

煤成油排驱效率模拟实验

戴卿林

(中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640)

郝石生

(石油大学, 北京 100083)

卢双舫

(大庆石油学院, 黑龙江安达 151400)

利用未混油或混油源岩样品, 通过控制含油量、温度、压力、时间和含水量等实验条件, 系统进行了煤在各种条件下的排油效率及机理实验, 并与相近条件下的湖相泥岩进行了对比。结果表明, 煤成油可以排出其母源, 排油系数约为 50%~250%, 但在同等条件下, 明显低于湖相泥岩约 100%。

关键词 煤成油 排驱效率 模拟实验

第一作者简介 戴卿林 男 33岁 博士后 有机地球化学

煤成油是煤和煤系中集中和分散的陆源有机质, 在煤化作用的同时所生成的液态烃类。煤能作为油源岩, 已被大量的事实所证实, 但世界范围内所发现的煤成油盆地, 与世界含煤盆地总量相比仍微不足道, 因此, 人们对煤成油能否排出母体并聚集成工业油藏仍存疑虑。针对这一问题, 我们选择了某盆地具有代表性的烃源岩和原油, 进行了排驱效率模拟实验, 并与湖相泥岩作了对比。

1 样品及实验

1.1 样品

实验选择了两种类型烃源岩和两类原油样品。它们分别是侏罗系煤和湖相泥岩, 以及煤成油和湖相泥岩生成的油。

1.2 实验条件及方法

在设计模拟实验时, 主要考虑了下列几方面: (1) 烃源岩的含油量;

(2) 实验温度; (3) 压力; (4) 水; (5) 时间。实验装置如图1所示。

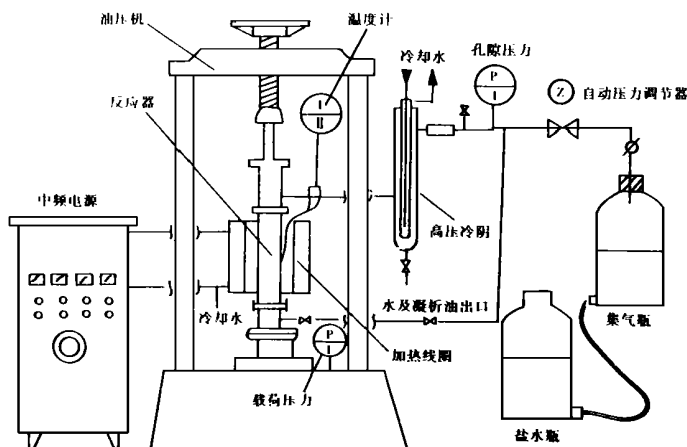


图1 排烃模拟实验装置简图

实验时, 首先将源岩粉碎至 60 目左右, 然后称取源岩样 80 g, 按实验条件称取一定量的原油。煤样加入煤成油, 湖相泥岩样加入湖相泥岩生成的油(部分源岩样品不加原油)。将原油和源岩充分搅拌均匀后, 置于反应器中间, 其上下分别装入 80~ 100 目的石英砂, 以便接受排出物。实验后, 对源岩样品和石英砂分别进行正己烷冷浸和氯仿抽提, 测定产物含量。

2 结果与讨论

2.1 排驱效率与含油量的关系

一般认为, 烃源岩的生油量或含油饱和度是控制排油作用的一个重要因素。石油从烃源岩中排出必须是在生成了足够数量的石油, 并饱和了烃源岩孔隙之后才发生^[1]。利用不同含油量的煤和湖相泥岩, 在载荷压力为 100 MPa、温度为 150℃、时间为 48h 和不加水的条件下进行排油实验, 结果表明, 未混油煤样(实验编号 KG1) 排油系数为 3.67% (表 1)。有必要说明的是, 该样品在采样和实验过程中都造成了部分轻组分的损失, 如果考虑这一因素, 其排油系数应该更大一些(其它样品均存在相同情况)。曾有不少学者认为, 由于煤的微孔隙性所产生的分子筛性质、高塑性所导致的自行封闭性及高吸附性都不利于煤层石油的排出^[2]; 但本次实验未混油煤样中少量石油的排出, 说明煤成油是可以运移的, 煤的微孔隙性、高塑性和高吸附性并不构成石油排出不可逾越的障碍。混油煤样(KG3、KG2) 在上述相同实验条件下含油饱和度

分别达到 12.19% 和 30.48%, 它们的排油系数明显高于未混油煤样, 排油系数是随着煤样含油量或含油饱和度增加而增大的(表 1)。这进一步说明只要煤生成了足够数量的石油亦可排出, 含油饱和度越高, 油的相对渗透率就更易达到其排油门限而排出源岩。

泥质烃源岩具有良好的排油能力已被无数勘探实践所证实, 其绝对排油率最高可达 45% 左右^[3]。为了与煤样对比, 用未混油的(QG1) 和混油的(QG2) 湖相泥岩, 在与上述煤样相同实验条件下进行实验。结果显示, 泥岩的排油效率明显高于煤, 具有相近含油量的混油泥岩样(QG2) 的排油系数比相近条件的混油煤样(KG2) 高 10% 左右, 未混油湖相泥岩(QG1) 的含油量(氯仿沥青“A”为 0.03%) 比相应的未混油煤样(KG1) 的含油量(氯仿沥于“A”为 0.77%) 低得多, 但其排油系数却比未混油煤样高近 12% (表 1)。比较两个湖相泥岩样品(QG1 和 QG2) 的排油系数也可以看出, 泥岩的排油效率明显地随含油量增大而增加(表 1)。Sandvik^[4] 认为液态石油在烃源岩中的滞留主要与固体有机质的吸附有关, 石油在无机矿物表面的吸附量很小, 主要是吸附在固体有机质中。煤的有机质丰度远高于泥岩, 并且还发育大量的微孔隙, 导致煤的吸附能力比泥岩高得多, 这也许正是煤的排油效率低于泥岩的主要原因。

2.2 排驱效率与温度的关系

利用混相同含油量(约占岩样重 5%) 的煤和湖相泥岩分别在压力(100 MPa) 和时间(48h) 条件相同, 温度不同而且均不加水的条件下进行实验, 结果显示, 排油效率明显受温度的控制。混油煤样在室温(25℃) 条件下(KT0), 排油系数仅为 2.62% (表 2), 甚至低于未混油煤样(KG1) 在 150℃ 条件下的排油系数(表 1), 但煤的排油效率明显随温度的升高而逐渐增大。值

表 1 不同类型源岩的排油系数 %

实验编号	源岩	含油量	排油系数
KG1	煤	0.77	3.67
KG3	煤	2.69	10.49
KG2	煤	5.57	13.52
QG1	湖相泥岩	0.03	15.80
QG2	湖相泥岩	4.95	23.41

得注意的是,当温度在 250℃时煤的排油系数为 21.82‰,而当温度增加到 300℃时则陡然上升至 92.93‰(表 2)。这一现象表明了高温条件使石油的物理、化学性质发生了较大变化,使热

表 2 相同含油量烃源岩的排油系数

实验编号	源 岩	实验温度/℃	排油系数/‰
KT0	煤	25	2.62
KT1	煤	100	6.02
KT2	煤	150	13.52
KT3	煤	200	14.91
KT4	煤	250	21.82
KT5	煤	300	92.93
QT1	湖相泥岩	100	13.76
QT2	湖相泥岩	150	23.41
QT3	湖相泥岩	200	26.57

比煤高约 10‰。

排油效率随温度增加而增大的原因:(1) 温度升高,分子运动能力加强,石油粘度降低,使之易于流动,从而有利于石油的排出;(2) 温度升高,石油和烃源岩中的水产生热膨胀,导致孔隙压力增加,从而促使石油排出;(3) 温度升高,源岩基质发生膨胀,使孔隙度减小,同时也降低了对有机质的吸附能力,促进了石油的排出;(4) 高温条件下(> 300℃),石油产生明显的热蒸发而且部分烃类发生热裂解形成气态烃,从而加快了石油的排出。

2.3 排驱效率与压力的关系

目前普遍认为,异常高压带的形成和孔隙流体压力增加是产生排烃作用的重要原因。利用混相同含油量(约占岩样重 5‰)的煤和湖相泥岩分别在温度(150℃)和时间(48h)条件相同,但载荷压力不同且均不加水的条件下进行实验,结果显示,煤和泥岩的排油系数均随载荷压力的增加而逐渐增大,同时泥岩的排油系数在相同条件下也同样表现出比煤高约 10‰(表 3)。

载荷压力的增加使源岩孔隙度减小,从而迫使石油排出。同时,在压实过程中源岩比石英砂压缩性大,因此源岩孔隙中的石油也比相邻的石英砂承担了较大一部分的载荷压力,使两者形成压力差,在此压力差的作用下也迫使石油从源岩向石英砂方向排出。

在实验过程中观察到压力积累、释放,压力再积累、再释放的现象。压力随着温度的升高逐渐增大,当温度恒定之后,随着实验时间延长,压力继续逐渐增大;但当压力达到一定数值后,开始逐渐下降,降低到一定数值后又开始重新增加。每一个实验过程中,压力增加、降低,

蒸发作用成为排油的主要动力,同时也使部分固体有机质和石油发生热裂解,从而导致排油效率失真。以往大多数同时考虑生烃和排烃的模拟实验,其最低加热温度为 300℃,最高温度常达 550℃以上。显然,在如此高温的条件下,绝大部分烃类都以热蒸发作用占据主导地位,所以过去大部分模拟实验得到的排烃效率均偏高,与实际地质体中真实的排烃效率差距较大。由此可见,在低温或中等温度条件下的模拟实验所得到的排油效率,才可能比较真实地反映实际的排油效率。此外,从表 2 还可以看到,湖相泥岩的排油系数同样随温度的升高而增大,而且再次表现出在相同条件下泥岩的排油效率

表 3 相同含油量烃源岩的排油系数

实验编号	源 岩	载荷压力/MPa	排油系数/‰
KP0	煤	常压	4.37
KP1	煤	50	11.11
KP2	煤	100	13.52
KP3	煤	150	15.88
QP1	湖相泥岩	100	23.41
QP2	湖相泥岩	150	27.07

再增加、再降低的过程一般重复若干次, 增加和下降的幅度随实验时间的延长而逐渐变弱。该现象表明, 实验过程中石油是以微裂隙、脉冲式进行运移的。源岩中的石油在温度的作用下产生了热膨胀, 导致源岩孔隙压力增加。当孔隙压力超过源岩强度时, 就开始产生微裂隙, 导致石油运移, 随着压力释放, 微裂隙闭合。然后, 源岩中剩余的石油在温度的作用下又继续产生热膨胀, 使已释放了的压力能有效地恢复, 闭合了的微裂隙又重新张开, 如此周而复始, 使源岩中的石油不断排出。此外, 实验是在不加水的条件下进行的, 当实验温度小于 250℃时, 也没有收集到气体组分, 并且排出的油中均含非烃、沥青质组分, 这说明实验过程中石油排驱的相态主要是独立油相。

2.4 排驱效率与水的关系

为了考察水对排油作用的影响, 分别在混油的煤和湖相泥岩样品中加入一定量的蒸馏水, 在温度为 150℃, 压力为 100 MPa, 时间为 48 h 的条件下进行实验, 结果表明, 加水样品的排油效率明显比相同条件的不加水样品的排油效率高(表 4, 表 1 中 KG2、QG2)。这说明源岩中的水在温度的作用下发生体积膨胀(温度为 150℃), 造成源岩内孔隙压力增加, 从而促进了石油的排出。同时, 在载荷压力的作用下, 随源岩孔隙度不断减小, 水不断排出也带动了石油的排出, 其中包括部分烃类溶解于水被排出源岩(族组分分析表明, 加水样品排出油中芳烃和非烃含量高于相应条件的不加水样品)。此外, 应该注意到加水量较大的煤样排油系数, 仅比相应的不加水煤样的排油系数增加 5.21%; 而加水量较小的湖相泥岩样的排油系数, 却比相应的不加水的湖相泥岩样的排油系数增加了 16.19%。这表明当源岩中含水量较高时具有阻碍石油排出的副作用。

2.5 排驱效率与实验时间的关系

实验室内重建地质时间是根本不可能的, 大多数模拟实验都采用提高实验温度的方法来补偿时间的不足。为了考察在设计实验条件下时间因素对排油效率的影响, 利用混相同含油量(约占岩样重 5%)的煤在压力(100 MPa)、温度(150℃)相同和不加水的条件下分别进行了 2 天、5 天和 15 天的实验。结果表明, 排油效率随实验时间的延长而增大, 时间越长, 排油量越大, 排油系数越高(表 5)。

表 5 相同含油量煤的排油系数

实验编号	源岩	实验时间/h	排油系数/%
KS1	煤	48	13.52
KS2	煤	120	14.68
KS3	煤	360	25.03

盆地煤成油具有早生早排特点, 煤在该阶段具有最佳的孔隙条件, 以有利于液态烃活动的大孔和中孔为主, 孔隙度在 10%以上, 微孔隙相对不发育^[5]。本次模拟实验由于受模拟条件的限制, 是将源岩样品粉碎后进行。通过实验后的样品孔隙结构观察和测定, 表明实验中的煤的孔隙结构上基本上与相应的煤层相当, 煤成油排驱的主要通道仍是大孔和中孔, 以及排驱过程中产生的微裂隙。实验显示油滴沿裂隙分布, 直观证明了煤成油是以独立油相沿微裂隙排出的。

表 4 加水烃源岩样品的排油系数

实验编号	源岩	加水量/ml	排油系数/%
KW1	煤	40	18.73
QW1	湖相泥岩	20	39.60

2.6 排驱效率与孔隙系统的关系

煤的孔隙是影响煤成油排驱至关重要的因素, 不同孔隙类型对烃类的储集和排驱作用不同。大孔和中孔易于液态烃和气态烃的储集和排驱; 微孔隙则易于气态烃的储集和排驱; 过渡孔则处于上述二者之间。程克明等认为, 吐哈

3 认识

(1) 煤成油只要生成足够的数量,并饱和了煤自身孔隙之后,可以克服煤的微孔隙性、高塑性和高吸附性等障碍而排出。在同等条件下,煤的排油效率明显低于泥岩约 10%,其分布范围约 5%~25%,但其大小不仅受煤自身性质的影响,而且也受生油量、温度、压力、地层水以及排油时间长短等因素的控制。

(2) 煤成油的排驱相态以独立的连续油相为主,但当煤的产气量较大时,也可以是气液混溶相。排驱动力主要是在温度作用下烃类和水的体积膨胀而增加的孔隙压力,其次为压实作用。微裂隙可能是煤成油排驱的主要通道。

致谢:工作得到中国地质大学(北京)张爱云教授指导,大庆石油学院傅晓泰、曲佳燕同志协助完成模拟实验,谨致感谢。

参 考 文 献

- 1 Leythaeuser D, Schaefer R G. Geochemical effects of primary migration of petroleum in kinmerkldge source rocks from Brae field area, North Sea I: Gross composition of C_{15} soluble organic matter and molecular composition of C_{15} saturation hydrocarbons. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52: 701~713
- 2 黄第藩, 卢双舫. 煤成油地球化学研究的最新进展. 见: 黄第藩, 华阿新, 王铁冠等. 煤成油地球化学新进展. 北京: 石油工业出版社, 1992. 1~25
- 3 李明诚. 油气运移研究的现状与发展. *石油勘探与开发*, 1994, 21(2): 1~6
- 4 Sandvik E I. Expulsion from hydrocarbon source: the role of organic absorption. *Org Geochem*, 1992, 19(1-3): 77~87
- 5 程克明. 吐哈盆地油气生成. 北京: 石油工业出版社, 1994. 29~35

SIMULATION EXPERIMENTS OF EXPULSION EFFICIENCY FROM COAL-FORMED OIL

Dai Qinglin

(Guangzhou Institute of Geochemistry, Academia Sinica, Guangzhou)

Hao Shisheng

(Petroleum University, Beijing)

Lu Shuangfang

(Daqing Petroleum College, Anda, Heilongjiang)

Abstract

Simulation experiments of primary or oil-added source rocks (some oil was added into source rock) have been conducted. The oil expulsion efficiency and mechanism of coal at different oil saturations, temperatures, pressures, time and water saturations have been systematically studied and compared in detail with those of mudstone. The results indicate that coal-formed oil could expel its mother source, and its expulsion efficiencies are about 5%~25%, which is 10% lower than those of mudstone at the same conditions.