

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

烃源岩催化生烃机制研究进展

刘洛夫 李术元

石油大学,北京,102249

内容提要 本文扼要综述了国内外在热模拟催化生烃领域的研究进展,并针对其存在问题或不足之处,提出了新的研究思路,设计了新的实验方案,对烃源岩催化生烃机理和过程进行定量的研究,建立定量的催化反应速率数学模型和催化生烃产率数学模型,并制作成可操作的计算机软件。划分出起正催化作用和反催化作用的催化剂。在研究过程中,全面考虑某生油岩中的所有粘土矿物和地下水中的无机盐类对生烃的催化作用,即系统地分别考虑生油岩中存在的各单个催化剂及它们的各种组合对烃源岩生烃过程的影响。

关键词 烃源岩 催化作用 生烃机制 热模拟实验

1 烃源岩催化生烃的研究现状

油气主要源于干酪根的热降解,其过程既有生物化学作用,也有热催化、热裂解作用。这一认识已在石油地球化学界达成了广泛的共识,而且已进入了系统的理论研究阶段,并取得了丰硕的成果。一切化学物质的生成归根结底是反应物进行化学反应的结果,油气的生成也不例外。实际上,干酪根热降解成烃,是一个在地质条件下低温长时间的复杂的热催化和热裂解反应过程。无论是实验室内的热模拟过程,还是地质条件下的自然演化过程,都不同程度地涉及到催化剂对油气生成过程的催化作用,包括促进作用、抑制作用、吸附脱附作用等。这一内容属于高难度的基础性研究课题,横跨地质和化学两大学科。我国在这一领域虽有所研究,但不够系统、不够全面、不够深入。目前国际上的同行们也正在进行此前沿课题的研究。

在我国以往的攻关项目中,并没有将有关油气生成过程中的矿物和无机盐类的催化作用研究列为单项专题,但在与之相关的课题研究中,不少学者对其进行了初步的探讨。例如,高先志(1990)利用改进的岩石评价仪(敞开体系),研究了矿物催化剂对热解生烃的影响,认为石英、正长石、斜长石、方解石、白云石对热解过程基本无影响,高岭石、伊利石、蒙脱石的影响较大。曹慧缙(1991)利用玻璃管封闭体系,从碳酸盐岩生烃机制入手,考察了矿物的催化影响。李忠(1992)对油气生成过程中粘土矿物的催化作用进行了综述,认为粘土矿物对有机质成岩、油气生成和油气改造过程均有重要的催化作用。其催化机理是通过形成正碳离子以生成支链烃类来实现的。张国防(1993)采用高温高压模拟仪器,考察了氯化盐和碳酸盐在生成未熟油过程中的催化作用。结果发现,在氯化盐和碳酸盐的存在下,有机质热敏性增强,生油温度提前约50℃,生油高峰持续时间短,在有限的温度范围内完成了生油过程,且最终的生油气产量也明显增加。刘晓艳(1995)利用高压釜反应装置,在水介质存在下研究了蒙脱石对褐煤热解生烃过

程的影响。认为:①蒙脱石加速了有机质的成熟,使有机质的生气率明显增加;②由于吸附作用和催化作用的相互影响,在低成熟度时,蒙脱石使有机质生油率显著提高;③水的存在不会降低蒙脱石的催化活性。关平等(1992)提出有机酸等游离有机质,在成岩作用早期可被泥岩催化生成低熟油。另外,从事煤化工领域的研究者,从煤的化工利用角度出发,对矿物质的催化作用进行了许多研究,考察了煤在不同矿物催化剂存在时的热解反应特性,认为碱金属盐的阴离子是影响催化作用的主要因素。李凡(1992)研究了矿物质对煤显微组分热解过程的影响,建立了催化热解动力学方程。这些工作虽然与地化领域的研究目的不同,但其研究思路和方法都是相同或相似的,可以相互借鉴。

国外有关的基础工作做得较多,早在四、五十年代,美国化学家 Brooks(1948, 1952)在考察石油炼制过程的催化作用时,发现在较低温度时酸性粘土对烃类的异构化、脱氢、烯烃聚合等反应具有催化作用。Johns 等(1972)利用脂肪酸作为模型化合物,考察了蒙脱石催化生烃的机理。结果发现,蒙脱石加速了脂肪酸脱羧基生成链烷烃,以及长链烷烃进一步裂解生成短链烷烃。而这些长、短链烷烃的分布情况与石油的组成非常相似。Almon(1975)研究了脂肪酸脱羧的反应,认为无水情况下膨润土(同蒙脱石类似)加速了支链烷烃的生成,而有水存在时将加速直链烷烃的生成。Aizenshtat(1984)在敞开体系中,考察了蒙脱石对十六酸、十八酸和二十二酸脱羧过程的影响。认为蒙脱石的存在推迟了脂肪酸脱羧生成烃类的时间,但并不影响烃类的组成和性质。

到了 80 年代,油气生成过程中存在着矿物催化作用这一事实被越来越多的学者所接受,因而,干酪根催化生成油气的研究工作逐渐活跃起来。Espitalie 等(1980)利用敞开体系的热模拟实验,分别研究了源岩、干酪根及干酪根添加矿物时的热解生烃过程,发现矿物催化剂的存在对生烃过程具有抑制作用(或称反催化作用),这种抑制作用的大小顺序为:伊利石>蒙脱石>高岭石>方解石。Horsfield 等(1980)在敞开体系中考察了氧化铝、膨润土、高岭土、方解石对干酪根、煤及煤岩组分热解过程的影响,认为矿物基质主要影响产物中烃类的化学组成,并不影响其总收率。Goldstein(1983)利用玻璃管封闭体系研究了几种模型化合物(醇类)的催化热解反应。催化热解过程中经历了官能团的脱落、缩合、环化、脱氢、异构化等反应。

为了使催化生烃的人工模拟实验更接近于实际的地质条件,Eglinton 等(1986)利用高压釜实验装置,在考虑水介质及加压的情况下,考察了蒙脱石、伊利石、高岭石、方解石和黄铁矿对干酪根的热解影响。模拟温度为 280℃和 330℃,时间为 72 h,在水介质中矿物的含量是干酪根的 20 倍。Eglinton 的主要结论如下:①在 280℃时,除伊利石具有反催化作用外,其他矿物(方解石、蒙脱石、黄铁矿、高岭石)均有明显的催化作用。②在 330℃时,所有矿物均有反催化作用。③矿物催化剂对热解产物的组成有着明显的影响。还有学者(Tannenbaum et al., 1986; Tannenbaum, 1986; Huizinga, 1987; Huizinga et al., 1987)利用玻璃管封闭体系,在温度为 200~300℃范围内,时间为 2~1000 h,研究了两种低熟干酪根的催化生烃过程,考察了蒙脱石、伊利石和方解石在水介质和非水介质条件下的催化作用。

进入 90 年代,有关烃源岩生烃的研究工作继续吸引着众多的学者。他们除了在催化机制和生烃模式等方面进行更深入的研究外,还在生烃的定量模型方面进行了有益的探讨。例如, Dembicki(1990, 1992)利用岩石评价仪(敞开体系)研究了矿物催化剂存在时的干酪根热解动力学。结果发现,在矿物含量较高时,或有机碳含量较低时,高岭石表现出正催化作用,而其他矿物均无任何作用。Reynolds 等(1995)利用敞开体系的微型热解仪,研究了源岩和分离出的干

酪根的热解动力学,认为矿物基质的存在,对于干酪根的热解动力学特征没有影响。Saxby(1992)考察了膨润土对煤生烃过程的催化作用,利用玻璃管封闭体系,在200~300℃范围内将样品加热4天。结果发现,膨润土的影响较大,主要表现为吸附滞流作用。Hetenyi(1995)利用敞开流动体系,研究了方解石和蒙脱石对不同类型干酪根热解生烃的影响。对于Ⅲ型干酪根,蒙脱石起反催化作用,方解石起正催化作用;对于Ⅰ型干酪根,蒙脱石起正催化作用,而方解石几乎无催化作用。Mango(1992)考察了过渡金属对油气生成的催化作用和机理,认为镍、钒、钛、钴等金属对油气生成特别是轻烃和天然气的生成有催化作用。

综合上述的国内外有关烃源岩矿物催化生烃的研究,可以归纳为以下几点认识:

(1)多数学者承认矿物催化作用的存在,并认为蒙脱石的催化活性高于其他矿物(伊利石、高岭石、方解石等)的催化活性。如果说有些矿物有反催化作用,则主要表现为矿物对热解产物的吸附滞流作用。这一作用延缓了反应产物的释放,相应地提高了反应的温度。

(2)模拟实验所用装置主要包括3个体系:即敞开体系、封闭体系和水介质体系。有水存在时的矿物催化作用更接近于实际生烃过程,但水的存在将或多或少地降低催化剂的催化活性。

(3)多数学者认为,催化生烃过程的反应按照正碳离子的催化机制进行。但这一机制存在一定的问题,主要是正碳离子机制的产物以异构的烃类为主,而石油组成是以正构的烃类为主。因此,正碳离子的催化机制与石油组成并不吻合,有待于进一步探讨。

(4)矿物催化剂对生烃过程的速率及烃类的性质影响较大,而对烃类的产率影响较小。催化剂主要是改变了生烃反应的途径,降低了反应的活化能,从而加速了反应的进行,这一点与动力学和热力学规律是相一致的。

(5)矿物催化剂对于干酪根热解生成可溶烃(热沥青)的影响较小,因为这一过程是在两个固体相中进行的,两相之间缺乏催化反应的基本条件。而可溶烃进一步降解生成小分子液态烃和气态烃时,矿物催化作用比较明显,因为这一过程是在固相和液相之间进行的,满足了催化裂化反应的基本条件。因此,干酪根生成油气的过程可以划分为两个阶段:干酪根热降解首先生成热沥青,热沥青又进一步热催化降解生成油气(李术元等,1996)。

2 实验方案与技术思路

前述的关于催化生烃的研究工作,多数为定性的研究,很少建立定量的数学模型,更没有制作成可操作的计算软件。而且,没有系统地分别考虑生油岩中存在的各单个催化剂(特别是地层水中的无机盐类)及它们的各种组合对烃源岩生烃过程的影响。另外,对催化生烃不同学者之间的看法也还存在争议。很明显,今后总的发展趋势是:催化剂对生油过程影响的研究将从定性向定量发展,催化反应将从总包反应向分子反应方向发展,催化机理将从宏观结构向微观分子发展。总之,弄清各种矿物和无机盐类催化剂的催化反应机理,以便对油气的成因、催化剂的影响进行定量的描述,从而指导油气资源评价和勘探开发工作。

针对上述存在的问题,在中国石油天然气集团公司“九五”重大科技攻关项目“大、中型油气田成藏定量模式研究”中,我们设立了“烃源岩催化成烃机制及定量模型”三级专题,主要研究我国碎屑岩烃源岩油气生成过程中的催化成烃机制及定量模型。利用石油地化的热模拟方法和化工催化的基本原理,在实验室内采用热解气相色谱仪、高压反应釜等装置,模拟地质条件下存在的各种矿物催化剂和接近地下的演化条件,如温度、压力、水介质、加盐、加碱等,对我国具有代表性的生油母质进行催化生烃模拟实验。对各种模拟产物的组成和产率进行定量的

分析计量,考察各种矿物催化剂和无机盐类催化剂在各种模拟条件下的催化反应机理,建立定量的化学反应动力学模型,求出催化反应动力学参数(活化能、频率因子、催化因子),形成了可操作性的软件,并划分出加快反应和延迟反应的催化剂。从而全面系统地分析矿物催化剂在烃源岩生烃过程中所起的作用,包括正、反催化作用,弄清它们的催化反应机制,对油气成因提出了新的看法。

本研究的内容和技术思路如下(图1):

(1)模拟实验样品:选取3种典型的未成熟或低成熟烃源岩干酪根,它们分别取自松辽盆地白垩系青山口组的碎屑岩生油岩(Ⅱ型,淡水湖相)、东营凹陷沙河街组沙四段的碎屑岩生油岩(Ⅰ型,咸水湖相)和泌阳凹陷下第三系核桃园组的碎屑岩生油岩(Ⅰ-Ⅱ型,半咸水湖相)。根据模拟实验的要求,我们选取了成熟度尽可能低、有机质丰度高的样品。

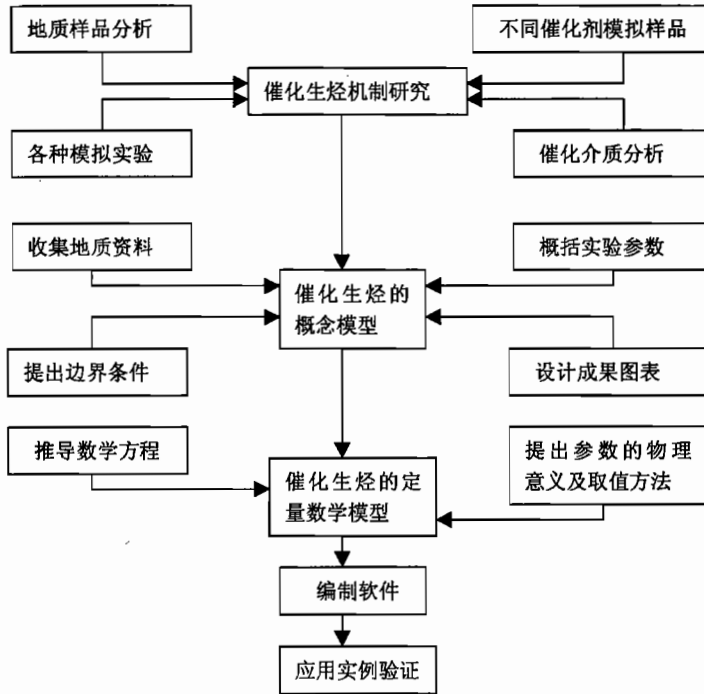


图1 烃源岩催化生烃机制及定量模型研究的技术路线图

Fig. 1 Research approach for hydrocarbon generation from source rock by catalysis and its quantitative model

积环境等因素来确定模拟实验条件。模拟实验介质包括两种:非水介质及水介质,非水介质模拟实验温度为300~500℃,水介质模拟实验温度为200~350℃,时间为72 h,采用2℃/h的恒温升温方案。另外,还考虑了水介质的pH值对生烃过程的影响。

(5)对各种模拟产物的组成和回收率数据进行定量的分析计量和化学动力学处理,建立反应动力学模型,考察催化反应动力学参数(活化能、频率因子、催化因子)随实验条件、催化剂种类、生油母质类型等因素的变化规律,划分出加快反应、延迟反应和对反应无影响的催化剂。

(6)对各种实验条件下得到的热解产物,进行各种分析测试,如气体组成、液体组成、残余母质的镜质体反射率、元素分析等等,以探讨催化生烃机制。固体矿物质作为催化剂时,还进行了催化剂表征方面的分析,如岩相组成、比表面积、红外分析、X衍射分析等,以便考察矿物催化剂在热模拟过程中的演化情况。

根据模拟实验的要求,我们选取了成熟度尽可能低、有机质丰度高的样品。

(2)催化剂种类:具体采用哪种催化剂,取决于所采集样品的沉积环境及生油岩中所含的矿物种类和无机盐的种类(根据岩石矿物分析结果和油田水分析结果来决定)。即催化剂包括粘土矿物如蒙脱石、高岭石、伊利石等和无机盐类如NaCl、MgCl₂、CaCl₂、Na₂SO₄、NaHCO₃和K₂CO₃等。

(3)模拟实验仪器:高压釜反应器、岩石热解评价仪(Rock-Eval)和气相色谱仪(Py-GC)。

(4)模拟实验条件:根据催化剂的种类以及不同的成岩沉积环境等因素来确定模拟实验条件。

(7)对以上热模拟实验的结果及分析测试数据进行汇总处理,利用各种影响因素建立定量的催化反应速率数学模型和催化生烃产率数学模型,划分出起正催化作用和反催化作用的催化剂,并编制成可操作的软件。利用编制的软件对某一地区进行生烃量计算,得到了考虑催化作用的生烃量,更为客观地评价该区的油气资源。

本次研究的技术思路与实验方案的优点在于:①研究的定量性。建立定量的化学反应动力学模型等,并制作成可操作的计算软件。②研究的系统性。全面考虑某生油岩中的所有粘土矿物和地下水中的无机盐类对生烃的催化作用,即系统地分别考虑生油岩中存在的各单个催化剂及它们的各种组合对烃源岩生烃过程的影响。而以往的研究则没有考虑生烃环境中地下水里的无机盐类的催化影响,忽视了环境因素。③室内的热模拟实验紧密结合地质实际进行。在热模拟催化生烃实验之前,详细分析岩样中的粘土矿物种类和含量,以及岩样所处的油田水的矿化度(无机盐类的种类和含量),以便选取和制备各种催化剂和催化剂组合,使实验条件更接近生烃的实际地质环境。

3 烃源岩催化生烃机制研究的新认识

经过三年多的科技攻关研究,我们得到了多方面的研究成果:

(1)无机盐类对干酪根的热解生烃过程具有不同的作用,其中,氯化盐类具有一定程度的反催化作用,其他盐类具有正催化作用(图2)。这是十分重要的认识,国内外目前尚未见报道。

(2)各种矿物基质对干酪根生烃过程均表现出较强的催化作用,在无水介质存在时,伊利石的影响最明显,高岭石、钠长石、白云石次之,蒙脱石较小,方解石的作用最小(图2)。在有水

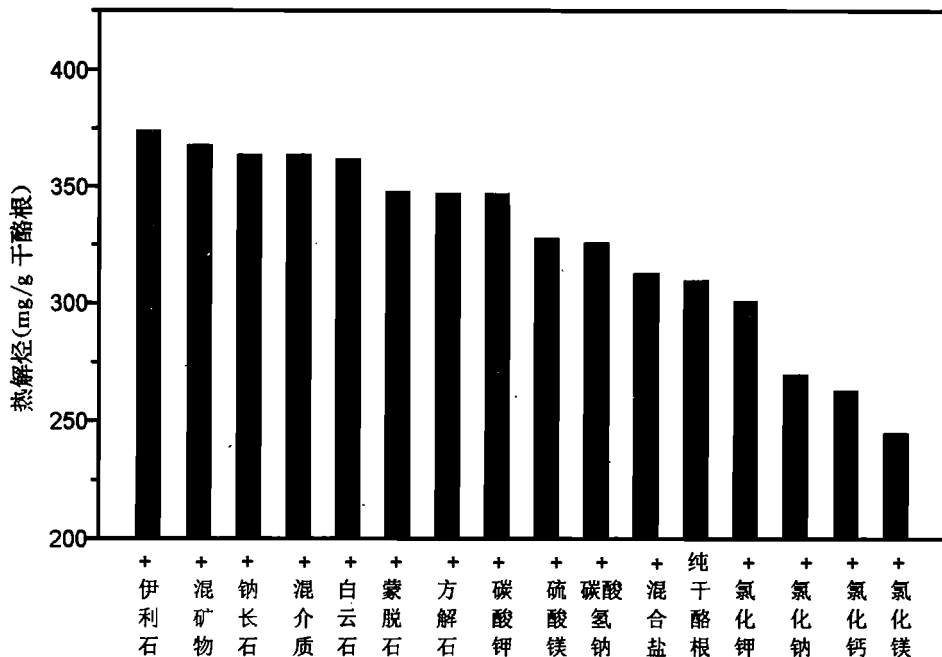


图2 各种催化剂对泌阳凹陷干酪根热解生烃量的影响(Rock-Eval结果)

Fig. 2 Effects of catalysts on hydrocarbon generation amount in Rock-Eval analysis of kerogen from the Biyang sag

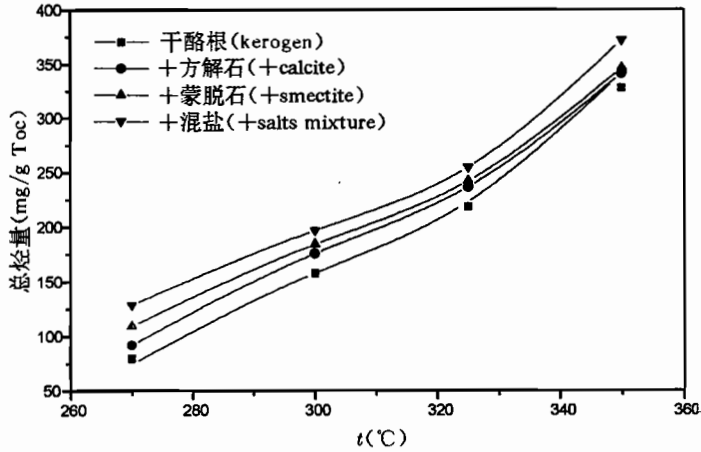


图3 水介质条件下东营凹陷干酪根热模拟
总生烃量-温度关系曲线

Fig. 3 Relationship between total hydrocarbon generation amount and temperature in thermal water-medium modeling experiment on kerogen from the Dongying sag

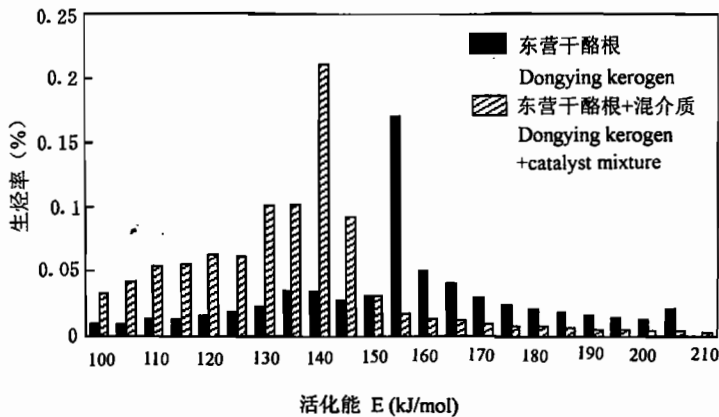


图4 混介质对东营凹陷干酪根热裂解表观活化能的影响

Fig. 4 Effects of catalyst mixture on activation energy in thermal cracking of kerogen from the Dongying sag

表1 介质存在下泌阳凹陷干酪根各种热解产物生成量数据(mg/g干酪根)

Table 1 Generation amounts of pyrolytical products of kerogen from the Biyang sag in the presence of catalysts (mg/g kerogen)

样品	总检测烃	C ₁ 烷烃	C ₁ -C ₅ 烷烃	C ₆ -C ₁₄ 烷烃	C ₁₅ + 烷烃	苯类
干酪根	222.1	11.9	56.51	93.1	51.0	21.5
+伊利石	264.5	16.7	111.1	79.8	55.9	17.7
+钠长石	262.9	16.3	112.9	81.0	50.3	18.7
+白云石	262.0	15.1	99.9	93.2	50.3	18.6
+蒙脱石	232.6	13.7	115.8	75.2	18.9	22.6
+K ₂ CO ₃	269.4	10.2	104.2	89.2	53.9	22.1
+MgSO ₄	244.5	11.3	80.0	88.4	57.4	18.7
+CaCl ₂	210.5	10.4	46.3	62.3	46.0	16.2

介质存在时,蒙脱石的催化作用高于伊利石,方解石的作用依然最小。

(3)当水介质存在时,矿物基质及盐类也表现出明显的催化作用(图3),其催化作用并没有因为水的存在而消失,其中蒙脱石的催化作用还因水介质的存在而得到加强。

(4)从化学动力学角度看,各种矿物和盐类的催化作用,是通过改变反应的路径,降低反应的活化能而表现出来的。催化剂的存在,虽然降低了活化能,但并没有改变活化能的整体分布趋势(图4),说明催化剂的存在,既加速了高活化能的反应,也加速了低活化能的反应。

(5)催化剂的存在,不仅影响干酪根的生烃量和生烃率,也影响热解烃类的化学组成。催化剂使轻烃含量增加,非正构烃生成量增加,重烃含量减少(表1)。矿物催化剂对烃类组成的影响较大,盐类催化剂对烃类组成的影响较小。

(6)热解温度对催化作用也有影响,低温时催化剂的作用较强,随着温度升高,催化

作用逐渐减弱(图5),这与热力学平衡理论相一致。这也说明低温长时间的干酪根催化生烃过程中,矿物和盐类存在着重要的催化作用。

(7)干酪根的热解过程符合自由基反应机理,矿物基质存在时的催化生烃过程符合正碳离子反应机理,无机盐类对热解过程的催化作用可借助于“电子诱导响应”进行初步的解释,这也是本专题首次得到的初步认识。

(8)利用所建立的定量数学模型,结合有关的地质参数,计算出了自然演化条件下干酪根的催化生烃率和生烃

强度。我们对东营凹陷牛庄洼陷的7口井进行了初步的计算,其生烃率和生烃强度值较其他方法计算的结果高10%左右。由于考虑了矿物和盐类的催化作用,因此这样算出的生烃率和生烃强度结果将较为准确,比较符合实际情况。

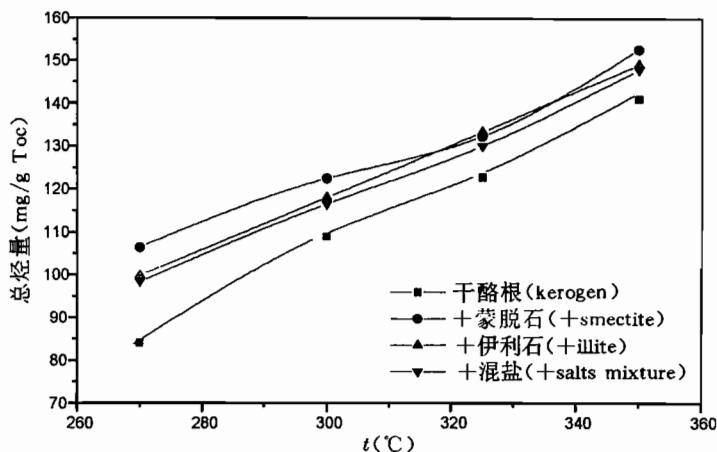


图5 水介质条件下松辽盆地干酪根热模拟总生烃量-温度关系曲线

Fig. 5 Relationship between total hydrocarbon generation amount and temperature in thermal water-medium modeling experiment on kerogen from the Songliao basin

参 考 文 献

- 曹慧缙. 1991. 碳酸盐岩生烃机制的新认识. 石油实验地质, 13(3): 223~237.
- 高先志. 1990. 矿物质对热解影响的研究. 石油实验地质, 12(2): 201~205.
- 关平, 王大锐. 1992. 辽河盆地泥岩成岩作用过程中天然气的初次运移和排气量计算. 石油勘探与开发, 19(增): 48~54.
- 李凡. 1992. 矿物质对煤显微组分热解的影响. 燃料化学学报, 20(3): 300~306.
- 李术元, 刘洛夫. 1996. 烃源岩催化生烃机制的研究进展. 天然气地球科学, 7(5): 1~6.
- 李忠. 1992. 试论油气形成过程中粘土矿物的催化作用. 石油实验地质, 14(1): 59~63.
- 刘晓艳. 1995. 粘土矿物对有机质演化的影响. 天然气地球科学, 6(3): 23~26.
- 张国防. 1993. 盐湖相石油的早期生成. 石油勘探与开发, 20(5): 43~48.
- Aizenshtat Z. 1984. Effect of montmorillonite on the thermal decomposition of fatty acids under "bulk flow" conditions. *Org. Geochem.*, 7 (1): 85~90.
- Almon W R. 1975. Petroleum-forming reaction; clay catalyzed fatty acid decarboxy. *Diss. Abs. Int.*, 36 (1): 129B.
- Brooks B T. 1948. Active surface catalysts in the formation of petroleum. *AAPG Bull.*, 32 (12): 2269~2286.
- Brooks B T. 1952. Evidence of catalytic action in petroleum. *Ind. Eng. Chem.*, 44 (11): 2570~2577.
- Dembicki Jr H. 1990. Mineral matrix effect during analytical pyrolysis of source rocks, *Assoc. Pet. Geochem. Explor. Bull.*, 6: 78~105.
- Dembicki Jr H. 1992. The effects of the mineral matrix on the determination of kinetic parameters using modified Rock Eval Pyrolysis. *Org. Geochem.*, 18 (4): 531~539.
- Eglinton T I, Rowland S J, Curtis C D, et al. 1986. Kerogen-mineral reactions at raised temperatures in the presence of water. *Org. Geochem.*, 10: 1041~1052.
- Espitalie J, Madec M, Tissot B. 1980. Role of mineral matrix in kerogen pyrolysis: influence on petroleum generation and migration. *AAPG Bull.*, 69 (1): 59~66.
- Goldstein T P. 1983. Geocatalytic reaction in formation and maturation of petroleum. *AAPG Bull.*, 67 (1): 152~159.

- Hetenyi M. 1995. Simulated thermal maturation of type I and II kerogens in the presence and absence of calcite and montmorillonite. *Org. Geochem.*, 23 (2): 121~127.
- Horsfield B, Douglas A G. 1980. The influence of minerals on the pyrolysis of kerogens. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44: 1119~1131.
- Huizinga B J. 1987. The role of minerals in the thermal alteration of organic matter—III. Generation of bitumen in laboratory experiments. *Org. Geochem.*, 11 (6): 591~604.
- Huizinga B J, Tannenbaum E, Kaplan L R. 1987. The role of minerals in the thermal alteration of organic matter—4. Generation of n-alkanes, acyclic isoprenoids and alkenes in laboratory experiments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 51: 1083~1097.
- Johns W D, Shimoyama A. 1972. Clay minerals and petroleum forming reaction during burial and diagenesis. *AAPG Bull.*, 56 (11): 2160~2167.
- Mango F D. 1992. Transition metal catalysis in the generation of petroleum and natural gas. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56: 553~555.
- Reynolds J G, Burnham A K. 1995. Comparison of analysis of source rocks and kerogen concentrates. *Org. Geochem.*, 23 (1): 11.
- Saxby J D. 1992. Effects of clay minerals on products from coal maturation. *Org. Geochem.*, 18 (3): 373~383.
- Tannenbaum E. 1986. Role of mineral in thermal alteration of organic matter—II. a material balance. *AAPG Bull.*, 70 (9): 1156.
- Tannenbaum E, Kaplan I R. 1986. Role of mineral in the thermal alteration of organic matter—I. generation of gases and condensates under dry conditions. *Org. Geochem.*, 49: 2589~2604.

Advances in the Study of the Mechanism of Hydrocarbon Generation from Source Rocks by Catalysis

Liu Luofu Li Shuyuan

University of Petroleum, Beijing, 102249

Abstract

The present status of research on hydrocarbon generation by catalysis in the process of thermal modeling is reviewed briefly in this paper and a new method and a new experimental scheme are proposed in order to quantitatively study the mechanism and process of hydrocarbon generation by catalysis, to set up quantitative mathematical models of the catalytic reaction rate and hydrocarbon generation rate, to develop feasible computer softwares, and finally to distinguish catalysts and anticatalysts. In this study, the catalysis of all clay minerals in source rocks and inorganic salts in oil-field water on hydrocarbon generation is taken into consideration, i. e. the effects of every single catalyst and various catalyst combinations on hydrocarbon generation are analyzed systematically.

Key words: source rock; catalysis; hydrocarbon generation mechanism; thermal modeling experiment

作者简介

刘洛夫,男,1958年生。1992年于英国 Bristol 大学化学学院获博士学位。现为石油大学盆地与油藏研究中心教授、博士生导师,主要从事油气地球化学和石油地质学方面的研究工作。通讯地址:102249,北京市昌平区石油大学盆地与油藏研究中心。