

油页岩原位裂解用注热管柱数值传热模拟与试验研究

白文翔^{1,2}, 孙友宏^{1,2}, 周科³, 李强^{1,2}, 贾瑞¹

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 油页岩地下原位转化与钻采技术国家地方联合实验室, 吉林 长春 130026; 3. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 油页岩作为一种非常规油气资源, 有望成为石油的替代品。油页岩原位裂解技术对环境污染小, 生成的油页岩油品质好, 具有良好的开发前景。裂解温度是油页岩原位裂解的关键因素, 因此降低注热管路的热量损失十分重要。本文采用数值模拟和试验研究的方式研究注热管柱的传热特性。通过传热学计算分析, 保温注热管柱设计为外径 32 mm 的钢管, 外层缠绕共计 24 mm 的纳米保温材料。数值分析表明氮气流量越大, 注热管柱出口温度达到稳定的时间越短, 稳定温度也越高; 当管柱氮气入口温度为 500 °C 时, 管柱出口温度在一定注气时间后均可达到 400 °C 以上。在农安油页岩原位裂解先导试验工程中对注热管柱进行野外试验, 管柱达到注热保温效果, 井底温度达到设计温度, 最终成功获得油页岩油。

关键词: 油页岩原位裂解; 注热管柱; 临界半径; 数值模拟; 野外试验

中图分类号: P618.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2018)04-0001-05

Numerical Simulation and Field Test Study on Heat Injection Pipe Column of Oil Shale In-situ Pyrolysis/BAI Wen-xiang^{1,2}, SUN You-hong^{1,2}, ZHOU Ke³, LI Qiang^{1,2}, JIA Rui¹ (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. National-Local Joint Engineering Laboratory of In-situ Conversion, Drilling and Exploitation Technology for Oil Shale, Changchun Jilin 130026, China; 3. Guizhou Traffic Planning and Design Academe Co., Ltd., Guiyang Guizhou 550001, China)

Abstract: As an unconventional oil and gas resource, oil shale is expected to be a substitute for oil. At present, the underground oil shale in-situ pyrolysis technology has better prospects due to its good product quality and environment-friendly surroundings. The pyrolysis temperature is the key factor of oil shale in-situ pyrolysis, so it is of great importance to reduce the heat loss of the heat injection pipe. Therefore, the heat transfer characteristic of heat injection pipe column for in-situ pyrolysis is studied by numerical simulation and field test. According to the heat transfer calculation, the heat preservation and injection pipe column is designed to be a steel pipe with outer diameter of 32mm, and the outer layer is wrapped with 24mm thick aerogel. The numerical analysis shows that the larger the N₂ injection flow rate is, the shorter the time to reach the steady temperature at the heat pipe column injection outlet can be; when the N₂ inlet temperature of the pipe column is 500°C, the outlet temperature can reach 400°C a certain time after gas injection. Field experiments are carried out on heat injection pipe column in Nong'an oil shale in-situ pyrolysis pilot test project, the heat preservation effect is obtained and the temperature at the well bottom reaches the designed value, shale oil is successfully mined.

Key words: oil shale in-situ pyrolysis; heat injection pipe column; critical radius; numerical simulation; field test

0 引言

随着社会的发展, 能源需求持续上涨, 油气资源已成为制约我国工业化和城市化的重要因素。2016 年我国的能源消费结构中, 煤炭资源消耗占 70%, 比重过大, 能源结构不合理; 自 1993 年起, 我国石油消耗量已大于生产量, 至 2017 年中国石油对外依存度已达到 67.4%, 进口 3.96 亿 t^[1-2]。我国急需加大非常规能源的开发利用来确保国家能源安全。

油页岩又称油母页岩, 是沉积岩的一种, 油页岩

的含油率 3.5%~30%, 由有机物和无机物组成; 发热量 $\geq 4.19 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其资源量大、前景好而被认为是重要的替代能源^[3-5]。我国油页岩矿藏丰富, 埋深 $< 1 \text{ km}$ 且含油率 $> 3.5\%$ 的油页岩资源量为 7199.37 亿 t, 高居世界第二^[6]。因此, 进行油页岩原位裂解技术的系列研究对我国的经济建设和能源安全十分重要。

油页岩开发技术分为: 地上干馏技术和地下原位裂解技术。油页岩地上干馏技术是指将油页岩矿

收稿日期: 2018-03-21

基金项目: 吉林省省校共建计划专项“油页岩地下原位开发利用示范工程”(编号: SF2017-5-1); 吉林大学高层次科技创新团队建设项目“油页岩资源钻采与深部钻探技术创新团队”(编号: 2017TD-13)

作者简介: 白文翔, 男, 汉族, 1975 年生, 副研究员, 博士研究生, 地质工程专业, 主要从事油页岩开发利用技术研究工作, 吉林省长春市西民主大街 938 号, baiwx@jlu.edu.cn。

从地下开采至地面,油页岩内的干酪根在地表干馏设备中进行裂解,生成页岩油、气,虽然该技术较为成熟,但存在环境污染大、利用率低、成本极高、废渣多、占地面积大等缺点^[7-8]。地下原位裂解技术是指:通过钻井的方式,在地下建立反应区域并加热油页岩层,油页岩层加热至 300 °C 时开始裂解生成页岩油、气,然后通过开采井将产物输运至地表^[9],其工艺原理如图 1 所示。温度是影响油页岩裂解过程的首要因素,而在运输热载体的过程中,不可避免地会有热量损失,因此需要对注热管柱采取适当的保温措施以减少热载体传输过程中的热量损失。

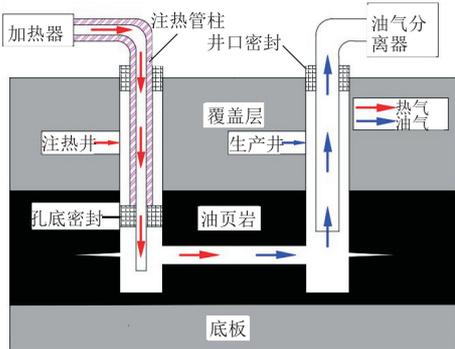


图1 油页岩原位转化工艺注热示意图

本文首先对比 8 种常用保温材料的导热性能,得到在高温条件下仍具有良好保温能力的材料,通过理论计算得到注热管柱的临界半径,再对注热管柱的实际物理模型进行网格划分,采用 FLUENT 分析注热管柱的传热特性,得到注热管柱的传热规律;最后在野外试验中对注热管柱的传热规律及其保温效果进行验证。

1 油页岩原位裂解注热管柱设计

1.1 保温材料选择

为减少注热管柱的热损失,在其外表面包裹一层保温材料,保温材料导热系数 $\leq 0.12 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[10-13]。选择 8 种常用的保温材料,绘制其热传导系数随温度变化曲线(见图 2),可以看出 GR10 型气凝胶毡导热系数低,为 $0.020 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (常温),比热容为 $501 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$,最高可耐 800 °C 高温(可满足原位裂解的温度要求),且导热系数随温度无剧烈变化。因此采用 GR10 型气凝胶毡用作注热管柱保温结构的首选材料,厚度为 6 mm 。

1.2 保温结构设计

注热管为圆筒输热管,其保温性能与保温层厚度之间并非直线关系,而是存在着一个临界绝热半径 r_{cr} :

$$r_{cr} = k/h \quad (1)$$

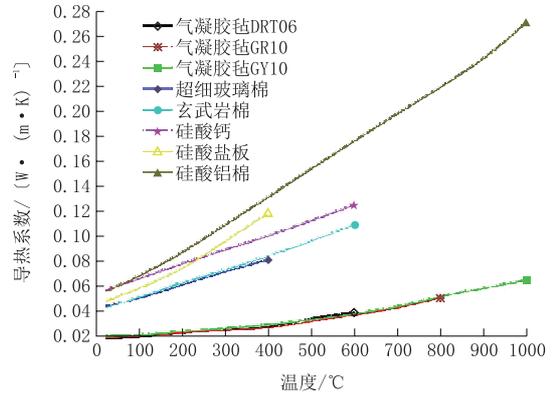


图2 8种保温材料热传导系数随温度变化的曲线

式中: k ——保温层的热导率,气凝胶 GR10 导热率为 $0.020 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; h ——保温层外表面的对流换热系数,空气中的自然对流约为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

当保温层外半径 r 小于临界绝热半径 r_{cr} 时,总热阻随着保温层厚度的增加而减少,此时保温层厚度越厚,隔热效果越差;当保温层外径 r 大于临界绝热半径 r_{cr} 时,总热阻随着保温层厚度的增加而增大,此时保温层厚度越厚,隔热效果越好^[14]。

气凝胶 GR10 的临界隔热半径为 $r_{cr} = k/h = 0.02/10 = 0.002 \text{ m}$ 。下入注热管柱的管道为内径 124 mm 的套管,因此保温注热管柱的外径应小于 124 mm ,在此条件下保温材料越厚越好。因此选取 45 号 $\text{Q}32 \text{ mm}$ 的钢管作为注热管柱的基础材料,在注热管柱外表面均匀缠绕 4 层 GR10 型气凝胶毡(每层厚 6 mm ,4 层共厚 24 mm),结构如图 3 所示。

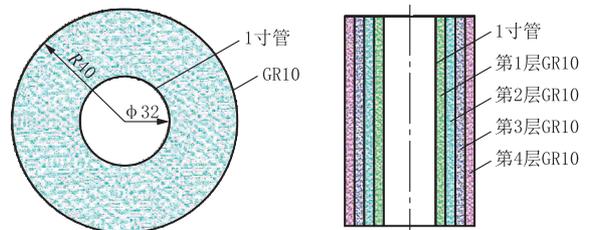


图3 高温保温注热管柱结构图

2 油页岩原位裂解注热管柱传热数值模拟

2.1 建立模型与网格划分

农安油页岩地下原位裂解先导试验工程选址于吉林省农安县,位于松辽盆地腹地,油页岩赋存条件良好,油页岩埋深为 $64.8 \sim 72.0 \text{ m}$,油页岩的上覆地层大部分为泥岩。从地表向油页岩层钻垂直井,建立地表和油页岩层之间的通道,在钻孔内壁下入内径为 124 mm 的套管,注热管柱外壁和套管内壁之间充满 N_2 。金属的导热系数较大,因此在注热过程中的热损失可忽略,注热时注热管路在注热井中

的简化模型如图 4 所示。

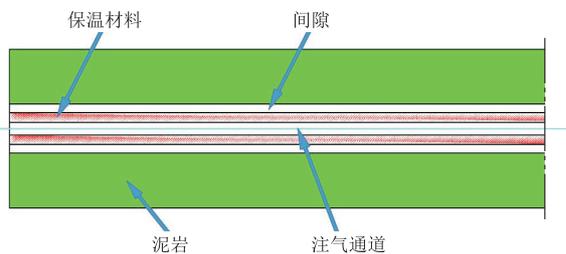


图 4 注热管柱注热物理模型

采用 HYPERMESH 划分模型网格,模型网格的长宽比极小,故只能展示物理模型的部分网格,如图 5 所示。数值模拟中涉及的气凝胶 GR10 和泥岩的物性参数如表 1 所示。在试验工况下, N_2 应视为压缩流体,因此注热管柱入口设置为质量流量入口,出口为自由出流。

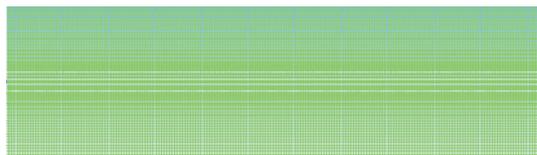


图 5 注热管柱注热模型网格

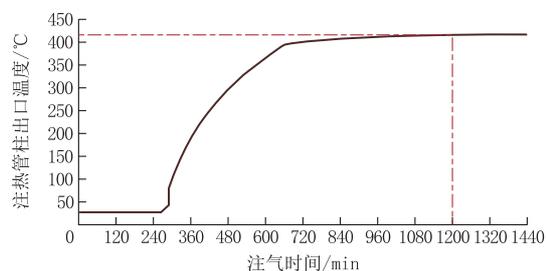
表 1 数值模拟中的物性参数

参 数	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	比热容/ [$J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}$]	导热系数/ [$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$]
泥岩	2000	1190	1.19
气凝胶 GR10	220	501	0.02

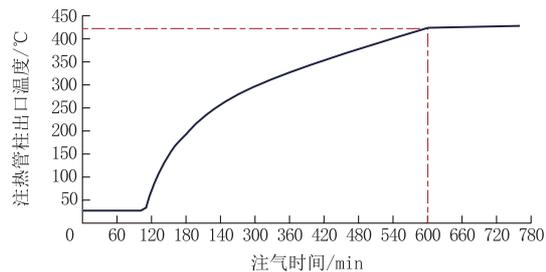
2.2 模拟结果及数据分析

数值模拟条件: N_2 注入温度为 $500^\circ C$;注入流量分别为 50、70、100、120 和 $140 Nm^3/h$ 。获取 N_2 不同注入流量下注热管柱 N_2 的出口(即注热井的孔底)温度。

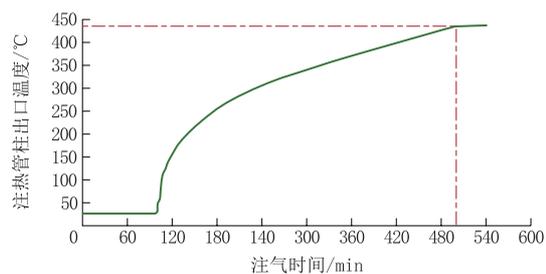
原位裂解过程中,热载体的最终稳定温度和热载体的升温速率是影响油页岩原位裂解的重要参数。通过数值模拟得到不同 N_2 注入量下注热管柱出口温度随时间的变化曲线,如图 6 所示。从图中可看出,当 N_2 注入量为 $50 Nm^3/h$ 时,注热管柱的出口温度在 250 min 后开始增长,经过 950 min 后,在 1200 min 后达到稳定温度 $417^\circ C$;当注气流量为 $70 Nm^3/h$ 时,出口温度在 120 min 后开始增长,经过 480 min 后,在 600 min 后达到稳定温度 $428^\circ C$;当 N_2 注入量为 $100 Nm^3/h$ 时,出口温度在 105 min 后开始增长,经过 395 min 后,在 500 min 后达到稳定温度 $437^\circ C$;当 N_2 注入量为 $120 Nm^3/h$ 时,出口温度在 100 min 后开始增长,在 480 min 后达到稳定温度 $437^\circ C$;当 N_2 注入量为 $140 Nm^3/h$ 时,出口温度在 95 min 后



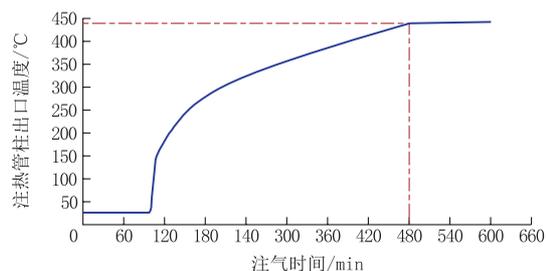
(a) N_2 注入量 $50 Nm^3/h$



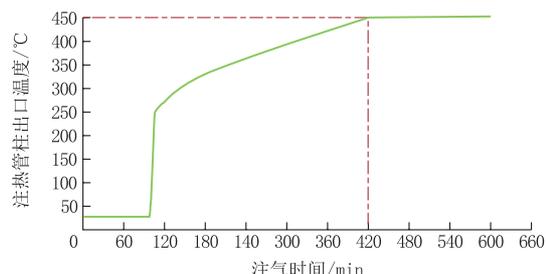
(b) N_2 注入量 $70 Nm^3/h$



(c) N_2 注入量 $100 Nm^3/h$



(d) N_2 注入量 $120 Nm^3/h$



(e) N_2 注入量 $140 Nm^3/h$

图 6 注热管柱出口温度随时间的变化曲线

开始增长,在 420 min 后达到稳定温度 $451^\circ C$ 。

注气的流量越大,注热管柱出口开始升温的时间越短,达到稳定温度的时间也就越短,加热速率越快,最终稳定的温度也就越高,对油页岩原位裂解也

越有利。

从图6中还可以看出, N_2 在注热管柱的出口温度在注热开始一段时间后才开始升高, 以 $140 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 注入流量为例, 得到注热管柱在不同注热时间的温度云图, 如图7所示。从图中可以看出在加热 95 min 时, 注热管柱进出口温差较大, 这是由于 N_2 流经 70 m 的注热管柱需要一定时间, 流量越大 N_2 在注热管柱中停留的时间越短, 管柱出口温度开始上升也就越快; 从 120、240 和 420 min 的温度云图可以看出, 在加热过程中管柱进口和出口的温差较小, 保温层保温效果较好。

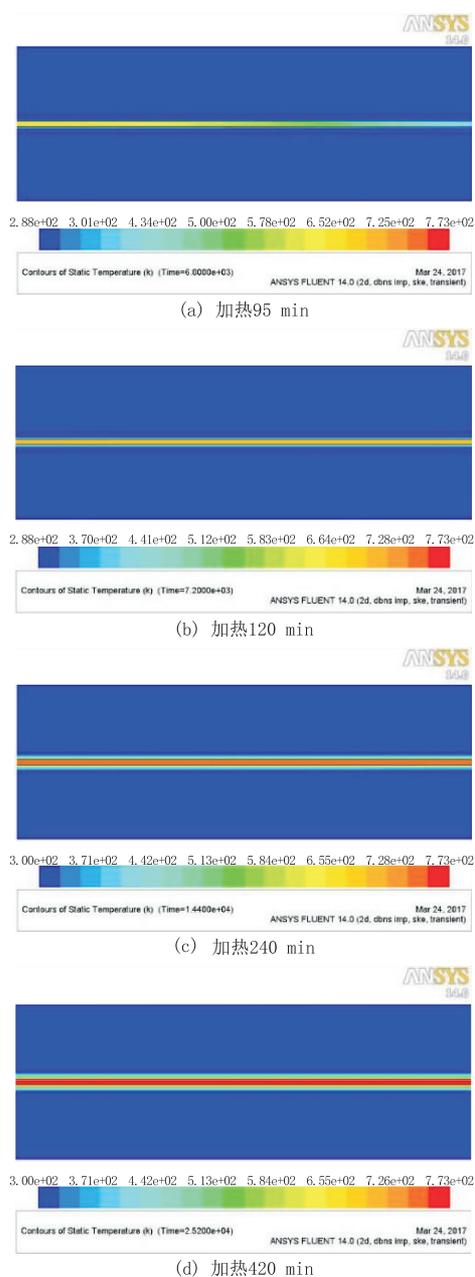


图7 $140 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 流量 N_2 不同注热时间温度云图

通过数值模拟分析可知, 注热管柱在长为 70 m、外径为 32 mm, 均匀缠绕 4 层纳米气凝胶 GR10, N_2 入口温度为 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 的情况下, 尽管注入流量不同, 但注热管柱出口的 N_2 温度在注热一段时间后均可达到 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 能满足油页岩原位裂解的要求。

3 油页岩原位裂解野外试验

3.1 安装保温注热管

在吉林省长春市农安县进行了油页岩原位裂解先导试验工程, 采用本文设计的保温注热管柱进行高温 N_2 的注热试验。

在完成注热井和开采井的施工后, 进行射孔和水力压裂, 使两井贯通^[15-16]。根据文中的设计制作保温注热管柱, 在管柱底部 1 m 内设置 32 个 8 mm 的孔作为排气口, 管柱下入注热井内, 为保证同心度每隔 12 m 安装 1 个 $\text{O}115 \text{ mm}$ 三翼扶正器, 共安装 6 个, 下管时保证最后 1 m 的排气段正对着注热井的射孔段。

3.2 注热试验

3.2.1 数据采集

采用 PT100 型温度传感器对试验过程中 6 个关键温度参数进行采集, 具体包括: 一级换热器 N_2 出口温度 T_1 、注热管柱 N_2 入口温度 T_2 、 N_2 在注热井井底的温度 T_3 、注热井井壁周围的岩层温度 T_4 、 N_2 在开采井井底温度 T_5 以及开采井井壁周围的岩层温度 T_6 。

数据采用无纸记录仪采集, 并同时用 DTM 软件实时显示在计算机上, 以及时了解加热情况并及时调节参数。

3.2.2 试验数据分析

原位裂解试验从 2015 年 6 月 3 日开始。由注热井向油页岩层注入高温 N_2 。注入流量 $120 \sim 140 \text{ m}^3/\text{h}$ 。试验过程中各关键点的温度变化如图 8 所示, 气体温度在 $0 \sim 2 \text{ d}$ 为 $300 \text{ }^\circ\text{C}$, $3 \sim 6 \text{ d}$ 为 $350 \text{ }^\circ\text{C}$, $6 \sim 8 \text{ d}$ 为 $400 \text{ }^\circ\text{C}$, 9 d 为 $450 \text{ }^\circ\text{C}$, 10 d 以后为 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由图 8 可知, 注热井的 N_2 入口温度 T_2 随着一级换热器的 N_2 出口温度 T_1 的变化而波动; 而热载体经注热井中的注热管柱到达孔底后, 热载体的孔底温度 T_3 同样随着 T_2 和 T_1 的变化而变化。加热 10 d 后, T_1 和 T_2 的温度在 $450 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$, T_3 为 $400 \sim 420 \text{ }^\circ\text{C}$ 。随着 N_2 注入温度的升高, 注热井井壁周围的岩层温度 T_4 、 N_2 在开采井孔底的温度 T_5 和开采井井壁周围的岩层温度 T_6 也在不断升高。

野外试验的注热过程中, 全程开启在线分析仪, 测试油页岩原位裂解的产物成分, 重点监测产物中碳氢化合物 (HC) 的含量, 数据提取间隔为 0.5 h 。

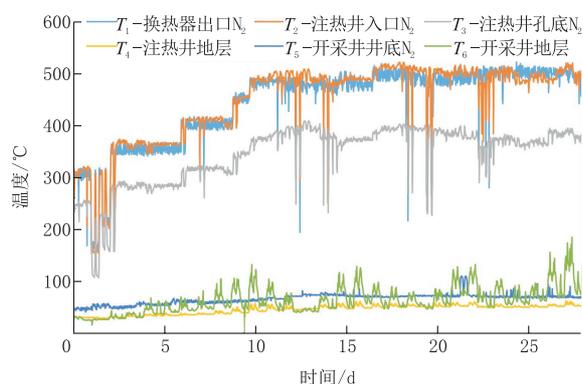


图 8 加热试验温度变化曲线

图 9 为裂解产物成分含量曲线图。从裂解产物成分含量的变化中可以得到,从注热开始至注热第 10 d, HC 含量随时间的增加而逐渐升高;油页岩层加热至第 8 d 时,HC 的含量已大于 10%,这表明油页岩层中的干酪根已开始裂解,第 10 d 裂解产物中的 HC 含量达到最大值 40%。

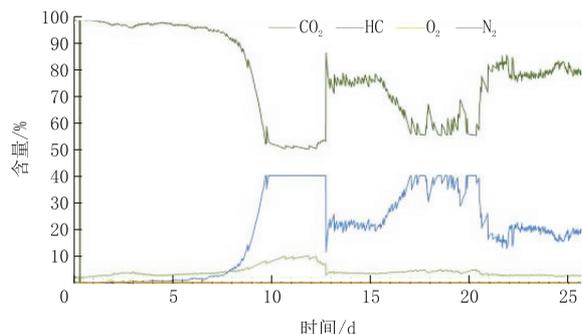


图 9 裂解产物成分含量曲线

野外试验中,注热与裂解产物的分离过程同步进行,在加热至 17 d 后,从裂解产物中成功提取油页岩油,如图 10 所示。这表明设计的保温注热管柱能满足油页岩原位裂解的要求。



图 10 成功裂解出的油页岩油

4 结论

(1)根据油页岩原位裂解的工艺要求,通过对 8 种保温材料分析,确定了采用气凝胶 GR10 作为

保温材料,并根据保温层的临界绝热半径和工程要求设计了保温注热管柱:外径 32 mm 钢管,在钢管外壁均匀缠绕 4 层共计 24 mm 的气凝胶。

(2)注热管柱进行数值分析表明, N_2 的注入流量对于注热过程有重要影响,注气流量越大,注热管柱出口温度达到稳定状态时的时间越短,出口最终的稳定温度也越高。同时,当 N_2 注入温度为 500 °C 的情况下,管柱出口温度在一定注气时间后均可达到 400 °C 以上,能满足油页岩原位裂解的要求。

(3)采用本文设计的保温注热管柱在农安油页岩原位裂解先导试验工程中开展野外试验,在 N_2 注入温度为 500 °C、注入流量为 120~140 Nm^3/h 的工况下, N_2 孔底温度可达 400~420 °C。油页岩层加热 8 d 后,裂解产物中碳氢化合物的含量 > 10%,这表明油页岩层中的干酪根开始裂解,最终成功获得油页岩油,表明设计的保温注热管柱能满足油页岩原位裂解的要求。

参考文献:

- [1] 李霞. 中国石油对外依存度研究[J]. 经济研究导刊, 2011, (31): 171-172.
- [2] 张德义. 世界能源消费形势刍议[J]. 中外能源, 2012, 17(3): 1-11.
- [3] 钱家麟, 尹亮. 油页岩: 石油的补充能源[M]. 北京: 中国石化出版社, 2011.
- [4] 钱家麟, 王剑秋, 李术元. 世界油页岩资源利用和发展趋势[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(6): 877-887.
- [5] 郭永刚, 许修强, 王红岩, 等. 非常规能源油页岩开发利用的研究进展[J]. 江苏化工, 2008, 36(2): 6-9.
- [6] 汪凯明, Wang Kaiming. 我国非常规油气资源勘探开发前景[J]. 国外测井技术, 2009, 17(4): 24-27.
- [7] Pan Y, Zhang X, Liu S, et al. A Review on Technologies for Oil Shale Surface Retort[J]. Journal - Chemical Society of Pakistan, 2012, 34(6): 1331-1338.
- [8] 曹祖宾, 张宗平, 韩冬云, 等. 油页岩干馏工艺与工程[M]. 北京: 中国石化出版社, 2011.
- [9] 方朝合, 郑德温, 刘德勋, 等. 油页岩原位开采技术发展方向及趋势[J]. 能源技术与管理, 2009, (2): 78-80.
- [10] 孙志坚, 孙玮, 傅加林, 等. 国内绝热保温材料现状及发展趋势[J]. 能源工程, 2001, (4): 26-28.
- [11] 郭莉. 保温材料的概况及选择[J]. 四川电力技术, 2005, 28(1): 52-55.
- [12] 刘承婷. 蒸汽管道保温材料与保温结构优化研究[D]. 黑龙江大庆: 东北石油大学, 2013.
- [13] 杨欢欢, 刘鸿飞. 激光测厚仪在热轧生产线上热防护的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2016, (12): 61-64.
- [14] 周新仁. 圆筒输热管隔热临界半径 r_c 确定[J]. 石河子农学院学报, 1996, (1): 57-60.
- [15] 王聪, 陈晨, 孙友宏, 等. 农安油页岩水力压裂模拟及实验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(11): 7-11.
- [16] 陈强, 郭威, 李强, 等. 油页岩原位开采井钻井工艺设计与施工[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(7): 9-14.
- [17] 周科. 热氮气地下原位裂解油页岩温度场数值模拟及野外试验[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2017.