

井控页岩气可动地质储量和可采储量的评价方法

陈元千, 齐亚东, 傅礼兵, 位云生
(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:页岩气是一种非常规天然气资源。页岩气藏由超致密基质和天然裂缝系统组成。基质中的页岩气是自生、自储和自闭的吸附气,裂缝系统中的页岩气为自由气,其中吸附气为页岩气的主体部分,必须通过打水平井进行多段压裂,才能从压裂产生的裂缝面解吸出来。这种被水平井控制的解吸气和自由气量总称为井控页岩气资源量。评价页岩气藏基质中的吸附气资源量和裂缝系统中自由气的资源量,通常采用体积法。其有效应用受基质中原始吸附气含量、天然裂缝系统的有效孔隙度、页岩视密度和原始地层压力准确性的影响。应当指出,中国于2014年颁布的《页岩气资源/储量计算评价技术规范》中所规定的体积法公式是错误的,而且也缺少动态法应用的具体内容。为此,根据页岩气以井为开发单元的特点,提出利用动态法评价井控页岩气可动地质储量和可采储量的方法。3口页岩水平气井实际应用结果表明,新建方法是实用且有效的。

关键词:页岩气 井控 可动地质储量 可采储量 评价方法

中图分类号:TE327.8

文献标识码:A

Methods for estimating well-controlled movable in-place and recoverable reserves of shale gas

CHEN Yuanqian, QI Yadong, FU Libing, WEI Yunsheng

(PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China)

Abstract: Shale gas is one of the unconventional natural gas resources, and shale gas reservoir is composed of extra-dense matrix and natural fracture system. Shale gas in the matrix is adsorbed gas that is self-generated, self-stored and self-trapped, while that in the fracture system is free gas. Overall adsorbed gas is the main resource of shale gas, which will be desorbed at the fracture surface created by multistage fracturing in the horizontal well. The desorbed gas and free gas controlled by the horizontal wells are generally called well-controlled movable gas in-place and recoverable reserves. Volumetric method is the most common one for estimating resources of adsorbed gas in the matrix and free gas in the fracture systems in the shale gas reservoirs. However, the application of the volumetric method is greatly influenced by the validity of data including original adsorbed gas content, effective porosity in the fracture system, shale bulk density, and initial formation pressure. It should be noted that the volumetric method formula is uncorrected which was reported in the 2014 national technical standards for shale gas resources/reserves estimation. Moreover, the standards do not refer to any specific content about performance estimating methods. Therefore, considering shale gas is developed in well unit, performance method was presented as to estimate the well-controlled movable in-place and recoverable reserves of shale gas wells. The results of actual application in 3 shale horizontal gas wells indicates that the new method is practical and effective.

Key words: shale gas; well-controlled; movable in-place reserves; recoverable reserves; estimation methods

中国拥有比较丰富的页岩气资源量,近几年来已逐步进入工业开发阶段。2016年页岩气的年产量已近 $80 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 约占全国天然气总产量的

5.9%, 并拥有近 500 口页岩水平气井。页岩气是一种非常规气,它由超致密基质中的吸附气和裂缝系统中的自由气组成,而页岩基质中的吸附气是页岩

收稿日期:2018-03-05。

作者简介:陈元千(1933—),男,河南兰考人,教授级高级工程师,从事油气藏工程、油气田开发和油气储量评价工作。联系电话:15910321810, E-mail:fulibing@petrochina.com.cn。

气资源的主体。应当指出,页岩基质渗透率为平方纳米级,比毫达西小3个数量级,如此低的基质渗透率,根本不存在吸附气的解吸和流动条件。因此,必须通过打水平井,并进行大型多段水力压裂,才能使吸附于裂缝面的气发生解吸,与储存自由气的天然裂缝系统相沟通,形成可用于页岩气可动地质储量和可采储量的井控评价单元。令人遗憾的是,在中国评价页岩吸附气和自由气资源量的DZ/T 0254—2014^[1]中规定的体积法,竟然是错误的^[2]。就体积法本身而言,影响页岩气资源量评价可靠性的因素很多,比如,页岩的原始吸附气含量、页岩的视密度、天然裂缝系统的有效孔隙度和原始地层压力等。

在拥有页岩气井大量动态资料的情况下,如何利用动态法评价井控页岩气可动地质储量和可采储量,陈元千等已作出了有效尝试^[3]。对于垂直气井,陈元千于1991年提出的垂直井压降曲线拟稳态方程^[4],已被广泛地应用于四川盆地大量定容裂缝性气藏探明地质储量的评价,并被引入SY/T 6098—2000和SY/T 6098—2010^[5-6]。基于文献[7-8]的研究成果,笔者重新推导了评价水平气井井控页岩气可动地质储量的压降曲线拟稳态方程。陈元千于2005年提出的快速直接评价油气井、油气藏和油气田可采储量的方法^[9],于2010年被引入SY/T 5367—2010^[10]。基于文献[11-12]的研究成果,经推导得到由文献[13]利用综合归纳法提出的直接快速评价井控页岩气可采储量的广义递减模型法。

1 评价方法的建立

1.1 评价井控页岩气可动地质储量的拟稳态法

压降曲线拟稳态法在中国又被称为弹性二相法。在稳定产量生产的条件下,压降曲线存在非稳态和拟稳态两大阶段。当气井以稳定产量开井生产时,井底流压随时间呈直线下降,当井底流压变化率为常数时,气井的生产动态处于拟稳态阶段。从理论上讲,由于地层气体粘度和气体偏差系数都是压力的函数,因此,应用拟压力表示压降曲线方程更为合适。但对页岩气井来说,由于页岩吸附气的解吸需要明显降低井口和井底流压,因此,当连通体内的压力低于15 MPa时,应用压力平方替代拟压力可以得到比较满意的结果。目前中国许多气井的稳定试井和不稳定试井基本上都采用压力平方法表示。尽管陈元千已对垂直气井的压降曲线拟稳态方程进行了理论上的推导^[4],但考虑到该方

法在评价井控页岩气可动地质储量方面的重要性,和页岩水平气井的特点,笔者又进行了一次简明的推导。当水平气井以稳定产量生产,而压力动态已达到拟稳态阶段时,以压力平方法表示的气井产量公式^[4,8]为

$$q_g = \frac{2.714 \times 10^{-5} KhT_{sc} (\bar{p}_R^2 - p_{wf}^2)}{p_{sc} \mu_{gi} Z_i T \left(\ln \frac{r_{ed}}{r_w} - \frac{3}{4} + S \right)} \quad (1)$$

将水平井的椭圆形驱动半径转为产量与垂直井相等的等效圆形驱动半径,则 r_{ed} 的计算式^[7-8]为

$$r_{ed} = r_w \left(\frac{1-h/L}{2} \right)^{\frac{h}{L}} \left[\left(\frac{4a}{L} - 1 \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

将式(1)整理后,可得井底流压的计算式为

$$p_{wf}^2 = \bar{p}_R^2 - \frac{3.684 \times 10^4 q_g \mu_{gi} Z_i T p_{sc}}{KhT_{sc}} \left(\ln \frac{r_{ed}}{r_w} - \frac{3}{4} + S \right) \quad (3)$$

对由水平气井控制的页岩气连通体,当气井压力动态达到拟稳态阶段时,此时物质平衡方程^[14]为

$$q_g(t-t_0)B_g = G_{wc} B_{gi} C_i^* (p_i - \bar{p}_R) \quad (4)$$

将式(4)两边同乘以 $p_i - \bar{p}_R$,整理后可得

$$p_i^2 = \bar{p}_R^2 + \frac{q_g(t-t_0)B_g(p_i + \bar{p}_R)}{G_{wc} B_{gi} C_i^*} \quad (5)$$

其中

$$C_i^* = C_{gi} + \frac{C_w S_{wi} + C_f}{S_{gi}} = C_{gi} + C_c \quad (6)$$

在拟稳态阶段早期, $\bar{p}_R \approx p_i$, $B_g \approx B_{gi}$,由式(5)可得

$$p_i^2 = \bar{p}_R^2 + \frac{2q_g p_i}{G_{wc} C_i^*} \quad (7)$$

将式(3)减式(7),得压降曲线拟稳态阶段的关系式为

$$p_{wf}^2 = p_i^2 - \frac{3.684 \times 10^4 q_g \mu_{gi} Z_i T p_{sc}}{KhT_{sc}} \times \left(\ln \frac{r_{ed}}{r_w} - \frac{3}{4} + S \right) - \frac{2q_g p_i (t-t_0)}{G_{wc} C_i^*} \quad (8)$$

将式(8)整理后可简写为

$$p_{wf}^2 = \alpha - \beta t \quad (9)$$

其中

$$\alpha = p_i^2 - \frac{3.684 \times 10^4 q_g \mu_{gi} Z_i T p_{sc}}{KhT_{sc}} \times \left(\ln \frac{r_{ed}}{r_w} - \frac{3}{4} + S \right) + \beta t_0 \quad (10)$$

$$\beta = \frac{2q_g p_i}{G_{wc} C_i^*} \quad (11)$$

根据实测的井口压降曲线拟稳态阶段的直线关系,按式(11)进行线性回归,求得 α 和 β 值后,再由式(10)得到评价井控页岩气井可动地质储量的关系式为

$$G_{wc} = \frac{2q_g p_i}{\beta C_i^*} \quad (12)$$

由于 $C_e \ll C_{gi}$,因此,式(6)可写为

$$C_i^* = C_{gi} = \frac{1}{p_i} - \frac{\partial Z}{Z \partial p} \quad (13)$$

由于 $\frac{\partial Z}{Z \partial p} \ll \frac{1}{p_i}$,故式(13)可较精确地简写为

$$C_i^* = \frac{1}{p_i} \quad (14)$$

将式(14)代入式(12),得评价井控页岩气可动地质储量的关系式为

$$G_{wc} = \frac{2q_g p_i^2}{\beta} \quad (15)$$

对于页岩水平气井,进行大型分段水力压裂后,从井口到水平井段,形成了一个由水平井主导的人工裂缝系统与天然裂缝系统相沟通的定容连通体。当水平气井以稳定产量生产,压力动态达到拟稳态阶段时,从井口到井底再到水平井段内连通体内任意位置的流动压力将进入等速同步下降的拟稳态阶段,此时 $\frac{dp_{whf}}{dt} = \frac{dp_{wf}}{dt} = \frac{dp_{mf}}{dt} = \beta = \text{常数}$ 。因此,可利用井口流压的 β 值代替井底流压的 β 值,即可利用式(15)评价井控页岩气可动地质储量。

1.2 评价井控页岩气可采储量的产量递减法

产量递减法是评价油气井、油气藏和油气田可采储量和剩余可采储量的重要方法,也是世界各石油公司和国际评估公司进行储量资产上市评估的主要方法,其不受油气藏储集类型、驱动类型和开发方式的限制,只要产量进入递减阶段即可有效应用。Arps于1945年提出的3种经典的产量递减法,只适用于投产即进入递减的模式,而且不能直接进行可采储量的预测。为此,笔者建立了可以直接快速评价可采储量的方法。

假设 t_0 为从投产计时进入产量递减阶段的开始时间, G_{pv_0} 为投产计产到 t_0 时的总累积产气量, q_i 为进入递减评价阶段的初始产气量,则截止到 t 时间($t > t_0$)的总累积产气量为

$$G_{pv} = G_{pv_0} + \int_{t_0}^t q_g dt \quad (16)$$

在产量递减阶段,文献[11]提出的产气量与时间的广义关系式为

$$q_g = \frac{q_i}{[1 + D_i(1-m)(t-t_0)]^{1-m}} \quad (17)$$

将式(17)代入式(16),得文献[2]提出的总累积产气量与产气量的关系式为

$$G_{pv} = G_{pv_0} + \frac{q_i}{m D_i} \left[1 - \left(\frac{q_g}{q_i} \right)^m \right] \quad (18)$$

将式(18)进行整理简化后,即可得到利用综合归纳法得到的广义递减模型^[13],其表达式为

$$q_g^m = A - B G_{pv} \quad (19)$$

其中

$$A = q_i^m + \frac{m D_i G_{pv_0}}{q_i^{1-m}} \quad (20)$$

$$B = \frac{m D_i}{q_i^{1-m}} \quad (21)$$

当 $q_g = q_{EL}$ 时,由式(19)得评价经济可采储量的广义关系式为

$$G_{RE} = \frac{A - q_{EL}^m}{B} \quad (22)$$

当 $q=0$ 时,由式(19)得评估技术可采储量的关系式为

$$G_{RT} = \frac{A}{B} \quad (23)$$

当 $m=2$ 时,由式(19)一式(23)可得线性递减的有关关系式为

$$q_g^2 = A_L - B_L G_{pv} \quad (24)$$

$$A_L = q_i^2 + 2D_i G_{pv_0} q_i \quad (25)$$

$$B_L = 2D_i q_i \quad (26)$$

$$G_{RE} = \frac{A_L - q_{EL}^2}{B_L} \quad (27)$$

$$G_{RT} = \frac{A_L}{B_L} \quad (28)$$

当 $m=1$ 时,由式(19)一式(23)可得指数递减的有关关系式为

$$q_g = A_E - B_E G_{pv} \quad (29)$$

$$A_E = q_i + D_i G_{pv_0} \quad (30)$$

$$B_E = D_i \quad (31)$$

$$G_{RE} = \frac{A_E - q_{EL}}{B_E} \quad (32)$$

$$G_{RT} = \frac{A_E}{B_E} \quad (33)$$

当 $0 < m < 1$ 时,双曲线递减的评价关系式即为式(19)一式(23)。下面对广义递减模型的递减率推导如下。

Arps于1945年定义的递减率为

$$D = -\frac{dq_g}{q_g dt} \quad (34)$$

为了确定广义递减模型的递减率,将式(19)对

时间求导得

$$-\frac{dq_g}{q_g dt} = \frac{B}{mq_g^{m-1}} \quad (35)$$

将式(34)代入式(35),得广义递减模型的递减率为

$$D = D_i \left(\frac{q_i}{q_g} \right)^{m-1} \quad (36)$$

当 $m=2$ 时,由式(36)得线性递减的递减率为

$$D_L = D_i \frac{q_i}{q_g} \quad (37)$$

当 $m=1$ 时,由式(36)得指数递减的递减率为

$$D_E = D_i = \text{常数} \quad (38)$$

当 $0 < m < 1$ 时,由式(36)可得不同 m 值时递减率关系式, m 值愈大,则递减率愈大。

2 方法应用实例

笔者通过中国3口页岩水平气井的实际应用,说明所建方法的实用性和有效性。

2.1 拟稳态法的应用

由SG-1井的生产历史曲线(图1a)可以看出,曲线最后一段产气量基本稳定,井口流压呈直线下降趋势,具有达到拟稳态的条件。按照式(9)绘制得到拟稳态阶段的压降曲线,曲线最后一段是一条

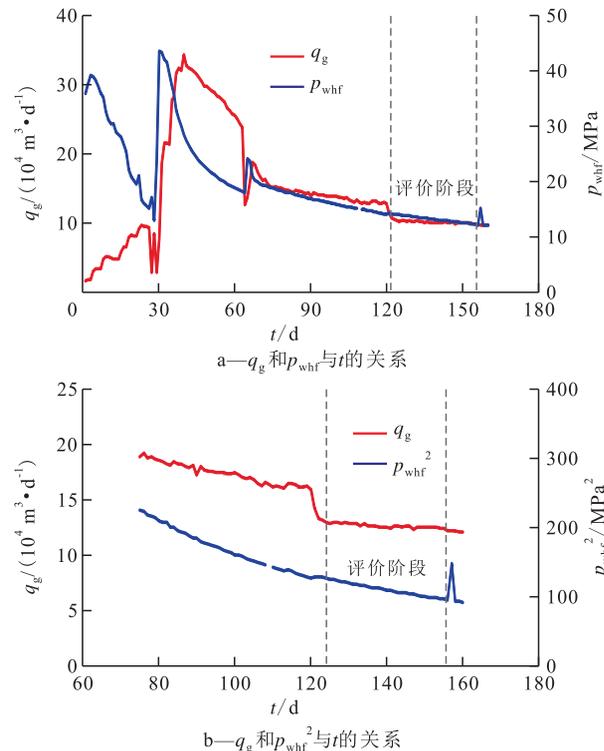


图1 SG-1井的生产历史曲线及拟稳态阶段的压降曲线
Fig.1 Production history curves and the plot of p_{whf}^2 and t of Well SG-1

很好的直线(图1b)。经线性回归求得直线的截距为246.1,斜率为0.968 8,相关系数为0.998 1。由页岩层埋深静水压力1.5倍估算原始地层压力,其值为38.25 MPa,评价阶段的稳定产气量为 12.64×10^4 m^3/d 。将有关参数代入式(15),得该井的井控页岩气可动地质储量为

$$G_{wc} = \frac{2 \times 12.64 \times 38.25^2}{0.9688} = 3.83 \times 10^8 \text{ m}^3 \quad (39)$$

2.2 线性递减法的应用

由SG-2井的 q_g 与 t 的关系(图2a)可以看出,该井投产50 d后即进入线性递减阶段。根据式(24),绘制 q_g^2 与 G_{pr} 的关系曲线,分析图2b可知,该井的递减属于线性递减率,即 $m=2$ 。经线性回归后,求得直线的截距为1.220 9,斜率为0.000 7,相关系数为0.948 6。将 A_L 和 B_L 值代入式(28),得该井的井控页岩气技术可采储量为

$$G_{RT} = \frac{1.2209}{0.0007} = 1744 \times 10^4 \text{ m}^3 \quad (40)$$

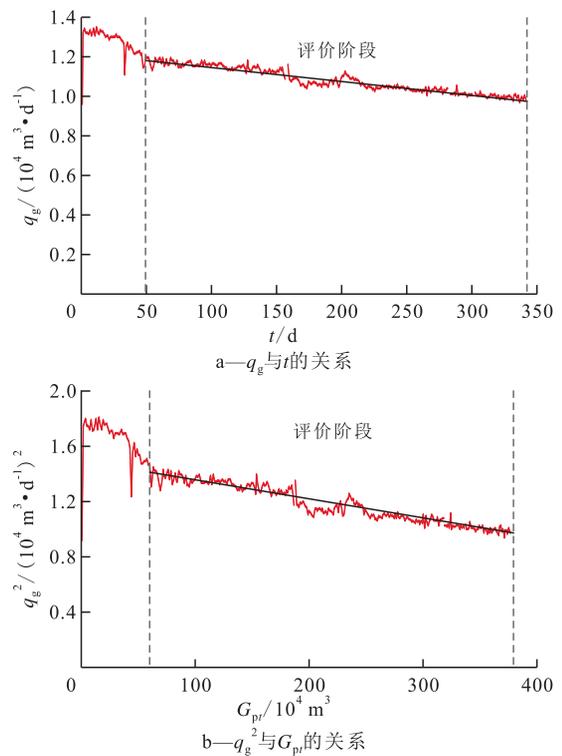


图2 SG-2井的 q_g 与 t 及 q_g^2 与 G_{pr} 的关系

Fig.2 Relationship curve of q_g-t and the plot of $q_g^2-G_{pr}$ of Well SG-2

2.3 指数递减法的应用

分析SG-3井的 q_g 与 t 的关系(图3a)可知,该井在排除钻井、完井、测井和压裂等施工液对产气量的波动影响后,即进入了正常的产量递减阶段。根据式(29),绘制 q_g 与 G_{pr} 的关系曲线。由图3b可见, q_g 与 G_{pr} 呈很好的直线关系,符合指数递减规律。经

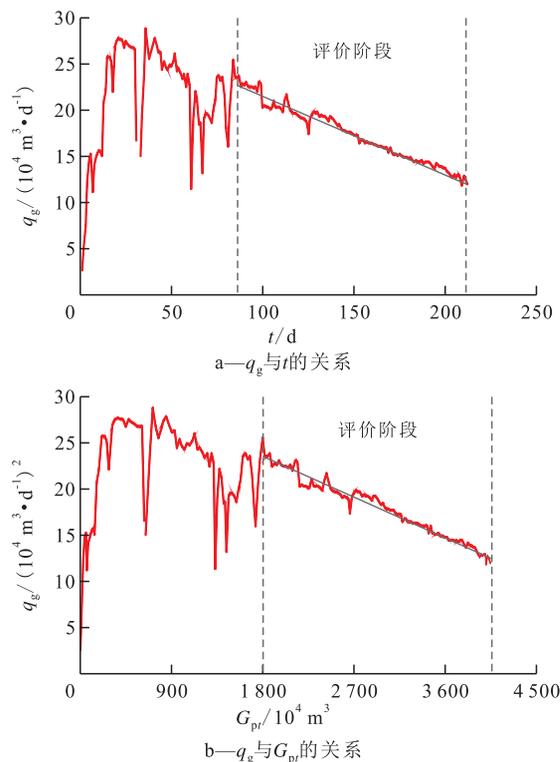


图3 SG-3井的 q_g 与 t 及 q_g 与 G_{pi} 的关系

Fig.3 Relationship curve of q_g-t and the plot of q_g-G_{pi} of Well SG-3

线性回归后,求得直线的截距为32.138,斜率为0.0048,相关系数为0.9842。将 A_E 和 B_E 值代入式(33),得该井的井控页岩气技术可采储量为

$$G_{RT} = \frac{32.138}{0.0048} = 6695 \times 10^4 \text{ m}^3 \quad (41)$$

3 结论

页岩气是由超致密基质中的吸附气和天然裂缝系统中的自由气组成,其中吸附气是页岩气资源的主体。根据天然裂缝的发育程度,可将页岩气藏分为裂缝性页岩气藏和基质性页岩气藏。前者是形成页岩气井高产的主要条件,后者是为页岩气井提供解吸气源的基础。评价页岩气资源量的方法主要是体积法,其可靠性取决于页岩基质的原始吸附气含量、页岩视密度、天然裂缝系统的有效孔隙度和页岩气藏的原始地层压力。令人遗憾的是,中国发布的DZ/T 0254—2014所规定的评价页岩气资源量的体积法是错误的。

页岩气的开发,必须通过打不同方式的水平井,并通过大型分段水力压裂,形成以水平井为主导的人工裂缝与天然裂缝相沟通的定容连通体,这就是笔者所提出的井控评价单元。笔者提出的评价井控页岩气可动地质储量和可采储量的方法,实

例应用结果表明,该方法是实用、有效的。对于应用压降曲线拟稳态法评价的水平气井,当产量进入递减阶段后,应采用广义递减模型法评价井控页岩气的可采储量。对于已进入产量递减的水平气井,应当先根据气井的生产历史曲线,判断产量与时间是否呈直线关系。如果呈直线关系,则应先利用广义递减模型的线性递减法,评价井控页岩气的技术可采储量。如果不呈直线关系,则应用广义递减模型的指数递减法,进行技术可采储量的评价,双曲线递减发生的概率较低。从递减的快慢而言,线性递减最快,指数递减其次,双曲线递减最慢。总之, m 值愈大,产量递减得愈快。

页岩水平气井的生产,会受到钻井、完井、测井和水力压裂等施工液的严重影响,应当在投产初期尽快排出,否则,页岩水平气井就难以正常生产,而面临停喷停产的局面。除此之外,在页岩水平气井正常生产时,不要随意关井开井,避免引起气井的激动,降低气体携带凝析水的能力,导致气井过早的停喷停产。为了保持或提高页岩气井的产量,或降低产量的递减率,可能会采用换小油管、注气排液和井口安装压缩机进行负压生产等措施,对此,需做好仔细的经济评价工作。应当指出,在页岩气的开发过程中,始终存在着投入与产出的平衡问题,两者的严重失衡,将是对页岩气开发的最大挑战。

井控页岩气可动地质储量和可采储量的评价,是预测而不是算命,更不能一劳永逸。评价结果会因评价时间、评价方法和评价阶段使用的资料不同而改变。

符号解释:

q_g ——拟稳态法的稳定产气量,或产量递减法 t 时间的产气量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; t ——从投产计时的生产时间, d ; K ——有效渗透率, mD ; h ——有效厚度, m ; T_{sc} ——地面标准温度, K , 其值为293; p_R ——地层压力, MPa ; p_{wf} ——井底流动压力, MPa ; p_{sc} ——地面标准压力, MPa , 其值为0.101; μ_{gi} —— p_i 下的气体粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; p_i ——原始地层压力, MPa ; Z_i —— p_i 下的气体偏差系数; T ——气层温度, K ; r_{cd} ——水平井的等效圆形驱动半径, m ; r_w ——水平井段的井筒半径, m ; S ——表皮系数, f ; L ——水平井段长度, m ; a ——水平井椭圆驱动长轴半长, m ; t_0 ——从投产计时进入拟稳态或产量递减的开始时间, d ; B_g ——气体体积系数, Rm^3/SCm^3 ; G_{sc} ——井控页岩气可动地质储量, 10^4 m^3 ; B_{gi} ——原始气体体积系数, Rm^3/SCm^3 ; C_t^* ——总压缩系数, MPa^{-1} ; C_{gi} —— p_i 下的气体压缩系数, MPa^{-1} ; C_w ——束缚水的压缩

系数, MPa^{-1} ; S_{wi} ——束缚水饱和度, f ; C_r ——岩石的有效压缩系数, MPa^{-1} ; S_{gi} ——原始含气饱和度, f ; C_e ——气层的有效压缩系数, MPa^{-1} ; α 和 β ——拟稳态法直线的截距和斜率; Z ——气体偏差系数, f ; p ——压力, MPa ; p_{whf} ——井口流压, MPa ; p_{wf} ——水平井段任一位置的流动压力, MPa ; G_p ——从投产计产到 t 时的总累积产气量, 10^4 m^3 ; G_{p0} ——从投产计产到 t_0 时的总累积产气量, 10^4 m^3 ; q_i ——进入递减评价阶段的初始产气量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; D_i ——广义递减模型法 t_0 时的初始递减率, d^{-1} ; m ——广义递减模型的递减因子, d^{-1} , m 值等于 2 时为线性递减, m 值等于 1 时为指数递减, $0 < m < 1$ 为双曲线递减; A 和 B ——广义递减模型直线的截距和斜率; q_{rel} ——产量递减法的经济极限产量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; G_{RE} ——经济可采储量, 10^4 m^3 ; G_{RT} ——技术可采储量, 10^4 m^3 ; A_L 和 B_L ——线性递减法直线的截距和斜率; A_E 和 B_E ——指数递减法直线的截距和斜率; D ——广义递减模型的递减率, d^{-1} ; D_L ——线性递减模型的递减率, d^{-1} ; D_E ——指数递减模型的递减率, d^{-1} 。

参考文献:

- [1] 陈永武, 王少波, 韩征, 等. 页岩气资源/储量计算与评价技术规范: DZ/T 0254—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
CHEN Yongwu, WANG Shaobo, HAN Zheng, et al. Regulation of shale gas resources/reserves estimation: DZ/T 0254—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [2] 陈元千, 周翠. 中国《页岩气资源/储量计算与评价技术规范》计算方法存在的问题与建议[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(1): 1—4.
CHEN Yuanqian, ZHOU Cui. Problems and recommendations for the Regulation of shale gas resources/reserves estimation in China [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 1—4.
- [3] 陈元千, 李剑, 齐亚东, 等. 页岩气藏地质资源量、可采资源量和井控可采储量的确定方法[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(5): 547—551.
CHEN Yuanqian, LI Jian, QI Yadong, et al. Determination methods of geological resources, recoverable resources and well-controlled recoverable reserves in shale gas reservoir [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(5): 547—551.
- [4] 陈元千. 油气藏工程计算方法(续篇)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 37—47.
CHEN Yuanqian. Petroleum reservoir engineering calculation methods (Continuation) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 37—47.
- [5] 张伦友. 天然气可采储量计算方法: SY/T 6098—2000[S]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
ZHANG Lunyou. The estimated methods of natural gas recoverable reserves: SY/T 6098—2000 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [6] 穆曙光, 赵云翔, 黄嘉鑫. 天然气可采储量计算方法: SY/T 6098—2010[S]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
MU Shuguang, ZHAO Yunxiang, HUANG Jiaxin. The estimated methods of natural gas recoverable reserves: SY/T 6098—2010[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [7] 陈元千. 水平井产量公式的推导与对比[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(1): 68—71.
CHEN Yuanqian. Derivation and correlation of production rate formula for horizontal well [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(1): 68—71.
- [8] 陈元千. 确定水平井产能比、流动阻力比、驱动面积比和表皮因子的新方法[J]. 中国海上油气, 2008, 17(2): 5—9.
CHEN Yuanqian. New methods of determining productivity ratio, flow resistance ratio, drainage area ratio and skin factor of horizontal well [J]. China Offshore Oil and Gas, 2008, 17(2): 5—9.
- [9] 陈元千. 预测油气田可采储量和剩余可采储量的快速方法(为庆祝克拉玛依油田勘探开发 50 周年而作)[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(5): 544—548.
CHEN Yuanqian. Method for quickly forecasting recoverable reserves and remaining recoverable reserves in oil and gas fields [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(5): 544—548.
- [10] 侯建峰, 李军诗, 纪淑红, 等. 石油可采储量计算方法: SY/T 5367—2010[S]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
HOU Jianfeng, LI Junshi, JI Shuhong, et al. The estimated methods of oil recoverable reserves: SY/T 5367—2010[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [11] 陈元千, 周翠. 线性递减类型的建立、对比与应用[J]. 石油学报, 2015, 36(8): 983—987.
CHEN Yuanqian, ZHOU Cui. Establishment, comparison and application of the linear decline type [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(8): 983—987.
- [12] 陈元千, 吕恒宇, 傅礼兵, 等. 注水开发油田加密调整效果的评价方法[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(6): 60—64.
CHEN Yuanqian, LÜ Hengyu, FU Libing, et al. Evaluation method of infilling adjustment effect for waterflooding development oil fields [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(6): 60—64.
- [13] 陈元千, 唐玮. 广义递减模型的建立及应用[J]. 石油学报, 2016, 37(11): 1 410—1 413.
CHEN Yuanqian, TANG Wei. Establishment and application of generalized decline model [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1 410—1 413.
- [14] 陈元千. 油气藏工程实用方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
CHEN Yuanqian. Practical methods of petroleum reservoir engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.

编辑 常迎梅