

# 成烃增压数值模拟<sup>\*</sup>

徐思煌 梅廉夫 袁彩萍

(中国地质大学, 武汉 100083)

干酪根热解成烃作用是烃源岩中异常高压的重要成因之一。由于成烃增压作用主要是伴随生、排烃作用而发生的, 因此很难直接进行恢复和计算, 通常借助数值模拟方法来描述。通过成烃作用的物理化学机制建立了成烃增压机制的数学模型。该数学模型表明, 生烃越多、干酪根与烃类流体的密度差越大、烃源岩越致密, 则成烃增压强度就越大; 天然气的生成比石油的生成具有更显著的增压效应。应用该数学模型可模拟研究烃源岩演化过程中的成烃增压, 并能再现由此导致的微裂缝幕式排烃的地质过程。成烃增压数值模拟在我国几个典型含油气盆地中得到了有效的应用。

关键词 异常地层压力 成烃作用 微裂缝 数值模拟

第一作者简介 徐思煌 男 34 岁 副教授 石油地质

含油气盆地中广泛存在着不同程度的异常地层压力。异常地层压力的形成与分布不仅同油气的运移、聚集和成藏密切相关(李明诚, 1987), 而且还直接影响油气钻井与开采工程及技术(费特尔, 1976), 因此受到人们的广泛关注。目前地层流体压力研究已成为石油地质勘探与开发各领域中的重要研究内容。异常地层压力具有多种成因机制, 已经提出的成因类型包括欠压实作用、水热增压、粘土矿物脱水以及烃类生成等(真炳钦次, 1978)。各种成因机制的研究程度差异较大。其中由欠压实作用造成异常压力的机制研究程度较高, 而且可用等效深度法定量计算。其他增压机制仍处于定性分析或半定量估算阶段。例如关于成烃作用的增压效应, 一直未能定量描述, 严重制约了生排烃过程的模拟研究。本文旨在探讨成烃作用的增压机制, 建立定量表征成烃增压的数学模型, 提出成烃增压的数值模拟方法。

## 1 成烃增压机制概述

关于成烃作用的增压意义, 多年来一直受到广泛的关注。人们很早就注意到有机质生成油气时由于体积有所增加, 因而能大幅度提高已压实源岩的孔隙压力(Illing, 1938), 特别是甲烷等气体的生成对异常压力有明显的影响(Hedberg, 1980)。已经通

过物理实验证实气体的生成能够产生足够高的压力, 致使岩石发生破裂作用(Tissot, 1971)。应用荧光显微镜鉴定烃源岩生烃热模拟实验样品的薄片, 能够观察到这种微裂缝的存在及微裂缝中烃类充填特点(肖贤明等, 1993)。

显然, 成烃作用之所以具有增压意义, 本质上是因为: (1) 固态干酪根密度比油气密度大, 而由干酪根转化成油气是体积膨胀的过程; (2) 成熟烃源岩通常比较致密, 其内流体在排出之前处于相对密闭的系统中。

成烃增压机制可概括为: 烃源岩在埋藏、压实、受热过程中, 当有机质达到一定的成熟度时便开始生成石油、天然气。由于此时烃源岩已相当致密, 油气水不易排出而受到挤压, 通过积累弹性能的形式增高孔隙流体压力。当该压力增大到足以使源岩产生微裂缝时, 孔隙流体通过微裂缝排出。排液后压力释放, 受围压影响微裂缝又将闭合。这说明不但烃源岩成烃作用具有明显的增压效应, 而且这种增压已构成微裂缝排烃的重要动力。但值得一提的是, 成烃增压作用和微裂缝排烃作用都是发生在特定地史阶段的地质作用, 难以保留永久性记录。现今地层剖面中保存的异常压力并不一定与生烃作用有直接联系。因此成烃增压效应和过程通常很难直接恢复和计算, 需要借助于数值模拟的方法来研究。

## 2 成烃增压的数学模拟

### 2.1 数学模型的建立

至于成烃增压效应到底有多大, 长期以来人们一直在探索。Magara (1978) 曾表示成烃增压难以定量计算(真炳次, 1978)。虽然根据有机质生成烃类的化学反应式, 用物质平衡法能试算不同成熟阶段生烃反应引起的体积膨胀量, 却不能计算出增压值(Ungerer, 1981)。陶一川等(1992)在流体压力方程中考虑了新生烃类流体的体积速率对异常压力的贡献(徐思煌等, 1995)。但其计算参数涉及到古渗透率

和散失速率, 实现起来比较困难。总之, 到目前为止还没有合适的定量计算成烃增压效应的办法。

我们认为生烃作用遵循 3 个原则:

(1) 质量守恒原则: 在干酪根热解成烃的反应中保持源岩的总质量守恒, 即干酪根转化成同等质量的烃类与非烃类产物; (2) 体积守恒原则: 在排烃之前, 所生成的产物全部充填在因干酪根热解而腾出的空间; (3) 压力平衡原则: 油气水共存于源岩孔隙中, 具有统一的压力系统, 即多相流体压力平衡。

为便于推导, 取地下单位体积元(即体积  $V = 1$ ) 的烃源岩作为分析对象。根据上述原则, 提出该烃源岩成烃增压机理的概念模型(图 1)。

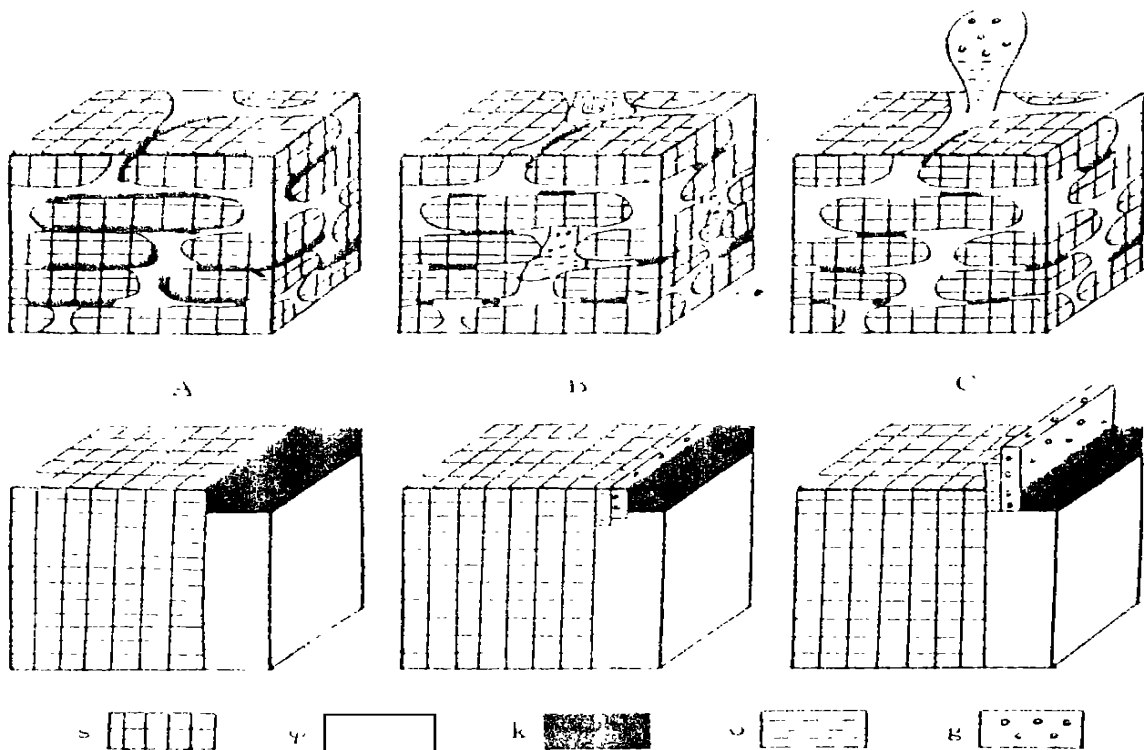


图 1 烃源岩成烃增压机制概念模型图

上排: 源岩结构示意图; 下排: 源岩体积关系图。图中  $s$ 、 $Q$ 、 $k$ 、 $o$ 、 $g$  分别表示源岩骨架、孔隙水、固态干酪根、新生石油、新生天然气所占体积(以小数计)。不同状态体积关系为: A:  $s + Q + k = 1$ ; B:  $s + Q + k + o + g = 1$ ; C:  $s + Q + k + o + g > 1$

图 1 表明, 在生烃之前烃源岩体积组成包括源岩矿物骨架( $s$ )、孔隙水( $Q$ )和固态干酪根( $k$ ) (图 1A)。在地温增加很小、成熟度递增也很小之后, 其中质量为  $M_k$  ( $M_k$  也很小) 的干酪根热解生成质量为  $M_o$  的石油(包括一定的溶解气)和质量为  $M_g$  的游离天然气。在排出烃源岩之前, 这些油气都充填在干

酪根热解产生的空间中, 并导致孔隙压力增加(图 1B)。为了导出成烃增压的数学模型, 现在提出一种假想情况, 即不形成增压的生烃作用, 则新生石油和天然气的体积将比图 1B 中更大, 而且总体积将超过 1 个单位(如图 1C)。图 1C 和图 1B 可看作同一系统的两种不同状态, 图 1C 体积大, 流体压力小; 图

1B 体积小, 流体压力大。

假定图 1C 所示状态流体压力为  $P_n$ , 地层状态下石油、天然气的密度 ( $\rho_o, \rho_g$ ) 都是 ( $P_n$ ) 的函数, 新生石油的体积 ( $V_{o1}$ ) 为  $M_o / \rho_o(P_n)$ , 新生游离态天然气的体积 ( $V_{g1}$ ) 为  $M_g / \rho_g(P_n)$ , 孔隙水的体积 ( $V_{w1}$ ) 为  $\Phi$  热解干酪根体积 ( $V_k$ ) 为  $M_k / \rho_k$ 。设成烃增压量为  $\Delta P$ , 则图 1B 所示状态流体压力为  $P_{n+} \Delta P$ , 新生石油的体积为  $V_{o2}$ , 新生游离状态天然气的体积为  $V_{g2}$ , 孔隙水体积为  $V_{w2}$ 。

显然从图 1C 到图 1B, 是流体体积压缩而压力增加的物理过程。由于考虑的是温度增值很小的情况, 故可近似应用流体等温压缩系数来反映其压力与体积的关系, 即

$$\Delta P_o = - \frac{V_{o2} - V_{o1}}{C_o \cdot V_{o1}} \quad (1)$$

$$\Delta P_g = - \frac{V_{g2} - V_{g1}}{C_g \cdot V_{g1}} \quad (2)$$

$$\Delta P_w = - \frac{V_{w2} - V_{w1}}{C_w \cdot V_{w1}} \quad (3)$$

式中  $\Delta P_o$ 、 $\Delta P_g$ 、 $\Delta P_w$  分别为油、气、水的增压值,  $C_g$ 、 $C_o$ 、 $C_w$  分别为地下天然气、石油和地层水的压缩系数。

又根据前述质量守恒、体积守恒和压力平衡原则, 分别有:

$$M_o + M_g = M_k \quad (4)$$

$$V_{o2} + V_{g2} + V_{w2} = V_{w1} + V_k \quad (5)$$

$$\Delta P_o = \Delta P_g = \Delta P_w = \Delta P \quad (6)$$

将以上 6 个方程联立并求解, 得到生成油气时的增压量 ( $\Delta P$ ) 数学模型为:

$$\Delta P = \frac{M_g / P_g + M_o / P_o - M_k / P_k}{C_g \cdot M_g / \rho_g + C_o M_o / \rho_o + C_w \Phi} \quad (7)$$

## 2.2 数学模型分析

(7) 式表示的成烃增压数学模型揭示了该机制的本质。为了便于理解, 不妨假设当干酪根热解生成的天然气数量不足、全部溶解在石油和水中而不能形成游离气相, 这时 (7) 式中  $M_g$  为零, 成油增压数学模型成为:

$$\Delta P = \frac{M_o / \rho_o - M_k / \rho_k}{C_o \cdot M_o / \rho_o + C_w \cdot \Phi} \quad (8)$$

根据质量守恒原则, (8) 式中有  $M_o = M_k$ , 因此 (8) 式又可化简为:

$$\Delta P = \frac{\rho_k - \rho_o}{\rho_k (C_o + C_w \Phi \frac{\rho_o}{M_o})} \quad (9)$$

(9) 式清楚地表明:

(1) 干酪根与所生成的烃类密度差值 ( $\rho_k - \rho_o$ ) 越大, 则产生的增压越大, 说明增压是由体积膨胀造成的。

(2) 生烃强度 ( $M_o$ ) (单位体积烃源岩所生成的烃类的质量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 越大, 则产生的增压越大, 说明成烃增压大小取决于生烃的多少。

(3) 孔隙度越小, 则产生的增压越大。说明烃源岩越致密, 成烃增压越显著。

(4) 若假设当干酪根热解生成的石油数量不多、溶解于天然气和水中后不能形成游离油相, 则 (9) 式中  $M_o$ 、 $\rho_o$  分别可由  $M_g$ 、 $\rho_g$  代替。由于  $\rho_g$  比  $\rho_o$  更小, 可见干酪根生成气态烃时产生的增压更加显著。

事实上, 烃源岩在演化过程中不可能只生油不生气或只生气不生油, 常常是生成各种组成的石油、天然气包括凝析气的混合物。因此 (8)、(9) 式只用以分析, 不能用以计算, 实际模拟计算时必须应用 (7) 式。上述结论也正是 (7) 式所揭示的成烃增压机制的本质。

## 3 成烃增压数值模拟方法

### 3.1 模拟参数的确定

在建立上述成烃增压数学模型过程中, 我们做了一些必要的简化和假设, 因此在实际应用该数学模型进行模拟计算时, 应尽量满足这些简化与假设条件。

#### 3.1.1 采用迭代法求取流体压缩系数

在上述成烃增压数学模型中用到油、气、水的压缩系数 ( $C_o$ 、 $C_g$ 、 $C_w$ ), 而流体压缩系数的取值与压力有关。换言之, 计算  $C_o$ 、 $C_g$ 、 $C_w$  时需要用到流体压力, 而计算增压时又需要流体压缩系数, 因此两者都不能直接求得, 必须使用迭代法解决这个问题。

#### 3.1.2 关于温度变化问题

在建立上述成烃增压数学模型时使用了流体等温压缩系数的定义式, 而事实上成烃作用过程并不

是等温过程。为尽量满足等温压缩条件,在应用以上数学模型计算增压时必须使温度变化很小。我们的做法是将烃源岩成烃演化史划分为许多时段,每个时段取值为 0.01 至 0.5Ma。相应地,在每个时段内地温变化范围只有 0.05~2.0℃,基本上可视为等

温的。每个时段计算一次增压值。

### 3.1.3 其它模拟参数的取值

上述成烃增压数学模型还涉及到地下流体密度、源岩孔隙度、生烃强度等参数,这些参数都是随

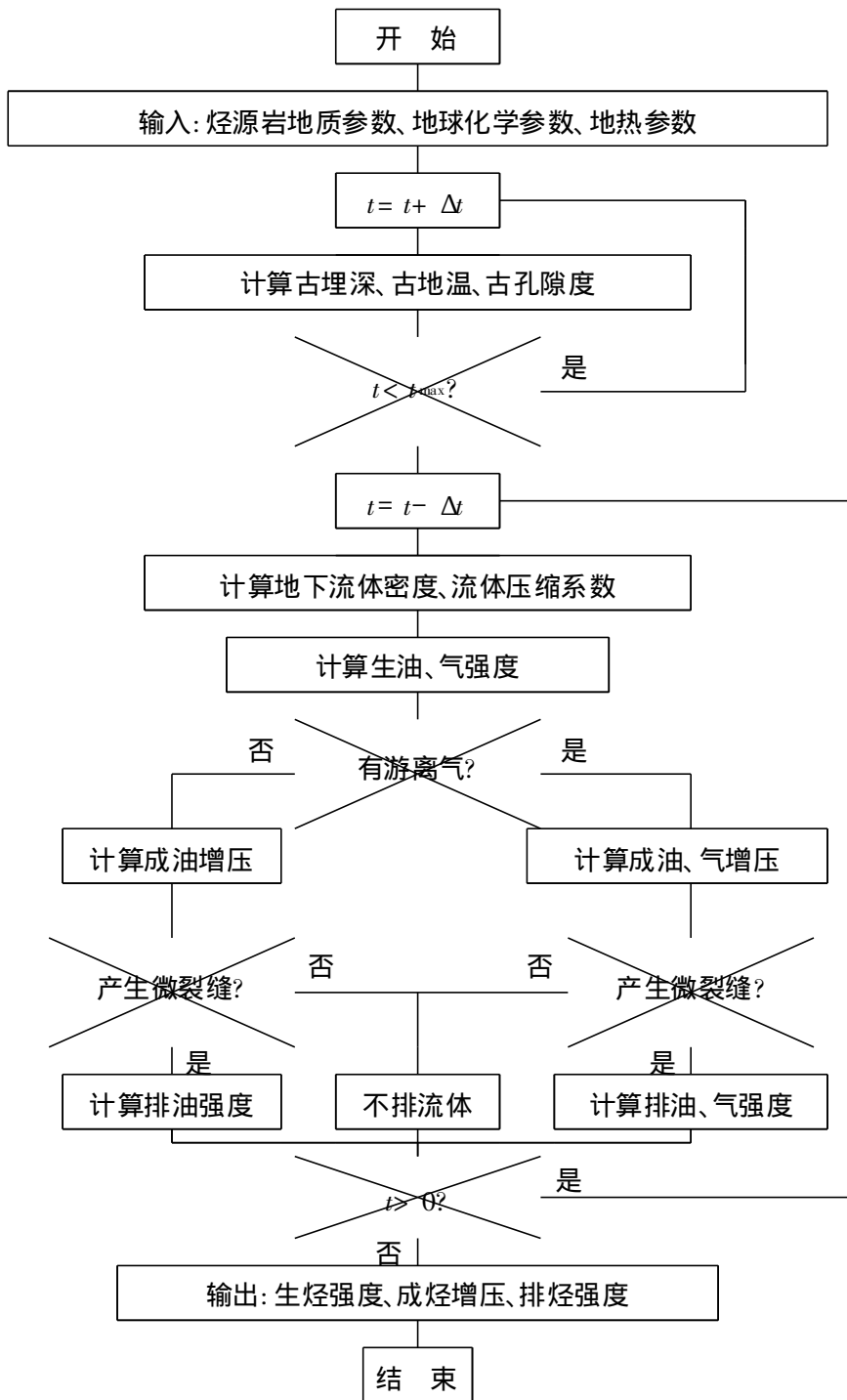


图 2 成烃增压、微裂缝排烃模拟程序框图

着烃源岩演化而不断变化的。例如, 地下流体密度是将地表流体密度折算到地层温度、压力条件下而获得的。烃源岩孔隙度的求取是通过埋藏史模拟进行的。生烃强度由烃源岩生烃史模拟结果提供。

### 3.2 模拟程序框图

成烃增压现象通常是伴随生排烃作用而发生的, 因此可以镶嵌在烃源岩演化与生排烃史模拟系统中进行。笔者已编制了烃源岩演化及生排烃史模拟的系统软件, 其中有关成烃增压、微裂缝排烃数值模拟的程序框图如图2所示。

### 3.3 应用实例

笔者已将上述方法应用于渤海湾盆地、松辽盆地、四川盆地、塔里木盆地、西藏伦坡拉盆地。模拟结果再现了各盆地主要烃源岩成烃增压史, 以及由此导致的微裂缝幕式排烃过程, 为油气成藏史和勘探目标分析提供了科学依据(徐思煌等, 1995; 徐思煌等, 1996; Xu Sihuang, 1997)。限于本文的篇幅, 在此不再重复叙述。

## 4 结论

通过上述分析, 可得出以下几点认识:

(1) 烃源岩中异常压力具有多种成因类型, 其中有机质成烃作用是重要增压机制之一。

(2) 成烃增压现象的本质原因是成熟烃源岩相当致密, 其内干酪根热解成烃时密度变轻、体积膨胀。

(3) 成烃增压的大小取决于烃源岩生烃强度、干酪根与烃类的密度差、烃源岩孔隙度等参数。

(4) 当烃源岩中流体压力大到足以使其产生微

裂缝时, 孔隙流体通过微裂缝排出。排液后压力释放, 微裂缝重新闭合。成烃增压是微裂缝幕式排烃的重要动力。

在研究过程中, 笔者同陈荣书、陶一川、张博全3位教授作过有益的探讨, 受到很大启示, 在此表示衷心的感谢!

### 参 考 文 献

- 1 李明诚. 石油与天然气运移. 北京: 石油工业出版社, 1987
- 2 费特尔. 异常地层压力——在油气资源勘探钻井和开采中的应用. 1976. 宋秀珍译. 北京: 石油工业出版社, 1982
- 3 真柄钦次. 压实与流体运移. 1978. 陈荷立等译. 北京: 石油工业出版社, 1981.
- 4 Hedberg H D. Methane generation and petroleum migration. AAPG Studies in Geology, No. 10, 1980
- 5 肖贤明等. 烃类生成的显微岩石学特征研究. 石油学报, 1993, 14(3): 30-36
- 6 Ungerer P. 根据地球化学资料对烃类生成时有机质总体积膨胀的试算——初次运移的内涵. 1981. 见黄第藩等译. 油气运移, 第1集. 北京: 石油工业出版社, 1988
- 7 陶一川. 异常地层压力, 数学模型分析与应用. 地球科学, 1992, 17(5): 571~579
- 8 徐思煌, 何生, 袁彩萍. 烃源岩演化与生、排烃史模拟模型及其应用. 地球科学, 1995, 20(3): 335~341
- 9 徐思煌, 梅廉夫, 邓四新. 西藏伦坡拉盆地烃源岩生、排烃史模拟. 地球科学, 1996, 21(2): 179~183
- 10 Xu Sihuang. Numerical simulation of histories of hydrocarbon generation and expulsion in several typical basins in China. Proc. 30th Int 'l Geol. Congr. Vol. 18 Part A. Z. C. Sun et al (Eds), VSP, 1997.

(收稿日期: 1997年7月10日)

(下转 271 页)