

Research Article

Study on Fuel Oil Production from Waste Tires via Fixed-Bed Pyrolysis

Xiaoxu Fan¹ , Liguang Yang^{1,*} , Hongjian Chen² 

¹Energy Research Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan, China

²Shandong Environmental Protection Industry Research Institute Co., Ltd., Jinan, China

Abstract

Pyrolysis of waste tires for oil production is an effective approach for resource utilization. To optimize the process parameters of fixed-bed pyrolysis of waste tires and clarify the product characteristics, this study employed a fixed-bed electric heating system to conduct pyrolysis experiments on waste tire chunks under a nitrogen atmosphere. The effects of pyrolysis time (1h and 2h) and pyrolysis temperature (270°C~620°C) on product yields were investigated, and the reliability of the experimental data was verified through repeated tests. Furthermore, the chemical composition of the pyrolytic oil was analyzed using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), while the pyrolytic char was subjected to proximate analysis, calorific value measurement, and ash fusibility testing. The results showed that extending the pyrolysis time from 1h to 2h resulted in a limited increase in oil yield (less than 1%), indicating that the tires were essentially completely cracked within 1h. As the pyrolysis temperature increased, the oil yield first rose and then declined. The optimal pyrolysis temperature range was 440°C~460°C, under which the oil yield reached 35.2%~40.1% and the oil-to-gas ratio was 2.3~2.9. The average yield of solid products ranged from 44% to 53%, with an average steel wire content of 15.5%. After the temperature exceeded 320°C, the pyrolytic carbon black yield stabilized at 29%~34%. A total of 218 effective components were detected in the pyrolytic oil, among which 13 substances, including limonene (11.87%), ethanol, and phenol, each accounted for more than 1%. The pyrolytic carbon black had a fixed carbon content exceeding 80%, a calorific value of approximately 30 MJ/kg, and an ash melting point ranging from 1170°C to 1220°C. This study provides data support for the optimization of fixed-bed pyrolysis processes for waste tires and the graded utilization of pyrolysis products.

Keywords

Waste Tires, Fixed-bed Pyrolysis, Pyrolytic Oil, Pyrolytic Carbon Black, Oil Yield, Pyrolysis Temperature, Resource Utilization

*Correspondence: Liguang Yang (ylg_1978@163.com)

Received: 16 July 2026; **Accepted:** 26 August 2026; **Published:** 4 September 2026



Copyright: © The Author(s), 2026. Published by Science Publishing Group. This is an **Open Access** article, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

废轮胎固定床热解制油研究

范晓旭¹, 杨立国^{1,*}, 陈红健²

¹ 山东省科学院能源研究所, 济南, 中国

² 山东环保产业研究院有限公司, 济南, 中国

摘要

废轮胎热解制油是实现其资源化利用的有效途径。为优化废轮胎固定床热解制取燃油的工艺参数并明确产物特性, 本研究采用固定床电加热系统, 以废轮胎块为原料, 在氮气气氛下进行热解实验。考察了热解时间(1 h和2 h)和热解温度(270℃~620℃)对产物产率的影响, 并通过重复性实验验证数据的可靠性。此外, 采用气质联用仪(GC-MS)对热解油的化学组分进行分析, 同时对热解炭进行工业分析、热值及灰熔融性测试。结果表明: 热解时间从1 h延长至2 h对产油率提升有限(增幅<1%), 说明轮胎在1 h内基本完成裂解; 随热解温度升高, 产油率呈先升后降趋势, 最佳热解温度区间为440℃~460℃, 此时产油率达35.2%~40.1%, 油气比为2.3~2.9; 固体产物平均产率为44%~53%, 其中钢丝含量平均为15.5%, 热解炭黑产率在320℃后稳定在29%~34%; 热解油中检测到218种有效成分, 其中柠檬油精(11.87%)、乙醇、苯酚等13种物质含量超过1%; 热解炭固定碳含量超过80%, 热值约30 MJ/kg, 灰熔点为1170℃~1220℃。本研究为废轮胎固定床热解工艺的优化及热解产物的分级利用提供了数据支撑。

关键词

废轮胎, 固定床热解, 热解油, 热解炭, 产油率, 热解温度, 资源化利用

1. 引言

随着汽车工业的快速发展和轮胎保有量的持续增长, 废旧轮胎的产生量逐年攀升。据统计, 全球每年约有数百万吨废轮胎亟待处理, 大量堆积的废轮胎不仅占用宝贵的土地资源, 而且极易滋生蚊虫、引发火灾, 释放有毒烟雾, 对生态环境和公众健康构成严重威胁。如何实现废轮胎的无害化、减量化和资源化处置, 已成为世界各国共同关注的环保与能源课题[1-3]。

目前, 废轮胎的处置方式主要包括露天堆放、填埋、焚烧、再生胶生产、胶粉制备以及热解等。其中, 露天堆放和填埋已逐渐被淘汰, 焚烧虽能回收部分热能但易产生二次污染, 再生胶和胶粉生产对原料要求较高且市场容量有限。相比之下, 热解技术能够在惰性气氛下将废轮胎转化为热解油、热解炭和热解气三相产物, 具有二次污染小、资源回收率高、产物利用途径广等优势, 被认为是处理废轮胎最有效的方法之一。在各种热解产品中, 热解油作为最主要的目标产物, 因其富含高附加值化学成分而备受关注[4-7]。

废轮胎热解油具有较高的热值, 具备良好的燃料替代潜力[8]。已有文献报道, 废轮胎真空热解油的热值可达约

44 MJ/kg, 远高于烟煤和木炭, 同时其灰分含量低于0.05%, 硫含量仅为0.8%~1.5%, 残炭量约为1%~2%, 这些特性使其具备优异的燃烧性能。因此, 热解油不仅可以直接作为工业锅炉或电站锅炉的燃料油使用, 还可以经过倾析、离心和过滤等预处理工序后, 与其他燃料(如重油、柴油)混合调配, 或进一步加工提炼为高附加值化学品[9-11]。

在热解工艺参数中, 热解温度和升温速率是影响产物分布和油品质量的关键因素。已有研究表明, 采用固定床热解装置处理废轮胎时, 最高的热解液产率通常在较低的热解终温(约450℃)条件下取得, 说明低温热解有助于热解油的生成[12-14]。然而, 较低的升温速率会导致挥发分在反应区内停留时间过长, 加剧大分子挥发分的二次裂解反应, 生成更多不可冷凝的小分子气体, 从而降低热解油产率[15-17]。这意味着, 单纯追求低温并不足以保证较高的油收率, 升温速率同样是需要优化的重要参数[18-20]。

此外, 现有研究中固定床热解的实验温度多集中在400℃~600℃区间, 对更低温度段(如270℃~400℃)的系统考察较为薄弱, 且多数实验采用的升温速率偏低(通常为5℃/min~20℃/min), 未能充分揭示快速升温条件下废

轮胎的热解行为及其对产物组成的影响规律[21]。针对上述研究空白，本文将热解温度范围向低温方向拓宽至270 ℃，同时将升温速率提高至40 ℃/min~50 ℃/min，系统考察热解温度和热解时间对产物产率的影响，确定最佳热解工艺参数，并对热解油和热解炭的理化特性进行深入分析，以期为废轮胎固定床热解制取燃油的技术开发与工艺优化提供基础实验数据和理论依据。

2. 实验概述

本试验采用图1所示的固定床式电加热系统进行测试。经过破碎后的轮胎料块尺寸一般小于50mm×70mm，放入固定床式电加热炉进行加热，加热程度由温度测试调节系统控制，升温速率为40 ℃/min ~50 ℃/min，每次测试物料量在110g~180g范围内。试验采用N₂将轮胎物料隔绝空气，防止氧化，并将热解产生的油气混合物携带出加热系统。混合气体进入双级水冷凝系统，冷却水温度约10 ℃，热解油被冷凝为液体，剩余不凝结燃气排入大气。剩余的物料残余固体产物为热解炭黑和钢丝的混合物，经过N₂隔绝空气自然冷却后，从试验系统取出，挑拣出钢丝，分别进行称量。

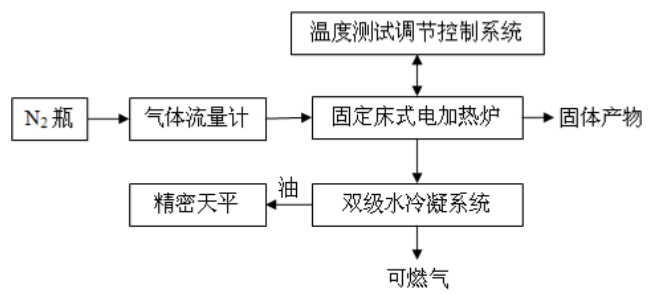


图1 实验系统示意图。

实验采用的固体废弃物为废轮胎，细挫磨成粉末。表1为其元素分析和工业分析。

表1 试样元素分析和工业分析。

项目	结果
元素分析（收到基，%）	C 79.93
	H 6.69
	O 4.44
	N 0.49
	S 1.67
	M 2.09

项目	结果
工业分析（干燥基，%）	A 7.56
	V 59.98
	FC 30.37
热值（kJ/kg）	33595.49

3. 实验结果与分析

3.1. 热解时间的影响

实验选定320 ℃、370 ℃、420 ℃、470 ℃、520 ℃五个典型的热解工况，分析热解时间1h和2h对焦油产率的影响，结果如图2所示。可以看出，热解2h的产油率比1h的略高，最高不超过1%，因此可以认为大部分轮胎在1h内可以被完全裂解掉。

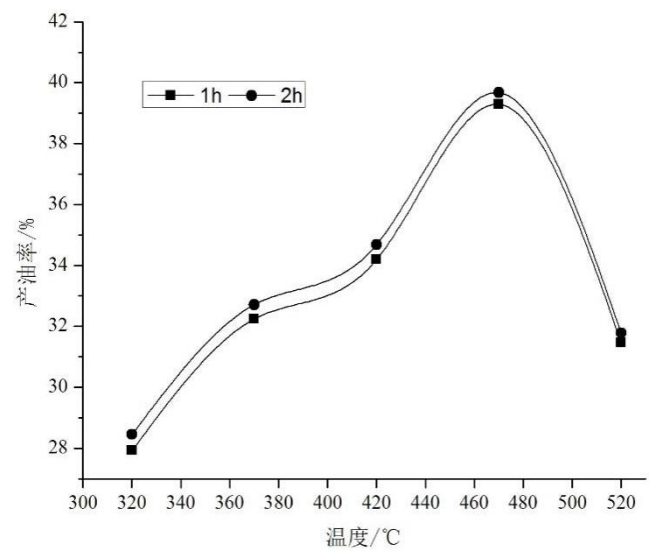


图2 热解时间对产油率的影响。

3.2. 热解温度的影响

本实验热解温度范围取270 ℃-620 ℃，分两个过程，第一过程，等间距每隔50 ℃进行测试，得到最优温度区间的大致范围，第二过程，缩小温度间隔，细化最优反应温度区间，最终细化至温度间隔为10 ℃。实验结果如图3所示。由3（a）图可知，在270 ℃-620 ℃范围内，随着温度升高，产油率先增加后减小，根据(d)图油气比分析，最佳热解温度为450 ℃，此时产油率40.1%，油气比为2.86。整个实验范围内，热解炭产率为46%-55%，平均产率为48%。

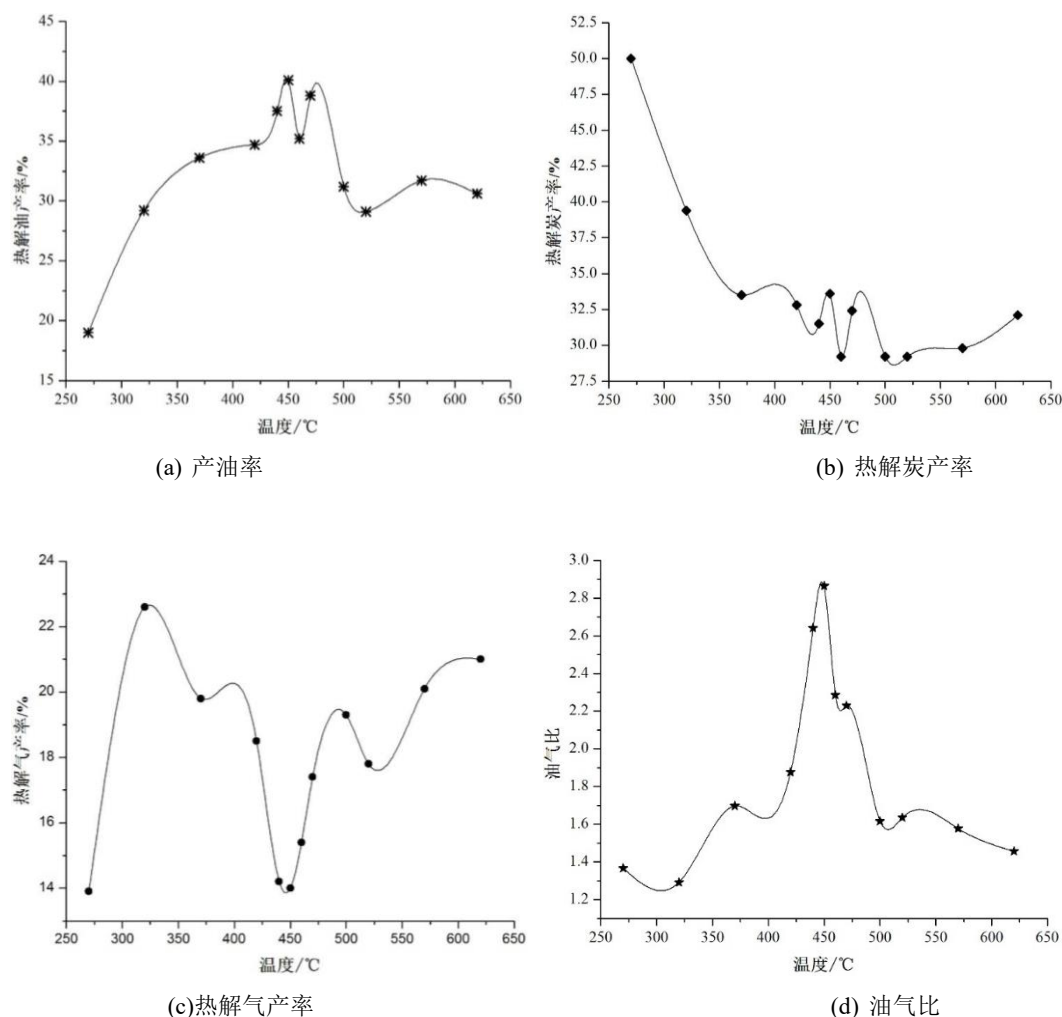
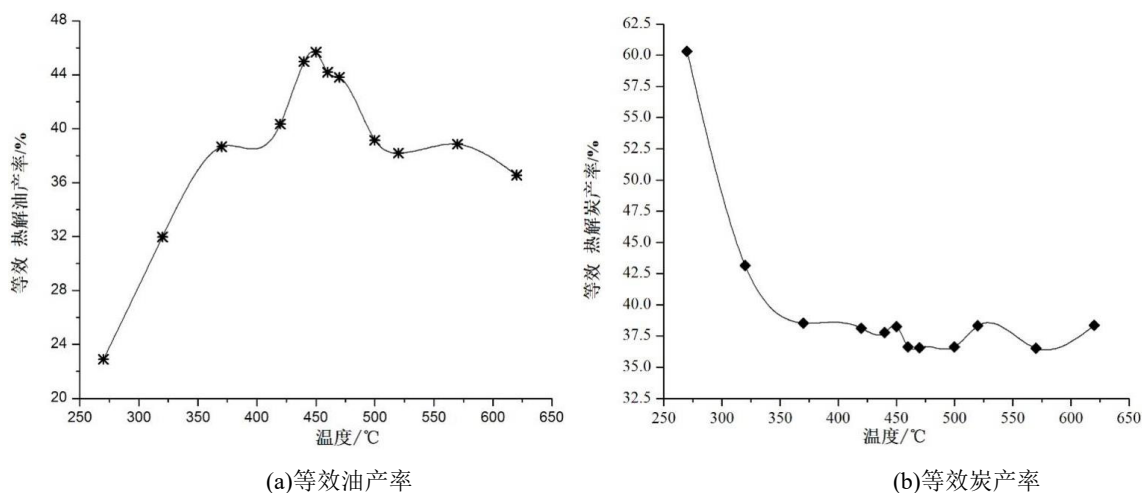


图3 热解温度对产物产率的影响。

图3(a)中460 °C时, 产油率略有一个小的波谷, 这是因为此实验点的料块钢丝含量偏高。为减少由于每次试样钢丝含量不同而对实验结果产生的影响, 可将钢丝剔除, 计算出等效结果, 即等效产率 = 原产率 ÷ (100 - 钢丝产率) × 100%, 计算结果如图4所示。370 °C以前, 轮胎不能充

分反应, 导致热解炭含量高。370 °C-620 °C温度范围内, 等效的热解炭产量在36.5%-38.6%之间, 平均37.6%。在该温度范围内, 随着热解温度的升高, 等效产油率先增加后减小, 在450 °C达到最高值45.7%。这与图3(d)的分析结果一致。



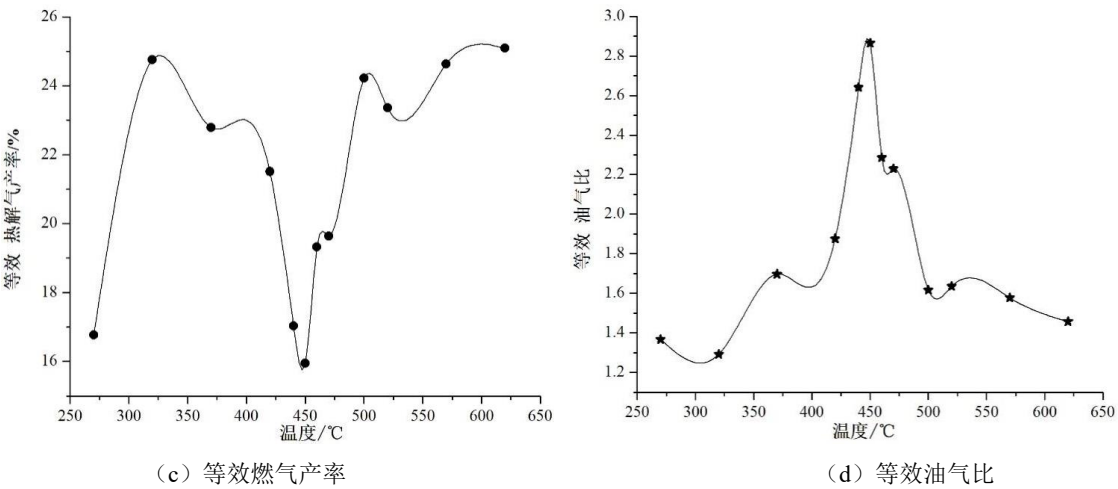


图 4 剔除钢丝后的等效结果。

3.3. 误差分析

为了验证本次实验数据的可靠性程度，分别在420 ℃和520 ℃各进行了3次重复性实验，实验结果如下图5和图6所示。从等效的成分产率来看，本次实验误差不超过1%，实验结果较为可靠。

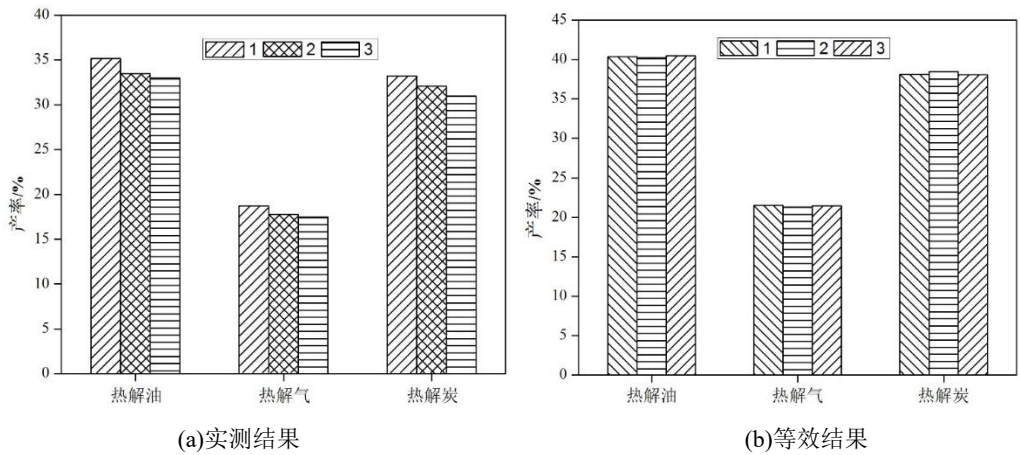


图 5 420℃时可靠性分析

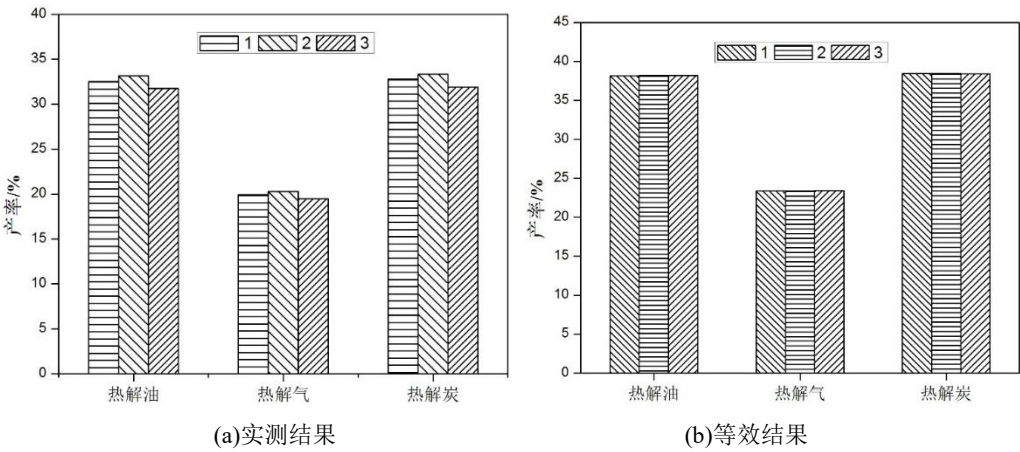


图 6 520℃时可靠性分析。

3.4. 热解产物特性分析

3.4.1. 热解油特性分析

采用Agilent 7890A/5975C型气质联用仪分析测试油样品，柱温初始温度100℃，进样口温度250℃。载气采用Ar，试验采用分流模式。本次测试共检测到218种有效物质成分，其中共有13种化学物成分所占比例超过了1%，主要为柠檬油精、乙醇、苯酚和各种烯烃类物质，见表2。其余205种物质单项成分比例均低于1%（比例低于1%的物质未在表2列出）。

表 2 热解油主要化学物成分。

序号	成分比例/%	成分名称
1	11.87	柠檬油精
2	2.90	乙醇
3	2.28	苯酚
4	2.07	二甲基环辛二烯
5	1.69	二甲基八三烯
6	1.56	苯
7	1.49	喹啉
8	1.19	螺环烃
9	1.15	苯并噻唑
10	1.11	二氢化吡唑
11	1.10	双环庚烷
12	1.06	蛇麻烯
13	1.02	苯乙烯

3.4.2. 热解炭特性分析

对热解炭进行工业分析、热值以及灰熔融性的测试，结果见表3。热解炭中挥发分含量低于4.5%，废轮胎已基本裂解完毕。热解炭固定碳含量超过80%，热值约30MJ/kg，热解炭灰熔点高于1150℃。

表 3 热解炭特性。

项目	名称	结果
工业分析/%	水分	0.84
	灰分	14.18
	挥发分	4.49

项目	名称	结果
灰熔融性/℃	固定碳	80.49
	热值/kJ·kg ⁻¹	29721.92
	变形温度	1172
	软化温度	1224
	流动温度	1239

4. 结论

本章进行了废轮胎固定床热解制取燃油的小试实验和中试试验研究，主要结论如下：

- (1) 废旧轮胎块在1h内基本可以被裂解完毕，2h后产油率比1h产油率略高，但不超过1%；
- (2) 最佳热解温度区间为440℃~460℃，此时产油率在35.2%~40.1%，产气率14.0%~15.4%，油气比2.3~2.9；
- (3) 固体物平均产率44%~53%；轮胎钢丝含量8.7%~23.8%不等，平均含量15.5%；热解温度超过320℃之后，热解炭黑产率维持在29%~34%，与热解温度关联不大；
- (4) 热解油中有效成分超过200种，其中13种物质单项成分超过1%，主要为柠檬油精、乙醇、苯酚和各种烯烃类物质。热解炭黑固定碳含量超过80%，挥发份和水分含量极低，发热量约30MJ/kg，炭黑灰熔点约1170℃~1220℃。

致谢

本文为山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目《废轮胎资源化循环利用关键技术研究》(2024TSGC0037)的阶段性成果之一。

参考文献

[1] 严智慧. 废旧轮胎热解制备炭材料装备及工艺研究 [D]. 河南科技学院, 2023.
<https://doi.org/10.27704/d.cnki.ghnkj.2023.000027>

[2] 唐丹宁, 徐英志, 张远文, 王晓东等. 废轮胎的资源化处理与热解技术研究进展 [J]. 弹性体, 2026, 36(2): 71-76.
<https://doi.org/10.16665/j.cnki.issn1005-3174.2026.02.004>

[3] 纪德强, 彭佳, 王玉迎, 苑丹丹等. 废旧轮胎热解理论与技术研究进展 [J]. 材料工程, 2026, 54(4): 176-190.

[4] 李伟, 杨程, 刘亚青, 王中天. 反应温度对废轮胎热解油催化加氢反应性能的影响 [J]. 石化技术与应用, 2025, 43(3): 187-191.
<https://doi.org/10.19909/j.cnki.ISSN1009-0045.2025.03.0187>

- [5] 赵光杰, 金建龙, 金亮, 毛宇炜等. 废轮胎与生物质共热解特性及产物分布研究 [J]. 低碳化学与化工, 2025, 50(6): 74-80.
- [6] 夏勇, 阳宇, 朱聪, 欧阳少波等. 废轮胎热解过程中的动力学与热力学特性及热解油组分分析 [J]. 低碳化学与化工, 2023, 48(4): 36-45.
- [7] 马良妍. 废轮胎分质转化及热解焦油催化提质性能研究 [D]. 大连理工大学, 2025.
<https://doi.org/10.26991/d.cnki.gdllu.2025.001602>
- [8] 潘宇涵. 废轮胎梯级热解装置开发及产物高值化利用研究 [D]. 浙江大学, 2023.
<https://doi.org/10.27461/d.cnki.gzjdx.2023.001323>
- [9] 沈孟飞, 宋虎潮, 邢定一, 王博等. 废旧轮胎热解吸附强化重整制氢特性及经济性分析 [J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(10): 222-232.
- [10] 吴淑澄. 废轮胎热解的化学产品制炭黑关键工艺集成与10万t/a工程应用评估 [D]. 浙江大学, 2024.
<https://doi.org/10.27461/d.cnki.gzjdx.2024.001079>
- [11] 郭怡君, 李 军, 黄宏宇, 小林敬幸. 有机固体废弃物热解技术及热解气组成综述 [J]. 新能源进展, 2023, 11(2): 106-122.
- [12] 刘晓伟, 庞赞佶, 吴孟, 杨辰等. CaO 原位催化废轮胎热解产气特性研究 [J]. 应用化工, 2026, 55(6): 1489-1494.
<https://doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20260325.016>
- [13] 单体仑, 高晓东, 田晓龙, 边慧光等. 多种动力学模型应用于废旧轮胎的热解机理研究 [J]. 橡胶工业, 2024, 71(3): 197-203.
- [14] 蒋好. 废轮胎高温热解特性及炭黑形成与调控机制研究 [D]. 华中科技大学, 2024.
<https://doi.org/10.27157/d.cnki.ghzku.2024.000436>
- [15] 陈亚娟. 废轮胎热解/气化特性及反应机理研究 [D]. 北京交通大学, 2024.
<https://doi.org/10.26944/d.cnki.gbifu.2024.001336>
- [16] 张鑫. 高温烟气热解废轮胎过程中硫及重金属的转化特性研究 [D]. 山东大学, 2024.
<https://doi.org/10.27272/d.cnki.gshdu.2024.004263>
- [17] 郝东杰. 基于组分解析的废轮胎热解特性研究 [D]. 中北大学, 2025.
<https://doi.org/10.27470/d.cnki.ghbgc.2025.000284>
- [18] 王树宇, 薛志亮, 朱静, 付鑫等. 废弃全钢胎颗粒热解过程中质量和形态变化研究 [J]. 化工学报, 2025, 76(7): 3459-3467.
- [19] 吴孟. 氧化钙添加下废旧橡胶轮胎热裂解产物特性研究 [D]. 内蒙古科技大学, 2023.
<https://doi.org/10.27724/d.cnki.gnmkg.2023.000482>
- [20] 严智慧, 徐贝贝, 刘恒辰, 冯宜鹏等. 制备方法对废旧轮胎热解制备的炭材料性能的影响 [J]. 湖北理工学院学报, 2023, 39(4): 21-25.
- [21] 马玉芹. 城市固体废弃物热化学处理实验研究 [D]. 华北电力大学, 2014.