

压裂-注氮原位裂解油页岩加热工艺及传热模拟

姜鹏飞, 孙友宏, 郭威, 李强
(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘 要: 提出了一种油页岩地下原位转化的新方法, 即压裂-注氮原位裂解油页岩技术. 油页岩储层压裂后, 在加热井内下入电加热器, 然后向井内注入氮气, 利用加热后的高温氮气原位裂解油页岩. 介绍了该方法与传统的电加热法和对流加热法相比的优势, 以及特别适用的地层, 并且对加热氮气过程进行了传热模拟, 优化了气体加热器的参数, 确定加热器的最佳长度为 30 m, 其热流密度为 11 kW/m^2 . 针对本工艺方法特别适用的薄层油页岩地下原位开采, 进行了地层加热时间的传热模拟, 确定了 80 d 即可将井距 15 m, 矿层 1.5 m 厚的油页岩加热到裂解温度, 较电加热法和对流加热法的加热时间明显缩短.

关 键 词: 油页岩; 气体加热器; 注氮气; 传热模拟; 加热时间

中图分类号: TD 83

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)09-1353-06

Heating Technology and Heat Transfer Simulation for Oil Shale of In-situ Pyrolysis by Fracturing and Nitrogen Injection

JIANG Peng-fei, SUN You-hong, GUO Wei, LI Qiang

(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China. Corresponding author: GUO Wei, E-mail: guowei6981@jlu.edu.cn)

Abstract: A new method for the in-situ conversion of oil shale was introduced i. e., oil shale in-situ pyrolysis technique by fracturing and nitrogen injection. Electrical heater was put into the heating well and nitrogen was then pumped into the well. As a result, the oil shale layer was pyrolyzed by heated nitrogen. The advantages of the proposed method and the suitable layers were also introduced in comparison with traditional electrical heating and convective heating, and a computer simulation was done for the heating process of nitrogen. The parameters of the heater were optimized and it was confirmed that the length of the electrical heater was 30 m and the heat flux was 11 kW/m^2 . Finally, based on the suitable thin oil shale layers, it was verified by the computer simulation that the heating time is 80 days under the condition that the distance of the heating well and the production well is 15 m while the thickness of the oil shale layer is 1.5 m. Obviously, the time is shortened compared with traditional electrical heating or convective heating.

Key words: oil shale; gas heater; nitrogen injection; heat transfer simulation; heating time

油页岩是一种高灰分含有可燃有机质的沉积岩,我国已查明的油页岩地质资源量为7 200 亿 t,储量巨大^[1-3]. 目前油页岩的主要开发方式仍为露天开采或者巷道开采,然后在地面进行干馏提取页岩油,但该方法存在成本高、环境污染严重等问题^[4]. 近年来油页岩的地下原位开采技术越来越引起人们的重视,该技术主要是通过一定的方

法将地下的油页岩加热,当温度达到油页岩内干酪根的裂解温度时,干酪根裂解释放出页岩油气,再将加热产生的页岩油气从地面采出^[5]. 本文主要介绍了一种原位压裂油页岩,通过注入氮气加热油页岩的工艺方法,并且对加热器参数的选择和加热时间等进行了数值模拟.

收稿日期: 2014-01-14

基金项目: 教育部跃升计划专项; 吉林省战略性新兴产业发展项目(2013Z050).

作者简介: 姜鹏飞(1988-),男,吉林省吉林市人,吉林大学博士研究生; 孙友宏(1965-),男,江苏如皋人,吉林大学教授,博士生导师.

1 油页岩水力压裂注气加热工艺

1.1 油页岩储层水力压裂改造

油页岩属于一种致密的沉积岩,其天然孔隙率及渗透率均极低,其天然渗透率一般在 1 mD 以下,加之油页岩本身的热传导系数很低,只有 $1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 左右,因此在油页岩地下原位裂解的加热过程中热量传导很慢,能量利用率较低。以壳牌 ICP 技术为例,在电加热过程中生产井的温度变化一般只有 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}^{[6-7]}$,导致整个加热过程要持续几年。所以通过对油页岩储层的改造,增加储层中的裂缝,增大热量与油页岩接触的面积可以有效地减少加热时间。

水力压裂技术是常规油气生产过程中主要采用的储层改造技术,在加热井中进行水力压裂,使得其与生产井通过裂缝进行连通,由于压裂后需要对油页岩层进行加热,所以使用的支撑剂需要能够耐受 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温,需要使用人工陶粒支撑剂,普通天然石英砂一般难以满足要求。压裂后加热井和生产井之间通过裂缝连通,不但可以在加热过程中提高加热速率,而且有利于生产过程中产生的油气向生产井流动。

1.2 油页岩储层注气加热工艺

本工艺方法为在油页岩加热井下入一定长度的电加热器,随后向其井内注入常温氮气,氮气在井内和加热器发生热交换,达到 $450\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温;加热后的氮气通过压裂产生的裂缝流向生产井,在流动过程中氮气和油页岩发生热交换,将热量传递给油页岩;通过一段时间的加热可以将油页岩加热到 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$,达到其中干酪根的裂解温度^[8-9],释放其油气,注入的氮气还可以达到驱油气的目的。油页岩原位裂解主要产生页岩油气。页岩油气以高温气体的形式返出地表,经多级冷凝可获得液态页岩油,冷凝后的混合气体可通过分子筛技术进行分离,分离出可燃气体和氮气,可燃气体可发电,供给电加热器,进一步提高能量利用率,氮气可再次注入井内,用于加热油页岩层。

该工艺方法的原理如图 1 所示。

该工艺方法较传统的电加热和对流加热方法有很多优势:

1) 传统的对流加热油页岩一般使用过热蒸汽^[10],在沙漠或者缺水地区很难提供大量水源,无法保证蒸汽的供给,导致无法进行开采。而氮气可以使用制氮机分离空气获得,在各种环境下均适用。

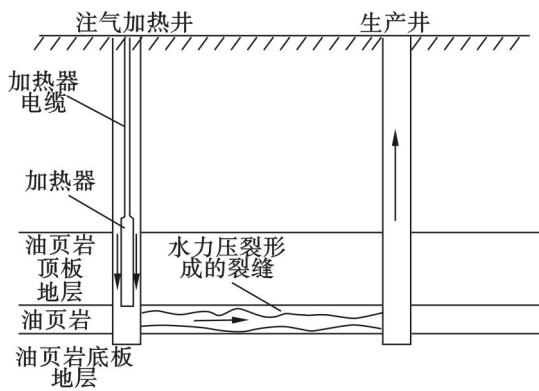


图 1 油页岩原位压裂注氮加热工艺

Fig. 1 Heating technology for oil shale of in-situ pyrolysis by fracturing and nitrogen injection

2) 若使用过热蒸汽做为热载体,水蒸气可能在地下换热过程中由于温度降低而发生液化,若变成液态水存在于油页岩储层裂缝或井内,将给加热过程带来很多问题。

3) 在加热井内下入加热器,将热载体的加热过程放入地下,可以保证氮气进入裂缝时达到最高温度,若把氮气的加热放在地面进行,在油页岩埋深较深的地层中,加热井较深,加热后的氮气经过加热井进入孔底的过程中温度已经降低,无法达到裂解油页岩的温度。

4) 该工艺方法特别适用于吉林省这种油页岩的赋存方式,油页岩储层薄,一般在 $4\sim 5\text{ m}$,含油率高的层厚一般在 $2\sim 3\text{ m}$,传统的电加热方式不适用,而此工艺方法则特别适用。

2 电加热器参数数值模拟计算及分析

假定油页岩层加热井套管直径为 139.7 mm ,其内径约为 124 mm ,取加热器的直径为 30 mm ,取加热井周围 2 m 直径的地层作为参与计算地层,对加热段进行建模模拟。使用 GAMBIT 软件建立三维模型并进行网格划分(见图 2)。

2.1 模拟参数选择

模拟计算所需要的主要参数见表 1。

表 1 地层和氮气的主要参数

Table 1 Parameters of stratum and nitrogen

参数	数值
地层密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1 800
地层比热/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	2 100
地层导热系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1.1
地层初始温度/K	300
氮气体积流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	90
氮气质量流量/ $(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	0.034
氮气初始温度/K	295



图2 数值模拟的三维模型
Fig. 2 3-dimensional numerical simulation model

2.2 模拟过程与结果

通过 ANSYS FLUENT 软件进行数值模拟, 选择电加热器长度分别为 5, 10, 20, 30, 40 和 50 m, 电加热器的热流密度暂定为 8 kW/m^2 , 其所对应的功率分别为 3.8, 7.5, 15.1, 22.1, 30.1 和 37.7 kW . 采用非稳态方式进行计算, 计算时间设定为 24 h, 计算得到氮气和电热器换热后出口的温度云图, 图 3 ~ 图 5 分别为加热器长度 5, 30 和 50 m 的模拟结果.

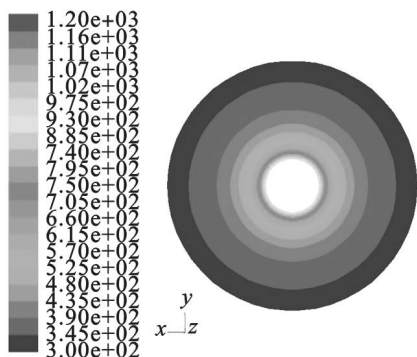


图3 5 m 长加热器加热氮气后温度分布云图
Fig. 3 Temperature distribution of nitrogen when heated by the heater of 5 m

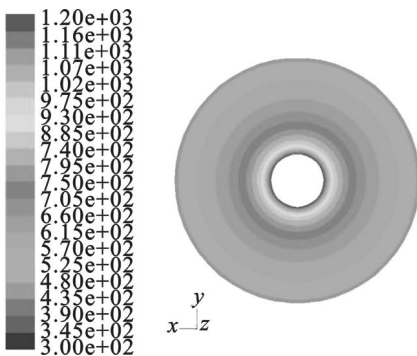


图4 30 m 长加热器加热氮气后温度分布云图
Fig. 4 Temperature distribution of nitrogen when heated by the heater of 30 m

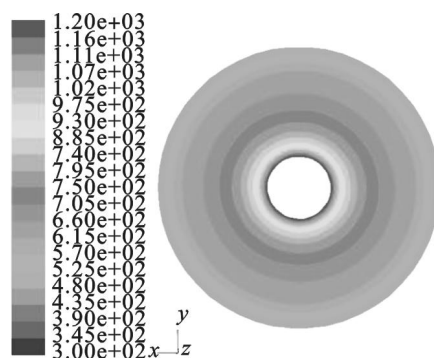


图5 50 m 长加热器加热氮气后温度分布云图
Fig. 5 Temperature distribution of nitrogen when heated by the heater of 50 m

氮气经加热器加热后平均温度曲线见图 6.

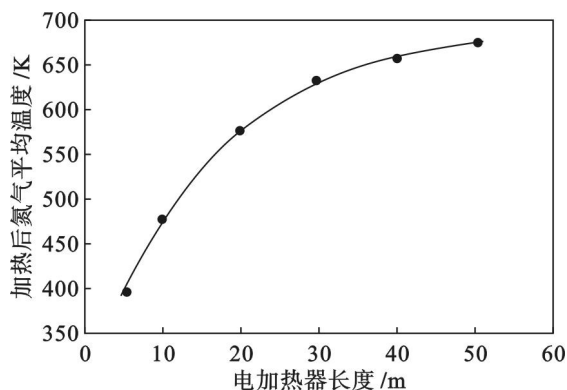


图6 不同长度加热器加热 24 h 后氮气温度曲线
Fig. 6 Curve of nitrogen temperature when heated for 24 h by heater with different lengths

当电加热器长度固定为 30 m 时, 其热流密度分别为 8, 9, 10, 11 和 12 kW/m^2 , 再次进行同样的模拟, 仍然采用非稳态方式进行计算, 计算时间设定为 24 h, 计算得到氮气和电热器换热后出口的温度云图. 图 7 ~ 图 8 分别为热流密度为 10 和 12 kW/m^2 时的模拟结果 (8 kW/m^2 时温度云图前面已经给出).

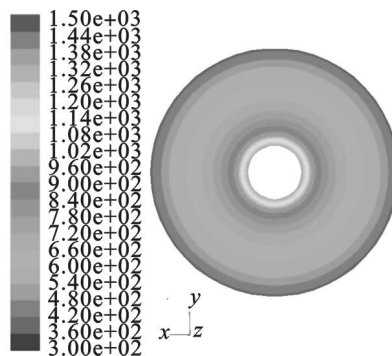


图7 热流密度为 10 kW/m^2 时加热后氮气的温度云图
Fig. 7 Temperature distribution of nitrogen when heated by heater in the heat flux of 10 kW/m^2

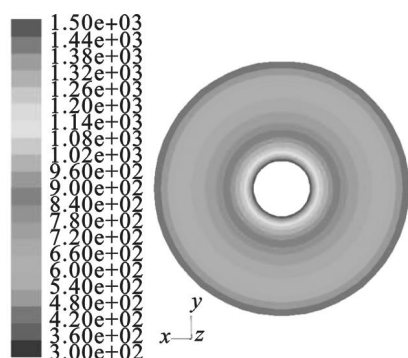


图 8 热流密度为 12 kW/m^2 时加热后氮气的温度云图

Fig. 8 Temperature distribution of nitrogen when heated by heater in the heat flux of 12 kW/m^2

2.3 数值模拟结果分析

从电加热器热流密度设定为 8 kW/m^2 , 加热段长度不同时的模拟结果来看, 在加热器长度小于 30 m 时, 随着加热器长度的增加加热后的氮气的温度增长较快; 但是从曲线上来看当加热器长度大于 30 m 时, 曲线趋于平缓, 温度升高幅度变小. 从曲线分析可见加热器的长度设定为 30 m 比较合适, 如果加热器过长, 虽然也可显著提高氮气的加热温度, 但是加热效率会大大降低、成本会急剧增加从而导致意义不大.

氮气经加热器加热后平均温度曲线见图 9.

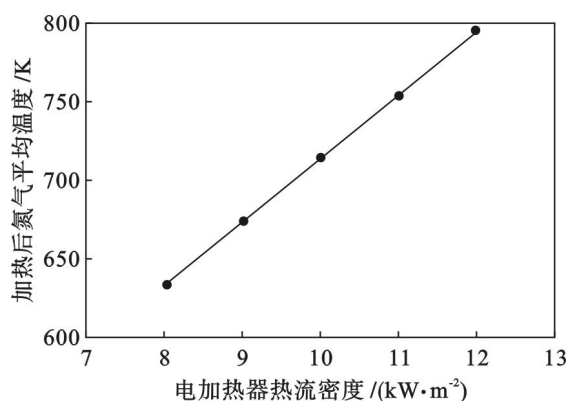


图 9 不同热流密度加热 24 h 后氮气温度曲线

Fig. 9 Curve of nitrogen temperature when heated for 24 h by heater in different heat fluxes

随着加热器长度的增加温度变化曲线逐渐趋于平缓, 笔者认为地层的初始温度较低, 氮气在和加热器进行热交换升温的同时也在和地层进行热交换而降温. 对流传热公式如下:

$$Q = \alpha A (T - T_w) \quad (1)$$

式中: Q 为对流传热热流量, W ; α 为对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A 为对流换热面积, m^2 ; T 为流体温度, K ; T_w 为壁面温度, K .

若只考虑氮气和加热器换热, 随着换热器长

度的增加, 氮气温越来越高; 但是考虑到和地层之间的换热, 氮气的温度越高, 和地层之间的温差越大. 根据上述公式, 温差越大, 气体和地层之间的换热速率越大. 气体会将大部分热量传递给地层, 导致其自身升温较慢, 与计算机模拟结果相同.

当电加热器长度固定为 30 m 时, 分别给电加热器施加不同大小的热流密度, 从曲线中可以看到, 加热后氮气的温度随着加热器的热流密度的增大线性升高. 当加热器的热通量为 11 kW/m^2 时, 加热后氮气的温度为 754 K (481°C), 可以达到油页岩的裂解温度. 因为从油页岩的热失重曲线上来看, 油页岩的裂解主要发生在 $450 \sim 550^\circ \text{C}$ 之间^[11], 并且随着加热时间的增长, 和氮气进行换热的油页岩上覆地层的温度也缓慢升高. 这样氮气在从地面到油页岩层位的过程中, 氮气在和加热器换热同时也和较高温度的地层进行换热, 所以氮气进入到油页岩层位时的温度和地层的温度较低时相比也会相应有所提高. 故最终确定电加热器的热流密度为 11 kW/m^2 比较合理.

最终确定加热器长度为 30 m , 热流密度为 11 kW/m^2 , 其所对应的加热功率为

$$Q_0 = \pi \cdot d \cdot l \cdot q \quad (2)$$

式中: Q_0 为加热器功率, kW ; d 为加热器直径, m ; l 为加热器长度, m ; q 为加热器热流密度, kW/m^2 .

带入数值后得到 Q_0 为 31 kW . 氮气经过加热后获得的热量与加热器总功率的比值定义为 a , 其计算公式为

$$a = \frac{c \cdot m (T - T_0)}{Q_0 \times 3.6 \times 10^6} \quad (3)$$

式中: c 为氮气比热容, J/kg ; m 为单位时间内注入的氮气质量, kg/h ; T 为加热后氮气温度, K ; T_0 为氮气的初始温度, K ; Q_0 为加热器功率, kW .

带入数值计算, 得到 $a = 52\%$, 说明电热器释放的热量中有 52% 可以被气体带走用于加热油页岩, 有 48% 的热量用于加热油页岩顶板地层.

3 加热时间的数值模拟计算与分析

由于该工艺方法特别适合薄层油页岩的开采, 本文假设油页岩的厚度为 1.5 m , 加热井和生产井之间的距离为 15 m , 通过水力压裂, 在 1.5 m 厚的油页岩内均匀形成了 2 条裂缝, 这 2 条裂缝之间间距 0.5 m , 裂缝的高度为 5 mm , 以下通过数值模拟进行分析, 确定高温裂解这些油页岩所

需要的时间。

利用 GAMBIT 建立二维计算模型并划分网格如图 10 所示。

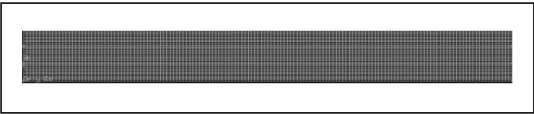


图 10 氮气加热油页岩地层时的模型
Fig. 10 Model for oil shale layer when heated by nitrogen

假设加热后的氮气可以全部进入裂缝进行加热油页岩,当加热器的长度选为 30 m,热流密度为 11 kW/ m² 时,氮气加热后的温度为 754 K. 根据桦甸油页岩的物理参数确定的油页岩的参数见表 2.

表 2 油页岩的主要参数 Table2 Main parameters of oil shale	
参数	数值
油页岩密度/(g·cm ⁻³)	1 600
油页岩比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	2 000
油页岩导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0. 99
油页岩初始温度/ K	300

加热时间分别设定为 10,20,40,60 和 80 d,得到了油页岩层的温度分布云图,图 11 ~ 图 13 分别为加热时间为 10,40,80 d 的模拟结果.

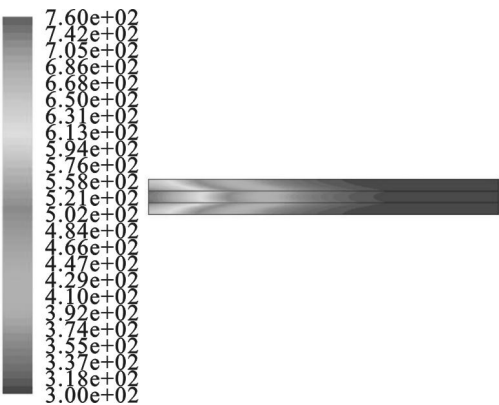


图 11 加热 10 d 后油页岩层的温度分布云图
Fig. 11 Temperature distribution of oil shale when heated for 10 days

从油页岩不同加热时间的温度分布云图来看,加热时间在 80 d 左右时,相距 15 m 的加热井和生产井之间 1.5 m 厚的油页岩基本可以被加热到 400 ~ 450 ℃ 以上,其中的干酪根可以裂解出页岩油气,实现油页岩的地下原位裂解. 和传统的电加热和对流加热相比,加热时间明显缩短.

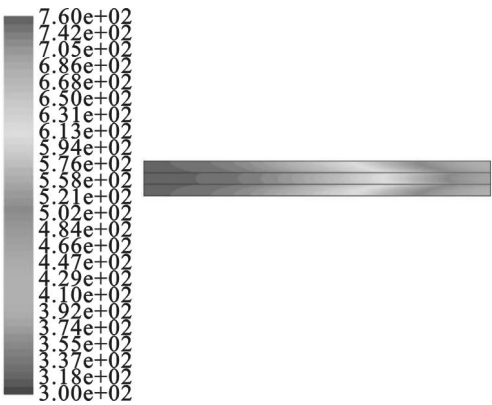


图 12 加热 40 d 后油页岩层的温度分布云图
Fig. 12 Temperature distribution of oil shale when heated for 40 days

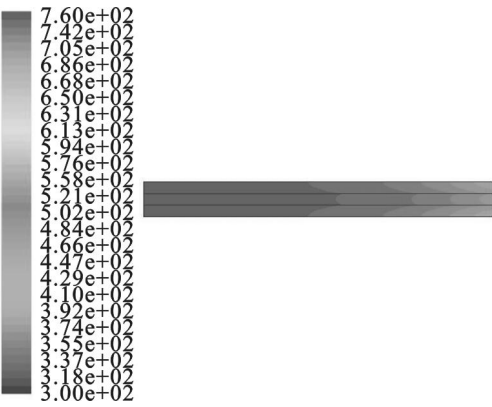


图 13 加热 80 d 后油页岩层的温度分布云图
Fig. 13 Temperature distribution of oil shale when heated for 80 days

4 结 论

- 1) 提出了油页岩压裂 - 注氮原位裂解油页岩新方法,该方法与电加热法和对流加热法相比有许多优势,特别适合于薄层油页岩的原位开采.
- 2) 通过数值传热模拟,确定了电加热器的最优参数. 电加热器的最佳长度为 30 m,热流密度为 11 kW/m²,并对加热效率进行了计算分析.
- 3) 采用参数优化后的电加热器,对薄层油页岩地层原位开采进行了数值传热模拟,分析了原位裂解所需的加热时间. 模拟结果显示,加热时间明显少于其他原位开采方式,说明该工艺方法特别适用于薄层油页岩.

参考文献:

[1] 刘昭君,杨虎林,董清水,等. 中国油页岩[M]. 北京:石油出版社, 2009:148 - 154.
(Liu Zhao-jun, Yang Hu-lin, Dong Qing-shui, et al. Oil shale in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Publishing House, 2009:148 - 154.)

(下转第 1368 页)