燃烧科学与技术
Journal of Combustion Science and Technology
2026,32(4):416-422
DOI 10.11715/rskxjs.R202508005

温度对稻壳快速热解中挥发分转化的影响

王立涵，陈宝明，高培培，毕德贵
（上海理工大学环境与建筑学院，上海 200093）

摘　要：以稻壳为原料，借助恒温管式炉热解实验系统，研究了温度对热解产物分布及含氧化合物演化规律的影响. 结果表明，温度显著影响热解产物的组成与含量，随着温度升高，液相产物产率由 45.8%下降至 33.1%，气相产率由 13.6%升高至 34.6%；温度是影响含氧组分赋存形态与含量的关键因素. 低于 600 ℃时，液相中主要生成苯酚、甲苯酚及糠醛、糠醇等酚类与呋喃类衍生物，含量占比为 14.14%～62.92%；高于 600 ℃后，酚类和呋喃类经脱羧、芳构化等反应逐渐向芳香族化合物转化. 该研究明确了不同温度区间内典型含氧组分的生成及转化特征，为农林废弃物热转化过程中焦油中含氧化合物的调控与资源化利用提供了技术支撑.

关键词：稻壳；热解；恒温管式炉；含氧化合物
中图分类号：TK11　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1006-8740(2026)04-0416-07

Effect of Temperature on Volatiles Transformation During Fast Pyrolysis of Rice Husk

Wang Lihan，Chen Baoming，Gao Peipei，Bi Degui，
（School of Environment and Architecture，University of Shanghai for Science and Technology，
Shanghai 200093，China）

Abstract：In this study，rice husk was selected as the feedstock，and pyrolysis experiments were conducted in a fixed-bed tubular furnace to systematically evaluate the influence of temperature on product distribution and the evolution of oxygenated compounds.With increasing temperature，the liquid yield decreased from 45.8% to 33.1%，whereas the gas yield rose from 13.6% to 34.6%. Temperature was identified as the dominant factor governing the generation and transformation of oxygenated species. At temperatures below 600 ℃，phenolic and furanic derivatives，such as phenol，cresol，furfural，and furfuryl alcohol，were the predominant liquid products，accounting for 14.14%—62.92%. At higher temperatures（＞600 ℃），these compounds were progressively converted into aromatic hydrocarbons through decarboxylation and aromatization. This study elucidates the temperature-dependent evolution of key oxygenated compounds and provides technical guidance for the regulation and valorization of tar during the thermal conversion of agricultural and forestry residues.

Keywords：rice husk；pyrolysis；constant temperature tube furnace；oxygenated compounds

在全球应对气候变化与推动可持续发展的背景下，稻壳通过热解技术可以转化为生物炭、可燃气和生物油等高附加值产物，兼具能源回收与碳封存功能，具有显著的经济优势[1-3]，是目前研究的热点

收稿日期：2025-08-24.
作者简介：王立涵(2000—)，男，硕士研究生，2941542391@qq.com.
通信作者：毕德贵，女，博士，讲师，bidegui1103@163.com.

之一.

稻壳热解过程中，焦油作为冷凝有机混合物副产物组分较为复杂，在工业生产中常常具有两面性，一方面，焦油本身具有较高黏性，常导致管道堵塞与设备腐蚀[4-6]，但另一方面，焦油本身具有远高于原始稻壳的热值[7]（可达 21.1 ~ 23.9 MJ/kg），并富含酚类、呋喃类、醛类、酮类及多环芳烃等含氧有机物，有较高的工业应用价值[8]. 焦油的组成受燃料特性和工艺参数影响显著，尤其是含氧组分复杂且不稳定，不仅影响其燃料性能，也限制其在材料与化工领域的利用[9]，因此，深入揭示焦油中含氧组分的生成转化特性是实现其资源化利用的关键.

生物质热解过程中焦油中含氧组分因其组分的复杂性与高反应活性，不少学者也做了相关研究. Chen 等[10]通过实验发现纤维素的主要热解产物为脱水糖类，约占总峰面积的 75%，但对小分子含氧产物的形成机制关注相对较少；Usino 等[11]研究结果表明，纤维素在热解过程中通过糖苷键断裂及片段重排解聚，生成糖类及一系列轻质含氧小分子，且呋喃类和吡喃类产物可通过解聚、脱水和重排等反应形成，其生成受温度、停留时间等条件的显著影响. Li 等[2]以典型的松木、稻壳和玉米秸秆为原料进行实验，发现随着芳构化程度的提高，含氧化合物逐步脱氧，纤维素热解产生的 H 自由基可促进木质素向酚类焦油的转化. 该研究虽然探讨了焦油中酚类的生成及转化，但缺乏对生物质热解过程中其他含氧组分的研究. Sun 等[12]采用 Py-GC/MS 技术系统研究了稻壳与白杨木在 400 ~ 700 ℃的热解产物分布，结果显示稻壳热解过程中酚类与呋喃类化合物在多个温度区间仍占据较高比例. 这一现象与采用 Py-GC/MS 测试方法有关，这种在线测试方法存在升温快、停留时间短及缺乏冷凝过程等特点，抑制了热解组分二次反应，因此在高温段依然能够检测到较多的呋喃类与酚类产物. 然而，在实际热解工况下，气相停留时间更长，二次裂解与缩合不可避免，导致产物分布与分析热解结果存在显著差异. Muzyka 等[13]通过对比 Py-GC/MS 与固定床热解所得焦油组分发现，酸类、呋喃类及芳烃等物质的相对含量在两种方法中差异显著，进一步表明 Py-GC/MS 数据在工程适用性上存在一定局限. 相比于 Py-GC/MS，采用 GC-MS 技术分析可以在更接近实际工艺的条件下对焦油及气体产物进行定性和定量表征.

本文以我国典型生物质稻壳为原料，利用恒温管式炉热解反应系统开展实验研究，并基于 GC-MS 分析方法探讨了温度对稻壳热解特性及三相产物分布的影响，重点分析了焦油中含氧组分的生成规律，以探究稻壳热解过程中挥发分中含氧化合物的生成与转化规律，为稻壳热解过程优化控制及焦油资源化技术开发提供参考.

1　实验材料和方法

1.1　实验材料

稻壳经过除杂、干燥、粉碎处理后制成实验样品，并密封于自封袋中. 样品细度为 50 目（0.297 mm），每次实验取 5 g 放置于石英舟中进行实验. 样品工业分析和元素分析如表 1 所示.

表 1　稻壳的工业分析和元素分析

Tab.1　Proximate analysis，ultimate analysis of rice husk

工业分析/%				元素分析/%				
M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	$F_{C,ad}$	$w_{C,ad}$	$w_{H,ad}$	$w_{O,ad}$	$w_{N,ad}$	$w_{S,ad}$
6.90	18.93	59.44	14.73	36.57	4.50	32.58	0.47	0.06

1.2　实验方法

本文搭建恒温管式炉热解反应实验系统，实验系统如图 1 所示. 本实验系统由气体供应单元、高温反应单元以及测试单元组成.

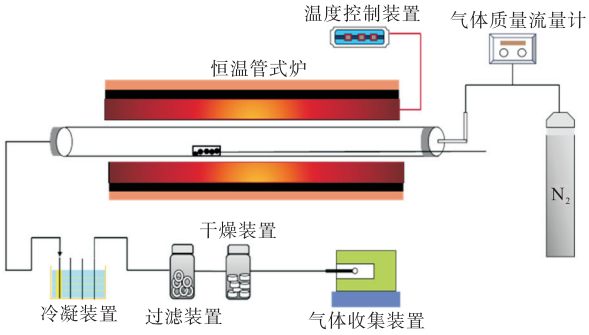


图 1　恒温管式炉热解反应实验系统示意

Fig.1　Schematic diagram of pyrolysis reaction experiment system of constant temperature tube furnace

气体供应单元由高纯氮气钢瓶、连接管道及质量流量计等组成. 选用高纯氮气作为载气，气体流量为 450 mL/min. 在实验开始前，将氮气通入系统 10 min 以充分排出管路和反应器内部空气，确保整个热解过程在惰性气氛下进行.

高温反应单元由恒温管式炉和石英反应管组成. 恒温管式炉加热元件为硅钼棒，使用温度为 0 ~ 1 200 ℃；石英反应管内径 50 mm，两端通过不锈钢法兰密封连接. 实验前对炉内温度分布进行了测试以确定恒温段，结果如图 2 所示. 根据测温结果，恒温区为距离进气端 25 ~ 70 cm 处，因此，本实验将样品固定在距离进气口 70 cm 的位置，以保证受热均匀性. 实验开始时将稻壳原料放入石英舟中，待恒温管

式炉的温度达到指定温度后，用金属棒迅速推入恒温区. 实验设定 400 ℃、500 ℃、600 ℃、700 ℃及 800 ℃ 5 个温度条件，每个工况实验时间均为 60 min 并重复 3 次以降低实验误差.

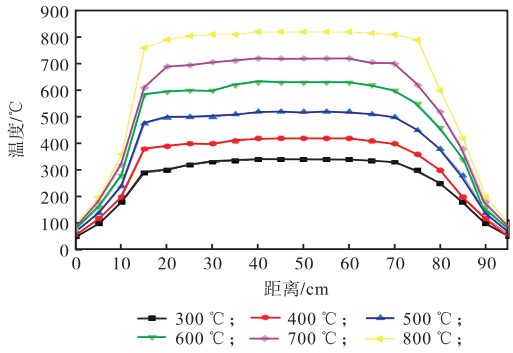


图 2　管式炉温度分布

Fig.2　Temperature distribution of tube furnace

测试单元包括气体收集、冷凝装置与测试仪器等. 热解过程中产生的热解气体依次通过冷凝装置(用于捕集焦油)及干燥装置，之后非冷凝气体由气袋收集，每隔 5 min 采集一次气体样品，并送入气相色谱仪(GC，Agilent Micro 990)进行测试，其重复性指标小于 0.5%. 所捕集的焦油产物采用四氢呋喃作为溶剂溶解[14]，通过配备 Agilent HP-5MS 毛细管柱(30 m × 250 μm × 0.25 μm)的气相色谱质谱联用仪(GC-MS，Agilent 7980A/5975C)进行组分分析，结合内标定量时，定量精度可控制在 2% ~ 5%以内，通过焦油质量的变化可判断热解过程中的主要反应方向及其对焦油生成的影响程度；热解结束后将残留炭冷却至室温，用天平进行称重，并使用扫描电镜(SEM，JSM-IT500)对热解炭进行分析.

1.3　数据分析方法

采用 GC 分析热解气体的成分和含量.

$$V=\frac{V_t\times C_n}{C}$$

式中：V 为气体生成物的体积，mL；V_t 为 5 min 内的气体流量 2 250 mL；C_n 为 GC 所测气体的物质的量浓度，mol/L；C 为 GC 所测气体物质的量浓度的总和，mol/L. 因此，对于一系列气体生成的化学反应，气体体积较多的即为关键反应.

采用差减法计算液体产物的产量.

$$m_{tar}=m_b-m_c-m_g$$

式中：m_{tar} 为焦油的质量，g；m_b 为原始稻壳质量，g；m_c 为热解炭质量，g；m_g 为气体产物质量，g.

根据所得三相产物的质量，可计算三相产物的产率占比.

$$Y_n=\frac{m_n}{m_b}\times 100\%$$

式中：Y_n 为产物的产率，%；m_n 为气相、液相、固相产物的质量，g.

2　稻壳热解产物分布特性分析

本文考察了 400 ℃、500 ℃、600 ℃、700 ℃和 800 ℃下稻壳热解产物分布特性，图 3 展示了各温度下三相产物的产率变化. 从图中可以看出，随温度升高，焦油产率由 400 ℃的 45.8%降至 800 ℃的 33.1%，而对应温度下的气相产物产率则由 13.6%增至 34.6%；当温度高于 700 ℃后，各产物产率变化趋于平缓，这与 Yu 等[15]在稻壳和玉米秸秆的热解研究中的结果相似. 这是因为在较低温度下，生物质主要发生脱水和初步裂解反应，导致焦油生成量较高；而在较高温度下，焦油组分发生二次裂解和重整反应，生成更多的小分子气体，如 CO、CO_2、H_2 和 CH_4 等. 当温度超过 700 ℃时，热解焦基本完成了主要的挥发分释放和重组过程，因此产率变化趋于稳定. 焦油产率的持续下降也说明高温有利于焦油的裂解和二次裂解.

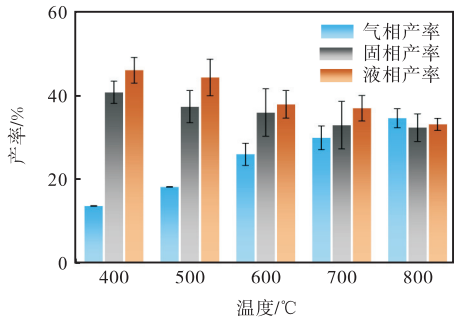


图 3　不同温度下稻壳热解产物的分布情况

Fig.3　Distribution of pyrolysis products of rice husk at different temperatures

可见，气体产率和焦油的裂解及重整过程密切相关，本文对不同温度下气相产物的组成和变化规律进行了分析，结果如图 4 所示. 在 400 ~ 600 ℃范围内，气体产物以含氧气体 CO 和 CO_2 为主，二者总占比超过 70%，这一阶段主要对应于纤维素和半纤维素的热解过程，其中羧基和羰基官能团断裂产生大量 CO_2 和 CO. 在 600 ~ 800 ℃的高温区，气体组成发生显著变化，H_2 和轻烃的生成明显增加. H_2 的相对含量从 400 ℃时约 2%持续升高至 800 ℃时的约 22%，其增长主要与焦油蒸气重整反应($C_nH_m+H_2O\rightarrow CO+H_2$)以及甲烷热裂解($CH_4\rightarrow C+2H_2$)密切相关. 同时，$CH_4$ 含量随温度升高略有增长，高温条件有助于碳氢键断

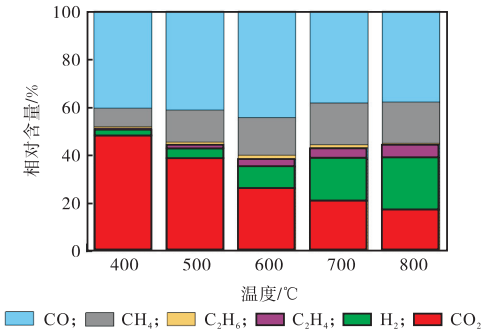
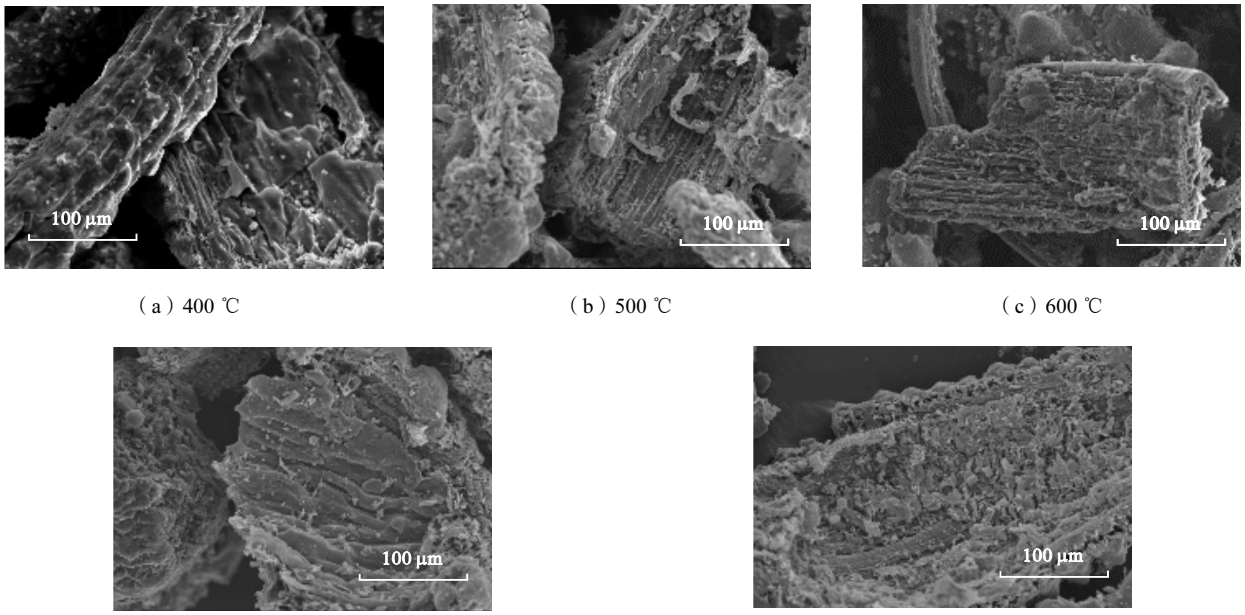


图 4　温度对稻壳热解气相组分变化的影响

Fig.4　Pyrolysis gas composition and changes in rice husk at different temperatures

裂和小分子气体释放. C_2 烃(主要为乙烷和乙烯)在 500 ~ 600 ℃范围内出现明显峰值(分别约 1.4% 和 1.7%),这可能与与木质素衍生酚类化合物的脱甲基化和 Diels-Alder 裂解路径有关[16],但在温度超过 700 ℃后,其含量迅速下降,符合高温条件下自由基缩合形成多环芳烃的趋势. 这说明较高温度有利于含氧官能团的脱羧反应,温度对含氧结构热裂解行为具有显著的调控作用.

温度对固相产物的影响如图 5 所示,扫描电镜结果显示,温度升高使炭表面由致密转为层状、孔隙增多且内部疏松,有机质在灰分中 K、Si 等矿物催化下加速分解与重组,促进比表面积与孔隙率提升.



(a) 400 ℃　(b) 500 ℃　(c) 600 ℃

(d) 700 ℃　(e) 800 ℃

图 5　不同温度下热解焦的扫描电镜图像

Fig.5　SEM images of pyrolysis coke at different temperatures

3　焦油中含氧化合物的生成及转化特性

3.1　稻壳热解过程中焦油组分分布特性

本文采用 GC-MS 测试方法对焦油组分进行分析,图 6 为稻壳热解产物的 GC-MS 总离子流谱图,可以看出四氢呋喃溶剂峰的洗脱时间区间(4 ~ 5 min),四氢呋喃溶剂峰与焦油组分峰明显分离,表明本实验可以有效避免溶剂对焦油组分分析的干扰. 表 2 是基于 GC-MS 测试的不同温度下稻壳焦油的化学成分和相对含量.

从表 2 可以看出,当热解温度低于 600 ℃时,焦油组分主要以苯酚类衍生物、呋喃类化合物以及单环芳烃为主,三者总相对含量(基于 GC-MS 峰面积归一化的相对占比总和)超过 60%. 此外,还检测到少量的酸、醛、酮和酯等含氧化合物. 该温度区间内,焦油中富含含氧基团,表明较低温有利于保留木质素和纤维素热裂解生成的初级含氧化合物,这一特征与已有研究关于焦油热转化特性的结论相一致[12-13].

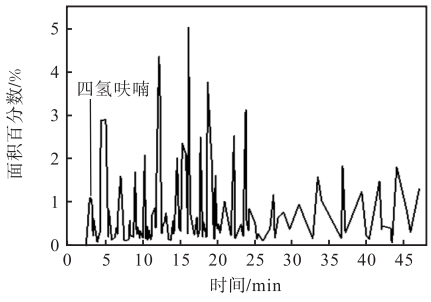


图 6　稻壳热解产物的 GC-MS 总离子流谱图(TIC)

Fig.6　GC-MS total ion flow spectra (TIC) of pyrolysis products from rice husk

表 2　不同温度下稻壳焦油的化学成分和相对含量

Tab.2　Chemical composition and relative content of rice husk tar at different temperatures

化合物类型	相对含量/%				
	T = 400 ℃	T = 500 ℃	T = 600 ℃	T = 700 ℃	T = 800 ℃
烷烃	0.51	0	0	0	0
烯烃	1.05	0.6	0.87	0	0
苯酚和苯酚衍生物	45.57	46.24	54.53	27.08	14.14
呋喃及其衍生物	15.39	16.68	9.23	7.15	0
醇	1.89	3.51	4.46	1.86	1.19
酸	3.12	3.15	2.53	0	0
醛	2.82	1.36	0	0	0
酮	10.38	10.45	4.41	0	0
酯	2.68	4.91	5.57	1.25	0
单环芳烃	3.11	1.9	3.5	17.7	1.9
多环芳烃	0.14	0.44	8.24	40.74	78.04
其他	13.34	10.72	6.66	4.23	2.72

当热解温度升高至 600 ℃以上时，焦油组分出现明显的结构重组特征. 苯酚类和呋喃类的总相对含量占比下降至 40% 以下，芳香族化合物（尤其是多环芳烃）的相对含量显著提高，在 600 ~ 800 ℃范围内多环芳烃相对含量由 8.24% 增加至 78.04%，其原因除高温促进芳构化外，还与高温下轻质含氧组分进一步转化有关，导致多环芳烃在相对含量上被显著富集. 同时，酸、醛、酮和酯类等不稳定含氧化合物在高温条件下完全消失，表明—OH、—O—等官能团具有热敏感性，易发生断裂、脱羧及芳构化反应，进一步转化为气态小分子或芳香族碳骨架结构. 这一现象与 Li 等[2]提出的含氧官能团热解转化路径相似.

3.2　酚类及其衍生物生成特性

从表 2 可以看出，焦油中酚类和呋喃类等含氧化合物的相对含量较高，且随温度变化明显，是本文关注的重点.

如图 7 所示，稻壳热解过程中焦油中主要酚类化合物的相对含量随温度表现出明显的阶段性变化. 整体来看，低温阶段以含支链和取代基的酚类为主，而在高温阶段，酚类组分逐渐简化并向结构更稳定的单环酚转变. 在中低温区间（400 ~ 600 ℃），邻苯二酚和对乙基苯酚的相对含量较高，是该阶段焦油的重要含氧组分，同时，苯酚、邻甲酚和 3，5-二甲基苯酚在约 500 ℃时开始出现并逐步增加，反映出木质素初始解聚产物在此温度区间进一步发生二次反应[18]. 当温度进一步升至 600 ℃以上时，支链较多的酚类物质含量持续下降，而 2，6-二叔丁基对甲酚在各温度下仍保持较高水平，表明高温条件下可能发生脱支或取代基结构转化等过程，更易生成该产物；同时，高温条件也促进了芳环裂解和小分子气体的释放，使部分酚类进一步分解或消失. 已有研究表明，稻壳中木质素是酚类化合物形成的主要来源[19]，其中以 β-O-4 芳基醚为主的连接结构在 400 ℃以上易断裂，侧链解聚生成以愈创木酚为代表的中间体，继而通过脱羧、脱甲氧基等反应转化为苯酚、邻苯二酚等二次酚类产物[20]. 因此，随着温度的升高，稻壳热解焦油中酚类化合物呈现由支链取代型向结构更简单、热稳定性更高的苯酚类逐步转化的趋势.

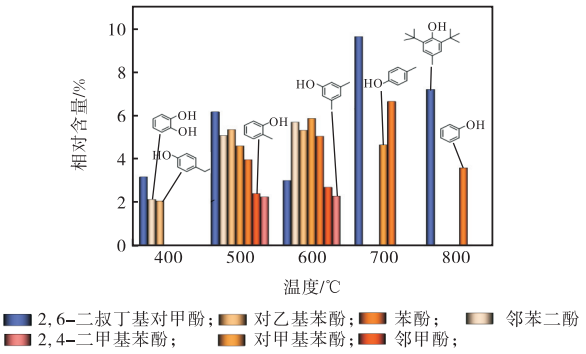


图 7　不同温度下焦油中主要酚类化合物相对含量变化

Fig.7　Changes in the relative content of major phenolic compounds in tar at different temperatures

之前有研究发现，在木质素单独热解过程中酚焦油的产率很低[21]，而在木质素与纤维素共热解时，纤维素热解释放的氢自由基能够稳定木质素热解中间体，从而促进其转化为酚类焦油，呈现协同效应. 此外，灰分中的矿质元素（如 K、Ca、Fe 等）在焦油的转化中也具有催化作用[22]. 总体而言，酚类焦油的生成受温度、生物质组成及反应协同作用的共同影响，其中 400 ~ 600 ℃有利于初级酚焦油的生成，600 ~ 800 ℃则主要生成次级酚类焦油.

3.3　呋喃类及其衍生物生成特性

如图 8 所示，稻壳热解过程中焦油中主要呋喃类化合物的相对含量随温度呈现出明显的阶段性变化. 2，3-二氢苯并呋喃、糠醛和糠醇等典型呋喃衍生物在中低温区间（400 ~ 600 ℃）相对含量较高，是该阶段焦油的主要含氧组分. 具体来看，在 400 ℃时，糠醛和糠醇的相对含量达到峰值，随着温度升高至 500 ℃，2，3-二氢苯并呋喃的产率显著增加，而糠醇的比例有所下降，反映出不同呋喃结构在中温条件下热稳定性和转化路径存在差异[23]. 这一规律与 El-Sayed 等针对半纤维素热解的研究结果相似，均表明糠醛类化合物在中低温条件下更易富集[24].

当热解温度进一步升高至 600 ℃以上时，焦油中呋喃类化合物的种类和含量均呈持续下降趋势. 特

别是糠醛和糠醇的相对含量在 700～800 ℃区间显著减少，至 800 ℃时几乎完全消失. 这一现象主要归因于呋喃骨架在高温下热稳定性较差，易发生裂解、缩合或重整反应，生成气态小分子产物或高分子碳质物（如炭黑）[25]. Deschamps 等[26]也观察到呋喃类在高温条件下快速裂解并向芳香族和多环芳香族化合物转化，进一步印证了本研究结果.

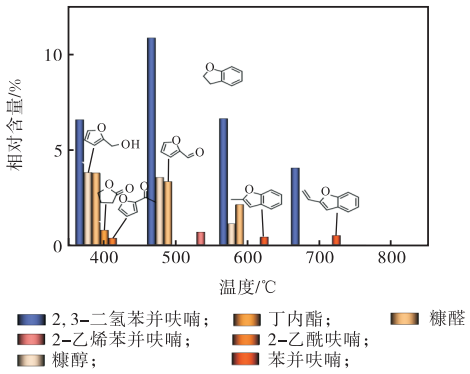


图 8　温度对焦油中主要呋喃类化合物相对含量变化的影响

Fig.8　Effect of temperature on changes in the relative content of major furan compounds in tar

4　结　论

本文搭建恒温管式炉热解反应实验系统开展稻壳惰性气氛下热解实验研究，并基于 GC-MS 测试方法分析了温度对稻壳热解产物特性的影响，进一步探究了含氧挥发物释放特征及焦油中含氧组分的变化规律，主要结论如下：

(1) 高温条件下热解反应更加彻底，随着温度从 400 ℃升至 800 ℃，液体产率由 45.8% 下降至 33.1%，而气体产率则由 13.6% 上升至 34.6%. 表明温度升高强化了挥发分释放并促进了焦油的裂解与二次反应，从而显著提高了气态产物生成.

(2) 焦油组分随温度演化呈现显著的结构重组特征. 在 400～600 ℃区间，苯酚类和呋喃类衍生物为主导组分，相对含量合计超过 60%；而在 600 ℃以上，两类含氧化合物明显减少，多环芳烃组分快速增加，在 800 ℃时其比例已超过 70%，反映出高温下脱羧、芳构化和缩合反应的加剧.

(3) 典型含氧组分的生成路径及演化趋势具有明确的温度依赖性. 酚类源于木质素单元的断裂与重排，中低温区有利于其初级生成，而高温则进一步经历脱支、缩合反应；呋喃类主要富集于 400～600 ℃，高温下逐步分解消失. 通过合理调控热解温度可实现典型含氧组分的选择性富集或抑制，从而改善焦油性质并提升利用潜力.

参考文献：

[1] Supriyanto，Ylitervo P，Richards T. Fast co-pyrolysis of wood and plastic：Evaluation of the primary gaseous products[J]. *Energy Conversion and Management*：*X*，2024，22：100613.

[2] Li G，Wang Z，Zuo L，et al. Regulating phenol tar in pyrolysis of lignocellulosic biomass：Product characteristics and conversion mechanisms[J]. *Bioresource Technology*，2024，409：131259.

[3] Hao J，Xu F，Yang D，et al. Analytical pyrolysis of biomass using pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*，2025，208：115090.

[4] Chen G，Liu C，Ma W，et al. Co-pyrolysis of corn cob and waste cooking oil in a fixed bed[J]. *Bioresource Technology*，2014，166：500-507.

[5] Liu Y，Song J，Diao X，et al. Removal of tar derived from biomass gasification via synergy of non-thermal plasma and catalysis[J]. *Science of the Total Environment*，2020，721：137671.

[6] Zachl A，Soria-Verdugo A，Buchmayr M，et al. Stratified downdraft gasification of wood chips with a significant bark content[J]. *Energy*，2022，261：125323.

[7] Chen D，Gao A，Ma Z，et al. In-depth study of rice husk torrefaction：Characterization of solid，liquid and gaseous products，oxygen migration and energy yield[J]. *Bioresource Technology*，2018，253：148-153.

[8] 刘　亚，黄　胜，吴诗勇，等. 生物质燃气中焦油净化的试验研究[J]. 太阳能学报，2020，41(1)：161-165.
Liu Ya，Huang Sheng，Wu Shiyong，et al. Experimental study on purification of tar frombiomass gas producer[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*，2020，41(1)：161-165(in Chinese)

[9] Li J，Xu K，Yao X，et al. Slow pyrolysis experimental investigation on the tar formation and its pyrolysis behavior characteristics[J]. *Process Safety and Environmental Protection*，2024，184：660-671.

[10] Chen L，Liao Y，Guo Z，et al. Products distribution and generation pathway of cellulose pyrolysis[J]. *Journal of Cleaner Production*，2019，232：1309-1320.

[11] Usino D O，Supriyanto，Ylitervo P，et al. Influence of temperature and time on initial pyrolysis of cellulose and xylan[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*，

2020，147：104782.

[12] Sun T，Chen Z，Wang R，et al. Influences of the reaction temperature and catalysts on the pyrolysis product distribution of lignocellulosic biomass(aspen wood and rice husk)[J]. *Polymers*，2023，15(14)：3104.

[13] Muzyka R，Chrubasik M，Dudziak M，et al. Pyrolysis of tobacco waste：A comparative study between Py-GC/MS and fixed-bed reactors[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*，2022，167：105702.

[14] Hu Z，Gao P，Wang B，et al. Decoupling study of municipal solid waste gasification：Effect of pelletization on pyrolysis and gasification of pyrolytic char[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*，2024，12(6)：114334.

[15] Yu Y，Yang Y，Cheng Z，et al. Pyrolysis of rice husk and corn stalk in auger reactor(Part 1)：Characterization of char and gas at various temperatures[J]. *Energy and Fuels*，2016，30(12)：10568-10574.

[16] Lu X，Gu X. A review on lignin pyrolysis：pyrolytic behavior，mechanism，and relevant upgrading for improving process efficiency[J]. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*，2022，15：106.

[17] Hu B，Lu Q，Zhang Z X，et al. Mechanism insight into the fast pyrolysis of xylose，xylobiose and xylan by combined theoretical and experimental approaches[J]. *Combustion and Flame*，2019，206：177-188.

[18] Jiao Z，Qiu P，Chen X，et al. Effects of volatiles and active AAEMs interaction with char on char characteristics during co-pyrolysis[J]. *Renewable Energy*，2023，208：618-626.

[19] Kumar A，Biswas B，Kaur R，et al. Predicting the decomposition mechanism of Loktak biomass using Py-GC/MS[J]. *Environmental Technology & Innovation*，2021，23：101735.

[20] Wang L，Yin J，Jiang J，et al. Revealing G-lignin model compounds pyrolysis behavior：β-O-4 and 5-5′ dimer and trimer[J]. *Fuel*，2022，317：123531.

[21] Leng E，Guo Y，Chen J，et al. A comprehensive review on lignin pyrolysis：Mechanism，modeling and the effects of inherent metals in biomass[J]. *Fuel*，2022，309：122102.

[22] Puri L，Hu Y，Naterer G. Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis[J]. *Frontiers in Fuels*，2024，2：1378361.

[23] Dong C Q，Zhang Z F，Lu Q，et al. Characteristics and mechanism study of analytical fast pyrolysis of poplar wood[J]. *Energy Conversion and Management*，2012，57：49-59.

[24] El-Sayed S A. Chemical products yielded from different pyrolysis processes of rice waste residues：A comprehensive review[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*，2025，15(14)：20615-20655.

[25] Shen D K，Gu S，Bridgwater A V. Study on the pyrolytic behaviour of xylan-based hemicellulose using TG–FTIR and Py–GC–FTIR[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*，2010，87(2)：199-206.

[26] Deschamps T，Kanniche M，Grandjean L，et al. Modeling of vacuum temperature swing adsorption for direct air capture using aspen adsorption[J]. *Clean and Fuels*，2022，4(2)：258-275.