高影响的主次顺序依次为:黏土含量、孔隙度、渗透率、天然裂缝密度、气体黏度。 $R(\text{黏土含量})$ 比其他参数的  $R$  值高 7 倍以上,表明储层的黏土含量对启动压力梯度的影响非常显著。

### 2.2 单一因素对启动压力梯度的影响分析

以各参数的水平值为横坐标,每个水平值所对应的  $m_i$  值为纵坐标,作直观分析图(图 1~5)。由图 1 可以看出,随着天然裂缝密度的增加启动压力梯度呈降低趋势。由图 2 可以看出,启动压力梯度随着地层黏度含量的增加呈迅速上升趋势,从这可以反映出地层黏土含量对启动压力梯度的影响非常显著。因此,对于长岭气藏在进行气井产能分析时,地层黏土含量

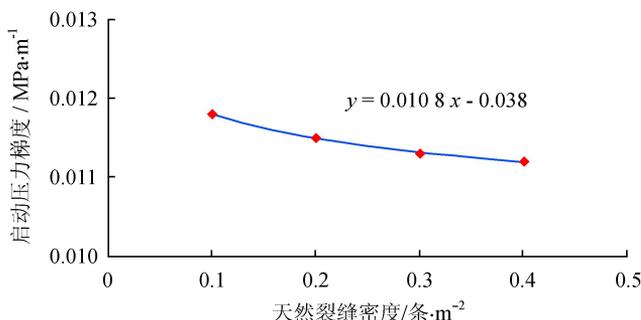


图 1 天然裂缝密度对启动压力梯度的影响图

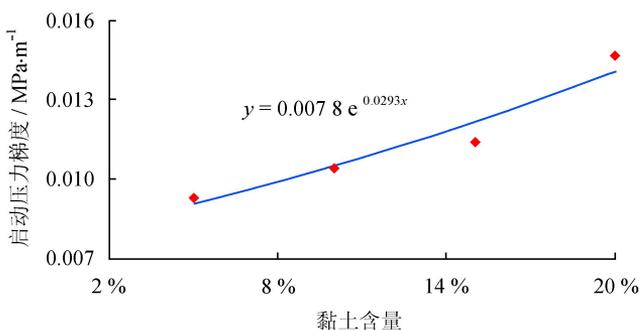


图 2 黏土含量对启动压力梯度的影响图

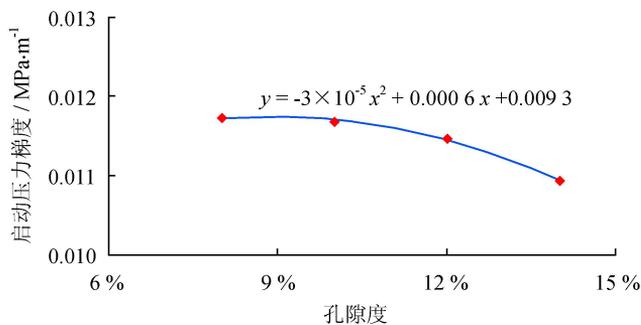


图 3 孔隙度对启动压力梯度的影响图

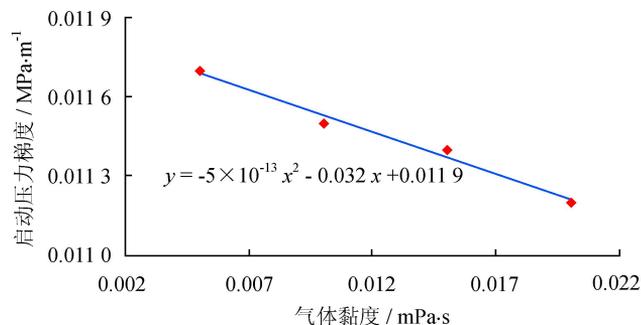


图 4 气体黏度对启动压力梯度的影响图

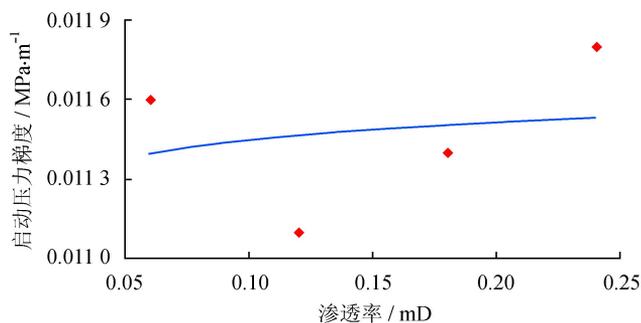


图 5 地层渗透率对启动压力梯度的影响图

度随着地层孔隙度的增加呈递减趋势。由图 4 可以看出,气体黏度对启动压力梯度的影响不具有规律性。由图 5 可以看出,启动压力梯度随储层渗透率增加呈递减的趋势。

### 3 现场应用分析

位于松辽盆地南部的长岭气田下白垩统登娄库气藏气层为属于低孔、特低渗储层,中部深度为 3 400~3 700 m,压力系数介于 1.062~1.067,属于正常压力系统,地层温度主要分布范围为 125~140 °C;岩心分析孔隙度一般为 2.7%~6.6%,平均为 5.2%;渗透率介于 0.04~0.24 mD,平均为 0.175 mD,天然裂缝密度在 0~0.5 条/m<sup>2</sup> 范围内,气体黏度在 0.05~0.20 mPa·s 范围内。

C1~C4 井为长岭气田邻近的 4 口气井,利用式(1)计算出 4 口气井稳定生产 100 d 后产能方程的  $a$ 、 $b$  系数值、启动压力梯度值、产能值。表 4 中列出了 4 口气井三项式产能方程的系数值、启动压力梯度值和产能值,并与实际产能相比较。

从表 4 中可以看出,随着启动压力梯度的增加,计算产能与实际产能都趋于减小,长岭气田登娄库组 4 口气井计算产能与实际产能的相对误差都在 10% 以下,说明考虑压力梯度的三项式产能方程能够较准确

表 4 长岭气田 4 口气井计算产能与实际产能对比表

井号	$a$	$b$	启动压力梯度 / MPa·m <sup>-1</sup>	计算产能 / 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>	实际产能 / 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>	相对误差
C1	10.89	1.861	0.009 8	20.7	22.1	-6.33%
C2	13.27	1.569	0.010 7	16.1	15.6	+3.21%
C3	17.48	1.112	0.012 6	14.5	13.2	+9.85%
C4	19.24	1.327	0.014 4	9.9	10.8	-8.33%

的预测登娄库气藏气井产能;此外,对于低渗透气藏气井必须考虑启动压力梯度进行产能分析,其结果对气藏开发具有较强的指导意义。

## 4 结论

1)长岭登娄库组致密砂岩气藏气井产能分析中启动压力梯度受到天然裂缝密度、黏土含量、孔隙度、气体黏度、渗透率等因素的影响,其影响主次顺序为黏土含量、孔隙度、渗透率、天然裂缝密度、气体黏度。

2)利用三项式产能方程计算所得的长岭气田产能与实际产能间的相对误差小于 10%,处于合理范围内,说明气藏气井的产能分析考虑启动压力梯度是正确的,对长岭登娄库组致密砂岩气藏产能分析具有一定的指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] 王富平,黄全华,张连军,等.低渗透气藏压裂井三项式产能方程分析[J].天然气技术,2010,4(5):25-27.
- [2] 李闯,薛国庆,罗碧华,等.低渗透气藏拟稳态三项式产能方程及应用[J].新疆石油地质,2009,30(5):593-595.
- [3] 李伟,于士泉,郑丽坤.确定三项式产能方程系数的新方法[J].大庆石油地质与开发,2008,27(4):61-63.
- [4] 郭晶晶,张烈辉,梁斌.考虑启动压力梯度的低渗透气藏压裂井产能分析[J].天然气工业,2010,30(7):45-47.
- [5] 胥洪成,陈建军,万玉金,等.一点法产能方程在气藏开发中的应用[J].石油天然气学报:江汉石油学院学报,2007,29(3):454-456.
- [6] 高海红,程林松,冯儒勇.考虑启动压力梯度的低渗气藏水平井产能计算[J].天然气工业,2008,28(7):75-77.
- [7] 陈元千.线性流的启动压力梯度不能用于平面径向流方程[J].石油学报,2011,32(6):1088-1092.
- [8] 董大鹏,冯文光,赵俊峰,等.考虑启动压力梯度的相对渗透率计算[J].天然气工业,2007,27(10):95-96.
- [9] 马飞,杨逸,宋燕高,等.新场气田低品质储层启动压力梯度影响因素[J].石油地质与工程,2011,25(2):72-75.
- [10] 王尤富,吴刚,安淑凯,等.低渗透油层岩石启动压力梯度影响因素的试验研究[J].石油天然气学报:江汉石油学院学报,2006,28(3):112-113.