

# 构造应力场与油气运移

宋洪亮 徐守余 郑 丁

(中国石油大学地球资源与信息学院, 山东 东营 257061)

**摘 要** 应力是油田勘探中不可缺少的部分,因为它影响着油气运移,决定油气的成藏位置。从应力与流体势的关系及流体势与成藏位置的关系研究出发,通过现有资料约束,找出油气成藏的位置。

**关键词** 应力 运移 流体势 模拟

## 1 应力场研究概述

在油气运移过程中,应力作用是其中一个比较活跃、可控制全局的因素,因为引起地质环境、圈闭条件、应力状态改变的動力是构造应力场,所以,应力场与油气运移聚集之间存在必然的联系<sup>[1]</sup>。采用地震资料约束下的应力场模拟,模拟出流体的运移势,找出运移通道和存储位置。模拟出的应力场产生的岩层破裂情况可与之比较,若差别很大,就调节最大主应力的方向或方向重新模拟,直到两者达到最大拟合。对于现代油气运移和存储位置的模拟,也采用应力场模拟,并考虑温度场的影响,最终找到油气的存储位置。

现代构造应力场的室内岩心实验是建立在地质取心的基础上,主要有波速各向异性法、差应变测试法、测井资料分析及井壁崩落法。古构造应力场的测量包括位错密度法和凯塞效应法<sup>[2]</sup>。

## 2 构造应力场模拟

目前,最广泛使用的模拟方法是有限单元法。由于计算机性能的提高及理论的成熟,为使结果更加准确,采用三维有限单元法。有限单元法是近似求解一般连续介质问题的数值求解法,其基本思路是:将地质体离散成有限个单元,单元之间以节点相连,每个单元内赋予其实际的岩石力学参数。把求解研究区域内的连续场函数转化为求解有限个离散点处的场函数值<sup>[3]</sup>。

### 2.1 建立地质模型

搞清楚研究区域的地质背景,包括区域面积、

沉积相特征、生油期与生油区、运移期与运移区、断层分布及岩性类别。通过物探测井资料及一些地应力测点值,找出研究区域地层应力的优势方位和方向,了解剪应力大小及方向。另外,由于模拟是在连续介质中进行的,对于断层部位,用较小的杨氏模量值和剪切模量值来模拟。

### 2.2 模拟条件

①按照软件的规则来划分网格,可以采用五面体或六面体,对于断裂带,由于其变化剧烈,在划分单元时结点数应该有所增加,划分得更细些;②根据已有资料,判断主应力方向及大小,加上测点的约束确定应力边界条件;③由于选取的区域比实际有效油气区域大,通常在构造幅度小的地区确立区域边界,可以找到一些固定点,确定位移边界条件;④岩石力学参数的选取,如弹性模量、泊松比等,通常参照地质勘察、岩心及测井资料。

### 2.3 注意事项

要注意模型的收敛。如果模型不收敛,应不断细微地调整加载力的大小和分布,不能出现歧义点。另外,在进行现代应力场模拟后,两者一定存在某部分的相似,可以通过对比,验证模拟的正确性,如果差别很大,应该仔细检查模型及参数,甚至是修改模型参数,最终达到两者尽量相似。含油气盆地构造应力场研究的技术路线见图1。

收稿日期:2006-12-25。

作者简介:宋洪亮,男,1981年生,现为中国石油大学(华东)地质工程专业研究生,主要从事剩余油仿真模拟、应力场模拟及地震资料解释工作。电话:(0546)8392263, E-mail:hongliang805@163.com。

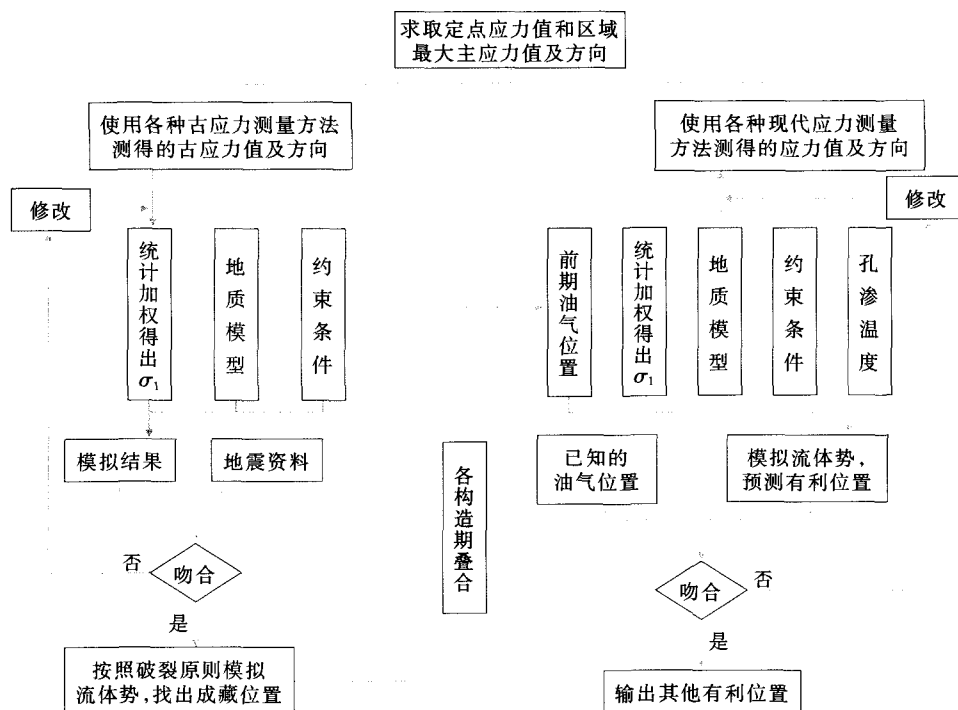


图 1 含油气盆地构造应力场研究技术路线

### 3 应力场推演流体势

依据流体力学、渗透力学观点及孙雄等的研究方法<sup>[4]</sup>,在渗透区采用微元六面体的方式研究。然而,地下介质中流体大多并不是单相,而是油水两相甚至油水气三相,所以在模型中流体采用油水两相介质模拟,则对于饱和流体而言,即

$$S_o + S_w = 1 \quad (1)$$

式中: $S_o$  为油相饱和度; $S_w$  为水相饱和度。

在  $\Delta t$  时间内,油流入和流出平行六面体的质量差为

$$\Delta Q_x + \Delta Q_y + \Delta Q_z = \left[ \frac{\partial(\rho_o v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_o v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_o v_z)}{\partial z} \right] L_x L_y L_z \Delta t \quad (2)$$

式中: $\Delta Q_x, \Delta Q_y, \Delta Q_z$  分别为  $\Delta t$  时间内沿坐标轴  $x, y, z$  方向流入流出的油的质量,kg; $\rho_o$  为油的密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $v_x, v_y, v_z$  分别是沿坐标轴  $x, y, z$  方向油的流速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $L_x, L_y, L_z$  分别为沿  $x, y, z$  轴长度的变化量。

根据质量守恒定律得

$$\left[ \frac{\partial(\rho_o v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_o v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_o v_z)}{\partial z} \right] L_x L_y L_z \Delta t = - \frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_o S_o L_x L_y L_z) \Delta t \quad (3)$$

式中: $\phi$  为介质孔隙度; $S_o$  为油相饱和度。

则

$$\begin{aligned} & - \frac{\partial(\rho \phi S_o L_x L_y L_z) / \partial t}{L_x L_y L_z} = \\ & - \left[ \rho_o S_o \frac{\partial \phi}{\partial t} + \phi S_o \frac{\partial \rho_o}{\partial t} + \rho_o \phi \frac{\partial S_o}{\partial t} + \right. \\ & \left. \frac{\rho_o S_o \phi}{L_x L_y L_z} \times \frac{\partial(L_x L_y L_z)}{\partial t} \right] \quad (4) \end{aligned}$$

一般情况下, $S_o$  随时间变化不大,可认为在某段时间内它是常数,则

$$\frac{\partial S_o}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

根据体积压缩系数的定义  $\beta = - \frac{1}{v} \cdot \frac{dv}{dp} =$

$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dp}$ , 则

$$\frac{\partial \rho_o}{\partial t} = \rho_o \beta \frac{\partial p}{\partial t} \quad (6)$$

由达西定律  $v = - \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r}$  及  $H = z + \frac{p}{\rho_o g}$  ( $H$  为油势), 并且应用体积压缩模量公式得<sup>[5]</sup>

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[ k_x (\sigma + \sigma_T) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k_y (\sigma + \sigma_T) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[ k_z (\sigma + \sigma_T) \frac{\partial H}{\partial z} \right] = - \frac{(1-2\mu)}{E} \cdot \end{aligned}$$

$$\frac{\partial(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z + \sigma_{Tx} + \sigma_{Ty} + \sigma_{Tz})}{\partial t} + \rho_o g S_o \phi \frac{\partial H}{\partial t} \quad (7)$$

式中:  $k_x(\sigma + \sigma_T)$ ,  $k_y(\sigma + \sigma_T)$ ,  $k_z(\sigma + \sigma_T)$  分别为沿坐标轴  $x, y, z$  方向的介质渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{Tx}, \sigma_{Ty}, \sigma_{Tz}$  分别为正应力和温度应力沿坐标轴  $x, y, z$  方向的分量;  $\mu$  为多孔介质的泊松比;  $E$  为弹性模量;  $p$  为所测压力值, MPa。

式(7)的初始条件和边界条件为

$$H(x, y, z, t)|_{t=0} = f_1(\sigma + \sigma_T) \quad (8)$$

$$H(x, y, z, t)|_{s_1} = f_2(\sigma + \sigma_T) \quad (9)$$

$$\partial H / \partial \phi|_{s_2} = f_3(\sigma + \sigma_T) \quad (10)$$

## 4 应用实例

渤海湾盆地是华北板块内的反“S”形中新生代叠加复合盆地。盆地南北两端较窄, 中间较宽, 总体上呈菱形。盆地内部发育 2 组基底断裂, 断裂系统控制着盆地内 7 个坳陷, 坳陷之间有 4 个隆起间隔, 总体构成“东西分带、南北分块”的格局<sup>[6]</sup>。该盆地主要构造运动期可分为海西末期(P2)、印支末期(T3)、燕山早期(J1+2)、燕山中期(J3+K1)、燕山末期(K2)、喜山 I 期(Es)及喜山 II 期(Nm)。各期采用不同的地质模型和数学模型进行模拟(见图 2、图 3)。图 3 中红色部分为已知含油气区, 淡蓝色部分为预测的有利含油气区域。

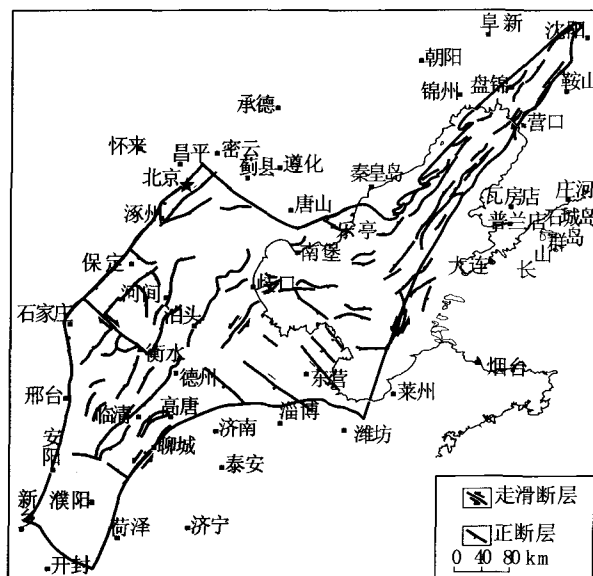


图 2 喜山 II 期(Nm)地质模型  
(据吴智平)

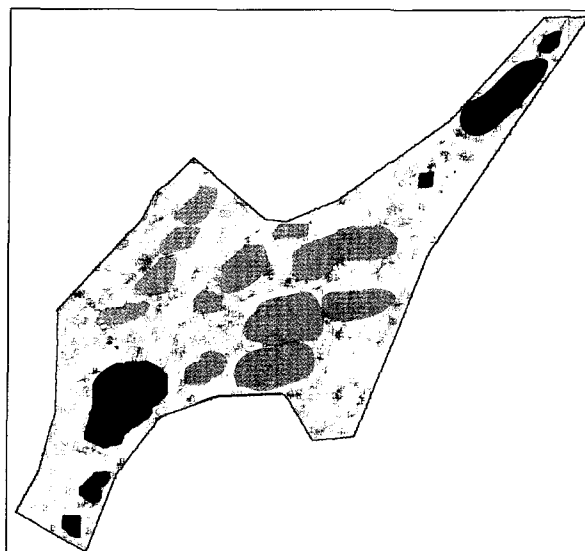


图 3 喜山 II 期预测的有利含油气区

## 5 结论

- (1) 对于古构造应力场的模拟, 通过地震资料约束(层层剥离)可以提高模拟的精度。
- (2) 在应力场模拟中应考虑温度的影响, 特别是对于成藏期, 若进行更精确的模拟需要进一步探索。
- (3) 通过已知油区位置来约束并预测未知油区, 该方法是切实可行的。

## 参 考 文 献

- [1] 张明利, 谭成轩. 东海西湖凹陷应力场数值模拟及其应用研究[J]. 地质力学学报, 2002, 8(3): 229-238.
- [2] 靳保军, 许星, 唐汝众, 等. 史深 100 地区现代构造应力场研究与应用[J]. 油气采收率技术, 1999, 6(4): 41-43.
- [3] 王连捷, 王红才, 王薇, 等. 油田三维构造应力场、裂缝与油气运移[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 4 053 - 4 054.
- [4] 孙雄, 洪汉净. 构造应力场对油气运移的影响[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(1): 1-3.
- [5] 孙雄, 洪汉净, 马宗晋. 构造应力作用下流体运动的动力学分析: 构造流体动力学[J]. 地球学报, 1998, 19(2): 150-157.
- [6] 何斌. 渤海湾复式盆地地动力学探讨[J]. 石油实验地质, 2001, 21(1): 27-30.

(编辑 姬美兰)