

# 低速非达西渗流理论方法在 DST 试井中的应用

刘长印<sup>1</sup> 王和琴<sup>1</sup> 孙良田<sup>1</sup> 孔令飞<sup>1</sup> 孙宜建<sup>2</sup>

(1.中原油田井下特种作业处 2.中原油田采油二厂)

刘长印等.低速非达西渗流理论方法在 DST 试井中的应用.天然气工业,2005;25(5):88~90

**摘要** 文章从低渗透油气藏中流体低渗流速度特征入手,通过引入启动压差概念,建立了能描述低渗透油气藏中流体低速非达西渗流的渗流微分方程和考虑井筒储集、表皮效应的低速非达西渗流 DST 段塞流试井模型,并结合适当的地质模型、内(外)边界条件,构成了低速非达西渗流定解问题。通过对其求解,从试井解释的角度上得出新型样板曲线,这进一步丰富了对低渗透油气藏的认识。在进行 DST 测试时,启动压差的影响将会导致续流时间延长,增加解释的难度;其试井导数曲线后期上翘,不能简单认为是边界反映,要结合地质及生产实际情况做细致分析才能得出结论,这有效地解决了过去遇到的压力导数曲线上翘而解释边界距离太近的疑难问题。此外,采用低速非达西渗流模型可解释为何在低渗层中刚开井投产时无产量,而经过一段时间后才产生产量的现象。

**关键词** 低渗透油气藏 非达西流 低速 试井解释 启动压力

## 一、引言

中原油田多为低渗或特低渗透油气藏,在油气田开发方面存在很多问题,地层测试存在许多急待解决的问题。低速非达西渗流机理及地层测试分析研究,将有助于更加正确的认识油气层参数,更加准确地进行油气层评价和动态监测,对油田科学决策,对开发方案制订和调整,对增产措施的制订都将起到非常重要的作用。

## 二、低渗油层启动压差的研究

在低渗透油层中,流体渗流时主要受岩石孔道壁与流体固、液相界面上的表面分子力作用。因此,流体渗流压差由零逐渐增大使流体发生流动,首先要克服这种固、液界面上的表面分子力作用。只有在驱动压差达到一定程度后,流体才开始流动。这一数值即为启动压力梯度,简称为启动压差。

“启动压差”是低渗透油层中流体低速非达西流动研究中一个非常重要的概念。对于中高渗透油层,当渗流速度较小、还未出现紊流时,流体渗流服从达西线性流动,此时的启动压差为零。这种情况对中高渗透油层并不重要,但对低渗透油层则不同。其启动压差表示流体渗透流的难易程度,即启动压差越大,油层中流体的渗流越难。

## 三、低速非达西渗流理论研究

### 1. 达西定律及适用范围

$$v = \frac{K}{\mu} \frac{\Delta p}{L} \quad (1)$$

定义达西准数( $D_a$ ):

$$D_a = \frac{K \Delta p}{\mu w L} \quad (2)$$

$D_a$  为无量纲数,可解释为驱动力与粘滞力之比。在达西定律成立的范围内,有  $D_a = 1$ 。这说明在达西渗流中驱动力完全用于克服粘滞阻力,因此达西定律描述了粘滞力作用下的线性渗流规律。

### 2. 低速非达西渗流基本渗流规律

低速渗流时驱动力除了用于克服粘滞阻力外,还要克服低速渗流所特有的附加阻力作用。由式(1)进一步可以导出低速渗流下流动公式:

$$v = \frac{K}{\mu} \left( \frac{\Delta p}{L} - \gamma \right) \quad (3)$$

当我们用某一常数  $\gamma$  来近似代替  $\gamma$  时,可以得到油藏工程中采用的拟达西公式:

$$v = \frac{K}{\mu} \left( \frac{\Delta p}{L} - \gamma \right) \quad (4)$$

此处  $\gamma$  为拟启动压力梯度,即启动压差。

### 3. 低渗透油层压力传导方程及其近似解析解

低渗透渗流由于不再遵循线性达西定律,因而

**作者简介:**刘长印,高级工程师;1990年毕业于石油大学石油地质专业,2004年毕业于西南石油学院,获博士学位;现一直从事试油、压裂综合研究工作。地址:(457164)河南省濮阳市柳屯。电话:(0393)4876934。E-mail:jxdzslcy@163.com

在开发这类油层时存在许多不同于中、高渗油层的特殊性。其主要特点表现在低渗透油层渗流具有启动压力梯度,由于启动压力梯度的存在使得这类渗流问题成为一类含动边界的非线性渗流问题,渗流开始只在井底附近区域的激动区内发生,该区域内地层压力梯度大于启动压力梯度。随着油井的不断生产,激动区边界随时间的变化以一定的规律向外扩展,而在激动区外地层压力梯度小于启动压力梯度,没有渗流发生。

具启动压力梯度的低渗透弹性不稳定平面径向渗流问题的数学模型可写为:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \partial_e \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \frac{\partial p}{\partial r} - \gamma \right) \right] \quad (5)$$

初始条件:  $p = p_i; t = 0$ 。

井壁条件:  $\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{Q\mu}{2\pi Kh\gamma} + \gamma; r = r_c$ 。

激动区边界条件:  $p(r, t) = p_i; \frac{\partial p}{\partial r} = \gamma; r = T(t)$ 。

想要求得上述问题的精确解析解非常困难,这里我们用一种解弹性不稳定渗流问题的近似方法——积分法求得了低渗透弹性不稳定渗流定产量问题的近似解析解(求解过程省略),并以此来分析低渗透油层开发过程中的压力动态。近似解析解的形式为:

$$p^D = \ln \frac{R_D}{r_D} + \frac{r_D}{R_D} - 1 + \gamma_b (R_D - r_D) \quad (6)$$

式中:  $p^D = \frac{2\pi Kh}{Q\mu} (p_i - p)$  为无因次压力;  $\gamma_b = \frac{2\pi Kh r_{cv} \gamma}{Q\mu}$  为无因次启动压力梯度;  $t_D = \frac{\partial_e t}{r_c^2}$  为无因次时间;  $r_D = \frac{r}{r_c}$  为无因次半径;  $R_D = \frac{R}{r_c}$  为无因次激动区半径。

#### 四、压力恢复试井及压力动态分析

对于低速非达西流,严格讲是一个非线性移动边界问题,压力恢复迭加原理不适合低速非达西渗流。但是在实际计算时,由于启动压力梯度较小,另外,如果关井前生产时间较长,在关井前一段时间里,边界移动变化量是很小的,因此可以用边界问题近似之。在这种情况下,仍可用迭加原理:

$$p^{D_{恢复}} = p^D [(t_p)_D] - p^D [(\Delta t + t_p)_D] + p^D [(\Delta t)_D] \quad (7)$$

实例计算表明,迭加原理是可以运用的。

图1表明:在相同参数下,压力恢复曲线与压降曲线在早期是重合的,但后来都变为在压降曲线的下方,表明恢复更为缓慢。

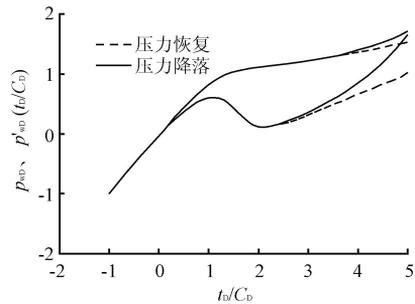


图1 压力恢复与压力降落在无穷地层中比较图

图2表明:在封闭地层中,压力恢复达到边界后,导数是下掉的,这与实际情况相符。因为在封闭地层中,压力恢复最终要恢复到平均地层压力,因而相当于定压情况,所以导数下掉。

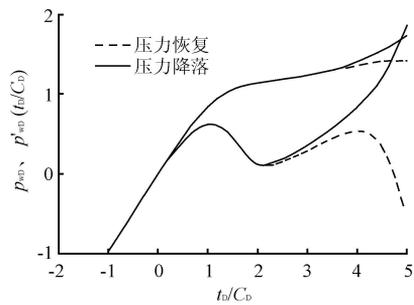


图2 压力恢复与压力降落在圆形封闭地层中比较图

由以上分析看出,低渗透地层渗流时启动压力梯度的存在对地层压力动态有很大的影响,且随着开发时间的延续其影响愈趋增大,使得低渗透地层井底压降变化规律、激动区边界运动规律不同于一般弹性流体渗流规律,因此当进行低渗透油田油藏工程计算,特别是应用不稳定试井分析求取地层参数时不能再沿用一般达西流方法,而应针对低渗透地层启动压力梯度的渗流特点研究和开发出更适应的计算方法。

#### 五、应用实例

通过对中原油田9口井进行解释应用,压力导数曲线在早期都有不同程度的上翘,解释边界距离0.3~63 m,与地质构造情况严重不符,而采用低速非达西渗流模型解释拟合很好,去除了边界,增加了

启动压差参数,使解释结果更符合低渗、特低渗油藏气藏实际情况。9口井部分解释参数如表1所示。

表1 中原油田部分井的解释参数

井号	常规解释模型			低速非达西渗流模型		
	渗透率( $\mu\text{m}^2$ )	表皮系数	边界距离(m)	渗透率( $\mu\text{m}^2$ )	表皮系数	启动压差(MPa/m)
卫339 <sup>①</sup>	$8.5 \times 10^{-4}$	5.1	2.05, 2.05	$9.3 \times 10^{-4}$	4.2	1.18
文227 <sup>①</sup>	$1.69 \times 10^{-2}$	4.8	1.5, 1	$2.2 \times 10^{-2}$	4	1.52
胡114	$1.1 \times 10^{-3}$	28.7	13.4, 13.4	$1.05 \times 10^{-3}$	27	0.0455
胡108	$5.5 \times 10^{-7}$	11.9	0.304, 0.304	$7.2 \times 10^{-7}$	13	8.07
胡96-1	$3.9 \times 10^{-4}$	4.1	2, 3.4, 3.4	$7.9 \times 10^{-4}$	4.3	1.94
文179-9	$1.2 \times 10^{-3}$	17.9	63.7, 63.7	$1.22 \times 10^{-3}$	18	0.0112
文153-2	$3.4 \times 10^{-5}$	0.87	4.05, 4.05	$4.25 \times 10^{-5}$	0.8	1.02
卫339 <sup>②</sup>	$8.5 \times 10^{-4}$	5.1	2.056, 2.056	$9.33 \times 10^{-5}$	4.2	1.18
胡116 <sup>①</sup>	$3.9 \times 10^{-3}$	-1	11.09, 11.09	$8.47 \times 10^{-3}$	-0.5	0.077
文古2	$2.01 \times 10^{-5}$	0.9	5.1	$3.01 \times 10^{-5}$	2.6	0.33

## 六、典型井例

部1-3井位于户部寨气田的卫79~9块,测试井段为3454.1~3588.9m,垂直井,井半径0.06m,孔隙度10.5%,有效厚度17.9m,地层压力31.439MPa,地层温度131.71℃。生产时间为287h,油产量为1.7m<sup>3</sup>/d,气产量为53463m<sup>3</sup>/d,水产量为9.1m<sup>3</sup>/d。

### 1. 常规处理方法

采用外边界模型,平行断层,渗透率为 $3.321 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2$ ,表皮系数为-3.318,地层压力为33.85MPa,断层距离 $L_1$ 为25m,断层距离 $L_2$ 为25m。

### 2. 低速达西渗流模型处理结果

采用外边界模型,无穷地层,渗透率为 $2.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,表皮系数为6.47,启动压差为 $1.9 \times 10^{-2}$ MPa/m。

由图3可看出实测压力导数曲线出现了明显的上翘特征,原来按不渗透边界解释,断层距离只有15m,从构造图看该井距离断层200m以上,所以按断层模型是不合适的。而本研究成果的提出恰可以弥补这一方面的不足,实际应用表明,采用此模型的解释结果是比较贴近实际情况的。

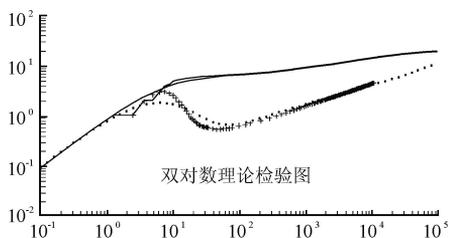


图3 部1-3井压力导数曲线

## 七、结论与建议

(1)在描述低渗层流体渗流规律时,低速非达西流比达西流定律更能反映实际情况。

(2)笔者引入拟体积系数和拟真实启动压差的概念,通过一种简化近似方法,使对油井适用的分析方法能很方便的应用到气井分析上。

(3)笔者对低速非达西流在有界地层中求解是解析解,比数值求解精度要高,运算要快,节约时间。

(4)压裂改造可以减少启动压力造成的影响;启动压差可以作为压裂选井的重要参数。

### 参 考 文 献

- 冯文光.天然气非达西低速不稳定渗流.天然气工业,1986;6(3)
- 程时清,李跃刚.低速非达西渗流试井模型的数值解及其应用.天然气工业,1995;16(3)
- 李凡华,刘慈群.含启动压力梯度的不定常渗流的压力动态分析.油气井测试,1997;6(1)
- 程时清,徐伦勋.低速非达西渗流试井典型曲线拟合法.石油勘探与开发,1996;23(4):50~53
- 程时清,李功权.双重介质油气藏低速非达西渗流试井有效井径数学模型及典型曲线.天然气工业,1997;17(2):35~37
- 贾永禄,李允.双孔介质有界地层试井分析模型及样板曲线.石油学报,1996;17(4):98~103
- 夏位荣,王新海.低渗透油层早期压力恢复资料的解释方法——恢复程度法.油气井测试,1993;2(1):26~28

(收稿日期 2005-02-21 编辑 韩晓渝)