纳秒脉冲滑动弧放电等离子体裂解煤油实验研究*

张 凯,金 迪,宋飞龙,黄胜方,胥世达

(空军工程大学 等离子体动力学实验室,陕西西安 710038)

摘 要:为改善极端条件下航空煤油的点火和燃烧性能,在大气压氮气环境下利用纳秒脉冲电源产生的滑动弧等离子体开展煤油裂解实验研究,得到了包含气态轻质烃和氢气等高活性小分子物质的裂解 气。通过改变电源输出脉冲电压的上升沿时间和下降沿时间,得到了裂解气产量(Q_{gas})、碳氢比(R) 以及裂解气中主要组分选择性(S)的变化规律,并总结了相关的部分反应路径。实验结果如下:裂解 气产量随着上升沿时间的延长而减小,随着下降沿时间的延长而上升,裂解气碳氢比则呈现相反的变化 规律;裂解气主要组分中,乙烷选择性最高,在各实验工况下均超过30%;随着上升沿时间和下降沿时 间的延长,裂解气中丙烷和丙烯的选择性均降低,氢气的选择性上升;上升沿时间和下降沿时间的变化 影响裂解效果的主要原因是改变了反应的路径。实验结果表明,纳秒脉冲滑动弧放电等离子体可以将煤 油中的部分大分子烃类转化为气态轻烃和氢气等高活性组分。同时,增加纳秒脉冲电压下降沿时间能够 改善滑动弧等离子体的裂解效果,获得更多高活性的小分子物质。

关键词:航空煤油;纳秒脉冲滑动弧等离子体;裂解;碳氢比;选择性;反应路径 中图分类号:V312+.1 文献标识码:A 文章编号:1001-4055 (2022) 07-200993-09 DOI: 10.13675/j.enki.tjjs.200993

Experimental Research on Nanosecond Pulsed Gliding Arc Discharge Plasma Cracking Kerosene

ZHANG Kai, JIN Di, SONG Fei-long, HUANG Sheng-fang, XV Shi-da

(Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: To improve the ignition and combustion performance of aviation kerosene in extreme conditions, the gliding arc plasma generated by the nanosecond pulsed power supply was adopted to crack kerosene in atmospheric-pressure nitrogen environment. Cracking gas which consisted of active components such as gaseous light hydrocarbon and hydrogen were acquired. Besides, the change laws of cracking gas production rate (Q_{gas}) , C/H ratio (R) and the selectivity of main components (S) in cracking gas were obtained through changing the rise time and fall time of the pulse voltage, and part of relevant reaction paths were summarized. The experimental results were as follows. The cracking gas production rate reduced as the rise time grew, and increased with longer fall time. The variation laws of C/H ratio with the two parameters were opposite to that of cracking gas production rate. Among the main components of the cracking gas, the selectivity of ethane was the highest and the value exceeded 30% in the experimental conditions. With the growth of the rise time and fall time, the selectivity of propane and propylene in cracking gas decreased while that of hydrogen rose. The changes of rise time and fall time

^{*} 收稿日期: 2020-12-15; 修订日期: 2021-03-05。

基金项目:国家自然科学基金重大项目(91641204;91941105)。

作者简介:张 凯,硕士生,研究领域为等离子体点火助燃。

通讯作者:金 迪,博士,副教授,研究领域为等离子体流动控制与点火助燃。

引用格式:张 凯,金 迪,宋飞龙,等. 纳秒脉冲滑动弧放电等离子体裂解煤油实验研究[J]. 推进技术, 2022, 43(7):
 200993. (ZHANG Kai, JIN Di, SONG Fei-long, et al. Experimental Research on Nanosecond Pulsed Gliding Arc Discharge Plasma Cracking Kerosene[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(7):200993.)

influenced cracking effects through changing the reaction paths. The experimental results show that nanosecond pulse gliding arc discharge plasma could convert part of the macromolecular hydrocarbons in kerosene into active components gaseous such as light hydrocarbon and hydrogen. Meanwhile, longer fall time could improve the cracking effect, and obtain more active components.

Key words: Aviation kerosene; Nanosecond pulse gliding arc plasma; Cracking; C/H ratio; Selectivity; Reaction path

1 引 言

RP-3航空煤油具有密度适宜、热值高、燃烧性能 好、洁净度高、对机件腐蚀小等优点,在航空燃气涡 轮发动机和冲压发动机中得到了广泛使用^[1]。然而, 煤油的主要成分为大分子碳氢化合物^[2-3],导致其在 高空低压等极端条件下活性较低、蒸发性差、火焰传 播速度低,严重影响发动机可靠点火和稳定燃烧,限 制了其在航空航天领域的进一步应用。航空煤油裂 解是指将航空煤油中的大分子化合物经过一系列的 反应,分解成为小分子、高活性物质的过程^[4],是实现 极端条件下发动机燃烧室正常点火和稳定燃烧的有 效方法。然而,传统的煤油裂解方法,如热裂解、催 化裂解等,存在反应时间过长、催化剂易失活等局限 性^[5-6],难以应用于航空发动机。

等离子体是由带电的正负离子、自由基和各种 激发态中性粒子组成的集合体,被称为"物质的第四 态"。等离子体中高能粒子能够破坏烃类化合物中 的碳碳键和碳氢键等化学键,将大分子烃转化为小 分子烃,提高燃料分子的化学活性[7]。滑动弧放电 (Gliding arc discharge, GAD)是一种常见的可在大 气压环境中产生周期性滑动电弧的气体放电形 式[8-9]。滑动弧放电激励器结构简单、功耗低,兼具 热平衡/非平衡等离子体两者的优点^{10]}。鉴于滑动 弧放电等离子体在促进化学反应方面的独特优势, 一经提出便成为燃料重整领域的研究热点[11-13]。 Prieto 等^[14]为提高对高压电弧等离子体重整重油参 数优化设计的认识,开展非平衡等离子体重整重油 实验,研究了加载功率和电极间距对裂解效果的影 响。实验结果表明,重油转化过程中的化学反应有 明显的选择行为。Piavis等^[15]利用反向涡流滑动弧 等离子体反应器对柴油及其模型化合物十二烷进 行裂解实验研究,研究了功率、蒸汽碳比、当量比对 燃料重整效果的影响。于吉超[16]提出了利用滑动 弧等离子体对汽油进行裂解重整,并研发了新型滑 动弧等离子体电源。结果表明,该装置对汽油的重 整效率达到80%以上,汽油在滑动弧等离子体作用 下生成大量H₂和CO,极大地拓宽了发动机的贫油 燃烧极限并降低污染物排放。刘潇钰等^[17]针对滑 动弧等离子催化对甲烷水蒸汽重整制氢进行了研 究,实验结果表明提高能量密度,甲烷/水蒸汽比例 和总流量均有利于甲烷的转化,且提高能量密度和 甲烷/水蒸汽比值会改变甲烷的转化路径,提高CO 的选择性。

目前,国内外针对滑动弧等离子体裂解燃料进 行的实验多用连续直流或者交流等离子体电源。然 而,连续交流和直流等离子体在裂解煤油的同时, 部分能量转化为热能,加热碳氢化合物,导致焦炭 的产生和能量的损失^[18]。研究发现,脉冲放电等离 子体用于裂解可以提高能量利用率并抑制焦炭的 产生。同时,脉冲放电等离子体较大的占空比有助 于增强放电的稳定性和可控性。此外,脉冲放电过 程中,更多的放电能量会转化为电子的动能,导致 等离子体中平均电子能量更高,有利于煤油分子的 裂解^[19]。Scapinell等^[20]使用纳秒脉冲电源产生的 DBD等离子体进行了CH₄和CO₂重整实验研究,实 验结果显示该方法能量利用率高达40%。Gao 等^[19]使用微秒和纳秒脉冲火花放电等离子体进行 了甲烷裂解实验研究,分析了放电功率、放电间隙 长度和气体流速对CH₄转化率的影响,实验结果表 明,增大放电功率、放电间隙以及减小气体流速均 有利于裂解的进行。然而, Gao和 Scapinell 等实验 过程中载气流量较小,裂解原料为单一组分,且脉 冲电压波形对裂解效果的影响未得到研究。因此, 纳秒脉冲放电等离子体在燃料处理领域仍具有较大 的探索空间。

本文利用参数化纳秒脉冲电源在棒-环电极间 产生的旋转滑动弧等离子体进行航空煤油的裂解实 验。研究纳秒脉冲放电上升沿时间和下降沿时间的 变化对等离子体放电特性及煤油裂解效果的影响, 并总结部分反应路径。实验结果对于促进纳秒脉冲 放电滑动弧等离子体在燃料处理领域的实际工程应 用具有参考价值。

2 实验系统及实验方法

实验系统由供气部分、供油部分、电源及电特性 测试部分、等离子体裂解器和裂解气分析部分组成, 如图1所示。实验步骤主要如下:实验前,接通供气 系统,排出裂解反应器中残余气体,使氮气充满反应 器。裂解反应器内正负极在脉冲高压的作用下击穿 放电,产生电弧。电弧在气流的吹动下旋转滑动产 生旋转滑动弧等离子体。随后,将煤油通入裂解反 应器进行裂解。



Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

为保证实验结果更加准确,各工况条件下得到 的裂解气均测量三次取平均值作为最终结果,以确 保实验误差小于3%。实验过程中,氮气(99.99%)和 煤油(RP-3)的流量分别通过CX-M2型齿轮流量计 (量程0~150mL/min,误差<0.5%)和D07-9E质量流量 计(量程0~200L/min,误差<2%)进行记录并通过相应 阀门进行控制。等离子体电源采用参数化纳秒脉冲 电源,电源参数如下:输出电压 0~20kV,脉冲重复频 率1Hz~20kHz(由于电源功率限制,脉冲重复频率高 于400Hz时不能保证正常放电,为获得最好的裂解效 果,实验中放电频率取400Hz),脉宽0~1ms,上升沿 时间和下降沿时间均在50~500ns内可调。滑动弧放 电过程的电压电流分别由高压探针 (Tektronix P6015A)和电流探针(Tektronix TCP0030)进行测量, 并通过 MDO3024 型数字示波器进行记录。使用气相 色谱仪(Agilent 7890B)进行裂解气组分分析。气相 色谱仪装备两个热传导检测器(TCD)和一个火焰离 子检测器(FID),可定量分析氢气,C,及C,以下的烷 烃、烯烃和炔烃等组分。

等离子体裂解器如图2所示,等离子体放电形式 为棒-环电极间滑动弧放电。裂解器由氮气/煤油进 口段,有机玻璃管,裂解气/废液出口段组成。氮气经 直径 6mm 的不锈钢管道进入裂解器, 经整流器整流 以及旋流器(绝缘)旋转后进入等离子体裂解区域。 煤油经直径8mm的管道进入裂解器,并通过丹佛斯 雾化喷嘴喷入裂解区域,提供裂解的原料。两个长 100mm,外径 50mm 的有机玻璃管用于支撑裂解器, 同时便于观察实验现象。裂解器出口段用于裂解气 的收集以及废液的排出。裂解气通入气相色谱仪进 行检测之前,使用过滤器对裂解气进行过滤,防止裂 解气中液态组分对色谱仪造成污染。电源正极与不 锈钢供油管相连,由于进油段均为金属导电材料,因 此整个供油段均为高压电极。文丘里管接地,作为 放电的负极。电弧在雾化喷嘴和文丘里管之间形 成,并在氮气的吹动下进行滑动。



Fig. 2 Structure of plasma cracking reactor

纳秒脉冲电源注入滑动弧等离子体裂解器的平 均功率可由(1)式计算。

$$P = \int U(t)I(t)d(t) \times f \tag{1}$$

式中U(t)和I(t)分别代表t时刻负载两端的电压和电流,单位分别为V和A;f为脉冲重复频率,单位为Hz。

比输入能量(Specific input energy, SIE)表示注入 单位体积流量来流的能量(J/L),计算公式如下

$$SIE = \frac{60 \times P}{Q_{\star}} \tag{2}$$

式中 Q_v 为氮气的体积流量,单位为L/min。

3 实验结果与讨论

3.1 放电特性分析

上升沿时间和下降沿时间分别指电源输出脉冲 电压从0kV上升至峰值及从峰值下降为0kV的时长, 如图 3 所示。图中, τ, 指上升沿时间, τ, 指下降沿时间, τ, 指下降沿时间, τ, 指峰值电压维持时间, 即脉冲宽度。



Fig. 3 Schematic diagram of nanosecond pulse discharge voltage waveform

实验过程中,电源输出电压设置为18kV,脉冲重 复频率保持400Hz,脉宽为100ns。氮气和煤油的流 量分别为10L/min和25.5mL/min。负载两端的电压 电流波形随输出电压上升沿时间变化规律如图4 所示。



Fig. 4 Voltage-current waveforms in different rise time (fall time: 50ns)

如图 4 所示,在不同上升沿时间工况下,电流幅 值均超过 60A,且电流半最大全宽(FWHM)超过 200ns,说明放电进入大电流模式^[21]。此外,由电压电 流波形图可以看出,负载两端电压下降的同时,电流 快速上升并达到峰值,说明放电形式为滑动弧放电 的 Spark模式。由于在上升沿时刻,电极之间还击穿 形成电弧,负载两端电压可以维持在较高水平,因 此,随着上升沿时间的增长,负载电压的上升时间也 相应变长。

保持电源施加电压上升沿时间为50ns,改变下 降沿时间,负载两端电压电流波形变化规律如图5所 示。由于在下降沿时刻,电极间已形成电弧放电,负 载两端难以维持高电势差,故负载两端电压快速下降。由于下降沿时刻电极之间已经导通,延长下降沿时间会引起电源输出波形发生变化,形成较弱的 二次峰值电压。

由图4和图5可以看出,延长电压上升沿时间和 下降沿时间均会导致电流的增大,而电流的增大会 使外电路分压增加,因此负载两端电压降低。此外, 图4和图5中电流波形表明,虽然电源施加的是单极 纳秒脉冲电压,但却产生了具有正负极性的双极放 电电流。



Fig. 5 Voltage-current waveforms in different fall time (rise time: 50ns)

裂解器的比输入能量随着上升沿时间和下降沿 时间变化规律如图6所示。

上升沿时间和下降沿时间的延长均会导致电极 间电子流通时间的延长,导致放电平均功率增大。 随着电源输出电压上升沿时间由 50ns 延长至 250ns, 下降沿时间由 50ns 延长至 300ns,比输入能量分别上 升至 91.66J/L和 209.84J/L。图中数据说明,下降沿时 间对纳秒脉冲滑动弧放电平均功率的影响显著大于 上升沿时间。分析认为,上升沿阶段,电极间未形成 电弧放电,功率较小,故导通时间的变化对放电总功 率影响较小。下降沿阶段,电极间放电形式为电弧 放电,功率较大,导通时间改变导致放电总功率变化 较大。

3.2 裂解效果分析

本文采用裂解气产量(*Q*_{gas})、主要组分的选择性 (*S*)和裂解气碳氢比(*R*)^[22]作为衡量裂解效果的标 准,裂解气产量和裂解气主要组分选择性定义如下

$$Q_{\rm gas} = \sum \frac{\eta_{\rm CxHy}}{\eta_{\rm N_2}} \times Q_{\rm N_2} \tag{3}$$



Fig. 6 Change laws of SIE

$$S_{\rm H_2} = \frac{M_{\rm H_2}}{M_{\rm H \ atoms}} \times 100\%$$
$$S_{\rm CxHy} = \frac{M_{\rm CxHy}}{M_{\rm C \ atoms}} \times 100\%$$
(4)

$$S_{\rm co} = \frac{M_{\rm Co}}{M_{\rm C \ atoms}} \times 100\%$$
$$R = \frac{M_{\rm C \ atoms}}{M_{\rm U \ atoms}} \times 100\% \tag{5}$$

式(3)中,Q和 η 分别代表体积流量(L/min)和体积百 分比(%)。式(4)中,C_xH_y表示化学分子式中碳原子 数为x,氢原子数为y的烃类, M_{H_2} 代表氢气质量流量 (g/s), M_{CxHy} 代表 CxHy的质量流量(g/s), M_{Hatoms} 和 M_{Cat-} oms为裂解气中氢原子和碳原子质量流量(g/s)。裂解 气碳氢比(R)为裂解气中碳原子质量流量与氢原子 质量流量的比值。

3.2.1 裂解气产量和碳氢比变化规律

裂解气产量指裂解气各组分之和,宏观反应了 裂解气总流量的变化特征。同时,裂解气产量结合 各组分选择性可分析出裂解气中各组分产量的变化 规律。因此,研究裂解气产量是十分必要的。图7显 示了裂解气产量随上升沿时间和下降沿时间的变化 规律。由图7(a)可以看出,随着脉冲电压上升沿时 间的延长,裂解气的产量减少。研究表明,较短的上 升沿时间会使电子获得更高的初始能量并改变整个 等离子体系统中的能量分布^[23]。上升沿时间的增长 会导致等离子体热效应增强,裂解区域温度提高。 经测量,上升沿时间为250ns时裂解区域温度较上升 沿时间为50ns时提高约22K。因此,上升沿时间较小 时,虽然裂解器中比输入能量较小,却产生了更多的 高能电子去破坏烃类中的碳碳键和碳氢键,进而形 成更多的小分子烃类和氢气。图7(b)显示,下降沿 时间的增长导致了电弧放电的时间延长,增大了比 输入能量,产生了更多的高能电子进行煤油的裂解。 因此,随着下降沿时间的增长,更多的大分子烃裂解 为气态轻烃和氢气。





碳氢比是评价燃油质量的一个重要参数。碳氢 比越低意味着燃料中的氢含量越高,能量效率和燃 烧速度越高,越清洁。随着上升沿时间和下降沿时 间的延长,裂解气碳氢比变化规律如图8所示。

上升沿时间由 50ns 延长至 250ns,裂解气中碳氢 比由 4.99上升至 5.25。分析认为,上升沿时间的增加 导致的高能电子密度减少,抑制了乙基、丙基等基团 的产生,导致裂解气中碳氢比较小的分子如乙烷、乙



Fig. 8 Change rules of C/H ratio in cracking gas

烯等物质体积百分比浓度下降,进而导致碳氢比上 升。下降沿时间的增长,产生更多的高能电子,更多 的β-碳碳键和γ-碳碳键断裂形成乙基和丙基。同时 高能电子数量的增加促进了更多的碳氢键断裂,产 生氢原子。因此,随着下降沿时间由 50ns 延长至 300ns,碳氢比由 4.99下降至 4.63。

3.2.2 裂解气主要组分选择性变化规律

选择性表征了碳原子或氢原子在裂解气中的存 在形式。C_xH_y(H₂)选择性越高,表明裂解气中更多的 碳原子(氢原子)存在于C_xH_y(H₂),选择性是从微观 上理解裂解过程以及裂解气组分分布的重要参数。 图9显示了裂解气主要组分的选择性随上升沿时间的 变化情况。由图9(a)可以看出,在裂解气的主要组分 中,C₂(包括乙烷、乙烯、乙炔)的选择性高于C₃(包括丙 烷、丙烯),其中乙烷的选择性最高,达到了30%。由 化学键能数据手册可知^[24],大分子烃类(如正癸烷) 中,β-碳碳键的键能小于γ-碳碳键。因此,在高能粒 子的撞击下,β-碳碳键更容易断裂,形成乙基。在等 离子体作用下,乙基能够进行脱氢反应生成乙烯(吸 热),也能够进行加氢反应生成乙烷(放热)。由于实 验在室温下进行,温度较低,因此乙基更倾向于生成 乙烷。图9(a)中数据显示,随着上升沿时间的延长, C₃(丙烷和丙烯)的选择性下降,乙烷和乙烯的选择性 基本不变,乙炔的选择性快速上升。分析认为,上升 沿时间的延长导致高能电子密度的降低。查阅化学 键能数据手册^[24]可知,大分子烃类中γ-碳碳键键能 相对于 β -碳碳键键能较高,高能电子密度的降低主 要抑制了γ-碳碳键的断裂,丙基减少,进而导致裂解 气中C₃选择性下降。由于 β -碳碳键键能相对较低, 高能电子密度的降低对乙基的生成影响较小,故乙 烷和乙烯的选择性基本不变。值得注意的是,随着 上升沿时间由 50ns 延长至 250ns,乙炔选择性由 11.83%上升至22.47%。原因分析如下,由于温度的 升高有利于乙炔的生成^[22],而上升沿时间的延长会 导致裂解区域温度提高,因此乙炔的选择性上升。

氢气的热值达1.4×10⁸J/kg,高于所有化石燃料, 并且极易燃烧。因此,氢气的存在对扩展点熄火边 界十分有利。由图9(b)可以看出,随着上升沿时间 的延长,氢气的选择性由9.50%上升至9.75%。乙烷 和乙烯脱氢生成乙炔过程中会产生大量氢原子,氢 原子会进行结合形成氢分子。随着上升沿时间的延 长,乙炔选择性上升,更多的氢原子会由乙烷和乙烯 转移至氢气,进而导致氢气选择性上升。



Fig. 9 Variation trend of the selectivity of key components with rise time

裂解气主要组分选择性随下降沿时间变化规律 如图10所示。由图10(a)可以看出,随着下降沿时间 的增长,C,的选择性略有上升,而C,的选择性快速下 降。分析认为,下降沿时刻,电极间的放电为电弧放 电,产生的电子普遍能量较高。随着下降沿时间的 延长,高能电子数量增加,更多的β-碳碳键和γ-碳碳 键以及碳氢键被破坏形成C,,C,和氢原子。然而,裂 解产生的C。在等离子体作用下,碳碳键会再次被破 坏形成乙基,进而形成C,分子。随着下降沿时间的 延长,电极间导通时间增长,C,分子更易被二次裂解, 丙烷和丙烯的选择性下降。同时,更多的高能电子 也会导致煤油分子以及乙烷中的碳氢键断裂增多, 产生更多的氢原子,进而产生更多的氢气,导致氢气 选择性快速上升。如图10(b)所示,随着脉冲电压下 降沿时间由 50ns 延长至 300ns, 氢气的选择性由 9.50% 上升至 18.01%。



Fig. 10 Variation trend of the selectivity of key components with fall time

此外,由图10(b)可以看出,随着下降沿时间的 增长,裂解气组分种类增加,在下降沿时间为250ns 时裂解气中出现CO,在下降沿时间为300ns时出现 甲烷。分析认为,随着比输入能量的增加,部分碳原 子会发生氧化反应生成 CO。氧原子的来源,分析认 为有两种可能,一是煤油分子中携带的氧原子,二是 实验环境中残余的氧原子。下降沿时间较短时,输 入能量不足以使碳原子与氧原子发生氧化反应,故 无 CO生成。同时,由于α-碳碳键键能较高,当下降 沿时间较短时,等离子体输入能量基本用于β-和γ-碳碳键的断裂,当下降沿时间较长时,更多的高能电 子会使α-碳碳键断裂,形成甲基,部分甲基与氢原子 结合生成甲烷分子。宋飞龙等^[25]利用微秒脉冲电源 在氦气环境中进行等离子体裂解正癸烷实验时,裂 解产物中并未出现甲烷。宋飞龙的实验中比能量输 入均小于 150J/L,因此未产生甲基与氢原子结合形成 甲烷。

根据实验得到的裂解气组分种类及变化规律, 可以将煤油裂解的部分路径归纳如图11所示。



Fig. 11 Part reaction paths of plasma cracking kerosene

图 11 中,黑线表示碳碳键的断裂,红线代表碳氢 键的断裂,蓝线为加氢反应。煤油在等离子体作用 下碳碳键和碳氢键断裂形成甲基、乙基、丙基以及氢 原子。初步裂解产生的乙基和丙基会在等离子体作 用下与氢原子结合,产生烷烃或失去氢原子,形成烯 烃或炔烃。丙基和C₃烃在等离子体作用下会再次裂 解产生乙基和甲基。上升沿时间的增加主要抑制了 路径②,③的进行,同时促进了路径⑥,⑦的进行,故 裂解产物中C₃产物含量减少,乙炔含量增加。下降 沿时间的增加同时促进了路径①,②,③,⑤,⑥,⑦, 且对路径③的促进作用比路径①,②更显著。因此, 裂解气中C₂选择性有所增加,C₃选择性有所降低。

4 结 论

本文首次利用纳秒脉冲放电在室温大气压氮气 环境下产生的滑动弧等离子体对航空煤油进行裂 解,得到的主要结论如下:

(1)随着上升沿时间的延长,尽管比输入能量增

加,但裂解气产量减小。比输入能量和裂解气产量 均随着下降沿时间的延长而增大;

(2)上升沿时间的增长导致裂解气碳氢比上升。 而下降沿时间的延长促进了β-碳碳键和γ-碳碳键以 及碳氢键的断裂,形成更多碳氢比较小的燃料分子, 因此碳氢比下降;

(3)裂解气主要组分中,乙烷的选择性最高,实验工况下均超过30%,C₂(乙烷、乙烯、乙炔)的选择性高于C₃(丙烷、丙烯)。随着上升沿时间和下降沿时间的延长,C₃的选择性均降低,氢气的选择性上升;

(4)上升沿时间和下降沿时间的变化对裂解效 果产生影响的主要原因是改变了反应路径。

实验结果表明,煤油经过纳秒脉冲滑动弧等离子体处理后,部分大分子烃转化为轻烃和氢气等活性组分。在应用过程中,可通过增加纳秒脉冲电压,延长下降沿时间以及缩短上升沿时间,改善滑动弧等离子体的裂解效果,获得更多活性更高的小分子物质。

由于实验设备以及实验条件有限,仍存在一些 问题未得到解决。纳秒脉冲放电时间尺度为纳秒级 别,而目前实验室的高速相机最短曝光时间为1μs, 难以捕捉到电弧发展过程。电子密度及电子温度的 变化规律有待进一步明确,后续将采用光谱测量进 行相关研究。气相色谱仪仅能检测到C₃及以下的烃 类物质,为更好地理解煤油裂解路径,需要采用相关 手段对C₄以上烃类以及氮气与煤油反应物进行进一 步检测。

致 谢:感谢国家自然科学基金重大项目的资助。

参考文献

- [1] 李秀强,李建来,张建平.影响3号喷气燃料质量的
 因素及对策[J].兰州石化职业技术学院学报,2006,
 6(4):1-3.
- [2] 谭若樵,杨晓奕,甘志文.长直链烷烃对航空煤油理 化及雾化性能影响[J].科学技术与工程,2016,16
 (4):33-40.
- [3] 郭 进.航空煤油表面火焰脉动及表面流特性研究
 [D].合肥:中国科学技术大学,2012.
- [4] 刘明夏,谈宁馨,王静波.航空煤油裂解产物燃烧机 理构建与动力学模拟[J].化学研究与应用,2019,31
 (2):104-108.
- [5] ZENG Mei-rong, YUAN Wen-hao, WANG Yi-zun, et al. Experimental and Kinetic Modeling Study of Pyrolysis and Oxidation of n-Decane [J]. Combustion and Flame,

2014, 161(7): 1701-1705.

- [6] Cheekatamarla P K, Lane A M. Catalytic Autothermal Reforming of Diesel Fuel for Hydrogen Generation in Fuel Cells[J]. Journal of Power Sources, 2006, 154(1): 223-231
- [7] Taghvaei H, Shirazi M, Hooshmand N, et al. Experimental Investigation of Hydrogen Production Through Heavy Naphtha Cracking in Pulsed DBD Reactor[J]. Applied Energy, 2012, 98: 3-10
- [8] Mutaf-Yardimci, Ozlem, Saveliev A V. Thermal and Nonthermal Regimes of Gliding Arc Discharge in Air Flow
 [J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(4): 1632– 1641.
- [9] Korolev Yury D, Frants O B, Landl N V, et al. Glowto-Spark Transitions in a Plasma System for Ignition and Combustion Control [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2007, 35(6): 1651-1657.
- [10] 张 浩,朱凤森,李晓东,等.滑动弧放电等离子体 重整甲烷关键技术分析[J].高电压技术,2015,41
 (9):2930-2942.
- [11] Bromberg L, Cohn D R, Rabinovich A. Plasma Catalytic Reforming of Methane [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1999, 24(12): 1131-1137.
- [12] Rusu I, Cormier J-M. On a Possible Mechanism of the Methane Steam Reforming in a Gliding Arc Reactor [J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 91(1).
- [13] Park S H, Park D W. Conversion of Methane to Hydrogen and Carbon Black by D.C. Plasma Jet[J]. Studies in Surface Science & Catalysis, 2006, 159(6): 421-424.
- [14] Prieto G, Okumoto M, Shimano K, et al. Reforming of Heavy Oil Using Nonthermal Plasma[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(5): 1464-1467.
- [15] Piavis William, Turn Scott, Ali Mousavi S M. Non-thermal Gliding-Arc Plasma Reforming of Dodecane and Hydroprocessed Renewable Diesel [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(39): 13295-13305.
- [16] 于吉超.低温等离子体汽油重整及对汽油机稀薄燃烧 影响的研究[D].天津:天津大学,2007.
- [17] 刘潇钰. 滑动弧等离子体催化甲烷水蒸汽重整制氢研 究[D]. 大连:大连理工大学, 2019.
- Burlica R, Kirkpatrick M J, Locke B R. Formation of Reactive Species in Gliding Arc Discharges with Liquid Water[J]. Journal of Electrostatics, 2006, 64(1): 35-43.
- [19] GAO Yuan, ZHANG Shuai, SUN Hao, et al. Highly Efficient Conversion of Methane Using Microsecond and

Nanosecond Pulsed Spark Discharges [J]. Applied Energy, 2018, 226: 534-545.

- [20] Scapinello M, Martini L M, Dilecce G, et al. Conversion of CH₄/CO₂ by a Nanosecond Repetitively Pulsed Discharge[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(7).
- [21] ZHANG Cheng, SHAO Tao, YAN Ping, et al. Nanosecond-Pulse Gliding Discharges Between Point-to-Point Electrodes in Open Air[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2014, 23(3).
- [22] SONG Fei-long, WU Yun, XV Shi-da, et al. Effects of Refueling Position and Residence Time on Pre-Combus-

tion Cracking Characteristic of Aviation Kerosene RP-3 [J]. Fuel, 2020, 270(15).

- [23] WANG Xiao-ling, GAO Yuan, ZHANG Shuai, et al. Nanosecond Pulsed Plasma Assisted Dry Reforming of CH₄: The Effect of Plasma Operating Parameters[J]. Applied Energy, 2019, 243: 132-144
- [24] 罗渝然. 化学键能数据手册[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [25] SONG Fei-long, WU Yun, XV Shi-da, et al. N-Decane Reforming by Gliding Arc Plasma in Air and Nitrogen
 [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2020, 40(5).

(编辑:张 贺)