

文章编号: 1001-6112(2011)05-0452-08

烃源岩有限空间热解生油气潜力定量评价研究

郑伦举^{1,2,3}, 马中良^{2,3}, 王强^{2,3}, 李志明^{2,3}

(1. 中国地质大学(武汉) 构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074;

2. 中国石油化工集团公司 油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214151;

3. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151)

摘要: 利用无锡石油地质研究所研制的地层孔隙热压生排烃模拟仪, 选用泌阳凹陷核三段未成熟深灰色泥岩, 采用分温阶连续递进有限空间热压生烃模拟实验方法, 获得了 II₁ 干酪根在不同成熟时期的阶段与累计生油、生气与生烃产率。通过与开放体系的 Rock-Eval 热解生烃动力学对比研究, 首次建立了一套在有限空间条件下烃源岩生油气潜力评价方法, 提出了以下干酪根生烃潜力评价参数: ①残留油潜量与指数; ②干酪根生油潜量与指数; ③干酪根生气潜量与指数; ④干酪根总生烃潜量与指数; ⑤最大生油温度与反射率、最大生气温度与反射率及最高生烃温度与反射率。借助这些生烃评价指标能定量评价干酪根在某个演化阶段生“油”、生“燃气”和生烃潜力, 描述其生油气过程。

关键词: 有限空间生烃模拟; 烃源岩; 油气潜力; 定量评价

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Quantitative evaluation of hydrocarbon yielding potential of source rock: application of pyrolysis in finite space

Zheng Lunju^{1,2,3}, Ma Zhongliang^{2,3}, Wang Qiang^{2,3}, Li Zhiming^{2,3}

(1. Key Laboratory of Tectonic and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Key Laboratory of Petroleum Accumulation, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China; 3. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

Abstract: With the formation porosity thermocompression simulation experiment instrument designed by Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, immature perse mudstones from the 3rd member of Hetaoyuan Formation in the Biyang Sag were pyrolyzed in finite space and with phased, continuous and progressive temperature. The stage and total product rates of oil, gas and total hydrocarbon of type II₁ kerogen during different evolution stages were calculated. Comparison was made between the above-mentioned method and the conventional open-system Rock-Eval experiment. A new evaluation method to study hydrocarbon generation potential in finite space was put forward. The following parameters were used to judge the hydrocarbon generation potential of kerogen. 1) Residual oil potential and index. 2) Oil generation potential and index of kerogen. 3) Gas generation potential and index of kerogen. 4) Total hydrocarbon generation potential and index of kerogen. 5) Maximum temperatures for oil, gas and total hydrocarbon generation and reflectance. Quantitative evaluation of oil, gas and total hydrocarbon generation potential of kerogen during certain stage was made, and the generation process was described using the parameters.

Key words: hydrocarbon generation simulation in finite space; source rock; hydrocarbon generation potential; quantitative evaluation

利用有机质热解生烃模拟实验研究烃源岩在不同成岩演化阶段油气的形成与转化过程, 对于确定烃源岩层系的生油气期, 评价其生油气潜能, 建立油气生成的产率模式, 进而为盆地生油气量的计

算和资源评价提供定性和定量依据具有重要意义。现有的烃源岩生烃能力评价方法从原理上可以归纳为化学动力法和成因体积法^[1-2]。化学动力法是以干酪根热降解的化学反应建立油气生成的数

收稿日期: 2011-05-09; 修订日期: 2011-10-10。

作者简介: 郑伦举(1966—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事油气地球化学实验研究。E-mail: zhenglj_syky@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技部项目(P11060, P08060)资助。

学模型,根据干酪根的活化能、频率因子和古地温模拟计算烃源岩有机质的产烃率^[1]。成因体积法是在不同类型有机质模拟实验的产烃率曲线图版基础上,通过烃源岩埋藏史、热演化史恢复的 $TTI-R$ 值来确定烃源岩有机质的产烃率,然后根据实际烃源岩厚度、有机碳含量等参数计算生油、生气强度^[3]。无论采用那种评价方法,均需要在烃源岩油气生成模拟实验基础上获得不同演化阶段的油气产率,建立烃源岩生烃动力学模型或生烃产率数学模型。然而由于受实验装置的限制以及对油气形成机理认识上的差异,目前大多数热解生烃模拟实验是在比样品孔隙空间大得多的完全密闭或开放的容器中,在不施加载荷压力和流体压力的条件下进行的,主要只强调了物质基础(如:有机质丰度、干酪根类型等)和地温场条件,并没有深入思考油气生成过程中温度、孔隙空间、孔隙流体(地层水)和流体压力等边界条件的共控作用,与烃源岩在地质埋藏条件下的实际演化过程差异很大,势必会影响到有机质的演化历程、所生油气产物的组成和量,在此基础上所建立的各种烃源岩生油气潜力评价方法也就值得商榷了。

本文依据关德范等^[4-5]提出的烃源岩有限空间生油的理论思维和定量模型,利用无锡石油地质研究所研制的地层孔隙热压生排烃模拟仪^[6],选用泌阳凹陷核三段未成熟深灰色泥岩,采用分温阶连续递进有限空间热压生烃模拟实验方法,获得了 II_1 型干酪根在不同成熟时期的阶段与累计生油、生气与生烃产率,通过与开放体系的 Rock-Eval 热解生烃动力学对比研究,初步建立了一套在有限空间条件下烃源岩中干酪根生油气潜力评价方法。

1 模拟实验装置、流程与样品

1.1 地层孔隙热压生、排烃模拟实验

烃源岩热解生、排烃模拟实验是在实验室内借助仪器设备,在短时间内通过高温高压作用“再现”地质条件下烃源岩的油气生成过程。然而现有的热解生烃模拟装置在实验条件的设置方面未将温度、时间、压力、流体性质、矿物介质和生烃空间等边界条件作为一个整体加以综合考虑,与地下实际演化条件存在较大差异^[7-8]。Rock-Eval 热解仪是有机质在无压、无水及无穷空间(开放)中进行的热降解反应;玻璃管或金属高压釜模拟实验一般是在低流体压力、无静岩压力、少量水或水蒸气及较大的生烃空间(远大于孔隙空间)中进行的热降解反应。从现有的认识水平可知:烃源岩生烃演化的实

际地质条件是在有限的孔隙空间中,在有液态地层水和矿物介质参与下,在相对低温(60~200 °C)、较高孔隙流体压力(30~120 MPa)和静岩压力(60~200 MPa)等因素直接或间接作用下,在地质时间尺度内沉积岩中的有机质在经历了一系列复杂的生物化学与物理化学作用之后才生成油气的。地质条件下烃源岩的生烃过程既不是完全封闭,也不是完全开放,而是一个温度压力共控、多种流体共存、受一定空间限制(孔隙、裂缝等)的半封闭一半开放边生边排的过程。基于这种认识,无锡石油地质研究所设计研制了地层孔隙生排烃模拟实验仪^[7],并形成了独具特色的有限空间热解生排烃模拟实验技术。这种生排烃模拟实验属于可控生排烃体系,是在保留烃源岩原始矿物组成结构和有机质赋存状态、在与孔隙空间接近的生烃空间(V)中完全充满高压液态水(地层流体 L)、同时考虑到与地质条件相近的上覆静岩压力(P)、地层流体压力(P)和围压(P)的条件下所进行的有机质高温(T)短时间(t)热解生烃反应及可控压差排烃模拟实验,即 PVT-t-L 共控条件下的烃源岩生、排烃模拟实验。

1.2 模拟实验条件与流程

1.2.1 模拟实验条件

本次有限空间模拟实验采用人工压制小岩心,直径 3.5 cm;与地质条件相近的地层流体压力(21~69 MPa)、上覆静岩压力(39~142 MPa),相当于地下埋深 1 600~5 500 m 以上;模拟温度为 275~500 °C,相当于从未熟到高过成熟, R_o 在 0.4%~3.5%;岩石样品孔隙中完全充满高温高压液态地层水;与孔隙空间接近的生烃空间,150 g 样品生烃空间在 16~25 mL 之间,相当于孔隙度在 25%~60%。不同温阶下有限空间生烃模拟实验边界条件参照了泌阳凹陷核三段烃源岩层系的埋藏史与热演化史^[9-11],见表 1。

1.2.2 模拟实验流程

为了进一步深入剖析干酪根在受热加压条件下的生烃演化过程,获得其阶段油、气、烃产率,建立烃源岩生烃潜力评价方法,基于对沉积有机质的多元连续递进成烃演化过程的认识,本次研究设计了一种分温阶连续递进热压生烃模拟实验方案。其实验流程是首先将未成熟原始岩样用氯仿抽提沥青“A”后,加热到设定温度和压力,恒温 48 h 后降温收集气体和排出油,并对其残样进行抽提,除去干酪根在此温度压力下生成的可溶有机质,再用此抽提后的残样进行下一个更高温度阶段的热压

表 1 有限空间生烃模拟实验边界条件

Table 1 Experimental conditions of hydrocarbon generation simulation in finite space

来样号	模拟温度/ °C	相当埋深/ m	静岩压力/ MPa	流体压力/ MPa	生烃空间/ mL
泌 215—原样		1 532			
泌 215—275	275	1 600	39	21	25
泌 215—300	300	1 800	44	23	25
泌 215—310	310	1 900	46	26	25
泌 215—325	325	2 100	51	31	24
泌 215—330	330	2 200	55	34	24
泌 215—340	340	2 300	57	37	23
泌 215—350	350	2 400	58	41	22
泌 215—360	360	2 700	67	44	22
泌 215—370	370	2 900	72	46	21
泌 215—380	380	3 100	78	49	21
泌 215—400	400	3 600	92	50	18
泌 215—425	425	4 000	105	54	17
泌 215—450	450	4 500	116	56	16
泌 215—500	500	5 500	142	69	16

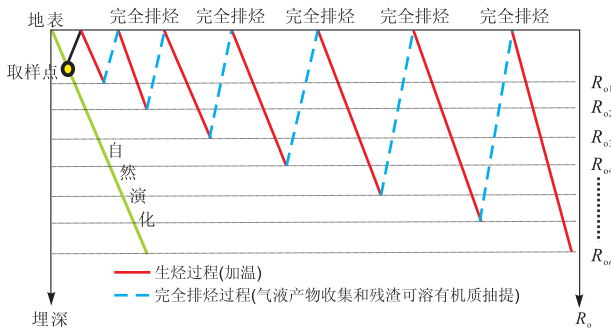


图 1 分温阶连续递进有限空间热解生排烃模拟实验所表示的生烃史示意

Fig. 1 Hydrocarbon generation history simulated in finite space and with phased, continuous and progressive temperature

生烃模拟,再次完全排烃(指排出在该温压阶段已生成的全部气体和可溶有机质)后,用残样再进行下一个更高演化阶段的热解生烃模拟实验,依次类推,这种模拟实验方式所表示的烃源岩生烃演化过程如图 1 所示。这种生排烃模拟方法为单温度点边生边排烃,可以获得干酪根在不同演化阶段的阶段生气、生油以及生烃量。

烃源岩有限空间生排烃模拟实验流程一般包括样品制备、装样、加温加压、取样与产物地化分析等步骤。

(1)制样装样:考虑到烃源岩的非均质性,将样品粉碎到 60 目用氯仿抽提除去可溶有机质,充分混匀以确保样品的均一性与代表性。将抽提过的

岩样装入样品室,用一定的机械压力压制成直径为 3.5 cm 的小圆柱体岩心。

(2)加温加压模拟:①试漏:将装有岩心样的样品室安装在反应釜中,施压密封后,充入 5~10 MPa 的惰性气体,放置试漏,待不漏后,放出气体,用真空泵抽真空后再充气,反复 3~5 次,最后抽成真空。②注水:用高压泵注入 60~80 MPa 的高压水,让压制的岩心样孔隙空间中被水完全充满。为了确保整个生烃过程中生烃空间被高压液态水所充满,升温之前流体压力不低于 2~3 MPa。③压实升温:启动机械加压装置对岩心样施加设定的静岩压力进行压实,同时启动温度控制器和加热炉按 1 °C/min 的升温速率升至设定的温度,达到设定温度后再恒温 48 h 进行有限空间生烃模拟实验。

(3)产物收集与定量分析:①气体与排出油的收集定量:待整个反应体系温度降到 150 °C 时,打开排烃阀门排出油气水混合物,通过冷阱分离油水与气体,被冷冻的油水混合物用有机溶剂萃取分离油水获得排出油;气体经计量体积后收集,再用气相色谱仪分析其成分,计算各气体物质的量。②残留油与固体残样的收集定量:每次模拟后的烃源岩残样称重后,用氯仿抽提沥青“A”,即为残留油。并取少量样品进行全岩反射率测定,获得相应的镜质体反射率值。残留油与排出油之和为总油,总油与烃气之和为总烃。

1.3 模拟实验样品

实验样品(泌 215)为泌阳凹陷泌 215 井核三段的未成熟深灰色泥岩,埋深 1 532.5 m, $R_0 = 0.35\%$, H/C 和 O/C 原子比分别为 1.27 和 0.09,热解氢指数 $I_H = 684 \text{ mg/g}$, $TOC = 3.22\%$, 沥青“A”为 0.041 9%, $T_{max} = 445 \text{ °C}$, $S_1 = 0.09 \text{ mg/g}$, $S_2 = 22.30 \text{ mg/g}$,该烃源岩的干酪根类型为 II_1 型,基本上可以代表中国东部陆相断陷盆地发育的湖相优质烃源岩。

为了对比研究开放体系热解与有限空间热解生烃产率与演化过程的差异,本次研究还利用 Rock-Eval 6 型热解仪和 Optkin 动力学软件,选择 5, 15, 25 °C/min 3 种升温速率对同一个样品进行了动力学分析,获得了其瞬时产烃率与累计产烃率曲线。

2 分阶段连续递进有限空间热解生烃特征

图 2 是泌 215 井核三段未成熟深灰色泥岩采用分温阶连续递进有限空间热解模拟实验所得到的阶段生气、生油与总生烃产率与成熟度的关系曲线。从中可知,该深灰色泥岩的阶段烃气、总油与

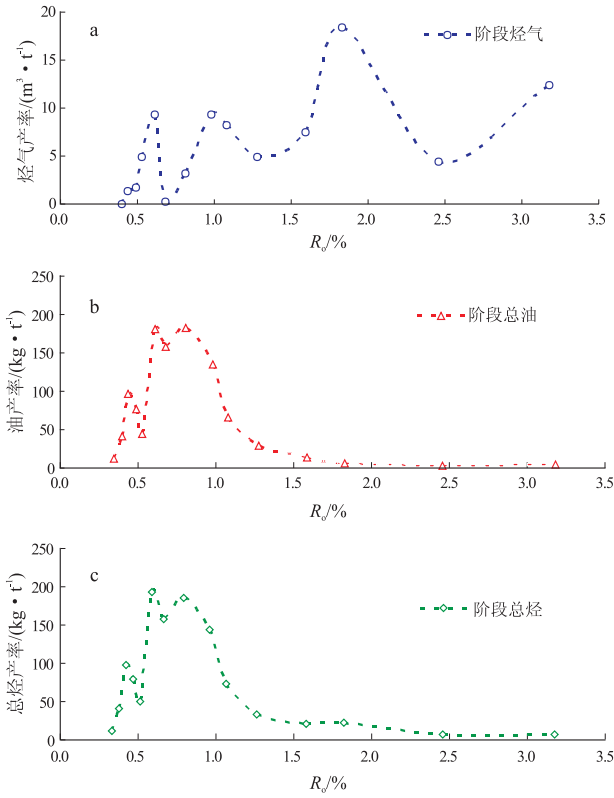


图 2 分温阶连续递进有限空间热解模拟实验阶段生油、生气与总生烃产率

Fig. 2 Stage product rates of oil, gas and total hydrocarbon simulated in finite space and with phased, continuous and progressive temperature

总烃产率随热演化程度的增加,均呈现出明显的阶段性变化趋势,即存在阶段性的生油、生气与总生烃高峰期。

II₁ 型干酪根经过人工加温加压之后具有以下生油、生气特征:

(1) 烃气产率特征: II₁ 型干酪根随着成熟度的提高,明显地存在 3 个相对的阶段生气高值范围,对应的镜质体反射率分别为 0.61%, 0.98%, 1.83%(图 2a),这正好与干酪根成熟早期生成热催化过渡带气^[12]、成熟期间生成正常原油伴生气和高成熟期生成正常凝析油伴生气相对应。但与传统的生油理论认识不一致的是“生气死亡线”并没有出现在 Ro=2.0% 附近, Ro=3.0% 时这个阶段的烃气产率值在累计烃气产率中所占百分比超过 10%(图 2a, 3a),说明在该成熟度时的干酪根仍然具有一定的产烃气潜力。即使在 Ro 大于 3.0% 时, II₁ 型干酪根阶段烃气产率还有增大的趋势(图 2a)。

(2) 总油产率特征: 阶段总油产率存在 2 个相对高值范围,对应的镜质体反射率分别在 0.44%~0.53% 和 0.61%~1.08%(图 2b),正好与传统的未

熟—低熟油及成熟“生油窗”的成熟度范围一致^[13]。当 Ro ≤ 0.61% 时,此低成熟演化阶段干酪根生油量只占累计生油量的大约 25%; 在 0.61% < Ro ≤ 1.08% 成熟阶段,干酪根生油量接近累计生油量的 70%(图 3b); 而当 Ro > 1.08% 之后, II₁ 型干酪根剩余生油潜力已不足 5%(图 4),这与经典的干酪根生油学说一致。但与传统的基于开放体系或封闭体系热解模拟实验结果对于干酪根生烃演化过程的描述相比,有限空间热解模拟实验结果能更加精细地刻画干酪根在不同演化阶段的生油、生气以及生烃过程。

(3) 总烃产率特征: 通过对比阶段烃气产率、总油产率和总烃产率值的相对大小(图 2),可以看出

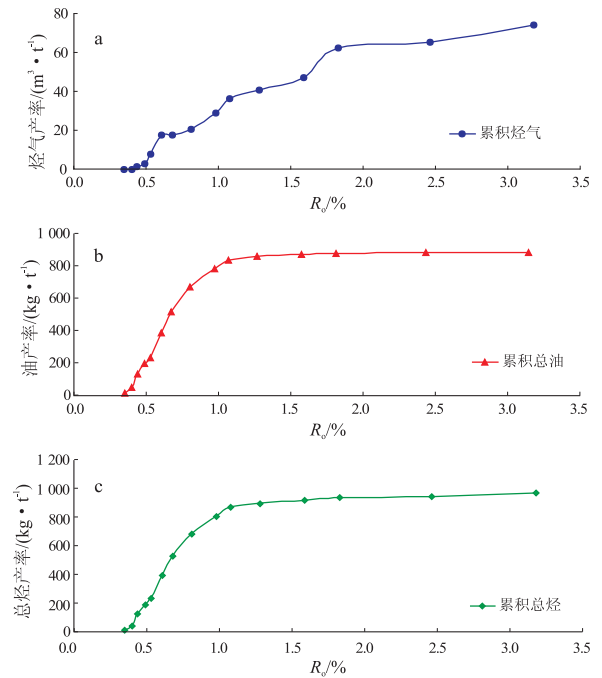


图 3 分温阶连续递进有限空间热解模拟实验累积生油、生气与总生烃产率

Fig. 3 Accumulated product rates of oil, gas and total hydrocarbon simulated in finite space and with phased, continuous and progressive temperature

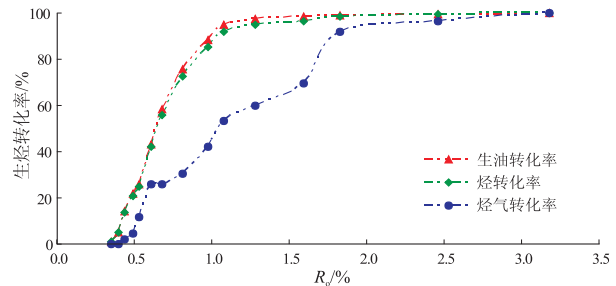


图 4 分温阶连续递进有限空间热解模拟实验不同演化阶段生烃转化率

Fig. 4 Hydrocarbon conversion rate during different stage simulated in finite space and with phased, continuous and progressive temperature

湖相Ⅱ₁型干酪根主要以生油为主,累计油产率占总烃产率的比例可以超过 90%,而烃气产率所占比例则不超过 10%,其阶段总烃产率随成熟度的变化趋势主要受阶段油产率的控制。进入成熟阶段后期,尽管还具备一定的生气潜力,但当 $R_o > 1.08\%$ 之后,残余干酪根的剩余生烃潜力已不到 10%(图 4),已不再具有大量的生烃能力,烃源岩的生烃潜力主要取决于残留油的再生烃能力,而不是残余干酪根的生烃能力。

(4)湖相Ⅱ₁型干酪根的生烃演化特征:从图 2 所示的阶段生烃产率曲线、图 3 所示的累计生烃曲线以及图 4 所示的生烃转化率曲线可知:典型湖相Ⅱ₁型干酪根的生油是一个短暂的突变过程(主要在成熟的早中期),而生烃气是一个相对持续的渐变过程(从低成熟直到高过成熟),如果考虑到地层流体压力对可溶有机质向烃气转化的抑制作用^[8],那么油气的生成与保存将是一个更为漫长的地质演变过程。

在干酪根分温阶连续递进有限空间热解模拟生、排烃过程中,由于烃源岩中干酪根的生烃过程是间歇封闭的,演化过程是连续递进的,排烃是完全开放的,也就是说在前一个封闭生烃阶段所生成的油气被全部排出去了,并没有参与后期更高演化阶段的热裂解演化(即没有可溶有机质的二次裂解),而干酪根的热演化程度从低成熟到高成熟是连续递进的,因此这种热解生烃模拟过程主要反应了干酪根在不同演化阶段所能生成的最大产油与产烃气量,相当于 Rock-Eval 热解实验中的边生边排模式。但与其不同之处是通过这种热解生烃模拟实验可以分别获取不同成熟度干酪根生成的全部“油”、“烃气”与“总烃”产率,而不是像 Rock-Eval 热解生烃那样只能告诉我们岩石中已生成的可挥发烃 S_1 和岩石中有机质热解烃 S_2 (热解“烃”不是油气,只是在实验温度下可以挥发、被氢火焰检测器检测到的碳氢化合物)之和,即所谓的烃源岩产烃潜量(PG),却不能分别提供干酪根的生油潜量、生烃气潜量与总烃潜量及与之对应的实测镜质体反射率。因此利用有限空间热解生烃模拟不仅能够更加精细地描述干酪根的生油、生气过程,而且可以更加合理地评价其生油、生气与生烃潜力。

3 有限空间热解生油气潜力评价

3.1 干酪根有限空间生烃潜力定量评价参数

元素分析(H/C 与 O/C 原子比)和生油岩评价技术(Rock-Eval 热解)常常被认为是评价干

酪根成烃特征与潜力的简洁、快速、有效的方法。但是,由于在 Rock-Eval 热解实验过程中无法鉴别在某个升温阶段生成的到底是“油”还是“烃气”,只能检测到在这个温度时能够挥发又能为氢焰离子检测器识别的低分子量“烃类物质”——它不一定是“油”,因而也只能提供干酪根大分子在生油气规律方面的一些宏观参数,也就是只能提供瞬时生“烃”产率峰值与累计生“烃”产率曲线。此外,由于 Rock-Eval 热解实验是在一种“无水无压的开放体系”中进行的干酪根高温热解—裂解生烃,这极有可能会干酪根的“焦化作用”,造成烃源岩的“生烃死亡线”提前和生烃潜力评价过低的严重缺陷。

尽管热解色谱质谱(PY-GC-MS)可以给出产物分子级定量分析数据,能充分展示烃类生成的精细分子结构信息,并进行分子热降解动力学的计算以及热演化过程中干酪根成烃产物的预测等生烃机理与生烃潜力方面的研究,但由于其热解生烃所设置的条件与 Rock-Eval 热解仪一样也是“无水无压无限空间”,干酪根在这种人工实验条件下的演化过程可能与地质条件下的演化过程差异较大。因为在提高模拟温度加快生烃反应速度,以补偿漫长地质时间的同时,不可避免地也改变了生烃反应的途径,也就是说人工热解生成的油气与自然演化生成的油气在分子组成上差异很大。

基于上述分温阶连续有限空间热解生烃特征,以及利用岩石 Rock-Eval 热解结果评价烃源岩生烃潜力方面存在的不足,为更加合理地定量评价烃源岩中干酪根的生油气潜力,提出以下几个定量评价参数:①残留油潜量 RS_o 和指数 RI_o : 烃源岩中残留可溶有机质(氯仿沥青“A”)分别与岩石质量、总有机碳质量(C_{OT})的比值(相当于 S_1/C_{OT}),它表示干酪根在经历了某个热演化阶段生排油气之后残留在烃源岩中的可溶有机质量。②干酪根生油潜量 KS_o 和指数 KI_o : 烃源岩中干酪根在不同温度或成熟度条件下热解所生成可溶有机质的累计质量分别与岩石质量、总有机碳质量的比值,代表了烃源岩最大生油潜量。③干酪根生气潜量 KS_g 和指数 KI_g : 烃源岩中干酪根在不同温度或成熟度条件下热解所生成烃气的累计质量分别与岩石质量、总有机碳质量的比值,代表了烃源岩中干酪根最大生成烃气的潜量。④干酪根总生烃潜量 KS_H 和指数 KI_H : 烃源岩中干酪根在不同温度或成熟度条件下热解所生成的可溶有机质及烃气的累计量分别与岩石质量、总有机碳质量的比值,相当于 $(S_1 + S_2)/C_{OT}$,

代表了烃源岩最大生油气潜量。⑤最大生油温度 T_{O-max} 和反射率 OR_{O-max} 、最大生气温度 T_{G-max} 和反射率 GR_{O-max} 、最高生烃温度 T_{H-max} 和反射率 HR_{O-max} ：烃源岩中干酪根最大阶段生油产率、最大阶段烃气产率和阶段生烃产率所对应的镜质体反射率(相当于 Rock-Eval 热解生烃过程中干酪根最大热解烃量对应的加热温度 T_{max} ，反映了烃源岩热解生油、生气及生烃达到最高时的成熟度，相比 Rock-Eval 热解产烃潜量评价方法而言，直接用成熟度指标比用实验温度来衡量最大生烃时的热解演化程度更具有实际地质意义。

3.2 II₁ 型干酪根生油气潜力定量评价

图 5 是利用烃源岩有限空间热解生烃模拟与开放体系 Rock-Eval 热解生烃(升温速率分别为 5, 15, 25 °C/min)所得到的阶段生烃产率、累计生烃产率及生烃转化率与模拟温度之间的对比关系曲线。为了便于 2 种热解模拟方式的对比研究, 将 Rock-Eval 热解生烃的每一个升温速率所得到的瞬时生烃产率按照 10 °C 的温度区间进行累加, 得到温度每升高

10 °C 的阶段生烃产率, 再将 3 种升温速率的 10 °C 阶段生烃产率进行加权平均。表 3 为根据 2 种热解生烃实验的阶段、累计产率及其转化率计算所得到的生油气潜力评价参数。

从图 5 与表 2 对比可知, 利用 2 种热解生烃模拟实验所获得的 II₁ 型干酪根有关生烃潜力评价参数差异较大。从其不同模拟温度下的阶段生烃产率曲线(图 5a)可以看出, 无论是有限空间热压生烃还是 Rock-Eval 热解生烃均存在 2 个相对峰值, 当温度达到 500 °C 时基本上不再具有生烃能力, 但有限空间热压生烃最高生烃温度 T_{H-max} 为 330 ~ 350 °C, 对应的最大反射率 HR_{O-max} 为 0.61% ~ 0.81%, 比 Rock-Eval 热解峰温 445 °C 提前了 100 °C 左右。从两者的转化率曲线(图 5c)也可以看出这种差距, 在有限空间条件下烃源岩达到 10% 的生烃转化率对应的模拟温度为 300 °C (即进入生烃门限的温度), 其镜质体反射率大约为 0.45% (图 4); 达到 90% 转化率的温度为 370 °C, 对应的 R_o 值为 1.08%。利用 Rock-Eval 热解实验时在 10% 和 90% 生烃转化率对应的热解温度分别为 400 °C 和 460 °C, 高出前者近 100 °C。这种热解峰温的高低差异表明在 PVT-t-L 共控条件下烃源岩中干酪根的生油气演化并不需要那么高的能量, 这也暗示了利用 Rock-Eval 热解实验所计算出来的生烃动力学参数——活化能可能严重偏高。导致这种差异的主要原因是 2 种热解生烃模拟实验所设置的边界条件相差较大。尽管 Rock-Eval 热解法在不同类型干酪根的产烃量、油气生成动力学研究方面积累了大量资料, 是快速评价烃源岩的有效手段, 但这种评价只是相对这种人工实验条件而言, 并不能较好地反映烃源岩在地下的生烃演化过程。由于其主要只是考虑了热解温度也就是热力对有机质成烃过程的影响, 其它条件与地质演化条件相差甚远, 因此所获得的一系列地化参数(S_1, S_2, T_{max}, I_H 等)和化学动力学参数只是表征了在这种实验反应条件下有机质的热裂解特征, 只适合用于比较沉积有机质的相对生烃潜力大小, 但对有机质成烃机理解释是不完整的、片面的, 有些地方甚至是错误的, 也就难以用于描述实际地质条件下的生烃演化过程, 因此并不是模拟烃类生成过程的理想手段。

除了上述生烃演化过程的差异之外, 还有对烃源岩生烃潜力评价上的不同。由表 2 可见, 利用 Rock-Eval 热解法评价烃源岩生烃潜力大小的主要参数有产烃潜量(生油势) $PG(PG = S_0 + S_1 + S_2)$ 、有效碳

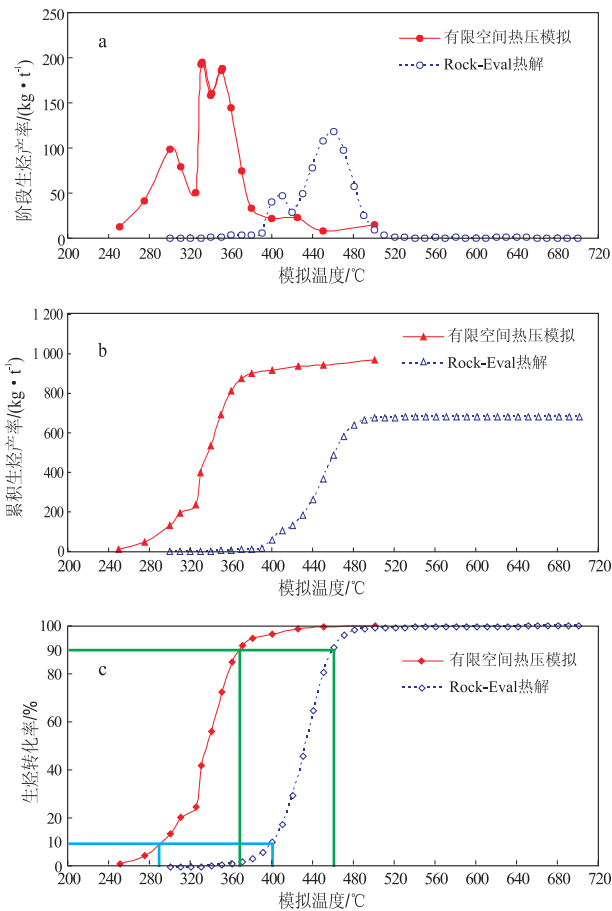


图 5 有限空间热解模拟实验与 Rock-Eval 热解实验烃产率对比

Fig. 5 Comparison of hydrocarbon product rate between pyrolysis in finite space and Rock-Eval experiment

表 2 2 种热解方式生气气潜力定量评价参数对比

Table 2 Comparison of quantitative evaluation of hydrocarbon generation potential between pyrolysis in finite space and Rock-Eval experiment

实验方法		评价参数												
有限空间 热解	残留油量 $RS_o/$ ($mg \cdot g^{-1}$)	生气潜量 $KS_g/$ ($mg \cdot g^{-1}$)	生油潜量 $KS_o/$ ($mg \cdot g^{-1}$)	生烃潜量 $KS_H/$ ($mg \cdot g^{-1}$)	残留油 指数 $RI_o/$ ($mg \cdot g^{-1}$)	生气指数 $KI_g/$ ($mg \cdot g^{-1}$)	生油指数 $KI_o/$ ($mg \cdot g^{-1}$)	生烃指数 $KI_H/$ ($mg \cdot g^{-1}$)	生油高峰 反射率 $OR_o-max/$ %	生气高峰 反射率 $GR_o-max/$ %	生油高峰 温度 $T_o-max/$ °C	生气高峰 温度 $T_g-max/$ °C	有效碳 $PC/$ %	降解潜率 $D/$ %
	0.42	2.39	30.04	32.43	13.04	73.92	883.27	970.23	0.61~0.81	1.83	330~350	425	2.69	82.56
Rock-Eval 热解	$S_1/$ ($mg \cdot g^{-1}$)		$S_2/$ ($mg \cdot g^{-1}$)	产烃潜量 $PG/$ ($mg \cdot g^{-1}$)			氢指数 $I_H/$ ($mg \cdot g^{-1}$)				热解峰温 $T_{max}/$ °C		有效碳 $PC/$ %	降解潜率 $D/$ %
	0.09		22.30	22.39			684				445		1.89	58.05

PC、降解潜率 D 和氢指数 I_H ，与之对应的利用有限空间热压模拟实验法评价烃源岩生烃潜力的参数主要为生油、生气与生烃潜量以及生油、生气与生烃指数。对比研究发现：II₁ 型干酪根有限空间热压模拟实验所得生烃潜力评价参数，无论是生烃潜量 KS_H (32.43 mg/g)、生烃指数 KI_H (970.23 mg/g) 均比 Rock-Eval 热解产烃潜量 (22.39 mg/g) 和氢指数 I_H (684 mg/g) 要高得多。这种差异表明在利用 Rock-Eval 热解法评价烃源岩时，可能远远低估了其潜在的产油气量和热降解生烃能力。

从 2 种模拟实验热解生烃产率计算出的有效碳 PC 和降解潜率 D 的大小也可以看出在评价烃源岩生烃潜力上的差异。有效碳 PC 表示干酪根中能生成油气的有机碳，降解潜率 D 表示能生成油气的有机碳最大转化率。从表 2 可知，有限空间热解有效碳为 2.69%，降解潜率为 82.56%，而 Rock-Eval 热解有效碳仅为 1.89%，降解潜率 D 仅为 58.05%。为什么同样一个样品，仅仅因为热解生烃条件的不同，会导致对其生烃潜力评价上的巨大差异呢？众所周知，烃源岩中有机质的氢含量(H/C 原子比)不仅决定了烃源岩是以生气为主，还是以生油为主，而且决定了其生油气的潜力大小。但是在 Rock-Eval 高温干燥无水开放条件下，由于没有近临界液态水的“保护”，部分沉积有机质在干热体系热解生烃过程中发生了“焦化作用”，不仅发生了 C—C 键断裂生成烃类有机质的化学反应，而且由于高温加速作用还导致了有机质的 C—H 键断裂，生成了更多的“焦炭”和 H₂，从而降低了油气产率。相反，PVT-t-L 共控条件下的有限空间热解生烃过程中，由于具有近临界特性的地层水在不同演化阶段与干酪根及其中间过渡产物发生了一系列复杂的有机化学反应，这不仅防止了人工模拟时高温导致的焦化作用，而且由于近临界水可以加速有机质自由基反应，有利于

C—C 键的形成与断裂，从而促使干酪根向油气的热裂解反应^[14]。

最有意义的是，利用有限空间热解生烃模拟评价烃源岩中干酪根生烃潜力时不仅可以对其总生烃潜力进行定量评价，还可以对其生油、生气潜力进行定量评价。比如泌 215 井 II₁ 型干酪根的生油潜量为 30.04 mg/g，生油指数为 883.27 mg/g，占总生烃潜量和生烃指数的 90% 以上；而其生气潜量与生气指数分别只有 2.39 mg/g 和 73.92 mg/g，不足总潜力的 10%。这可为不同类型干酪根的生油、生气潜力提供了一种定量的评价指标，而 Rock-Eval 热解对此却不能进行定量描述。

需要特别强调的是上述烃源岩热解生气气潜力定量评价参数只是针对干酪根的热解生成油气的最大量，实际烃源岩的生烃过程既不是完全的密闭体系，也不是完全的开放体系，而是一种半封闭半开放的生排烃过程，生烃过程与排烃过程是不可分的。因此，对于实际烃源岩层系的生油气量计算必须同时考虑到可溶有机质的热裂解转化与排烃效率的影响。

4 结论

1) Rock-Eval 热解法尽管是快速评价烃源岩的有效手段，但由于其实验条件与地质演化条件相差甚远，所获得的一系列地化参数和化学动力学参数只是表征了在这种实验反应条件下有机质的热裂解特征，只适合用于比较沉积有机质的相对生烃潜力大小，而对有机质成烃机理解释是不完整的、片面的，有些地方甚至是错误的，其难以用于描述实际地质条件下的生烃演化过程。

2) 通过分温阶连续递进模拟实验，初步建立了一套有限空间条件下的烃源岩生油气潜力评价方法，并提出了生烃潜力评价参数，它弥补了 Rock-E

Eval 热解无法分别定量评价干酪根在某个演化阶段生“油”与生“烃气”潜力的不足,借此可以更加精细地刻画干酪根在不同演化阶段的生油、生气以及生烃过程。

参考文献:

[1] 刘广野. 油气资源分类及评价方法[J]. 海洋地质动态, 2009,25(3):32-36.

[2] 周总瑛,白森舒,何宏. 成因法与统计法油气资源评价对比分析[J]. 石油实验地质,2005,27(1):67-73.

[3] 庞雄奇,陈章明,陈发景. 含油气盆地地史、热史、生留排烃史数值模拟研究与烃源岩定量评价[M]. 北京:地质出版社, 1993:205-212.

[4] 关德范,徐旭辉,李志明,等. 成盆成烃成藏理论思维与有限空间生烃模式[J]. 石油与天然气地质,2008,29(6):709-715.

[5] 李志明,关德范,徐旭辉,等. 有效泥质油源岩有机碳丰度评价标准研究:以东营凹陷为例[J]. 石油实验地质,2009, 31(4):379-383.

[6] 郑伦举,马中良. 中国石化无锡石油地质研究所实验地质技

术之地层孔隙热压生排烃模拟实验技术[J]. 石油实验地质, 2010,31(3):封二.

[7] 邹艳荣,帅燕华,孔枫,等. 油气生成过程实验研究的思考与展望[J]. 石油实验地质,2004,26(4):375-381.

[8] 郑伦举,秦建中,何生,等. 地层孔隙热压生排烃模拟实验初步研究[J]. 石油实验地质,2009,31(3):296-302,306.

[9] 邱荣华,林社卿,涂阳发. 泌阳凹陷油气成藏特征及勘探潜力分析[J]. 石油天然气学报,2005,27(2):158-161.

[10] 王敏,秦伟军,赵迫,等. 南襄盆地泌阳凹陷油气藏形成条件及聚集规律[J]. 石油与天然气地质,2001,22(2):169-172.

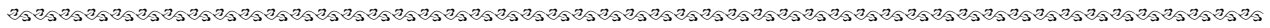
[11] 夏东领,尹伟,李治. 南襄盆地泌阳凹陷南部陡坡带油气成藏过程分析[J]. 石油实验地质,2010,32(3):247-251.

[12] 刘文汇,徐永昌. 论生物-热催化过渡带气[J]. 石油勘探与开发,2005,32(4):30-36.

[13] 刘文汇,黄第藩,熊传武,等. 成烃理论的发展及国外未熟-低熟油气的分布与研究现状[J]. 天然气地球科学,1999, 10(1-2):1-22.

[14] 郑伦举,何生,秦建中,等. 近临界特性的地层水及其对烃源岩生排烃过程的影响[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2011,36(1):83-92.

(编辑 徐文明)



(上接第 451 页)

[13] 苏玉山,王生郎,张联盟,等. 超压异常对东濮凹陷深层油气成藏的控制作用[J]. 石油勘探与开发,2002,29(2):49-52.

[14] 钟宁宁,张枝焕,孙晓明. 成藏流体历史分析:以黄骅坳陷三甲地区为例[J]. 石油勘探与开发,2002,29(3):13-16.

[15] 张立新,李军,刘淑芝,等. 试析歧北凹陷异常压力在深层油气藏成藏过程中的控制作用[J]. 石油勘探与开发,2000, 27(5):19-21.

(编辑 黄娟)