

油、气藏的物质平衡方程式 及其应用

陈元千 编著

石油工业出版社

TE 15
1
3

油、气藏的物质平衡 方程式及其应用

陈元千 编著



石油工业出版社

A630258

内 容 提 要

物质平衡方程式是计算油气藏储量、预测油气藏开采动态的一种简易有效的方法。本书系统地综合了国外大量参考文献中有关物质平衡方程式的实用资料，作了理论上的简要阐述和方法上的推导，并举了一些油气藏的例子说明其实际应用情况。

本书可作为油田地质人员、开发开采人员的参考书和工具书。

油、气藏的物质平衡方程式及其应用

陈元千 编著

石油工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $4^{1/2}$ 插页1 字数96千字印数1—5,250

1979年4月北京第1版 1979年4月北京第1次印刷

书号15037·2014 定价0.50元

引 言

油、气藏的物质平衡方程式，在国内外得到较为广泛的重视和普遍的应用。它的主要功能是，利用油、气藏开发的实际动态资料，测算不同驱动类型油、气藏的地质储量，预测油、气藏的地层压力变化，以及天然水侵量的大小等。尤其是对于断块型、岩性和灰岩裂缝性油、气藏，由于目前尚难以准确地划定含油、气面积的大小，地层厚度的变化，以及储层地质参数的变化规律，给储量的计算和动态分析工作带来一定的困难。而运用物质平衡方程式，恰好能够避免某些复杂地质因素的影响。

所谓物质平衡方程式，是大家所熟知的物质守恒定律，在油、气田开发工作上的具体运用。它的最简单涵义就是，在某开发阶段的流体采出量加上剩余的储存量，等于流体的原始储量。在应用物质平衡方程式时，应当注意到它所具有的地下平衡、体积平衡和累积平衡的三大特点。在研究油、气藏的物质平衡方程式时，常常利用到以下几个假定条件：

- (1) 油、气藏的储层是均质的；
 - (2) 油、气藏内的流体物性和岩石物性是相同的；
 - (3) 不考虑油、气藏的重力和毛管力影响；
 - (4) 油、气藏的原始地层压力和目前地层压力在各点是相同的；
-

(5) 流体在油、气藏内的流动是径向对称的层状流动。

本书对于不同驱动类型的油、气藏的物质平衡方程式,进行了理论上的简要阐述和公式的推导,并通过一些油、气田的实例运算,具体地说明实际应用情况。

目 录

引 言

第一章 油、气藏的物质平衡方程式	1
第一节 油藏的物质平衡方程式	1
一、封闭型弹性驱动油藏	1
二、不封闭的弹性水压驱动油藏	4
三、天然水驱、人工水驱、气顶驱和溶解气驱的混合驱动油藏	5
四、气顶、天然水驱和溶解气驱混合驱动油藏	13
五、气顶、人工水驱和溶解气驱混合驱动油藏	13
六、气顶和溶解气驱混合驱动油藏	13
七、天然水驱和溶解气驱混合驱动油藏	14
八、人工水驱和溶解气驱混合驱动油藏	15
九、天然水驱、人工水驱和溶解气驱混合驱动油藏	16
十、溶解气驱油藏	16
第二节 气藏的物质平衡方程式	17
一、封闭型气藏	17
二、天然水驱作用的不封闭气藏	21
第三节 天然水侵量的计算方法	26
一、稳定流方法	27
（1）薛尔绍斯方程式	27
（2）赫斯特修正方程式	27
二、不稳定流方法	28
（1）半球形流方程式	28
（2）平面径向流方程式	29
（3）直线流方程式	33

第四节 油、气藏物质平衡方程式的直线表达式	35
一、第一种直线形式	36
二、第二种直线形式	36
三、第三种直线形式	37
四、图解直线形式	38
第五节 天然供水区地层参数的确定方法	39
一、半球形流供水系统	39
二、平面径向流供水系统	40
三、直线流供水系统	40
第二章 油、气藏物质平衡方程式的应用	42
第一节 计算所需的基础资料和准备工作	42
一、计算所需的基础资料	42
二、计算前的准备工作	43
第二节 物质平衡方程式的应用举例	43
一、利用“图解法”确定封闭型油藏的原始地质储量	44
二、利用“最小二乘方法”解物质平衡方程式， 确定油藏的原始地质储量和水侵常数	46
三、利用试凑法（试算法）解物质平衡方程式， 确定油藏的原始地质储量和水侵系数，并预 测油田开发的动态变化及供水区的地层参数	51
四、利用“交会法”解物质平衡方程式，预测油 藏的地层压力和天然水侵量	62
五、应用“压力函数”和“图解法”解物质平衡 方程式，确定油藏的原始地质储量和水侵系数	69
六、应用物质平衡方程式确定封闭型气藏 的原始地质储量、含气面积和生产某时间 后的剩余地质储量	74
七、利用“图解法”确定某水驱气藏的原始地 质储量和天然水侵量	76

八、利用物质平衡方程式, 确定气藏的原始地质储量、 水侵系数、水淹体积系数和水侵波及系数	78
九、气藏天然气水侵的判断	83
结束语	86
附 录	88
附图 1 岩石有效压缩系数与有效孔隙度的实验 关系曲线	88
附图 2 地层水的粘度与地层温度和氯化钠含量 的关系图	88
附图 3 地层水的压缩系数与地层压力和地层温 度的关系曲线, 以及地层水含气时压缩 系数的校正图	89
附图 4 天然气和凝析气的临界压力和临界温度 与天然气比重的关系图	90
附图 5 气体偏差系数与比压力和比温度关系图	91
附图 6 计算油田地质储量诺模图之一	92
附图 7 计算油田地质储量诺模图之二	93
附图 8 计算气田地质储量诺模图之一	94
附图 9 计算气田地质储量诺模图之二	95
附表 1 半球形流无限大供水系统的 $Q(t_D)$ 与 t_D 关系表	96
附表 2 半球形流有限封闭供水系统不同 R_D 值 的 $Q(t_D)$ 与 t_D 关系表	97
附表 3 半球形流有限敞开供水系统不同 R_D 值 的 $Q(t_D)$ 与 t_D 关系表	103
附表 4 平面径向流无限大供水系统的 $Q(t_D)$ 与 t_D 关系表	106
附表 5 平面径向流有限封闭供水系统不同 R_D 值 的 $Q(t_D)$ 与 t_D 关系表	111

附表 6	直线流的不同供水区条件的 $Q(t_D)$ 与 t_D 关系表	115
附表 7	计算油、气田地质储量的容积法公式表	117
附表 8	物质平衡方程式直线化关系式汇总表	118
符号及单位注释		130
参考文献		134

第一章 油、气藏的物质平衡方程式

第一节 油藏的物质平衡方程式

油藏的物质平衡方程式，大体上可以分为未饱和油藏的和饱和油藏的两大类。不同驱动类型油藏的物质平衡方程式分述如下。

一、封闭型弹性驱动油藏

对于原始地层压力高于饱和压力的断块型油藏、灰岩裂缝油藏以及岩性油藏，在开采初期主要依靠地层压力下降所引起的孔隙岩层及其中所储集油、水的弹性膨胀作用，将原油从地层中驱挤到井底。因此，在饱和压力以上的某一地层压力下降期间内，从油藏中采出的油量应当等于油、水和储集岩层的弹性膨胀量。此物质平衡关系可写成下式：

$$\begin{aligned} N_p B_o &= F h \phi S_{oi} C_o \Delta P + F h \phi S_{wi} C_w \Delta P + F h \phi C_f \Delta P \\ &= F h \phi S_{oi} \left[C_o + \frac{S_{wi}}{S_{oi}} C_w + \frac{1}{S_{oi}} C_f \right] \end{aligned} \quad (1)$$

已知，在地层条件下，油藏的原始地质储量为：

$$N_o B_{oi} = F h \phi S_{oi} \quad (2)$$

再令油藏的综合弹性压缩系数为：

$$C_t = C_o + \frac{S_{wi} C_w + C_f}{S_{oi}} \quad (3)$$

式中 $S_{oi} = 1 - S_{wi}$

将（2）式和（3）式代入（1）式得下式：

$$N_p B_o = N_o B_{oi} C_t \Delta P \quad (4)$$

本书的(4)式与文献[1]中推导的结果完全相同。

对于封闭型弹性驱动油藏的任一开发阶段,可根据物质守恒原理,直接写出如下的文字关系式:

地层原油的原始体积储量 =

累积采出地层原油的体积量 + 地层原油的剩余体积储量

(5)

将相应关系量代入(5)式得:

$$N_o B_{oi} = N_p B_o + (N_o - N_p) B_o \quad (6)$$

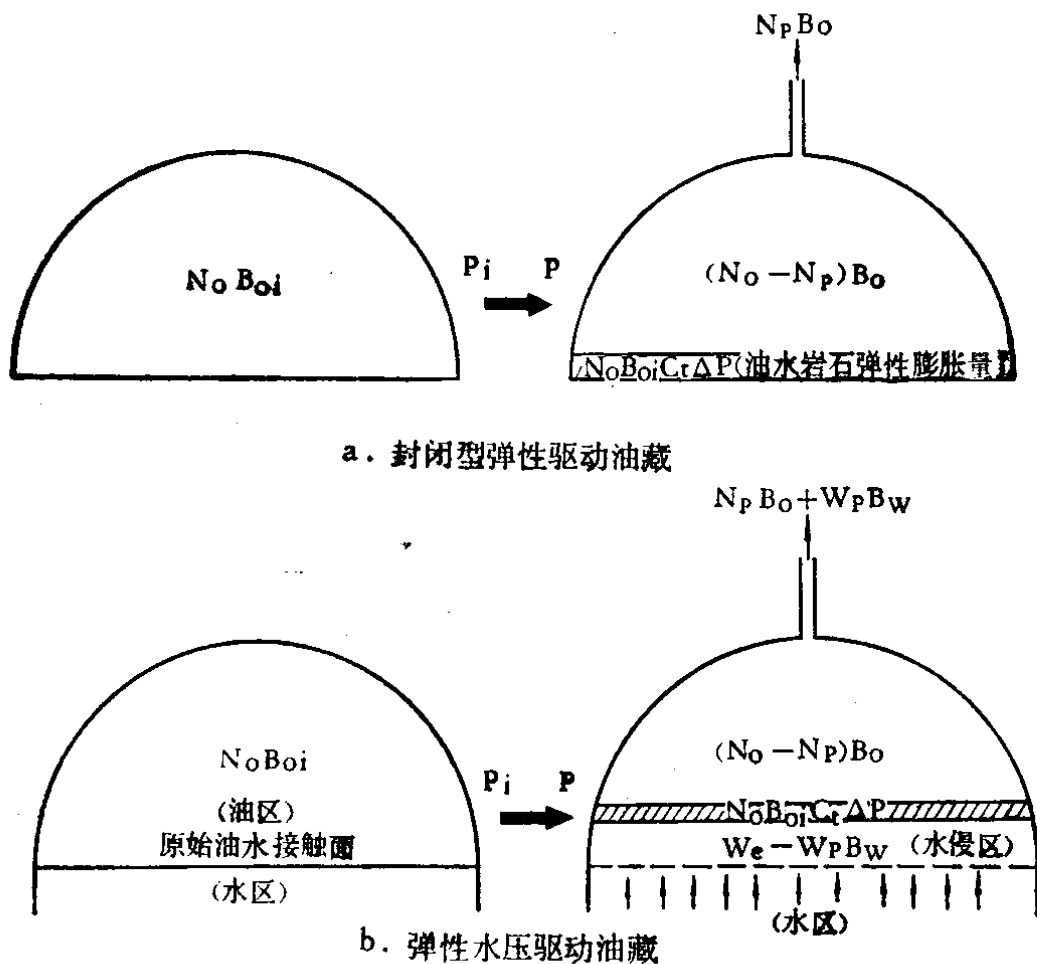


图 1 地层压力高于饱和压力油藏的物质平衡图

由图1a可以得到地层原油的剩余体积储量为:

$$(N_o - N_p) B_o = N_o B_{oi} - N_o B_{oi} C_i \Delta P \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式同样可以得到(4)式。

在矿场的实际分析中,通常引用一个所谓弹性产率概念,其涵义即单位地层压降的产油量,或每产单位体积原油的地层压力降低量,由(4)式可以得到:

$$\eta = \frac{N_p}{\Delta P} = \frac{N_o B_{oi} C_i}{B_o} \quad (8-1)$$

或

$$\varepsilon = \frac{\Delta P}{N_p} = \frac{B_o}{N_o B_{oi} C_i} \quad (8-2)$$

由(8-1)和(8-2)式可以看出,对于封闭型弹性驱动油藏的弹性产率,基本上保持一个常数(见图2和图3所示)。

图2 $N_p = f(\Delta P)$ 图
1—封闭型弹性驱动; 2—
弹性水压驱动

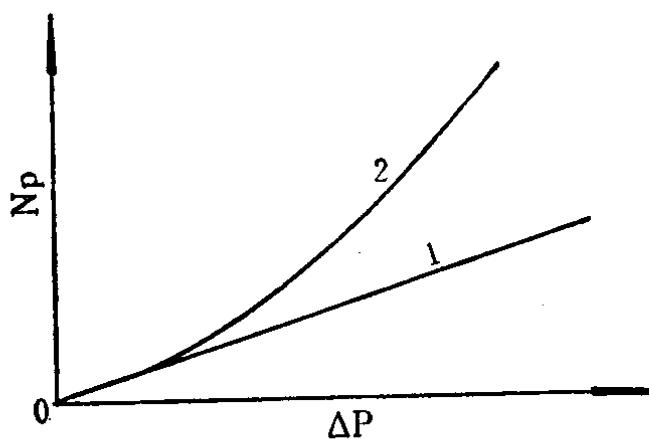
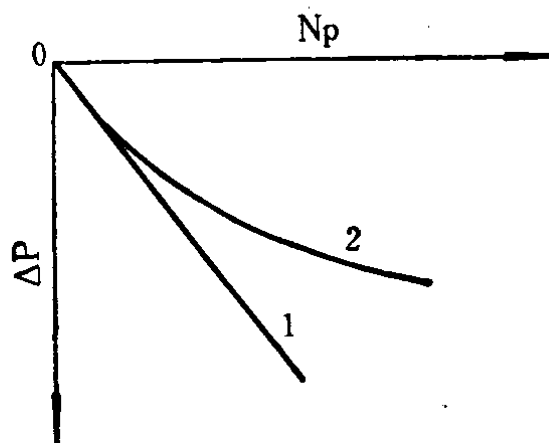


图3 $\Delta P = f(N_p)$ 图
1—封闭型弹性驱动; 2—弹
性水压驱动



二、不封闭的弹性水压驱动油藏

对于一个具有边水作用的、原始地层压力高于饱和压力的未饱和油藏，在饱和压力以上的地层压力下降期间，不仅在油藏部分发生油、水和孔隙岩层的弹性膨胀作用，而且同时产生由于边水区的弹性膨胀使边水对油藏的入侵作用。因此，在该驱动条件下，油藏的累积产油量，应当等于油藏本身的油、水和岩层的累积弹性膨胀量，加上边水的累积净水侵量（即要扣除油藏的累积产水量）。此物质平衡关系式由下式表示：

$$N_p B_o = N_o B_{oi} C_t \Delta P + (W_e - W_p B_w) \quad (9-1)$$

或写为：

$$N_o = \frac{N_p B_o - (W_e - W_p B_w)}{B_{oi} C_t \Delta P} \quad (9-2)$$

对于弹性水压驱动的油藏，同样可以根据物质守恒的关系式（6）和物质平衡图1b，得到物质平衡方程式（9-1）。由图1b可以写出地层原油的剩余体积储量为：

$$(N_o - N_p) B_o = N_o B_{oi} - N_o B_{oi} C_t \Delta P - (W_e - W_p B_w) \quad (10)$$

将（10）式代入（6）式，同样可以得到弹性水压驱动的物质平衡方程式（9）式。

油藏的弹性水驱产率由（9）式得到：

$$\eta = \frac{N_p}{\Delta P} = \frac{N_o B_{oi} C_t}{B_o} + \frac{W_e - W_p B_w}{B_o \Delta P} \quad (11-1)$$

$$\text{或} \quad \varepsilon = \frac{\Delta P}{N_p} = \frac{B_o}{N_o B_{oi} C_t + \frac{W_e - W_p B_w}{\Delta P}} \quad (11-2)$$

由（11-1）式和（11-2）式看出，弹性水驱产率（ η ）

随时间而增加，而单位产量的地层压降率（ ε ）随时间而减小（见图 2 和图 3 所示）。这就是弹性水压驱动油藏的开采特征。

当既存在天然弹性水驱作用，而又进行人工注水时，由（9-1）式可以直接写出如下的物质平衡方程式：

$$N_p B_o = N_o B_{oi} C_t \Delta P + [W_e + (W_i - W_p) B_w] \quad (12)$$

将（12）式改写为下式：

$$\frac{N_o B_{oi} C_t \Delta P}{N_p B_o + W_p B_w} + \frac{W_e}{N_p B_o + W_p B_w} + \frac{W_i B_w}{N_p B_o + W_p B_w} = 1.0 \quad (13)$$

类似文献〔1、2〕的分析方法，把第一项称为油藏内部的弹性驱动指数（ EDI ）；第二项称为天然水驱动指数（ $W_e DI$ ），第三项为人工注水驱动指数（ $W_i DI$ ），故得：

$$EDI + W_e DI + W_i DI = 1.0 \quad (14)$$

$$\text{式中 } EDI = N_o B_{oi} C_t \Delta P / (N_p B_o + W_p B_w) \quad (15)$$

$$W_e DI = W_e / (N_p B_o + W_p B_w) \quad (16)$$

$$W_i DI = W_i B_w / (N_p B_o + W_p B_w) \quad (17)$$

由（15）、（16）和（17）三式，可以分别算出某种驱动能力在开发中所占的百分比。

三、天然水驱、人工水驱、气顶驱和溶解气驱的混合驱动油藏

对于一个原始地层压力等于饱和压力，而且具有气顶、边水作用和人工注水开发的饱和油藏，在开采过程中随着油藏地层压力的下降，就要引起边水的入侵、气顶的膨胀、溶解气的分离膨胀和油藏部分的岩石、束缚水的弹性膨胀等作用（见图 4）。这是原油在地层中渗流的诸动力。在这种情况下，油藏的原油和自由气的体积累积减少量，应当等于天

然水、人工注水的累积纯净进水量（即扣除油藏的累积产水量），加上油藏的岩石和束缚水的弹性膨胀量。基于文献〔1、3〕介绍的方法，该混合驱动条件下的物质平衡方法，推导如下述。

（1）油藏内原油体积的减少量

已知油藏内原油的原始体积量为：

$$V_{oi} = N_o B_{oi} \quad (18)$$

当地层压力下降到 P 的 t 时刻，油藏内原油的剩余体积量为：

$$V_o = (N_o - N_p) B_o \quad (19)$$

因此，在 t 时间内，油藏内原油体积的减少量为：

$$V_{oi} - V_o = N_o B_{oi} - (N_o - N_p) B_o \quad (20)$$

（2）油藏的自由气体积减少量

在地层条件下，假定原始气顶内自由气的体积量与原始含油体积量之比为：

$$m = \frac{V_{gi}}{N_o B_{oi}} \quad (21)$$

因此，原始气顶内自由气的地层与地面条件下的体积量，可分别写出：

$$V_{gi} = N_o m B_{oi} \quad (22)$$

和
$$\frac{V_{gi}}{B_{gs}} = \frac{N_o m B_{oi}}{B_{gs}} \quad (23)$$

在地层压力下降到 P 的 t 时刻，自由气的体积量 (M_g)，应当等于原始气顶内的自由气体积量，加上油藏内原油的原始溶解气量，减去在 t 时间内的累积产气量和油藏内原油中的剩余溶解气量。此物质平衡关系，按地面标准条件可写为：

$$\frac{M_g}{B_g} = \left[\frac{N_o m B_{os}}{B_{gs}} + N_o R_{ss} \right] - N_p R_p - (N_o - N_p) R_s \quad (24)$$

若写为地层条件时, 则为:

$$M_g = \left[\frac{N_o m B_{os}}{B_{gs}} + N_o R_{ss} - N_p R_p - (N_o - N_p) R_s \right] B_g \quad (25)$$

综合上述, 在 t 时间内, 自由气的体积减少量 (地层条件), 应当等于原始自由气的体积量 (地层条件) 减去目前 t 时间的自由气体积量, 由 (22) 式减 (25) 式得:

$$V_{gi} - M_g = N_o m B_{os} - \left[\frac{N_o m B_{os}}{B_{gs}} + N_o R_{ss} - N_p R_p - (N_o - N_p) R_s \right] B_g \quad (26)$$

(3) 油藏内的含水体积增加量

已知: 油藏内的原始含水体积量为 W ; 在 t 时间内的累积产水量为 $W_p B_w$; 在 t 时间内的人工累积注水量为 $W_i B_w$; 在 t 时间内天然水驱的累积水侵量为 W_e 。因此, 当地层压力从饱和压力 (即原始地层压力) 下降到 P 的 t 时刻, 油藏内总的含水体积量 (地层条件) 为:

$$W + W_e + (W_i - W_p) B_w \quad (27)$$

故油藏内相应的含水体积增加量为:

$$\begin{aligned} & [W + W_e + (W_i - W_p) B_w] - W \\ & = W_e + (W_i - W_p) B_w \end{aligned} \quad (28)$$

(4) 油藏内岩石和束缚水的弹性膨胀量

在地层压力下降 ΔP 期间, 油藏内含油部分的岩石和束缚水的弹性膨胀体积量为:

$$-\frac{N_o B_{os}}{S_{oi}}(C_f + C_w S_{wi}) \Delta P \quad (29)$$

基于以上分析, 在生产 t 时间内, 油藏内原油和自由气的体积减少量, 应当等于进入油藏的水量, 加上油藏内的岩石和束缚水的弹性膨胀量, 由 (20)、(26)、(28) 和 (29) 等四式即得:

$$\begin{aligned} & N_o B_{oi} - N_o B_o + N_p B_o + N_o m B_{os} - \frac{N_o m B_{os} B_g}{B_{gs}} \\ & - N_o R_{ss} B_g + N_p R_p B_g + N_o R_s B_g - N_p R_s B_g \\ & = W_e + (W_i - W_p) B_w + \frac{N_o B_{os}}{S_{oi}}(C_f + C_w S_{wi}) \Delta P \end{aligned} \quad (30)$$

将 (30) 式进行整理并项后得:

$$\begin{aligned} & N_o [(B_{os} - R_{ss} B_g) - (B_o - R_s B_g) + \frac{m B_{os}}{B_{gs}} (B_{gs} - B_g) \\ & - \frac{B_{os}}{S_{oi}}(C_f + C_w S_{wi}) \Delta P] = -N_p (B_o - R_s B_g + R_p B_g) \\ & + W_e + (W_i - W_p) B_w \end{aligned} \quad (31)$$

由 (31) 式解出 N_o , 即得天然水驱、人工水驱、气顶驱、溶气驱和弹性驱等混合驱动条件下的油藏物质平衡方程式为: