

文章编号: 1000-0550(2002)03-0510-05

全岩热模拟新方法 及其在气源岩评价中的应用

谢增业^{1,2} 蒋助生² 张 英²

李 剑² 胡国艺² 王春怡² 李志生² 罗 霞²

(1 中国地质大学 北京 100083) (2 中国石油勘探开发研究院廊坊分院 河北廊坊 065007)

摘 要 由中国石油勘探开发研究院廊坊分院建立的全岩热模拟仪器分析方法是采用岩心样品(岩石颗粒 0.5~2 mm)来模拟烃类生成的一项实验新技术。该方法模拟结果表明(1)不同类型样品单位质量岩石的产气率与传统的加水温压模拟法结果具有可比性(2)能够反映源岩在不同演化阶段的产气量(3)比常规的有机碳评价方法能更准确地反映源岩在不同演化阶段的产气潜力。(4)全岩热模拟新方法经济、简便、分析周期短,可以用于大量常规样品分析,是判识有效气源岩及定量评价的一种快速、可靠的方法,在油气勘探过程中,将对气源岩的评价发挥重要作用。

关键词 气源岩 热模拟 定量评价 天然气 有机碳

第一作者简介 谢增业 男 1965 年出生 博士 天然气地质和地球化学

中图分类号 TE122.1 **文献标识码** A

1 前言

早在二十世纪 20 年代,煤化学家为了探讨煤的气化机理就开始对煤进行高温加热实验^[1]。到了 50 年代中期至 60 年代,热模拟实验已成为油气研究的重要手段和内容之一^[2]。70 年代以后,随着实验装置的改进、分析测试手段的提高,热模拟工作取得重大进展,主要体现在(1)在实验装置系统方面,有开放系统、封闭系统和可控系统三类。(2)在实验条件方面,根据实验目的和解决问题的角度的不同,选用不同的实验样品、不同的实验条件以及不同的催化剂等。(3)在实验成果方面,证实了干酪根在增温条件下能够产生烃类组分,在某种程度上,时间和温度可以相互补偿^[3],目前世界上低温热模拟时间最长的已达到六年多^[4];有机质中某些矿物基质对烃类的生成具有一定的催化作用^[5],且对已生成的烃类有吸附作用;压力对烃类的生成有一定的影响^[6,7];水介质的有无对模拟结果有较大的影响,有水存在条件下的产气量大于无水条件;同样是有水条件,颗粒样品的模拟结果比粉末样品更接近自然演化特点^[8];在相同实验条件、相同成熟程度下,全岩样品模拟的天然气干燥系数大于粉末状样品,并且从多种方法证实了全岩样品的模拟结果与自然演化结果比较吻合^[9]。目前,Rock-Eval 方法已经成为定量评价油源岩的快速简便的方法,但这种方法测定的热解产物为气、液混合烃,并含有部分沥青质,不

适用于气源岩的快速定量评价。因此,我们针对气源岩评价的特点,建立了全岩热模拟新方法。

2 实验样品及方法

2.1 样品及地质特征

实验样品包括陆相(湖—沼相)泥岩、碳质泥岩、煤和海相泥岩、碳酸盐岩。陆相源岩取自塔里木盆地库车坳陷三叠—侏罗系地层,有机质以腐殖型为主,镜质体反射率值大部分介于 0.7~1.0%。海相源岩分别取自威利斯顿(W1、W2)、鄂尔多斯以及塔里木盆地, W1、W2 奥陶系样品属开阔海沉积环境下的产物^[10],有机质为腐泥型,处于低成熟阶段;鄂尔多斯盆地除 O_{3p} 层系的样品的镜质体反射率值为 0.83% 外,其它均处于高—过成熟阶段;塔里木盆地 TZ101 样品为成熟阶段的泥灰岩。

2.2 实验方法

全岩热模拟新方法所使用仪器为自行组装的一套新型热模拟定量评价分析仪。仪器主要部分是澳大利亚 SGE 公司生产的高温热解器、美国惠普公司 HP5890A 型气相色谱仪及微机数据系统,其热解装置可在 900 °C 以下各温度点长时间恒温工作。

分析的流程是:岩石样品粉碎成 20~40 目的颗粒,称取 0.2~2 g 样品(视岩性而定)装入高温热解器的不锈钢样品管中,在氦气流中加热到各预设温度,升温速率 15 °C/min,在每个预设温度点恒温 30~40

min 热解产物用冷阱收集,达到预定反应时间后,迅速将热解器温度降至适当温度,并撤去冷阱,让热解产物进入气相色谱填充柱中进行 C₁~C₅ 组分的分析,最后由微机数据系统对各组分进行定量分析。

2.3 全岩热模拟新方法的基本原理

全岩热模拟新方法采用全岩热解,保留了矿物晶体格架未被破坏,使岩石中的矿物质对有机质的生烃过程起到催化作用。热解过程中,有机质封闭在岩石矿物中,有机质及岩石矿物均产生一定量的水,同时,热解产物在热力作用下不断地由大分子裂解成小分子,烃类体积膨胀,在岩石颗粒内部产生高压。因此,对岩石颗粒中的分散有机质,微观上相当于处在一个封闭体系,这种情况类似于加水的高压釜封闭体系。当岩石颗粒内部的压力大于岩石强度时,岩石将发生破裂,形成微裂缝。随着岩石颗粒中有机质生成的烃类不断积聚,积聚到一定程度后,烃类沿微裂缝排出,在宏观上这又相当于一个开放体系。由于烃类在排出时,受孔隙、裂隙及岩石矿物表面的吸附等作用,相当于地层中油气初次运移的作用,因此该方法比较符合实际地层条件的过程。

3 实验结果与讨论

3.1 全岩热模拟实验结果与普遍采用的加水温压热模拟结果具有可比性

自从 Lewan M D (1993) 等通过实验证实加水温压模拟实验比无水温压模拟实验更接近自然演化结果以来,加水温压模拟实验已成为目前应用最广泛的一种模拟方法。全岩热模拟新方法实验结果表明,它与加水温压模拟实验结果具有可比性。表 1 列出了海陆相不同类型气源岩样品的两种模拟方法结果。海相样

品取自鄂尔多斯盆地,温压模拟结果为 38.5~171.7m³/t.C,若换算成 m³/t.R,则其数值为 0.12~0.34m³/t.R;全岩模拟结果为 0.11~0.15m³/t.R,在数值上相当于或略小于温压模拟结果。这可能与样品本身的演化程度有关。随演化程度增高,样品中剩余的产气潜力也相应降低。

取自塔里木盆地的陆相源岩,有泥岩、碳质泥岩和煤三种类型,且它们的有机碳含量不同,产气潜力也有较大的差异,但同类型样品不同模拟方法得到的结果也同样具有可比性。如泥岩样品,温压模拟结果为 1.22m³/t.R,全岩模拟结果为 1.25~4.71m³/t.R;煤的温压模拟结果为 60.68m³/t.R,全岩模拟结果为 84.19m³/t.R。

3.2 全岩热模拟新方法实验结果可以反映源岩在不同演化阶段的产气量

新方法 with 高压釜法的差别主要表现在:后者是将同一样品分成若干份,每一份所得结果均为从实验起始阶段至设定阶段的累积产物,而前者是对同一块样品分阶段连续测定,可以测定任何演化阶段的产气量,这对于研究源岩的生气机理有重要意义。图 1 表示了不同类型气源岩的阶段生气模式,可见,产气高峰主要在模拟温度为 450~650℃ 之间,大致相当于 R₀ 值为 1.0%~2.3% (图 2),这一阶段的产气量一般占总产气潜力的 90% 左右,其中又以 R₀ = 1.3%~1.9% 演化阶段的产气量占绝对优势。在 R₀ < 0.90% 的演化阶段,产气量甚微,一般不超过总产气潜力的 3%,R₀ > 2.8% 的演化阶段,产气量占总产气潜力的比例不超过 10%。因此,该方法不仅可以反映干酪根阶段产气的潜力,更为重要的是为高过成熟气源岩原始产气潜力的正确评价提供了一种重要的手段。

表 1 不同类型气源岩样品全岩热模拟新方法 with 加水温压模拟实验结果对比

Table 1 The comparison of results detected from the novel method and conventional closed-system of different samples

样品号	层位	岩性	有机碳 / %	R ₀ / %	产气率 /m ³ /t.R	产气率 /m ³ /t.C	沉积相	模拟方法
L3*	O ₂ m	灰质云岩	0.30	1.61	0.12	38.53	海相	温压模拟
L8*	O ₂ m	灰岩	0.20	1.50	0.34	171.7	海相	温压模拟
SI88	O ₂ m	泥质云岩	0.10	2.43	0.12	115	海相	全岩模拟
SI88	O ₂ m	云质泥岩	0.16	2.46	0.11	65	海相	全岩模拟
YU9	O ₂ m	云岩	0.26	1.89	0.15	56	海相	全岩模拟
KC1*	J ₂ k	泥岩	5.17	0.76	1.22	37.54	陆相	温压模拟
KC2*	T ₃ t	煤	74.79	0.74	60.68	77.29	陆相	温压模拟
KC3*	T ₃ t	碳质泥岩	13.02	0.78	7.28	59.46	陆相	温压模拟
YN2	J ₂ k	泥岩	2.87	0.85	3.54	123.34	陆相	全岩模拟
YN2	J ₂ k	煤	83.25	0.83	84.19	101.13	陆相	全岩模拟
YN2	J ₁ y	泥岩	3.73	0.88	4.71	126.29	陆相	全岩模拟
YN2	T ₃ t	泥岩	1.24	1.01	1.25	101.05	陆相	全岩模拟

注:带*者引自陈义才,李延钧等.鄂尔多斯盆地中央古隆起及周缘地区下古生界低丰度碳酸盐岩烃源岩生排烃能力评价(内部报告).

1997;带*者引自柳少波,董大忠等.库车坳陷油气资源、经济评价及方法研究(内部报告).2000.

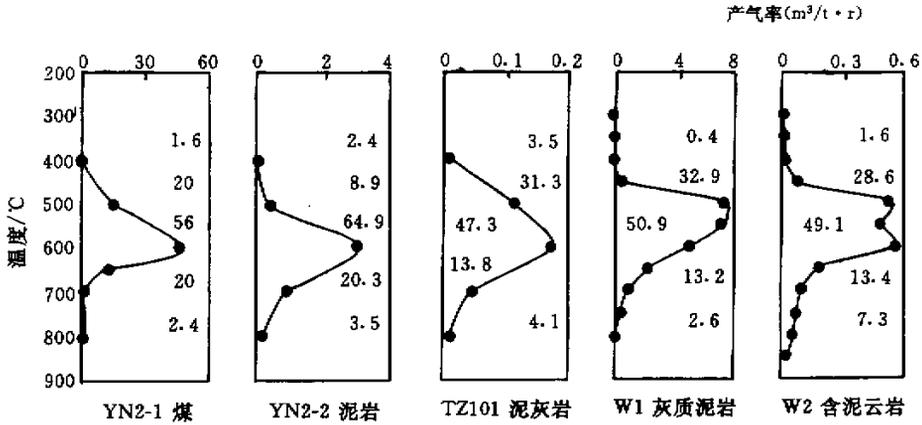


图1 不同类型源岩阶段产气模式图

Fig. 1 Gas-generating model of different type of source rocks

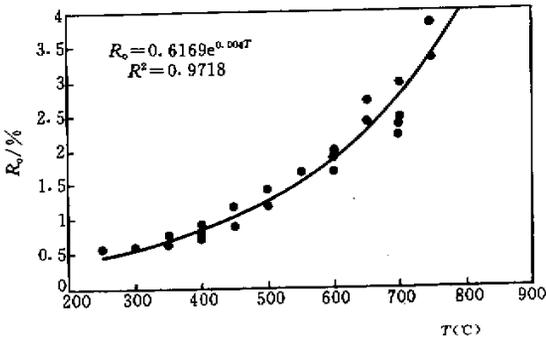


图2 全岩热模拟方法的模拟温度与 R_v 关系图

Fig. 2 The relationship between the teperature and vitrinite reflectivity of the rock simulation method

3.3 全岩热模拟新方法能比常规有机碳评价方法更准确地评价源岩的产气潜力

气源岩残余有机碳含量长期以来被用作评价烃源岩有效性最主要的指标,但通过研究发现,有机碳含量并不能直接反映源岩的产气潜力。表2列出了依南2井泥岩在不同演化阶段下的有机碳含量及产气率的变化,可见,尽管有机碳含量在不同演化阶段变化不大,但其热解时的产气率值却有很大的变化。这主要是因为有机碳中包括有效碳和无效碳,虽然有机质生烃后消耗掉其中的部分有效碳,但烃类的进一步裂解也要产生一部分无效碳,此外,倾向于生气的有机质(如Ⅲ型)大部分碳均集中在稠环上,侧链上的碳较少,所以在热演化过程中有机碳含量变化较小。如热演化阶段从1.9%演化到2.8%,有机碳含量由3.53%降低到3.21%,变化幅度仅为0.32%,而产气率则由3.059

$m^3/t.R$ 降低到 $0.955 m^3/t.R$,变化幅度达 $2.104 m^3/t.R$ 。就不同样品而言,由于源岩有机母质结构的差异,同样存在着有机碳含量与产气率不一致的现象(见表3)。如TLM4号 T_3t 湖相泥岩样品,有机碳含量为1.24%,产气率为 $1.253 m^3/t.R$,而与其成熟程度相当的TLM3号 J_{1y} 煤系泥岩,有机碳含量为2.96%,其产气率仅为 $1.037 m^3/t.R$ 。再如TLM7号 J_2k 泥岩和与其相同层位的TLM1号泥岩,有机碳含量分别

表2 气源岩残余有机碳含量与产气率随温度的变化情况

Table 2 The changes of organic carbon and yields of unit quality rock with pyrolysis temperature

井号	井深 /m	层位	岩性	温度 /°C	有机碳 /%	产气率 / $m^3/t.R$
					原样	3.73
				300	3.68	
依南2	4404.3	J_{1y}	泥岩	400	3.64	0.110
				500	3.49	0.421
				600	3.53	3.059
				700	3.21	0.955

表3 塔里木盆地气源岩残余有机碳含量与产气率数据

Table 3 The organic carbon and yields of unit quality rock of source rock in Tarim basin

样号	层位	岩性	有机碳 /%	产气率 / $m^3/t.R$
TLM1	J_2k	泥岩	2.96	1.083
TLM2	J_{1y}	泥岩	3.73	4.711
TLM3	J_{1y}	泥岩	2.96	1.037
TLM4	T_3t	泥岩	1.24	1.253
TLM5	T_3h	泥岩	0.60	0.593
TLM6	T_3h	泥岩	2.03	0.098
TLM7	J_2k	泥岩	2.87	3.570
TLM8	J_2k	煤	83.25	84.193

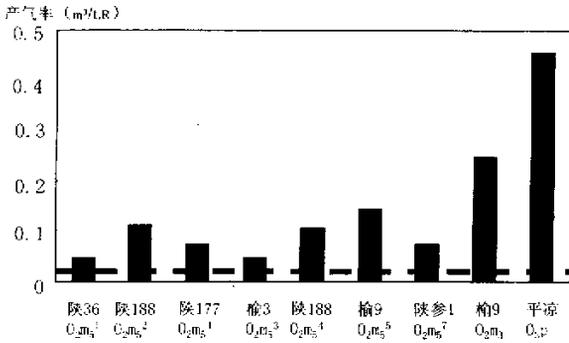


图3 鄂尔多斯盆地奥陶系源岩产气率

Fig. 3 The histogram of the pyrolysis yields of unit quality rock of Ordovician in Ordos basin

为 2.87% 和 2.96%, 而产气率则相差较大, 前者为 3.570 m³/t.R, 是后者的 3.3 倍。表 3 还表明, 同类型源岩, 产气率高者, 其有机碳含量也高, 但有机碳含量高, 其产气率却不一定高。朱美茜^[11]等的研究结果也反映了源岩有机碳含量随成熟度增高, 其变化幅度不大。可见, 评价气源岩的产气潜力时仅凭残余有机碳这一主要指标存在一定的局限性, 将有机碳和产气率数据结合起来应该更为合理。

3.4 全岩热模拟新方法是判识有效气源岩及定量评价的有效方法

判别一个源岩是否为有效气源岩, 关键因素之一是要确定岩石饱和自身的最大吸附气量与生气量的关系。从“九五”攻关开始, 我们已对源岩吸附气量进行了详细研究, 结果表明: 不同类型的源岩, 最大吸附气量有很大差别, 煤最大为 36 m³/t.R, 泥岩居中, 一般在 0.600 m³/t.R 左右, 泥灰岩最低, 仅为 0.030 m³/t.R。但总的吸附气量除煤达到总生气量的 40% 以上外, 泥质岩及灰岩类的总吸附气量一般在 10%~30% 左右。虽然模拟实验结果不可能完全符合实际的地质情况, 但它毕竟为我们如何去判识源岩的有效性及其产气潜力提供了重要的研究思路。

有机质丰度高的源岩, 仅凭有机碳含量也可以确定其是否为有效的气源岩, 但全岩热模拟新方法能够定量确定各演化阶段的产气量, 这对于天然气成藏聚集的研究是很有意义的。如库车坳陷主要存在拜城和阳霞凹陷两个生气中心, 相同时代的源岩, 拜城凹陷的成熟度明显高于阳霞凹陷。据热史分析结果, 拜城凹陷三叠-侏罗系源岩在中新世之前, R_o 值小于 1.2%, 尚未进入生气高峰期, 中新世末期至现今, R_o 值迅速增高至 2.4% 以上^①。煤及暗色泥岩的热模拟结果则

表明, 在 R_o 值小于 1.3% 阶段, 源岩的产气量占其总产气潜力的比例小于 20%。可见, 库车坳陷至少有 80% 的天然气是在中新世末期以来生成的。

对于成熟度普遍很高、残余有机碳含量普遍较低的海相烃源岩, 仅凭有机碳这一项指标难以确定源岩的有效性。从排烃角度考虑, 源岩排出的烃类越多, 剩余的有机质必然越少。因此, 从有效性角度比用常规评价方法去评价源岩更有效, 可信度更高。如鄂尔多斯盆地奥陶系源岩残余有机碳含量一般为 0.1%~0.3%, 这到底是由于沉积时有机质本身数量少、类型差还是归于热演化程度高、已大量排烃, 这是奥陶系源岩能否生烃的争论焦点。全岩热模拟新方法则可以从源岩自身的产气潜力和饱和自身的吸附气量来确定其是否为有效气源岩。图 3 是部分样品的模拟结果, 可见, 这些奥陶系过成熟碳酸盐岩样品的残余热解生气量和游离气量之和仍超过最大吸附气量, 尤其是榆 9 井 (O₂m₃⁵) 的产气潜力更大, 累计产气率达到 0.146 m³/t.R, O₂m³ 含沥青的样品, 其累计产气率则达到 0.250 m³/t.R。由此推测, 这些源岩在地质历史中曾经生排过烃类。如果按上述模拟结果进行恢复, 则这些源岩的原始产气率约为其残余值的 5 倍左右, 可以确定这些源岩在原始地层条件下是有效气源岩。

4 结语

全岩热模拟新方法以不等粒岩石颗粒为实验对象, 样品在开放的体系下热解, 烃类的生成与排出是在岩样中各种矿物的参与下进行的, 这种条件比粉末样品或纯干酪根能更准确地模拟自然条件。新方法模拟结果可以反映源岩在不同演化阶段的产气量, 产气率数值不仅与传统的加水温压模拟结果具有可比性, 而且具有分析周期短、费用低等优越条件, 可用于大量常规样品的分析, 便于快速地对烃源岩作出定量评价, 指导油气的勘探。同时, 该方法能比有机碳评价方法更准确地反映源岩不同演化阶段产气的潜力, 为成气特征研究及高过成熟烃源岩的原始产气量的恢复提供重要信息, 是源岩有效性判识及定量评价的一种有效、可靠的方法, 在烃源岩评价中将发挥重要的作用。

参考文献 (References)

- 1 关德师, 戚厚发等. 煤和煤系泥岩产气率实验结果讨论 [A]. 煤成气地质研究 [C]. 北京: 石油工业出版社, 1987. 182~193 [Cuan Deshi, Qi Houfa *et al.* The discussion on the gas generation experimental results of coal and bind. Symposium on geological research of coal-formed

① 赵孟军等. 塔里木盆地天然气成藏条件及勘探方向(内部报告). 2000

- ga[A]. Beijing :Petroleum Industry Press ,1987. 182~193]
- 2 侯读杰. 热模拟实验技术简介[J]. 国外地质勘探技术 ,1990 ,10 :39~40 [Hou Dujie ,The brief introduction of source rock thermal simulation technique[J]. *Abroad Geology Exploration Technique* ,1990 ,10 :39~40]
- 3 [法] B. P. 蒂索 (西德) D. H. 威尔特著 ,徐永元等译. 石油形成和分布[M]. 北京 :石油工业出版社 ,1989 [B. P. Tissot ,Welte D H ,ed. Translated by Xu Yongyuan *et al.* *Petroleum Formation and Occurrence* [M]. Beijing :Petroleum Industry Press ,1989]
- 4 Saxby J D , Bemett A J R , Corran J F. Petroleum generation : Simulation over six years of hydrocarbon formation from torbanite and brown coal in a subsiding basin[J]. *Org Geochem* ,1986 (9) 69~81
- 5 Dembicki H Jr. The effects of the mineral on the determination of kinetic parameters using modified Rock Eval pyrolysis[J]. *Org Geochem* , 1992 (18) 531~539
- 6 Cs. Sajgo , *et al.* Influence of Temperature and Pressure on Mature Process—I : Preliminary Report[J]. *Org Geochem* ,1986 (10) 331~337
- 7 高岗 ,黄志龙等. 碳酸盐岩油气生成模拟方法[M]. 北京 :石油工业出版社 ,2000 [Gao Gang ,Huang Zhilong ,*et al.* *The simulation of oil and gas generation from Carbonate* [M]. Beijing :Petroleum Industry Press ,2000]
- 8 Lewan M D. Laboratory Simulation of Petroleum Formation[M]. *Org Geochem*. Plenum Press ,1993. 419~442
- 9 Sedat Inan. Gaseous Hydrocarbons Generated during Pyrolysis of Petroleum Source Rocks using Unconventional Grain-size : Implications for Natural Gas Composition[J]. *Org Geochem* ,2000 (31) :1409~1418
- 10 Haidl F M. Hydrocarbon potential of Lower Paleozoic Carbonate Strata in southeastern Saskatchewan[R]. In : Summary of investigation. Saskatchewan Geological Survey , Sask. Energy Mines , Misc. Rep. , 1995. 95~4 , 118~128
- 11 朱美茜 ,李执. 油气生成、演化的模拟实验[A]. 见 :钱志浩 ,曹寅等. 石油地质实验测试技术新进展[C]. 北京 :地质出版社 ,1994. 106~116 [Zhu Meiqian ,Li Zhi. Oil and gas generation ,evolution and simulation experiment[A]. In :Qian Zhihao ,Cao Yin ,eds. *The advance of novel method on petroleum geology experiments* [C]. Beijing :Geological Publishing House ,1994. 106~116]

Novel Method of Whole Rock Pyrolysis and Application to the Evaluation of Source Rock

XIE Zeng-ye^{1,2} JIANG Zhu-sheng² ZHANG Ying² LI Jian²
HU Guo-yi² WANG Chun-yi² LI Zhi-sheng² LUO Xia²
(China University of Geosciences , Beijing 100083)

X Langfang Branch of Research Institute of Petroleum Exploration and Development , Langfang ,Hebei 065007)

Abstract The pyrolysis on-line gas chromatographic method of rock simulation , developed by Langfang Branch of Research Institute of Petroleum Exploration and Development , is a novel laboratory technique used to simulate hydrocarbon formation , which employs the unconventional grain size (0.5~2mm). The results detected from the novel method of pyrolysis rock chips show that (1) The pyrolysate yields of unit quality rock of different samples are similar to that of conventional hydrous closed-system , so the two methods are comparable. (2) Rock pyrolysis experiment can reflect the yields of gas generated from its host rock in different evolution stage. (3) The novel method is more valid in the potential evaluation of gas generation compared to that of conventional organic carbon in different evolution stage. (4) A number of conventional samples can be tested in rock pyrolysis experiment for its economical and simple method and the analytical cycle is short , so it is an available and credible technique for the judgement of validity and the quantitative evaluation of source rock. This technique will play more important role in the evaluation of source rock during the exploration of petroleum.

Key words gas source rock , thermal simulation , quantitative assessment , natural gas , organic carbon