

油页岩原位开采井下燃烧加热器催化燃烧特性 及参数优化研究

林宝新¹, 陈知霖^{2,3,4,5}, 王元^{2,3,4,5*}

(1. 吉林省地质技术装备研究所, 吉林 长春 130103; 2. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 3. 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; 4. 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; 5. 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: 针对油页岩原位转化开采过程中的环境污染与能源效率问题, 本研究提出一种将井下开采产生的甲烷废气回收, 并用于催化燃烧加热器的能源循环利用方法。研究选定催化燃烧与多孔介质燃烧相结合的方式, 以甲烷为燃料, 构建二维轴对称模型, 系统模拟了孔径、注气速率及甲烷摩尔分数对燃烧效果的影响。研究表明: 减小孔径可显著提高甲烷转化率与尾气温度; 注气速率的变化对燃烧效果影响微弱; 贫燃状态下甲烷浓度的微量变化对转化率提升有限。本研究为油页岩井下废气中甲烷的资源化利用与燃烧加热器的优化设计提供了理论依据, 对推动油页岩绿色开采具有重要的工程参考价值。

关键词: 油页岩; 原位开采; 原位转化; 催化燃烧; 多孔介质; 数值模拟; 参数优化; 绿色开采

中图分类号: TD83; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)02-0096-06

Study on catalytic combustion characteristics and parameter optimization of underground combustion heaters for in-situ oil shale extraction

LIN Baoxin¹, CHEN Zhilin^{2,3,4,5}, WANG Yuan^{2,3,4,5*}

(1. Jilin Provincial Institute of Geological Technology and Equipment, Changchun Jilin 130103; 2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 3. National-Local Joint Engineering Laboratory of In-situ Conversion, Drilling and Exploitation Technology for Oil Shale, Changchun Jilin 130026, China; 4. Provincial and Ministerial Co-construction of Collaborative Innovation Center for Shale Oil & Gas Exploration and Development, Changchun Jilin 130026, China; 5. Key Laboratory of Complex Condition Drilling and Exploitation Technology, Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: To address the issues of environmental pollution and energy efficiency in the in-situ conversion and exploitation of oil shale, this study proposes an energy recycling method that involves recovering methane-rich waste gas generated from the downhole process and utilizing it as a fuel for a catalytic combustion heater. In this research, a combined approach of catalytic combustion and porous medium combustion was adopted, with methane as the fuel. A two-dimensional axisymmetric model was constructed to systematically simulate the effects of pore diameter, gas injection rate, and methane mole fraction on combustion performance. The results indicate that: reducing the pore diameter can significantly enhance methane conversion rate and exhaust gas temperature; variation in the gas injection

收稿日期: 2025-08-31; 修回日期: 2025-10-11 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.02.010

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(编号: 20230203121SF)

第一作者: 林宝新, 男, 满族, 1981年生, 高级工程师, 机械电子工程专业, 从事矿山选冶设备、非标机械制造等相关工作, 吉林省长春市高新区顺达路88号, linbaoxin@126.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: 林宝新, 陈知霖, 王元. 油页岩原位开采井下燃烧加热器催化燃烧特性及参数优化研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(2): 96-101.

LIN Baoxin, CHEN Zhilin, WANG Yuan. Study on catalytic combustion characteristics and parameter optimization of underground combustion heaters for in-situ oil shale extraction[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(2): 96-101.

rate has a negligible impact on combustion performance; under fuel-lean conditions, minor changes in methane concentration lead to limited improvement in the conversion rate. This study provides a theoretical basis for the resource utilization of methane from downhole waste gas in oil shale operations and the optimized design of combustion heaters, offering significant engineering reference value for advancing the green extraction of oil shale.

Key words: oil shale; in-situ extraction; in-situ conversion; catalytic combustion; porous medium; numerical simulation; parameter optimization; green extraction

0 引言

目前,石油、天然气和煤炭等化石燃料仍是中国的主要能源来源。为了满足不断增长的能源需求,油页岩作为一种重要的替代能源受到高度重视^[1]。根据美国地质调查局(USGS)估算,全球范围内油页岩储量约为6000亿t,是全球原油可采储量(约1700亿t)的数倍^[2],其中中国、爱沙尼亚和美国等国拥有最大储量。油页岩又称油母页岩,是一种高灰分(>40%)的固体可燃有机矿产,低温干馏可获得类似天然石油的页岩油^[3]。油页岩通过加热分解可以生产出沥青等燃料类产物以及化学原料,是解决未来能源危机的重要潜在资源。

油页岩开采和处理过程中存在严重的环境问题。传统的地面干馏技术是将油页岩开采至地面,破碎后置于密闭反应釜中,在隔绝空气的条件下加热,使有机质(干酪根)热解为页岩油、可燃气及半焦,再经冷凝和分馏获得液体燃料和化工原料^[4]。此方法排放出CO₂、SO₂、NO_x及含酚废水,产生大量废渣,堆存占地,且存在重金属淋溶风险。现阶段主要采用地下原位转化技术开采油页岩,通过井下注热技术实现油页岩地下干馏分解,提高开采效率的同时兼具环保性及经济性^[5]。地下原位转化技术开采过程中伴随大量裂解废气排放,其中甲烷(CH₄)是最主要的温室气体之一。研究表明,油页岩开采过程中的甲烷排放不仅会加剧全球变暖,还可能对地下水资源造成污染^[6]。因此,如何在高效开采油页岩的同时减少对环境的影响,成为当前能源领域急需解决的问题。

传统的废气处理方式主要包括燃烧发电等,存在效率低、成本高等问题。本研究提出了一种创新性的解决方案,即将油页岩开采产生的废气中的甲烷回收,并用于井下燃烧加热器重新开采油页岩,从而实现能源循环利用。这种方法不仅可以减少尾气排放,还能提高油页岩资源的利用率,为绿色开采提供了一条可行路径。

1 加热器燃烧方式选择

预混合燃烧模式要求燃料与空气在进入燃烧室前充分均匀混合,如图1所示。该燃烧方式能够产生较短的火焰,且具有相对均匀的温度分布,但存在对回火敏感的显著缺陷^[7]。

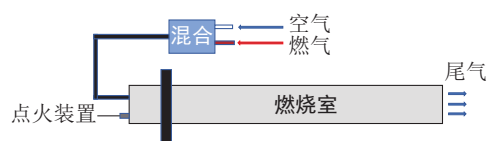


图1 预混燃烧示意

Fig.1 Schematic diagram of premixed combustion

考虑到甲烷作为一种高热值气体(55.5 MJ/kg),虽然能量密度较大,但其爆炸极限体积浓度的下限仅为5%,这在井下环境中可能存在无法有效控制甲烷浓度,从而引发爆炸的风险。基于上述安全性考量,工程实践中选择采用扩散燃烧模式:通过让燃料与空气在燃烧区内逐步混合并持续反应^[8-9],如图2所示。该方案不仅能够产生稳定的火焰,还具有设备结构简单、运行可靠等显著优势,适合应用于井下工作环境中。

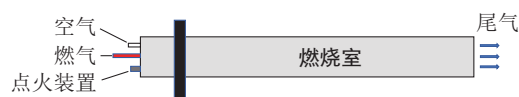


图2 扩散燃烧示意

Fig.2 Schematic diagram of diffusion combustion

目前研究中的燃烧方式主要包括脉动燃烧、高温空气燃烧、直接燃烧、自由空间燃烧、富氧燃烧、等离子燃烧、多孔介质燃烧、催化燃烧等,燃烧特性如表1所示。

综上所述,本研究采用催化燃烧与多孔介质燃烧相结合的创新方式开展模拟,以甲烷为研究对象,通过将甲烷燃料与空气分离注入实现扩散燃烧过程。系统考察不同工况下甲烷转化率及尾气温度等关键参数,在确保达到开采温度要求的同时,

表1 燃烧方式及特性分析

Table 1 Analysis of combustion methods and characteristics

燃烧方式	燃烧特性
脉动燃烧	通过周期性改变燃烧条件来提高效率或减少排放,但不适合井下环境中的稳定需求
高温空气燃烧	需要预热空气,设备复杂,不适合井下的空间限制
直接燃烧	简单,但效率低且污染物多,对井下安全和环保不利
自由空间燃烧	在开放环境中进行,对于井下封闭空间而言,控制困难且危险性高
富氧燃烧	提高效率但需额外设备,不适合井下应用
等离子燃烧	需要特殊能量源,成本高且在井下环境中不实用
多孔介质燃烧	提供稳定火焰和良好热传导,适合井下的空间限制
催化燃烧	降低排放,减少安全风险,适合井下环保需求

优化燃烧效率和甲烷转化性能。这一研究方法既提高了燃烧过程的稳定性,又减少了尾气排放,为深井甲烷综合利用技术提供理论依据与实践指导。

2 加热器参数优化

2.1 构建模型

模拟选用负载贵金属催化剂多孔介质进行研究,使用ICEM软件进行模型构建,如图3所示,负载密度为 3.69×10^{-9} mol/cm²,多孔介质材料选择氧化铝,具有优异的机械强度、高温稳定性和化学惰性,可以控制其孔径分布和比表面积,耐腐蚀性优异^[10]。

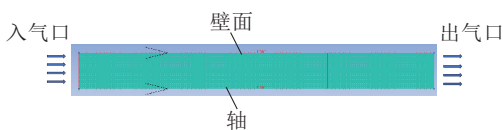


图3 模型网格结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the model grid structure

将模型导入Fluent中进行模拟,设定反应前后的气体均视为不可压缩流体,混合气体进入孔通道内气体组分均匀。所以选用多孔介质单孔轴对称模型进行模拟,使模拟结果更加精确。选用2D模型便于更精确的燃烧效果分析^[11],激活能量方程,并选用经典的k-epsilon(两方程)湍流模型。同时启用物种传输模块,以捕获催化反应中的物质迁移

过程,并在壁面界处理中激活燃烧反应选项。为实现对贵金属催化剂的精确模拟,导入了基于Ansys Chemkin平台生成的详细化学反应机制文件,其中包含了催化燃烧所需的关键反应路径和动力学数据。在边界条件设置方面,将混合气入口指定为速度入口,且将进口气体组分以摩尔分数形式进行定义。物性参数的计算采用质量加权平均方法,包括混合气的比热容、黏度等特性,以确保流场和传热计算的准确性。求解过程中,选用了基于压力-速度耦合的SIMPLE算法,这一算法在工程计算中表现出良好的数值稳定性和收敛性能,能够有效解决非线性物理问题^[12]。最终的数据通过后处理软件Tecplot和Origin进行可视化分析和结果提取,以获得关于催化燃烧过程的全面认识。

2.2 多孔介质孔径对燃烧效果影响

多孔介质孔径作用机制主要体现在流体力学特性、传热与质量传递动力学以及表面反应速率,对催化燃烧效果有显著影响。催化段长度设置为200 mm,注气速率2 m/s,进气口温度298 K,甲烷摩尔分数0.09,氧气摩尔分数0.21,孔径从0.5 mm增加至3.0 mm,梯度为0.5 mm。模拟结果如图4、图5所示。

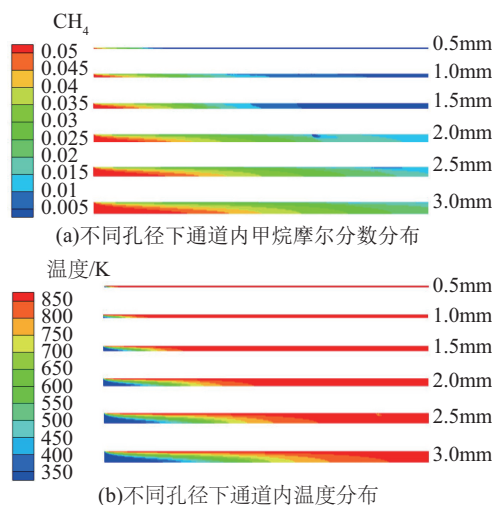


图4 不同孔径下通道内温度及甲烷摩尔分数云图

Fig.4 Contour plots of pore channel temperature and methane molar fraction under varying pore size

孔隙直径的缩小会导致催化剂床或单元中的压力降显著升高。较大的压力降会迫使反应流体在催化剂表面形成更加优化和均匀分布,从而显著增加反应物分子与活性中心的接触频率,有效提

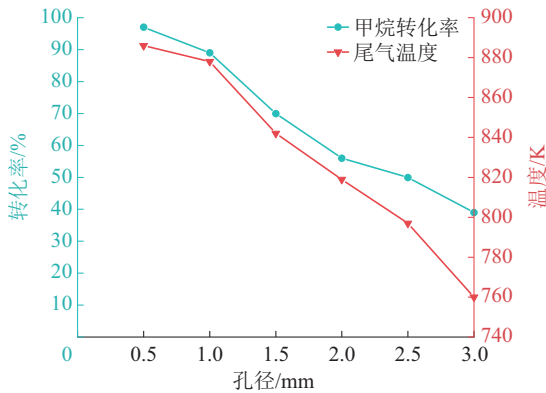


图5 尾气温度及甲烷转化率随孔径变化

Fig.5 Exhaust gas temperature and methane conversion rate under varying orifice apertures

高化学转化率。此外,缩小孔隙直径可能导致流体的流动机制发生显著变化,即从惯性主导的流动向黏性主导的斯托克斯流转变,这种流动模式的改变能够延长反应物分子在催化剂表面的停留时间,有助于完成那些需要较长时间的化学转化过程。同时,孔径的缩小也会增强流体的惯性效应,使得更多反应物分子偏离主流方向进入微观孔道,从而增加与催化剂表面的接触概率。

在传热性能方面,孔隙直径的减小会影响催化剂颗粒的有效导热系数和相对扩散长度。较小的孔隙可能通过优化局部传热效率,使反应释放的热量更加均匀地分布在催化剂表面,从而有效避免局部过热,显著提升反应体系的稳定性。尽管在某些情况下,缩小孔径可能导致催化剂内部出现更为显著的温度梯度,但这种特性通常有助于优化活性分布,尤其是在燃烧反应中,更高的局部温度能加速化学反应速率,从而进一步提高转化率并增加废气排放温度。需要注意的是,孔径减小所导致的额外压力降需要通过外部能量补偿,这部分输入能量可能以热形式反馈到系统中,从而进一步提升废气温度。

在物质扩散方面,缩小孔隙直径会显著改变催化剂颗粒内的浓度梯度分布。更为显著的内部浓度梯度能够加速反应物从流体向催化剂表面的扩散过程,从而提升质量传递效率。这一现象在大分子或高黏度体系中表现得尤为突出。同时,较小孔隙的结构可能导致更为复杂的扩散路径,显著增加反应物分子与催化剂表面的接触概率。在特定条件下,孔径的缩小可能导致扩散限制对反应速率的影响更加显著。但这种副作用通常可以通过优化

流体动力学设计和热量管理得到有效缓解,从而实现更高的整体转化效率。

2.3 注气速率对燃烧效果影响

从氧气分布特征、反应混合效率以及与可燃物的相互作用机制等方面分析,注气速率对燃烧效果产生一定影响。催化段长度设置为 200 mm,孔径 0.5 mm,进气口温度 298 K,甲烷摩尔分数 0.09,氧气摩尔分数 0.21,注气速率从 1 m/s 增加至 3 m/s,梯度为 0.5 m/s。模拟结果如图 6、图 7 所示。

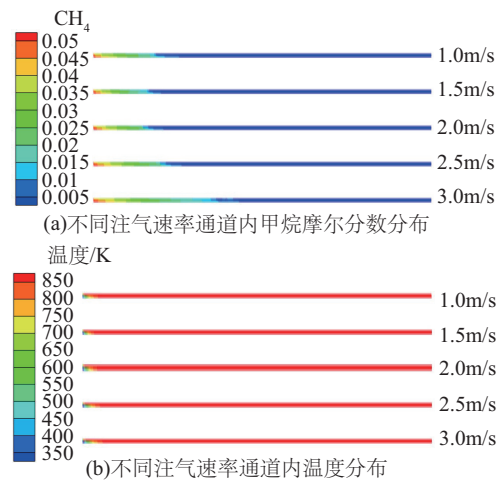


图6 不同注气速率孔通道温度及甲烷摩尔分数云图

Fig.6 Cloud maps of pore channel temperature and methane molar fraction at different gas injection rates

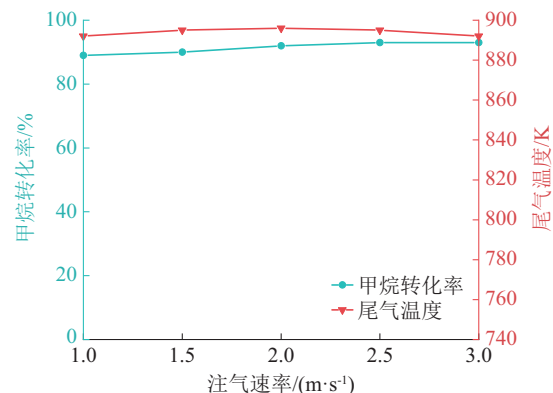


图7 下尾气温度及甲烷转化率随注气速率变化

Fig.7 Exhaust gas temperature and methane conversion rate under variable injection rates

在注气速率 1~3 m/s 范围内,氧气在燃烧区的分布呈现出较高的一致性。这是因为该流速区间内的气体动力学特性,能够有效保障氧气与可燃物混合过程中浓度梯度的平衡,从而使燃烧效果保持稳定。该

注气速率范围所对应的流体力学效率充分满足了反应物混合的基本要求,即氧气与可燃物之间实现了高效的接触和交换,这种状态下,微小幅度的流速波动不会显著改变混合过程中的物质转移效率。

从化学动力学的角度来看,在1~3 m/s的注气速率区间内,可燃物与氧气分子之间的碰撞频率和反应时间,已经达到化学反应进行所需的最优范围。因此,流速的小幅度变化不会显著影响分子间的相互作用过程。在这一稳态条件下,即使存在一定的注气速率调整,也不会破坏系统内的热力学平衡。此外,燃烧室的结构设计中,通过优化气体和可燃物的流动路径,进一步增强了氧气与反应物的混合效率,从而有效削弱了注气速率变化对燃烧过程的影响。在这种情况下,注气速率引起的分子间碰撞时间尺度的微小变化不足以显著改变化学反应速率的整体水平。

2.4 甲烷摩尔分数对燃烧效果影响

根据甲烷摩尔分数的不同,燃烧分为两种不同状态,分别为贫燃和富燃。贫燃指的是在燃烧过程中,燃料与空气或氧气的混合比例低于化学计量比,系统中存在过量的空气或氧气^[13]。富燃则指在燃烧过程中,燃料与空气或氧气的混合比例高于化学计量比。根据热力学第二定律,燃烧室内热效率与压缩比有关,贫燃允许更高的压缩比(不易爆震),从而提高理论热效率。此外,过量空气降低了燃烧温度,减少了传热损失。上述两部分模拟燃烧都处于贫燃状态下进行,温度达到油页岩开采要求。此外CO和HC的生成主要源于燃烧不充分。贫燃提供充足氧气,促进完全燃烧,使CO转化为CO₂、HC转化为CO₂和H₂O的反应更彻底。NO_x的生成依赖高温(>1800 K)和富氧条件。贫燃在提高热效率的同时减少有害气体排放,实现高效、绿色开采。所以这部分模拟全部采用贫燃状态进行,即甲烷与氧气比值<0.5。

催化段长度设置为200 mm,孔径0.5 mm,进气口温度298 K,注气速率2 m/s,氧气摩尔分数0.21,甲烷摩尔分数从0.05增加至0.10,梯度为0.01。模拟结果如图8、图9所示。

在此工况下,甲烷转化率已逼近化学平衡极限,贫燃区内的表面反应速率受限于可获得的活性氧,整体趋于饱和,模拟中催化剂无失活风险,故浓度梯度变化对转化率影响甚微。当前氧气摩尔分

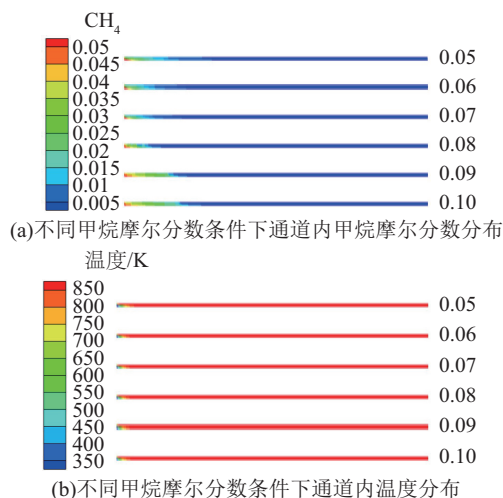


图8 不同甲烷摩尔分数条件下孔通道温度及甲烷摩尔分数云图

Fig.8 Temperature and methane molar composition contour maps of pore channels under different methane molar Ratios

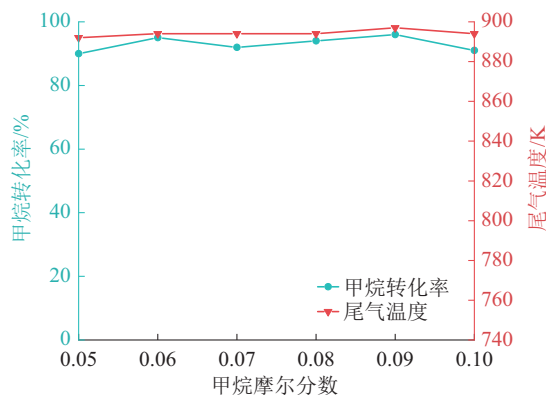


图9 尾气温度及甲烷转化率随甲烷摩尔分数变化

Fig.9 Exhaust gas temperature and methane conversion rate under different methane molar ratios

数仅0.21,已接近甲烷完全燃烧的理论下限;催化燃烧链式中间步骤会进一步耗氧,使氧气瞬时浓度更低。因而在氧气成为明确瓶颈的条件下,继续提高入口甲烷浓度无法突破平衡束缚,转化率无明显提升。反应区整体处于近平衡状态,微小扰动不足以打破热力学与动力学锁定,宏观表现即为平稳。

此外,0.5 mm孔径对应的雷诺数处于层流区,边界层较厚,外扩散阻力显著。当表面本征反应速率远高于扩散速率时,体系进入传质控制区,表现为反应速率对浓度变化失去敏感性。扩散燃烧的局部高温虽可导致微区反应差异,但模拟输出为空间均值,故仅呈现轻微波动。

3 结论

为实现油页岩绿色开采,指导油页岩原位加热井下微孔燃空比优化的目的,本文在0.5~3.0 mm孔径、200 mm恒定催化段长度的石英微反应器内,系统开展了恒体积流量条件下甲烷贫燃实验,并辅以Fluent层流-有限速率化学反应模拟,得到以下认识:

(1)在催化段长度保持不变的条件下,孔径越小甲烷转化率越高,尾气温度越高。在恒定体积流量条件下,孔径减小,参与反应孔数量增加,流通横截面积增加,线速度降低,气体实际驻留时间增加。 CH_4 与催化剂活性位接触时间加长,进一步提高了转化率。孔径减小使得换热面积增加,反应放出的热量更易被主流气体回收,导致轴向热损失减少,热回馈效应增强,既提高了局部催化剂温度,又提升了出口尾气温度。

(2)注气速率改变对燃烧效果影响较小。注气速率提高时,表观驻留时间理论上应缩短,然而,催化段长度200 mm远超当前贫燃工况需要,因此即使表观驻留时间变短,在足够催化段长度条件下仍以完成剩余反应,宏观上表现为转化率几乎不变。增大注气速率一方面减薄边界层、降低外扩散阻力,有利于反应物抵达活性表面;另一方面提高对流传热系数,使反应热传递更迅速,局部温升被抑制。两者作用方向相反,导致尾气温度变化在宏观层面表现微弱。孔径0.5 mm的微通道内,注气速率提高使压差增大,但压差自身对反应动力学影响较小,同时会轻微压缩气体密度,使分子通量提高,降低部分驻留时间缩短带来的负面效应,从而进一步稳定速率敏感性。

(3)在贫燃状态下,燃烧反应已达到化学反应平衡临界点,甲烷浓度微量变化无法进一步促使反应正向移动,对燃烧效果影响微弱。贫燃状态下燃烧效率极高,甲烷几乎完全燃烧,需进一步计算系统整体能量效率,进而确定最佳燃空比。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] World Energy Council. 2004 Survey of Energy Resources[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2004.

[3] 刘招君,柳蓉.中国油页岩特征及开发利用前景分析[J].地学前缘,2005,12(3):315-323.
LIU Zhaojun, LIU Rong. Oil shale resource state and evaluating system[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3):315-323.

[4] 朱颖.油页岩层理对其力学特性及裂缝起裂与扩展的影响研究[D].长春:吉林大学,2022.
ZHU Ying. Study on the influence of oil shale bedding planes on its mechanical properties, fracture initiation and extension[D]. Changchun: Jilin University, 2022.

[5] 曾帅.中国页岩油气资源开发技术-经济和环境的影响分析[D].广州:华南理工大学,2019.
ZENG Shuai. Techno-economic analysis and environmental impacts assessment of shale oil and shale gas development in China[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

[6] Daelman M R J, van Voorthuizen E M, van Dongen U G J M, et al. Methane emission during municipal wastewater treatment[J]. Water Research, 2012, 46(11):3657-3670.

[7] 杨凯麟.天然气燃烧模式对柴油引燃天然气双直喷发动机燃烧过程的影响研究[D].长春:吉林大学,2024.
YANG Kailin. Study on the influence of natural gas combustion mode on the Combustion process of diesel pilot natural gas dual direct injection engine[D]. Changchun: Jilin University, 2024.

[8] 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 pre-heated gas on the autothermic pyrolysis in-situ conversion process (ATS) for oil shale exploitation[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6):24-31.

[9] 王文焯,翟梁皓,荀杨,等.油页岩储层改造技术研究进展与建议[J].钻探工程,2025,52(3):12-21.
WANG Wenxuan, ZHAI Lianghao, XUN Yang, et al. Research progress and suggestion of oil shale reservoir reconstruction technology[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3):12-21.

[10] Chen L, He A, Zhao J L, et al. Pore-scale modeling of complex transport phenomena in porous media[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2022, 88:100968.

[11] Pashchenko D. Comparative analysis of hydrogen/air combustion CFD-modeling for 3D and 2D computational domain of micro-cylindrical combustor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(49):29545-29556.

[12] Shui H C, Wang Y, Li Q R, et al. Analysis of heat transfer performance and system energy efficiency of catalytic combustion heaters for low calorific value waste gas application to oil shale in-situ conversion[J]. Energy, 2024, 294:130690.

[13] 张俊春.多孔介质燃烧处理低热值气体及燃烧不稳定性研究[D].杭州:浙江大学,2014.
ZHANG Junchun. Porous media combustion for low calorific gases and combustion instabilities [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

(编辑 王跃伟)