

第一口探井产水后评价含气程度的方法

杨家琦 秦成明

(四川石油管理局地质勘探开发研究院)

气田勘探中的一个问题是：某一构造第一口探井出水后，如果继续钻探，有没有获气的可能？本文试图从油田水普遍含溶解气的现象出发，探索解决这个问题的途径。

一、影响气体溶解度的因素

溶解气是指水溶液中以溶解状态存在的气体，不包括呈游离相态的气泡。所谓气体溶解度，指的是在一定的压力、温度、含盐量条件下，单位体积水溶液中所溶解的气体的最大量（标准状态下，即0℃、760毫米汞柱条件下的体积）。气体溶解度所对应的压力，称为饱和压力。影响气体溶解度的因素很复杂，其中最重要的有：气体组分、压力P、温度T、含盐量M^[1,2]。以甲烷为例（图1），压力对溶解度的影响最大，当温度一定时，溶解度随压力升高而增大；其次是温度，在压力一定时，大约80℃以下，溶解度随温度升高而减小，大约80℃以上，溶解度随温度升高而增大。含盐量对溶解度的影响，可由斯切诺夫（Сеченов）公式表述：

$$N_i'^* = N_i' \cdot 10^{-k_i n}$$

式中， k_i 为某种盐类对气组分*i*溶解度影响的斯切诺夫系数（图4）， n 为水中溶解盐类的克分子浓度（油田水以NaCl计）， $N_i'^*$ 为矿化水中溶解气组分*i*的克分子百分数， N_i' 为纯水中溶解气组分*i*的克分子百分数。

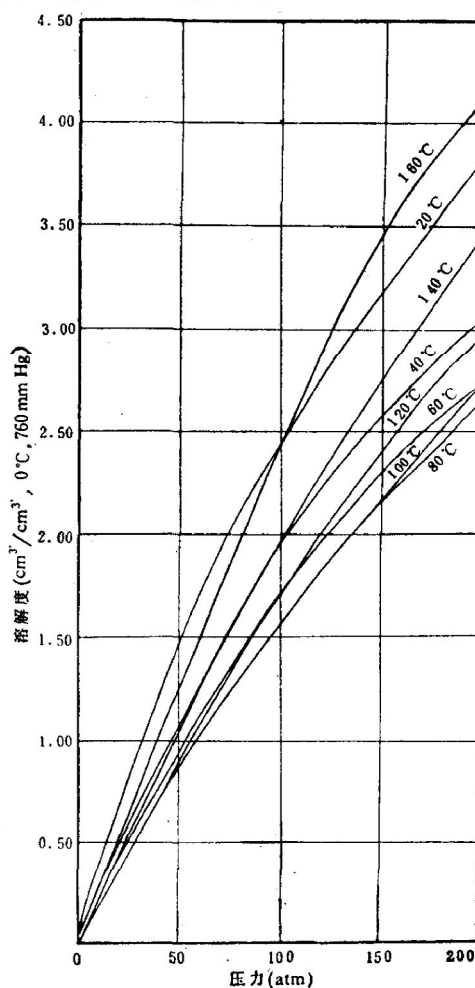


图1 甲烷在纯水中的溶解度
(据А. Ю. Намиот等, 1963)

二、溶解气形成气藏的地质模型

油气的运、聚过程都在水介质中进行。油气在地层水中的赋存形式，说法不一，但

溶解形式的存在是无可置疑的。不少纯水井在关井稳定后,井筒上部出现一段气柱,就是天然气可能以溶解形式存在于地层水中的证据。

众所周知,构造变动、成岩作用、水文地球化学环境的变迁等等,都会导致流体压力、地温和地层水含盐量的变化,从而使得天然气在水中处于溶解 $\rightleftharpoons$ 脱出的动平衡状态。只有存在饱和水溶液的地区,才可能在一定条件下从水溶液中分离出游离相态的气泡,并按比重分异原理聚集于圈闭中^[2,9]。这是本文立论的基础。为了阐明这个问题,笔者提出“溶解气的初始饱和压力”这一概念,它指的是当压力降低到使未饱和气的水溶液变成饱和气水溶液的那个压力值。

在勘探程度很低的地区,通常只能根据初探井的资料来推测小区域内地层压力、温度和含盐量的近似变化规律。本文假定在小区域内压力、温度和含盐量均是深度的函数,故可将气体溶解度 S 这个多元函数看作是压力的一元函数:

$$S = F(P, T, M) = \varphi(P).$$

图2是溶解气从地层水中脱出的示意图。图示压力的变化也包含了温度、含盐量的变化。设储层中单位体积水溶解的气量为 V_2 ,如果地层压力为 P_1 ,则 V_2 落在曲线下方A点,地层水处于未饱和气的状态,气体不可能脱出;当 P_1 降到 P_s 时,地层水刚好被溶解气饱和, P_s 即是溶解气的初始饱和压力;压力继续降到 P_1 ,水中只能允许 V_1 的气量溶解,部分气体将呈游离气脱出,脱出量为 $\Delta V = V_2 - V_1$ 。

笔者由此建立图3所示地质模型。甲背斜位于 P_s 的相应深度 H_s 以上,乙背斜位于 H_s 以下。对乙背斜来说, $P_1 > P_s$,地层水处于未被气体饱和的状态,水中的溶解气不可能脱出形成气藏。对甲背斜来说,A点以下, $P_1 > P_s$,地层水未被气体饱和;A点以上, $P_1 < P_s$,必然有一部分气体从水中脱出,聚集于圈闭上部而形成气藏。A点与B点之间,溶解气的饱和压力等于地层压力,但小于气体的初始饱和压力,此一区间可称为饱和气水带,只有存在气藏的构造才有此带。因此有无此带的存在是判断构造是否含气的关键。

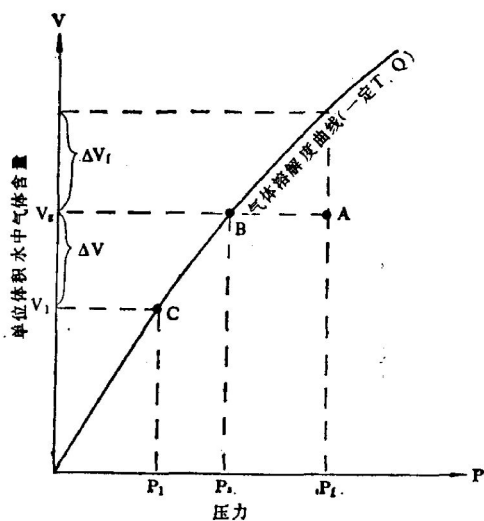


图2 溶解气脱出示意图

设 P'_s 为利用第一口探井资料计算的初始饱和压力, P_1 为水井产层中部井深的地层压力, P'_1 为构造顶部的地层压力。由上述可知,井打在A点以下的未饱和气水带内, $P'_s = P_s$;若井打在A点与B点之间的饱和气水带内,因为气体已从A点起脱出了一部分,则 $P'_s < P_s$ 。如果第一口探井没有打在高点上,则可根据以下原则判断有无气藏,为进一步勘探提供依据。

1. $P_1 > P'_1 \geq P'_s$, 为纯水藏, 井打在A点以下。
2. $P_1 > P'_s > P'_1$, 有气藏, 井打在A点以下。

3. $P_i = P'_s > P'_f$, 有气藏, 井打在 AB 区间内。

4. $P_i < P'_s > P'_f$, 有气藏, 井打在 B 点上。

第4种情况之所以可能, 是因为当井打在 B 点时, 井筒上部的气柱不全是水中脱出的那部分气体, 它还包括来自气藏的部分气体。

上述的2、3、4三种情况的 P'_s 同 P_s 的关系分别是 $P'_s = P_s$ 、 $P'_s < P_s$ 、 $P'_s > P_s$, 三种情况均判断可能有气藏存在。

只有第2种情况才能获得较准确的 P_s , 因此用 P'_s 来估算气藏的含气高度和地质储量时, 第2种情况可以获得较可靠结果, 第3种情况下的结果偏小, 第4种情况下的结果偏大。

综上所述, 对构造含气程度评价的关键, 是求地层水溶解气的初始饱和压力 P_s 。其大小仅取决于地层水中溶解天然气的量, 对一个面积不大的构造来说, 可以认为是一个定值。如果构造面积较大, 则可用几口初探井的资料求出一个平均值, 用来进行评价。

三、求溶解气初始饱和压力

水井在关井稳定后, 由于溶解气脱出, 可在井筒上部形成一段气柱 (图5)。

第一口探井产水后, 可取得如下资料: 实验室测定的水的矿化度 (含盐量) M 和密度 ρ_w , 实验室测定的天然气比重 γ (对空气), 天然气中各种组分的百分数, 关井稳定后的井口压力 P_{wmax} 和井口温度, 关井稳定后下压力计实测的各深度点的压力、温度。井筒气柱平均密度通常用下式求得:

$$\rho_g \approx 1.293 \times 10^{-3} \gamma \cdot P_{wmax} \text{ (克/厘米}^3\text{)}。$$

以下压力计的第2区间的平均压力梯度作为第2深度点 H_2 的水的平均密度 ρ_{w2} , 可算出气柱高度:

$$H_g = \frac{H_2 \rho_{w2} - 10 (P_2 - P_{wmax})}{\rho_{w2} - \rho_g} \text{ (米)}。$$

有了以上资料, 可按如下步骤求 P_s 。

1. 计算各小区间下限深度点 H_i 的压力 P_i 、温度 T_i 、水矿化度 M_i

相邻两个测点之间的距离叫做一个深度段。由于地层水的密度随深度而变化, 各深度段的 $\Delta P / \Delta H$ 值一般互不相同。计算过程中需将每一个深度段细分为100米 (或更小) 的小区间, 以深度段起点和终点的 $\Delta P / \Delta H$ 值的差值除以小区间数, 得出平均地压梯度变化率, 据以算出各小区间的平均地压梯度 $\Delta P_i / \Delta H_i$, 作为小区间下限深度的 dP_i / dH_i 的近似值。 dP_i / dH_i 的物理意义, 是深度 H_i 处水的密度 ρ_{wi} 。任意一个小区间下限深度的压力 P_i , 可按式求出:

$$P_i = P_{i-1} + \Delta P_i$$

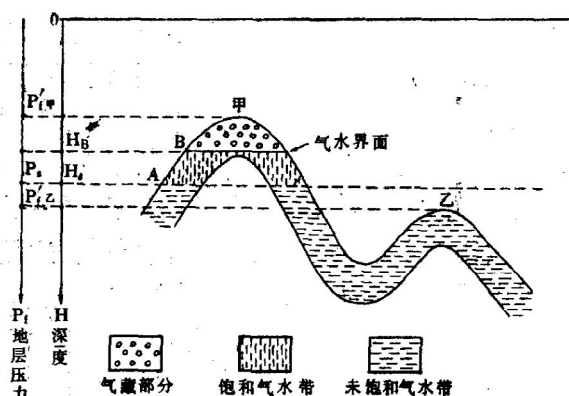


图3 溶解气脱出形成气藏模式图
 P_s —溶解气初始饱和压力

用同样的方法，可求出与 H_i 对应的 T_i 。如果没有实测井温资料， T_i 可由恒温带年平均温度 T_0 和平均地温梯度 G 算出：

$$T_i = T_0 + GH_i$$

至于 H_i 处的矿化度 M_i ，可按下面推导出的公式算出。

设常温常压下（实验室）水的体积为 V_{w0} ，其中纯水的质量为 m_1 ，溶解盐类的质量为 m_2 。当这种水处在深度 H_i 时，在 P_i 、 T_i 下水的体积变为 V_{wi} ，而质量 m_1 、 m_2 不变。

$$\therefore \frac{\rho_{wi}}{\rho_w} = \frac{(m_1 + m_2)/V_{wi}}{(m_1 + m_2)/V_{w0}} = \frac{V_{w0}}{V_{wi}},$$

$$\frac{M_i}{M} = \frac{m_2/V_{wi}}{m_2/V_{w0}} = \frac{V_{w0}}{V_{wi}},$$

$$\therefore \frac{\rho_{wi}}{\rho_w} = \frac{M_i}{M},$$

$$M_i = \frac{\rho_{wi}}{\rho_w} M.$$

2. 求 P_i 、 T_i 、 M_i 条件下的气体溶解度 S_{ii}

根据纳米奥特（А.Ю.Намиот）和科尔岑什（В.Н.Корченш）提供的方法^[1,2]，笔者归纳出计算 S_{ii} 的步骤如下。

（1）查出 P_i 、 T_i 条件下纯水中溶解气各组分的平衡常数 K_{ii} ——气体从水中析出的量和保留在水中的量之比。表中列出了一部分气体组分的 K_i 值。

（2）从图4查出与 T_i 对应的气体各种组分的斯切诺夫系数 k_{ii} 。

（3）由公式 $K_{ii}^* = K_{ii} \cdot 10^{k_{ii}n_i}$ 求出气体各组分在地层水中的平衡常数 K_{ii}^* 。这里， n_i 为矿化度，以

表1 甲烷、乙烷、二氧化碳在纯水中的平衡常数
（据А.Ю.Намиот等，1963）

（a）甲 烷

压力 (atm)	温 度 (°C)							
	20	40	60	80	100	120	140	160
1	37500	49000	59600	63900	64200	59100	52300	46300
25	1640	2070	2540	—	—	—	—	—
50	850	1140	1330	1470	1490	1400	1210	1030
60	724	977	1100	1190	1200	1140	1040	881
75	586	804	912	966	977	933	851	724
100	483	638	740	796	787	723	631	542
150	378	488	570	608	589	518	449	393
200	330	411	456	481	466	407	354	309
250	297	363	400	415	397	352	305	263
300	270	329	361	371	352	309	270	234
400	242	275	301	316	292	260	224	191
500	226	242	269	278	262	229	196	167
600	208	230	247	259	247	211	179	150

（b）乙 烷

压力 (atm)	温 度 (°C)					
	20	40	60	80	100	120
1	28500	44600	58500	67400	69700	66300
25	1420	2160	2740	—	—	—
50	890	1300	1560	1750	1750	1590
75	755	1020	1240	1420	1420	1260
100	710	926	1080	1220	1190	1030
150	722	911	958	988	910	800
200	728	935	940	924	820	715
250	744	897	913	900	—	—

（c）二氧化碳

压力 (atm)	温 度 (°C)			
	37.8	50	75	100
25	100	125	178	225
50	56	69	95	117
100	35	40	55	65
150	29	33	42	48
200	26	30	37	41
250	24	28	34	37
300	23	26	31	34
400	21	24	28	30
500	20	22	26	28
600	—	21	24	26
650	—	20	23	25

克当量/升为单位, 按 $n_i = M_i / 58.5$ 算得。

(4) 由公式 $N_{ij}^{*'} = N_i'' / K_{ij}^*$ 求出地层水中溶解气各组分的克分子百分数 N_i^* 。这里, N_i'' 为井筒中气柱各种气组分的克分子百分数 (即为体积百分含量)。

(5) 按公式 $b_{ij}^* = N_{ij}^{*'} / (0.804 \times 10^{-3})$ 求出1毫升地层水中纯水的溶解气量, 并换算成1克纯水的溶解气量 b_{ij}^* , 单位为毫升/克 (标准状态)。

(6) 最后按公式 $S_{ij} = b_{ij}^* (1 - M_i / 1000 \rho_{wi}) \rho_{wi}$ 求出1毫升地层水中溶解气各组分的含量 S_{ij} (毫升/毫升, 标准状态)。式中 $M_i / 1000 \rho_{wi}$ 为溶解盐类在1毫升地层水中占有的体积近似值, $(1 - M_i / 1000 \rho_{wi}) \rho_{wi}$ 即为1毫升地层水中纯水的重量, ρ_{wi} 的单位为克/立方厘米, M_i 的单位为克/升。

3. 求 S_i 和 P 、 H 的关系

将根据上述方法得到的一组 S_{ij} 值和对应的 P_i 值进行回归分析, 可建立回归方程 $S_i = \varphi_i(P)$, 也可得到回归方程 $P = \psi(H)$ 。由于在计算 S_{ij} 的过程中已考虑到了 T_i 和 M_i 对 S_{ij} 的影响, 同时由于 T 、 M 和 P 均同深度 H 存在相关关系, 因此可以认为 $\varphi_i(P)$ 和 $F_i(P, T, M)$ 是等价的。拟合 $S_i = \varphi_i(P)$ 和 $P = \psi(H)$ 曲线的最佳函数并不是线性函数。为了避免有关积分计算的困难, 笔者假定它们均为线性函数 (实例表明, 此时相关系数仍大于 0.99):

$$S_i = a_i P + b_i,$$

$$P = cH + d,$$

式中 a_i 、 b_i 、 c 、 d 均为常数。

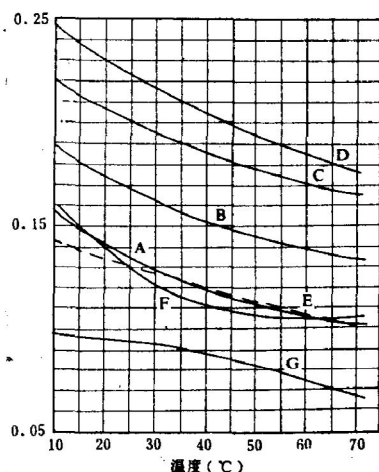


图4 斯切诺夫系数

(据 A. Ю. НАМИОТ 等, 1963)

A—甲烷, B—乙烷, C—丙烷,

D—正丁烷, E—乙烯, F—氮, G—氢。

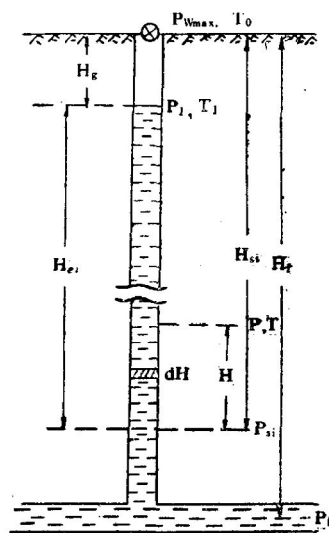


图5 井筒示意剖面图

4. 求溶解气的初始饱和压力 P_{si}

如图5所示, 气柱 H_g 是由各组分的 P_{si} 对应的深度 H_{si} 到深度 H_g 的地层水脱出各组分的溶解气而形成的, 因此可以通过 H_g 来反求 P_{si} 。为此, 引入下列符号:

H_g ——气柱高度 (米);

S_{gi} ——气组分*i*开始析出时 P_{si} 所对应的气组分*i*的溶解度(毫升/毫升, 标准状态);

P ——深度 H_{si} 以上 H 处的压力(atm);

dH ——深度元;

V_{ki} ——井筒气柱气组分*i*的体积 V_{ki} 换算到标准状态下的体积,其相应的虚高为 H_{ki} 。

当压力从 P_{si} 降到 P 时,从单位体积的地层水中析出的溶解气组分*i*为 dV_{ki}/dV (V 为水的体积):

$$\frac{dV_{ki}}{dV} = \frac{dH_{ki}}{dH} = S_{gi} - S_i.$$

$$\begin{aligned} \therefore S_{gi} &= a_i P_{si} + b_i, \quad P_{si} = cH_{si} + d, \\ S_{gi} &= a_i (cH_{si} + d) + b_i, \\ S_i &= a_i [c(H_{si} - H) + d] + b_i \\ &= a_i (P_{si} - cH) + b_i, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore S_{gi} - S_i &= a_i cH, \\ dH_{ki} &= a_i cH dH. \end{aligned}$$

因为气柱是压力从 P_{si} 逐渐降到 P_1 的水中析出形成的,故积分限从0到 H_{ei} :

$$H_{ki} = \int_0^{H_{ei}} a_i cH dH = \frac{1}{2} a_i c H_{ei}^2.$$

又因

$$P_1 = c(H_{si} - H_{ei}) + d = P_{si} - cH_{ei},$$

故

$$H_{ei} = (P_{si} - P_1) / c,$$

$$H_{ki} = \frac{a_i}{2c} (P_{si} - P_1)^2. \quad (1)$$

需将 H_{ki} 折算成井筒状态下的 H_k 。因为井筒气柱 H_k 是混合气体,根据分压定律,气组分*i*在气柱中的分压 $P_i = P_1' \cdot N_i''$,由实际气体状态方程 $PV = nZRT$,得到:

$$H_{ki} = \frac{P_i H_k T_k}{P_0 T_1' Z} = \frac{P_1' N_i'' H_k T_k}{P_0 T_1' Z}.$$

式中, H_k 为实际气柱高度(米), P_0 为大气压力(1atm), P_1' 为井筒气柱平均压力(atm), $P_1' = (P_{wmax} + P_1) / 2$, T_1' 为井筒气柱平均温度(开), Z 为在 P_1' 、 T_1' 条件下的气体压缩系数, T_k 为273开, N_i'' 为井筒气柱气组分*i*的百分含量。

于是,式(1)可写成:

$$P_{si} = \left(\frac{2cH_k P_1' N_i'' T_k}{a_i P_0 T_1' Z} \right)^{\frac{1}{2}} + P_1. \quad (2)$$

式(2)是求任意气组分初始饱和压力的公式。

求得各组分的 P_{si} 后,以最大的 P_{si} 按前述原则对构造进行评价。因为最大的 P_{si} 对应的深度 H_{si} 最大,从 H_{si} 起开始脱出气组分*i*,随着深度减小,地层压力也减小,才可能达到其它组分开始脱出的初始饱和压力值。在深度未减小到第二个组分开始脱出的深度

之前,只有第一个组分脱出,如果构造高点处在这两个深度之间,则只可能形成高纯度的第一组分的气藏。

如果气柱中某组分的含量大于90%,为了简化计算过程,可将气体当成100%的该组分来处理。

四、结 束 语

在运、聚、保过程中,随着地层压力、温度、水的含盐量等条件的变化,天然气在地层水中处于溶解 $\rightleftharpoons$ 脱出的动平衡状态。现今地质条件下的气藏,只是这一漫长的连续过程中的“瞬间”平衡的产物。这是本文的立足点。如果气田早已进入开发阶段,地层能量的衰减破坏了这种平衡,本文方法就不适用了。

笔者对刘方槐、何志鹏同志的热情帮助,表示感谢。

(收稿日期 1982年3月20日)

参 考 文 献

- [1] А. Ю. Нампот, М. М. Бондарева, 1963, Растворимость газов в воде под давлением. Гостоптехиздат, Москва.
- [2] В. Н. Корценштейн, 1963, Методика гидрогеологических исследований нефтегазоносных районов. Гостоптехиздат, Москва.
- [3] М. С. 古列维奇 (主编), 1956, 石油普查水文地质问题. 吴光轮译, 1963, 中国工业出版社.

A METHOD FOR ESTIMATE GAS POTENTIAL AFTER FINISHING FIRST WATER-PRODUCING WILDCAT

Yang Jiaqi, Qin Chengming

(Shichuan Research Institute of Petroleum Exploration and Development)

Abstract

Is there any possibility of succeeding in gaining gas flux, if drilling is required to be continued after water-bearing horizon is tapped by the first wildcat on an anticlinal structure? Here, the writers propose a method intending to estimate the gas potential of related structure, which is based on calculation of the initial saturated pressure of gas contained in formation water based on pressure and temperature of well head, as well as mineralization and density.