

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.344



南黄海盆地碳酸盐岩生烃动力学参数特征

陈春峰

中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335

摘要: 南黄海盆地碳酸盐岩生烃动力学参数的研究对于估算该盆地油气资源潜力极为重要.利用黄金管—高压釜封闭体系的实验设备,对南黄海盆地栖霞组和青龙组2个碳酸盐岩样品进行了热模拟实验及生烃动力学分析.结果表明,栖霞组灰岩热解气体最高产率为102 mL/g TOC,青龙组灰岩为78 mL/g TOC;栖霞组灰岩生烃活化能主峰为52 kcal/mol,青龙组灰岩生烃活化能主峰为60 kcal/mol.栖霞组灰岩活化能主峰偏低可能是受样品中残留烃类影响,热成熟度参数 R_o 与气体产率的关系不受地质升温速率的影响,可以利用实验结果进行碳酸盐岩生烃量模拟.

关键词: 南黄海盆地;碳酸盐岩;生烃动力学;烃源岩;热模拟;石油地质.

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2019)03-0872-08

收稿日期: 2018-10-22

Kinetics of Hydrocarbon Generation of Carbonate Rocks in South Yellow Sea Basin

Chen Chunfeng

Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200335, China

Abstract: The kinetics data of hydrocarbon generation in South Yellow Sea Basin is very important for its hydrocarbon potential evaluation. Pyrolysis experiments of Qixia Formation and Qinglong Formation carbonate samples in South Yellow Sea basin were carried out by using gold tube-autoclave instruments in finite space and then the kinetics data of hydrocarbon generation was analyzed. The results show that gas generation rate of Qixia carbonate is 102 mL/g TOC, and that of Qinglong Formation is 78 mL/g TOC. The mean value of activation energy of Qixia carbonate is 52 kcal/mol, and that of Qinglong carbonate is 60 kcal/mol. The low value of activation energy of Qixia carbonate is possibly caused by the residual hydrocarbon in the sample. The relationship between the maturity parameter R_o and the gas generation rate is not affected by the rate of geo-heating rate, so the parameters can be used to simulate the carbonate hydrocarbon generation in South Yellow Sea Basin.

Key words: South Yellow Sea Basin; carbonate rock; kinetics of hydrocarbon generation; source rock; thermal simulation; petroleum geology.

0 引言

近年来,中石油、中石化在四川盆地中、古生界碳酸盐岩地层中不断发现新的大型、超大型油气田,如普光气田、龙岗气田、安岳气田(马永生等,2010;赵文智等,2012;邹才能等,2014),南黄海盆地与四

川盆地同属扬子板块,经过30余年勘探及研究,大量物探资料和钻井资料揭示南黄海盆地中、古生界海相碳酸盐岩广泛发育,南黄海海相盆地的油气资源潜力如何一直是勘探家关心的核心问题.学者们先后对上扬子区四川等地的泥岩、煤及下扬子地区苏北盆地的栖霞组灰岩、大隆组泥岩进行了生烃动力学研

基金项目:中海石油(中国)有限公司项目(No.YXKY-2018-SH-01).

作者简介:陈春峰(1972—),男,高级工程师,从事石油地质方面的研究. ORCID:0000-0001-9570-5406. E-mail:chenchf@cnooc.com.cn

引用格式:陈春峰,2019.南黄海盆地碳酸盐岩生烃动力学参数特征.地球科学,44(3):872-879.

究(徐立恒等,2008;蒋启贵等,2010;黎琼等,2014).由于缺乏南黄海盆地烃源岩的生烃动力学实验参数,影响了对该区碳酸盐岩烃源岩生烃潜力的认识.

烃源岩的生烃动力学研究开展较早,Tissot 假定干酪根主要由 6 种具有不同活化能和频率因子的反应物组成,应用平行和连续反应模型,首次通过实验给出了 3 种类型干酪根的动力学参数的频率分布(Tissot and Welte,1984).由于不同盆地形成的烃源岩的各种类型干酪根含量相差较大,因此无法应用 Tissot 生烃模型进行相对准确的资源量估算(饶松等,2010).同时,不同盆地、不同岩性的烃源岩经历的埋藏时间、温度、压力及围岩的吸附能力、排烃能力均存在较大的差异(韩文学等,2018;李志明等,2018),这些因素均会造成不同地质背景下形成的有机质生烃动力学参数存在明显差异(郑伦举等,2015),在实际研究中必须针对具体盆地的特定烃源岩进行实验,求取具体的生烃动力学参数才能准确模拟出盆地的生烃过程及盆地的资源量(刘立峰等,2009;王民等,2011;郑伦举等,2011a;郭小文等,2013).因此,为了准确地评价南黄海水相中、古生界的资源潜力,本次研究通过实验首次获得了南黄海盆地海相碳酸盐岩烃源岩的生烃动力学参数.

近 30 年来国内众多学者开展了大量的烃源岩生烃动力学试验与研究(蒋启贵等,2011;郑伦举等,2011b;汤庆艳等,2013;张莉等,2017).通过这些研究,建立了一套完整的针对全岩或干酪根的生烃动力学试验方法及流程.从物质平衡及与外界物质交换的角度来看,生烃动力学方法实验装置有 3 种:开放体系、限定体系(又称封闭体系)及介于两者之间的半开放体系.

1 区域地质背景

南黄海盆地位于南黄海海域,属于华南板块下扬子块体东部的一个组成部分(姚永坚等,2005;冯志强等,2008;赵文芳等,2011).中、古生界(Z-T)在盆地内均有发育,新生界主要分布于盆地内的坳陷区,该盆地自北向南依次为北部坳陷、中部隆起、南部坳陷、勿南沙隆起(图 1).南黄海盆地海相中、古生界地层条件与下扬子陆区中、古生界相似,发育 4 套烃源岩,主要有下寒武统幕府山组泥岩、下志留统高家边组泥岩、下二叠统栖霞组灰岩和上二叠统龙潭组碳质泥岩(梁狄刚等,2008).另外,下三叠统青龙组灰岩在局部地区有机质丰度较高,也是潜在的烃源岩.与我国大多

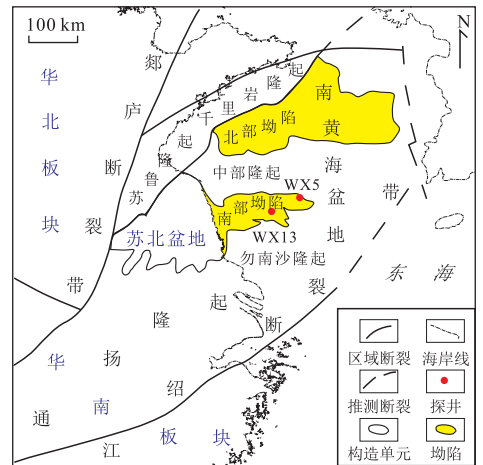


图 1 南黄海盆地位置

Fig.1 Location of the South Yellow Sea Basin

数海相盆地相似,南黄海盆地碳酸盐岩分布虽然广泛,但存在着有机质丰度低、热演化程度高的特点,而要准确求取烃源岩的生烃动力学参数往往要求样品的有机质丰度高、热演化程度低(耿新华等,2005;饶松等,2010),这对缺乏低演化程度样品的南黄海盆地来说是一个巨大的挑战,本次研究只能选取南黄海盆地热演化程度相对较低的样品进行实验.由于南黄海盆地目前钻孔尚未获得下古生界烃源岩样品,本文仅对下二叠统栖霞组灰岩和下三叠统青龙组灰岩做了生烃实验及生烃动力学参数模拟.

2 实验方法及样品

2.1 实验方法及样品概况

在 3 种实验方法中,封闭体系模拟比较适用于有二次裂解、尤其是成熟度相对较高的样品.由于南黄海古生界的烃源岩样品均有一定的成熟度,因此,限定体系较适合本次实验.实验在中国科学院广州地球化学研究所的高温高压黄金管—高压釜封闭体系进行,实验样品为干酪根.

栖霞组灰岩是南黄海主要的烃源岩之一,有机碳含量为 0.2%~2.0%,为保证试验准确性,生烃动力学试验选取了 WX13 井下二叠统栖霞组灰岩、WX5 井下三叠统青龙组灰岩岩心样品.在试验之前,分别对 2 块样品进行了有机岩石学测试,结果表明:栖霞组灰岩样品 TOC 为 0.25%、 $S_1 + S_2$ 为 0.1 mg/g、 R_o 为 0.67,有机质类型为 I 和 II₁ 型;青龙组灰岩样品 TOC 为 0.16%、 $S_1 + S_2$ 为 0.05 mg/g、 R_o 为 0.78,有机质类型以 I 和 II₁ 型为

主,少量Ⅲ型.由于 2 个样品的有机碳含量较低,故对其进行了干酪根处理.

2.2 实验步骤

第一步,样品采集并进行处理为干酪根.第二步,对所选样品进行生烃动力学热模拟实验,热解生烃实验材料采用黄金管,将样品在氩气保护下封入金管,样品封装在氩气箱中进行,确保没有空气污染;金管用脉冲氩弧焊机焊封,焊封时对金管进行水冷,保证焊接时金管温度不高于 40℃;将金管放置于高压釜中,通过高压泵对高压釜充水,高压水使金管产生柔性变形,从而对样品施加压力.第三步,在 50 MPa 的压力、2℃/h 和 20℃/h 的升温速率、封闭体系下进行干酪根热模拟,测定各项热解产物.

3 实验结果及生烃动力学参数模拟

3.1 栖霞组灰岩实验结果

WX13 栖霞组灰岩干酪根在封闭体系下产出甲

烷、乙烷、丙烷、CO₂ 及极少量的 C₄、C₅ 气体,图 2 为各气体组分及干燥系数随热模拟温度的变化特征.在本次实验中,受烃源岩显微组分与成熟度限制,C₄、C₅ 气体含量极低,故未给出其产率演化特征.从气体产率图中可以看出(图 2):

(1)干酪根裂解以产生甲烷气为主.在热解过程中,裂解气干燥系数由 85%左右逐渐上升到 100%.值得注意的是,虽然 C₂—C₅ 的裂解可以生成甲烷,进而造成干燥系数的增高,但由于其产率极低(不超过 1 mL/g TOC),故 C₂—C₅ 裂解生成的甲烷与整个甲烷产率相比是非常小的.因此,气体干燥系数的增加主要与干酪根的持续脱甲基作用相关,而不是 C₂—C₅ 裂解.

(2)不同组分具有不同的演化特征.随着热解温度的增高,甲烷产率不断增加,直至最高值.以 2℃/h 实验为例,甲烷开始大量生成的温度约为 395℃,对应产率为 7.06 mL/g TOC,在 600℃时其最高产率为 101 mL/g TOC.这表明甲烷是热解过程中最稳定的组分.对于乙烷和丙烷而言,产率达到最大值后

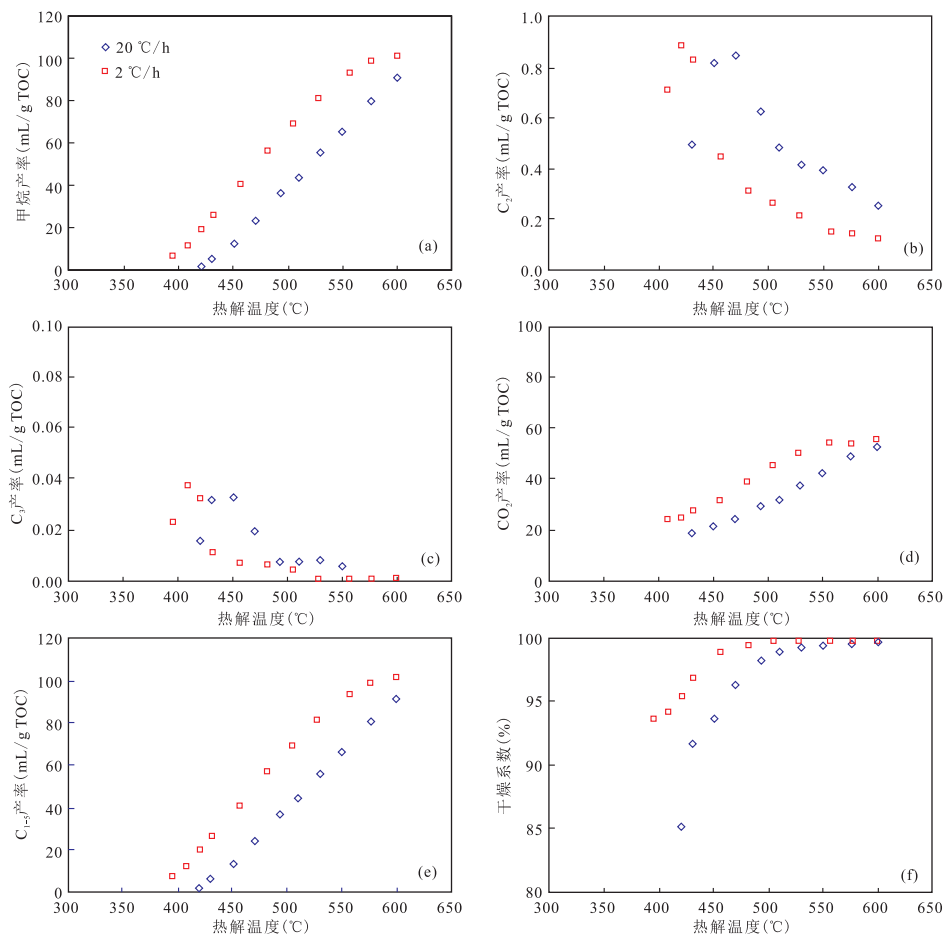


图 2 栖霞组灰岩气体产率与热解温度关系

Fig.2 Relationship between gas generation rate and pyrolysis temperature of Qixia limestone

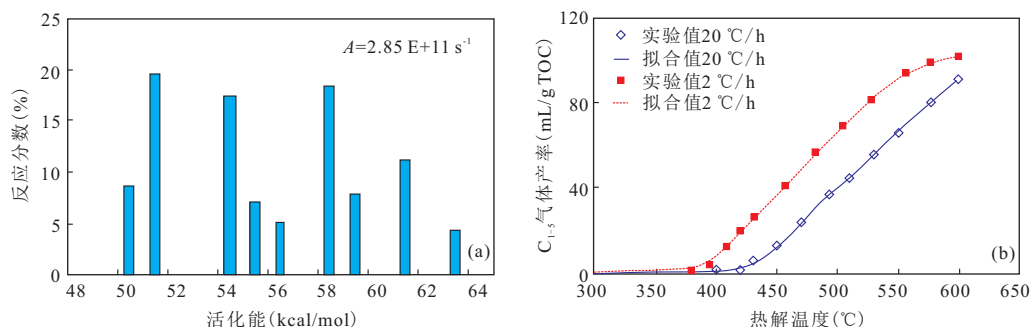


图 3 栖霞组灰岩样品活化能频率分布(a)及拟合结果(b)

Fig.3 Activation energy distribution of carbonate sample in Qixia Formation (a) and the result of fitting (b)

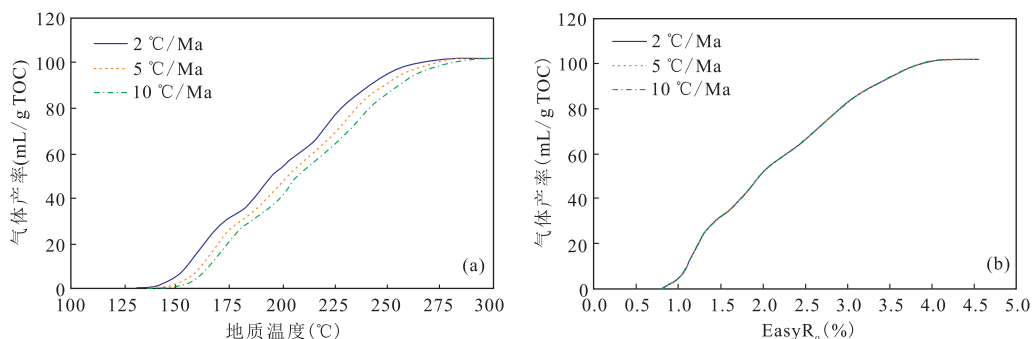


图 4 栖霞组灰岩样品不同地温条件(a)及成熟度条件(b)下的生气产率

Fig.4 Hydrocarbon generation rate at different geo-temperatures (a) and maturities (b) of Qixia limestone

开始降低,表明其为中间产物,在更高温度下会裂解形成更小的分子,如甲烷和焦沥青.同时,乙烷和丙烷的产率非常低,在 2 °C/h 实验条件下,乙烷的最高产率为 0.89 mL/g TOC,出现在 420.8 °C;丙烷的最高产率不到 0.1 mL/g TOC,出现在 408.8 °C.从甲烷到乙烷再到丙烷,最高产率出现的温度逐渐降低,表明其热稳定性逐渐变差,开始裂解的温度越来越低.

3.2 栖霞组灰岩生烃动力学参数模拟

利用生烃动力学模拟软件 Kinetics05 拟合计算了 WX13 井栖霞组灰岩 C₁₋₅ 气体生成的动力学参数(图 3). 经过模拟, C₁₋₅ 气体生成的频率因子为 2.85E+11 s⁻¹, 最低活化能为 50 kcal/mol, 最高活化能为 63 kcal/mol, 主峰活化能为 52 kcal/mol(图 3a). 该套参数能够很好地对实验数据进行拟合(图 3b). 将这套动力学参数外推到不同地温条件下, 模拟结果表明, 不同的升温速率对天然气的生成有一定的影响, 升温速率越慢, 对应的生气温度越低(图 4a). 以 2 °C/Ma 升温速率为例, 天然气的大量生成始于 150 °C 之后(对应转化率为 0.05), 在 250 °C 之后开始进入生气末期阶段(对应转化率大于 0.95). 然而, 气体产率随 EasyR₀ 的变化却基本不受升温速率的影响(图 4b), 表明可应用 EasyR₀ 值较

准确地估算盆地内具有不同埋藏历史的构造部位的生烃量.

3.3 青龙组灰岩实验结果

WX5 井青龙组灰岩干酪根在实验条件下产出的甲烷等气体随热模拟温度的变化特征见图 5, 不同组分产率相差较大. 随着热解温度的增高, 甲烷产率不断增加, 直至最高值. 以 2 °C/h 实验为例, 在 408 °C 左右, 甲烷产率约为 6.7 mL/g TOC, 在 600 °C 左右其最高产率为 76 mL/g TOC. 乙烷、丙烷及 C₄、C₅ 的产率极低, 所测的最高产率仅为 2.7 mL/g TOC, 所以在图 5 中 C₂—C₅ 气体的产率合并显示. 干酪根裂解以产生甲烷气为主, 裂解气干燥系数由 67% 左右逐渐上升到 100%, 虽然 C₂—C₅ 的裂解可以生成甲烷, 进而造成干燥系数的增高, 但由于 C₂—C₅ 产率较低, 由 C₂—C₅ 裂解生成的甲烷与整个甲烷产率相比是非常小的. 因此, 气体干燥系数的增加主要与干酪根的持续脱甲基作用相关, 而不是 C₂—C₅ 裂解.

3.4 青龙组灰岩生烃动力学参数模拟

应用动力学参数模拟软件对青龙组灰岩的实验数据进行拟合, 结果如图 6 所示, 其频率因子为 9.88E+11 s⁻¹, 活化能分布范围在 50~64 kcal/mol

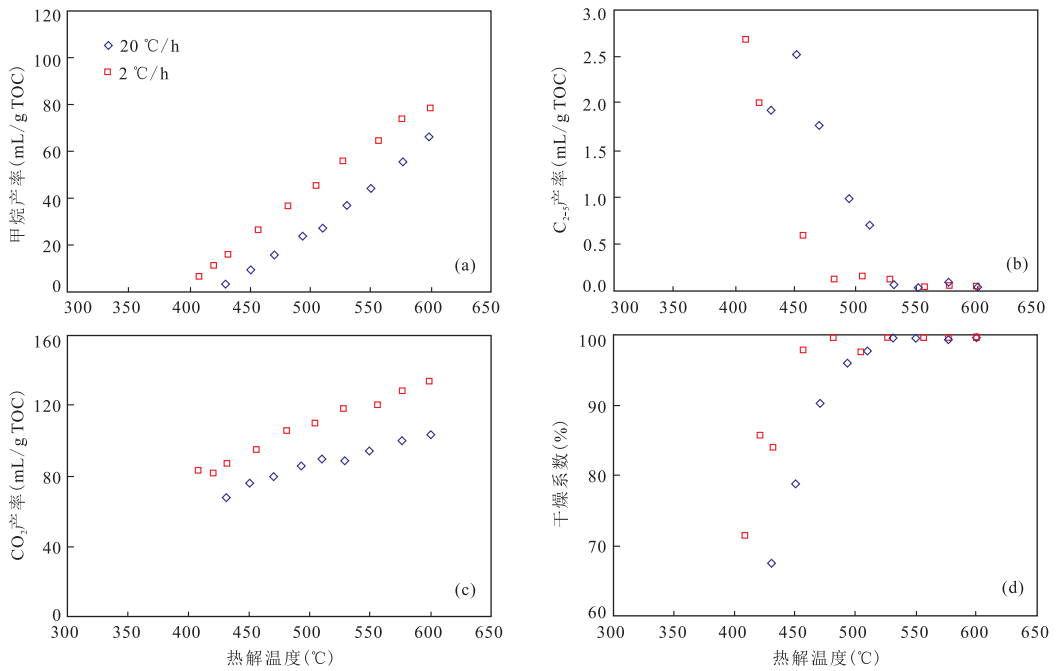


图 5 青龙组灰岩气体产率与热解温度关系

Fig.5 Relationship between gas generation rate and pyrolysis temperature of Qinglong limestone

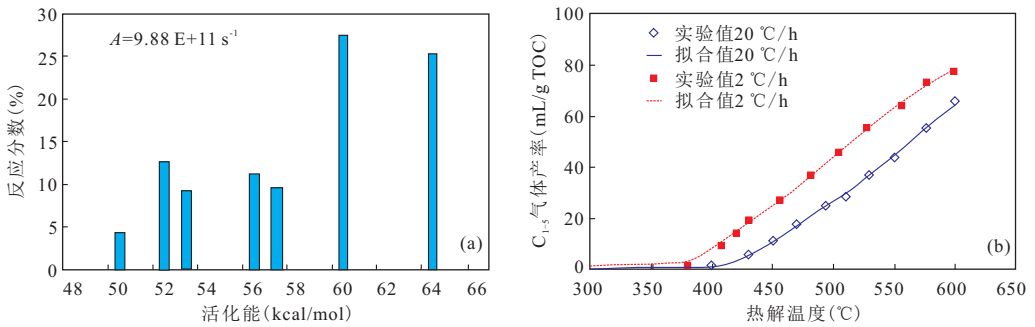


图 6 青龙组灰岩活化能分布特征(a)与拟合结果(b)

Fig.6 Activation energy distribution of carbonate sample in Qinglong Formation (a) and the result of fitting (b)

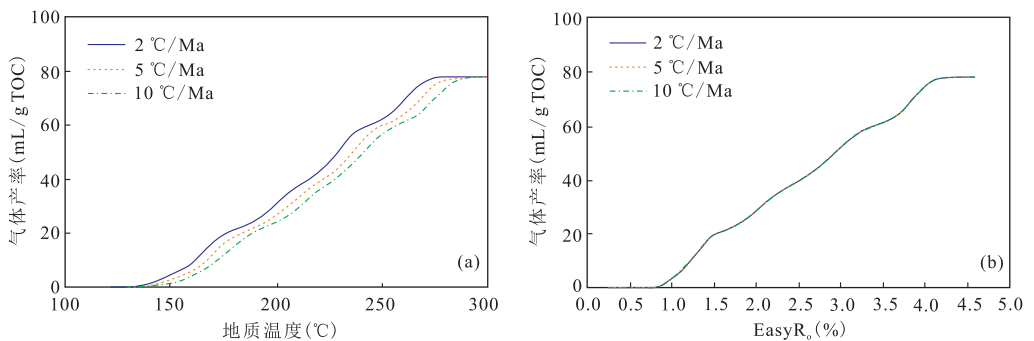


图 7 不同地温(a)及成熟度条件(b)下的青龙组灰岩生气特征

Fig.7 Hydrocarbon generation rate at different geo-temperatures (a) and maturities (b) of Qinglong limestone

之间,活化能主峰为 60 kcal/mol,所占百分比为 27.37%(图 6a)。该套参数能够很好地拟合实验数据(图 6b)。将该动力学参数模拟到地质条件下得到的

气体生成特征如图 7 所示,可以看出不同的升温速率对天然气的生成有一定的影响,升温速率越慢,对应的生气温度越低(图 7a)。以 2 °C/Ma 升温速率为

例,天然气的大量生成始于 155 °C 之后(对应转化率为 0.05),在 275 °C 之后开始进入生气末期阶段(对应转化率大于 0.95);青龙组灰岩气体产率随 EasyR₀ 的变化却基本不受升温速率的影响(图 7b),表明可应用 EasyR₀ 值较准确地估算盆地内具有不同埋藏历史的构造部位的生烃量。

4 讨论

本次应用黄金管一高压釜热模拟体系对 2 块碳酸盐岩烃源岩样品开展了烃类生成热模拟实验及生烃动力学参数拟合,并将其外推到地质条件下。首次在南黄海盆地获得了碳酸盐岩烃源岩样品的生烃动力学参数。

笔者将南黄海碳酸盐岩烃源岩热模拟结果与其他地区的分析结果对比。根据蒋启贵等(2010)对中国南方海相地层不同类型干酪根热模拟的实验结果,I型、II₁型、II₂型、III型干酪根的主峰活化能分别为 59.95 kcal/mol、59.95 kcal/mol、61.86 kcal/mol、63.06 kcal/mol,对应最低活化能与最高活化能的跨度分别为 3.11 kcal/mol、4.06 kcal/mol、5.97 kcal/mol、10.03 kcal/mol。耿新华等(2005)通过实验取得三塘湖盆地芦苇沟组灰岩全岩及干酪根(以 I 型、II₁ 型干酪根为主)生烃的主峰活化能为 68 kcal/mol,分布范围为 44~71 kcal/mol。

本次实验栖霞组灰岩生烃的主峰活化能为 52 kcal/mol,活化能分布范围在 50~63 kcal/mol 之间;青龙组灰岩生烃的主峰活化能为 60 kcal/mol,活化能分布范围在 50~64 kcal/mol 之间。栖霞组灰岩及青龙组灰岩以 III 型干酪根为主。本次试验结果显示,青龙组灰岩的主峰活化能与蒋启贵等(2010)的实验结果基本相当,而栖霞组灰岩生烃的主峰活化能相对较低。

是不是本次碳酸盐岩烃源岩热模拟样品的有机质成熟度影响了生烃动力学参数呢?根据卢双舫等(2007)对低熟的三塘湖盆地二叠系灰岩样品分别加热到不同熟化程度后再进行二次加热的生烃实验及动力学参数模拟结果,当初次熟化程度 R₀ 分别为 0.59%、0.82%、0.95% 的灰岩样品在进行抽提后再进行二次生烃实验时,其主峰活化能均为 52.55 kcal/mol;而熟化后未进行抽提的前述灰岩样品再进行二次生烃实验时,其主峰活化能则分别为 52.55 kcal/mol、47.78 kcal/mol、45.39 kcal/mol;二次生烃实验中活化能主峰随灰岩样品熟化程度增高而

降低是由于初次生烃形成的残留烃类在二次升温过程中从样品中解析造成的。本次实验中栖霞组灰岩和青龙组灰岩的 R₀ 值为 0.78%、0.67%,栖霞组灰岩生烃的活化能主峰明显低于青龙组灰岩及蒋启贵等(2010)的实验中的中国南方海相 III 型干酪根的实验结果,其原因可能与该样品中已有少量烃形成有关。而青龙组灰岩尽管已达到低熟阶段,但由于其有机碳含量低而造成岩石样品中生烃量相对较低,其实验结果更接近真实的活化能数据。同时,根据卢双舫等(2007)的二次生烃实验,建议在以后的试验中,对 R₀ 值在 0.95% 以下的样品开展生烃动力学试验时,要对样品作抽提处理才能取得更为准确的生烃动力学参数。

5 结论

(1)应用黄金管一高压釜封闭热模拟体系对南黄海盆地 2 个碳酸盐岩烃源岩样品开展了不同升温速率的生烃热模拟实验,栖霞组灰岩热解气体最高产率可达 102 mL/g TOC,高于青龙组灰岩的 78 mL/g TOC。热解气体以甲烷组分为主,栖霞组灰岩甲烷最高产率为 94 mL/g TOC,高于青龙组灰岩甲烷最高产率 76 mL/g TOC,C₂-C₅ 湿气组分较少,干燥系数较大,一般不低于 70%。

(2)通过拟合,WX13 井栖霞组灰岩生烃活化能分布在 50~63 kcal/mol 之间,主峰能为 52 kcal/mol;WX5 井青龙组灰岩生烃活化能分布在 50~64 kcal/mol 之间,主峰能为 60 kcal/mol。青龙组灰岩活化能数据相对真实,而栖霞组灰岩样品可能受残留烃类影响造成实验测得的活化能主峰数据可能偏低,建议以后对中低成熟度的样品作抽提处理才能进行生烃动力学模拟。

(3)不同的升温速率对天然气的生成有一定的影响,但差异不大,升温速率越小,对应的生气温度越低。热成熟度参数 R₀ 与气体产率的关系基本不受地质升温速率的影响,可以利用 EasyR₀ 法对具有不同埋藏热历史的构造单元的生烃量进行预测。

References

- Feng, Z. Q., Chen, C. F., Yao, Y. J., et al., 2008. Tectonic Evolution and Exploration Target of the Northern Foreland Basin of the South Yellow Sea. *Earth Science Frontiers*, 15(6): 219-231 (in Chinese with English abstract).
- Geng, X. H., Geng, A. S., Xiong, Y. Q., et al., 2005. Kinetic

- Simulating Experiment on Marine Carbonate Source Rocks: Comparison of Source Rocks with Isolated Kero-gens. *Geochimica*, 34(6): 612–618 (in Chinese with English abstract).
- Guo, X. W., He, S., Liu, K. Y., et al., 2013. A Quantitative Estimation Model for the Overpressure Caused by Natural Gas Generation and Its Influential Factors. *Earth Science*, 38(6): 1263–1270 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2013.123>
- Han, W. X., Ma, W. J., Tao, S. Z., et al., 2018. Hydrocarbon Generation Potential Evaluation of Upper Paleozoic Limestone in Ordos Basin. *Earth Science*, 43(2): 599–609 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.529>
- Jiang, Q. G., Ma, Y. Y., Li, X., 2011. Application of Single Cold Trap Pyrolysis Chromatography in Source Rock Evaluation. *Petroleum Geology & Experiment*, 33(5): 546–551, 558 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Q. G., Wang, Y. B., Qin, J. Z., et al., 2010. Kinetics of the Hydrocarbon Generation Process of Marine Source Rocks in South China. *Petroleum Exploration and Development*, 37(2): 174–180 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Zhang, Z. H., Ou, G. X., et al., 2014. Chemical Kinetics Study on Organic Matter in Source Rocks in Huangqiao Area. *China Mining Magazine*, 23(6): 92–95 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. M., Zheng, L. J., Jiang, Q. G., et al., 2018. Simulation of Hydrocarbon Generation and Expulsion for Lacustrine Organic-Rich Argillaceous Dolomite and Its Implications for Shale Oil Exploration. *Earth Science*, 43(2): 566–576 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.024>
- Liang, D. G., Guo, T. L., Chen, J. P., et al., 2008. Some Progresses on Studies of Hydrocarbon Generation and Accumulation in Marine Sedimentary Regions, Southern China (Part 1); Distribution of Four Suits of Regional Marine Source Rocks. *Marine Origin Petroleum Geology*, 13(2): 1–16 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. F., Jiang, Z. X., Zhong, N. N., et al., 2009. Hydrocarbon-Generating Dynamic Characteristics of Paleocene Source Rocks in Western Depression, Liaohe Basin. *Earth Science*, 34(5): 799–805 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S. F., Zhong, N. N., Xue, H. T., et al., 2007. Kinetics of the Hydrocarbon Secondary Generation of Carbonate Source Rocks and Its Meaning. *Scientia Sinica Terrae*, 37(2): 178–184 (in Chinese).
- Ma, Y. S., Cai, X. Y., Zhao, P. R., et al., 2010. Distribution and Further Exploration of the Large-Medium Sized Gas Fields in Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 31(3): 347–354 (in Chinese with English abstract).
- Rao, S., Hu, S. B., Wang, J. Y., 2010. Hydrocarbon Generation Kinetic Parameters of Organic Matter: Review and Outlook. *Progress in Geophysics*, 25(4): 1424–1432 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Q. Y., Zhang, M. J., Zhang, T. W., et al., 2013. A Review on Pyrolysis Experimentation on Hydrocarbon Generation. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 35(1): 52–62 (in Chinese with English abstract).
- Tissot, B. P., Welte, D. H., 1984. Petroleum Formation and Occurrence. Springer-Verlag, Berlin.
- Wang, M., Lu, S. F., Xue, H. T., et al., 2011. The Influence and Appraisal of Source Rock Heterogeneity on Kinetic Parameters of Hydrocarbon Generation from Organic Matter. *Earth Science*, 36(3): 530–540 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2011.054>
- Xu, L. H., Chen, J. F., Xue, H. T., et al., 2008. Quantitative Evaluation of Secondary Hydrocarbon Generation of Carbonate Source Rocks Using Chemical Kinetics Method of Hydrocarbon Generation; A Case Study of the Zhujiadun Reservoir. *Geochimica*, 37(3): 251–257 (in Chinese with English abstract).
- Yao, Y. J., Xia, B., Feng, Z. Q., et al., 2005. Tectonic Evolution of the South Yellow Sea since the Paleozoic. *Petroleum Geology & Experiment*, 27(2): 124–128 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Xiong, Y. Q., Chen, Y., et al., 2017. Mechanisms of Shale Gas Generation from Typically Organic-Rich Marine Shales. *Earth Science*, 42(7): 1092–1106 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.088>
- Zhao, W. F., Yang, F. L., Zhuang, J. J., 2011. Analysis of the Tectonic Characteristics of Mesozoic-Palaeozoic in the Middle Uplift of the South Yellow Sea. *Reservoir Evaluation and Development*, 1(5): 6–13 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W. Z., Wang, Z. C., Hu, S. Y., et al., 2012. Large-Scale Hydrocarbon Accumulation Factors and Characteristics of Marine Carbonate Reservoirs in Three Large On-shore Cratonic Basins in China. *Acta Petrolei Sinica*, 33(S2): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, L. J., Guan, D. F., Guo, X. W., et al., 2015. Key Geological Conditions Affecting Pyrolysis Experiments of Marine Source Rocks for Hydrocarbon Generation. *Earth Science*, 40(5): 909–917 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.075>

- Zheng, L. J., He, S., Qin, J. Z., et al., 2011a. Formation Water of Near-Critical Properties and Its Effects on the Processes of Hydrocarbon Generation and Expulsion. *Earth Science*, 36(1): 83–92 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2011.009>
- Zheng, L. J., Ma, Z. L., Wang, Q., et al., 2011b. Quantitative Evaluation of Hydrocarbon Yielding Potential of Source Rock: Application of Pyrolysis in Finite Space. *Petroleum Geology & Experiment*, 33(5): 452–459 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Du, J. H., Xu, C. C., et al., 2014. Formation, Distribution, Resource Potential and Discovery of the Sinian-Cambrian Giant Gas Field, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 41(3): 278–293 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 冯志强, 陈春峰, 姚永坚, 等, 2008. 南黄海北部前陆盆地的构造演化与油气突破. *地学前缘*, 15(6): 219–231.
- 耿新华, 耿安松, 熊永强, 等, 2005. 海相碳酸盐岩烃源岩热解动力学研究: 全岩和干酪根的对比. *地球化学*, 34(6): 612–618.
- 郭小文, 何生, 刘可禹, 等, 2013. 烃源岩生气增压定量评价模型及影响因素. *地球科学*, 38(6): 1263–1270. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2013.123>
- 韩文学, 麻伟娇, 陶士振, 等, 2018. 鄂尔多斯盆地上古生界灰岩烃源岩生烃潜力评价. *地球科学*, 43(2): 599–609. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.529>
- 蒋启贵, 马媛媛, 李欣, 等, 2011. 单冷阱热解色谱仪在烃源岩评价中的应用. *石油实验地质*, 33(5): 546–551, 558.
- 蒋启贵, 王延斌, 秦建中, 等, 2010. 中国南方海相烃源岩生烃过程动力学研究. *石油勘探与开发*, 37(2): 174–180.
- 黎琼, 张枝焕, 欧光习, 等, 2014. 黄桥地区烃源岩有机质的化学动力学研究. *中国矿业*, 23(6): 92–95.
- 李志明, 郑伦举, 蒋启贵, 等, 2018. 湖相富有机质泥质白云岩生排烃模拟及其对页岩油勘探的启示. *地球科学*, 43(2): 566–576. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.024>
- 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等, 2008. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一)南方四套区域性海相烃源岩的分布. *海相油气地质*, 13(2): 1–16.
- 刘立峰, 姜振学, 钟宁宁, 等, 2009. 辽河西部凹陷古近系烃源岩生烃动力学特征. *地球科学*, 34(5): 799–805.
- 卢双舫, 钟宁宁, 薛海涛, 等, 2007. 碳酸盐岩有机质二次生烃的化学动力学研究及其意义. *中国科学(D辑)*, 37(2): 178–184.
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等, 2010. 四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向. *石油学报*, 31(3): 347–354.
- 饶松, 胡圣标, 汪集昶, 2010. 有机质生烃动力学参数研究进展: 回顾和展望. *地球物理学进展*, 25(4): 1424–1432.
- 汤庆艳, 张铭杰, 张同伟, 等, 2013. 生烃热模拟实验方法述评. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 35(1): 52–62.
- 王民, 卢双舫, 薛海涛, 等, 2011. 烃源岩非均质性对有机质生烃动力学参数影响及评价. *地球科学*, 36(3): 530–540. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2011.054>
- 徐立恒, 陈践发, 薛海涛, 等, 2008. 应用生烃动力学法定量评价碳酸盐岩的二次生烃: 以朱家墩气藏为例. *地球化学*, 37(3): 251–257.
- 姚永坚, 夏斌, 冯志强, 等, 2005. 南黄海古生代以来构造演化. *石油实验地质*, 27(2): 124–128.
- 张莉, 熊永强, 陈媛等, 2017. 中国典型海相富有机质页岩的生气机理. *地球科学*, 42(7): 1092–1106. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.088>
- 赵文芳, 杨风丽, 庄建建, 2011. 南黄海中部隆起中—古生界构造特征分析. *油气藏评价与开发*, 1(5): 6–13.
- 赵文智, 汪泽成, 胡素云, 等, 2012. 中国陆上三大克拉通盆地海相碳酸盐岩油气藏大型化成藏条件与特征. *石油学报*, 33(增刊2): 1–10.
- 郑伦举, 关德范, 郭小文, 等, 2015. 影响海相烃源岩热解生烃过程的地质条件. *地球科学*, 40(5): 909–917. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.075>
- 郑伦举, 何生, 秦建中, 等, 2011a. 近临界特性的地层水及其对烃源岩生排烃过程的影响. *地球科学*, 36(1): 83–92. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2011.009>
- 郑伦举, 马中良, 王强, 等, 2011b. 烃源岩有限空间热解生油气潜力定量评价研究. *石油实验地质*, 33(5): 452–459.
- 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等, 2014. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现. *石油勘探与开发*, 41(3): 278–293.