

医疗废弃物低温催化热解特性研究

王静文¹, 汤文君¹, 陈景卫¹, 马腾杰⁴, 芦天亮^{1,3}, 李攀^{1,3,4}, 彭智昆^{1,2*}

(1.河南天辰新垣环保科技有限公司,河南 郑州 450001;
2.郑州大学河南先进技术研究院,河南 郑州 450001; 3.郑州大学化工学院,河南 郑州 450001;
4.生物质炼制技术与装备河南省工程实验室,河南 郑州 450001)

摘要:以推广工业化医疗废弃物热解处理为背景,以混合医疗废弃物为原料,利用两段式管式电炉在低温、氮气气氛等条件下,采用非原位催化的方式,对催化温度、原料与催化剂质量比以及催化剂种类的催化热解特性进行探究。结果显示,催化温度的升高会提升气态产物中 H₂、CO 和 CH₄ 的选择性;随着原料与催化剂质量比的逐步增大,气态产率从 21.99% 提升至 30.73%,H₂ 的选择性先下降后上升,CH₄ 的选择性先上升后下降;不同种类的催化剂其催化特性相差较大,H β 催化剂的制氢效率最高(选择性 41.45%,产量 8.04 mmol/g)、HY 催化剂对 CH₄ 的选择性最好(29.78%)、USY 催化剂的气态产率最高(41.30%)、SAPO-34 催化剂的液态产率最高(58.74%)。ZSM-5 可促进液态产物中大分子组分进一步分解,将 C₆~C₁₀ 组分的含量从 23.07% 提升至 73.93%。该文的研究内容及结论对推动热解技术应用于医疗废弃物工业化处理具有重要的参考意义。

关键词:医疗废弃物;低温催化;热解特性;分子筛催化剂

中图分类号:X705

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)03-0130-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.03.022

Characterization of low-temperature catalytic pyrolysis of medical waste

WANG Jing-wen¹, TANG Wen-jun¹, CHEN Jing-wei¹, MA Teng-jie⁴, LU Tian-liang^{1,3},
LI Pan^{1,3,4}, PENG Zhi-kun^{1,2*}

(1.Henan Tianchen Xinyuan Environmental Protection Technology Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China; 2.Henan Institute of Advanced Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
3.School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 4.Henan Provincial Engineering Laboratory of Biomass Refining Technology and Equipment, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Under the context of promoting industrialized treatment of medical waste, this study investigated the catalytic pyrolysis characteristics of mixed medical waste using a two-stage tubular electric furnace under low-temperature and nitrogen atmosphere conditions via a non-in situ catalytic mode. Systematic exploration was conducted on the effects of catalytic temperature, feedstock-to-catalyst ratio, and catalyst type. The results demonstrated that elevated catalytic temperatures enhanced the selectivity of H₂, CO, and CH₄ in gaseous products. With increasing feedstock-to-catalyst ratios, the gas yield increased from 21.99% to 30.73%, while H₂ selectivity exhibited an initial decline followed by an upward trend, contrasting with the CH₄ selectivity pattern which showed an inverse tendency. Significant variations in catalytic performance were observed among different catalysts: H β catalyst achieved optimal hydrogen production efficiency (41.45% selectivity, 8.04 mmol/g yield), HY catalyst demonstrated superior CH₄ selectivity (29.78%), USY catalyst yielded the highest gas production rate (41.30%), and SAPO-34 catalyst produced the maximum liquid yield (58.74%). Notably, ZSM-5 catalyst facilitated further decomposition of macromolecular components in liquid products, substantially increasing C₆-C₁₀ fraction content from 23.07% to 73.93%. This research provides valuable insights into optimizing pyrolysis technology for industrial-scale medical waste treatment, particularly regarding catalyst selection and process parameter optimization.

Key words: medical waste; low-temperature catalysis; pyrolysis characterization; molecular sieve catalysts

根据全国第 7 次人口普查数据显示,我国人口已超过 14 亿人^[1]。在庞大的人口基数下,医疗废弃物产生量巨大。医疗废弃物种类多样,具有感染性、腐蚀性、易燃性和毒性等特性^[2]。据统计,我国在 2022 年产生医疗废弃物共计 237 万 t,其中感染性废弃物占比 57.89%^[3]。若对其处置不当,易造成重大安全隐患。目前处理技术主要包括焚烧、卫生

填埋、化学处理、高温灭菌、微波处理、等离子体处理及热解等。焚烧技术成熟、适用性广,但会产生二噁英等有害气体;卫生填埋经济便捷但占地大、不可持续;化学处理清除彻底但成本高,且存在药剂残留问题;高温灭菌杀菌效果好但减容有限;微波与等离子体技术减容显著,但设备与运维成本高;热解技术原料适应性强、处理效率高,但预处理成本较高^[4-9]。

收稿日期:2025-09-18;修回日期:2026-01-03

基金项目:国家自然科学基金面上项目(22278380)

作者简介:王静文(1990-),女,本科,研究方向为固体废物、危险废物处理处置及资源化利用,1244681949@qq.com;彭智昆(1988-),男,博士,教授,研究方向为多相催化、催化化学,通讯联系人,zhikunpeng@zzu.edu.cn。

同时也存在多种处理方式相结合的方式,来实现医疗废弃物的高效处理^[10]。相比其他方法,热解技术兼具环保与高效优势:有害副产物少于焚烧和化学法,减容效果优于填埋和高温灭菌,经济性优于微波和等离子体法。此外,医疗废弃物中有机物含量高、热值大,适宜热解处理^[11-13]。

热解是在缺氧条件下加热原料制备炭、焦油和合成气的技术,可通过调控原料、温度、升温速率等提高目标产物产率,并借助催化剂改善产物品质、降低反应活化能及加快反应速率^[14-16]。诸多学者围绕医疗废弃物热解展开研究,顾全斌等^[11]将其热解失重划分为水分及轻组分析出(100~247℃)、生物质热解(247~399℃)和塑料热解(399~531℃)3个阶段。耿宏佩等^[17]在500℃热解中获得气、液、固产率分别为24%~28%、36%~47%、29%~36%。Fang等^[18]对产物进行分析,指出合成气中可燃组分总占比达83.22%、热值为10 995.02 kcal/Nm³,高于国家标准规定的天然气热值;焦油的热值为8 972.82 kcal/kg,仅略低于汽油,其中烃类和脂类含量约占60%;固体产物经过酸洗后可明显提高热值,并且C元素含量高达63.13%。Ding等^[19]对医疗废弃物种注射器和药瓶热解的转化率、加热速率、活化能及反应机理进行研究。Liu等^[20]使用双金属催化剂催化医疗废弃物热解,发现50% FeAlO_x的加入降低了热解的活化能,提高反应速率。程焯涛^[21]通过研究发现热解过程中加入传热介质球是一种有效强化传热的方式,并通过模拟得到传热介质球的尺寸在略小于物料颗粒尺寸时,强化传热效果最好。Liu等^[22]使用ZSM-5分子筛作为载体负载Ga或Mo,经过碱处理后催化废弃医用口罩生成的液态产物中芳烃含量达到63.0%,其中单环芳烃选择性高达87.6%。现有研究虽证实热解技术的潜力,但缺乏对多组分废弃物在不同商业化分子筛下催化特性的系统对比。因此,本文以混合医疗废弃物为原料,采用两段式管式炉在氮气气氛下进行非原位催化热解,重点考察5种商业化分子筛的作用,并探究催化温度与原料催化剂质量比对热解特性的影响,以推动该技术的工业应用。

1 实验材料和方法

1.1 原料及分子筛催化剂

本实验中的原料由河南某医疗垃圾处理公司提供,主要包含医用口罩、手套、输液管、注射器、塑料袋和纱布等。邓娜^[12]选取了7种医疗废弃物作为原

料,每次选取2种混合进行热解特性的研究,结果表明输液管会与其他种类原料发生相互作用,而其他种类原料共热解的热解特性分布为单组分热解特性的线性叠加,其相互影响较小。张力^[23]进行了多组分医疗废弃物混合热解实验,发现不同组分之间会存在相互作用,但相互作用仅在初始阶段发生。因此不同种类的原料在共热解时,会产生一定的相互作用,为控制原料的热解特性,每次实验选取固定种类的原料及比例进行热解实验,原料的种类及质量比如图1所示(去掉针头、金属等低温条件下不易热解的物品)。实验前将原料进行烘干及简单破碎等预处理,便于放入热解设备。

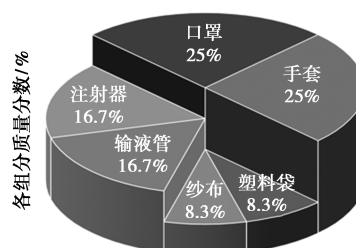
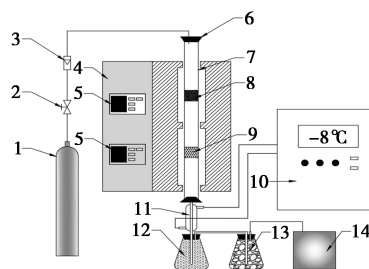


图1 医用废弃物原料比例

本文使用5种商业化分子筛催化剂,均通过采购得到,分别为ZSM-5、USY、HY、SAPO-34和H β 分子筛催化剂。实验前先将分子筛催化剂在550℃条件下煅烧1h。因为分子筛的结构及特性已经被广泛研究^[24-25],因此本文未对催化剂的结构特性进行表征分析。

1.2 催化热解实验

本实验使用两段式的管式电炉,采用非原位催化的热解方式,如图2所示。每次使用6g原料(口罩和手套各1.5g、输液管和注射器各1g、塑料袋和纱布各0.5g),置于第一段热解区,催化剂装填于第二段催化区。系统经气密性检查后,以150 mL/min N₂吹扫空气,确保无氧环境。第一段热解温度固定



1—氮气瓶;2—节流阀;3—质子流量计;4—管式电炉;
5—操控面板;6—橡胶塞;7—石英管;8—原料;9—催化剂;
10—冷阱;11—冷凝管;12—集油瓶;13—洗气瓶;14—集气袋

图2 热解系统示意图

为 450℃,第二段催化温度在 410~490℃间调整,升温时间 20 min,到达后反应 25 min。反应结束冷却后,收集气、液、固 3 相产物:气体由气袋采集,液体经冷凝收集,固体通过差减法计算产率。每组实验重复 3 次取平均值。本研究重点考察了催化温度、原料与催化剂质量比及催化剂种类对热解行为的影响。

1.3 热解产物分析方法

液态产物组分使用安捷伦科技有限公司生产的气相色谱-质谱联用仪(GC-8860/MS-5977A)对其组分进行检测。色谱柱为 HP-5MS 型毛细管柱,载气 He 气流速 1 mL/min,每次进样 1 μL,气化室温度为 300℃,进样口温度为 280℃。电离方式为电子电离(EI),电子轰击能量为 70 eV,扫描质量范围为 35~550 m/z ,扫描时间为 1 s。液体产物的检测结果由分析设备配套化学工作站分析软件中的谱库 NIST 17.L 进行检索分析,主要分析 C₆~C₂₀的液态成分。

气态产物使用气相色谱仪对其组分进行检测。柱 A 为 HP-PLOTQ(载气 He,温度 80℃);柱 B 为 MS-5A(载气 He,温度 110℃);柱 C 为 HP-PLOT/Al23(载气 N₂,温度 150℃);进样口温度 100℃。可检测出 H₂、CO₂、CO、CH₄、C₂、C₃、C₄ 和 C₅ 等气态成分。

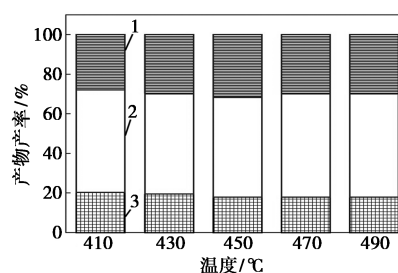
固态产物主要为固体残渣及炭,并未进行组分测定及分析。

2 结果和讨论

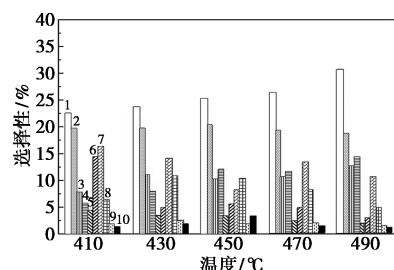
2.1 催化温度对热解特性的影响

在热解温度为 450℃,原料与 ZSM-5 催化剂质量比为 2:1 的条件下,催化温度对热解特性的影响如图 3 所示。图 3(a)展示了不同催化温度对热解固态、液态和气态产物产率的影响。如图所示,随着催化温度上升,产物的产率变化较小,固态产率平均为 19.06%(±1.77%)、液态产率为 51.23%(±1.07%)、气态产率为 29.72%(±1.74%)。图 3(b)展示了各气态产物选择性的变化情况。气体组分对合成气的热值及燃烧特性有显著影响^[26]。由图中各组分变化趋势可以看出,随着催化温度的提高,ZSM-5 分子筛催化剂对 H₂、CO 和 CH₄ 的选择性上升。其中 H₂、CO、CH₄ 的选择性分别从 22.59%、7.61%、5.66% 上升至 30.78%、12.65%、14.34%,产量由 2.13 mmol/g、0.73 mmol/g、0.54 mmol/g 提升至 3.73 mmol/g、1.53 mmol/g、1.74 mmol/g。H₂/CO

在 410℃ 时达到最大的 2.97,但此时 H₂ 的含量较低,其次在 450℃ 达到 2.47。CO₂ 的选择性较高,平均在 19.57%(±0.70%),产量在 2.10 mmol/g 左右;C₂H₆、C₄H₁₀ 和 C₅H₁₂ 的选择性较低。C₂H₄ 在低温时选择性较高达到 14.42%,产量为 1.38 mmol/g,随后下降;而 C₃H₈ 的选择性呈现先下降后上升的趋势。尽管气态总产率变化不大,但催化温度提高促进了 H₂、CO 和 CH₄ 的生成,这可能是由于温度梯度较小且气体选择性对温度更为敏感。从工业化应用角度,综合考虑能耗与产物收益,450℃ 被确定为合适的催化温度。



1—气态产率;2—液态产率;3—固态产率
(a) 产物产率



1—H₂;2—CO₂;3—CO;4—CH₄;5—C₂H₆;6—C₂H₄;7—C₃H₈;
8—C₃H₆;9—C₄H₁₀;10—C₅H₁₂
(b) 气态产物组分选择性

图3 催化温度对热解特性的影响

2.2 原料与催化剂的质量比对热解特性的影响

图 4 展示了在热解与重整温度均为 450℃ 并使用 ZSM-5 催化剂的条件下,原料与催化剂质量比对热解特性的影响。由图 4(a) 可见,随原料与催化剂质量比从 10:1 增至 10:5,气态产率由 21.99% 升至 30.73%,液态产率从 58.70% 降至 50.50%,固态产率基本稳定。这表明 ZSM-5 用量增加促进液态大分子发生 2 次裂解,转化为小分子气体,从而提高气体产率。图 4(b) 显示,添加 ZSM-5 后 H₂ 选择性从 19.40% 降至 11.35%,之后随催化剂质量比增加而上升,在 10:5 时达到最大值 25.15%,产量为 2.76 mmol/g。CO 选择性变化较小,稳定在 10.50% ± 1.08%,H₂/CO 比在 10:5 时达到 2.47。CH₄ 选择性

先升后降,于10:3.5时达最大19.20%。 CO_2 选择性逐渐从31.32%降至20.27%, $\text{C}_2\sim\text{C}_5$ 烃类变化不显著。考虑到工业化经济性,未继续提高催化剂比例。综合分析表明,原料与催化剂质量比为10:5时气体产率最高,且 H_2 选择性与 H_2/CO 比最大,因此后续实验采用该比例。

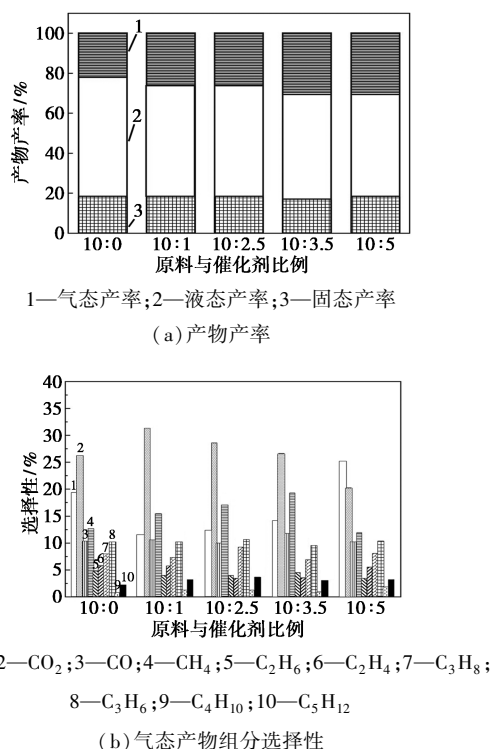


图4 原料与催化剂质量比对热解特性的影响

2.3 催化剂种类对热解特性的影响

图5展示了在热解和催化温度为 450°C ,原料与催化剂质量比为2:1条件下,分子筛催化剂种类对热解产物特性的影响。由图5(a)可以看出,SAPO-34分子筛催化剂的液态产率最高,达到了58.74%;USY和H β 分子筛的气态产率较高,分别为41.30%和40.30%。图5(b)展示了不同分子筛催化剂的气态产物中,各组分选择性的变化。首先可以看出,H β 对 H_2 的选择性最高,达到41.45%,产量同样最高,为8.04 mmol/g,同时 H_2/CO 达到了2.88,结合其较高的气态产率可以得到H β 拥有最高的制氢效率。SAPO-34对 C_2H_4 的选择性达到了最高的38.61%,但由于其气体产率较低,导致 C_2H_4 的产量仅有2.92 mmol/g。 CH_4 的选择性在HY达到了最高的27.89%,产量为4.64 mmol/g。USY虽然拥有最高的气态产率,但对 H_2 、 CO 、 CH_4 等气体的选择性并不高,其利用价值较低。由以上分析可得,不同分子筛催化剂对热解产物特性影响较大,气

态或液态产率最大相差18%以上,且对同一气体的富集特性差异较大,如H β 对 H_2 的选择性是SAPO-34的2.65倍, H_2 的产量是后者的5.82倍。

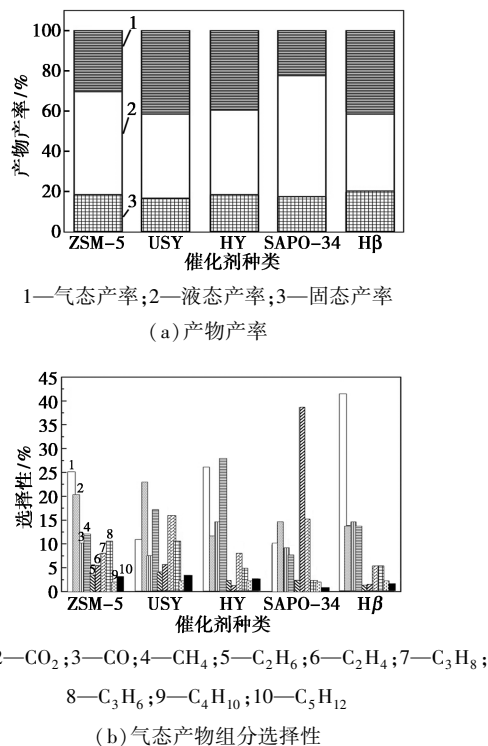


图5 催化剂种类对热解特性的影响

催化热解产物中,液态产物的组分通常较为复杂,为进一步研究热解产物特性,选取未催化的空白组、使用ZSM-5催化剂和USY催化剂3组液态产物进行分析,液态产物中碳数分布如图6所示,各组分含量如表1所示。由图表数据分析可得,当医疗废弃物未被催化热解时,液态产物中组分共计57种,且碳数最高可达40,而经过催化后,液态产物组分大幅下降,仅有40种左右,且碳数最高为20。由图6可以看出,经过ZSM-5和USY催化热解的液态产物组分主要分布在 $\text{C}_6\sim\text{C}_{10}$,其含量分别为73.93%和66.10%,而未催化的 $\text{C}_6\sim\text{C}_{10}$ 含量仅有28.00%,但大于 C_{20} 的含量有25.31%。此现象说明

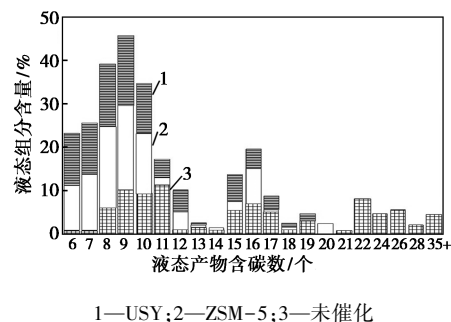


图6 液态产物组分的碳数分布

表 1 液态产物各组分相对含量

序号	化合物 分子式	未催化 含量/%	ZSM-5 含量/%	USY 含量/%					
1	C ₆ H ₁₀ O	—	7.40	9.02	41	C ₁₂ H ₂₀ O	0.60	—	—
2	C ₆ H ₁₂ O ₂	1.19	2.51	3.11	42	C ₁₂ H ₂₂	—	0.29	0.35
3	C ₇ H ₈	0.55	9.77	6.61	43	C ₁₂ H ₂₄	—	0.25	2.92
4	C ₇ H ₁₄	0.25	2.96	5.09	44	C ₁₂ H ₂₆ O	0.35	—	0.21
5	C ₇ H ₁₄ O	0.19	—	—	45	C ₁₃ H ₁₄	—	0.35	0.60
6	C ₈ H ₈	2.75	—	—	46	C ₁₃ H ₂₀ O ₂	0.09	—	—
7	C ₈ H ₁₀	0.44	17.68	11.87	47	C ₁₃ H ₂₄	1.53	—	—
8	C ₈ H ₁₄	0.11	0.13	—	48	C ₁₄ H ₂₂ O ₂	—	0.53	—
9	C ₈ H ₁₆	0.88	0.21	0.87	49	C ₁₄ H ₂₈	0.73	—	—
10	C ₈ H ₁₈	0.52	0.65	0.79	50	C ₁₅ H ₂₄ O ₂	0.51	0.11	0.58
11	C ₈ H ₁₆ O	0.54	—	—	51	C ₁₅ H ₂₆ O ₂	0.92	0.56	0.32
12	C ₈ H ₁₈ O	0.90	—	0.86	52	C ₁₅ H ₃₀	1.44	—	—
13	C ₉ H ₁₀	—	0.72	—	53	C ₁₅ H ₃₂ O	2.85	1.23	4.77
14	C ₉ H ₁₂	0.32	6.79	7.41	54	C ₁₆ H ₃₀ O	0.91	0.13	0.59
15	C ₉ H ₁₄ O	—	0.34	—	55	C ₁₆ H ₃₄ O	0.59	—	—
16	C ₉ H ₁₆	0.25	0.11	—	56	C ₁₆ H ₃₄ S	5.39	8.16	3.71
17	C ₉ H ₁₆ O	0.17	—	—	57	C ₁₇ H ₂₄ O	—	0.12	—
18	C ₉ H ₁₈	9.43	8.69	8.32	58	C ₁₇ H ₃₆	1.43	—	—
19	C ₉ H ₂₀	—	0.25	0.19	59	C ₁₇ H ₃₆ O	3.71	0.50	2.98
20	C ₉ H ₂₀ O	—	2.16	0.51	60	C ₁₈ H ₃₄ O	0.16	—	—
21	C ₁₀ H ₈	—	2.64	0.87	61	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	1.06	0.40	0.89
22	C ₁₀ H ₁₀	—	0.72	—	62	C ₁₉ H ₃₀ O ₂	1.10	—	0.13
23	C ₁₀ H ₁₂	—	0.44	—	63	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	0.59	—	0.23
24	C ₁₀ H ₁₄	—	1.45	2.75	64	C ₁₉ H ₃₈ O	1.47	—	1.12
25	C ₁₀ H ₁₄ O ₂	0.08	0.26	0.10	65	C ₂₀ H ₂₈ O	0.13	—	0.10
26	C ₁₀ H ₁₆	3.33	3.16	1.74	66	C ₂₀ H ₄₀ O	—	—	2.04
27	C ₁₀ H ₁₆ O	1.68	1.72	3.81	67	C ₂₀ H ₃₈ O ₂	0.10	—	—
28	C ₁₀ H ₂₀ O	0.87	—	—	68	C ₂₁ H ₃₈ O ₃	0.24	—	—
29	C ₁₀ H ₁₈	0.22	—	—	69	C ₂₂ H ₄₂ O ₂	6.10	—	—
30	C ₁₀ H ₁₈ O	0.82	1.50	1.25	70	C ₂₂ H ₄₄ O ₂	1.50	—	—
31	C ₁₀ H ₂₀	0.69	0.75	—	71	C ₂₂ H ₄₆ O	0.54	—	—
32	C ₁₀ H ₂₂	1.81	0.92	0.93	72	C ₂₄ H ₄₈	4.72	—	—
33	C ₁₁ H ₁₄	—	0.15	—	73	C ₂₆ H ₄₄ O ₅	5.66	—	—
34	C ₁₁ H ₁₈ O	—	—	2.39	74	C ₂₈ H ₄₈ O	2.07	—	—
35	C ₁₁ H ₂₂	6.59	—	—	75	C ₃₅ H ₇₀	4.02	—	—
36	C ₁₁ H ₂₄	1.11	—	—	76	C ₃₇ H ₇₆ O	0.33	—	—
37	C ₁₁ H ₂₄ O	3.94	1.41	1.57	77	C ₄₀ H ₈₂ O ₂	0.12	—	—
38	C ₁₂ H ₁₂	—	2.00	1.27					
39	C ₁₂ H ₁₂ O	—	0.32						
40	C ₁₂ H ₁₈ O ₂	—	1.17	0.21					

ZSM-5 和 USY 分子筛催化剂可以促进大分子液态产物进一步裂解为小分子液态产物,达到对部分小分子液态产物富集的作用。其中 C₆H₁₀O、C₇H₈、C₈H₁₀ 和 C₉H₁₂ 的含量提升超过 6%, 而 ZSM-5 和 USY 催化剂对 C₇H₈ 的选择性分别提升 17.23% 和

11.43%。

基于以上实验结果,对混合医疗废弃物催化热解的协同作用与反应机理进行讨论。原料中包含纺织类、橡胶类和塑料类组分,共热解时存在协同效应,主要表现为中间产物与自由基相互作用,可降低反应活化能并加速反应进程^[27]。随温度升高,纺织类原料中的半纤维素和纤维素于230~300℃分解,生成含氧有机物和自由基,促进橡胶和塑料分子链断裂并释放H自由基,后者进一步加速纺织类组分分解,形成大量活性中间体。这些中间体经重组、聚合或断裂等二次反应,并在分子筛催化下转化为最终产物。不同分子筛因孔道结构与酸性位点差异,表现出不同催化行为。通过对5种分子筛催化效果的对比分析发现,其孔道结构和酸性显著影响产物分布。USY、HY和H β 属于典型的大孔分子筛,其孔道结构有利于大分子中间产物的扩散和深度裂解生成小分子气态产物,该现象与图5(a)中所示实验结果相一致。相较之下,ZSM-5和SAPO-34属于中小孔分子筛,一定程度上限制了大分子中间体的有效进入,从而影响了热解效率和产物分布。在催化性能方面,H β 分子筛可有效促进中间产物的脱氢和深度裂解过程,其Brønsted酸位点对C—H键的断裂具有较高的催化活性,因而显著提升了H₂的选择性。同时,产物中H₂/CO比值高达2.88,表明在催化过程中水煤气变换反应被显著促进。USY分子筛对大分子裂解的促进作用尤为显著,表现出最高的气态产率,其液态产物中C₆~C₁₀组分占比达66.10%,但产物分布相对分散。HY分子筛同样具有较强酸性,增强了对C—C键的断裂能力,因而在催化过程中对CH₄的选择性最高。相比之下,ZSM-5虽孔径较小,限制了部分大分子的进入,导致气态产率提升有限,但其强酸性仍有效促进了H₂的生成,并显著抑制了液态产物中高碳组分的生成,使得C₆~C₁₀组分占比进一步提高至73.93%,表现出优异的中碳组分选择性。SAPO-34孔径小、酸性较弱,液态产率较高,其酸性位点促进C—O和C—C键断裂,从而提高小分子烯烃产率。综上,分子筛通过裂解、脱氧、芳构化等反应重构产物分布,显著降低液态产物碳数,实现小分子高值化学品的定向富集,并提高液态产物转化为燃料的潜力。

2.4 医疗废弃物催化热解潜在机理分析

图7展示了医疗废弃物催化热解的潜在机理,主要包括热裂解与催化转化两个阶段。首先,混合废弃物在惰性气氛下受热,聚合物主链断裂生成

链烃、芳香族前体及小分子气体等不稳定中间产物。随后,这些中间产物进入催化段与酸性分子筛接触,发生催化裂解、重整、脱氢芳构化及异构化等反应,该过程受催化剂酸性、孔径及择形效应调控^[22]。酸性催化剂中的布朗斯特酸位点能够有效断裂C—C键,使大分子转化为小分子气体和轻质液体,路易斯酸位点则有助于重整和脱氢反应的发生,促进芳香族化合物与氢气等气态组分的生成。同时,催化剂的孔道结构对反应选择性起到调控作用,大孔催化剂有利于促进大分子的扩散与转化,微孔或中孔分子筛则通过尺寸匹配效应调控反应路径,实现轻质组分的富集或目标产物的定向生成。此外,催化温度影响反应动力学,高温可加速自由基生成,提高气态产物比例;原料与催化剂质量比则关系催化位点利用效率,显著影响产物分布与生成速率^[28]。

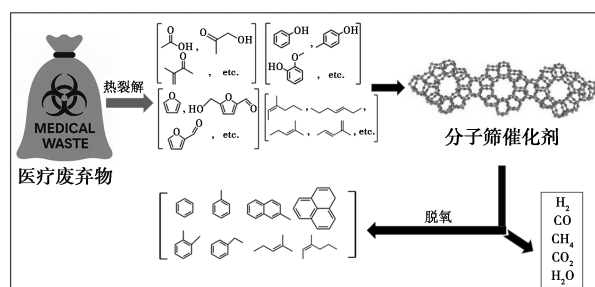


图7 医疗废弃物催化热解潜在机理图

3 总结

以医疗废弃物工业化推广为背景,选用医疗废弃物混合原料,探究了催化温度、原料与催化剂比例以及多种分子筛催化剂的种类对其热解特性的影响,主要结论如下。

(1)催化温度由410℃上升至490℃,对气态和液态产率影响不大,气态产物中H₂、CO和CH₄的选择性上升,H₂/CO在450℃达到2.47,因此450℃是较为适合的催化温度。

(2)随着ZSM-5催化剂占比增大,气态产率逐步增大;H₂的选择性呈现先下降后上升的趋势,在10:5时达到25.15%;CH₄的选择性先上升后下降,在10:3.5时达到19.20%,产量为1.91 mmol/g。

(3)不同分子筛的催化特性相差较大,H β 分子筛的制氢效率最高,H₂选择性和产量高达41.45%和8.04 mmol/g;HY拥有最高的CH₄的选择性和产量,分别为27.89%和4.64 mmol/g;USY获得了最高的气态产率41.30%,但选择性分散。

(4)ZSM-5和USY分子筛可提高液态产物的

质量,液态产物中 $C_6 \sim C_{10}$ 的组分含量被 ZSM-5 从 23.07% 提升至 73.93%, 而 USY 使之提升至 66.10%, 其中 C_7H_8 的选择性最高提升 17.23%。

热解技术应用于医疗废弃物处理具有良好的前景,不仅可以制备高值合成气,提纯后制备氢气,还具有生产液态燃料的潜力。因此开发多种低成本高效的催化剂,设计效率高,容量大,适用于各类废弃物的热解设备和系统,以及研发出的热解体系能否被企业所接受,是未来能否推动工业化应用的关键。

参考文献

- [1] 童玉芬. 中国人口的最新动态与趋势——结合第七次全国人口普查数据的分析[J]. 中国劳动关系学院学报, 2021, 35(4): 15-25.
- [2] 魏诗晴, 涂敏, 赖晓全, 等. 我国各类医疗机构部分医疗废物分类处置现状[J]. 中国感染控制杂志, 2021, 20(9): 782-787.
- [3] 国家统计局, 生态环境部. 中国环境统计年鉴 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [4] 李塘威, 李健, 颜蓓蓓, 等. 医疗废物热解技术综述[J]. 环境科学, 2024, 44(8): 4432-4445.
- [5] Zamri M F M A, Hasmady S, Akhilar A, et al. A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2021, 137: 110637.
- [6] Ilyas S, Srivastava R R, Kim H. Disinfection technology and strategies for COVID-19 hospital and bio-medical waste management[J]. Science of the Total Environment, 2020, 749: 141652.
- [7] Wang J, Shen J, Ye D, et al. Disinfection technology of hospital wastes and wastewater; Suggestions for disinfection strategy during coronavirus disease 2019 (COVID-19) pandemic in China[J]. Environmental Pollution, 2020, 262: 114665.
- [8] Ma D, Feng Q, Chen B, et al. Insight into chlorine evolution during hydrothermal carbonization of medical waste model[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 380: 120847.
- [9] Hong J, Zhan S, Yu Z, et al. Life-cycle environmental and economic assessment of medical waste treatment[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 174: 65-73.
- [10] Zhang T, Li A, Huang Y, et al. Effect of NaClO disinfectant treatment on the yields, components and combustion characteristics of typical medical waste pyrolysis products[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(2): 112403.
- [11] 顾全斌, 王棋, 赵红钰, 等. 医疗废弃物热解动力学研究[J]. 能源研究与利用, 2022, (6): 13-17.
- [12] 邓娜. 医疗废物热解特性及动力学模型研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [13] Dharmaraj S, Ashokkumar V, Pandiyan R, et al. Pyrolysis: An effective technique for degradation of COVID-19 medical wastes[J]. Chemosphere, 2021, 275: 130092.
- [14] Mazzei H G, Specchia S. Latest insights on technologies for the treatment of solid medical waste: A review[J]. Journal Of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(2): 109309.
- [15] 吕柯键, 骆仲浚, 方梦祥, 等. 热解气氛对准东煤中钠行为的影响及半焦结渣特性研究[J]. 能源工程, 2022, 42(6): 1-8.
- [16] 李怀翔, 方梦祥, 吕通, 等. 气氛及后置催化剂对平朔烟煤热解特性的影响[J]. 能源工程, 2021(2): 1-8.
- [17] 耿宏佩, 陈景卫, 白德瑞, 等. 医疗废物低温热解技术应用研究[J]. 河南科技, 2024, 51(12): 88-91.
- [18] Fang S, Jiang L, Li P, et al. Study on pyrolysis products characteristics of medical waste and fractional condensation of the pyrolysis oil[J]. Energy, 2020, 195: 116969.
- [19] Ding Z, Chen H, Liu J, et al. Pyrolysis dynamics of two medical plastic wastes: Drivers, behaviors, evolved gases, reaction mechanisms, and pathways[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 402: 123472.
- [20] Liu J, Jia D, Xu W, et al. Catalytic pyrolysis of $FeAlO_x$ and medical plastic waste: Kinetic, slag conversion, and gas emission patterns[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(3): 112605.
- [21] 程焯涛. 医疗废弃物热解过程传热强化机制探究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [22] Liu J, Fu H, Zhou G, et al. Preparation of aromatic hydrocarbons from fast pyrolysis of waste medical mask catalyzed by modified HZSM-5[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2023, 169: 105797.
- [23] 张力. 灾难救援医疗废弃物溯源方法、理化性质及热解特性研究[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2017.
- [24] 姜志显, 刘俊辰, 阮宏程, 等. 沸石分子筛基 VOCs 催化燃烧催化剂的研究进展[J]. 能源环境保护, 2024, 38(4): 112-122.
- [25] Sun Y, Guo Q, Ma H, et al. Research progress in preparation and application of molecular sieves/silicon carbide composites[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(9): 2334-2338.
- [26] 梁拯, 周俊虎, 曹欣玉. 气体组分对低热值气体 MILD 燃烧性质的影响[J]. 能源工程, 2021, (6): 1-7.
- [27] Vo T A, Ly H V, Tran Q K, et al. Lumped-kinetic modeling and experiments on co-pyrolysis of palm kernel cake with polystyrene using a closed-tubing reactor to upgrade pyrolysis products[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 249: 114879.
- [28] Sudalaimuthu P, Ali U, Sathyamurthy R. Optimization of process parameters of catalytic pyrolysis using natural zeolite and synthetic zeolites on yield of plastic oil through response surface methodology[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 28442. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志, 邮发代号 82—67。