

确定异常高压气藏地质储量和有效压缩系数的新方法

陈元千*

(中国石油天然气总公司石油勘探开发科学研究院)

胡建国

(长庆石油勘探局勘探开发研究院)

内容提要 本文基于异常高压气藏的物质平衡方程式^[1],提出了确定异常高压气藏原始地质储量和有效压缩系数的新方法。该法可称为二元回归分析法,用它可求得 OGIP 和 C_r 的唯一结果。

主题词 异常高压气藏 地质储量 有效压缩系数

近年来,在国内外许多含油、气盆地发现了大量的异常高压气藏。这类气藏的压力系数可高达 2~2.5 以上,因而引起地质家和油藏工程专家的高度重视。异常高压气藏的地质与开发资料表明,这类气藏具有定容封闭和压降图异常的特征。对于定容封闭的正常压力系统的气藏,由视地层压力(p/Z)和累积产气量(G_p)构成的压降图,自始至终为一条下降的直线。然而,对于定容封闭的异常高压气藏,它的压降图则不是一条直线,而是斜率明显不同的两个直线段,并且第一直线的斜率(即视地层压力随累积产气量的下降率)明显地低于第二直线的斜率。国外科研工作者指出^[2,4],在异常高压气藏投入开发的初期,随着天然气从气藏中的采出和地层压力的下降,必将导致天然气的膨胀作用、储层岩石的再压实和岩石颗粒的弹性膨胀作用、以及地层束缚水的弹性膨胀和储层周围泥岩再压实所引起的水侵作用的出现。除天然气膨胀作

用之外的其他作用,均能起到补充气藏能量和减小地层压力下降率的效果,从而形成了异常高压气藏初期压降较缓的第一直线段。

当异常高压气藏的地层压力,随着生产连续下降到正常压力系统条件,即当地层压力等于或小于静水压力时,气藏的再压实作用影响已基本结束,岩石的有效孔隙压缩系数 C_r 将保持在较低的正常数值(砂岩为 $4 \times 10^{-4} \sim 8 \times 10^{-4} \text{MPa}^{-1}$)。它同随地层压力下降而显著增加的天然气压缩系数 C_g 相比,可以忽略不计。此时,气藏的开采主要是依靠天然气的膨胀作用,表现为定容封闭性气藏,正常压力系统的消耗式压力动态特征。这在压降图上,就是压力下降较快,直线斜率较大的第二直线段。因而,对于异常高压气藏,应当利用对第二直线段的外推或计算,确定气藏的真实地质储量,而应用第一直线段的外推或计算确定的地质储量,为异常高压气藏的虚拟地质储量。但是,第二直线段的出现一般较

* 100083,北京市学院路。

晚,可能需要采出气藏真实地质储量的 20%~25%。在文献[1]中,提供了利用第一直线段外推或计算求得的虚拟地质储量,确定真实地质储量的解析方法。然而,利用此方法时,需要事先确定异常高压气藏有效压缩系数 C_e 的数值。该系数与岩石有效孔隙压缩系数 C_f 、地层束缚水的压缩系数 C_w 和饱和度 S_w 有关。要想准确地把这些参数的数值确定下来,也是有一定困难的。本文将文献[1]推导的异常高压气藏的物质平衡方程式,改写为二元回归方程,可以一次求得异常高压气藏的原始地质储量和有效压缩系数的唯一解。当已知 C_f 和 C_w 值时,还可确定异常高压气藏的地层束缚水饱和度或原始含气饱和度。两个实例的应用结果表明,本文提供的方法是简便而实用的。

方法的引导

对于一个深部埋藏的异常高压气藏,在其投产之后,随着天然气的采出和地层压力的下降,必将同时引起天然气的膨胀作用、储层的再压实和岩石颗粒的弹性膨胀作用、地层束缚水的弹性膨胀作用、储层周围泥岩的再压实所造成的水侵作用。在气藏的地层压力从原始压力 p_i 下降到 p 的生产期间内,由上述四部分驱动能量的作用与累积采出天然气体积的物质平衡方程式,由下式表示^[1]:

$$G_p B_g = G(B_g - B_{gi}) + V_p C_f (p_i - p) + V_p S_{wi} C_w (p_i - p) + (W_e - W_p B_w) \quad (1)$$

$$\text{式中 } V_p = 0.01 Ah\varphi = \frac{GB_{gi}}{1 - S_{wi}} \quad (2)$$

$$B_{gi} = p_{sc} Z_i T / p_i T_{sc} \quad (3)$$

$$B_g = p_{sc} Z T / p T_{sc} \quad (4)$$

将(2)式代入(1)式得:

$$G_p B_g = G(B_g - B_{gi}) + GB_g C_e (p_i - p) + (W_e - W_p B_w) \quad (5)$$

$$\text{式中 } C_e = \frac{C_w S_{wi} + C_f}{1 - S_{wi}} = \frac{C_w (1 - S_{gi}) + C_f}{S_{gi}} \quad (6)$$

将(3)、(4)式代入(5)式,经整理简化后得:

$$G_p = G - \frac{G(1 - C_e p_i)}{p_i/Z_i} \left(\frac{p}{Z} \right) - \frac{GC_e}{p_i/Z_i} \left(\frac{p^2}{Z} \right) + (W_e - W_p B_w) \quad (7)$$

在异常高压气藏压降的过程中,考虑到储层周围泥岩再压实造成的水侵量很小,而忽略不计时,由(7)式得:

$$G_p = G - \frac{G(1 - C_e p_i)}{p_i/Z_i} \left(\frac{p}{Z} \right) - \frac{GC_e}{p_i/Z_i} \left(\frac{p^2}{Z} \right) \quad (8)$$

对于一个具体的异常高压气藏,由于 G 、 C_e 、 p_i 和 p_i/Z_i 都是常数,故可将(8)式改写为:

$$G_p = a_0 + a_1 \left(\frac{p}{Z} \right) + a_2 \left(\frac{p^2}{Z} \right) \quad (9)$$

$$\text{式中 } a_0 = G \quad (10)$$

$$a_1 = - \frac{G(1 - C_e p_i)}{p_i/Z_i} \quad (11)$$

$$a_2 = - \frac{GC_e}{p_i/Z_i} \quad (12)$$

若再设: $x_1 = p/Z$ 和 $x_2 = p^2/Z$, 以及 $y = G_p$, 则由(9)式可以得到二元回归的分析式为:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (13)$$

根据异常高压气藏的实际生产数据: G_p 、 p 和由 p 与气体组分确定的 Z 值, 当利用(13)式进行二元回归分析后, 可以直接求得该气藏的 a_0 、 a_1 和 a_2 常系数值, 而 a_0 的数值就是异常高压气藏的原始地质储量。异常高压气藏的有效压缩系数 C_e , 由(11)式和(12)式联立得到的下式表示:

$$C_e = \frac{a_2}{a_1 + a_2 p_i} \quad (14)$$

当已知 C_w 和 C_f 值后, 可由(6)式得下式, 以确定异常高压气藏的原始含气饱和度:

$$S_{gi} = \frac{C_w + C_f}{C_w + C_e} \quad (15)$$

如果缺少实验测试的 C_w 和 C_f 数值, 可以利用文献[5]中的相关经验公式来近似地

确定。

方法应用举例及 计算结果对比

1. 两个实例的应用

下面通过美国南得克萨斯的安德森“L”气藏(Anderson “L” gas reservoir)^[6]和美国路易斯安那近海气藏(Louisiana offshore gas reservoir)^[7]两个实例的应用,说明本文提供方法的有效性和实用性。这两个气藏的基本地质参数列于表 1。它们投产后的实际开发

表 1 两个气藏的基本地质资料

气 藏 名 称	安德森 “L”气藏	路易斯安那 近海气藏
地理位置	南得克萨斯	路易斯安那
储层岩石	砂岩	砂岩
埋藏深度 $D(\text{m})$	3403.7	4053.8
原始地层压力 p_0 (MPa)	64.67	78.90
压力系数	1.90	1.95
气藏温度 $T(^{\circ}\text{C})$	130	128.4
气层孔隙度 $\varphi(\%)$	24	/
气层束缚水饱和度 $S_{w0}(\%)$	35	22
岩石有效孔隙压缩 系数 $C_f(\text{MPa}^{-1})$	2.176×10^{-3}	2.828×10^{-3}
地层束缚水压缩系 数 $C_w(\text{MPa}^{-1})$	4.41×10^{-4}	4.35×10^{-4}
气层有效厚度 $h(\text{m})$	22.86	/
容积法计算的地质 储量 $G(10^8\text{m}^3)$	19.54	/

数据和有关的计算数据列于表 2、3。将表 2 和表 3 内所列气藏的视地层压力(p/Z)和累积产气量(G_p)的相应数据,分别画在直角坐标纸上,得到了两个气藏的压降图(图 1、2)。

图中可见,它们都具有明显的两个直线段斜率的特征,且第一直线的斜率比第二直线要小;加之,这两气藏的压力系数分别为 1.90 和 1.95。由此表明,它们是定容封闭的异常高压气藏。

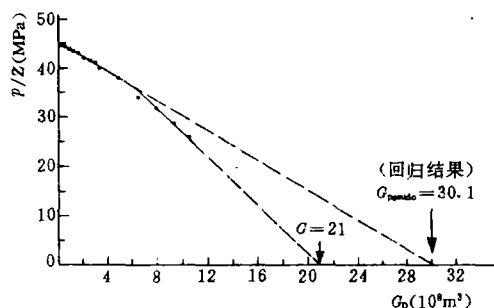


图 1 安德森“L”气藏的压降图

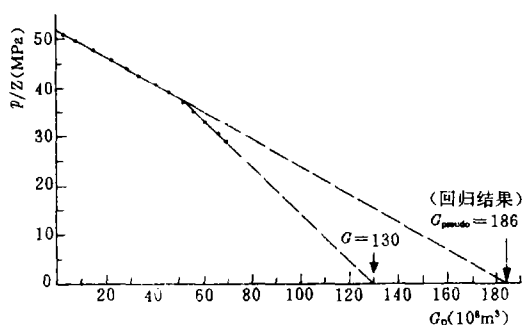


图 2 路易斯安那近海气藏的压降图

根据表 2 和表 3 所列的 $x_1(p/Z)$ 、 $x_2(p^2/Z)$ 和 $y(G_p)$ 的相应数据,利用(13)式分别进行二元回归分析后,求得常数 a_0 (即 G)、 a_1 和 a_2 的数值列于表 4。

由(10)式看出,由于 $a_0 = G$,故安德森“L”气藏的原始地质储量为 $21.124 \times 10^8 \text{m}^3$;路易斯安那近海气藏的原始地质储量为 $129.982 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

若将表 4 内两个气藏的 a_0 、 a_1 和 a_2 的数值,分别代入(13)式,得到的二元回归方程如下。

表 2 安得森“L”气藏的压力—产量历史数据

日 期	p (MPa)	Z	$p/Z(z_1)$ (MPa)	$p^2/Z(z_2)$ (MPa ²)	$G_p(y)$ (10 ⁶ m ³)	
					实际值	由(16)式计算值
1965 12 22	65.548	1.440	45.519	2983.679	0	/
1966 03 01	64.066	1.418	45.181	2894.566	0.1112	0.1228
1966 06 22	61.846	1.387	44.590	2757.713	0.4651	0.5375
1966 09 29	59.260	1.344	44.093	2612.951	0.9135	0.9283
1966 11 17	57.447	1.316	43.653	2507.734	1.2065	1.2417
1966 12 30	55.220	1.282	43.073	2378.491	1.5586	1.6416
1967 03 23	52.421	1.239	42.309	2217.880	2.1348	2.1547
1967 05 15	51.063	1.218	41.923	2140.714	2.4778	2.4083
1967 07 31	48.277	1.176	41.052	1981.867	2.9762	2.9589
1967 09 14	46.340	1.147	40.401	1872.182	3.3301	3.3576
1967 10 19	45.057	1.127	39.980	1801.379	3.6219	3.6153
1968 03 05	39.741	1.048	37.921	1507.018	4.8887	4.8022
1968 09 04	32.860	0.977	33.634	1105.213	6.4827	6.9747
1969 03 19	29.613	0.928	31.911	944.980	7.9706	7.8461
1969 09 29	25.855	0.891	29.018	750.260	9.2229	9.2041
1970 03 31	22.387	0.854	26.215	586.875	10.427	10.484

表 3 路易斯安那近海气藏的压力—产量历史数据

日 期	p (MPa)	Z	$p/Z(z_1)$ (MPa)	$p^2/Z(z_2)$ (MPa ²)	$G_p(y)$ (10 ⁶ m ³)	
					实际值	由(17)式计算值
1966 01 25	78.904	1.496	52.743	4161.620	0	/
1967 02 01	73.595	1.438	51.178	3766.464	2.8093	4.081
1968 02 01	69.851	1.397	50.001	3492.581	8.1052	8.7748
1969 06 01	63.797	1.330	47.968	3060.214	15.1795	16.535
1970 06 01	59.116	1.280	46.184	2730.205	21.9961	22.850
1971 06 01	54.510	1.230	44.317	2415.721	28.7221	29.160
1972 06 01	50.883	1.192	42.687	2172.075	34.0860	34.369
1973 09 01	47.208	1.154	40.909	1931.226	41.0668	39.810
1974 08 01	44.044	1.122	39.255	1728.921	45.4904	44.660
1975 08 01	40.176	1.084	37.063	1489.015	51.6387	50.815
1976 06 10	37.294	1.057	35.283	1315.822	55.9971	55.603
1977 06 01	34.474	1.033	33.373	1150.477	61.0749	60.542
1978 08 01	31.026	1.005	30.872	957.849	66.7616	66.777
1979 08 01	28.751	0.988	29.100	836.669	69.6389	71.047

表4 两个气藏的 a_0 、 a_1 、 a_2 数值

气藏名称	a_0	a_1	a_2	复相关系数
安得森“L”气藏	21.124	-0.3742	-1.4145×10^{-3}	0.99976
路易斯安那近海气藏	129.982	-1.7465	-9.6958×10^{-3}	0.99887

安得森“L”气藏为:

$$G_p = 21.1239 - 0.3742(p/Z) - 1.4145 \times 10^{-3}(p^2/Z) \quad (16)$$

路易斯安那近海气藏为:

$$G_p = 129.9824 - 1.7465(p/Z) - 9.6958 \times 10^{-3}(p^2/Z) \quad (17)$$

由(16)式和(17)式计算的结果,分别列于表2和表3。计算的 G_p 值与实际的数值基本一致。

将已知参数和常数分别代入(14)式和(15)式,又可得到两个气藏的有效压缩系数(C_e)和气层原始含气饱和度及束缚水饱和度的数值,见表5。

2. 不同方法计算结果对比

在文献[1,5,7]中,对于上述两个异常高压气藏的实例,利用另外两种方法预测的地质储量,同本文方法计算的结果列于表6。从表6看出,三种方法计算的结果基本上一致。但是,应当指出,另外两种方法的应用,都需要事先知道 C_w 、 C_f 和 S_{wi} 的数值。然而,这些参数一般是难以准确确定的,常常要借助于相关经验公式,这不能不带来一定的人为误差。而本文提供的方法,恰好避开了准确确定这些参数的困扰,并且在确定气藏地质储量

的同时,还可以确定气藏的有效压缩系数 C_e 。在 C_e 中就包括了 C_w 、 C_f 和 S_{wi} 这三个参数,见本文的(6)式。

表6 不同方法计算的OGIP对比表

气藏名称	$G(10^8 m^3)$			
	本文	文献[1,5]	文献[7]	容积法[7]
安得森“L”气藏	21.124	20.94	20.39	19.54
路易斯安那近海气藏	129.982	131.15	133.11	/

为了进行计算方法之间的对比,下面将另外两种方法作一简单介绍。

文献[1]中提供的解析方法为:

$$G = \frac{G_{pseudo}}{1 + \frac{C_e(p_i - p_H)}{\frac{p_i/Z_i}{p_H/Z_H} - 1}} \quad (16)$$

式中 G_{pseudo} 为由第一直线外推或计算确定的虚拟地质储量。

文献[7]中提供的将视地层压力(p/Z)与累积产气量(G_p)的关系校正为直线的方法,可由本文的(8)式得到其形式为:

$$\frac{p}{Z} [1 - C_e(p_i - p)] = \frac{p_i}{Z_i} - \left(\frac{p_i}{Z_i G} \right) G_p \quad (17)$$

利用(17)式,可将异常高压气藏的压降图,由两个不同直线段校正为一个直线,并由此直线的外推或计算,确定气藏的原始地质储量(G)的数值。

正如前述,由(16)式和(17)式求解时,都需要事先确定 C_e 的数值,即 C_w 、 C_f 和 S_{wi} 的数值,而本文提供的新方法,则不但不需要,还可以在确定异常高压气藏地质储量的同时,得到与这些参数直接有关的有效压缩系数 C_e 的数值。

结 论

定容封闭性异常高压气藏的压降图不是

表5 两个气藏计算的 C_e 、 S_{gi} 和 S_{wi} 数值

气 藏 名 称	C_e (MPa $^{-1}$)	S_{gi} (f)	S_{wi} (f)
安得森“L”气藏	30.294×10^{-4}	0.754	0.246
路易斯安那近海气藏	38.605×10^{-4}	0.759	0.241

直线。文献[1,7]中提供的确定原始地质储量的不同方法,都需要事先知道 C_w 、 C_i 和 S_{wi} 的数值。然而,准确地确定这些数值,有时是比较困难的。本文提供的方法,不需要事先知道 C_w 、 C_i 和 S_{wi} 的数值,相反,可以在确定异常高压气藏原始地质储量的同时,得到与这些参数直接有关的 C_i 数值。

应当着重指出,除了文献[1]的方法外,应用文献[6]和本文提供的方法,确定异常高压气藏的地质储量时,都需要气藏的地层压力下降到静水压力以下,方可求得可靠的数值。

符 号 说 明

G ——异常高压气藏的原始地质储量, 10^8 m^3 ;

G_{pseudo} ——异常高压气藏由第一直线段确定的虚拟地质储量, 10^8 m^3 ;

G_p ——累积产气量, 10^8 m^3 ;

W_e ——累积天然水侵量, 10^8 m^3 ;

W_p ——累积产水量, 10^8 m^3 ;

A ——含气面积, km^2 ;

h ——平均有效厚度, m ;

φ ——平均有效孔隙度, f ;

V_p ——有效孔隙体积, 10^8 m^3 ;

p_i ——原始地层压力, MPa ;

p ——某开发时间的地层压力, MPa ;

p_H ——静水压力 ($p_H = 0.01 \rho_w D$), MPa ;

p_{sc} ——地面标准压力, MPa ;

p_i/Z_i ——原始的视地层压力, MPa ;

p/Z ——某开发时间的视地层压力, MPa ;

p_H/Z_H ——静水压力下的视地层压力, MPa ;

Z_i —— p_i 压力下的气体偏差系数;

Z —— p 压力下的气体偏差系数;

Z_H —— p_H 压力下的气体偏差系数;

B_{gi} —— p_i 压力下的气体体积系数;

B_g —— p 压力下的气体体积系数;

B_w ——地层水的体积系数 (一般取 1.0);

T ——气藏温度, K ;

T_{sc} ——地面标准温度, K ;

S_{wi} ——气藏的地层束缚水饱和度, f ;

S_{gi} ——气藏的原始含气饱和度, f ;

C_w ——气藏的地层束缚水的压缩系数, MPa^{-1} ;

C_i ——气藏的地层岩石有效孔隙压缩系数, MPa^{-1} ;

C_e ——气藏的有效压缩系数, MPa^{-1} ;

D ——气藏的埋藏深度, m ;

ρ_w ——地层水的密度 (一般取 1.0), g/cm^3 。

参 考 文 献

1 陈元千. 异常高压气藏物质平衡方程式的推导及应用. 石油学报, 1983; (1)

2 Hammerlindl D J. Predicting Gas Reserves in Abnormally Pressured Reservoirs. SPE3479, 46th SPE Fall Meeting, New Orleans, La., October, 1971

3 Fertl W H. Abnormal Formation Pressures. chap. 7, 1976; 275

4 Harville D W, Hawkins M F. Rock Compressibility and Failure as Reservoirs in Geopressed Gas Reservoirs. JPT, December, 1969; 1528

5 秦同洛, 李强, 陈元千. 实用油藏工程方法. 北京: 石油工业出版社, 1989

6 Duggan J O. The Anderson "L": An Abnormally Pressured Gas Reservoir in South Texas. JPT, February, 1972; 132~138

7 Ramagost B P, Farshad F F. p/Z Abnormally Pressured Gas Reservoirs. SPE10125, presented at the 56th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, October, 1981; 5~7

(本文收稿 1992 04 20)

Lu Zhengyuan, Xu Chunchun and Bao Qiang: Distinguishing Reservoir in Feixianguan Formation in East Sichuan, NGI 13(1), 1993: 48~52

This paper comprehensively analyses the properties of conventional logging curve in Feixianguan formation in east Sichuan, proposes the method to eliminate the effect factors on distinguishing reservoir and builds up the quantitative discriminate of distinguishing reservoir to provide the basis for production test and selecting strata.

Subject Headings: east Sichuan, Lower Triassic, reservoir, distinguishing method.

Chen Yuanqian and Hu Jianguo: A New Method for Determining Gas in Place and Effective Compressibility in Abnormal High Pressure Reservoir, NGI 13(1), 1993: 53~58

Based on the material balance equation in abnormal high pressure gas reservoirs, a new method for determining its original gas in place (OGIP) and effective compressibility (C_e) is presented in this paper. The method is named dual regression analysis and the unique result of OGIP and C_e can be obtained by using it.

Subject Headings: abnormal high pressure gas reservoir, gas in place, effective compressibility.

Yang Canghu and Feng Wenguang: Comparison Analysis of Relaxation Methods in Two-Dimensional Reservoirs Simulation, NGI 13(1), 1993: 59~63

This paper analyses the application of the optimal variable relaxation method and all-variable parameters relaxation method in two-dimensional model with six different properties, based on explicit points constant successive over relaxation and implicit blocks constant line relaxation.

Subject Headings: two-dimensional reservoir simulation, constant relaxation, variable relaxation, comparison analysis.

DRILLING/PRODUCTION TECHNOLOGY AND EQUIPMENT

Ma Zongjin and Chen Zhongshi: Using the Means of Drilling Engineering to Raise Exploration Success Ratio, NGI 13(1), 1993: 64~67

As the exploratory level of Southwest Sichuan Mine is more higher, the exploration difficulties are added year by year. According to the exploration need of fault fissure trap gas reservoirs in Yangxin Series of Permian, it is described in this paper that the Mine in recent two years accurately drills the geologic target area within a radius of 50m in bottom hole by using the drilling engineering means and raises exploratory success ratio.

Subject Headings: southwest Sichuan, drilling engineering, Permian, fracture gas reservoir, exploration success ratio.