

文章编号:0253-9985(2012)05-0661-09

考虑压力作用的镜质体反射率动力学模型

周波,云金表

(中国石化石油勘探开发研究院,北京100083)

摘要:根据现有的实验资料和钻井数据,认为压力对有机质演化过程的影响不能用统一模型来概括,必须区别对待。当地层处于正常压力条件下,有机化学反应符合一级反应动力学原理。当地层处于超压条件下,这时的地层可以看作一个半封闭体系,有机质生成的烃类不能被及时地排出,随着生成物浓度的增大,最终化学反应达到平衡。这时,压力对有机质演化程度的影响是通过影响化学平衡的移动而实现的,并不改变化学反应的频率因子。因此,超压条件下的有机质演化模型反应了温度和压力对化学平衡移动影响的结果。故影响有机质演化的仍然是压力本身,并不是超压,超压只是提供了一个半封闭的化学反应系统,而压力通过对系统中化学平衡移动的控制来影响有机质的热演化过程。将上述模型用于实际含油气盆地中,模拟单井中的有机质演化规律,并和实测的有机质成熟度数据进行比较发现,文中提出的模型的模拟结果和实际有机质演化结果相一致,说明了该模型可以用于实际盆地中有机质演化规律的预测。

关键词:压力;温度;化学平衡;镜质体反射率;有机质热演化模型

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

A vitrinite reflectance kinetic model with the effect of pressure integrated

Zhou Bo and Yun Jinbiao

(Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Available lab and drilling data reveal that the effect of pressure upon the evolution of organic matter could not be fully described with a general model. In formations under normal pressure, organic chemical reactions follow the first-order reaction kinetics. In contrast, formations under overpressure act as semi-closed systems, in which the hydrocarbons generated from organic matter could not be expelled in time and a chemical equilibrium is eventually reached when the amount of reaction product increases to a critical state. The pressure exerts its influence upon the evolution of organic matter through affecting the shifting of chemical equilibrium instead of changing the frequency factor of the chemical reaction. Therefore, organic matter evolution under overpressure is the result of temperature and pressure affecting the shift of chemical equilibrium. What can be derived from this observation is that it is pressure itself that does the works not the overpressure. What the overpressure does is to provide a semi-closed system for chemical reactions. Formation pressure controls the shift of chemical equilibrium to manipulate the thermal evolution of organic matters. The new model then was applied to actual petroliferous basins to simulate the evolution pattern of organic matter in a single well. A comparison of the modeled results with the real maturity data reveals that the model matches well with the real evolution of organic matter, confirming the effectiveness of the model.

Key words: pressure, temperature, chemical equilibrium, vitrinite reflectance, thermal evolution model of organic matter

超压是指地层压力大于(或小于)静水压力。在沉积盆地超压是普遍存在的^[1-5],并且世界上很

收稿日期:2012-03-10;修订日期:2012-09-10。

第一作者简介:周波(1967—),男,博士、高级工程师,油气成藏。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05005-001-003)。

多含油气盆地的油气都存在于超压地层之中。超压对有机质的成熟度和生烃过程的影响一直都是人们研究的热点,围绕该问题,人们开展了大量的实验,但实验结果互相矛盾。有些实验结果证明压力促进了有机质的成熟^[6-12],而有些结果则证明压力抑制了有机质的成熟^[13-19]。在实际盆地中,情况类似,从钻井数据来看,在有些盆地中,压力对有机质的成熟度无明显作用,而另外一些研究者则认为压力抑制有机质的成熟^[19]。很显然,无论是在实验室还是在实际盆地中,超压对有机质演化的影响都存在矛盾的结果。

在石油勘探过程中,为了描述有机质成熟演化过程,勘探家们建立了许多地质模型。其中,最常用的是1971年原苏联学者 H. B. Jonahtn 首次提出的时间-温度指数概念,美国学者 Waples^[20]于1980年正式系统的介绍了这一方法,并称作 TTI 模型,随后很多人都用该模型来预测有机质演化程度。

在 TTI 模型中,时间和温度是控制沉积盆地中烃源岩成熟的两个重要指标,并且和成熟度指标(镜质体反射率)联系起来。然而通过研究发现,除时间和温度两个参数外,压力对有机质演化有一定的影响,因此,如果有机质演化模型中不考虑压力就不可能正确描述有机质演化过程。Dalla^[17]等人根据实验室结果提出新的模型,将压力并入有机质演化模型,认为只要存在压力,有机质演化就会受到影响。

事实上,在实际地质条件下,根据研究者的数据统计^[21],只有存在超压的情况下有机质的生烃作用才受到影响,在静水压力梯度下,压力并不影响有机质演化。因此,Dalla^[17]的模型显然不能直接用于实际地质条件。Carr^[22]等人收集了世界各地不同盆地的实际地质资料,并且从生烃动力学角度出发,将 Dalla^[17]等人提出的模型中的压力替换为剩余压力(地层压力减去静水压力),新模型获得的预测数据和实际数据更接近。

但是,超压影响下的有机质演化曲线表明^[21],超压在有些情况下完全抑制了有机质的演化,有机质的成熟度随着深度的增加保持不变,为常数。这一结果不论用原来的 TTI 模型、Dalla 的模型或者 Carr 的模型都无法解释。

本文从化学反应的基本原理出发,分析压力对有机反应的化学反应动力学原理,建立新的有机质演化地质模型,并和实际的盆地数据进行了

对比,从理论和实际两个方面的数据来验证模型的有效性。

1 超压在有机质演化中的作用

沉积盆地中,压力对有机质演化的影响是毋庸置疑的,前人曾经对不同盆地压力影响有机质演化的特例做过深入研究^[21-22]。本文中,作者分别选择两个盆地中两口典型井来进行分析。通过对不同盆地中有机质演化随压力的变化曲线图,分析压力在有机质演化中的作用。

由于镜质体反射率被认为是有机质热演化的最有效指标,且实际上是大多数学者研究压力/超压在有机质热演化中作用的主要参数甚至唯一参数。故此,本文在考虑压力/超压对有机质热演化的影响时,主要以镜质体反射率作为描述有机质热演化的指标。

1.1 莺歌海盆地有机质演化特征

莺歌海盆地位于海南岛与中南半岛之间,是南海北部边缘地区的重要组成部分。面积 $7.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地总体呈一不规则的菱形,走向北西,在板块构造位置上处于欧亚板块东南缘、太平洋板块和印度-澳大利亚板块交汇地带,是在古印支板块和欧亚板块拼接的红河断裂带上发育起来的一个新生代盆地。盆地内充填了巨厚的新生代地层,最大厚度可达 17 km。盆地的发育演化有两个突出的特点:①快速沉降和快速充填,其中新近系厚逾 10 000 m,尤其是上新世至第四纪(5.2 Ma)以来,盆地快速沉积巨厚的以泥岩为主的海相地层,厚度一般大于 4 000 m,沉积速率多在 700 m/Ma 以上;②盆地属高温高压型盆地,盆地中央底辟带地温梯度高,为 $43.6 \sim 49.8 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ 。LD-30-1-1 井位于莺歌海盆地东部。

如图 1^[21]所示,LD-30-1-1 井随深度增大,有机质演化系统被分为 3 个系统,3 300 m 以上为正常压力系统;3 300~3 900 m 为中部超压系统;3 900 m 以下为深部强超压系统(图 1a)。在正常压力系统下,镜质体反射率(R_o)和热解峰温($T_{\max}$)随埋藏深度增大而增大,二者反映的成熟度相吻合, R_o 的变化和深度呈指数关系。在中部超压系统下,有机质热演化出现明显的异常,中部超压系统的热解峰温(图 1e)和镜质体反射率(图 1f)

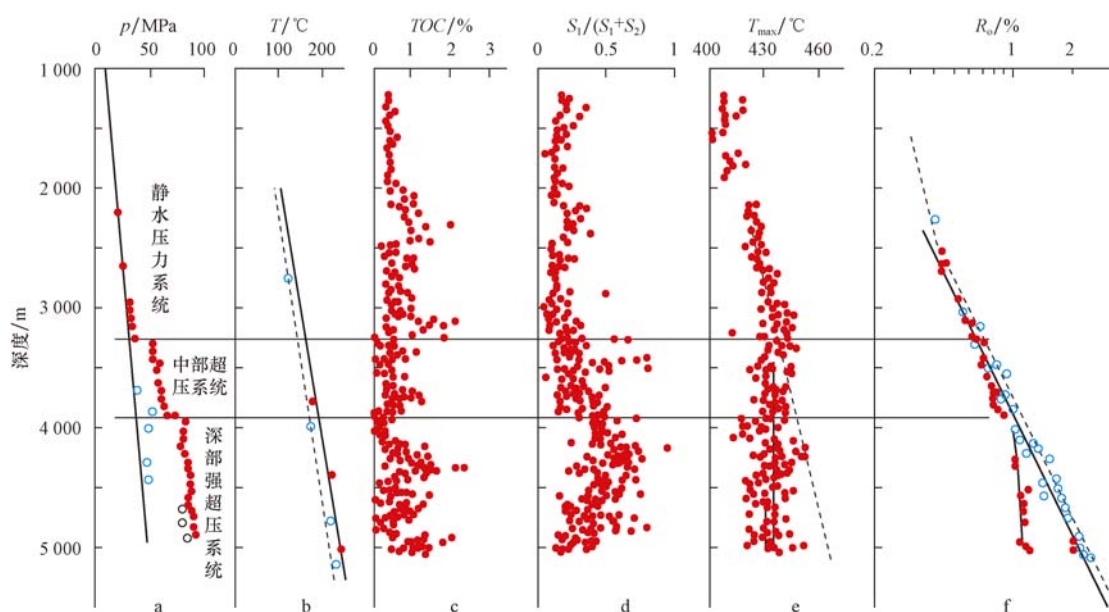


图1 莺歌海盆地地层温度、压力和有机质热演化剖面

Fig. 1 Temperature, pressure and thermal evolution profile of organic matter in the Yinggehai Basin

● LD30-1-1; ○ YA19-1-1; --- 计算值; — 预测值

均明显偏离了静水压力系统的正常演化趋势,但异常值和正常压力系统有机质演化趋势线的差异不大。而到了深部强超压系统有机质演化出现强烈异常,超压系统的热解峰温(图1e)和镜质体反射率(图1f)都大大偏离了静水压力系统的正常演化趋势,其中,镜质体反射率(图1f)变化较大,出现异常低值。

1.2 准噶尔盆地有机质演化特征

准噶尔盆地作为北疆地区最大的含油气盆地,周边分别受北天山造山带、西准噶尔造山带和克拉美丽造山带的围限,经历了复杂的形成、演化,盆地沉积地层有石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系,地层沉积最大厚度在15 000 m以上。根据盆地地层上、下之间的接触关系和构造变形特征分为石炭系、二叠系-三叠系、侏罗系-白垩系和新生界四大构造层系。

图2为准噶尔盆地盆4井的有机质演化与深度的关系图。图中,有机质演化被分为两部分,其中,深度4 500 m上部的地层压力为正常压力段,下部为异常压力段。在正常压力阶段随着深度的增加, R_o 值增加,并且深度和 R_o 之间存在指数关系。而当有机质演化进入超压地层时,有机质演化明显受到影响, R_o 值为低异常,并近似为常数。

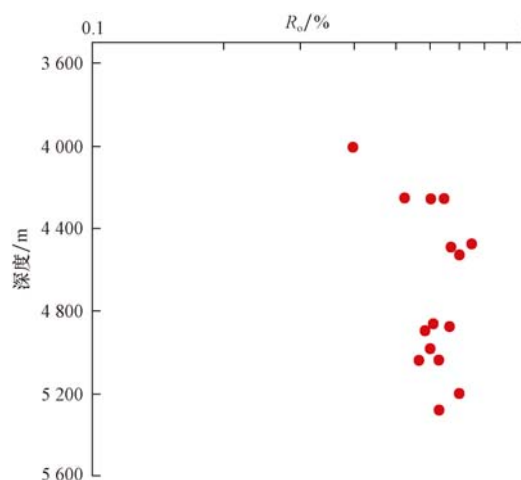


图2 准噶尔盆地盆4井镜质体反射率与深度关系

Fig. 2 Vitrinite reflectance vs. depth from the well

Peng-4 in the Junggar Basin

2 压力影响有机质演化的化学反应动力学原理

在考虑压力影响有机质生烃过程的基本动力学原理时,存在3种不同的认识。Canon^[18]等人认为,有机质演化过程符合一级反应方程,化学反应频率因子为常数,有机质演化程度只与温度和时间有关,和压力无关。该认识的前提是,化学反应为一级反应,且化学反应未达到反应平衡。Dalla^[17]等人认为,在有机质演化的过程中,压力的变

化会影响化学反应的频率因子,控制化学反应的进行,最终影响有机质的演化。该认识的前提是,有机质反应物的频率因子会随压力发生变化,并且化学反应为一级反应,化学反应未达到反应平衡。郝芳^[21]等人以 Le Chatellier 原理作为有机质演化的理论基础,认为当压力增加时,有机化学反应朝着反应体积减小的方向进行。该认识的前提是,化学反应必须达到反应平衡。

产生上面3种不同意见的原因是其对有机质生烃过程的基本反应动力学原理和有机化学反应所处的状态认识不一。因此,有必要认真分析实际地质条件,认清化学反应的反应状态,选择合适的反应动力学原理。首先,本文对不同地质条件下的有机质演化的过程进行分析。

如果地层处于正常压力系统下,地层中的流体相互连通,虽然地层压力随着深度的增加而增加,但是,化学反应体系属于开放系统,反应生成物(无论是液态烃还是气态烃)会及时地逸出,生成物浓度近乎等于零,该条件符合化学反应一级反应动力学原理。由于 Canon 和 Dalla 二人的结论都是建立在化学反应一级反应动力学原理基础上,因此其正常压力条件下有机质生烃过程的反应动力学原理同时符合上述反应原理,二者的差异仅在于压力是否会影响有机反应的频率因子。根据图2的数据,郝芳和 Carr 等人进行了数学模拟,发现正常地层压力条件下,有机质演化只受时间和温度的影响。因此,在正常地层压力条件下,压力应该不影响频率因子。这时候,应用 TTI 模型^[15]或者 EasyR_o 模型^[23-24]都可以较好地模拟有机质的热演化过程。

如果地层处于异常压力(超高压)系统下,这时,超高压部分的地层相当于一个半封闭体系(只有能量交换,没有物质交换)。根据 Tissot^[25]等人的研究,有机质生烃过程分为成岩作用阶段、深成作用阶段和后生作用3个阶段。在成岩作用阶段,有机质生烃过程主要由于细菌等的生物降解作用而发生,主要的产物为甲烷;在深成作用阶段,由于粘土矿物的催化作用和温度的增加,有机质由长链烃类裂解为小分子的烃类,生成产物包括石油和湿气;在后生作用阶段,随着温度的进一步提高,已经形成的液态烃和重质气态烃强烈的裂解,变成热力学上最稳定的甲烷。从上面的3个阶段可以看出,早期的成岩作用阶段,烃类的生

成是生物活动的结果,所以只要有生物(细菌)的存在,就可以生成烃类,压力和生烃过程没有直接关系。当生烃作用开始进入后面两个阶段的时候,无论是大的液态烃分子裂解为小的液态烃分子,还是其裂解为气态烃,体系的烃类摩尔数会随着反应的进行而增加。在超压地层这样一个半封闭体系中,随着化学反应的进行,反应体系中的生成物浓度越来越高,随着时间的推移,化学反应必然会达到反应平衡,这时候超压的存在使得化学反应必然会向着体系压力减小的方向进行,有机质的热演化受到超压抑制。因此,从理论上讲,无论是生气还是生油,只要化学反应体系摩尔数增加,超压的存在都会抑制有机质的热演化。并且这种影响是建立在对化学平衡移动影响的基础上。

通过上面的分析可以得出,正常压力条件下,压力应该不影响有机质的热演化。如果处于超压条件下,超压会抑制有机质的演化,并且,超压抑制有机质热演化存在两层涵义:第一,超压的存在表明反应处于半封闭体系,因而随着化学反应的进行,化学反应会达到平衡;第二,超压使得的达到平衡的化学反应发生移动而抑制有机质热演化。

3 化学平衡移动和有机质演化的关系

任何化学反应都不可能进行到底,通常所说的反应彻底是指化学生成物浓度远远大于反应物浓度。根据前面的分析,在超压存在的条件下,超压地层可以看作一个半封闭体系,这时候,随着有机质的成熟,化学反应最终会达到反应平衡,因此,要分析超压地层中的压力作用,必须分析影响化学反应平衡的动力学原理。

下面我们先分析一下影响化学平衡的两个主要因素(温度和压力)。

当化学反应达到平衡时,化学平衡受到温度和压力的影响会发生移动,具体的影响表现为化学平衡常数的变化。其中,温度对化学平衡常数的影响公式为:

$$\frac{d\ln K}{dT} = \frac{\Delta H}{RT^2} \quad (1)$$

两边积分得到:

$$\ln K = -\frac{\Delta H}{RT} \quad (2)$$

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (3)$$

式中: K 为平衡常数; ΔH 为反应焓变化(kJ/mol); R 为化学反应常数; T 为温度,K。

很显然,当反应为吸热反应时,温度升高,化学反应朝着反应正方向进行,并且和反应平衡常数成指数关系。

另外,压力对化学反应平衡常数的影响公式为:

$$\left(\frac{\partial \ln K}{\partial p}\right)_T = -\frac{n}{p} \quad (4)$$

两边积分,得到:

$$\ln K = -n \ln p \quad (5)$$

化简上式,得到:

$$K = p^{-n} \quad (6)$$

式中: p 为压力,MPa; n 为常数。

根据上述化学反应的基本原理分析可知,温度和化学反应平衡常数呈指数关系,但是压力和化学平衡反应常数呈乘幂关系。平衡常数表示的是化学反应反应物和生成物的比例关系,因此,当化学反应达到平衡状态时,化学平衡常数可以表示有机质演化程度,因此我们可以用描述有机质演化程度的镜质体反射率来代替平衡常数,于是,(3)式变化为:

$$R_o = \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (7)$$

(6)式可以变化为:

$$R_o = p^{-n} \quad (8)$$

式中: R_o 为镜质体反射率,%。

4 超压存在时有机质演化的地质模型

化学反应并不等同于实际地质过程,因此,在将化学反应原理应用于实际的有机质演化过程时,必须考虑沉积盆地的实际生烃过程,即要建立合适的有机质生烃模型,才能正确模拟有机质演化过程。

Carr^[22]等人总结前人的物理实验和实际钻井资料,建立了一个有机质生烃的地质模型(图3)。

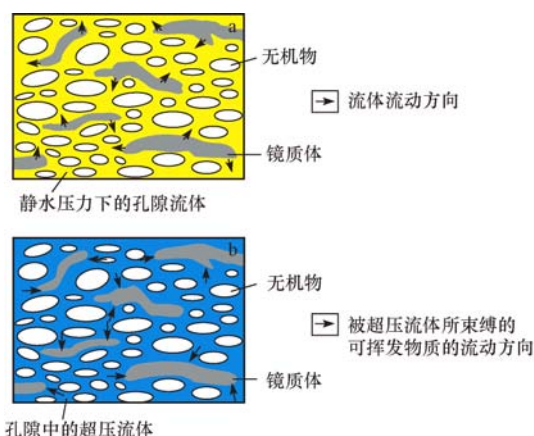


图3 静水条件和超压条件下有机质成熟示意图

Fig. 3 Schematic diagram showing the maturing process of organic matter under hydrostatic pressure and overpressure

a. 静水压力条件; b. 超高压条件

认为在静水压力条件下,生成的烃类在有机质成熟后释放出来,然后进入岩石孔隙之中^[26],这时,原来的有机质结构发生改变,有机质分子结构发生变化,大分子有机质裂解为小分子有机质,或者直接变为气体逸出,有机质的成熟度随着有机分子的裂解进一步提高,压力不影响有机质演化。在超压存在的情况下,有机质成熟后,生成的烃类由于压力的作用而不能从固态的干酪根中释放出来,所以,有机质的大分子结构基本不变化,这种大分子结构的持续存在使得有机质的成熟度难于发生变化,因此有机质的演化受到抑制。

上述地质模型从原理上对有机质生烃过程进行了解释,其建立模型的主要依据还是 Canon 提出的有机化学反应一级方程的原理,只是将原来认为是常数的频率因子看作了剩余压力的函数来解释压力对有机质的影响。

图3中,在静水压力条件下,烃类从干酪根中被排出,镜质体反射率的变化可以反映干酪根的成熟度。而在超高压条件下,烃类从受到超压条件的限制,其排放受到影响,因而影响了正常的有机质成熟过程。箭头反映有机质的排出方向。

下面我们用前面提到的两口井数据对 Dalla 和 Carr 等人的模型进行分析。根据 Dalla 等人的模型:

$$R_o = kp^{-m}t^n \exp(-E/RT) \quad (9)$$

式中: p 为压力,MPa; E 为活化能,kJ; t 为时间,s; R , k , m 和 n 为常数。

根据该公式,不管是静水压力还是超压,压力的存在都会影响有机质的演化。但是,图1和图2中,正常压力部分的有机质演化并没有受到压力的影响,所以,Dalla 的模型显然不符合实际地质数据。后来 Carr 等人根据 Dalla 存在的问题,提出了图4所示的地质模型,将公式(9)中的压力替换为剩余压力。按照新的公式,对于一个独立超压系统,剩余压力为常数,那么压力项的值自然为常数,但是,这时候温度对有机质演化的影响应该和正常压力系统下的有机质演化保持一致,即两段演化曲线的斜率应该一致,我们将 LD-30-1-1 和盆4井超压部分的有机质演化提取出来,绘制两口井超压部分有机质演化(图4,图5)。从图4和图5的可以看到,在不同盆地的两口井中,有机质的演化几乎完全被压力所抑制,表现为近乎常

数值。这显然和上述模型的规律不一致。因此,可以肯定,在超压存在的条件下,不论 Dalla 还是 Carr 的模型都不能合理解释有机质演化过程。根本原因应该就是其仍然用原来一级反应方程的原理来解释有机质的演化过程。

至此,我们认为当超压存在时,有机质演化的系统可以看作一个半封闭系统,化学反应随着时间的推移会达到反应平衡。故此,直接用上文提到的压力和温度对化学反应平衡的影响来表示有机质演化的程度才能更真实的反应超压地层中的有机质演化规律。

根据上面讨论到的超压条件下的化学反应的基本原理,本文建立一个新有机质生烃模型(图6)。模型中图6a为静水压力条件下的有机质生烃模型,在静水条件下,系统被看作一个开放系

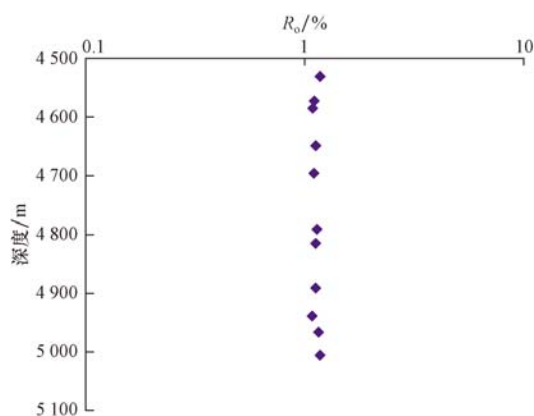


图4 LD-30-1-1井超压部分有机质的演化

Fig. 4 Maturing process of organic matter in formations with overpressure of the well LD-30-1-1

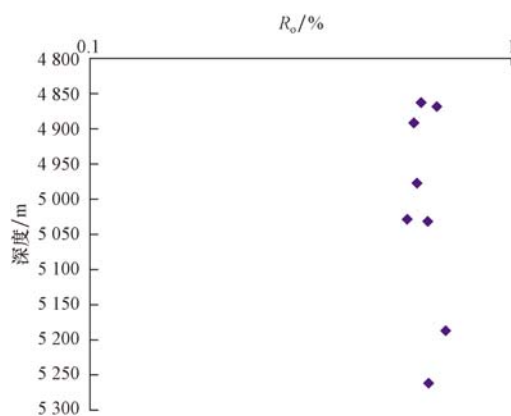


图5 盆4井超压部分有机质的演化

Fig. 5 Maturing process of organic matter in formations with overpressure of the well Peng-4

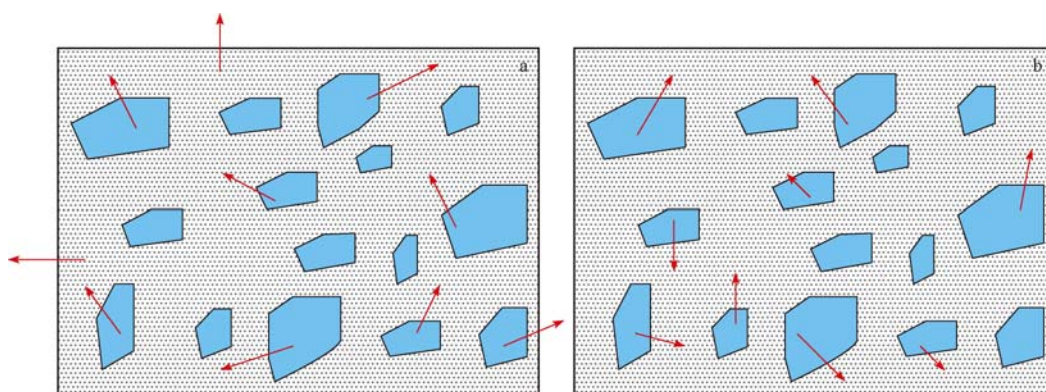


图6 超压存在下的有机质生烃地质模型

Fig. 6 Geological model of organic matter generating hydrocarbon under overpressure condition

a. 静水压力条件; b. 超压条件

(图中蓝色的不规则体为干酪根,基质为页岩,孔隙中充满流体水,箭头代表有机质逸出的方向。)

统,由于酪根生成的烃类可以被及时的排出,压力不影响有机质演化过程。

图6b为超压条件下的有机质生烃示意图。首先,将系统看作一个半封闭体系,系统中压力随着深度增加。当有机质裂解生成小分子烃或者气烃类时,烃类生成后会进入超压系统中任何可能的孔隙之中。随着时间的推移,产生的烃类越来越多,但是,由于系统为半封闭体系,生成的烃类不能排出体系,因此,最终生成物和反应物之间会达到化学反应平衡状态,这时存在于地层中的压力会影响化学平衡的移动,进而控制有机质的热演化过程。随着深度的变化,地层压力也发生变化,单独考虑压力作用的情况下,压力对生烃的抑制作用越来越强。从该模型我们可以认为影响有机质热演化的仍然是压力,但是其产生作用的基本前提条件是超压地层造成的半封闭系统,并且压力影响有机质演化的作用原理是压力对化学平衡的移動的控制。

按照上述地质模型,结合压力对有机质演化的公式(8),超压条件下压力对有机质演化的公式应该表示为:

$$R_o = p^{-n} \quad (10)$$

式中: p 为超压系统对应地层的压力,MPa。

这里必须注明,当压力大到一定程度时,有机质成熟度值不能低于热裂解为气烃的临界 R_o 值。

5 超压存在下有机质演化模型的建立

超压下有机质演化的基本动力学原理并不是一级反应方程,而是超压的存在对化学平衡移动的影响。因此认为超压影响活化能而导致有机质演化的变化的认识至少其基本原理是不正确的。故其获得的有机质演化模型也是不正确的。作者通过上述的分析认为,超压条件下的有机质演化是压力影响化学平衡移动的结果,那么有机质的演化应该是公式(7)和公式(10)组成的一个有机质演化公式。

按照公式(7),随着地层深度的增加,地温升高,有机质成熟度增加。而根据公式(10),随着地层深度的增加,有机质成熟度降低,那么,如果压力梯度和温度梯度达到某个特定值时,压力和温度对有机质的影响可以相互抵消。根据LD-30-1-1

井和盆4井有机质演化的认识可以得知,这两口井的有机质演化被超压彻底抑制,有机质的成熟度几乎为常数。该模型可以解释上述问题。

根据这一特点,我们提出超压条件下新的有机质演化模型。

$$R_o = k_1 t^n \exp(-E/RT) \quad \text{正常压力} \quad (11)$$

$$R_o = k_2 \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) p^{-n} \quad \text{超高压} \quad (12)$$

式中: k_1 和 k_2 均为常数。

从(11)式和(12)式看出,正常压力和超高压。在正常压力下,有机质演化规律和前人的模型一致,有机质本身演化受时间和温度的影响,和压力无关。当超压存在时,有机质生成的烃类不能及时逸出而使得化学反应达到反应平衡,因而,压力会影响有机质的演化,且是通过化学平衡移动的影响实现的。

6 模型的检验

通过对前人有机质演化模型和实际地质资料的分析,我们获得了有机质演化的新模型,式(11)和式(12)。这些公式可以更好地描述超压条件下的有机质成熟度变化。我们将该模型用来模拟LD-30-1-1井的有机质演化数据和盆4井有机质演化,用实际的数据来检验上述模型的有效性。

图7为新的有机质演化模型和实际有机质演化数据的对比结果。其中正常压力部分有机质演化

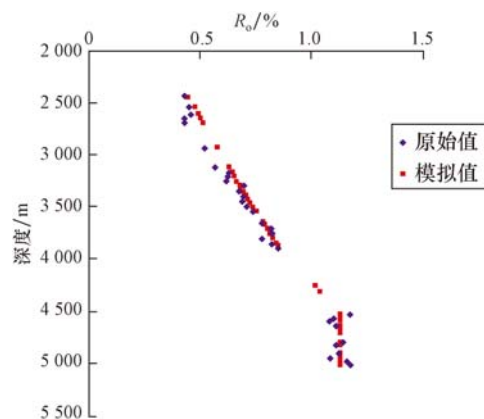


图7 LD-30-1-1井有机质演化新模型和原始有机质演化对比

Fig. 7 Comparison between the new and original models of organic matter evolution for the well LD-30-1-1
(图中红色点是数学模拟结果,蓝色点是原始镜质体反射率值。)

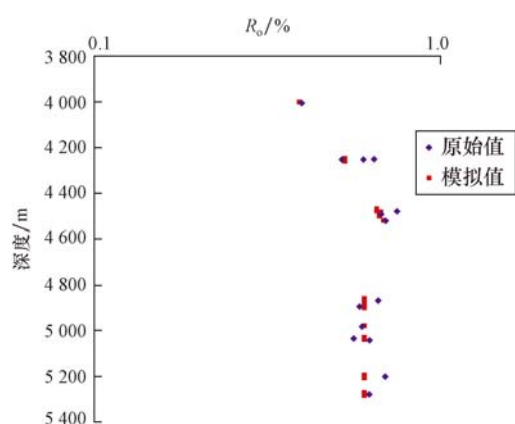


图8 盆4井有机质演化新模型和原始有机质演化对比
Fig. 8 Comparison between the new and original models of organic matter evolution for the well Peng-4

(图中红色点是数学模拟结果,蓝色点是原始镜质体反射率值。)

化计算公式为(11),超压部分有机质演化公式为(12)。通过对比可以发现,模拟结果和实际数据吻合性较好。

图8为盆4井的有机质演化模型和实际有机质演化数据的对比结果。其中正常压力部分有机质演化计算公式为(11),超压部分有机质演化公式为(12)。通过对比发现,模型的模拟结果和实际数据吻合性较好。

通过实际数据检验,很显然,新的模型完全可以模拟实际地质情况下的有机质演化过程。

7 结论

本文从化学反应的基本动力学原理出发,通过分析现有有机质演化实验和实际钻井资料,发现,压力对有机质演化不能用同一个模型来概括,必须区别对待。当地层处于正常压力条件下,有机质发生化学反应生成的烃类被流体及时带走,这时地层内生成的烃类浓度几乎为零,这时的有机化学反应符合一级反应动力学原理,有机质演化模型为公式(11)。当地层处于超压条件下,这时的地层为一个半封闭体系,有机质生成的烃类不能被及时的派出,随着生成物浓度的增大,最终化学反应达到平衡。这时,决定有机质演化程度的是化学平衡的移动。因此超压条件下的有机质演化模型是温度和压力对化学平衡移动的影响问题,据此得到超压条件下的有机质演化模型为公式(12)。

我们可以认为,影响有机质演化的仍然是压力本身,并不是超压,超压只是提供了一个半封闭的化学反应系统,而压力通过对系统中化学平衡移动的控制来影响有机质的热演化过程。

将上述模型用于实际含油气盆地中,模拟单井中的有机质演化规律,并和实测的有机质成熟度数据进行比较,发现,本文提出的模型的模拟结果和实际有机质演化结果保持一致,说明了该模型可以用于实际盆地中的有机质演化规律预测。

参 考 文 献

- [1] 赵艳艳,袁向春,康志江. 缝洞型碳酸盐岩油藏油井产量及压力变化模型[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 54-56, 62.
Zhao Yanyan, Yuan Xiangchun, Kang Zhijiang. Flow rate and pressure variation modeling for production wells in fractured vuggy carbonates reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 54-56, 62.
- [2] 曾治平,郝芳,宋国奇,等. 车镇凹陷套尔河洼陷古地层压力演化与油气幕式成藏[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2): 193-197, 205.
Zeng Zhiping, Hao Fang, Song Guoqi, et al. Palaeo-formation pressure evolution and episodic hydrocarbon accumulation in Tao'erhe Depression, Chechen Sag [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2): 193-197.
- [3] 许进进,徐旭辉,凡哲元,等. 考虑启动压力梯度下的火山岩气藏数值模拟研究[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2): 240-243, 259.
Xu Jinjin, Xu Xuhui, Fan Zheyuan, et al. A numerical simulation of volcanic gas reservoirs under consideration of start-up pressure gradient [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2): 240-243, 259.
- [4] 赵健. 松辽盆地西斜坡泥岩地层压实规律[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 486-492.
Zhao Jian. Laws of mudstone compaction on the west slope of the Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(4): 486-492.
- [5] 王京红,靳久强,匡立春. 准噶尔盆地莫北油气藏主控因素再认识[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 165-174, 191.
Wang Jinghong, Jin Jiuqiang, Kuang Lichun. Discussion on the main controlling factors of Mobei oil/gas reservoirs in the Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 165-174, 191.
- [6] Chandra D. Reflectance of coals carbonized under pressure [J]. Economic Geology, 1965, 60: 621-629.
- [7] Hrydkowian E, Dutcher R R, Dachille F. Experimental studies

- of anthradite coals at high pressures and temperatures [J]. *Economic Geology*, 1967, 67: 517–539.
- [8] Yang tianyu, Wang huanyu. High temperature and high pressure simulation experiment of organic matter in rock [J]. *Oil and Gas Geology*, 1987, 8(4): 380–389.
- [9] Huang jianquan, Zhou Zhongyi, Fan shanfa. The research of high pressure and high temperature experiment in hydrocarbon generation in deep basin [M]. Nanjing: jiangsu Science and Technology Press, 1992: 244–245.
- [10] Braun R L, Burnham A K. Mathematical model of oil generation, degradation and expulsion [J]. *Energy Fuels*, 1990, 4: 132–146.
- [11] Petzoukha Yu, Selivanov O. Promotion of petroleum formation by source rock deformation [C]//In: *Organic geochemistry advance and application in natural environment*. Manchester: Manchester University Press, 1991: 312–314.
- [12] Xie qilai, Fan shanfa, Zhou Zhongyi, et al. Influence of pressures on the evolution and hydrocarbon generation of source bed by simulation experiments [J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 1996, 15(2): 91–93.
- [13] Davis A, Spackman W. The role of the cellulosic and lignitic components of wood in artificial coalification [J]. *Fuel*, 1964, 43: 215–224.
- [14] Cecil V, Stanton R, Tobbin E. Geologic factors controlling coalification and hydrocarbon maturation [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1977, 61: 775–783.
- [15] Sajgo C S, Mcevoy J, Wolef G A, et al. Influence of temperature and pressure on maturation process I, Preliminary report [J]. *Organic Geochemistry*, 1986, 10: 331–337.
- [16] Price L C, Wenger L M. The influence of pressure on petroleum generation and maturation as suggested by aqueous pyrolysis [J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 19: 141–159.
- [17] Dalla Torre M, Mahlmann R F, Ernst W G. Experiment study on the pressure dependence of vitrinite maturation [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 67: 2921–2928.
- [18] Jiang Feng, Du jianguo, Wang wanchun, et al. The study on high-pressure high temperature aqueous pyrolysis I Influence of temperature and pressure on maturation of organic matter [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 9(3): 153–160.
- [19] Hao Fang, Jiang jianqun, Zou huayao, et al. The overpressure differently and levelly retard the organic matter evolution [J]. *Science in China(D)*, 2004, 34(5): 443–451.
- [20] Waples D W. Time and temperature in petroleum formation: Application of Lopatin's method to petroleum exploration [J]. *AAPG Bulletin*, 1980, 64: 916–926.
- [21] Hao Fang, Li Sitian, Sun Yongchuan, et al. Characteristics and origin of the gas and condensate in the yinggehai Basin, offshore South China Sea: Evidence for effect of overpressure on petroleum generation and maturation [J]. *Organic Geochemistry*, 1996, 24(3): 363–375.
- [22] Carr A D. A vitrinite reflectance kinetic model incorporating overpressure retardation. *Marine and petroleum Geology*, 1999, 16(3): 355–377.
- [23] Connan J. On time-temperature relation in oil genesis [J]. *AAPG*, 1974, 58, (12).
- [24] Sweeney J J, Burnham A K, Braun R L. A model of hydrocarbon generation from type one kerogen: application to Uinta basin, Utah [J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 71: 967–985.
- [25] Tissot B P, Welte D H. *Petroleum formation and occurrence (Second Edition)* [M]. Berlin: Springer, 1984: 699.
- [26] Stainforth J G, Reinders J E A. Primary migration of hydrocarbons by diffusion through organic matter networks, and its effect on oil and gas generation [J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 16: 61–74.

(编辑 高岩)

《石油与天然气地质》2013 年报道计划

2013 年计划出版《石油与天然气地质》期刊 6 期, 主要有 3 个专题: “非常规油气资源潜力、成藏理论、勘探开发关键技术”、“中国海相油气理论与勘探开发实践”和“中国陆相盆地油气资源精细勘探与开发技术”。

欢迎广大作者不吝赐稿。

《石油与天然气地质》编辑部