

# 温度场与压力场动态耦合下的沉积盆地热史模拟

吴春发, 李 星

(中国地质大学, 武汉 430074)

**摘 要:**盆地热史模拟是盆地模拟的重要组成部分,也是实现盆地整体模拟的基础。温度和压力是烃类形成的两个主要控制因素,在沉积盆地中温度场与压力场之间存在着复杂的相互制约机制。本文就从油气成藏动力学和盆地流体动力学的角度对盆地热流体运移下的温度场与压力场动态耦合关系进行了探讨,并建立了耦合下的温度控制方程。该方程不仅可以运用于沉积盆地热史模拟,推进盆地模拟技术的发展;还可以运用于金属成矿动力模拟,推动金属成矿动力模拟发展和提高成矿预测的精度等其他方面。

**关键词:**温度场;压力场;动态耦合;沉积盆地;热史模拟

中图分类号:P588.2

文献标识码:A

文章编号:1007-6956(2004)04-0245-04

## 1 热史研究现状及其存在问题

盆地的热演化史(简称热史)是指盆地形成至今的地热流史、地温史和地温梯度史。研究盆地热演化史就是要研究盆地内各沉积层序的地温随时间的演化关系,最后得到沉积层序的地质年代(时间)—岩层温度关系,或时间—温度—埋深关系的结果,并用数值或图解表示表示出来<sup>[1]</sup>。热史模拟是盆地模拟系统中的关键子系统之一,它为烃的生、排、运、聚等模拟提供温度场,其精度直接影响有机质演化模拟的精度。

温度是烃类形成的主要控制因素,只有弄清盆地内各生烃层序(富含有机质岩层)所经历的地温历史才能有效地评价成烃过程和计算产烃潜力。同时,盆地热史对于研究盆地的成因机制和地球动力学具有重要意义。另外,盆地热史研究还与地热能开发与热液作用有关的矿床密切相关,所以盆地热史研究一直受到有关的地学工作者,尤其是石油地质工作者的高度重视<sup>[1]</sup>。最近 20 多年来,国外许多学者在热史研究领域做了大量研究工作,并取得了一定进展。如德国、法国、美国、英国、日本等国家相继在计算机上建立了规模不等的盆地数值模拟系

统<sup>[2]</sup>,在各盆地模拟系统中热史模拟也采用不尽相同的热史模型和技术方法,如 1984 年法国石油研究院建立了一个较完整的二维盆地模拟系统。该系统通过地球动力学方法,利用地震折射数据和当今热流实测值求出热流史,利用岩性资料和岩石热导率求出地温史。我国盆地热史模拟技术主要是吸收国外先进技术,自主开发出的软件系统热模型种类较少。但也不乏有一些针对我国特定的复杂石油地质条件下的创新,如吴冲龙教授<sup>[3]</sup>等人提出将正常地热场与附加地热场分析相结合,提出了多热源、多期次叠加的思路与方法,并建立了盆地地热场的分层模型。

当前热史模拟对象多限于由地幔热流引起的正常地热场,相关技术主要用于描述盆地正常地热场中的热传导问题,较少涉及温度场、压力场的动态耦合研究和特别是有机质演化的耦合模拟。虽然也有李星等人做了初步研究,并探讨了油气成藏作用的温度场、压力场动态耦合概念模型和方法模型的建造;但是,在与盆地流体运移相关的温度场、压力场动态耦合方面,仅仅做了理论上的探讨。如何具体地建立描述油气成藏作用的温度场、压力场动态耦合模型问题,仍然没有得到很好解决。

收稿日期:2004-03-12;改回日期:2004-06-10

基金项目:国土资源部矿产资源定量预测及勘察评价开放研究实验室研究基金项目(MGMR2000-18)

作者简介:吴春发(1978-),男,安徽省池州市人,1999年毕业于中国地质大学(武汉),获学士学位,现为该院在读硕士生,主要从事盆地模拟研究、三维模拟软件开发和地质灾害防治研究,本文是硕士论文的部分研究成果。

沉积盆地中温度场与压力场动态耦合研究不仅可以提高热史模拟的真实程度和质量,推进油气成藏动力学研究和盆地模拟技术的发展;也可以为地热模拟和地热资源勘探开发研究提供技术支持和经验,促进地热资源勘探与开发利用。除此之外,还可以为金属成矿动力学提供参考,推动金属成矿动力模拟发展和提高成矿预测的精度。

## 2 地层压力场布局与盆地流体运移的关系

在盆地数值模拟时,通常把盆地看作由地层骨架和孔隙流体两部分构成,盆地流体流动的基本原则是降低其能量,改变地热场的分布格局,所以总是从高势区流向低势区。盆地流体运移由两种因素所致,一是压力驱动,形成压力流;二是热驱动,形成热对流;前者是主要驱动力。形成压力流最重要的驱动力包括:沉积压实、浮力、地形重力和构造应力及地震作用等。地层压力是指作用于地层孔隙空间的流体压力<sup>[4]</sup>,地层压力场的分布格局主要受地层的侵蚀卸载和沉积加载作用、油气的运移作用、区域水动力场的形成、演化、水化作用、地温场的布局 and 变化等因素的影响。

沉积盆地的地层压力有静水压力和超压两部分构成,因此,对非超压层仅计算静水压力史,对超压层计算动水压力史,即静水压力史加超压史。如果把非超压层当作  $P_a = 0$  的一种特殊情况,就可以对任何地层都施行超压计算。所以,地层压力  $P$  可表示为

$$P = 10^{-6} p_f \left[ 1 - \frac{1}{2} \alpha_T (T - T_s) gH + P_a \right] \quad (1)$$

式中:  $P$ —地层压力,  $atm$ ;  $p_f$ —孔隙流体的地表密度,  $g/cm^3$ , 可取  $1.004$ ;  $\alpha_T$ —流体受热膨胀系数,  $^{-1}$ , 可取为  $5 \times 10^{-4}$ ;  $g$ —重力加速度,  $cm/s^2$ , 可取  $981$ ;  $H$ —该层的上覆盖沉积物的厚度,  $cm$ ;  $T$ —地层中点的温度,  $^{\circ}C$ ;  $T_s$ —地表温度,  $^{\circ}C$ ;  $P_a$ —地层超压,  $atm$ 。

在进行油气盆地数值模拟时,计算盆地流体流速时需要知道孔隙介质两端的压差,可以通过地层压力场的分布格局求得。在不考虑温度场的地温梯度对盆地流体运移的影响时,沉积盆地内各沉积层序内盆地流体流速与地层压

力场布局间的关系方程可根据达西定律法推导出,其在一维形式下的方程可表达如下<sup>[2]</sup>:

$$v = - \frac{k}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (2)$$

式中:  $v$ —盆地流体的流速,  $cm/s$ ;  $q$ —流体的流量,  $cm^3/s$ ;  $A$ —孔隙介质的截面积,  $cm^2$ ;  $k$ —孔隙介质的渗透率,  $D$ ;  $P$ —孔隙介质两端的压差(流出端的压力减去流入端的压力),  $atm$ ;  $\mu$ —盆地流体的粘度,  $cP$ ;  $L$ —孔隙介质的长度,  $cm$ 。

在二维情况下的盆地流体流速与温度场的关系与一维的原理相同,只是要考虑的因素更多,可以从一维的方程(2)推导出其二维形式,具体公式如下:

$$\left. \begin{aligned} x &= - \frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \\ z &= - \frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $x$ —盆地流体沿水平方向的流速分量,  $cm/s$ ;  $z$ —盆地流体沿垂直方向的流速分量,  $cm/s$ 。

## 3 盆地流体的运移对温度场的影响

在油气盆地中因为各地温度和热流不尽相同,故在盆地流体的运移过程中必伴随着热量的转移,热量的转移将导致该区的温度场布局的改变。温度场中温度梯度和多孔介质的存在,导致盆地流体在空间上流动,其运动速度与温度梯度成正比。盆地流体的运移增强了热对流活动对温度场的影响,所以在盆地热史模拟中建立热流方程时需要同时考虑热传导和热对流两种方式。综合考虑热传导和热对流两种方式的温度控制方程形式较多,在这里参考 Yukler、Welt 等人提出的在一维情况下的热流方程<sup>[5,6]</sup>,结合常规的温度控制方程,可以推导出在盆地流体运移情况下的温度控制方程,其二维形式可以表示如下:

$$\begin{aligned} & 10^{-4} \frac{\partial T}{\partial x} \left( K_r \frac{\partial T}{\partial x} \right) - 10^4 f_{cf} \frac{\partial}{\partial x} (v_x T) + 10^{-4} \frac{\partial T}{\partial z} \\ & \left( K_r \frac{\partial T}{\partial z} \right) - 10^4 f_{cf} \frac{\partial}{\partial z} (v_z T) + 10^{-4} q_{sh} \\ & = 10^6 c [ \rho_s (1 - \phi) + \phi \rho_f ] \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4) \end{aligned}$$

式中:  $T$ —地温场的温度,  $^{\circ}C$ ;  $x, z$ —以盆地基底

为原点直至地表的水平和垂直坐标,  $m$ ;  $t$ —时间,  $s$ ;  $K_f$ —地下孔隙介质的热导率,  $\mu cal/(cm \cdot s \cdot ^\circ C)$ ;  $\rho_f$ —盆地流体的密度,  $g/cm^3$ ;  $\rho_s$ —盆地骨架的密度,  $g/cm^3$ ,  $c$ —孔隙介质比热容,  $cal/(g \cdot ^\circ C)$ ;  $c_f$ —盆地流体的比热容,  $cal/(g \cdot ^\circ C)$ ;  $q_{sh}$ —单位微元体内的热源强度,  $\mu cal/(cm^3 \cdot s)$ ;  $\alpha$ —盆地中某一层的孔隙度(小数);  $v_x, v_z$ —盆地流体沿坐标方向的速度分量,  $cm/s$ 。

### 4 温度场与压力场的制约机制及其耦合下的温度控制方程

沉积盆地中温度场与压力场都是盆地流体动力场的一部分,二者之间存在着密切关系。许多地质过程中的地层异常压力都与温度有关,其中有<sup>[7]</sup>: 水热增压作用(Barker, 1972)、蒙脱石转化作用(Burst 等, 1969)、有机变质作用(Momper, 1978; du Rouchet, 1978、1981)、相态变化(Heard 和 Rubey, 1966; Raleigh 和 Paterson, 1965)、深熔作用(局部熔化)(Gretener, 1969)。盆地中由于沉积、剥蚀、压实作用及盆地流体的运聚等作用的影响而造成盆地压力场动态变化,形成新的压差;而压差又直接决定盆地流体的运移速度,流体的运移过程中伴随有热量的传递,热量的传递必然导致盆地温度场的动态变化;温度场的变化使盆地流体体积和密度随之变化,从而导致压力变化。总之,盆地中温度场与压力场间存在着动态的复杂的制约关系。

通过将上述的方程(3)和方程(4)的联立消除流体流速这一项,就可以得到温度场与压力场间动态耦合关系方程,方程如下:

$$10^{-4} K_f \left( \frac{\partial^2 T}{\alpha^2} + \frac{\partial^2 T}{\alpha^2} \right) + 10^4 \rho_f c_f T \frac{k}{\mu} \left( \frac{\partial^2 P}{\alpha^2} + \frac{\partial^2 P}{\alpha^2} \right) + 10^4 \rho_f c_f \frac{k}{\mu} \left( \frac{\partial P}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\alpha} + \frac{\partial P}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\alpha} \right) + 10^{-4} q_{sh} = 10^6 c [ \rho_s (1 - \alpha) + \rho_f ] \frac{\partial T}{\alpha} \quad (5)$$

式中各变量所代表的意义及其单位与上文所述相同。地层压力方程的计算公式中,虽然地层的上覆沉积物的厚度也是个变量,但它主要受时间和沉积剥蚀速率影响,而受坐标位置影响较小,在此不作讨论。

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\alpha} = - \frac{1}{2} \times 10^{-6} \rho_{f_0} \tau g H \frac{\partial T}{\alpha}, \\ \frac{\partial^2 P}{\alpha^2} = - \frac{1}{2} \times 10^{-6} \rho_{f_0} \tau g H \frac{\partial^2 T}{\alpha^2}; \\ \frac{\partial P}{\alpha} = - \frac{1}{2} \times 10^{-6} \rho_{f_0} \tau g H \frac{\partial T}{\alpha}, \\ \frac{\partial^2 P}{\alpha^2} = - \frac{1}{2} \times 10^{-6} \rho_{f_0} \tau g H \frac{\partial^2 T}{\alpha^2} \end{cases} \quad (6)$$

因为盆地内流体可近似看作不可压缩的无源流体,其速度场边可近似看作无源场,即

$$\frac{\partial v_x}{\alpha} + \frac{\partial v_z}{\alpha} = 0$$

将(3)和(6)式代入,并精简可得到:

$$\frac{\partial^2 T}{\alpha^2} + \frac{\partial^2 T}{\alpha^2} = 0 \quad (7)$$

将(6)和(7)式代入上述(5)式中得到:

$$10^{12} c [ \rho_s (1 - \alpha) + \rho_f ] \frac{\partial T}{\alpha} + 2.5 \rho_{f_0} c_f g H \frac{k}{\mu} \left[ \left( \frac{\partial T}{\alpha} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\alpha} \right)^2 \right] = 10^2 q_{sh} \quad (8)$$

式中各变量所代表的意义及其单位与上文所述相同。不同类型的沉积盆地和不同的地史模型都会有不同的边界条件,这里不作详细讨论。

温度和压力条件是制约沉积盆地有机质演化的两个主要地质条件,对沉积盆地热史模拟中的温度场与压力场进行耦合模拟研究可以提高热史模拟的精度,而热史中的地温史是烃类成熟度的最重要因素,其精度直接影响盆地数值模拟的生烃史、排烃史和运移聚集史等三个子模型的精度,故在沉积盆地热史模拟和石油地质研究时,研究地下热流体运移下的温度场与压力场耦合十分必要。

### 5 讨论

本文中对温度场与压力场的动态耦合研究仅考虑了盆地流体流速这一个因素,因此推导出的方程忽略了温度场与压力场中其它因素的影响,虽然通常情况对耦合研究影响可以忽略不计,但在某些异常带的研究中可能会出现较大的误差,还需进一步深入研究。文中建立了在温度场与压力场动态耦合下的温度控制方程中的参数较多,特别是沉积盆地中的水文参数较多,而当前石油研究中往往缺少该方面的资

料,会给方程的应用研究带来某些困难。

#### 参考文献:

- [1]王璞,刘万洙,王东坡. 沉积盆地热史研究方法[J]. 世界地质, 1994, 13(3): 114-119.
- [2]石广仁. 油气盆地数值模拟方法(第二版)[M]. 北京:石油工业出版社, 1999: 3-138.
- [3]吴冲龙,李星,刘刚,等. 盆地地热场模拟的若干问题探讨[J]. 石油实验地质, 1999, 21(1): 1-7.
- [4]楼章华,曾允孚,高瑞祺,等. 扶扬油层地层压力场成因[J]. 石油实验地质, 1995, 17(1): 42-46.
- [5]Yukler M A, C Cornford, D. H. Welte. One-dimensional model to simulate geologic, Hydrodynamic development of a sedimentary basin [J]. Geol. Rundschau, 1978, 67: 960-979.
- [6]Welte D H, M A Yukler. Petroleum origin and accumulation in basin evolution—a quantitative model [J]. AAPG Bulletin, 1981, 65: 1387-1396.
- [7]P. E. 格雷泰纳. 地热学在油气勘探中的应用[M]. 北京:石油工业出版社, 1987: 51-52.

## Geothermal History Simulation of Sediment Basins Under Dynamic Coupling on the Pressure and Temperature Field

WU Chun fa, LI Xing

(China University of Geosciences, Wuhan 430074)

**Abstract:** Geothermal history simulation of sediment basins is an important segment and the base of basins simulation. Temperature and pressure are two major control factors of hydrocarbon generation. The relation between pressure field and temperature field is very complicated in sediment basins. But the current geothermal history model and their formula almost regard them as two absolutely independent factors, so the result of simulation always exists errors and directly influence its facticity. In this paper, the authors discuss the dynamic coupling relations between them on the condition of basin fluid migration from dynamics of petroleum accumulation and dynamics of basin fluid, and bring forward temperature control equation of sediment basins under their coupling equation. The control equation could be used in geothermal history simulation of sediment basins and promotes the development of basin simulation technology. It can also be used in metal mineralization dynamical simulation, and increases the precision of mineralization forecast.

**Key words:** temperature field; pressure field; dynamic coupling; sedimentary basin; geothermal history simulation