

基于甲烷催化燃烧的油页岩原位开采技术研究

陈知霖^{1,2,3,4}, 水浩澈^{1,2,3,4}, 王元^{1,2,3,4*}

(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工程实验室, 吉林 长春 130026; 3. 页岩油气资源勘探开发省部共建协同创新中心, 吉林 长春 130026; 4. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026)

摘要:针对油页岩开采过程中产生的含甲烷废气,提出了一项创新性的技术方案,即利用含低浓度甲烷裂解气进行催化燃烧以促进油页岩的开采,并借助Fluent和CMG软件进行了详尽的模拟分析。Fluent模拟研究发现,较小的孔径和增加的催化段长度能有效提升甲烷的转化率和燃烧温度,甲烷转化率可达到92.4%的高值,尾气温度亦可达到1050 K。CMG模拟结果显示,在不同的甲烷转化率条件下,油页岩开采过程中的温度场分布及油气产量存在显著差异,甲烷转化率92%时总产油量最高,为20.5 m³;同时,随着转化率的降低,日产气量呈现上升趋势,且峰值出现时间提前。研究证实了该方案在实现废气循环利用、提升能源利用效率的同时,还能有效减轻环境负担,为油页岩的绿色、高效开采提供了崭新的技术路径和方法。

关键词:油页岩;原位开采;原位转化;催化燃烧;甲烷转化率;尾气温度;总产油量

中图分类号:TD83:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)02-0102-06

Research on in-situ oil shale extraction technology based on methane catalytic combustion

CHEN Zhilin^{1,2,3,4}, SHUI Haoche^{1,2,3,4}, WANG Yuan^{1,2,3,4*}

(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. Provincial and Ministerial Co-construction of Collaborative Innovation Center for Shale Oil & Gas Exploration and Development, Changchun Jilin 130026, China; 4. Key Laboratory of Complex Condition Drilling and Exploitation Technology, Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: In this study, for the methane-containing waste gas generated during the oil shale extraction process, an innovative technological solution, i.e., catalytic combustion using methane cracking gas containing low concentration of methane to facilitate oil shale extraction, was proposed and analysed by means of detailed simulations with the help of Fluent and CMG software. In Fluent simulation, the role of pore size and length of porous media on the efficiency of catalytic combustion was explored. It is found that smaller pore size and increased catalytic section length could effectively enhance the methane conversion rate and combustion temperature. After model optimisation, the methane conversion rate can reach a high value of 92.4%, and the tail gas temperature can reach 1050 K. The CMG simulation results show that there are significant differences in the temperature field distribution and oil and gas production during the oil shale extraction process under different methane conversion rate conditions. The total oil production reaches the highest value

收稿日期:2025-02-28; 修回日期:2025-04-11 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.02.011

基金项目:吉林省科技发展计划项目(编号:20230203121SF);吉林省中青年科技创新卓越团队项目(编号:20220508135RC);吉林省发展和改革委员会自主创新能力建设项(编号:2022C021)

第一作者:陈知霖,男,汉族,2001年生,硕士研究生,地质工程专业,研究方向为油页岩原位开采井下加热器等,吉林省长春市西民主大街938号,2116829799@qq.com。

通信作者:王元,男,汉族,1988年生,副教授,地质工程专业,博士,主要从事天然气水合物高效钻采技术及油页岩原位转化开采技术相关研究工作,吉林省长春市西民主大街938号,wy2019@jlu.edu.cn。

引用格式:陈知霖,水浩澈,王元.基于甲烷催化燃烧的油页岩原位开采技术研究[J].钻探工程,2026,53(2):102-107.

CHEN Zhilin, SHUI Haoche, WANG Yuan. Research on in-situ oil shale extraction technology based on methane catalytic combustion [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(2):102-107.

of 20.5 m³ at a methane conversion rate of 92%. Meanwhile, the daily gas production shows an increasing trend with the decrease of the conversion rate, and the peak appears earlier. The study confirms that the scheme can effectively reduce the environmental burden while realising the recycling of waste gas and improving the efficiency of energy use, providing a brand new technical path and methodology for the green and efficient exploitation of oil shale.

Key words: oil shale; in-situ extraction; in-situ conversion; catalytic combustion; methane conversion rate; tail gas temperature; total oil production

0 引言

大气中温室气体能够捕获红外辐射并防止其逃逸到外太空,提高环境温度,使地球成为人类宜居的星球^[1]。工业革命以来,温室气体排放大幅加剧,自1850—1900年到2010—2019年,人类活动引起全球地表总温度升高0.8~1.3℃,最佳估计值为1.07℃^[2]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)气候科学报告指出,1850—1900年间平均50年才发生1次的极端高温事件,在当前气候状态下约每10年发生1次,如果实现1.5℃温控目标则约每5年发生1次,若放任至4℃,则每年都会遭遇至少1次同等严重的高温。

温室气体主要包括二氧化碳、甲烷、氮氧化物等,目前对于温室效应治理主要集中于二氧化碳,对于甲烷关注极少,但在20年的时间尺度内,甲烷的全球增温潜势是二氧化碳的86倍。甲烷主要来源为化石燃料开采。大多数工业废气中的甲烷被应用于供暖及发电,但有少部分低浓度甲烷难以通过正常手段燃烧利用,一般直接排放到大气。

油页岩属于非常规油气资源的一种^[3],岩石表征为细粒沉积岩,是一种含有丰富干酪根有机质的未熟($R_o < 0.5$)烃源岩,通过低温干馏可获得裂解油,含油率一般超过3.5%,发热量远大于4.18 MJ/kg^[4]。长期以来,油页岩开采方式主要以地面干馏为主。将油页岩开采至地面,完成粉碎剥离、粒度筛选等流程后在无氧环境的干馏炉中加热到450~550℃,根据样品总量确定保温时间。充分保温后,油页岩内部的干酪根受热裂解转化成页岩油^[5]。地面干馏法产油率较高,但工艺流程复杂,成本投入过高,且在生产过程中产生大量废气和废渣破坏生态环境,仅适用于开采埋藏较浅的油页岩^[6]。为了保护环境以及开采埋藏较深的油页岩,学者们聚焦于油页岩的原位开采技术。油页岩地下原位转化开采是通过直接加热地下油页岩储层产生高温尾气,使油页岩内部的固体干酪根裂解成所需油气,

并通过一定的工艺开采到地面的一种开发方式,是油页岩工业化开发的必由之路^[7-8]。

在现有的油页岩原位转化开采技术中广泛采用电加热器,但其存在显著的局限性,如能耗高、能量效率低、使用寿命短以及结构复杂等,特别是在高温、高压环境下,电加热器容易发生损坏,导致设备使用寿命大幅缩短。相比之下,催化燃烧装置具有结构简单、耐腐蚀性强等优势,可显著提高使用寿命。此外,传统电加热器需要消耗大量电力,而本方案创新采用油页岩开采过程中产生的含甲烷废气作为燃料,有效降低了能源获取成本。

从能量转换效率来看,传统电加热器的能量转换效率仅为40%~50%,而催化燃烧加热系统的能量转换效率可达70%以上,显著提升了能源利用效率。基于这一创新思路,本研究提出了一种新型开采方案,将油页岩开采过程中产生的含甲烷废气回注至井下加热器中,并利用催化燃烧技术进行加热,从而实现油页岩的高效开发。

该方案成功地将油页岩开采与废气处理两个环节有机结合,构建了一个完整的循环经济体系。通过内部资源的循环利用,显著降低了对外部能量的依赖,同时提升了系统的抗风险能力。此外,催化燃烧核心技术具有进一步优化和创新空间,为开发更高效、更稳定的新型催化剂指明了研究方向。

从经济性评估,本方案通过废气资源化利用,大幅降低了能源成本,并减少了环境治理投入。同时,通过提高资源利用效率,显著提升了综合收益。本方案不仅具有重要的理论价值和实践意义,还为后续技术优化和推广应用提供了可靠的基础。

1 研究模型的建立

1.1 催化燃烧数值模拟

1.1.1 催化燃烧模型

利用Fluent软件进行催化燃烧模拟,参数设置:入口温度298 K,流速4 m/s,氧气摩尔组分0.21,甲烷摩尔组分0.09。催化剂选用铂金属,均匀加载至

多孔介质通道,加载密度 $2.98 \times 10^{-9} \text{ mol/cm}^2$,整个区域设置为流体区域。设定条件燃烧反应前后温度、浓度、传热等忽略不计。在速度与压力出入口设置边界条件。反应过程中认为混合气体不发生压缩,气体进入孔道,在孔道表面催化剂的作用下进行燃烧。模拟中忽略气体扩散和重力影响。

为更好地评估燃烧特性^[9],使模拟结果能更好地收敛,本模拟采用轴对称的2D模型。在模拟燃烧过程中添加能量方程和k-epsilon (2eqn)流动模型,该模型适用于自然对流,模型计算简易,适用于长时间模拟计算,计算效率高、数值稳定。在管道墙面添加 Ansys Chemkin 机制文件作为催化剂促进燃烧,Ansys Chemkin 机制文件描述催化燃烧过程中涉及的组分和反应公式,采用催化剂 Pt/Al₂O₃,定于催化剂表面的气体与催化剂结合点位,设置燃烧反应温度上限 2000 K,催化点火温度 550 K。入口设置气体成分为摩尔组分,使用质量加权平均法计算混合气体的热容和黏度等参数。求解方式选择 SIMPLE,该算法适用于处理高雷诺数流动、不可压缩流动等问题,简易、高效、稳定。

1.1.2 网格独立性验证

建模采用长 60 mm、直径 1 mm 孔道,网格划分 40000、50000、60000、70000、80000 个单元格。设置模拟参数:入口温度 300 K,注入气体流速 3 m/s,混合气体中甲烷摩尔组分 9%,氧气摩尔组分 21%,进出口压力设置为 101325 Pa,壁面起燃温度 773 K,催化剂比表面积 200 m²/g,对模拟结果进行分析。

如图 1 所示,随着网格数量增加,模拟结果呈现出显著的趋同性。当网格数量超过 50000 时,结果的一致性尤为突出,表明在此网格数量以上,网格数量对模拟结果的影响可以忽略不计。据此,后续模拟研究将采用含有 50000 个网格的模型进行,以确保模拟结果的稳定性和可靠性。

1.2 油页岩地层

将旬邑油页岩作为研究对象,通过 CMG 软件进行模拟,油页岩开采层位为 350 m,生产井井底压力为 200 kPa。采用 BB 模型进行模拟^[10],经过 Pei 等^[10]和 Khakimova 等^[11]对模型修正,包含干酪根(Kerogen)热解、HO 热解、LO 热解、预焦热解 4 个油页岩热裂解反应,以及低温和高温两种氧化反应。油页岩物性参数见表 1,热解氧化方程式见表 2。

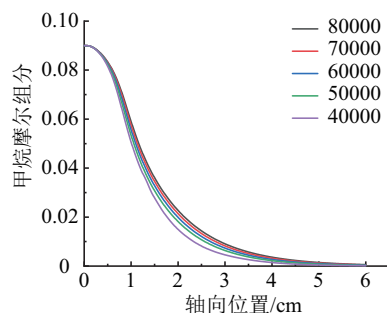


图 1 不同网格数量下甲烷摩尔分数随位置变化情况

Fig.1 Variation of methane molar fraction with position at different grid numbers

表 1 地层参数

Table 1 Stratigraphic parameter

参 数 项	参数值
原始地层压力/kPa	3500
原始地层温度/℃	25
基质总孔隙度/%	15.5
基质原始有效孔隙度/%	6.4
基质渗透率/mD	0.01
裂缝渗透率/mD	8
孔隙中干酪根浓度/(mol·m ⁻³)	5.50×10^4
有机孔隙度/%	9.1
基岩热传导系数/(J·m ⁻¹ ·d ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	1.21×10^5
基岩比热容/(J·m ⁻³ ·℃ ⁻¹)	1.50×10^6

2 结果与分析

2.1 Fluent 分析

催化参数对催化燃烧效果的影响见图 2。在单孔半径对燃烧效果影响研究中,多孔介质催化段的长度固定为 55 mm,单孔半径以 0.5 mm 为增量在 0.5~5 mm 范围内变化。结果显示,单孔半径为 0.5 mm 时,甲烷转化率达 84.7%,温度高达 1028 K。然而,当单孔半径增加至 5 mm 时,甲烷转化率降至 31.7%,温度亦降低了约 500 K。较小的孔径限制了反应物分子的自由扩散,使得更多的甲烷分子被迫在催化剂表面停留更长时间。根据 Thiele^[12]的小孔效应理论,在小孔中有效扩散系数会降低,从而增强反应物与催化剂间的相互作用,甲烷分子更有可能接触到催化剂活性位点,从而提高转化率。此外,较小孔径的结构减少了热量损失,因为热量在较狭窄的空间内被更有效地保留和重新分布,较小的尺寸有助于提高燃烧效率和温度。因此,小孔径下的高温可能由于更有效的热传递和能量利用。

表2 油页岩热解与氧化反应模型

Table 2 Modeling of oil shale pyrolysis and oxidation reactions

反 应	方 程 式	频率因子/ s^{-1}	活化能/ $(J \cdot mol^{-1})$	反应焓/ $(J \cdot mol^{-1})$
干酪根裂解	Kerogen(干酪根)=0.0107HO+0.009 7LO+0.0071HC+0.6411Precha(预焦)	2.59×10^{18}	213500	-4600
干酪根氧化	Kerogen+0.1052O ₂ =1.4225Prechar	5.59×10^9	64320	5864
轻油氧化	1LO+21.864O ₂ =16.26Water+12.208CO ₂ +3.052CO	2.26×10^{10}	72680	7794690
重油氧化	1HO+38.5359O ₂ =28.164Water+21.7368CO ₂ +5.4342CO	1.1232×10^{17}	180000	13735400
预焦氧化	Prechar+1.1723O ₂ =0.575H ₂ O+0.976 9IG	8.64×10^{31}	420000	868837
半焦氧化	1Char+0.9O ₂ =0.8CO ₂ +0.2CO	8.64×10^{31}	430000	315800
重油裂解	1HO=1.503765HC+0.661282LO+13.417Perchar	8.64×10^{17}	226090	-46500
轻油裂解	1LO=3.2378HC+5.1822Perchar	4.32×10^{16}	226090	-46500
预焦裂解	1Perchar=0.01718HC+0.9902Char	8.64×10^{17}	226090	-46500
甲烷氧化	1CH ₄ +2O ₂ =2Water+1CO ₂	8.01×10^{35}	16206	55556
烷烃类气体氧化	1HC GAS+4.9296O ₂ =4.164Water+2.5312CO ₂ +0.6328CO	2.61×10^5	71000	1758460

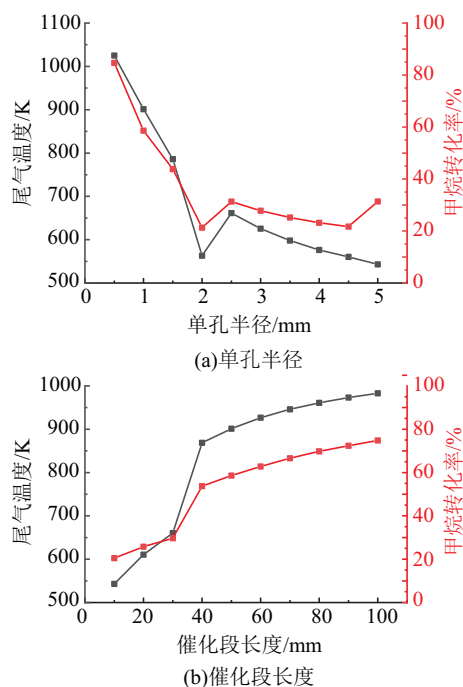


图2 催化参数对燃烧效果影响

Fig.2 The influence of catalytic parameters on the combustion effect

在催化段长度对燃烧效果影响研究中,孔径保持为1 mm,催化段长度在10~100 mm范围内变化。实验结果显示,当催化段长度为10 mm时,甲烷转化率为20%,尾气温度为600 K。然而,当催化段长度增加至100 mm时,甲烷转化率显著提升至75%,尾气温度亦升至970 K,达到了最高的效率水平。催化段长度的增加延长了反应物与催化剂的接触时间,

减少了内扩散限制,使得反应物更容易接触到催化剂的活性位点,从而提高了反应的完全性。较长的多孔介质有助于更精确地控制反应条件,优化反应动力学,进而提升转化率。此外,多孔材料在燃烧反应中表现出良好的热量管理能力,能够通过内部热传导优化温度分布^[13],随着长度的增加温度分布变得更加均匀,热量在反应过程中更加易于保留和积累。这种热量的有效积累有助于维持较高的反应温度,从而推动尾气温度的升高,提高反应速率和转化率。

根据上述规律,对反应模型进一步优化,最终甲烷转化率最高可达92.4%,尾气温度为1050 K。

2.2 CMG分析

将甲烷转化率为92%、85%、80%、75%四种情况的条件导入到CMG中,观察不同转化率对油页岩开采的影响。

2.2.1 温度场分布

图3为油页岩开采原位转化温度场分布,分别为第0.5、1、2、3、4、5年注采井间温度场分布,注入气体中含有CH₄,在加热器中与催化剂接触后注入地层时持续与O₂发生反应,CH₄热值较高,导致注入井边温度剧烈上升,热量从注入井开始,随着时间的推移,逐渐向油页岩层的周围区域传播。随着高温尾气注入,地层温度持续升高直至开采结束。图3(c)、(d)中注入气体中CH₄含量较高,CH₄氧化反应产生大量热量,最高温度达到1000~1500℃。干酪根裂解温度为300~350℃,干酪根分解随温度带推进,从注入井开始推进到四个生产井。

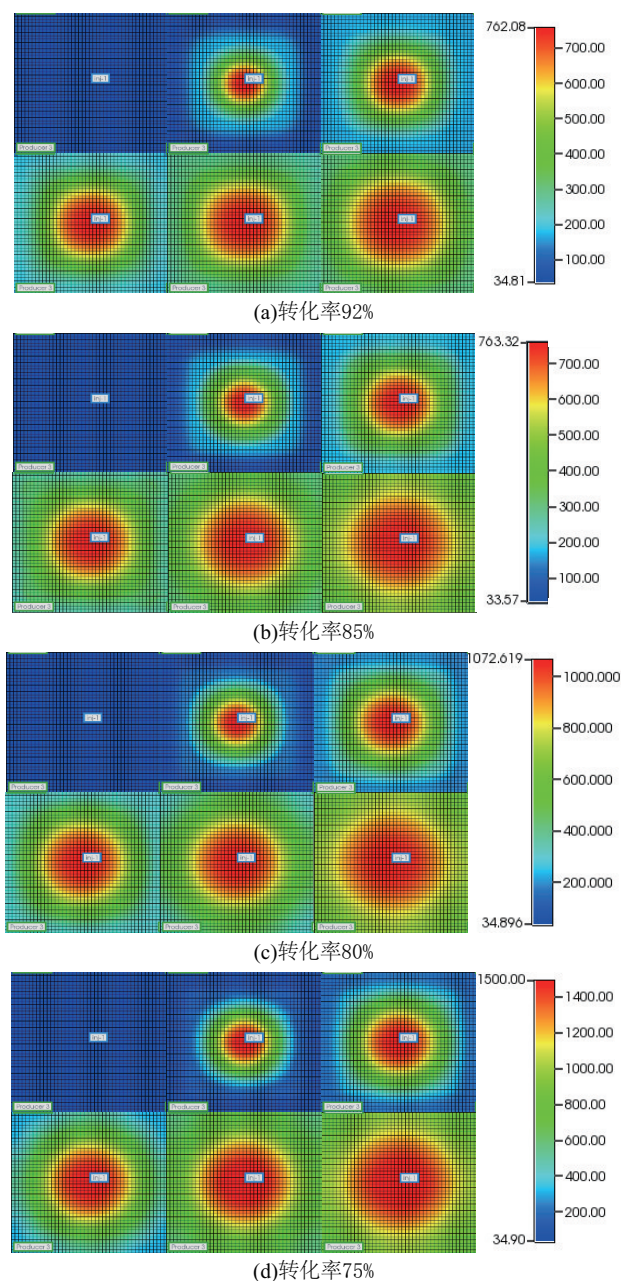


图3 温度场示意

Fig.3 Temperature field schematic

2.2.2 油气产量

如图4所示,甲烷转化率为92%时,总产油达 20.5 m^3 ,从第400天左右开始产油到第五年开采完毕,最高日产气量为 4.7 m^3 ;甲烷转化率为85%时总产油量为 17.5 m^3 ,最高日产气量为 6.3 m^3 ;甲烷转化率为80%时总产油量为 16 m^3 ,最高日产气量为 8.1 m^3 ;甲烷转化率为75%时总产油量与甲烷转化率为80%时几乎一致,日产气量最高为 11.4 m^3 。

本研究中,模拟的变量为注入气体的组分,其

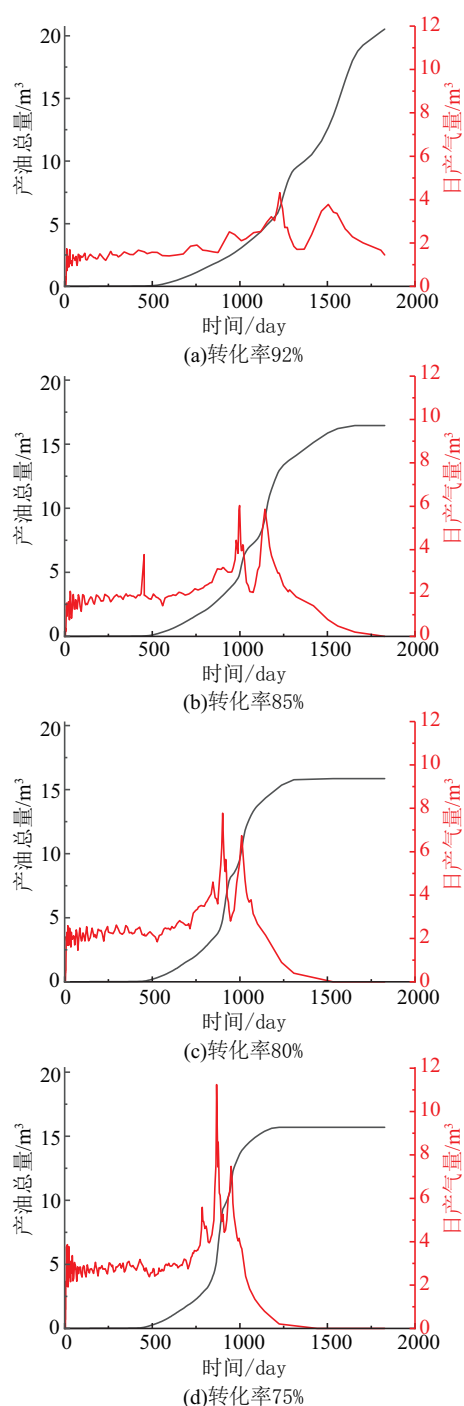


图4 产气速率和总产油量

Fig.4 Rate of gas production and total oil production

中甲烷转化率不同导致注入气体中的组分存在差异。具体而言,甲烷转化率较高时,燃烧后产生的二氧化碳含量相对较高。随着注入气体中甲烷含量增加,总产油量持续下降。这是因为甲烷具有较高的热值,其在地层中的持续氧化反应导致温度升高,进而引起干酪根碳化,最终导致整体产油量降

低。在甲烷转化率较低时,氧气含量较高,加剧了干酪根的氧化反应,进一步降低了产油量。

然而,横向对比分析表明,在甲烷转化率较低的情况下,产油速率较高。这可能因为:加热速度快且温度高,促进了干酪根的裂解^[14];二氧化碳含量高,注入地层后发生吸附和溶解,提高了产油效率。然而,对比分析显示,当甲烷转化率低于80%时,对产油的影响几乎不变,总产油量达到最低值。

进一步对比分析表明,随着甲烷转化率降低,日产气量增加,且峰值出现得更早。这可能是因为二氧化碳含量的增加,注入地层后可能发生膨胀和相变,导致地层压力增加,从而促进气体的迁移,提高了产气速率。此外,二氧化碳的溶解度更高,能置换储层中的甲烷,提高气体的流动性和产气速率。在开采过程中,裂解反应均为吸热反应,高温环境有助于触发这些吸热反应,从而提高产气量。

3 结论

利用低浓度含甲烷工业废气催化燃烧开采油页岩具有可行性。通过优化催化燃烧的多孔介质参数,可实现高效的甲烷转化和热量产生,为油页岩开采提供充足热源。

(1)随着甲烷转化率的提高,总产油量增加。当甲烷转化率从75%提升至92%时,总产油量显著增加,但当转化率低于80%时,总产油量趋于稳定,不再显著增加。

(2)甲烷转化率越低,最高日产气量越高,且达到峰值的时间越早。这表明在较低的甲烷转化率下,气体的产生速率更快。

(3)高甲烷转化率时产生的二氧化碳有助于提高产油效率,而低甲烷转化率时的高氧气含量会降低产油量。同时,二氧化碳的增加有助于提高地层压力和气体流动性,从而增加产气速率。

在油页岩开采过程中,本技术方案可以减少废气排放,实现废气循环利用,提高能源利用效率的同时还减少了对环境的影响,符合绿色开采理念,为油页岩绿色、高效开采提供了新的技术思路和方法。该技术也可扩展应用到煤层气、紧砂岩气等难开采的资源开发,提升这些资源的开发效率。

未来可继续研发更高活性的催化剂,以进一步提升甲烷转化率,降低成本,延长使用寿命;深入研究多孔介质的结构设计,探索其对气体流动性、热

传导等性能的影响,从而实现更高效的能量利用。

参考文献(References):

- [1] Kweku D W, Bismark O, Maxwell A, et al. Greenhouse effect: greenhouse gases and their impact on global warming[J]. Journal of Scientific Research and Reports, 2018, 17(6):1-9.
- [2] Mitchell J F B. The "greenhouse" effect and climate change[J]. Reviews of Geophysics, 1989, 27(1):115-139.
- [3] Dobslaw C, Glocker B. Plasma technology and its relevance in waste air and waste gas treatment[J]. Sustainability, 2020, 12(21):8981.
- [4] Burgess J E, Parsons S A, Stuetz R M. Developments in odour control and waste gas treatment biotechnology: a review[J]. Biotechnology Advances, 2001, 19(1):35-63.
- [5] Kumar A, Dewulf J, Van Langenhove H. Membrane-based biological waste gas treatment[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 136(2/3):82-91.
- [6] 柏静儒,孙灿辉,张亮,等. 油页岩微波干燥过程分析及模拟[J]. 化学工程, 2017, 45(2):26-32.
BAI Jingru, SUN Canhui, ZHANG Liang, et al. Analysis and simulation of the microwave drying of oil shale [J]. Chemical Engineering, 2017, 45(2):26-32.
- [7] WANG Hongyan, DAI Fei, LI Zengxi, et al. Upgrading shale oil distillation to clean fuel by coupled hydrogenation and ring opening reaction of aromatics on W-Ni/ γ - Al_2O_3 catalysts[J]. Energy & Fuels, 2015, 29(8):4902-4910.
- [8] 孙友宏,郭威,邓孙华. 油页岩地下原位转化与钻采技术现状及发展趋势[J]. 钻探工程, 2021, 48(1):57-67.
SUN Youhong, GUO Wei, DENG Sunhua. The status and development trend of in-situ conversion and drilling exploitation technology for oil shale[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1):57-67.
- [9] Braun R L, Burnham A K. PMOD: a flexible model of oil and gas generation, cracking, and expulsion[J]. Organic Geochemistry, 1992, 19(1/3):161-172.
- [10] PEI Shufeng, WANG Yanyong, ZHANG Liang, et al. An innovative nitrogen injection assisted in-situ conversion process for oil shale recovery: mechanism and reservoir simulation study[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 171:507-515.
- [11] Khakimova L, Bondarenko T, Cheremisin A, et al. High pressure air injection kinetic model for bazhenov shale formation based on a set of oxidation studies[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 172:1120-1132.
- [12] Thiele E W. Relation between catalytic activity and size of particle[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1939, 31(7):916-920.
- [13] Trimm D L. Catalytic combustion (review)[J]. Applied Catalysis, 1983, 7(3):249-282.
- [14] 范存翰,朱超凡,刘召,等. 预热气体对油页岩自生热原位转化效果的影响[J]. 钻探工程, 2024, 51(6):24-31.
FAN Cunhan, ZHU Chaofan, LIU Zhao, et al. Influence of preheated gas on the autothermic pyrolysis in-situ conversion process(ATS) for oil shale exploitation[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6):24-31.

(编辑 王跃伟)