

高温费托合成油加工工艺中大分子含氧化合物的鉴定

陈俊阳^{1#}, 胡智中^{2*#}, 何诗萍², 杨万预², 汪洋², 李运运¹, 张亚和^{1*}, 史权¹

(1. 中国石油大学(北京) 重质油全国重点实验室 分子工程中心, 北京 102249; 2. 中海油天津化工研究设计院有限公司, 天津 300131)

摘要: 在高温费托合成油分离工艺中, 于费托合成油和癸醇/十二烷混合体系中检出了大分子量的含氧化合物, 其生成与所用催化剂及费托合成油中的醇、醛类化合物密切相关。采用气相色谱-质谱(GC-MS)与正离子电喷雾电离轨道阱高分辨质谱(ESI(+)-Orbitrap MS), 鉴定出该类化合物为解吸剂中醛与醇发生缩合反应生成的缩醛产物(分子通式为 $C_xH_{2x+2}O_2$)。通过电子轰击(EI)质谱确定了这些缩醛类化合物具有 m/z 141、327等特征离子, 可佐证其与前驱体醛的对应关系, 碳数分布与原料费托合成油相近。该研究为合成油精制工艺开发与过程优化提供了理论指导。

关键词: 费托合成油; 缩醛反应; 气相色谱-质谱; 高分辨质谱

中图分类号: O657.7; O657.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(XXXX)XX-0001-07

Identification of Large-molecular Oxygenates in High Temperature Fischer-Tropsch Synthetic Oil Processing

CHEN Jun-yang^{1#}, HU Zhi-zhong^{2*#}, HE Shi-ping², YANG Wan-yu², WANG Yang², LI Yun-yun¹, ZHANG Ya-he¹, SHI Quan¹

(1. Petroleum Molecular Engineering Center (PMEC), State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. CNOOC Tianjin Chemical Research and Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300131, China)

Abstract: High-molecular-weight oxygen-containing compounds were detected in the Fischer-Tropsch synthetic oil-decanol/dodecane mixture during processing, and their generation is closely related to the catalyst used as well as the alcohols and aldehydes present in the high temperature Fischer-Tropsch synthetic oil. By using the combined technology of gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and positive ion electrospray ionization Orbitrap high-resolution mass spectrometry (ESI(+)-Orbitrap MS), these compounds were identified as acetals formed via the condensation reaction between aldehydes and alcohols in the desorbent, while their characteristic ion is m/z 141 and m/z 327 and the general molecular formula is $C_xH_{2x+2}O_2$. The EI mass spectral characteristics of the acetals confirm their correlation with the precursor aldehydes, and their carbon number distribution is comparable to that of the raw Fischer-Tropsch synthetic oil. This study provides theoretical guidance for the development and process optimization of synthetic oil refining.

Key words: Fischer-Tropsch oil; acetal formation; GC-MS; high-resolution mass spectrometry

费托合成(Fischer-Tropsch synthesis, F-T)是煤间接制油的关键技术。F-T产物通常不含硫和氮等杂原子^[1], 主要由正构烷烃、 α -烯烃及各类含氧化合物组成, 加工过程中一般不生成芳烃^[2-3]。费托合成油主要碳数分布为 C_5 ~ C_{22} , 其中长链 α -烯烃是重要的高附加值产品, 可作为乙烯共聚单体及聚合物合成原料^[4-7]。按操作温度, 费托合成分为高温和低温工艺^[8-11]: 高温工艺的烯烃产率约56%, 含

收稿日期: 2026-04-17; 修回日期: 2026-05-15

* 通讯作者: 胡智中, 硕士, 工程师, 研究方向: 吸附分离、总流程优化, E-mail: huzhzh4@cnooc.com.cn;
张亚和, 博士, 高级工程师, 研究方向: 石油化学、质谱分析, E-mail: zhangyh@cup.edu.cn
共同第一作者

氧化合物约 10%，芳烃约 6%^[12]，其中 α -烯烃具有较高的经济价值，但高温费托合成产物中同时含有醇、醛等反应活性较强的含氧化合物^[13-14]。在下游加工过程中，含氧化合物会影响 α -烯烃聚合工艺、毒化精制催化剂；醇、醛不仅易与催化剂作用，还可能与高价值烯烃或自身发生副反应，因此费托合成油的精制过程中需重点关注活性含氧化合物的脱除，及其与各类催化剂、吸附剂的相互作用^[13-15]。

吸附分离是费托合成油制备高附加值 α -烯烃产品的重要工艺。美国环球油品 (UOP) 公司开发的 Detergent-Olex 工艺可实现烷烃与内烯烃的高效分离，对费托合成油中烷烃- α -烯烃分离具有重要参考价值^[16]。在该吸附工艺中，针对 C_{10} ~ C_{16} 烯烃-烷烃体系，采用 1-己烯和正己烷作为解吸剂。对于费托合成油中的小分子烷烃-烯烃混合物，可选用碳数更高的烯烃/烷烃混合物作为解吸剂。在 C_5 ~ C_9 费托合成油氧化物吸附分离过程中，解吸剂十二烷/癸醇循环过程中出现大分子含氧化合物，影响分离性能及吸附剂活性。为明确该类化合物的分子结构与生成来源，本研究采用气相色谱-质谱 (GC-MS) 与轨道阱高分辨质谱 (Orbitrap MS) 对其进行系统表征与结构解析，研究结果可为含活性含氧化合物的费托合成油加工与高效利用提供理论支撑。

1 实验部分

1.1 样品与材料

费托合成油 (吸附工艺进料, Absorb process feed)、新鲜解吸剂 (Fresh desorb reagent)、循环解吸剂 (癸醇/十二烷混合物) (Recycled desorb reagent) 取自天津中海油某研究院，实验所用费托合成油来自高温费托合成工艺，碳数分布为 C_5 ~ C_9 ，含有一定含氧化合物与高含量 α -烯烃。循环解吸剂为模拟移动床吸附分离过程中，新鲜解吸剂与费托合成油的混合物精馏分离得到的循环物料。

甲苯与甲醇 (分析纯) 购自北京化学试剂公司，使用前采用 B/R 9600 型旋转蒸馏仪 (美国 B/R Instruments) 进行精馏纯化。

1.2 GC-MS 分析

采用美国 Bruker 公司 Bruker Scion TQ 气相色谱-质谱联用仪进行分析，色谱柱为 HP-5MS (30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m, Agilent 公司)；升温程序：50 $^{\circ}$ C 保持 4 min，以 20 $^{\circ}$ C/min 升至 170 $^{\circ}$ C，再以 10 $^{\circ}$ C/min 升至 300 $^{\circ}$ C。电离方式为电子轰击电离 (EI)，电离能量 70 eV，离子源温度 230 $^{\circ}$ C；质谱扫描范围 m/z 35~500，扫描速度 0.6 s。载气为高纯氦气，流速 1 mL/min；进样量 1 μ L，采用不分流进样模式。

1.3 高分辨质谱分析

采用配备电喷雾电离源 (ESI) 的 Orbitrap Fusion MS (Thermo Scientific, 美国) 测定含氧化合物的分子量与结构组成。样品以甲苯/甲醇 (1:1, 体积比) 稀释至 200 mg/L；离子传输管温度 300 $^{\circ}$ C，质量扫描范围 m/z 50~600，自动增益控制 (AGC) 5.0×10^5 ，最大离子累积时间 100 ms；自动进样流速 5 μ L/min。分别采用正、负离子模式检测，喷雾电压 3.6 kV；鞘气、辅助气、雾化气流速分别为 5、2、0.1 Arb。采用碰撞诱导解离 (CID) 模式对目标峰进行裂解分析，隔离窗口 0.1 Da，碰撞诱导解离能量 30%。

2 结果与讨论

2.1 费托合成油组成与大分子化合物的发现

费托合成油主要组成为 C_5 ~ C_9 的烷烃与烯烃，同时含有少量醇、醛类含氧化合物；实验所用解吸剂为癸醇和十二烷混合物。上述两类物料与吸附剂交替接触，解吸剂与吸附剂接触后富含小分子烯烃类化合物，通过精馏可将烯烃和解吸剂分离，分离后的解吸剂可循环至下一周期使用。

图 1 为费托合成油进料、新鲜解吸剂及循环解吸剂的 GC-MS 总离子流图 (TIC)。结果显示，费托合成油进料和新鲜循环解吸剂均未检出沸点高于癸醇的组分，但在运行一段时间后，循环解吸剂中出现高沸点组分 (保留时间大于 11 min)。这些化合物的总相对峰面积为 4.02%。但癸醇和十二烷的峰处于过载状态，因此这些大分子化合物的实际含量应远低于该值。目标物的分子离子峰强度极弱，无法获取精确分子量与元素组成；无匹配 NIST 标准谱，无法直接定性。显然这些化合物是体系内物料间发生反应生成，并随运行时间累积于精馏塔釜与循环解吸剂中，但其具体来源无法直接判定。

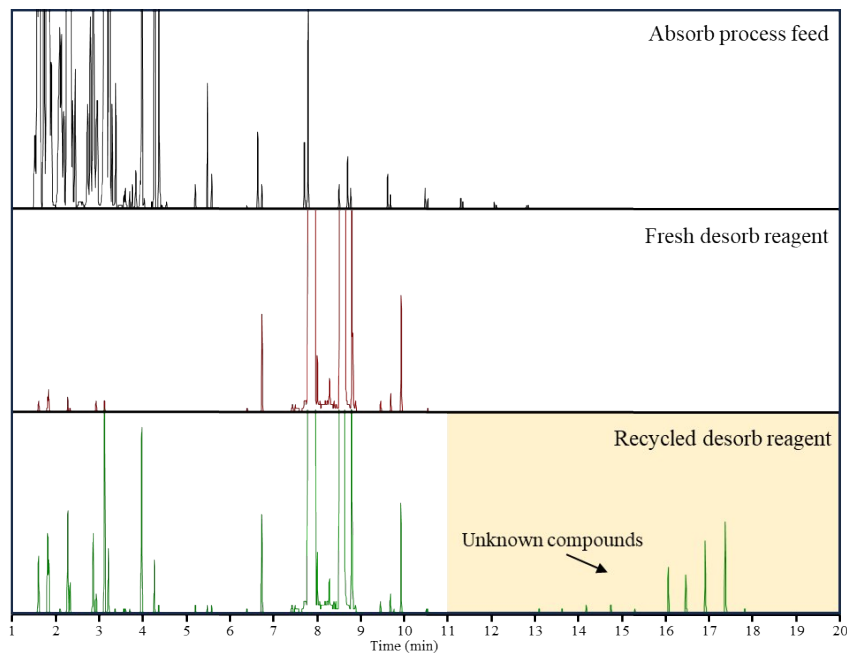


图1 费托合成油、新鲜解吸剂和循环解吸剂的GC-MS总离子流图

Fig. 1 GC-MS total ion chromatograms of absorb process feed, fresh desorb reagent, and recycled desorb reagent

2.2 大分子含氧化合物分子量的确定

循环解吸剂中生成的高沸点化合物为微量同分异构体混合物，GC-MS虽可实现色谱分离，但无法直接定性。因此仅靠GC-MS无法完成结构鉴定。ESI (+) Orbitrap MS具备高分辨精确质量测定、软电离、CID裂解优势，可精准给出分子式、不饱和度与裂解碎片信息，弥补GC-MS分子量与元素组成缺失的短板。二者为互补关系：GC-MS负责分离与碎片特征佐证，Orbitrap MS负责分子量、元素组成与骨架结构确证，协同完成未知物定性。高分辨质谱结合软电离是复杂混合物分子量精准表征的有力工具，已广泛应用于石油组学与天然有机物分析^[17-19]。软电离可在保留分子骨架的前提下实现电离，高分辨质谱可给出精确质量，从而计算元素组成^[20]。含活性氢的含氧化合物（羧酸、醇）在ESI (-)下易形成 $[M-H]^-$ ^[21-22]。非极性化合物可采用APCI电离。但不同的电离溶剂和辅助气体会产生不同的电离产物。如使用异辛烷和氮气可将非极性烷烃电离为 $[M-H]^+$ ，而使用氧气则可产生 $[M-H+O]^+$ ^[23-24]。含羰基、醚键的弱极性含氧化合物在ESI (+)下易与 Na^+ 结合，形成 $[M+Na]^+$ ^[25-26]。本文采用ESI (+) Orbitrap MS对大分子含氧化合物进行分子量精准测定，并结合CID技术进行结构解析。

图2为循环解吸剂的GC-MS TIC与ESI (+) Orbitrap MS谱图。色谱图截取正十二烷与癸醇之后的保留时间区间，对应体系中的高沸点组分。由于GC-MS中分子离子峰强度极弱，甚至无法观察到分子离子峰，难以直接确定其精确分子量，因此采用高分辨率Orbitrap MS对该组分进行分析。ESI电离源属于软电离源，适用于含有极性官能团的化合物电离并得到准分子离子峰，可以辅助判断分子量和分子式信息。在ESI (+)模式下，谱图中出现一系列以 $\Delta m/z=14.0156$ 为间隔的特征峰，其分子式通式为 $[C_xH_{2x+2}O_2+Na]^+$ ($x=16\sim 27$)。所有峰均含2个氧原子，且在ESI (-)模式下无响应，表明分子中不含活性氢。上述化合物的相对丰度分布与GC-MS结果基本一致，且仅能在ESI (+)模式下与 Na^+ 形成加和离子，进一步说明分子中含氧官能团并非羟基或羧基，而以羰基或醚键形式存在。结合通式 $[C_xH_{2x+2}O_2+Na]^+$ 可知，该类化合物为饱和结构，不含双键或环，因此其含氧基团只能为醚键。

采用CID技术对ESI Orbitrap MS得到的母离子进行裂解，并通过子离子信息推导分子结构。图3为碳数 $C_{16}\sim C_{22}$ 含氧化合物的CID裂解谱图。由于 Na^+ 在电离过程中与含氧化合物结合较弱，因此CID过程采用较低的裂解能量。裂解后生成两组特征子离子系列。高分辨Orbitrap MS可提供精确的元素组成信息，但无法区分同分异构体，表明母离子并非单一化合物，而是多种异构体的混合物。得益于Orbitrap MS的高分辨能力，CID裂解谱图可准确指认各碎片离子的元素组成。 $C_{16}\sim C_{22}$ 分子在裂解过程中产生多种特征碎片，且多个母离子均能裂解生成 C_{11} 含氧碎片。费托合成油中主要为 $C_5\sim C_9$ 烷烃与烯

烃, 解吸剂组分为癸醇与十二烷, 与 C_{11} 含氧碎片直接相关的组分仅为癸醇。该结果说明, 大分子含氧化合物可能由癸醇与费托合成油中的活性含氧化合物发生反应生成。

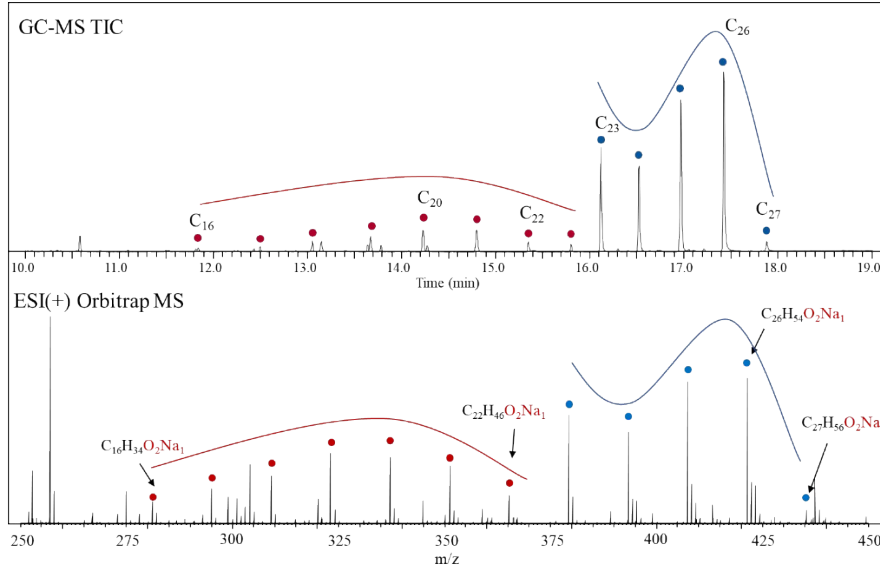


图2 循环解吸剂GC-MS总离子流图与ESI (+) Orbitrap MS谱图

Fig. 2 GC-MS total ion chromatogram and ESI (+) Orbitrap mass spectrum of recycled desorbent

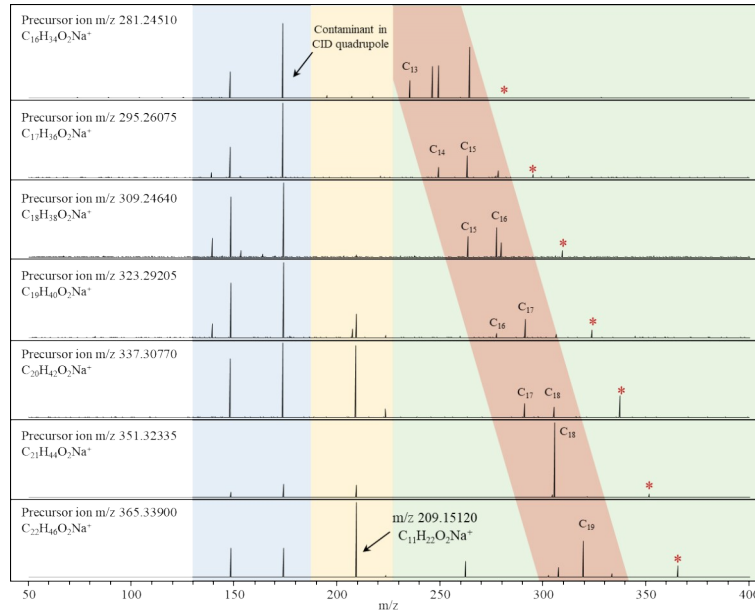


图3 不同含氧化合物母离子通过CID碎裂得到的子离子质谱图

Fig. 3 CID mass spectra of different precursor ion in circulating desorbent using ESI (+) Orbitrap MS precursor ion is labeled by star

2.3 大分子含氧化合物结构的确定

Orbitrap MS 已提供目标化合物的精确分子量与元素组成信息, 为进一步明确其分子结构, 需借助 GC-MS 实现异构体分离, 并通过 EI 质谱解析碎片离子以推导完整结构。GC-MS 碎片特征 (图 4) 表明, 所有目标化合物均出现 m/z 141 ($C_{10}H_{21}$) 特征碎片, 证实解吸剂中的癸醇参与了大分子杂质的生成。以保留时间 13.78 min 的化合物 A10-3-6 为例, 除 m/z 141 外, 还可观测到 m/z 199 与 m/z 271 特征峰; 保留时间 11~16 min 的化合物呈现 m/z $199+n \times 14$ 与 m/z $229+n \times 14$ 正交碎片分布, 表明分子由 3 个链段组成: 癸醇衍生的 C_{10} 侧链、碳数为 $C_3 \sim C_7$ 的侧链 [A], 以及碳数为 $C_3 \sim C_6$ 的侧链 [B]。

通过提取 m/z $229+n \times 14$ 系列离子的选择离子色谱图可知, 尽管各化合物的碳数不同, 但其丰度分布高度相似。同时, 各选择离子色谱峰均伴随 m/z $199+n \times 14$ 特征碎片, 说明此类含氧化合物的生成至

少涉及两组独立的化合物系列。此外，所有组分均存在 m/z 141 这一 C_{10} 特征碎片，进一步证实分子由 3 条侧链构成。结合 ESI-Orbitrap MS 结果，该类化合物不饱和度 $DBE=0$ ，不含双键与环结构，表明所有碎片离子均为直链结构。据此可确定：

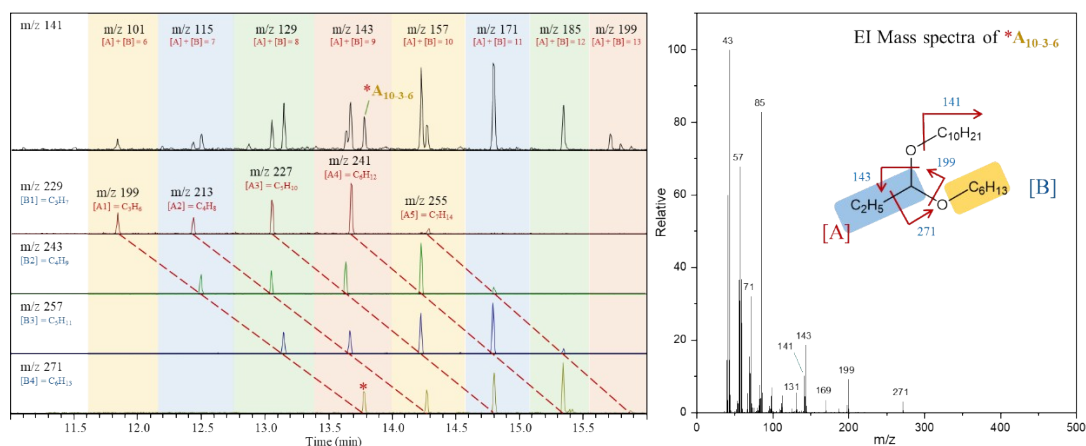


图4 高沸点化合物的特征离子分布 (A) 及化合物 A10-3-6 的 EI 质谱图 (B)

Fig. 4 Fragment distribution of target compounds (A) and example EI mass spectra of acetal A10-3-6 (B)

A B

m/z 229+ n ×14 系列碎片对应分子式为 $C_xH_{2x+1}O_2$ ($x=14\sim17$)； m/z 199+ n ×14 系列碎片对应分子式为 $C_xH_{2x+1}O_1$ ($x=13\sim17$)。

图5展示了保留时间大于 15.5 min 的含氧化合物的特征碎片、选择离子色谱图及结构鉴定结果。该类化合物在 m/z 141 与 m/z 327 处呈现共同特征碎片。其中， m/z 141 为 C_{10} 烷基特征碎片，对应癸醇烷基链； m/z 327 对应 $C_{21}H_{43}O_2$ 结构片段。结合 C_{10} 侧链与氧原子均来源于癸醇可推断，此类化合物由 2 分子癸醇与 1 分子费托油小分子化合物缩合而成，且 2 个癸醇单元连接于同一碳原子上。此外，该类化合物同样可产生 m/z 199+ n ×14 系列碎片，对应分子式为 $C_xH_{2x+1}O_1$ ($x=13\sim17$)，该碎片仅含 1 个氧原子，表明并非来自癸醇，而是源于费托油中的小分子化合物，对应侧链 [A] 的碳数范围为 $C_3\sim C_7$ 。 $C_{16}\sim C_{22}$ 含氧化合物呈现相似的碎片分布规律， m/z 101+ n ×14 系列碎片对应 $C_xH_{2x+1}O_1$ ($x=6\sim13$)，表明另一类侧链 [B] 的碳数范围为 $C_3\sim C_6$ 。该结果也印证了 m/z 229+ n ×14 系列碎片 ($x=14\sim17$) 的合理性，即侧链 [B] 与癸醇共同连接在同一个碳原子上。

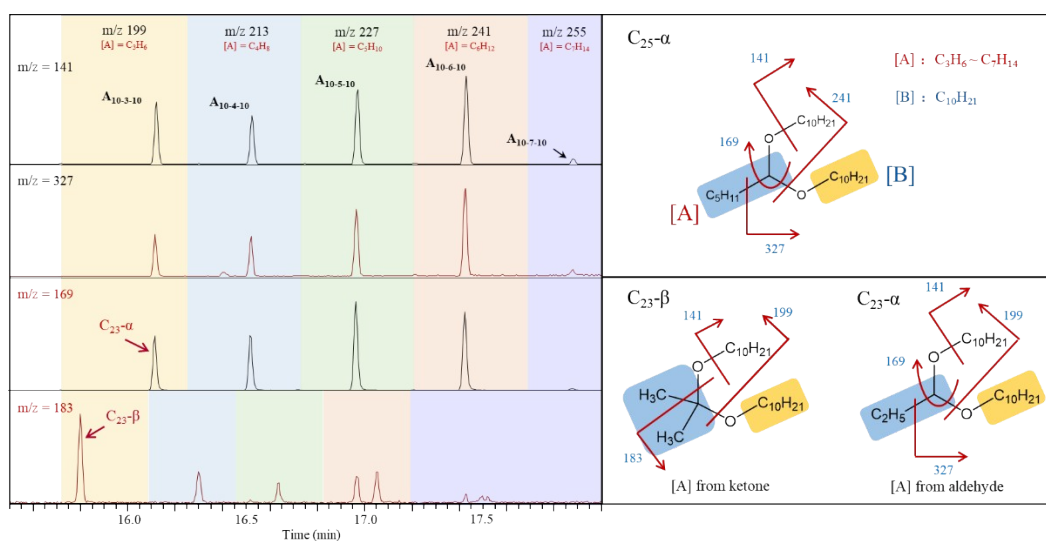


图5 保留时间大于 15.5 min 的缩醛类化合物的色谱图 (A) 及碎裂机理 (B)

Fig. 5 Gas chromatograms (A) and proposed fragmentation mechanism (B) of acetals with

A Retention time after 15.5 min

费托合成油中含有烯烃、醇、醛、酮等低分子活性组分。其中, 烯烃与醇仅能与一分子癸醇发生反应, 而醛、酮可与两分子醇发生缩醛反应, 生成含有两个氧原子的醚类结构(分子通式为 $C_xH_{2x+2}O_2$)。将所得质谱与NIST标准谱库比对后发现, 目标化合物的裂解规律与典型缩醛类化合物高度吻合。此外, C_{23} 组分在色谱上出现两个分离峰, 分别对应不同特征碎片: 一个峰伴随 m/z 169特征碎片, 另一个峰伴随 m/z 183特征碎片, 分别记为 $C_{23-\alpha}$ 与 $C_{23-\beta}$, 表明二者分别源自醛与酮。

缩醛的生成通常需要酸性与无水环境, 而本研究所用吸附剂含酸性氧化铝位点, 可提供酸催化环境, 进一步佐证了缩醛源于癸醇与费托油中醛/酮在酸性位点催化下发生缩合反应的推论。此外, 通过原料油模拟验证实验, 在解吸剂体系中检测到过量的、未完全反应的 C_4 、 C_5 醛类, 并进一步采用醛类标准样品开展模拟缩合实验, 证实了醛与醇生成缩醛的反应机理, 为原料中醛类的存在及转化路径提供了直接实验证据。本研究吸附分离工艺的进料经蒸馏切割, 碳数控制在 C_9 以内(图1中 C_9 以上烷烃、烯烃峰为色谱纵向放大所致, 实际含量极低)。其中正壬烷(C_9)沸点为 151°C , 庚醛(C_7)沸点为 153°C , 己醛(C_6)沸点为 127.9°C 。由此可知, 经蒸馏切割后, 沸点高于正壬烷的组分绝大部分无法进入进料体系。这一沸点规律恰好说明: C_6 醛可被完全分离至目标馏分中, 而 C_7 醛因沸点略高于 C_9 烷烃, 受蒸馏分离效率限制, 仅有极少量进入进料。上述分布与本研究测得的缩醛侧链[A]以 $C_3\sim C_6$ 为主、 C_7 组分含量极低的结果一致, 进一步印证了大分子含氧化合物的来源与生成机理。

3 结论

在高温费托合成油吸附分离中试装置的循环解吸剂中, 检测到高沸点含氧化合物。通过GC-MS和Orbitrap MS联用, 系统解析了该类化合物的元素组成与EI质谱碎裂特征, 明确其结构为缩醛类化合物(分子通式为 $C_xH_{2x+2}O_2$)。上述缩醛由费托合成油中的小分子醛、醇与解吸剂中的癸醇, 在吸附剂表面发生缩醛反应生成。该结果表明, 在费托合成油精制与分离工艺中, 应高度关注体系内醛、醇等活性含氧化合物的影响。含活性含氧化合物的费托合成油应避免与分子筛等具有酸性位点的催化剂或吸附剂直接接触, 以抑制高沸点缩醛类副产物的生成, 保障装置长周期稳定运行。

参考文献:

- [1] Steynberg A, Dry M. *Studies in Surface Science and Catalysis*. Amsterdam: Elsevier, **2004**: 1-63.
- [2] Seomoon K. *J. Ind. Eng. Chem.*, **2013**, 19 (6): 2108-2114.
- [3] Zaikin V G, Borisov R S. *J. Anal. Chem.*, **2002**, 57 (6): 544-551.
- [4] Choo T N, Waymouth R M. *J. Am. Chem. Soc.*, **2002**, 124 (16): 4188-4189.
- [5] Mehdiabadi S, Soares J B P. *Macromolecules*, **2011**, 44 (20): 7926-7939.
- [6] Terao H, Iwashita A, Matsukawa N, Ishii S, Mitani M, Tanaka H, Nakano T, Fujita T. *ACS Catal.*, **2011**, 1 (4): 254-265.
- [7] Zhang W, Wei J, Sita L R. *Macromolecules*, **2008**, 41 (21): 7829-7833.
- [8] Higman C, Tam S. *Chem. Rev.*, **2014**, 114 (3): 1673-1708.
- [9] Saeidi S, Nikoo M K, Mirvakili A, Bahrani S, Amin N A S, Rahimpour M R. *Rev. Chem. Eng.*, **2015**, 31 (3): 209-238.
- [10] Wang T F, Wang J F, Jin Y. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2007**, 46 (18): 5824-5847.
- [11] Wu Y, Feng J, Li W. *Chem. Eng. Res. Des.*, **2018**, 131: 80-91.
- [12] Leckel D. *Energy & Fuels*, **2009**, 23 (5): 2342-2358.
- [13] Mao W Y, Sun Q W, Ying W Y, Fang D Y. *J. Fuel Chem. Technol.* (毛菀钰, 孙启文, 应卫勇, 房鼎业. 燃料化学学报), **2013**, 41 (3): 314-322.
- [14] Wang H. *Study on the Mechanism of Oxygenates Formation in Fischer-Tropsch Synthesis*. Shanghai: East China University of Science and Technology (王昊. 费托合成含氧化合物生成机理的探究. 上海: 华东理工大学), **2018**.
- [15] Tan J. *Influences of Oxygenates Contained in F-T Oil on Oligomerization of α -Olefins and the Adsorption Removal*. Shanghai: East China University of Science and Technology (谭家伦. 费托合成油中含氧化合物对 α -烯烃聚合反应的影响及其吸附脱除研究. 上海: 华东理工大学), **2023**.
- [16] Tian K. *Dissertation Preparation and Performance Evaluation of High Temperature Fischer-Tropsch Synthetic Oil Deoxidation Catalyst*. Beijing: China University of Petroleum, Beijing (田凯歌. 高温费托合成油脱氧催化剂的制备与性能评价. 北京: 中国石油大学(北京)), **2023**.
- [17] Hertkorn N, Benner R, Frommberger M, Schmitt-Kopplin P, Witt M, Kaiser K, Kettrup A, Hedges J I. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **2006**, 70 (12): 2990-3010.

- [18] Kim S, Simpson A J, Kujawinski E B, Freitas M A, Hatcher P G. *Org. Geochem.*, **2003**, 34 (9): 1325–1335.
- [19] Rodgers R P, Schaub T M, Marshall A G. *Anal. Chem.*, **2005**, 77 (1): 20 A–27A.
- [20] Shi Q, Zhang Y, Chung K H, Zhao S, Xu C. *Energy & Fuels*, **2021**, 35 (22): 18019–18055.
- [21] Barrow M P, Headley J V, Peru K M, Derrick P J. *Energy & Fuels*, **2009**, 23 (5): 2592–2599.
- [22] Qian K, Robbins W K, Hughey C A, Cooper H J, Rodgers R P, Marshall A G. *Energy & Fuels*, **2001**, 15 (6): 1505–1511.
- [23] Jin C, Viidanoja J, Li M, Zhang Y, Ikonen E, Root A, Romanczyk M, Manheim J, Dziekonski E, Kenttämä H I. *Anal. Chem.*, **2016**, 88 (21): 10592–10598.
- [24] Tose L V, Silva S R C, Barros E V, Souza L M, Pinto F E, Palomino D K, Freitas J C C, Thompson C J, Vaz B G, Lacerda V, Romão W. *J. Brazilian Chem. Soc.*, **2019**, 30: 997–1009.
- [25] Krueve A, Kaupmees K, Liigand J, Oss M, Leito I. *J. Mass Spectrom.*, **2013**, 48 (6): 695–702.
- [26] Tkachenko N V, Sun Z M, Boldyrev A I. *ChemPhysChem*, **2019**, 20 (16): 2060–2062.

(责任编辑:)