第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0043-08

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
ⓒ 2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:李玉博, 薛林福, 马建雄. 油页岩原位开采过程中孔隙度和渗透率变化数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 43—50
Li Yubo, Xue Linfu, Ma Jianxiong. Numerical simulation of the changes of porosity and permeability in in-situ pyrolysis of oil shale[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 43—50

石油、天然气工业

# 油页岩原位开采过程中孔隙度和渗透率变化数值模拟

李玉博　薛林福*　马建雄
(吉林大学地球科学学院,长春 130061)

**摘　要**　油页岩原位开采技术是一种经济、环保的油页岩利用技术。在油页岩原位开采过程中,温度变化引起油页岩中干酪根的分解及黏土矿物的转化使油页岩的孔隙度和渗透率发生改变,而孔隙度和渗透率正是影响生成的烃类物质运移的重要因素。为了研究油页岩原位开采过程中孔隙度和渗透率的变化规律,参考吉林省松原地区油页岩原位开采的现场试验情况,以梅花状布井方式建立了三维模型,模拟了油页岩原位开采的注热、生烃、黏土矿物转化以及孔隙度和渗透率变化的过程。结果表明:油页岩原位开采过程中,油页岩的孔隙度和渗透率随生烃过程的进行呈现增大趋势,且增长速率先快后慢,注热 1 000 d时,孔隙度增长了 3.37%,渗透率增长了 $0.004\,9\times10^{-3}$ $\mu m^2$。油页岩的孔隙度随蒙脱石-伊利石的转化逐渐增大;蒙脱石-伊利石转化过程使油页岩的渗透率有所增大;注热 1 000 d 时,孔隙度增长了 2.14%,渗透率增长了 $0.002\,5\times10^{-3}$ $\mu m^2$。

**关键词**　原位开采技术　干酪根　黏土矿物　孔隙度　渗透率　数值模拟
**中图法分类号**　TE329;　　**文献标志码**　A

石油在人类消费的基本能源中占据着首要的地位,它为全球经济发展提供着动力。中国是化石能源消耗大国,石油能源与中国的经济安全及国家安全紧密相关,然而中国石油的自主开采量已远不能满足需求量。油页岩作为一种含有固体可燃有机质的沉积岩国际上被公认为是石油的重要替代资源之一。随着各国经济发展和油页岩所显现的愈来愈重要的作用,定会有更多的油页岩矿藏被发现[1]。

油页岩可以通过地面干馏被利用,按传热方式的不同,油页岩干馏工艺分为固体热载体干馏工艺和气体热载体干馏工艺[2]。但地面干馏方法的成本较高且对环境有一定的污染。20 世纪 80 年代以来,世界一些知名大公司均注巨资用于开发更为经济、环保的油页岩原位地下开采技术。油页岩原位开采技术是在地下通过高温流体,或燃烧等方式对油页岩进行加热使油页岩中的干酪根转化为液态烃而获取油气的技术[3]。目前主要的原位开采技术有荷兰壳牌集团公司研发的通过电加热棒加热油页岩的 E-ICP 技术[4]、雪佛龙公司开发的利用冷冻法或爆炸法的碎石化技术对油页岩进行改造的 CRUSH 技术[5]和以色列亚洲集团的 IIST-VTPC 技术等。此外,吉林省众诚油页岩公司研发了原位压裂化学提取油页岩油气技术(IFCD)并在吉林松原地区从地下 300 m 处产出油页岩油。

油页岩原位开采中,通过注气井注入高温气体加热油页岩层,油页岩中的干酪根逐渐分解产生流体成分的油页岩油和气,且油页岩中的黏土矿物伊蒙混层和高岭石的含量逐渐减少,伊利石含量先逐渐增加,后期减少并消失,在最后加热阶段出现绿泥石[6]。原位赋存状态的油页岩是致密的,其孔隙率极低,渗透性极差[7],随着干酪根的分解和黏土矿物的受热转化,产生大量的裂缝和微孔,导致油页岩的孔隙度增加,油气原地富集造成的压力增大和油气运移,使得孔隙和裂缝之间相互连通,促进加热后油页岩的渗透率提高[6]。

在油页岩原位开采过程中存在许多技术、环境和经济等方面的问题。油页岩原位开采过程的数值模拟能以较低的成本获取对该过程的理论认识,同时对油页岩现场试验和最优化开采方案的制定提供参考与支持。Fan 等[8]对油页岩原位开采过程进行了数值模拟,得到温度场及烃类产量的模拟结果,该

2018 年 7 月 4 日收到
第一作者简介:李玉博(1995—),女,汉族,硕士研究生。E-mail:liyb2018@163.com。
*通信作者简介:薛林福(1962—),男,汉族,博士,教授。E-mail:190780877@qq.com。

结果与美国绿河油页岩现场试验数据符合,并通过敏感性分析发现油和气的产量高度依赖于加热器的温度。雷光伦等[9]依据美国的绿河盆地油页岩原位电加热开采项目,利用油藏数值模拟软件 CMG 建立了油页岩原位加热开采模型,但是把电加热井改为了高温蒸汽注入井,模拟得到油页岩的温度场、干酪根分解情况和产油量。目前油页岩的原位开采数值模拟过程未考虑黏土矿物的转化及油页岩孔隙度和渗透率的变化情况,而孔隙度和渗透率是决定生成的油页岩油和气能否顺利产出的重要因素,因此对油页岩原位开采过程中孔隙度和渗透率变化进行的数值模拟研究具有重要意义。

本文针对注气井呈梅花状或六边形布设的情况(简称梅花井组)且在油页岩层中含有双压裂隙的油页岩原位开采模型进行了数值模拟实验研究。模拟了油页岩原位开采的注热、油页岩生烃和油页岩中黏土矿物转化的过程以及上述过程对油页岩的孔隙度和渗透率产生的影响。

## 1 油页岩原位开采三维模型的建立

三维模型的建立是数值模拟过程中的关键一步,模型能否准确建立决定了最终模拟结果的可靠性,然而实际地质情况是复杂的,只能对模型进行理想化和概化。吉林省松原地区油页岩原位开采现场试验过程中共布设了两口注气燃烧井和三口导出生产井,生产井以注气燃烧井为中心呈蜂窝形布局,邻井间距为 25 ~ 50 m,井口直径为 0.15 m,油页岩层中有若干条 1 ~ 3 mm 的人工压裂隙。参考吉林省松原地区油页岩原位开采的现场试验情况,以梅花状布井方式建立了较小区域的油页岩原位开采模型,拟为进一步进行的开采实验和规模化生产提供科学依据。该模型共分三层,上层为 5 m 厚的泥岩,中层为 4.5 m 厚的油页岩,下层为 4 m 厚的泥岩,三层的长和宽均为 40 m,其中在油页岩层中有两条长和宽均为 36 m、厚度为 2 mm 的人工压裂隙。

模型中注气井呈梅花状或六边形布设,生产井位于六边形区域的中心。注气井与生产井的间距为 15 m,井口直径均为 0.15 m(图 1)。油页岩的体积约为 7 194.32 $m^3$,泥岩体积约为 14 399.40 $m^3$,流体部分(注气井、生产井和双压裂隙)的体积约为6.28 $m^3$(图 2)。假设该模型是均质的、各向同性的。

油页岩原位开采时注入的气体为燃烟气,由于燃烟气的成分与空气的成分基本相同,模拟中将燃烟气的物理性质设置与空气相同,注气速率设置为 10 m/s,注入气体的初始温度设置为 900 K,油页岩及泥岩的初始温度设置为 300 K。模拟过程中仅考

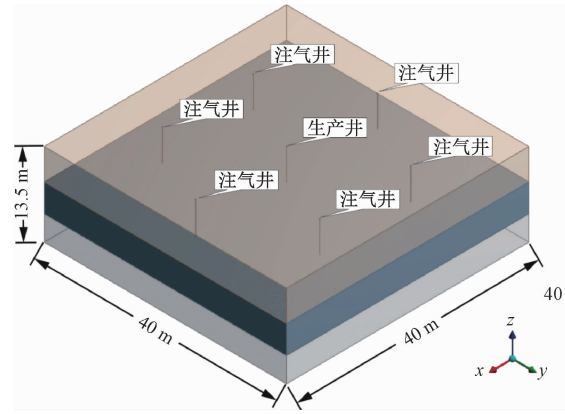


图 1 油页岩原位开采三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of oil shale in-situ pyrolysis

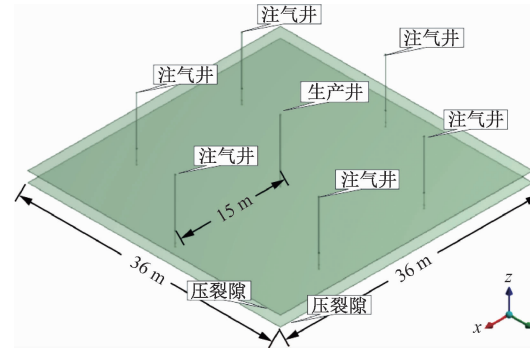


图 2 油页岩原位开采三维模型-流体部分

Fig. 2 Three-dimensional model of oil shale in-situ pyrolysis-fluid section

虑注入气体的热量。模型各部分物性参数设置如表 1所示。

油页岩生烃过程中干酪根分解的化学动力学方程为

$$\frac{\mathrm{d}X}{\mathrm{d}t} = -kX \tag{1}$$

$$k = A\exp\left(\frac{10^3 E_a}{RT}\right) \tag{2}$$

式中:$X$ 为干酪根的质量,kg;$t$ 为反应时间,s;$k$ 为化学反应速率常数,$s^{-1}$;$A$ 为频率因子,$s^{-1}$;$E_a$ 为表观活化能,$kJ\cdot mol^{-1}$;$R$ 为气体常数,$J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}$;$T$ 为温度,K,由温度场计算结果给出。频率因子 $A$ 和表观活化能 $E_a$ 参考钱家麟等[10]实验计算结果(表 2)。

油页岩中黏土矿物的转化主要模拟了蒙脱石-

**表 1 燃烟气、油页岩及泥岩的物性参数**

**Table 1 Properties of fuel gas, oil shale and mudstone**

| 名称 | 密度/($kg\cdot m^{-3}$) | 比热容/($J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$) | 热传导系数/($W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 燃烟气 | 1.225 | 1 006.43 | 0.024 2 |
| 油页岩 | 1 900 | 1 000 | 0.3 |
| 泥岩 | 1 900 | 1 000 | 0.31 |

**表 2　化学动力学反应参数**

**Table 2　Parameters of chemical kinetics reaction**

| 名称 | 频率因子 $A/s^{-1}$ | 表观活化能 $E_a/(kJ\cdot mol^{-1})$ |
|---|---|---|
| 干酪根分解 | $2.03\times10^{9}$ | 158.0 |
| 蒙脱石-伊利石转化 | $8.08\times10^{4}$ | 117.2 |

伊利石的转化过程,利用 Pytte 和 Reynolds[11] 在 1989 年提出的蒙脱石向伊利石转化的化学动力学模型,通式如下:

$$\frac{dS}{dt} = -kS^{a}\left(\frac{K^{+}}{Na^{+}}\right)^{b} \tag{3}$$

$$\frac{K^{+}}{Na^{+}} = 74.2\exp(-2\,490/T) \tag{4}$$

式中:$S$ 为蒙脱石的质量,kg;$a=5$;$b=1$;$K^{+}$ 为钾离子浓度,mol·$L^{-1}$;$Na^{+}$ 为钠离子浓度,mol·$L^{-1}$;式(3)中化学反应常数 $k$ 根据式(2)计算得出,其中频率因子 $A$ 和活化能 $E_a$ 参考石广仁[12] 的黏土矿物分析结果(表 2)。

## 2　油页岩原位开采数值模拟结果

### 2.1　油页岩原位开采注热过程模拟结果

油页岩原位开采的注热过程是将 900 K 的高温燃烟气通过 6 个梅花状布设的注气井注入油页岩层中,随着注入时间的增加,该燃烟气会充满 6 个注气井以及两条人工压裂的裂隙,与此同时,热量会逐渐传入油页岩层和泥岩层中,使油页岩和泥岩的温度升高,进而促使油页岩中干酪根分解及黏土矿物转化。油页岩靠近加热区域的一端热解最充分,中间区域发育较多微裂隙,热烟气通过这些裂隙热解油页岩,在远离加热区域的一端的较大裂隙也可以促使热烟气热解油页岩[13]。

油页岩原位开采三维模型建立后,将模型进行网格化处理,利用有限体积法数值模拟了油页岩原位开采的注热过程,模拟得到对油页岩注热 1 000 d 内的温度场(图 3)。可以看出,注气井及双压裂隙附近的油页岩的温度先升高,之后其他位置的油页岩的温度也逐渐升高。注热 100 d 时,温度达 458 K 的油页岩体积占油页岩总体积的 18.2%;注热300 d时,温度达到 458 K 的油页岩体积占油页岩总体积的 36.1%;注热 600 d 时,温度达到 458 K 的油页岩体积占油页岩总体积的 62.8%;注热 1 000 d 时,温度达到458 K 的油页岩体积占油页岩总体积的 86.2%,且温度达到 723 K 的油页岩体积占油页岩总体积的 21.6%。可见梅花井组双压裂隙油页岩原位开采加热效果显著。

### 2.2　油页岩原位开采生烃过程模拟结果

油页岩原位开采生烃过程的数值模拟基于化学动力学方程的求解,而化学动力学方程组与温度是高度耦合的,因此利用 MATLAB 软件读入注热过程模拟所得的温度场结果,并利用积分法求解化学动力学方程组,进而实现生烃过程的数值模拟。根据吉林省松原地区油页岩的含油率,模拟中将油页岩的含油率设置为 5%,模拟结果如图 4、图 5 所示,其中图 4 为不同时刻油页岩层中烃类物质生成量的切片图。在注热 10 d 时,注气井周围油页岩层中的干酪根已经开始分解产生油页岩油和气;注热 100 d 时,部分油页岩中的干酪根已经完全分解;注热 400 d时,69% 的油页岩中的干酪根完全分解;注热 1 000 d时,油页岩中完全分解的干酪根达到 86%(图 4)。此外,由烃类生成速率曲线[图 5(a)]可以

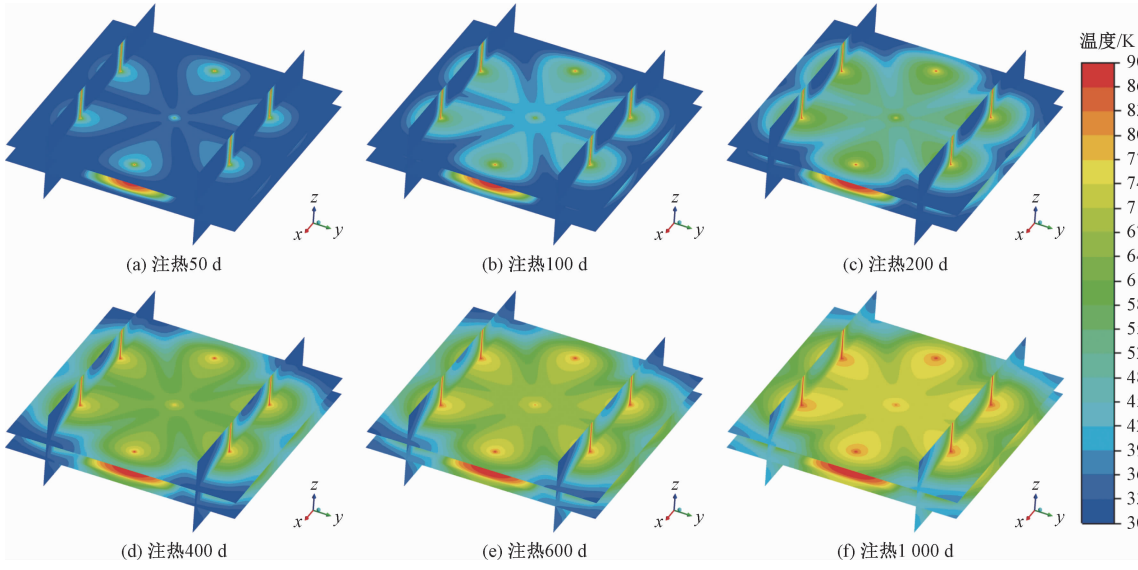


图 3　油页岩原位开采过程中温度场变化

Fig. 3　Temperature field changes during in-situ pyrolysis of oil shale

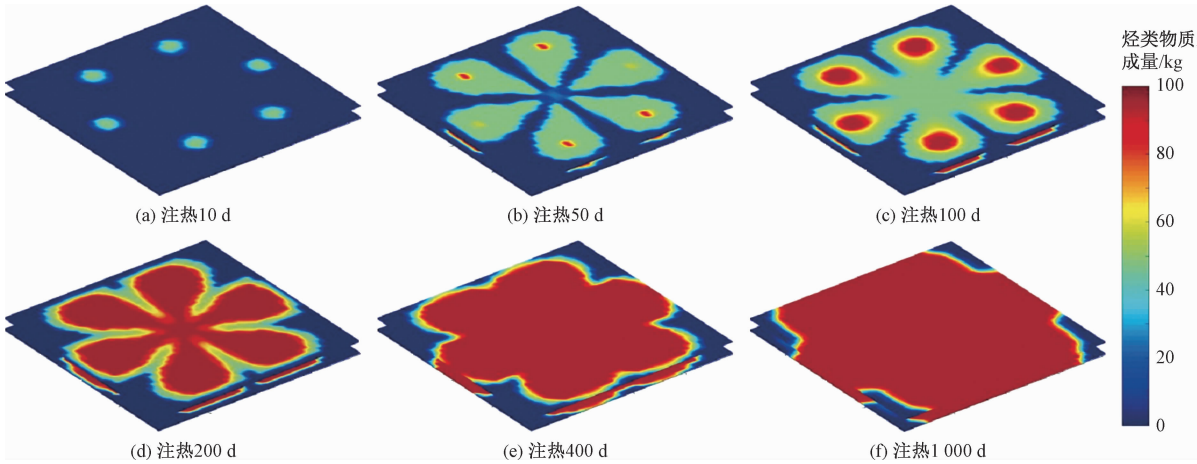


图 4 油页岩原位开采过程中烃类物质生成量

Fig. 4 Hydrocarbon production during in-situ pyrolysis of oil shale

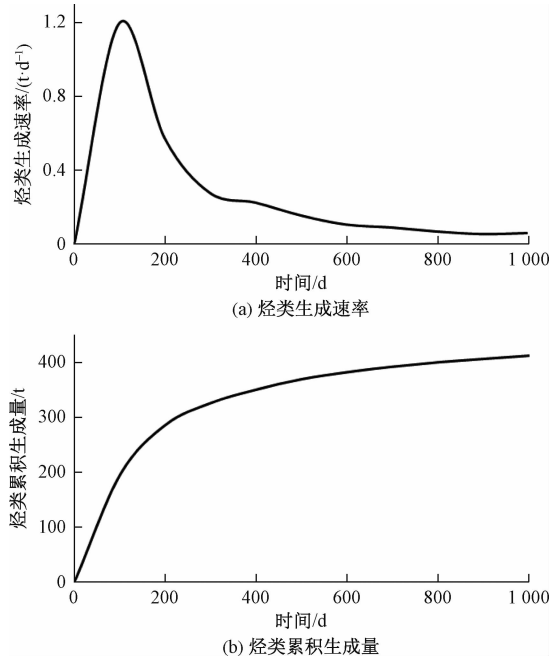


图 5 油页岩原位开采过程中烃类物质生成量随时间变化曲线

Fig. 5 The changing curves of hydrocarbon producing with time during in-situ pyrolysis of oil shale

看出,烃类物质的生成速率先迅速升高至峰值后开始下降,峰值的位置在注热 100 d 左右。由于以梅花井组的布井方式加热油页岩,注热过程开始后,携带热量的气体便迅速充满注气井及两条压裂隙,进而将热量传导至周围的油页岩层,导致油页岩中的干酪根迅速分解,产生大量的烃类物质。在注热 100 d 之后,烃类物质的产出速率逐渐减小,并略有波动。在注热 600 d 之后,油页岩中大部分干酪根完全分解,且边缘区油页岩获得的热量少,干酪根未达到分解所需的温度条件,因此烃类物质的产出速率缓慢。烃类物质累积生成量[图 5(b)]呈先升高后趋于平缓的趋势。烃类物质累积生成量在注热 400 d 之前,有明显的增长;在注热 400 ~ 800 d 有略微的增长;在注热 800 d 之后,增长不明显。

### 2.3 蒙脱石-伊利石转化过程模拟结果

油页岩原位开采过程中注热过程使油页岩的温度升高,油页岩中的蒙脱石不断脱水,并不断吸取钾等金属离子而转化为伊利石,故蒙脱石的含量越来越小[12]。模拟蒙脱石-伊利石转化过程时,利用 Pytte 和 Reynolds[11]在 1989 年提出蒙脱石向伊利石转化的化学动力学模型。将注热过程模拟的温度场结果导入 MATLAB 软件,通过在 MATLAB 软件中编程实现龙格-库塔法求解蒙脱石-伊利石转化的化学动力学方程,完成该过程的数值模拟。参考实验获得的吉林松原地区油页岩的蒙脱石含量,模拟中将油页岩中的蒙脱石含量设置为 36%,模拟结果如图 6和图 7 所示,其中图 6 为不同时刻油页岩层中伊利石生成量的切片图。

模拟结果显示,注热 16 d 时,注气井附近的油页岩中的蒙脱石开始向伊利石转化;注热 200 d 时,油页岩中约 30.88% 的蒙脱石发生转化,生成 720.46 t 伊利石;注热 400 d 时,油页岩中约 39.04% 的蒙脱石发生转化,生成 1 518.10 t 伊利石;注热 800 d 时,油页岩中约 55.25% 的蒙脱石发生转化,生成2 189.52 t伊利石;注热 1 000 d 时,约 61.71% 的蒙脱石发生转化,生成2 494.61 t的伊利石(图 6)。伊利石生成速率[图 7(a)]先升高至峰值后降低,在注热 50 d 时,伊利石生成速率达 21 t·d$^{-1}$,注热 50 d 之后速率开始下降,400 d 之后出现波动。伊利石累积生成量[图 7(b)]在注热 1 000 d 内持续增长,蒙脱石-伊利石转化过程与干酪根分解过程相比较为滞后,且未出现平缓增长情况,而是具有较为明显的持续增长趋势。这是因为油页岩中蒙

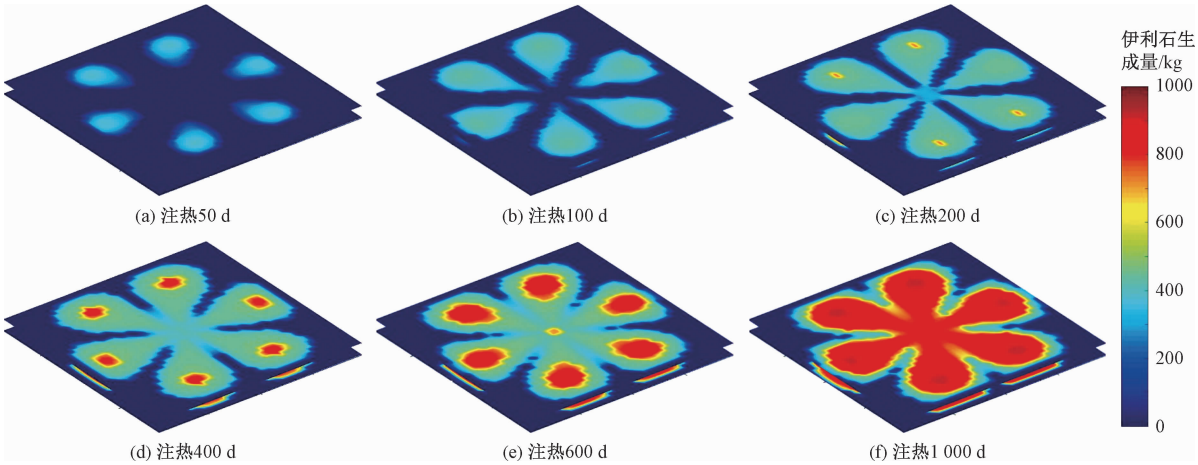


图 6　油页岩原位开采过程中伊利石生成量

Fig. 6　Illite generation during in-situ pyrolysis of oil shale

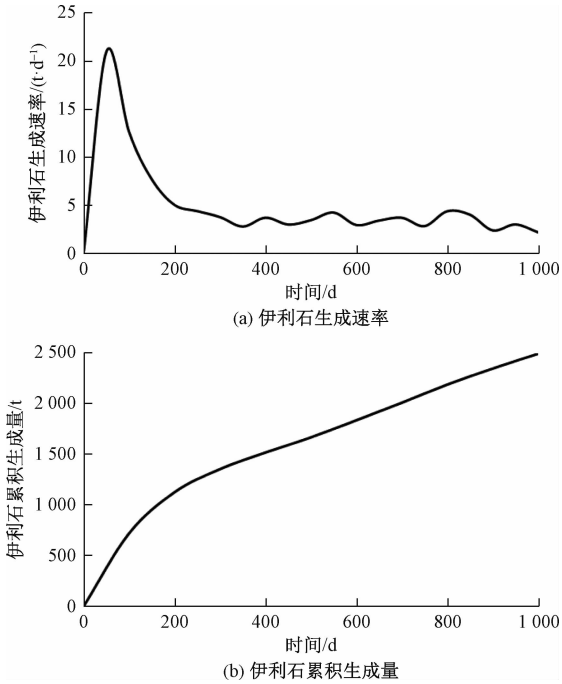


图 7　油页岩原位开采过程中伊利石生成量随时间变化曲线

Fig. 7　The changing curves of illite generating with time during in-situ pyrolysis of oil shale

脱石-伊利石转化过程所需要的温度条件高于干酪根分解所需要的温度条件。在注热1 000 d时,油页岩中大部分的干酪根已完全分解,而油页岩中的蒙脱石只有少部分转化完全。

## 3　油页岩孔隙度和渗透率变化

油页岩原位开采过程中孔隙度和渗透率的变化是一个相对复杂的过程,在数值模拟过程中将该过程做简化处理。油页岩受热后生成油、气和固态灰分,其中生烃过程中干酪根分解产生的油页岩油和烃类气体构成了流体组分,而固态灰分则留在原地,由此可以计算出油页岩的孔隙度的变化情况,得到干酪根分解对孔隙度的影响。设油页岩的初始有效孔隙度为5%,研究区的油页岩中的干酪根主要为Ⅲ型干酪根,模拟中设Ⅲ型干酪根的密度设置为1 700 kg/m$^3$。蒙脱石的密度小于伊利石,相同质量的蒙脱石所占空间大于伊利石,因此可以计算出蒙脱石转化为伊利石后所增加的孔隙体积,进而得到蒙脱石-伊利石转化过程对油页岩孔隙度的影响情况,模拟中设置蒙脱石的密度为2.35 g/cm$^3$,伊利石的密度为2.75 g/cm$^3$。

Kozeny-Carman 方程是多孔介质渗流的半经验公式,可有效估算多孔介质的渗透率($K$)。Kozeny-Carman 方程为

$$K = \frac{C\varphi^{n+1}}{S^2(1-\varphi)^n} \tag{5}$$

式(5)中:$C$ 和 $n$ 为 Kozeny-Carman 常数,由孔隙形状决定;$\varphi$ 为孔隙度,%;$S$ 为孔隙比表面积,m$^2$/g。模拟采用赵静[14]的结果,参考其实验结果,将式(5)中的 $C$、$n$ 和 $S$ 分别设置为2.064×10$^{-7}$ m$^6$/g$^2$、2 和4.85,且设置油页岩的初始渗透率为0.001 2×10$^{-3}$ μm$^2$。

### 3.1　生烃过程对油页岩孔隙度和渗透率的影响

油页岩的孔隙度随生烃过程的进行呈现增加的趋势,且增长速率先快后慢(图 8)。在注热 200 d 之前,由于干酪根的迅速分解,生成流体成分油页岩油和气,孔隙空间增加,孔隙度变大;注热 200 ~ 1 000 d,孔隙度增长的比较缓慢;注热 1 000 d 时,油页岩的孔隙度增加3.37%(表3)。

生烃过程使油页岩的渗透率有所增大,且增加速率先快后慢(图9),油页岩层的初始渗透率为0.001 2×10$^{-3}$ μm$^2$,注热1 000 d 时,渗透率为0.006 1×10$^{-3}$ μm$^2$),有0.004 9×10$^{-3}$ μm$^2$ 的增长(表4)。

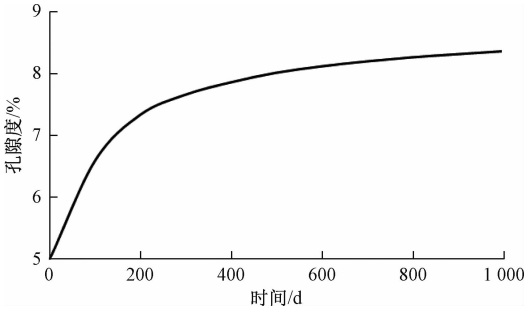


图 8 原位开采中油页岩的孔隙度变化曲线(仅考虑生烃)

Fig. 8 The curve of changes in porosity of oil shale during in-situ pyrolysis (only considering hydrocarbon generation)

**表 3 原位开采中油页岩孔隙度的变化(仅考虑生烃)**

**Table 3 Changes in porosity of oil shale in in-situ pyrolysis (only considering hydrocarbon generation)**

| 加热时间/d | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
|---|---|---|---|---|---|
| 孔隙度/% | 6.60 | 7.34 | 7.66 | 7.86 | 8.02 |
| 加热时间/d | 600 | 700 | 800 | 900 | 1 000 |
| 孔隙度/% | 8.12 | 8.20 | 8.27 | 8.32 | 8.37 |

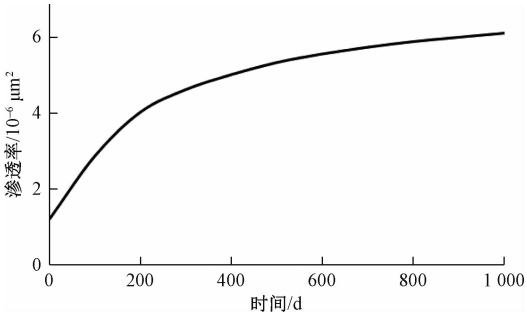


图 9 原位开采中油页岩的渗透率变化曲线(仅考虑生烃)

Fig. 9 The curve of changes in permeability of oil shale during in-situ pyrolysis (only considering hydrocarbon generation)

**表 4 原位开采中油页岩渗透率的变化(仅考虑生烃)**

**Table 4 Changes in permeability of oil shale during in-situ pyrolysis (only considering hydrocarbon generation)**

| 加热时间/d | 100 | 200 | 300 | 400 |
|---|---|---|---|---|
| 渗透率/$10^{-3}$ μm² | 0.002 9 | 0.004 0 | 0.004 6 | 0.005 0 |
| 加热时间/d | 500 | 600 | 800 | 1 000 |
| 渗透率/$10^{-3}$ μm² | 0.005 3 | 0.005 6 | 0.005 9 | 0.006 1 |

### 3.2 蒙脱石-伊利石转化过程对油页岩孔隙度和渗透率的影响

油页岩的孔隙度随蒙脱石-伊利石转化过程的进行呈增加趋势(图 10),这是由于蒙脱石的密度普遍小于伊利石,相同质量的蒙脱石所占空间大于伊利石。注热 1 000 d 时,油页岩的孔隙度增加 2.14%(表 5)。

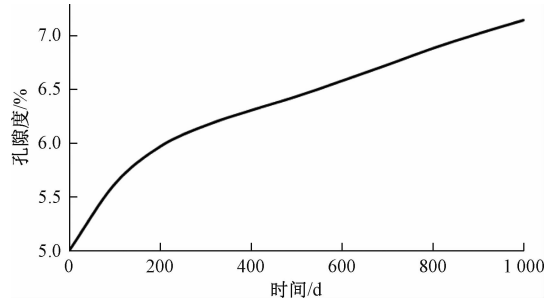


图 10 原位开采中油页岩的孔隙度变化曲线(仅考虑蒙脱石-伊利石转化)

Fig. 10 The curve of changes in porosity of oil shale in in-situ pyrolysis (only considering montmorillonite to illite conversion)

**表 5 原位开采中油页岩孔隙度的变化(仅考虑蒙脱石-伊利石转化)**

**Table 5 Changes in porosity of oil shale during in-situ pyrolysis (only considering montmorillonite to illite conversion)**

| 加热时间/d | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
|---|---|---|---|---|---|
| 孔隙度/% | 5.62 | 5.97 | 6.16 | 6.31 | 6.43 |
| 加热时间/d | 600 | 700 | 800 | 900 | 1 000 |
| 孔隙度/% | 6.58 | 6.73 | 6.88 | 7.02 | 7.14 |

蒙脱石-伊利石转化过程使渗透率增大(图 11)。油页岩层初始渗透率为 $0.001\ 2\times10^{-3}$ μm²,注热 1 000 d 时,渗透率为 $0.003\ 7\times10^{-3}$ μm²,有 $0.002\ 5\times10^{-3}$ μm² 的增长(表 6)。

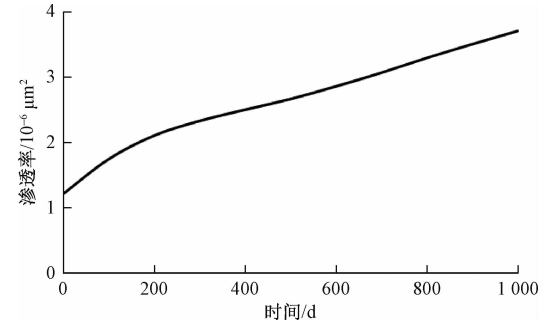


图 11 原位开采中油页岩的渗透率变化曲线(仅考虑蒙脱石-伊利石转化)

Fig. 11 The curve of changes in permeability of oil shale during in-situ pyrolysis (only considering montmorillonite to illite conversion)

**表 6 原位开采中油页岩渗透率的变(仅考虑蒙脱石-伊利石转化)**

**Table 6 Changes in permeability of oil shale during in-situ pyrolysis(only considering montmorillonite to illite conversion)**

| 加热时间/d | 100 | 200 | 300 | 400 |
|---|---|---|---|---|
| 渗透率/$10^{-3}$ μm² | 0.001 7 | 0.002 1 | 0.002 3 | 0.002 5 |
| 加热时间/d | 500 | 600 | 800 | 1 000 |
| 渗透率/$10^{-3}$ μm² | 0.002 7 | 0.002 9 | 0.003 3 | 0.003 7 |

## 4　结论

(1)油页岩原位开采生烃过程中,烃类物质的生成速率先迅速升高至峰值后开始下降。烃类物质累积生成量呈现先升高后趋于平缓的趋势。

(2)油页岩原位开采过程中,黏土矿物伊利石的生成速率先升高后降低。伊利石累积生成量先迅速增长,之后未出现平缓增长情况,而是具有较为明显的持续增长趋势。

(3)油页岩原位开采过程中,油页岩的孔隙度和渗透率随生烃的进行呈现增大的趋势,且增长速率先快后慢。注热 1 000 d 后,孔隙度增长了 3.37%,渗透率增长了 $0.004\ 9\times10^{-3}\ \mu m^2$。

(4)油页岩原位开采过程中,油页岩的孔隙度随蒙脱石-伊利石的转化逐渐增大,且蒙脱石-伊利石转化过程使渗透率有所增大。注热1 000 d 后,孔隙度增长了 2.14%,渗透率增长了 $0.002\ 5\times10^{-3}\ \mu m^2$。

### 参　考　文　献


1　秦　宏, 孙蓬元, 王　擎, 等. 预脱蜡对油页岩干馏炼油的影响. 科学技术与工程, 2014; 14(16): 49—54
Qin Hong, Sun Pengyuan, Wang Qing, *et al.* Effect of extracting wax from oil shale before retorting on shale oil. Science Technology and Engineering, 2014; 14(16): 49—54

2　秦　宏, 许方平, 刘洪鹏, 等. 油页岩热解过程中的热破碎特性. 科学技术与工程, 2014; 14(13): 26—30
Qin Hong, Xu Fangping, Liu Hongpeng, *et al.* Thermal fragmentation characteristic during pyrolysis of oil shale. Science Technology and Engineering, 2014; 14(13): 26—30

3　Jiang X M, Han X X, Cui Z G. New technology for the comprehensive utilization of Chinese oil shale resources. Energy, 2007; 32(5): 772—777

4　刘胜英, 王世辉, 陈春瑞, 等. 壳牌公司页岩油开采技术与进展. 东北石油大学学报, 2007; 31(3): 53—55
Liu Shengying, Wang Shihui, Chen Chunrui, *et al.* Shell shale oil recovery technique and its progress. Journal of Northeast Petroleum University, 2007; 31(3): 53—55

5　Looney M D. Chevron's plans for rubblization of Green River Formation oil shale (GROS) for chemical conversion. 31th Oil Shale Symposium. Colorado: Colorado School of Mines, 2011

6　常思阳. 松辽盆地油页岩加热过程储集物性特征研究. 长春: 吉林大学, 2017
Chang Siyang. Research on reservoir characteristics of oil shale during heating in Songliao Basin. Changchun: Jilin University, 2017

7　康志勤, 赵阳升, 孟巧荣, 等. 油页岩热破裂规律显微 CT 实验研究. 地球物理学报, 2009; 52(3): 842—848
Kang Zhiqin, Zhao Yangsheng, Meng Qiaorong, *et al.* Microscopic CT experimental study on thermal cracking of oil shale. Chinese Journal of Geophysics, 2009; 52(3): 842—848

8　Fan Y, Durlofsky L J, Tchelepi H A. Numerical simulation of the in-situ upgrading of oil shale. SPE Journal, 2009;15(2):368—381

9　雷光伦, 李　姿, 姚传进,等. 油页岩注蒸汽原位开采数值模拟. 中国石油大学学报(自然科学版),2017; 41(2): 100—107
Lei Guanglun, Li Zi, Yao Chuanjin, *et al.* Numerical simulation on in-situ upgrading of oil shale *via* steam injection. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017; 41(2): 100—107

10　钱家麟, 尹　亮. 油页岩:石油的补充能源. 北京: 中国石化出版社, 2008: 96
Qian Jialin, Yin Liang. Oil shale: Petroleum supplementary energy. Beijing: China Petrochemical Press, 2008: 96

11　Pytte A M, Reynolds R C. The thermal transformation of smectite to illite. Thermal History of Sedimentary Basins. New York: Springer New York, 1989: 133—140

12　石广仁. 蒙皂石转化伊利石的数值模拟——溶解沉淀模型与化学动力学模型. 沉积学报, 2007; 25(5): 693—700
Shi Guangren. Numerical simulation of smectite transformation into illite—Dissolution precipitation model and chemical kinetic mode. Acta Sedimentica Sinica, 2007; 25(5): 693—700

13　王　磊, 杨　栋, 康志勤, 等. 注蒸汽原位开采油页岩热解温度确定及可行性分析. 科学技术与工程, 2015; 45(29): 109—113
Wang Lei, Yang Dong, Kang Zhiqin, *et al.* Determination and feasibility analysis of pyrolysis temperature of steam injection in-situ open production shale. Science Technology and Engineering, 2015; 45(29): 109—113

14　赵　静. 高温及三维应力下油页岩细观特征及力学特性试验研究. 太原: 太原理工大学, 2014
Zhao Jing. Experimental study on mecroscopic characteristics and mechanical properties of oil shale under high temperature & three-dimensional stress. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014

# Numerical Simulation of the Changes of Porosity and Permeability in In-situ Pyrolysis of Oil Shale

LI Yu-bo, XUE Lin-fu*, MA Jian-xiong
(College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China)

[**Abstract**] In-situ pyrolysis of oil shale is an economical and environmental friendly oil shale utilization technology. During the process of in-situ pyrolysis of oil shale, the changes of temperature cause the decomposition of kerogen and the conversion of clay minerals in oil shale, which vary the porosity and permeability of oil shale, and the porosity and permeability of oil shale are important factors for migration of the hydrocarbons. In order to study the changes of porosity and permeability during the in-situ pyrolysis of oil shale, a three-dimensional model with hexagonal well pattern referring to the field tests of in-situ pyrolysis of oil shale in Songyuan City, Jilin Province was established, and the numerical simulations of the processes of heating, hydrocarbon generation, clay mineral conversion, and changes in porosity and permeability during the in-situ pyrolysis of oil shale were conducted. The results show that the porosity and permeability of oil shale show an increasing trend with the hydrocarbon generation process during the in-situ pyrolysis of oil shale, and the growth rate is faster then slower. When the hot gas is injected for 1 000 d, the porosity increases by 3.37% and the permeability increases by $0.004\ 9 \times 10^{-3}\ \mu m^2$. The porosity of oil shale increases with the conversion of montmorillonite to illite, and the conversion of montmorillonite to illite increases the permeability. When the hot gas is injected for 1 000 d, the porosity increases by 2.14% and the permeability increases by $0.002\ 5 \times 10^{-3}\ \mu m^2$.

[**Key words**] in-situ pyrolysis kerogen clay mineral porosity permeability numerical simulation