

# 烃源岩生排烃组分法模型研究与应用

柳广弟 黄志龙 郝石生

(石油大学,北京 100083)

**摘要** 本文提出了一种新的烃源岩生排烃组分法模拟模型。组分法生烃模型根据热模拟实验得到的组分产率曲线模拟烃源的生烃史。排烃模型包括开放体系模型和间歇开放体系模型,分别用于模拟以压实作用为主要动力的孔隙排烃和以异常高压为主要动力的微裂缝排烃。这一模型根据孔隙温度、压力和烃类组成,采用热力学方法模拟孔隙体系流体体积和相态的变化,不同组分在各相中的分布,并由此求出各组分的排出量和总排烃量。对陕甘宁盆地古生界源岩生排烃史的模拟结果表明,该模型具有实用价值。

**关键词** 油气生成 排烃 数值模拟 组分模型

**分类号** P 618. 130. 1

**第一作者简介** 柳广弟 男 35岁 副教授 博士 石油地质及盆地模拟

近十几年来盆地模拟技术在国内外均得到了迅速发展并在油气勘探和资源评价中得到了广泛应用。但目前国内盆地模拟系统所使用的生排烃模型特别是排烃模型基本上为单组分模型或双组分模型<sup>[1]</sup>。这种模型已不能满足目前生产上对烃类在地下赋存状态进行预测的要求。进入90年代,某些学者已开展了基于化学反应动力学的组分法生烃模型的研究,但组分法排烃模型所考虑的机理仍过于简化<sup>[2,3]</sup>,并且研究较少。另一方面,组分化学动力学模型参数复杂,针对具体烃源岩不易取得。

基于上述原因,本文以烃源岩热模拟实验资料为基础,建立了一种新的烃源岩生排烃组分法模型。

## 1 组分法生烃模型

### 1.1 热模拟实验资料的整理

根据不同的研究目的,可将热模拟实验的产物划分成不同的组分。如甲烷气(C<sub>1</sub>)、重烃气(C<sub>2</sub>~C<sub>5</sub>)、轻质油(C<sub>6</sub>~C<sub>14</sub>)和重质油(C<sub>15</sub>)等四种组分,也可以根据采用其他不同的划分方法。对于所划分出的每一种组分,根据烃源岩热模拟实验的结果,求出其在不同热演化程度(用R<sub>o</sub>值表示)下的产率,作出每一组分产率与镜质体反射率R<sub>o</sub>之间的关系曲线。这一曲线称为组分产率曲线。

### 1.2 组分法生烃模型

在烃源岩热演化史模拟结果的基础上,根据烃源岩的厚度、有机碳含量、热演化程度以及不同组分的产率,可以计算出每一组分在任一时刻的累积生成强度

$$E_{mt} = 10^6 M \rho C r_c \int_{Z_1(t)}^{Z_2(t)} G_m(R_o) dZ \quad (1)$$

式中 E<sub>mt</sub>为第 m 个组分在 t 时刻的累积生成强度, t/km<sup>2</sup>; M 为源岩层中可生气岩石的含量,小数; ρ 为烃源岩的密度 t/km<sup>3</sup>; C 为烃源岩的残余有机碳含量,小数; r<sub>c</sub> 为碳恢复系数,无量纲; G<sub>m</sub>(R) 为第 m 个组分的产率, mg/g; Z(t)、Z<sub>1</sub>(t) 为

t 时刻源岩层顶界和底界的埋深 m

## 2 组分法排烃模型

### 2.1 排烃概念模型

在烃源岩埋藏演化的整个过程中,由于岩石物理性质的变化,烃源岩排烃的地质条件也是变化的。当烃源岩埋藏较浅,具有较高的孔隙度和渗透率时,烃源岩孔隙空间的流体可以在压实作用的驱使下自由地从源岩中排出,此时的烃源岩基本上是一个开放体系;而当烃源岩埋藏较深时,由于其渗透率变得很低,孔隙空间内部的流体不能及时排出,往往形成异常高孔隙流体压力,此时烃源岩的孔隙作为排烃通道只占次要地位,烃源岩成为一种封闭或半封闭体系。这种体系与外部的联系以及流体的排出主要以在异常高压作用下间歇开启的微裂缝作为通道来完成,此时的烃源岩基本上属于一种间歇开放体系。

#### 2.1.1 开放体系模型

开放体系条件下烃源岩孔隙流体处于静水压力状态,流体的排出量等于孔隙体积的减少量与孔隙系统内新生流体的生成量之和。这种新生流体主要包括在烃源岩演化过程中生成的油气和粘土矿物转化脱出的水。但是从某一时刻 t<sub>i</sub> 到下一时刻 t<sub>i+1</sub>, 不仅由于压实作用造成了孔隙空间体积的减少,同时孔隙流体的组成、体系所处的温度和压力也发生了变化。这种变化不仅导致了孔隙内流体体积的改变,同时也改变了孔隙流体的相态特征和油气水三相的饱和度。这种变化可以用热力学中的状态方程和相平衡理论来描述(图 1)。

此时,孔隙流体的总排出量 Q 为:

$$Q = V_{fs} - V_{pi-1}$$

$$V_{fs} = F(m_{i+1}, T_{i+1}, P_{i+1}) \quad (2)$$

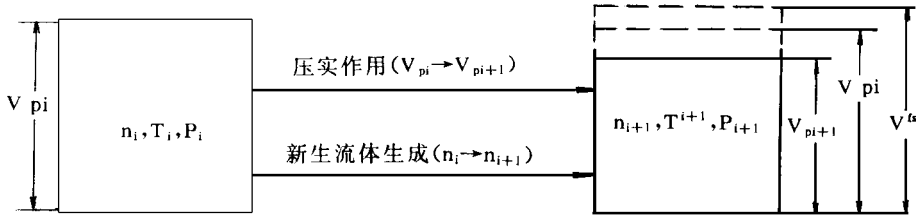
式中 F 代表热力学状态方程。

在开放体系条件下,体系的压力为静水压力,温度可由热模型得出,孔隙流体组成可由生烃模型和粘土脱水模型<sup>[4]</sup>

得出,孔隙体积由压实模型得出。在上述条件已知的情况下可用状态方程求出孔隙流体相态、各相流体饱和度、各组分在各相中的分布以及流体的总体积,进而求出各组分流体的排出量。

借此求出排烃量。此时所排出的流体体积为

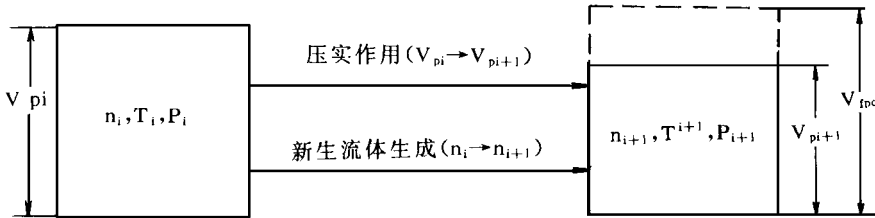
$$Q = V_{fpc} - V_{pi+1}$$



$V_{pi}, V_{pi+1}$  为  $t_i$  时刻和  $t_{i+1}$  时刻烃源岩孔隙体积;  $P_i, P_{i+1}$  为  $t_i$  时刻和  $t_{i+1}$  时刻体系的压力;  $T_i, T_{i+1}$  为  $t_i$  和  $t_{i+1}$  时刻体系的温度;  $n_i, n_{i+1}$  为  $t_i$  和  $t_{i+1}$  时刻孔隙流体组成;  $V_{fpc}$  为假设  $t_i$  至  $t_{i+1}$  时间段未排烃时在  $t_{i+1}$  时刻孔隙流体的总体积

图 1 开放体系排烃模型示意图

Fig. 1 Schema of expulsion model for the open system



$V_{pi}$  为  $t_i$  时刻烃源岩孔隙体积;  $V_{pi+1}$  为  $t_{i+1}$  时刻烃源岩孔隙体积,等于在  $P_{i+1}$  异常高压作用下的孔隙流体体积;  $V_{fpc}$  为相同的孔隙流体在破裂压力为  $P_c$  作用下的体积;  $n_i, n_{i+1}$  为  $t_i$  时刻和  $t_{i+1}$  时刻孔隙流体组成;  $T_i, T_{i+1}$  为  $t_i$  和  $t_{i+1}$  时刻体系的温度;  $P_i, P_{i+1}$  为  $t_i$  和  $t_{i+1}$  时刻体系的压力

图 2 间歇开放体系模型示意图

Fig. 2 Schema of expulsion model for the intermittently open system

2.1.2 间歇开放体系模型

间歇开放体系排烃的动力是孔隙流体的异常高压,排烃的主要通道是异常高压作用下间歇开启的微裂缝。微裂缝开启的标志是孔隙流体压力大于岩石的破裂压力。根据弹性力学原理,破裂压力为

$$P_c = \frac{V}{1 - \nu} S_1 \quad (3)$$

式中  $P_c$  为烃源岩的破裂压力;  $V$  为岩石的泊松比;  $S_1$  为上覆地层的地静压力。

在间歇开放体系模型中,烃源岩孔隙体系的温度、压力、孔隙体积和孔隙流体组成之间的关系同样受状态方程和相平衡原理支配。烃源岩发生排烃的条件是孔隙压力大于破裂压力,反之,则不发生排烃。这一条件也可以采用另一种方式来描述,即对于在某一时刻  $t_{i+1}$  烃源岩孔隙体系的温度和孔隙流体组成,如果当体系处于烃源岩破裂压力  $P_c$  时的流体体积大于当时的孔隙空间体积,则会形成微裂缝,发生排烃,反之不发生排烃(图 2)。这一在破裂压力下孔隙流体的体积可以同样用状态方程求出,并同时求出在此压力下孔隙流体的相态、各相流体的饱和度和各组分在各相中的分布,并可

$$V_{fpc} = F(n_{i+1}, T_{i+1}, P_c) \quad (4)$$

式中,  $F$  代表热力学状态方程。

2.2 热力学模型及算法

可以看出(2)式和(4)式的形式是相同的,因此可采用相同的热力学模型和算法。所不同的是在计算流体体积时二者使用的压力不同,开放体系模型使用静水压力,而间歇开放体系模型使用破裂压力。

孔隙系统内的烃类和水,由于各组分含量不同,体系所处的温度和压力不同,可呈不同相态出现。其中即可以是油水两相或气水两相,也可以是油气水三相。体系内的这种相态变化遵循热力学状态方程<sup>[5]</sup>

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a[T]}{V(V + b) + c(V - b)} \quad (5)$$

及相平衡原理

$$\begin{cases} T_o = T_G = T \\ P_o = P_G = P \\ f_o^m = f_G^m (m = 1, 2, \dots, k) \end{cases} \quad (6)$$

式中  $P$  为体系的压力;  $T$  为体系的温度;  $R$  为气体常数;  $V$  为体积;  $a[T]$  为一个与温度有关的系数;  $b, c$  为常数;  $P_o$  和  $P_G$

为油相和气相的压力;  $T_o$  和  $T_G$  为油相和气相的温度;  $f_o^m$  和  $f_G^m$  第  $m$  个组分在油相和气相中的逸度。第  $m$  个组分在气相的逸度可按下列式计算

$$RT \ln \left( \frac{f_G^m}{Y_m P} \right) = \int_V^{\infty} \left[ \left( \frac{L P}{L n_m} \right) - \frac{RT}{V} \right] dV - RT \ln Z \quad (7)$$

式中  $Y_m$  为第  $m$  个组分在气相中的摩尔分数;  $n_m$  为第  $m$  个组分的摩尔数;  $Z$  为压缩因子。如果要计算组分  $m$  在油相中的逸度,只需将式中的  $Y_m$  换成  $m$  组分在油相中的摩尔分数  $X_m$  即可。

在相平衡计算中,首先根据体系的温度和组成计算出其泡点压力 ( $P_b$ ) 和露点压力 ( $P_d$ ),并与体系的实际压力  $P$  比较以确定体系是处于一相还是两相(水相除外)。

如果  $P > P_b$ ,则此时无气相,故气相体积  $V_G = 0$ ,油相体积  $V_o$  由状态方程(5)直接解出;

如果  $P < P_d$ ,则此时无油相,故油相体积  $V_o = 0$ ,气相体积  $V_G$  由状态方程(5)直接解出;

如果  $P_d < P < P_b$ ,此时为油气两相共存,油相体积  $V_o$  和气相体积  $V_G$  由方程(5)和(6)联合解出。

方程的解法采用迭代方法。首先由设定的汽化分率  $e$  (即气相组成占总组成的比例)计算的气相组成  $Y_m$  和油相组成  $X_m$ ,并根据混合规则<sup>[3]</sup>分别计算出油相混合物和气相混合物的常数  $a$ 、 $b$  和  $c$ ,代入(5)式则可解出油相体积  $V_o$  和气相体积  $V_G$ ;将  $V_o$  和  $V_G$  分别代入(7)式可分别计算出当汽化率为  $e$  时各组分在油相和气相中的逸度  $f_o^m$  和  $f_G^m$  比较  $f_o^m$  和  $f_G^m$ ,如不满足(6)式,则调整  $e$  值并重复上述计算,直到满足(6)式为止。这时的  $X_m$  和  $Y_m$  及  $V_o$  和  $V_G$  即为油气两相共存时的组成和体积。

根据相平衡计算得到的化分率  $e$ 、油相组成  $X_m$ 、气相组成  $Y_m$ 、油相体积  $V_o$  和气相体积  $V_G$  即可求出各种烃类组分排出量

$$Q_m = n(V_f - V_p) \frac{(1-e)X_m + eY_m}{V_f} \quad (8)$$

其中

$$V_f = V_w + V_o + V_G$$

式中:  $Q_m$  为第  $m$  个组分的排出量,  $n$  为体系中烃类的总量;  $V_f$  在体系条件下流体的总体积;  $V_p$  为烃源岩的孔隙体积;  $e$  为两相体系的汽化率;  $X_m$  为第  $m$  个组分在油相中的摩尔分数;  $Y_m$  为第  $m$  个组分在气相中的摩尔分数;  $V_w$ 、 $V_o$  和  $V_G$  分别为水、油、气三相的体积。

应该指出,在相平衡计算中,对于开放体系模型,体系的压力取静水压力,因此得到的体积  $V_f$  应是流体的静水压力下的体积  $V_{fs}$ ;对于间歇开放体系模型,体系压力取破裂压力,则得到的体积  $V_f$  是流体在破裂压力下的体积  $V_{fp}$ 。

在具体进行模拟计算时,将烃源岩的整个排烃史划分为许多小的时间段,利用上述模型,依次求出每一时间段烃源岩的排烃量并进行累加即可求出烃源岩的总排烃量。

### 3 组分生排烃模型的应用

利用上述组分生排烃模型对陕甘宁盆地地下古生界的生排烃史进行了模拟。模拟中将热模拟产物划分为七种组分,即  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$ 、 $C_6$  和  $C_7$ 。模拟结果可以显示出下古生界烃源岩烃类生成和排出的组分组成在地史上的变化情况。

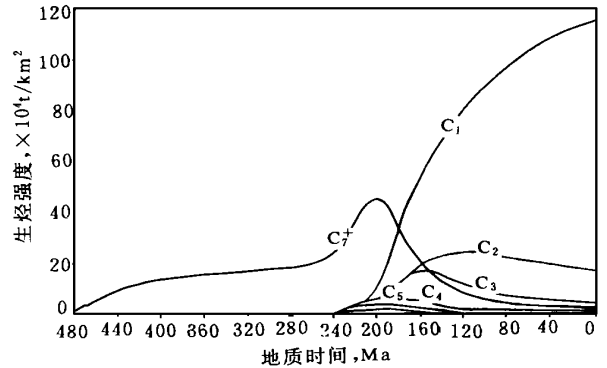


图3 陕甘宁盆地地下古生界烃源岩生成物组成在地史上的变化

Fig. 3 Composition changes of hydrocarbons from Lower Paleozoic source rocks of the Ordos basin in geological history

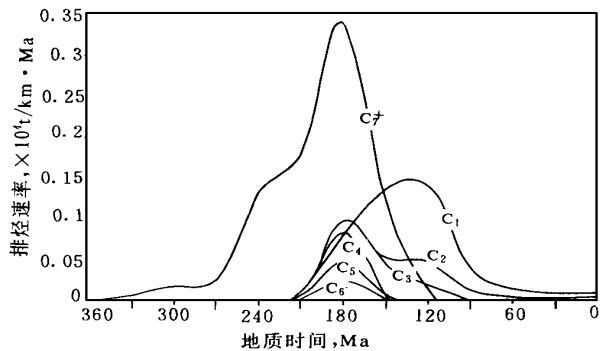


图4 陕甘宁盆地地下古生界烃源岩排出物组成在地史上的变化

Fig. 4 Composition changes of expelled hydrocarbons from Lower Paleozoic source rocks of the Ordos basin in geological history

图3表示了源岩生成物组成在地史上的变化。可以看出在古生代(240 Ma以前),该源岩主要以生成液态组分  $C_2$  以上烃类为主,且生成的量很少。进入三叠纪(240 Ma以后),液态组分的生成进入高峰期,大致在中三叠世末(195 Ma)达到最高峰,同时各种气态组分的生成量也逐渐增大。此后,液态组分的生成量逐渐减少(包括一部分液态组分裂解为气态组分),而  $C_2$ 、 $C_3$  的生成量则大幅度增加,  $C_4$ 、 $C_5$ 、 $C_6$  组分的生成量增加缓慢,且生成量较少。在侏罗纪期间,  $C_6$ 、 $C_5$ 、 $C_4$ 、 $C_3$  和  $C_2$  组分的生成量,依分子量递减的顺序依次达到高峰后开始下降,而只有  $C_1$  组分的生成一直保持增加的趋

势。到目前为止,下古生界源岩的生成物以 C<sub>1</sub> 组分占绝对优势, C<sub>2</sub> 和 C<sub>3</sub> 组分较少,其他组分极少。

表 1 陕甘宁盆地模拟天然气组成与实际天然气组成的比较\*

Table 1 Comparison of the hydrocarbon composition simulated with that of the gasified in the central area of the Ordos basin

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
模拟组成	91.70	7.03	1.06	0.13	0.08
中部气田天然气组成	98.46	1.261	0.165	0.073	0.041

\* 组成单位为体积百分数

图 4 表示不同烃类组分排出速率在地史上的变化。与生烃相对应,在古生代,只有液态组分(C<sub>7</sub>)排出,但排烃速率不高。进入三叠纪,液态组分的排出速率则大幅度增加,至早侏罗世(180 Ma)达到排出高峰。从中三叠世开始,各种气态组分的排出速率也开始增大,其中 C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>、C<sub>5</sub> 和 C<sub>6</sub> 组分均在早侏罗世(180 Ma)达到排出高峰,C<sub>1</sub> 组分排烃高峰出现较晚,大致在晚侏罗世至早白垩世期间达到高峰,从图 3 可以看出这一时期是 C<sub>1</sub> 组分生成速率最大的时间。晚白垩世以后,各种组分的排出速率都大幅度降低,目前各组分的排出趋于停止。

根据生排烃组分模拟的结果,可以计算出现今烃源岩产物的烃类组成(表 1)。可以看出,在烃类组成中,甲烷占绝对优势,与目前中部气田天然气的烃类组成基本相近。但目前气田的天然气中,甲烷的含量更高,重烃气含量更小。造成这种差别的主要原因可能是,模拟烃类组成只是其生排烃的组

成,而气田中的天然气组成则是经过运移后的最终结果。运移过程中的层析作用,使甲烷进一步富集,重烃气组分进一步减少。

### 4 结 论

本文建立了一种可以模拟烃源岩生成物和排出物组成变化的组分生排烃模型。用这种模型可以模拟出烃源岩生排烃组分在地史上的变化,根据模拟结果可以对烃类在地下的赋存相态进行预测。陕甘宁盆地地下古生界的模拟结果与中部气田的实际情况基本吻合,表明该模型具有实用价值。

### 参 考 文 献

[1] 石广仁. 油气盆地数值模拟方法. 北京: 石油工业出版社, 1994, 172.

[2] Rorbos, P L and Ungerer, P Met al. Compositional modeling of petroleum generation and expulsion: Trial to a local balance in the smorbukk sor Field, Haltenbanken area, Norway, AAPG Bulletin. 1991(5): 873~ 893.

[3] 王晓红, 石广仁, 李晋超. 油气盆地生烃排烃的组分法数值模拟研究. 石油勘探与开发, 1995, 22(1): 16~ 19.

[4] Du Rouchet, J Stress field, A key tp oil migration. AAPG Bulletin. 1981, 65(1): 74~ 85.

[5] Patel, N C and Teja, A S. A new cubic equation of state for fluid and fluid mixtures, Chemical Enegineering Science. 1982, 37(3): 463~ 473.

## Compositional Models of Petroleum Generation in and Expulsion from Source Rocks and Their Application

Liu Guangdi Huang Zhilong and Hao Shisheng

(University of Petroleum, Beijing 100083)

### Abstract

The new compositional models of hydrocarbon generation in and expulsion from source rocks were proposed in this paper. The compositional model of hydrocarbon generation is based on the compositional productivity of source rocks vs. thermal maturity derived from thermal simulation experiment in laboratory. The compositional model of hydrocarbon expulsion includes open system model and intermittently open system model. The open system model describes the process of hydrocarbon expulsion through pores of source rocks forced by compaction, and the intermittently open system model describes the process of hydrocarbon expulsion through microfractures forced by abnormally high fluid pressure. The changes of fluid volume and phases in the pore system and the distribution of hydrocarbon compositions in different phases were calculated with thermodynamic principles based on the temperature, pressure and the fluid composition in the pore system. Thus, the expulsion history of hydrocarbon compositions and the total expulsion amount can be simulated based on the difference between fluid volume and pore volume of source rocks and the distribution of hydrocarbon compositions in different phases. The result of these models applied to the Paleozoic of the Ordos basin has shown the practical value of the models.

**Key Words** hydrocarbon generation oil and gas migration numerical simulation compositional model