

低成熟度页岩油加热改质热解动力学及地层渗透性

王益维^{1,2}, 汪友平^{1,2}, 孟祥龙^{1,2}, 苏建政^{1,2}, 龙秋莲^{1,2}

(1. 国家能源页岩油研发中心, 北京 100083; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:低成熟度页岩油加热改质是采用加热井对地层进行加热,将地层中滞留的重质烃转化为轻质烃,同时将尚未转化的固体有机质热解生成油气后采出。热解油气生成量预测及地层孔渗变化是页岩油改质开采研究的难点和挑战之一。利用页岩井下取心样品,采用黄金管实验装置,研究了页岩加热过程中的有机质热解规律及组分动力学,获得了烃类气体、轻质油及重质油的生成动力学参数。结果表明,在温度为280~500℃范围内,油的生成量先增后减,而气体量持续增加;低速升温条件下的转化率随温度变化曲线左移,热解温度变低。重质油、轻质油和气态烃的活化能分别为39~49,57~74和56~59 kcal/mol;动力学模型可预测任意时间的烃类生成量。应用三轴高温渗透率测试装置,获得了页岩从室温到高温(550℃)条件下的氮气测试渗透率动态变化规律。结果显示,页岩加热过程中的渗透性变化分为下降段、上升段和稳定段,在温度达到有机质热解温度后,基质及裂缝渗透率均出现明显改善,比初始渗透率提高1~2个数量级。热解油气生成量及渗透率变化可为低成熟度页岩油加热改质开采的产量预测提供依据。

关键词:渗透率;活化能;组分动力学;反应动力学;原位加热;有机质热解;低成熟度;页岩油

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Organic matter pyrolysis kinetics and formation permeability variation during upgrading process of low-maturity shale oil

Wang Yiwei^{1,2}, Wang Youping^{1,2}, Meng Xianglong^{1,2}, Su Jianzheng^{1,2}, Long Qiulian^{1,2}

(1. State Energy Center for Shale Oil Research and Development, Beijing 100083, China;

2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Shale oil upgrading entails heating of formation through boreholes to convert heavy hydrocarbons in pore space into light ones, and it also stimulate the generation of oil and gas from kerogen through pyrolysis. Prediction of hydrocarbon yield through pyrolysis and changes of formation porosity and permeability are the challenges for shale oil upgrading and recovery. Organic matter pyrolysis and composition transformation in sample cores from shale wells during heating process using gold tube testing device were observed, and the formative kinetic parameters of hydrocarbon gases, light and heavy oil were calculated. The results show that oil generation increases first and then decreases through the temperature range of 280 °C – 500 °C while gas generation increases constantly. Under lower heating rate, the conversion curve shifts to the left and the pyrolysis temperature decreases. The kinetic parameters of pyrolysis of heavy oil, light oil and hydrocarbon gases were obtained, and the kinetic model can predict hydrocarbon generation amount at any time. The activation energy of heavy and light oil as well as gaseous hydrocarbons is 39 – 49 kcal/mol, 57 – 74 kcal/mol and 56 – 59 kcal/mol respectively. In addition, shale permeability variation during the heating process (from ambient temperature to 550 °C) were measured through nitrogen tests under triaxial stresses and high temperature. The results show that the permeability curve during the heating process can be divided into three stages, namely descending, ascending and stabilizing stages. Both the matrix permeability and fracture permeability improve remarkably by 1 – 2 orders of magnitude when reaching pyrolysis temperature. In short, generation of pyrolysis hydrocarbons and permeability variation may serve as a basis for production prediction of oil upgrading and recovery in low-maturity shales.

Key words: permeability, activation energy, compositional kinetics, reaction kinetics, in-situ heating, pyrolysis of organic matter, low maturity, shale oil

收稿日期:2018-12-10;修订日期:2019-02-16。

第一作者简介:王益维(1973—),男,高级工程师,石油工程。E-mail: wangyw_syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX050490303);国家自然科学基金项目(U1663208)。

中国东部陆相页岩热成熟度整体较低,页岩中部分有机质已经生成了油气,部分有机质仍以固体形式存在,地层原油组分中重质组分含量高、气油比低、流动性差;页岩地层基质渗透率低,层理及裂缝发育非均质性强,体积压裂改造效果差异大,单井产量递减快、单井累积产量低。

加热改质开采被认为是一项可实现中低成熟度页岩油有效动用的开采技术。通过对地层进行加热,高温覆盖目的页岩层,促使粘稠液态烃转化为轻质油,实现页岩油的改质,高温使固体有机质转化为油气,形成超压;热应力产生地下缝网系统、形成新的人工驱替系统,提高页岩油的开采速度。重油的加热改质和油页岩原位加热开采对于低成熟度页岩油的开采具有重要的借鉴意义。国外对于重油的加热改质和油页岩的加热开采开展了多年的研究和探索,并开展了多次的现场试验。加拿大阿尔贝塔省白垩系 Bluesky 重油改质项目,涵盖了3口水平生产井和18口水平加热井,通过缓慢加热地层,累计作业1732 d,最终获得 15×10^4 bbl 油。在美国科罗拉多 Mahogany 南区油页岩项目中利用16口加热井和2口采出井,累计作业15个月,最终采出了1860 bbl 轻质油页岩油。2014年以来,中国针对松辽盆地青山口组页岩开展了原位加热富含有机质页岩的探索和先导试验,分别采用气体井下燃烧加热和高温流体加热地下页岩两种方法,试验获得了页岩油,实现了对页岩油的开采。

加热改质技术有望成为实现低成熟度页岩油有效动用的突破性技术。目前原位加热改质研究才刚刚起步,尤其针对原位加热改质条件下的油气生成量预测、高温条件下的地层渗透性变化尚未开展系统研究。以往有机质热解主要针对油页岩的地面干馏或者盆地生烃史的模拟,而页岩油原位加热开采在升温速率、加热温度及时间尺度等方面存在较大差别,这些因素对于油气生成量的预测产生显著影响;另外,在温度作用

下,页岩有机质和粘土矿物的软化变形会不断挤压已经产生的裂隙、孔隙通道,对渗透性造成影响,同时还要受到地应力及机械强度变化的综合影响。目前对于页岩油加热改质过程中地层渗透率等油气产出条件的研究较少,尚不能为加热改质的产量预测提供可靠的渗透率等物性数据。

1 页岩油加热改质热解实验

1.1 页岩地层加热温度敏感性

实验样品来自于某页岩取心井,氯仿沥青“A”含量为0.41%。将样品分为两部分,每部分分为12等份,分别设定加热终温从300℃到600℃,样品在达到终温时停止加热并测定样品的镜质体反射率(R_o),获得 R_o 随加热温度变化的数据。结果显示在加热初期到350℃期间, R_o 缓慢上升,当温度升高到350℃以上, R_o 迅速提高。随着加热温度从200℃上升到600℃,样品的 R_o 值从0.3%上升到4.5%。

地层加热将促使地层中的滞留烃和固体有机质产生热解反应,图1显示地层中固体有机质及滞留烃的热解产物组分随时间和温度发生动态变化,热解产生的页岩油产量随着温度升高而先升后降,热解初始温度约为250℃,产生可动油的初始温度约为300℃;在温度区间380~450℃,即 R_o 在0.8%~1.2%为高产油窗口。

1.2 有机质热解实验

在加热开采过程中,由于受到地层渗透率和压力梯度的限制,生成的产物难以快速运移,页岩油及固体有机质的热解反应更接近于封闭系统下的热解反应。因此,本文采用黄金管封闭系统热模拟装置进行实验。

首先将样品在氩气保护下封入金管,金管放置于高压釜中,通过高压使金管产生柔性变形,从而对样品施加压力。用电弧焊焊封金管,分别以20℃/h和

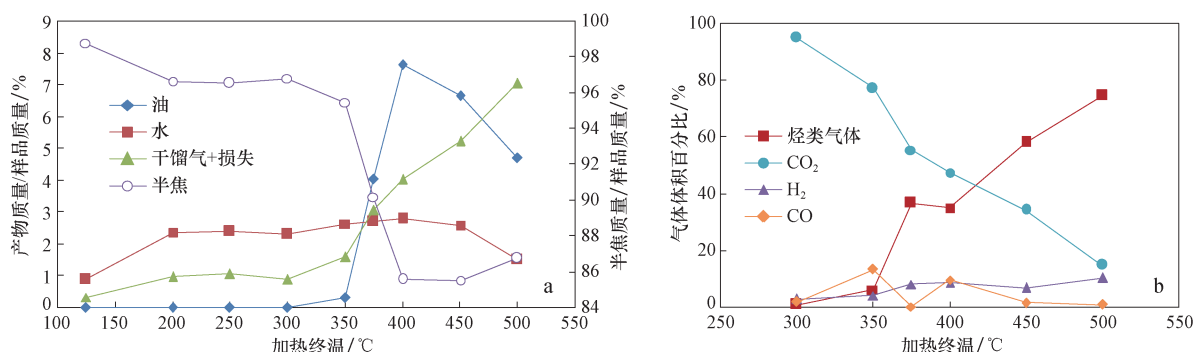


图1 有机质热解产物组成随温度变化关系

Fig. 1 The composition variation of pyrolysis products with temperature

a. 有机质热解产物与温度关系曲线; b. 有机质热解气体产物随温度变化特征

2 °C/h 的升温速率对样品进行加热。各个高压釜的温差小于 1 °C, 压力为 5 MPa, 压力波动小于 0.5 MPa, 温度范围为 100 ~ 600 °C, 温度波动小于 1 °C。含有样品的金管在加热结束后, 取出高压釜, 检测产物组分。金管放入真空系统, 使气体释放到真空系统中。真空系统与气相色谱连接, 分析气体成分。

含有样品的金管在加热结束后, 取出高压釜, 检测内容为气体、轻烃 (C₆—C₁₄) 和重烃 (C₁₄₊) 3 个部分。金管放入真空系统, 使气体释放到真空系统中。气相色谱在线分析 C₁—C₅ 烃类气体, 在气体分析完成后, 用液氮冷冻在线的样品瓶来收集扩散到真空玻璃管中的少量 C₆—C₁₀ 轻烃, 取下样品瓶后, 迅速注入二氯甲烷溶剂, 然后把金管从高压釜中取出, 连同样品一起剪开金管, 放入同一样品瓶, 用超声震动, 使金管中产生的油完全溶解到溶剂中。取样品瓶中上层的清液, 用自动进样器进行色谱分析。用氘代的 C₂₄ 作为内标进行轻烃 (C₆—C₁₄) 定量分析, C₁₄₊ 的部分采用萃取、过滤、称重法定量。

1.3 数据分析方法

1.3.1 热解反应模型

页岩油及固体有机质为非常复杂的有机混合物, 其热解反应过程包含多个反应, 数据分析采用平行一级化学反应模型, 将油页岩的热解反应视为 N 个具有不同频率因子和活化能的反应, 根据化学反应动力学基本原理:

$$\frac{dX_i}{dt} = A_i e^{\frac{-E_i}{RT}} (X_{i0} - X_i) \quad (i = 1, \dots, N) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N X_i = X, \quad \sum_{i=1}^N X_{i0} = 1 \quad (2)$$

$$X = \sum_{i=1}^N X_{i0} \left\{ 1 - \exp \left[1 - \int_{T_0}^T A_i \exp \left(-\frac{E_i}{RT} \right) dT \right] \right\} \quad (3)$$

$$P = \sum_{i=1}^N (X_{i0} - X_i) \quad (4)$$

式中: i 为第 i 个反应; i_0 为第 i 个反应的最终状态; T 为温度, K; E 为表观活化能, kcal/mol; R 为气体常数 8.31 J/(mol · K); t 为时间, s; X 为油气生成量, mg/g; X_0 为油气最大生成量, mg/g; P 为产物生成量, mg/g。

1.3.2 动力学参数的求取

在实验室条件下页岩油地层中的有机质发生化学反应所具有的化学动力学性质 (活化能和指前因子) 可以认为与在原位加热改质过程中相近, 因此可在实

验室条件下对页岩样品进行快速高温热解实验, 以获得有机质的化学动力学参数。

设在某一升温速率 l , 达到某一温度 j 时由实验所得的产油率为 X_{lj} , 在相同的条件下, 假定一组 E_i, A_i, X_{i0} 之后, 由模型计算的产油率为 XM , 如果存在某一组 E_i, A_i, X_{i0} , 使对所有的 l, j 都有 $X_{lj} - XM_{lj} = 0$, 则该组 E_i, A_i, X_{i0} 即为所求。但由于实验误差等方面的原因, 只能求使 $X_{lj} - XM_{lj}$ 尽量小的 E_i, A_i, X_{i0} 的取值。为此, 构造目标函数

$$U(E_i, A_i, X_{i0}) = \sum_{l=1}^{L_0} \sum_{j=1}^{J_0} \left(\frac{X_{lj} - XM_{lj}}{X_{lj}} \right)^2 \quad (5)$$

L_0 为不同升温速率实验的数目, J_0 为从一条实验曲线上的采样点数。活化能 E 可通过试算确定平行反应活化能分布范围和间隔确定, 上式转化为:

$$U(A_i, X_{i0}) = \sum_{l=1}^{L_0} \sum_{j=1}^{J_0} \left(\frac{X_{lj} - XM_{lj}}{X_{lj}} \right)^2 \quad (6)$$

$$\text{约束条件: } \begin{cases} A_i > 0 \\ 0 \leq X_{i0} \leq 1 \\ \sum_{i=1}^N X_{i0} = 1 \end{cases} \quad (7)$$

模型 (5) 的标定问题就化为求非负的目标函数 (6) 在满足约束条件 (7) 时的极小值问题。

2 高温页岩渗透性变化

页岩油加热改质需要将地层加热到 350 ~ 500 °C, 而目前常规的渗透性测试的实验仪器耐温一般不超过 200 °C, 难以获得高温条件下的渗透性。已有报道的实验是将油页岩加热到某一温度干馏一定时间后降温到室温然后撤去外加应力, 再去测试其渗透率, 或者是在单轴应力作用下测试油页岩在干馏过程中渗透性随温度的变化情况, 这些都与原位开采时油页岩在三轴应力作用下渗透性随温度变化的情况有所差异。三轴应力下的高温渗透率实时测量可真正反映高温下页岩油改质过程中地层渗透性变化。

2.1 实验装置

高温条件下无法采用橡胶套提供环压, 自研发的高温渗透率测定装置成功解决了高温密封问题, 顶部采用螺栓加载方式, 底部再用螺纹调节套进行加载, 实现了高温条件下 (350 ~ 500 °C) 的三轴覆压加载, 实现了三轴应力下高温页岩渗透率测定。

高温三轴应力页岩渗透率测定装置主要由注入

系统、三轴压力加载系统、岩心夹持系统、温控系统、计量系统、辅助系统和数据采集处理系统等部分组成。装置的流程示意图见图2。

2.2 渗透性评价方法

高温条件下富含有机质页岩渗透性测试过程中的岩样清洗、干燥等无法采用常规岩心渗透率测试标准进行。取岩样加工成直径为 25 cm 圆柱体,长度 2 ~ 5 cm,在 60 ℃ 条件下烘干,放入高温岩心夹持器。由于高温条件下样品会产生甲烷、二氧化碳、一氧化碳、氢气等气体和液态烃产物,故选择氮气为驱替气体,并采用稳态法进行驱替测试。

考虑到页岩渗透率低,气体流速小,忽略惯性阻力的影响。由于氮气在不同温度压力下粘度会发生变化,在不同温度和不同压力条件下进行氮气粘度校正。本文采用 NIST 数据库进行氮气粘度校正。

气体状态方程:

$$Q = \frac{p_{sc} Q_{sc} Z T}{p Z_{sc} T_{sc}} \quad (8)$$

达西定律:

$$Q = \frac{KA}{\mu} \cdot \frac{dp}{dL} \quad (9)$$

推导出高温条件下渗透率计算公式:

$$K_{lab} = \frac{2p_a Q_{g(lab)} \mu_{g(lab)} L}{A[p_{1(Lab)}^2 - p_{2(Lab)}^2]} \times 10^{-1} \quad (10)$$

式中: K 为渗透率, μm^2 ; A 为渗流面积, m^2 ; μ 为气体粘度, $mPa \cdot s$; p 为压力, Pa ; p_{sc} 为标准状况下的压力, Pa ; T_{sc} 为标准状况下的温度, K ; Q_{sc} 为标准状况下的流量, m^3/s ; L 为岩心长度, m ; Q 为流量, m^3/s ; Z 为偏心因子, 无量纲; K_{lab} 为实验氮气有效渗透率, μm^2 ; $Q_{g(lab)}$ 为实验氮气气体流量, m^3/s ; $\mu_{g(lab)}$ 为氮气粘度, $mPa \cdot s$; $p_{1(Lab)}$ 为岩心进口压力, Pa ; $p_{2(Lab)}$ 为岩心出口压力, Pa ; p_a 为大气压力, Pa 。

3 结果与讨论

3.1 页岩油热解规律

页岩油及有机质在不同升温速度下的产物量的变化曲线如图3所示,有机质快速热解温度范围为 280 ℃ 至 500 ℃,干酪根热解生成重油的初始温度较低,页岩油油量先增加后逐渐减少;重油生成轻油和天然气的温度较高,轻油量随重油量减少逐渐增加,当温度超过 450 ℃ 后其产量下降;气体生成量持续增加。两种升温速率下的趋势一致,说明在地层压力及封闭系统下,页岩油及有机质热解包含多个热解反应,已经存在的

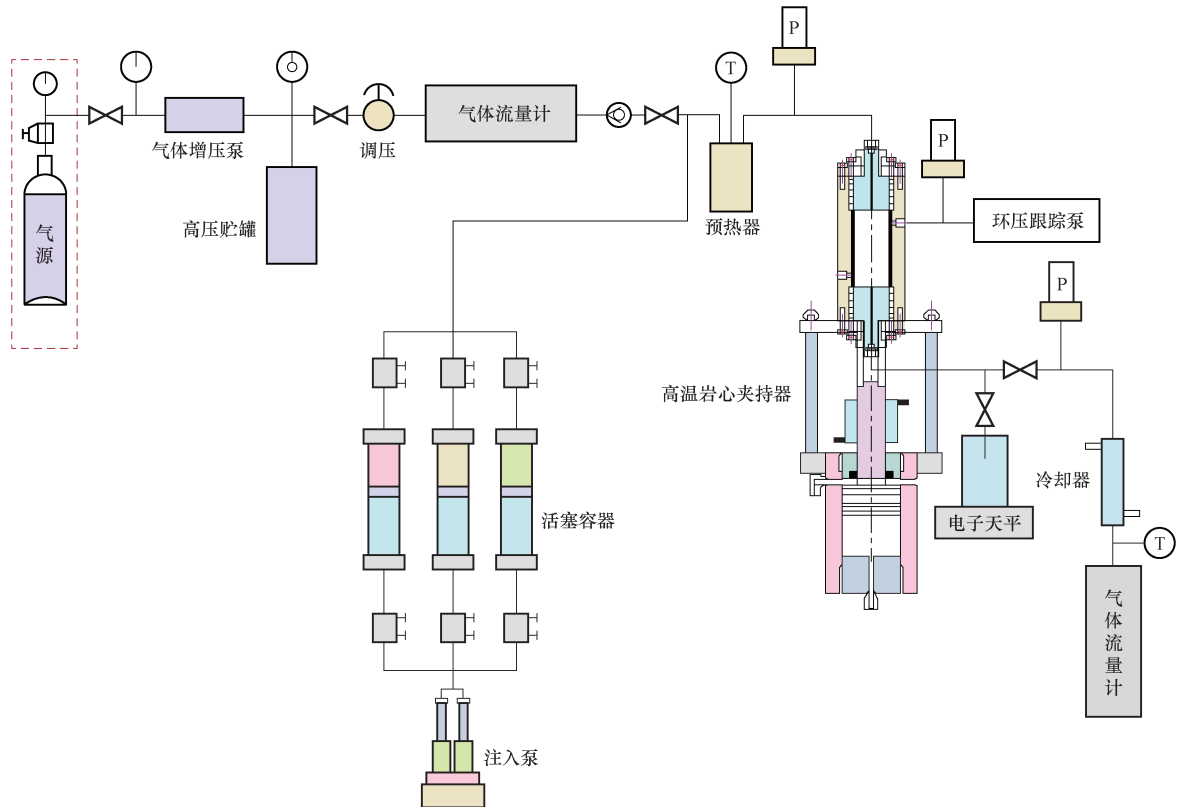


图2 高温三轴应力渗透率测定装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the testing device of permeability under high temperature and triaxial stresses

页岩油热解生成轻质油和烃类气体,固体有机质则生成重质页岩油和少量气体,重质页岩油再继续热解生成轻油和气体,当温度升高达到一定值后,轻油开始热解生成气体(图3)。在原位加热改质开采条件下需要优化热解区的温度和生产井生产压差,提高热解区油的总产量。

实验结果显示,升温速率显著影响产物的生成温度范围和产量,较低的升温速率条件下,产物最大热解速率对应的温度较低,升温速率显著影响热解的进程和产物组成。

3.2 热解反应动力学

在地层压力条件下分别以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 和 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的升温速度加热页岩油,获得各组分的生成量数据。进行归一化处理得到烃类气体、轻油及重油在两种升温速度下的转化率随时间变化曲线(图4);按上述反应动力学参数的标定方法,获得原位加热开采条件下有机质热解的频率因子和反应活化能。

结果显示,低速升温速度下的热解初始温度较低,快速升温对应的温度降低,表现在转化率-温度曲线左移,原位改质过程中页岩油热解温度区间低于实验

室条件下的热解温度区间,但需要更长的热解时间。烃类气生成的活化能范围较宽($57\sim 74\text{ kcal/mol}$),频率因子为 2.39×10^{14} ,说明气体来自多个不同的热解反应,轻油热解成烃类气气体主要为 $\text{C}-\text{C}$ 键的断裂,需要更高的能量;轻油气生成的主要活化能分布范围较窄($56\sim 59\text{ kcal/mol}$),频率因子为 1.01×10^{13} ;生成重油的活化能为($39\sim 49\text{ kcal/mol}$),明显低于轻油和气体,频率因子为 5.20×10^{11} (图5)。

3.3 高温页岩渗透性变化

3.3.1 页岩基质高温渗透率变化

采用高温三轴应力页岩渗透率测定装置测定基质页岩样品,在围压为 3 MPa , $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下应用氮气测得页岩原始渗透率为 $0.01\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$;然后持续加热至 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。整个气测渗透率曲线总体上呈现出下降段、上升段和水平稳定段。加热初期,岩心渗透率略有下降,这与矿物膨胀占据一定的孔隙空间有关,随后渗透率缓慢上升,有机质开始热解,当加热到 15 h 后,渗透率上升速度加快, 30 h 后油气不再产出,表观渗透率基本稳定在 $0.65\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ (图6)。

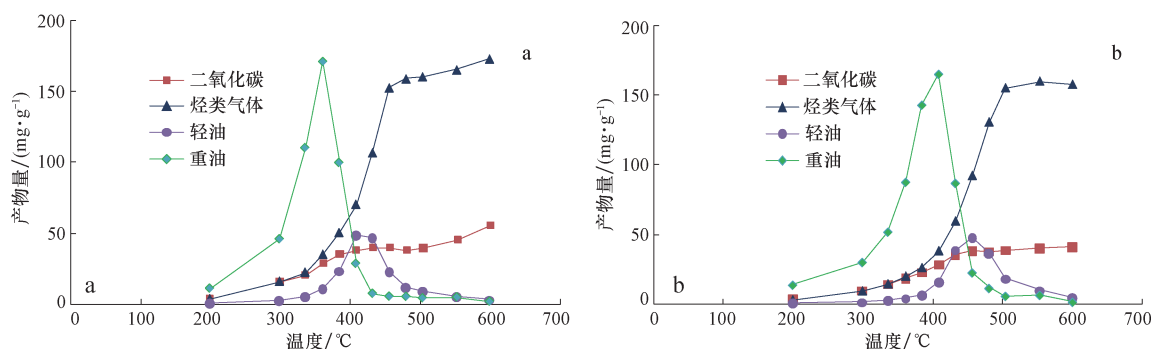


图3 升温速度对产物组成变化的影响

Fig. 3 The effect of heating rate on product composition

a. 升温速度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 产物组成随温度的变化特征; b. 升温速度为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 产物组成随温度的变化特征

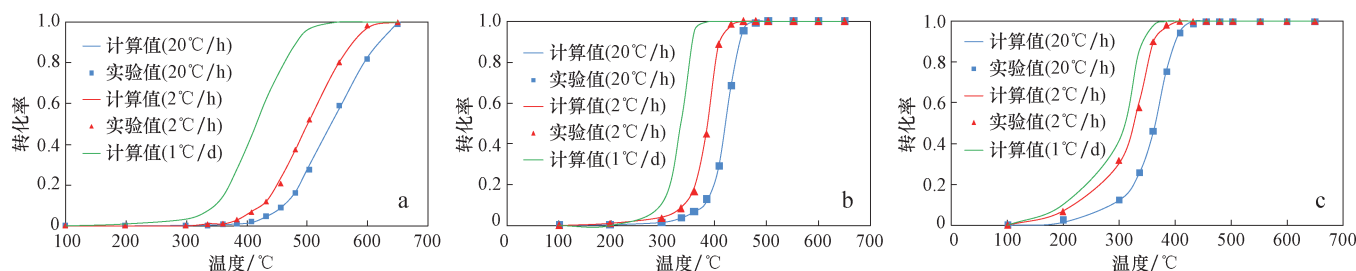


图4 热解烃类产物转化率随温度变化曲线

Fig. 4 Rates of hydrocarbon conversion through pyrolysis with temperature

a. 烃类气体; b. 轻质油; c. 重质油

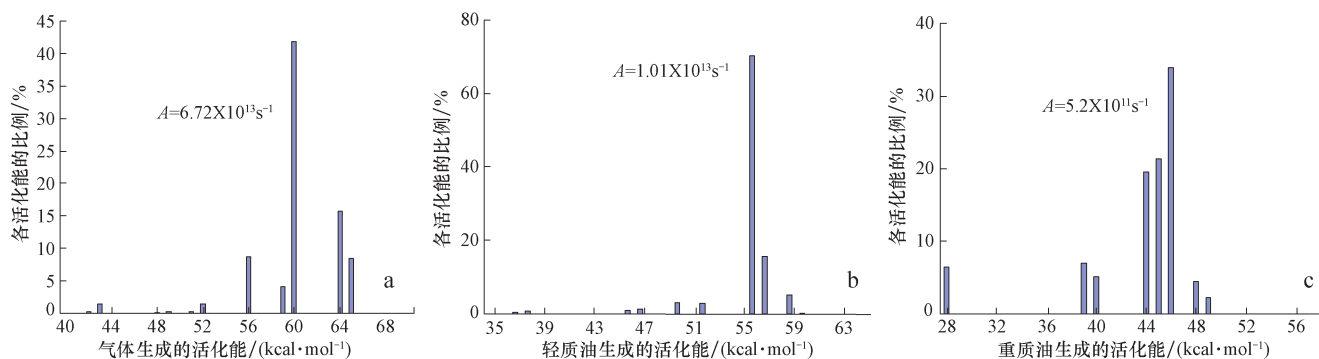


图5 烃类产物生成频率因子(A)及活化能

Fig. 5 Frequency factor and activation energy of hydrocarbon generation

a. 烃类气体; b. 轻质油; c. 重质油; A 为频率因子

3.3.2 裂缝型页岩高温渗透率变化

选取发育层理缝的页岩样品,在 3 MPa 围压和 20 °C 条件下,测得初始渗透率为 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。然后持续加热至 450 °C,整个气测渗透率曲线同样总体上呈现出下降段、上升段和稳定段,但渗透率数值差异较大,渗透率数值明显高于基质渗透性,加热过程中渗透率数值受裂缝导流能力的变化及流体组分的变化表现出一定的波动。25 h 后渗透率稳定在 $12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 7)。

3.3.3 裂缝型页岩渗透率应力敏感性

实验选取发育层理缝的岩心样品,进行不同围压下的渗透率测试。结果显示,这些层理缝页岩岩心渗透率随着围压的升高会明显降低,后期趋于平稳。样品的渗透率随围压变化较大,表现出显著的应力敏感性(图 8)。这主要是由于形成的层理缝随着围压升高、层理缝闭合、渗透率下降。在高应力地区或埋藏较深的页岩层位,加热后的地层渗透率的改善会受到一定影响。

事实上,高温条件下在油气产生阶段的数据实际上为多相渗流,瞬时渗透率为氮气气相的渗透率,当热解反应结束不再产生新的产物时,样品孔隙结构也不再发生变化,这时的渗透率趋于稳定并与气测渗透率一致。

4 结论

1) 页岩油地层有机质成熟度对温度敏感,固体有机质和滞留烃在加热页岩地层过程中发生热解,产物组分动态变化,存在产油最大的温度区间,对应的高产油窗口 R_o 在 0.8% ~ 1.2%。有机质热解生成重油的活化能较低,重油热解生成轻质油的活化能较高,轻质油生成气体活化能最高。

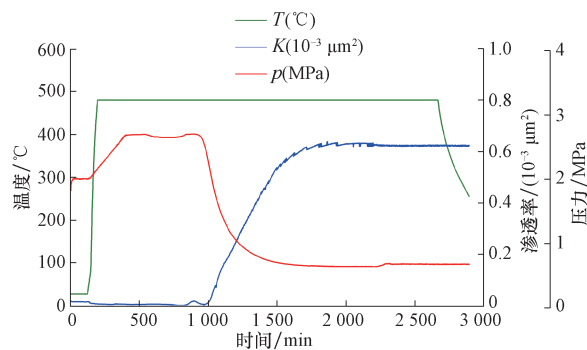


图6 高温条件下页岩基质渗透率随时间的变化特征

Fig. 6 Permeability variation in shale matrixes under high temperature with time

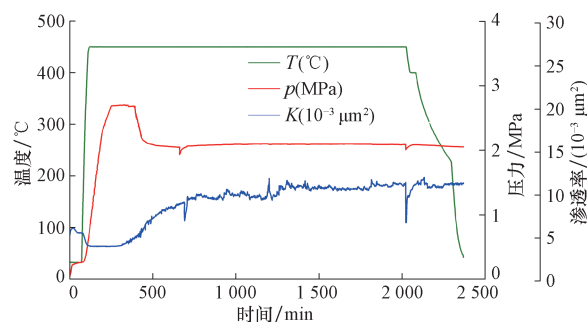


图7 高温条件下裂缝型页岩渗透率随时间的变化特征

Fig. 7 Permeability variation in fractured shale under high temperature with time

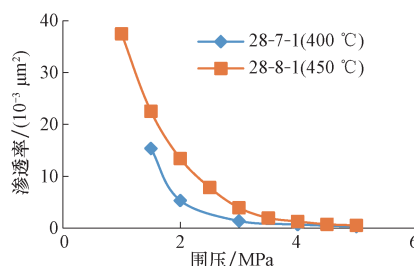


图8 不同围压下的岩心渗透率

Fig. 8 Core permeability under different confining pressures

2) 在原位加热改质开采条件下,热解的产物长时间处于高温环境下,热解出的页岩油在高温下会发生二次反应,轻油产量随温度上升先增加后减少。因此控制热解区温度、提高产物产出速度有利于提高热解产油量。

3) 页岩渗透性受其内部有机质的相态转化及岩石基质受热膨胀等多重因素的综合作用而动态变化。加热可使地层渗透率得到明显改善。低温阶段,有机质和粘土矿物的软化变形会不断挤压已经产生的裂隙、孔隙通道,造成页岩渗透率降低;高温阶段有机质的热解过程使页岩渗透率的大幅度提高,并达到某一稳定值。

4) 页岩地层渗透性主要受天然裂缝或层理缝的控制。加热可使裂缝型地层渗透率从原始的 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 上升到 $12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 裂缝性地层渗透率的应力敏感性较强,在低围压下可为页岩油气的产出提供有效的渗流通道。

参 考 文 献

- [1] Ungger P, Pelet R. Extrapolation of the kinetics of oil and gas formation from laboratory experiments to sedimentary basins[J]. *Nature*, 1987, 327: 52-54.
- [2] Lu S F, Fu X T, Liu X Y, et al. Kinetic model of oil-formed gas and its calibration. *Natural Gas Industry*[J], 1996, 16(6): 6-9.
- [3] Shen Z M. Some kinetic characteristics of hydrocarbon generation of soluble organic matter in low-mature source rocks. *Geological Review* [J], 1999, 45(1): 85-91.
- [4] Jereny Boak. Oil shale is now the time[R]. Garfield county energy advisory board; Colorado School of Mines, 2011.
- [5] Bartis J T, LA Tourrette, Dixon L, et al. Oil shale development in the United States[R]. Prospects and policy issues; The RAND Corporation, 2005.
- [6] Mitchell Leverette. Status and plans for the U. S. department of interior program for development of oil shale and oil sands[R]. 31th Oil Shale Symposium, 2011.
- [7] Harold Vinegar. Shell's S in-situ conversion process[R], Colorado; 26th Oil Shale Symposium, 2006.
- [8] Tanaka P L, Yeakel J D, Symington W A, et al. Plan to test Exxon-Mobil's S in situ oil shale technology on a proposed RD&D lease[R]. Colorado; 31th Oil Shale Symposium, 2011.
- [9] Indrek Aarna. Life cycle carbon intensity, water use of upgraded shale oil products using the enet280 technology[R]. Colorado; 31st Oil Shale Symposium, 2011.
- [10] Jacob H Bauman, Milind D D. Parameter space reduction and sensitivity analysis in complex thermal subsurface production processes[J]. *Energy and Fuels*, 25(1): 251-259, 2011.
- [11] Burnham A K, Braun R L. Global kinetic analysis of complex materials[J]. *Energy and Fuels*, 13(1): 1-22, 1999.
- [12] Braun R L, Burnham A K. A flexible model of oil and gas generation cracking and expulsion[J]. *Organic Geochemistry*, 19: 161-172, 1992.
- [13] 刘金钟, 唐永春. 用干酪根生烃动力学方法预测甲烷生成量之一例[J]. *科学通报*, 1998, 43(11): 1187-1191.
Liu Jinzhong, Tang Yongchun. An example of predicting methane production by kinetic method of kerogen hydrocarbon generation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(11): 1187-1191.
- [14] 杜玉明. 惠民凹陷南坡煤成气成藏动力学研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2004.
Du Yuming. Research on dynamics of coal formed gas reservoir in the south slope of Huimin Sag[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [15] 汪友平, 王益维, 孟祥龙, 等. 流体加热方式原位开采油页岩新思路[J]. *石油钻采工艺*, 2014, 36(4): 71-74.
Wang Youping, Wang Yiwei, Meng Xianglong, et al. A new idea for in-situ retorting oil shale by way of fluid heating technology[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2014, 36(4): 71-74.
- [16] 汪友平, 王益维, 孟祥龙, 等. 美国油页岩原位开采技术与启示[J]. *石油钻采工艺*, 2013, 35(6): 55-59.
Wang Youping, Wang Yiwei, Meng Xianglong, et al. Enlightenment of American's oil shale in-situ retorting technology[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2013, 35(6): 51-59.
- [17] 钱家麟, 尹亮. 油页岩: 石油的补给能源[M]. 北京: 中国石化出版社, 2008.
Qian Jialin, Yin Liang. Oil shale: Petroleum alternative[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2008.
- [18] 卢双舫. 有机质成烃动力学理论及其应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
Lu Shuangfang. Kinetic theory of hydrocarbon formation of organic matter and its application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [19] 康志勤, 王玮, 曹伟, 等. 原位开采背景下油页岩渗透规律的研究[J]. *太原理工大学学报*, 2013, 44(6): 768-770.
Kang Zhiqin, Wang Wei, Cao Wei, et al. Experimental study of permeating law of oil shale under in-situ process[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2013, 44(6): 768-770.
- [20] 刘均荣, 秦积舜, 吴晓东. 温度对岩石渗透率影响的实验研究[J]. *石油大学学报(自然科学版)*. 2001, 25(4): 51-53.
Liu Junrong, Qin Jishun, Wu Xiaodong. Experimental research on the effect of temperature on rock permeability[J]. 2001, 25(4): 51-53.

(编辑 张玉银)