

文章编号: 0253-9985(2009)01-0122-05

# 非线性渗流地层水平气井二项式产能方程

袁迎中<sup>1</sup>, 张烈辉<sup>1</sup>, 王健<sup>1</sup>, 普艳伟<sup>2</sup>

(1. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500;

2. 中国海洋石油总公司 渤海钻探第二固井分公司, 天津 300280)

**摘要:** 水平井是开发低渗透气藏最有效的方法之一, 而低渗透气藏存在着启动压力梯度效应以及高速非达西渗流时的紊流效应。通过建立和求解包含水平气井井身结构参数、近井区高速非达西渗流条件下气体紊流因素以及启动压力梯度效应的水平气井渗流模型, 推导出描述水平气井产能的二项式产能方程。在此基础上, 依据理论推导和计算, 对水平气井和直井的产能进行对比, 研究启动压力梯度以及非达西渗流对水平气井产能的影响。结果表明启动压力梯度对水平气井产量影响呈一线性下降关系, 非达西流动引起水平气井产能的降低, 并且非达西流动对水平井的影响小于对直井的影响。

**关键词:** 启动压力梯度; 二项式产能方程; 非达西渗流; 水平气井; 非线性渗流地层

中图分类号: TE132.2 文献标识码: A

## A binomial deliverability equation for horizontal gas wells in formations with nonlinear seepage flow features

Yuan Yingzhong<sup>1</sup>, Zhang Liehui<sup>1</sup>, Wang Jian<sup>1</sup>, Pu Yanwei<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Reservoir Geology and Development Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. The Second Well Cementing Branch of Bohai Drilling and Exploration Corporation, Tianjin 300280, China)

**Abstract:** A horizontal well is one of the most effective methods for developing low-permeability gas reservoirs which are characterized by the effects of start-up pressure gradient and turbulent flow under high-speed non-Darcy flow. A seepage flow model was established and solved for horizontal gas wells. It involves wellbore structure parameters, turbulent gas flow under high-speed non-Darcy flow in near-wellbore area and start-up pressure gradient. A binomial deliverability equation for horizontal gas wells was derived. Based on strict theoretical derivation and calculation, deliverability of horizontal and vertical wells was compared to understand the influences of start-up pressure gradient and non-Darcy flow on the deliverability of horizontal gas wells. The results indicate that the start-up pressure gradient is in negative linear relationship with the deliverability, the non-Darcy flow decreases the deliverability of horizontal gas wells and its influence on horizontal gas wells is smaller than that on vertical gas wells.

**Key words:** start-up pressure gradient; binomial deliverability equation; non-Darcy flow; horizontal gas well; formation with nonlinear seepage flow features

由于低渗透气藏具有低孔低渗特征, 导致其气水渗流特征较为复杂, 传统意义上的经典渗流规律不再适用于低渗透气藏<sup>[1~3]</sup>。低渗透气藏存在着启动压力梯度效应以及高速非达西渗流时的紊流效应, 因此建立水平气井产能方程时必须考虑这些因素。

李晓平等<sup>[4]</sup>建立了无限大气藏中水平井产能分析的数学模型, 研究了气层厚度、各向异性、水平井在气藏中的位置及地层损害对产能的影响, 但并没有考虑到气体的非达西渗流效应。范子菲等<sup>[5]</sup>推导出了均质各向异性气藏水平井二项式产能公式, 在推导过程中考虑油藏各向异性、井底附

收稿日期: 2008-10-18。

第一作者简介: 袁迎中(1983—), 男, 博士研究生, 油气田开发。

基金项目: 高等学校优秀青年教师科研奖励计划; 教育部博士点基金课题(20040615004)。

近非达西流动对水平井产能的影响, 但并没有考虑到启动压力梯度效应。张黔川<sup>[6]</sup>等将整个气藏分为达西流动区域和非达西流动区域两个部分, 用不同的公式计算其压降, 研究了高速气体向水平井流动的非达西流二项式产能公式。此外, 高海红等<sup>[7,8]</sup>对考虑启动压力梯度的低渗气藏水平井产能计算进行了研究, 吴晓东等<sup>[9]</sup>研究了考虑储层伤害影响的水平气井产能, 杨小松等<sup>[10]</sup>对鱼骨型多分支水平气井产能规律进行了研究。

Billiter T 等<sup>[11]</sup>将 Babur-Odeh 水平油井的流动方程转变为气井的拟压力形式, 并且考虑了非达西流效应以及机械表皮效应, 提出了非压裂水平气井的无因次流入动态 IPR 曲线。Chase R W<sup>[12]</sup>等将 Chase 和 Alkandari 提出的压裂垂直气井的 IPR 曲线进行了改进, 可以用于预测水平气井的 IPR 曲线, 应用效果很好。

本文建立和求解了包含水平气井井身结构参数 近井区高速非达西渗流条件下气体紊流因素以及启动压力梯度效应的水平气井渗流模型, 推导出了描述水平气井产能的二项式产能方程。在此基础上, 依据严格的理论推导和计算, 对水平气井和直井的产能进行了对比, 研究了启动压力梯度以及非达西渗流对水平气井产能的影响。

## 1 直井二项式产能方程

在平面径向流情况下, 气体高速非达西渗流的速度方程为<sup>[13]</sup>:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu}{K} v + \beta v^2 \quad (1)$$

定义气体拟压力:

$$m(p) = 2 \int_m \frac{p}{\mu Z} dp \quad (2)$$

其中,  $p_m$  是任一参考压力。由公式(2)可得:

$$\frac{dm}{dr} = \frac{2p}{\mu Z} \frac{dp}{dr} \quad (3)$$

由  $v = \frac{Q_{sc}}{2\pi h r} \frac{p_{sc} T Z}{p T_{sc}}$  以及  $\rho = \rho_{sc} \frac{p T_{sc}}{p_{sc} T Z}$ , 并将(1)

代入(3)得:

$$\frac{dm}{dr} = \frac{Q_{sc} p_{sc} T}{\pi K h r T_{sc}} + \frac{\beta Q_{sc}^2 p_{sc} T}{2\pi^2 h^2 r^2 \bar{\mu} T_{sc}} \quad (4)$$

将(4)积分可得直井二项式产能方程:

$$m(p_e) - m(p_w) = a Q_{sc} + b Q_{sc}^2 \quad (5)$$

其中

$$a = \frac{p_{sc} T}{\pi K h T_{sc}} \ln \frac{R}{r_w} \quad (6)$$

$$b = \frac{\beta Q_{sc} p_{sc} T}{2\pi^2 h^2 \bar{\mu} T_{sc}} \left| \frac{1}{r_w} - \frac{1}{R} \right| \quad (7)$$

## 2 水平气井二项式产能方程

### 2.1 水平井产能方程

稳定条件下水平井产能方程主要有 Borisov 方法, Joshi 方法, Giger-Reiss-Jourdan 方法, Renard-Dupuy 方法以及 S. A. Elgaghah 方法等。此外, 拟稳定状态下的产能公式还有 Babur-Odeh 方法, Kuchuk 方法以及 Ecnomides 方法等。

水平井稳态产能公式可以写成以下通式:

$$J_h = \frac{2\pi K_h h}{\mu_o B_o \left[ \ln \frac{R_e}{R_p} + \frac{h}{L} \ln \frac{r_b}{r_w} \right]} \quad (8)$$

设定水平井泄油面积为  $S$ , Borisov 给出  $R_e = \sqrt{S/\pi}$ ,  $R_p = L/4$ ,  $r_b = h/2\pi$ , 于是得到:

$$J_h = \frac{2\pi K_h h}{\mu_o B_o \left[ \ln \frac{4R_e}{L} + \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2\pi r_w} \right]} \quad (9)$$

Joshi<sup>[14]</sup>设定水平井长度之半  $L/2$ , 等于椭圆形泄油区的焦距之半, 即  $L/2 = \sqrt{a^2 - b^2}$ , 拟圆形驱动半径  $R_{ch} = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{ab}$ , 得出:

$$a = \frac{L}{2} \sqrt{0.5 + \sqrt{0.25 + (2R_{ch}/L)^4}} \quad (10)$$

由  $R_e = \frac{a+b}{2} = \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{2}$ ,  $r_b = h/2$ , 得到:

$$J_h = \frac{2\pi K_h h}{\mu_o B_o \left[ \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2r_w} \right]} \quad (11)$$

### 2.2 水平气井二项式产能方程推导

#### 2.2.1 拟压力关系式

在(8)式中, 取  $R_e = \frac{a+b}{2} = \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{2}$ ,

$R_p = L/4$ ,  $r_b = h/2\pi$ , 假设非达西渗流发生在近井地带, 由直井二项式产能方程(5)可以推广得到水平气井二项式产能方程:

$$m(p_e) - m(p_w) = A Q_{sc} + B Q_{sc}^2 \quad (12)$$

$$A = \frac{p_{sc} T}{\pi K h T_{sc}} \left| \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2\pi r_w} \right| \quad (13)$$

$$B = \frac{\beta p_{sc} T}{2\pi^2 L^2 T_{sc}} \left| \frac{1}{r_w} - \frac{2\pi}{h} \right| \quad (14)$$

### 2.2.2 压力关系式

对于高压气藏:

$$\frac{p}{\mu Z} = \text{常数}, \text{拟压力 } m(p) = \int \frac{2p}{\mu Z} dp = \frac{2p}{\mu Z} p$$

则(12)式变为

$$p_e - p_w = C Q_{sc} + D Q_{sc}^2 \quad (15)$$

$$\text{其中 } C = \frac{\mu Z}{2p} \cdot A, D = \frac{\mu Z}{2p} \cdot B$$

方程(1)~(15)使用的均是SI制基本单位。

由  $\rho_{sc} = \frac{p_{sc} M}{RT_{sc}} = \frac{28.97 \text{ kg} p_{sc}}{RT_{sc}}$ , 并使用矿场单位制, 可得到标准状况下(温度 20 °C, 压力 0.101 325 MPa) C 和 D 的表达式:

$$C = \frac{12.74 \mu Z T}{2 K h p} \left| \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2\pi r_w} \right| \quad (16)$$

$$D = \frac{2.828 \times 10^{-13} \beta_{yg} Z T}{2 p L^2} \left| \frac{1}{r_w} - \frac{2\pi}{h} \right| \quad (17)$$

式中  $\beta$  为非达西流因子, 其表达式为

$$\beta = 7.644 \times 10^{10} / K^{1.2} \quad (18)$$

### 2.2.3 压力平方关系式

对于低压气藏,  $\mu Z = \text{常数}$ ,

$$\text{拟压力 } m(p) = \int \frac{2p}{\mu Z} dp = \frac{1}{\mu Z} p^2 \quad (19)$$

则(12)式变为:

$$p_e^2 - p_w^2 = C_1 Q_{sc} + D_1 Q_{sc}^2 \quad (20)$$

其中

$$C_1 = \frac{12.74 \mu Z T}{K h} \left| \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2\pi r_w} \right| \quad (21)$$

$$D_1 = \frac{2.828 \times 10^{-13} \beta_{yg} Z T}{L^2} \left| \frac{1}{r_w} - \frac{2\pi}{h} \right| \quad (22)$$

## 3 考虑启动压力梯度的水平气井二项式产能方程

考虑启动压力梯度  $\lambda$  的直井产能方程为:

$$Q_{sc} = \frac{2\pi K h [p_e - p_w - \lambda(r_e - r_w)]}{\mu_g B_g \ln(r_e/r_w)} \quad (23)$$

设

$$\lambda = \frac{2\pi K h (r_e - r_w)}{Q_{sc} \mu_g B_g} \quad (24)$$

则(23)式化为:

$$Q_{sc} = \frac{(p_e - p_w)}{\frac{\mu_g B_g}{2\pi K h} (1 + \lambda) \ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (25)$$

按照(25)的形式, 将水平井产量公式写为:

$$Q_{sc} = \frac{(p_e - p_w)}{\frac{\mu_g B_g}{2\pi K h} \left| (1 + \lambda_1) \ln \frac{4R_e}{L} + (1 + \lambda_2) \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2\pi r_w} \right|} \quad (26)$$

式中:

$$\lambda_1 = \frac{2\pi K h (R_e - L/4)}{Q_{sc} \mu_g B_g} \quad (27)$$

$$\lambda_2 = \frac{2\pi K h (h/2\pi - r_w)}{Q_{sc} \mu_g B_g} \quad (28)$$

$$R_e = \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{2} \quad (29)$$

(26)式整理可得:

$$p_e - p_w = Q_{sc} \frac{\mu_g B_g}{2\pi K h} \left| \ln \frac{R_e}{L/4} + \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2\pi r_w} \right| + \left| \left| R_e - \frac{L}{4} \right| \ln \frac{4R_e}{L} + \left| \frac{h}{2\pi} - r_w \right| \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2\pi r_w} \right| \cdot \lambda \quad (30)$$

将(30)代入(15)式, 可以得到考虑启动压力梯度的水平气井二项式产能方程:

$$p_e - p_w = \frac{12.74 \mu Z T}{2 K h p} \left| \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2\pi r_w} \right| \cdot Q_{sc} + \frac{2.828 \times 10^{-13} \beta_{yg} Z T}{2 p L^2} \left| \frac{1}{r_w} - \frac{2\pi}{h} \right| \cdot Q_{sc}^2 + \left| \left| \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{2} - \frac{L}{4} \right| \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \left| \frac{h}{2\pi} - r_w \right| \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2\pi r_w} \right| \cdot \lambda Q_{sc} \quad (31)$$

$$\left| \frac{h}{2\pi} - r_w \right| \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2\pi r_w} \cdot \lambda \quad (31)$$

直井二项式产能方程为:

$$p_e - p_w = \frac{12.74 \overline{\mu} Z T}{2 K h p} \ln \frac{R_e}{r_w} \cdot Q_{sc} +$$
$$\frac{2.828 \times 10^{13} \beta_{yg} Z T}{2 p L^2} \left| \frac{1}{r_w} - \frac{1}{R_e} \right| \cdot Q_{sc}^2 +$$
$$(R_e - r_w) \cdot \lambda \quad (32)$$

由此可以计算出水平气井与直井的产能比。

4 实例分析

以某低渗透气藏为例, 计算所需参数有  $R_e=400\text{ m}$ ;  $\mu=0.0145\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ;  $Z=0.825$ ;  $T=322\text{ K}$ ;  $K=1.2\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ ;  $\Delta p=14\text{ MPa}$ ;  $r_w=0.1\text{ m}$ ;  $\gamma_g=0.65$ ;  $\overline{p}=17\text{ MPa}$ 。

图 1 为相同压差下, 气层厚度对水平气井与垂直气井产量比的关系曲线。由图可以看出: 随水平井段长度的增加, 水平气井产能增加, 因为水平气井井段越长, 泄油面积越大, 这也是水平井产能比垂直井产能高的重要原因; 随气层厚度的减小, 水平气井与垂直气井产量比增加, 随气层厚度的增大, 水平气井与垂直气井产量比减小。

图 2 为不同气层厚度下水平井与直井的产量对比, 其中水平段长度  $L=200\text{ m}$ ,  $\mu=0.005\text{ MPa/m}$ 。可以看出, 随气层厚度增加, 直井产能线性增加, 而水平气井产能的增加幅度越来越小, 由此说明水平气井不适合于厚度较大的气藏的开采, 而适合于开发厚度较小的气藏。

图 3 为启动压力梯度对水平气井产量的影响。由图可见: 启动压力梯度对水平气井产量影

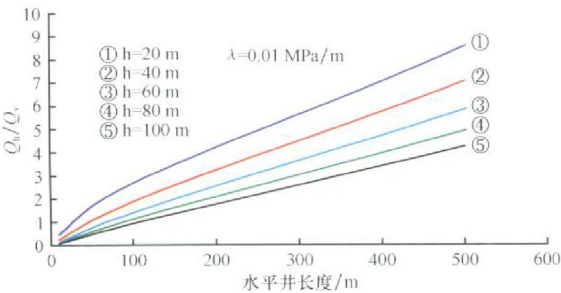


图 1 气层厚度对水平气井与垂直气井产量比的影响  
Fig. 1 Influence of gas layer thickness on the deliverability ratio of horizontal to vertical gas wells  
( $Q_h/Q_v$  为水平气井与垂直气井产量比。)

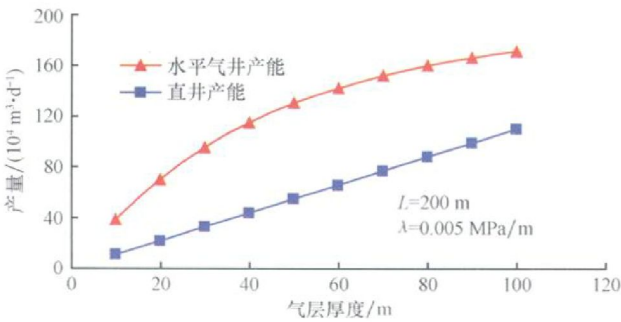


图 2 不同气层厚度下水平气井与直井产能对比  
Fig. 2 Comparison of deliverability between horizontal and vertical gas wells under different thickness of gas layers

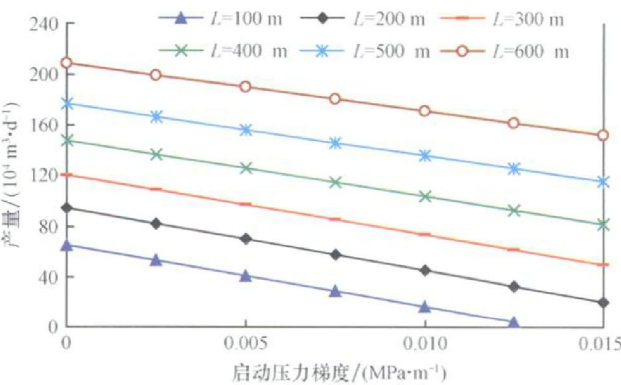


图 3 启动压力梯度对水平气井产量的影响  
Fig. 3 The influence of start-up pressure gradient on the deliverability of horizontal gas wells

响呈一线性下降关系; 随着启动压力梯度增大, 水平气井产量减少。当水平井长度较小, 而启动压力梯度较大(如图 3 中,  $L=100\text{ m}$ ,  $\lambda=0.0125\text{ MPa/m}$ ) 时, 水平气井可能停产。

表 1 为不同启动压力梯度下水平气井和直井在考虑紊流和不考虑紊流条件下的产气量。

由表 1 可见, 在相同气藏条件下, 水平气井的产气量显然比垂直井高得多, 并且非达西流动对

表 1 不同启动压力梯度下水平气井和直井的产气量  
( $L=200\text{ m}$ )

| Table 1 Gas production rates of horizontal and vertical gas wells under different start up pressure gradients |                                                               |       |                                                               |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------|-------|
| 启动压力梯度/<br>(MPa·m <sup>-1</sup> )                                                                             | 水平气井产量/<br>(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) |       | 垂直气井产量/<br>(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) |       |
|                                                                                                               | 无紊流                                                           | 考虑紊流  | 无紊流                                                           | 考虑紊流  |
| 0                                                                                                             | 94.66                                                         | 95.97 | 25.25                                                         | 28.07 |
| 0.002 5                                                                                                       | 82.48                                                         | 83.48 | 23.60                                                         | 26.06 |
| 0.005 0                                                                                                       | 70.26                                                         | 70.99 | 21.93                                                         | 24.06 |
| 0.007 5                                                                                                       | 58.00                                                         | 58.49 | 20.24                                                         | 22.05 |
| 0.010 0                                                                                                       | 45.69                                                         | 46.00 | 18.53                                                         | 20.05 |
| 0.012 5                                                                                                       | 33.34                                                         | 33.50 | 16.80                                                         | 18.05 |
| 0.015 0                                                                                                       | 20.95                                                         | 21.01 | 15.04                                                         | 16.04 |

水平井的影响小于对直井的影响。随着启动压力梯度的增加,水平气井的产量降低,无紊流和考虑紊流条件下产量的差别更小。

## 5 结论

1) 非线性渗流地层水平气井二项式产能方程具有较好的理论基础,考虑了水平气井井身结构参数,近井区高速渗流条件下气体紊流因素以及启动压力梯度效应。

2) 对水平气井和直井的产能进行了对比。计算结果表明当气层厚度较大时,水平气井增加产能的幅度越来越小,因此水平气井不适合于厚度较大的气藏的开采,而适合于开发厚度较小的气藏。

3) 定量研究了启动压力梯度以及非达西渗流对水平气井产能的影响。结果表明启动压力梯度对水平气井产量影响呈一线性下降关系;非达西流动引起了水平气井产能的降低,并且非达西流动对水平井的影响小于对直井的影响。研究结果对于水平气井产能分析的现场应用具有重要的指导意义。

### 符号注释

$a$ —椭圆长半轴, m;  
 $b$ —椭圆短半轴, m;  
 $B_g$ —天然气体积系数, 无量纲;  
 $B_o$ —石油体积系数, 无量纲;  
 $h$ —油气层厚度, m;  
 $J_h$ —产能指数,  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{Pa})$ ;  
 $K$ —气层渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  
 $K_h$ —水平渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  
 $L$ —水平井长度, m;  
 $m(p)$ —气体拟压力,  $\text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ ;  
 $M$ —分子量, 无量纲;  
 $p$ —气体压力, MPa;  
 $p_e$ —供给边界压力, MPa;  
 $p_{sc}$ —标准状态下气体压力, MPa;  
 $p_w$ —井底压力, MPa;  
 $Q_{sc}$ —标准状态下气井产量,  $10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ;  
 $r$ —地层围圆半径, m;  
 $r_b$ —垂直方向上水平井驱动半径, m;  
 $r_w$ —水平气井半径, m;  
 $R$ —气体普适常数,  $8\,314 \text{m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$ ;

$R_e$ —水平面驱动外边界半径, m;  
 $R_p$ —水平面拟圆形生产坑道半径, m;  
 $T$ —气层温度, K;  
 $Z$ —气体偏差因子, 无量纲;  
 $\Gamma_{sc}$ —标准状态下气体温度, K;  
 $\beta$ —非达西流因子, 无量纲;  
 $\gamma_g$ —气体相对密度, 无量纲;  
 $\mu$ —粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  
 $\mu_g$ —天然气粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  
 $\mu_o$ —石油粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  
 $\bar{\mu}$ —天然气平均粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  
 $v$ —气体流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  
 $\rho$ —气体密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  
 $\rho_{sc}$ —标准状态下气体密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

### 参 考 文 献

- 郭肖, 伍勇. 启动压力梯度和应力敏感效应对低渗透气藏水平井产能的影响[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(4): 539~ 543
- 郝蜀民, 惠宽祥, 李良. 鄂尔多斯盆地大牛地大型低渗气田成藏特征及其勘探开发技术[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 762~ 768
- 杜志敏, 付玉, 伍勇. 低渗透煤层气产能影响因素评价[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 762~ 768
- 李晓平, 刘启国, 赵必荣. 水平气井产能影响因素分析[J]. 天然气工业, 1998, 18(2): 53~ 56
- 范子菲. 裂缝性气藏水平井稳态解公式研究[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(5): 67~ 71
- 张黔川, 吕涛, 吕劲. 气藏水平井非达西流动二项式产能试井公式[J]. 天然气工业, 2004, 24(10): 83~ 85
- 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
- 王昔彬, 刘传喜, 郑荣臣. 大牛地致密低渗透气藏启动压力梯度及应用[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 698~ 702
- 吴晓东, 安永生, 李凡华. 考虑储层伤害影响的水平气井产能[J]. 天然气工业, 2008, 28(7): 78~ 80
- 杨小松, 刘传喜, 严谨, 等. 鱼骨型多分支水平气井产能规律研究[J]. 石油学报, 2008, 29(5): 727~ 733
- Billiter T, Lee J, Chase R. Dimensionless inflow-performance relationship curve for unfractured horizontal gas wells[J]. SPE 72361, 2001
- Chase R W, Cassandra R. Predicting horizontal gas well deliverability using dimensionless IPR Curves[J]. SPE 91101, 2004
- 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999. 253~ 263
- Joshi S D. Augmentation of well productivity using slant and horizontal wells[J]. SPE 15375, 1988

(编辑 董立)