

城市生活垃圾解耦燃烧污染物排放特性研究

杨若辰¹, 姜磊¹, 佟灿², 宋丽², 岳佳鑫², 张雄^{1,*},

廖玮¹, 邵敬爱^{1,3}, 杨海平¹, 陈汉平¹

(1. 华中科技大学煤燃烧与低碳利用全国重点实验室, 湖北武汉 430074; 2. 北京华宇辉煌生态环保科技股份有限公司, 北京 100000; 3. 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 随着我国社会经济的持续发展, 城市居民日常生活产生的生活垃圾 (Municipal Solid Waste, MSW) 逐年增加。MSW 解耦燃烧技术能够实现低 NO_x 燃烧, 具有重要研究意义。基于此, 采用两段式固定床反应器, 探究了反应温度 (T)、过量空气系数 (a) 以及气体停留时间 (t) 对 MSW 解耦燃烧过程中气体燃尽特性、尾气污染物及颗粒物排放特性的耦合影响, 并在此基础上对 MSW 解耦燃烧工艺进行了优化。研究结果表明, 高温富氧条件有助于提升燃尽效果; 而 NO 的生成依赖自由基的积累和高温激发反应路径。不同工况下颗粒物的生成呈非单调变化, 但最低颗粒物排放工况与最佳燃尽工况相对应, 表明二者存在协同控制关系。在 a 较高和 t 较短时, 高活性 PAHs 及二噁英前体易于富集, 增加了二噁英生成风险; 适当延长 t 并控制 a 在 1.5 左右, 可显著降低二噁英的生成趋势。综合考虑燃尽效率、颗粒物和 NO_x 控制效果, $T=850\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $a=1.5$ 、 $t=2.5\text{ s}$ 的工况为该温度下的最佳工况; 而在 $T=1\text{ }000\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $a=1.5$ 、 $t=2.5\text{ s}$ 时, 燃尽效率可进一步提高, 污染物抑制效果也更为显著。该研究为城市生活垃圾清洁高效能源化利用提供了技术参考。

关键词: 城市生活垃圾; 解耦燃烧; 燃尽特性; 颗粒物; 二噁英

中图分类号: X799.3

文献标识码: A

Pollutant Emission Characteristics During Decoupling Combustion of Municipal Solid Waste

YANG Ruochen¹, JIANG Lei¹, TONG Can², SONG Li², YUE Jiaxin², ZHANG Xiong^{1,*},
LIAO Wei¹, SHAO Jingai^{1,3}, YANG Haiping¹, CHEN Hanping¹

(1. National Key Laboratory of Coal Combustion and Low Carbon Utilization, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Beijing Huayuhuihuang Eco-Environmental Protection Technology Co., Ltd., Beijing 100000, China; 3. College of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the rapid development of China's socio-economic landscape, the volume of municipal solid waste (MSW) generated from daily urban life has been increasing steadily. MSW decoupling combustion technology holds significant research value due to its ability to reorganize the combustion stages of volatile components. This staged approach facilitates low- NO_x combustion while offering inherent advantages such as system simplicity and robust environmental adaptability. In this study, a two-stage fixed-bed reactor was employed to investigate the combined effects of reaction temperature (T), excess air ratio (a), and gas residence time (t) on the gas burnout behavior, flue gas pollutant emissions, and particulate matter characteristics during the decoupling combustion of MSW. The

收稿日期: 2025-06-25

修回日期: 2025-09-09

接受日期: 2025-09-11

DOI: 10.20078/j.eep.20251003

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (52176187)

第一作者: 杨若辰 (2000—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 硕士研究生, 主要研究方向为 CO_2 催化转化。E-mail: m202271288@hust.edu.cn

*通讯作者: 张雄 (1987—), 男, 湖北广水人, 副教授, 主要研究方向为能源清洁高效利用。E-mail: zhangxiong107@hust.edu.cn

pyrolysis stage primarily yielded CH_4 and CO as the dominant combustible gas components. Results demonstrated that higher T and a significantly enhanced the combustible gas burnout efficiency. In contrast, extending t exerted a comparatively weaker positive influence on burnout. Regarding nitrogen oxides, NO formation was found to be strongly dependent on free radical accumulation and high-temperature reaction pathways, while NO_2 generation was primarily governed by the NO oxidation rate and remained largely unaffected by variations in t . PM generation displayed a complex, non-monotonic response under different decoupling combustion conditions. Crucially, the operational condition yielding the minimum PM production rate exhibited a high degree of overlap with the condition achieving optimal combustible gas burnout. This strong correlation suggests a synergistic relationship between PM suppression and efficient burnout control. However, adverse effects were observed under high a combined with short t , where conditions favored the enrichment of highly active polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), consequently elevating the potential risk of dioxin formation. Although higher T can promote PAH cracking, effective dioxin suppression necessitates complementary measures such as rapid cooling and efficient adsorption techniques downstream. Comprehensive analysis identified the parameter set of $850\text{ }^\circ\text{C}$, $a=1.5$, and $t=2.5\text{ s}$ as offering a well-balanced performance profile under this temperature. This condition achieved satisfactory combustible gas burnout, effective PM suppression, and significant NO_x reduction, demonstrating considerable promise for practical engineering applications. While the condition of $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$, $a=1.5$, and $t=2.5\text{ s}$ delivered superior burnout and overall pollutant suppression, the substantially higher energy input required at this elevated temperature presents a significant trade-off, potentially diminishing its net energy efficiency and economic viability. This study provides essential data and insights for optimizing MSW decoupling combustion systems towards cleaner and more efficient waste-to-energy conversion.

Keywords: Municipal Solid Waste; Decoupling combustion; Burnout characteristics; Particulate matter; Dioxins

0 引言

随着经济的发展,人民的生活水平与质量日渐提高,日常消费中产生的城市生活垃圾(Municipal Solid Waste, MSW)产量及清运量逐步增长^[1]。2020年,我国生活垃圾的总清运量达2.35亿t,平均年增长率为4.82%。目前,MSW处理问题已成为我国可持续发展道路上的主要障碍之一,实现MSW的高效、清洁处理迫在眉睫^[2]。

罗永浩等^[3]发现,在传统MSW热处理模式下,热解气中含有大量 NO_x 和二噁英前驱体。此外,GLARBORG等^[4]进一步研究表明,MSW热解资源化程度有限、污染物排放高等局限性与塑料等高分子聚合物热解油中重质组分较多密切相关。

解耦燃烧技术最先由中国科学院过程工程研究所于1995年提出^[5]。在燃烧过程中,富氧和高温条件有利于MSW的充分燃烧,但也加剧了 NO_x 的形成;贫氧和低温条件下,炉膛内存有大量

的还原性气体,有利于抑制 NO_x 形成,但燃烧效率较低。通过优化解耦燃烧炉膛结构,先在低温区抑制 NO_x 生成,再在氧化区进行充分燃烧,实现在保证燃烧效率的情况下降低 NO_x 排放^[6]。

与直接焚烧相比,解耦燃烧技术可以实现MSW热解气的高效、清洁利用^[7],该技术具有二噁英、 NO_x 等污染物及颗粒物排放水平低^[8]、环境适应性强^[9]等优势,具有深入研究及大规模应用价值。

在MSW解耦燃烧技术中,反应温度、过量空气系数、气体停留时间是影响MSW解耦燃烧尾气污染物排放特性的重要因素^[10]。DONG等^[11]基于解耦燃烧技术对稻壳进行初步研究,结果表明,解耦燃烧可以实现超过36%的 NO_x 减排。LI等^[12]研究发现,耦合低温还原气氛热解及高温氧化气氛燃烧可以实现燃料的低 NO_x 排放。刘新华等^[13]进一步研究表明,解耦燃烧主要通过时间和空间上解除燃料热解与半焦燃烧的耦合,重构挥发分与半焦燃烧反应,实现低 NO_x 燃烧。

由于 MSW 组成复杂,在解耦燃烧过程中热解产物的气固分配以及气固产物性质对解耦燃烧的 NO_x 减排效果有重要影响^[14-15]。QI 等^[16]在此基础上采用两段式固定床反应器,探究了不同氧浓度条件下 MSW 模化物解耦燃烧尾气中的 NO_x 排放特性。研究发现富氧燃烧能够有效抑制 MSW 燃烧过程中 NO_x 的生成,且该趋势随着氧浓度的提高而加强。SARABHORN 等^[17]在中式规模台架上对木屑进行解耦燃烧,研究表明,解耦燃烧可以通过优化燃烧过程降低燃烧温度,进而实现 NO_x 排放量的降低。

在 MSW 解耦燃烧过程中,尾气焦油的生成特性是评价污染物排放特性的重要指标。一方面,超细颗粒物由烟尘、挥发性碱盐和其他难降解无机盐组成^[18]。其中,烟尘由气态碳氢化合物和 PAHs 等前体经化学链生长、聚集和石墨碳化产生^[19]。WANG 等^[20]发现,在 MSW 热解气化过程中,控制反应温度为 900~1 000 °C 时,MSW 焦油向烟尘转化速率明显提高。此外,MSW 中的碱金属盐也会促进烟尘等其他超细颗粒物的形成。LIU 等^[21]探究了在不同反应温度下 MSW 燃烧颗粒物成核特性,发现升高燃烧温度会抑制超细颗粒通过聚结途径生长,进一步证明 MSW 解耦燃烧能够有效抑制颗粒物的生成。反应温度过高会增加系统运行成本,探究不同反应条件下颗粒物生成特性对现有 MSW 处理厂家的生产具有重要指导意义。另一方面,焦油中的苯和 PAHs 是二噁英的重要前驱体^[22],探究不同条件下焦油中苯和 PAHs 的生成特性能够间接反映二噁英生成趋势。二噁英的主要形成途径包括高温气相合成^[23]和低温再合成^[24]。HAN 等^[25]基于 PVC 和杨木共热解的研究表明,芳烃的氯化是二噁英生成的主要途径,该反应主要发生在 200~400 °C。李晓东等^[26]研究表明,MSW 燃烧尾气中 PAHs 含量与二噁英含量呈明显正相关,同时苯并[a]蒽等高活性 PAHs 与二噁英产量的关联性较大,可以作为间接表征 MSW 燃烧过程中二噁英特性的信号物质。基于此,MENG 等^[27]对 17 种 MSW 模化物燃烧尾气中二噁英生成特性的研究表明,通过促进焦油中高活性苯和 PAHs 的裂解转化,可以有效抑制二噁英的生成。然而,MSW 来源复杂,无法实现对其组成的精确调控,因此,通过探究不同工况条件对尾气中苯和 PAHs 生成特性的影响,通过调控反应条件以降低焦油中高活性 PAHs 的含

量,进而抑制二噁英的生成,在实际生产过程中具有现实意义。

当前研究大多针对 MSW 中单一组分或模化物开展,但实际 MSW 组成多样,解耦燃烧过程中相互作用机制复杂,模化物无法完全模拟实际 MSW 的解耦燃烧特性。此外,现有关于 MSW 在不同解耦燃烧工况下尾气污染物排放特性的研究,大多仅针对单一污染物,缺乏针对 MSW 在不同工况下 CH_4 、CO 等可燃组分燃尽情况的研究,同时对污染物排放特性及颗粒物生成特性的综合研究及工艺优化研究较少。

基于 MSW 大规模清洁高效处理需要,本文选取实际 MSW,通过两段式固定床反应器实现了 MSW 的解耦燃烧,并探究了反应温度(T)、过量空气系数(α)及气体停留时间(t)对 MSW 解耦燃烧过程中气体燃尽特性、尾气污染物及颗粒物排放特性的耦合影响,在此基础上优化 MSW 解耦燃烧技术的工艺,为该技术的大规模应用提供理论指导。

1 实验部分

1.1 实验材料

本研究使用的 MSW 样品由北京华宇辉煌生态环保股份有限公司提供。本文根据《生活垃圾采样和分析方法》(CJ/T 313—2009)进行采样,并采用液氮粉碎机对样品预处理,控制样品粒径在 60 目以下,以确保后续测量和研究的准确性^[28]。

1.2 样品基础特性

根据《固体生物质燃料工业分析方法》(GB/T 28731—2012)对预处理样品进行工业分析及元素分析,相关结果见表 1、表 2。

表 1 MSW 工业分析结果

Table 1 MSW proximate analysis results %

样品	M_t	M_{ad}	V_{ad}	A_{ad}	$^*FC_{ad}$
MSW	22.840	1.245	43.033	50.333	5.389

注: t—全水; *— FC_{ad} 含量采用减差法计算; ad—空气干燥基。

表 2 MSW 元素分析结果

Table 2 MSW ultimate analysis results %

样品	w(C)	w(H)	$^*w(O_{ad})$	w(N)	w(S)
MSW	26.430	3.431	16.560	0.890	0.318

注: *— O_{ad} 含量采用减差法计算。

1.3 实验方法

本研究采用 OTF-1200X-II-VT 型立式固定床管式反应器进行实验研究,采用解耦燃烧方法对 MSW 热解气解耦燃烧进行实验研究。使用内径为 30 mm 的石英管作为热解室,使用内径为 48 mm 的石英管作为二燃室。其中热解室底部设置 15 个直径 1 mm 的小孔,确保热解室生成的气体可及时通入二燃室。热解室和二燃室侧边分别设有进气口,用于通入载气;尾部设置有出气口,出气口后部依次连接 2 个冰水浴冷凝瓶,用于收集液态产物以开展二噁英生成特性分析及预测研究。冷凝瓶尾部根据不同实验目的分别连接不同实验装置。在 MSW 解耦燃烧燃尽特性和 NO_x 生成特性实验中,冷凝瓶尾部连接在线分析仪,用于实时测定尾气中的可燃气及 NO_x 浓度;在颗粒物生成特性实验中,冷凝瓶尾部连接滤筒,用于收集解耦燃烧尾气中的颗粒物。在解耦燃烧实验中,控制热解室和二燃室载气流量比例为 35 : 65。MSW 首先在热解室内热解,选取 N_2 作为热解载气,控制热解温度为 700 $^{\circ}\text{C}$ 。热解气进入二燃室实现解耦燃烧,选取 N_2 和 O_2 作为二燃室载气,在不同工况实验中,分别控制 a 为 1.3、1.5 和 1.8, t 为 2.0、2.5 和 3.0 s, T 为 850 $^{\circ}\text{C}$ 和 1000 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.4 分析方法

1.4.1 尾气分析方法

本文采用芬兰 Temet 公司 GASMET DX4000 型便携式傅里叶红外烟气分析仪对解耦燃烧尾气进行在线分析,用于测定主要气体组分(CO 、 CH_4 、 NO 、 NO_2)的浓度。测试过程中,采样气体通过耐高温采样管道进入仪器内,维持分析仪样气室内温度为 180 $^{\circ}\text{C}$,傅里叶红外光谱分析仪分辨率为 0.5 cm^{-1} ,以保证气体成分的可靠测量。仪器经校准后,能够同时识别并定量检测 CH_4 、 CO 、 NO 和 NO_2 等多种组分。在每个工况实验前后,采用 N_2 吹扫样气室,直至分析软件显示分析仪内 CO 、 CH_4 、 NO 、 NO_2 的质量浓度均低于 20 mg/m^3 ,确保数据可靠性。

1.4.2 焦油分析方法

本文采用 Agilent 7890B/5977A 型气相色谱-质谱联用仪对 MSW 解耦燃烧后的焦油产物进行定量分析。测试采用 HP-5 毛细管柱,测试条件:进样口温度 250 $^{\circ}\text{C}$;气相色谱-质谱联用仪升温程序为初温 50 $^{\circ}\text{C}$,保持 3 min,以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 300 $^{\circ}\text{C}$ 并保温 10 min;载气为 He。最后,基于 NIST14.0

库数据库表征的 GC-MS 光谱计算液态化合物的组分。

1.4.3 颗粒物分析方法

本实验采用上海兴亚净化材料厂的 0.3 μm 标准玻璃纤维滤筒收集尾气中的颗粒物,并在收集后称量颗粒物质量,对不同工况下的颗粒物生成量特性展开分析。

2 结果和讨论

2.1 MSW 解耦燃烧尾气排放特性

2.1.1 CH_4 燃尽特性

MSW 在不同解耦燃烧条件下,尾气中 CH_4 浓度如图 1 所示。

由图中可以看出, CH_4 的燃尽行为表现出典型的“温度-氧浓度-反应时间”三因素耦合作用特征。从图 1(a)可以看出,在 $T=850$ $^{\circ}\text{C}$ 、 $t=2$ s、 $a=1.3$ 的条件下, CH_4 浓度首先迅速升至约 1 357 mg/m^3 的峰值,随后快速衰减并在约 60 s 时基本燃尽。这主要是由于二燃室内氧供应不足, CH_4 在短时间内未能被充分氧化。随着 t 延长至 2.5 s 和 3.0 s, CH_4 浓度峰值分别下降至约 214 mg/m^3 和 36 mg/m^3 ,说明更长的反应时间可有效提高 CH_4 与氧自由基之间的反应速率,促进其完全燃烧。从图 1(b)可以看出, T 的提升强化了 C—H 键的断裂趋势,进而提高了 CH_4 的反应活性。1 000 $^{\circ}\text{C}$ 不仅接近 CH_4 热解和部分氧化的最优温度,而且可促进氧自由基的生成,使得 $\cdot\text{CH}_3$ 等中间物种快速进入链式反应阶段,最终加速了 CH_4 的燃尽。

从图 1(c)和图 1(d)可以看出,随着 a 由 1.3 提升至 1.5,在 $T=850$ $^{\circ}\text{C}$ 、 $t=2$ s 的条件下,尾气中 CH_4 浓度峰值降至约 536 mg/m^3 。该下降趋势在停留时间为 2.5 s 和 3.0 s 时更为明显,这表明适当提高 O_2 浓度能够提高氧化反应速率。在 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,氧化反应速率提升的效果更为突出,这说明在该温度下反应已不受限于热力学或反应动力学,而转向由氧供应速度或扩散传质过程所控制。比较图 1(e)和图 1(f)可以看出,在 $a=1.8$ 的强氧化条件下, CH_4 浓度峰值均低于 143 mg/m^3 。这是由于 CH_4 在进入反应区后迅速与 O_2 发生反应。在此条件下, CH_4 的氧化反应主要由 O_2 浓度决定,自由基反应和高温裂解路径的重要性相对减弱,体系反应趋于稳定。

总体来看,中温贫氧条件下的 CH_4 燃尽主要受限于反应速率,依赖于较长停留时间;而在高温

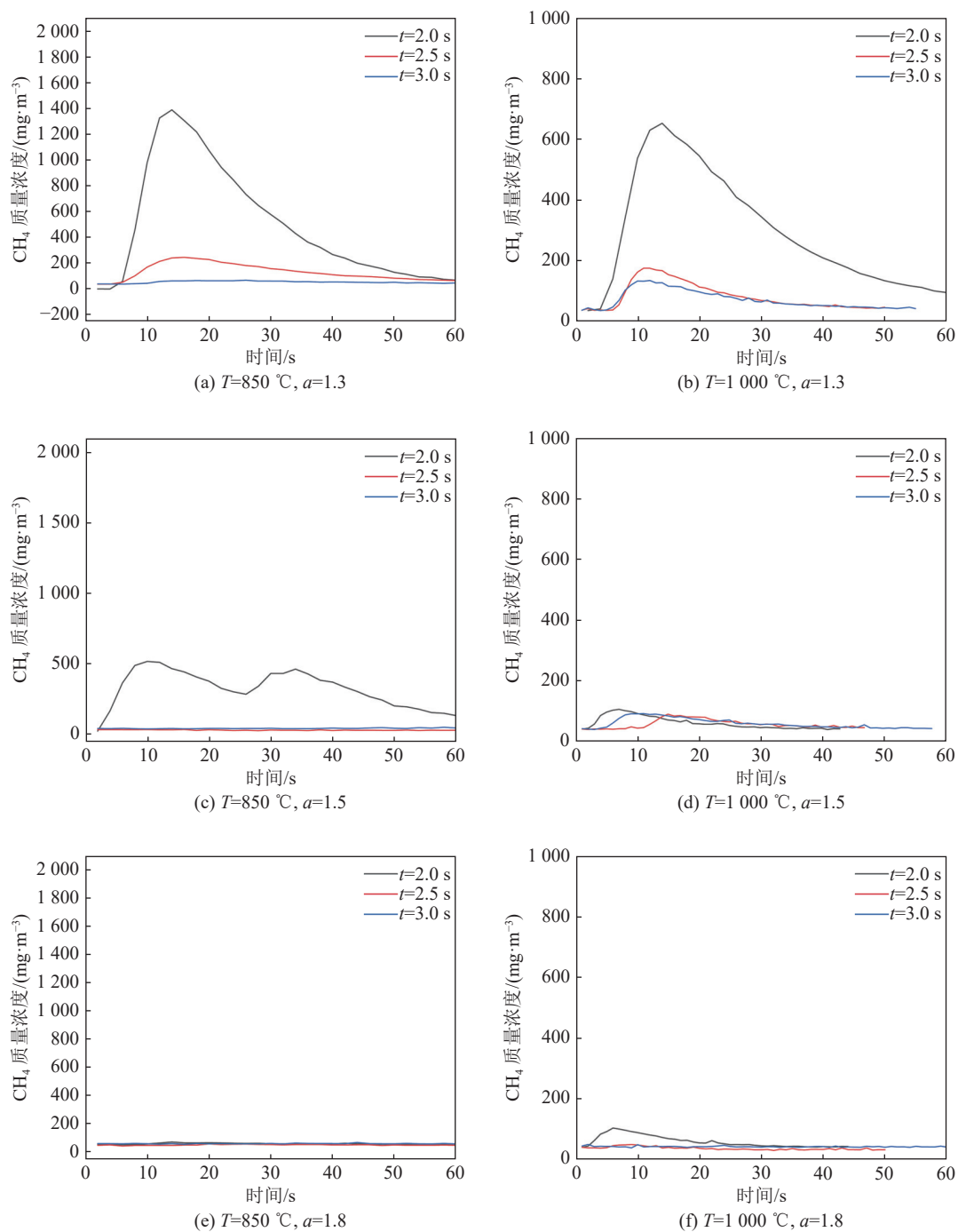


图1 不同工况条件下尾气中的 CH_4 浓度

Fig. 1 CH_4 concentration in flue gas under different conditions

富氧条件下, CH_4 燃尽过程迅速完成, 延长反应时间的效果有限。对于 $T=850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工况, 应将 a 控制在 1.5 以上, 同时保证 t 在 2.5 s 以上, 以确保 CH_4 燃尽效果; 而在 $T=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温解耦燃烧条件下, $a=1.3$ 、 $t=2.0\text{ s}$ 即可达到较理想的燃尽效果, 兼顾节能与排放控制目标。

2.1.2 CO 燃尽特性

不同解耦燃烧工况下, MSW 解耦燃烧尾气中 CO 浓度变化如图 2 所示。可以看出, CO 浓度

随时间变化受 T 、 a 与 t 的协同影响。总体来看, CO 浓度在反应初期迅速上升, 随后缓慢下降。 CO 浓度峰值明显滞后于 CH_4 , 该时延性主要是因为 CO 的生成存在多种机制, 包括残炭的部分氧化、焦油裂解重整、 CH_4 重整及 Boudouard 反应等^[29]。这些路径需更高温度和更长时间, 致使 CO 生成阶段推迟。此外, CO 氧化为 CO_2 的反应活化能高于 CH_4 燃烧, 因此其燃尽速度也相对较慢。

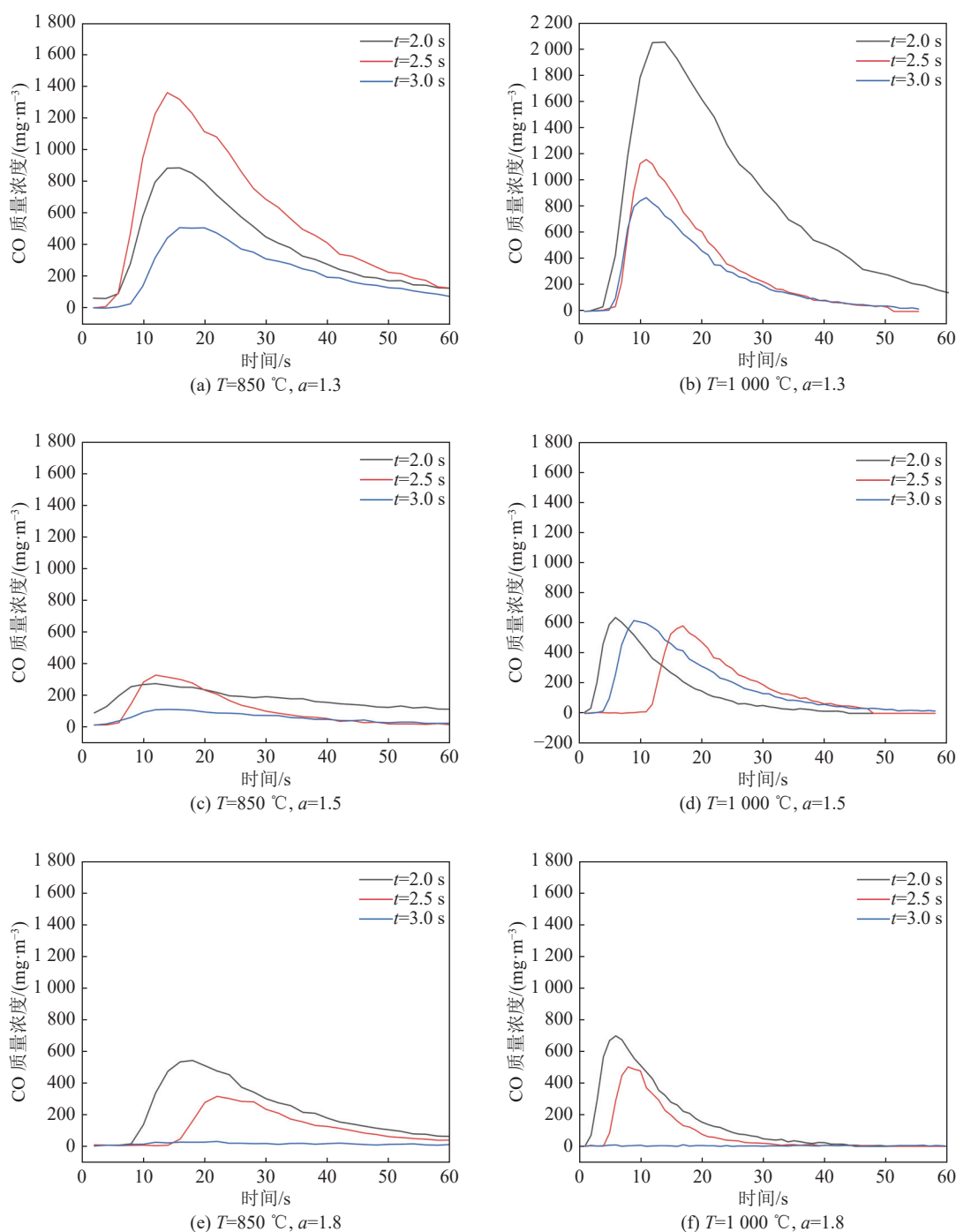


图2 不同工况条件下尾气中的CO浓度

Fig. 2 CO concentration in flue gas under different conditions

从图 2(a) 可以看出, 在 $T=850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $a=1.3$ 、 $t=2.5\text{ s}$ 的反应条件下, CO 浓度峰值高达 $1\ 400\text{ mg}/\text{m}^3$, $t=3.0\text{ s}$ 时略有降低, 说明二燃室内 O_2 不足导致生成的 CO 难以燃尽。当温度升高至 $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, CO 峰值上升至 $2\ 000\text{ mg}/\text{m}^3$, 但下降速度显著加快, $t=3\text{ s}$ 时峰值仅约 $750\text{ mg}/\text{m}^3$, 说明高温促进了 CO 的生成, 同时也促进其燃尽。从图 2(c) 和图 2(d) 可以看出, 富氧条件显著提升了 CO 的

氧化反应速率, 导致燃尽窗口前移。从图 2(e) 和图 2(f) 可以看出, 当 a 进一步提升至 1.8, CO 表现出较好的燃尽效果, 这表明“高温+富氧”组合可促进 CO 在生成后迅速被燃尽。

综合来看, CO 的燃尽控制不仅要求富氧环境, 更需合理设计停留时间以适应“滞后生成+缓慢燃尽”的特点。从可燃气燃尽效率与能耗平衡角度看, 采用 $850\sim 1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的中高温解耦燃烧条

件,在保证 $a \geq 1.5$ 的基础上,将 t 控制在2.0~2.5 s,可有效实现CO的燃尽与尾气清洁排放,同时避免过度供氧带来的能效损失。

2.1.3 NO_x 生成特性

不同解耦燃烧工况下,MSW解耦燃烧尾气中NO_x浓度变化如图3所示。

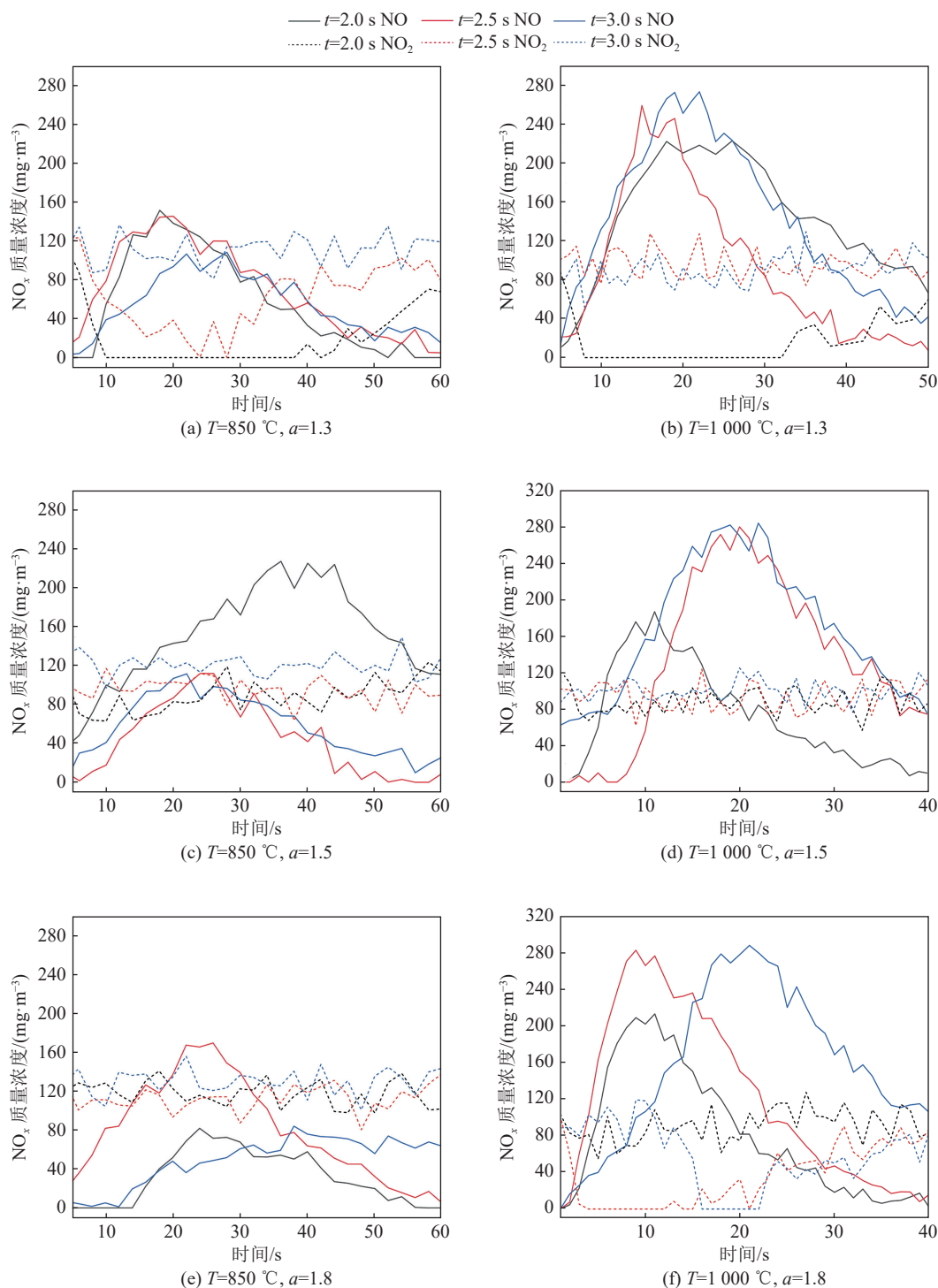


图3 不同工况条件下尾气中的NO_x浓度

Fig. 3 NO_x concentration in flue gas under different conditions

不同解耦燃烧工况下尾气中的NO_x浓度呈现出典型的 T 、 a 与 t 三因素耦合动态调控特点。从图3(a)可以看出,在 $T=850$ °C、 $a=1.3$ 条件下,相较

于其他条件NO生成速率较缓,峰值为161 mg/m³,出现在20 s左右,而NO₂浓度始终低于123 mg/m³,但波动较大。这是由于在该工况下, T 与 a 均处

于偏低水平, 自由基积累不足, NO 的生成与其向 NO₂ 的转化反应速率均受限, NO_x 总生成量控制良好, 可实现低 NO_x 排放目标。从图 3(b)可以看出, 在 1 000 ℃ 下, NO 生成前移至 10~15 s, 峰值突破 268 mg/m³。t=2.5 s 与 3.0 s 时 NO 浓度明显高于 t=2 s, 说明在高温下中长停留时间加快了快速型 NO_x 的形成, T 为控制其生成的主导因素。

从图 3(c)可以看出, 在 a 升至 1.5 后, NO 峰值升至约 214 mg/m³, 说明中等 O₂ 浓度对 NO 生成有一定促进作用, NO₂ 浓度也有所提高, 表明此时 NO 氧化反应更剧烈。图 3(d)显示, 在高温条件下, NO 生成速率和浓度峰值进一步提升, t=2.5~3.0 s 下 NO 浓度超 281 mg/m³。在图 3(e)的 a=1.8、T=850 ℃ 工况下, NO 峰值显著下降至 80~161 mg/m³, 说明此时一方面过量 O₂ 可以促进 NO_x 燃尽, 另一方面过氧条件抑制自由基浓度, 进而导致 NO_x 生成受限。图 3(f)表明 1 000 ℃ 与高过量空气系数的耦合促进了 NO 的大量生成, 其峰值超 281 mg/m³, 且下降缓慢, 表明高温高氧条件的耦合是 NO_x 产生的主要诱因。

需要注意的是, 在所有工况下 NO 的生成峰值普遍滞后于 CH₄ 和 CO 约 5~10 s, 表明其生成依赖自由基积累和高温激发反应路径。NO₂ 生成则更平缓, 表明其主要受 NO 氧化反应速率控制, 受 t 影响较小。

综上分析, 在实际生产过程中, 为平衡 NO_x 排放控制与可燃气燃尽效率, 优选工况为 T=850 ℃、t=2.0~2.5 s 或 T=1 000 ℃、t=2.5 s。在这些条件下, 可在实现较高燃尽率的同时抑制 NO_x 生成。此外, 应避免 a=1.8、t=3.0 s 等富氧长停留时间的工况, 以防 NO_x 超标排放。

2.1.4 颗粒物生成特性

在 MSW 解耦燃烧耦合系统中, 颗粒物的主要来源包括热解残余的细颗粒半焦、焦油冷凝生成的碳质核、高温诱导下气相有机物的重聚, 以及部分无机灰分夹带物^[30]。其中, 焦油冷凝与 MSW 气化产物的不完全燃烧是颗粒物的主要生成机制^[31]。

本研究使用 0.3 μm 滤筒收集尾气颗粒物, 对不同工况下的颗粒物产率进行了测定分析, 见表 3。整体来看, 颗粒物的产率同样受到 T、a 与 t 多因素的耦合调控, 颗粒物产率范围为 0.5%~1.9%, 呈现非单调变化, 表明其生成受多因素复杂交互调控。温度的升高是控制颗粒物产率的关键。在

850 ℃ 条件下颗粒物产率普遍高于 1 000 ℃, 尤其在 T=850 ℃、a=1.3、t=2.0 s 时达到 1.9% 的峰值; 而在 T=1 000 ℃、a=1.5、t=2.5 s 时最低, 仅为 0.5%。这是由于高温可有效促进焦油裂解和残炭解耦燃烧, 同时抑制了焦油冷凝与微粒的二次生成。当 a 升至 1.8 时, 颗粒物排放并未进一步降低, 部分工况下颗粒物产率甚至出现回升。这可能是由于过量 O₂ 导致二燃室局部温度下降, 使未裂解焦油重新冷凝, 同时促进了芳香族自由基聚合, 形成新的颗粒核。此现象说明颗粒物控制需兼顾 a 与 T 的平衡, 避免氧过剩引发冷凝反应。

表 3 尾气颗粒物产率

Table 3 Particulate matter yield from flue gas

t/s	a	T/℃	产率/%
2	1.3	850	1.9
		1000	1.3
	1.5	850	1.5
		1000	0.9
	1.8	850	1.8
		1000	0.8
2.5	1.3	850	1.4
		1000	0.9
	1.5	850	1.1
		1000	0.5
	1.8	850	1.1
		1000	0.5
3	1.3	850	1.6
		1000	1.1
	1.5	850	1.1
		1000	0.6
	1.8	850	1.3
		1000	0.7

在 850 ℃ 条件下, 颗粒物产率随着 t 的增加呈现先降后升的趋势。这是由于停留时间过短不利于颗粒反应完全, 适当延长停留时间有利于颗粒的燃尽与焦油的彻底裂解, 而停留时间过长则可能因尾气冷却与反应区自由基耗尽, 引发微粒冷凝或聚合。该趋势在 1 000 ℃ 条件下仍然存在, 但不如 850 ℃ 时明显, 说明高温下颗粒生成过程受停留时间影响相对较弱。

综合来看, 颗粒物最低排放工况对应最佳燃尽工况, 表明二者存在良好的协同控制关系。需

要注意的是, 尽管提高二燃室温度能够有效促进可燃气燃尽、降低颗粒物产率, 但 NO_x 排放量在高温富氧条件下明显升高。综合来看, 在 $T=850\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $a=1.5$ 、 $t=2.5\text{ s}$ 工况条件下, 可燃气燃尽, 颗粒物、 NO_x 减排方面表现较好, 具备优秀的工程应用潜力; 而 $T=1\text{ }000\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $a=1.5$ 、 $t=2.5\text{ s}$ 工况可在要求更高燃尽效率和低颗粒物排放的工况下优先考虑。

2.2 MSW 解耦燃烧焦油生成特性

基于前文对不同解耦燃烧条件下可燃气燃尽情况、 NO_x 和颗粒物生成特性的研究结果, 本文优选了 $T=850\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $t=2.0\text{ s}$; $T=850\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $t=2.5\text{ s}$; $T=1\text{ }000\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $t=2.5\text{ s}$ 三类工况分别在 $a=1.3$ 、 1.5 和 1.8 条件下, 对焦油组分相对含量变化展开研究。为方便表述, 本文将这 9 种工况分别记为 850-2.0-1.3、850-2.0-1.5、850-2.0-1.8、850-2.5-1.3、850-2.5-1.5、850-2.5-1.8、1 000-2.5-1.3、1 000-2.5-1.5、1 000-2.5-1.8。

优选工况下的焦油组分生成特性如图 4 所示。单环 PAHs 含量在 $T=850\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $t=2.0\text{ s}$ 时随 a 从 1.3 升高至 1.5 时呈现略微上升趋势, 这是由于在中温、短停留时间条件下, 小分子 PAHs 未被完全氧化; 当 a 进一步升至 1.8 时, 其相对含量下降至 0.993%, 表明过量的 O_2 有效促进了 PAHs 的完全氧化。当 t 延长至 2.5 s 后, 单环 PAHs 相对含量在 $a=1.5$ 时变化较小, 但在 $a=1.3$ 和 1.8 时分别下降至 1.001% 和 1.717%, 这是由于在中温条件下, 延长 t 虽增强了裂解与氧化, 但在极端富氧或缺氧条件下, 氧化与裂解效率仍受限。2 环 PAHs 的相对含量在 850-2.5-1.5 时达到峰值, 为 62.203%, 因为该条件有利于萘类中间体的累积。当 T 升高至 $1\text{ }000\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 2 环 PAHs 的相对含量在各过量空气系数条件下均显著下降至 7.834%~23.510%, 表明高温能够通过提高氧化反应速率加速 2 环芳烃裂解为小分子或转化为更复杂结构。3 环 PAHs 的相对含量在 850-2.0-1.5 的工况下最高, 达 38.333%。当 t 升至 2.5 s 后, 3 环 PAHs 的相对含量为 17.064%~35.409% 之间波动, 在 $a=1.8$ 时降至最低。当 T 升高至 $1\text{ }000\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 焦油中的 3 环 PAHs 相对含量进一步降低至 16.407%~24.531%, 说明高温裂解能够有效促进 3 环芳烃的裂解和氧化。4 环 PAHs 在 $T=850\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $t=2\text{ s}$ 随着 a 的提高从 14.924% 上升至 47.052%, 表明氧气含量的增加强化了多环的缩合。当停留时间升高至 2.5 s 时, 4 环 PAHs 的相对含量随着 a 的提高出现

波动, 这是由于适度提高 t 有助于 4 环芳烃的裂解。当 T 升高至 $1\text{ }000\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 4 环芳烃的相对含量保持在 38.906%~52.136%, 这是因为尽管高温能够促进裂解反应的进行, 但 4 环结构较为稳定, 在富氧环境下易由前体重聚而富集。

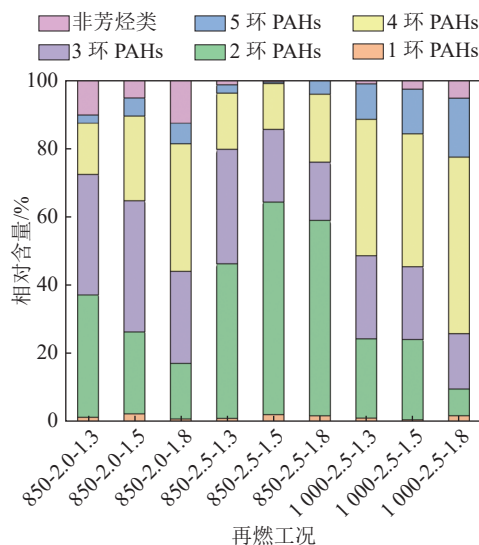


图 4 不同工况条件下尾气中的焦油相对含量

Fig. 4 Relative tar content in flue gas under different conditions

值得注意的是, 在 850-2.5-1.3 条件下, 焦油中 3 环及以上 PAHs 占比较低, 此时二噁英主要生成途径以再合成路径为主。当 a 升高至 1.5 时, O_2 浓度的提高促进了 PAHs 小环裂解, 进而抑制了部分前体聚合, 此时再合成路径与前驱体路径耦合。当 a 进一步升高至 1.8 时, 气相高反应性前体与碳质载体同时积累, 前驱体路径成为主导机理, 二噁英生成风险达到最高水平。同时, 此条件下 CH_4 和 CO 燃尽不完全, 残余有机物和炭质颗粒为二噁英合成提供原料, 颗粒物产率高, 表明中温、短停留时间、高过量空气系数不仅会导致有害气体和颗粒物的生成, 还可能极易形成二噁英^[32]。

当 $T=850\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 将 t 延长至 2.5 s 后, 在 $a=1.3$ 的条件下, 3 环及以上 PAHs 占比显著降低, 说明此时二噁英的再合成路径与前驱体路径均受到抑制。进一步提升 a 至 1.5 后, 3 环及以上 PAHs 占比达到最低值, 此时可视为二噁英生成潜力最小、毒性前体裂解最彻底的理想工况, 此时 CH_4 和 CO 的燃尽情况较好, 颗粒物产率也处在较低水平, NO_x 浓度处于可控区间。

综上所述, 在中温、短气体停留时间及高过量

空气系数条件下,尾气中出现了 4~5 环 PAHs 的显著富集,表明此类工况容易在尾气中残留高稳定性有机微粒;将停留时间延长至 2.5 s 并控制 a 为 1.5 时,可有效降低 4~5 环 PAHs 的相对含量;而在高温条件下,1~3 环 PAHs 相对含量极低,4~5 环 PAHs 则在高 a 条件下相对含量较高,这是由于此时高温虽能加速小环裂解,但对大环结构的分解有限。结合可燃气燃尽特性、颗粒物产率特性和 NO_x 生成特性分析, $T=850\sim 1\,000\text{ }^\circ\text{C}$, 控制 $a=1.5$ 、 $t=2.5\text{ s}$ 的运行条件最有利于高效燃尽、减少颗粒物和大环 PAHs 的生成;此外,可以在烟气后端引入快速冷却与高效吸附措施,以进一步降低 PAHs 和微细有机颗粒的排放,实现系统能效与尾气洁净度的最优平衡。

3 总 结

本文基于北京华宇辉煌科技股份有限公司提供的 MSW,采用解耦燃烧手段探究了其在不同工况下的燃尽特性及多种污染物的排放特性,得到如下结论:

(1) CH_4 和 CO 是 MSW 热解生成的主要可燃气体,采用高温富氧条件能够明显提升可燃气体的燃尽效果,同时需要选取合适的气体停留时间以适应 CO “滞后生成+缓慢燃尽”的特性。

(2) NO 的生成依赖自由基积累和高温激发反应路径, NO_2 生成则主要受 NO 氧化速率控制,气体停留时间对 NO_2 影响较小。

(3) 不同工况下颗粒物的生成呈现出非单调变化,其产率最低的工况与可燃气燃尽效果最佳的工况高度一致,表明二者存在良好的协同控制关系。

(4) 在高过量空气系数及较短气体停留时间条件下,高活性 PAHs 更易富集,二噁英生成风险较高。

(5) 综合来看, $T=850\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $a=1.5$ 、 $t=2.5\text{ s}$ 在可燃气燃尽、颗粒物及 NO_x 控制方面表现均衡,具备良好的工程应用潜力;而 $T=1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $a=1.5$ 、 $t=2.5\text{ s}$ 可实现更优秀的燃尽及污染物抑制效果,但可能导致系统能耗的提高。

参考文献 (References) :

[1] GUO Wei, XI Beidou, HUANG Caihong, et al. Solid waste management in China: Policy and driving factors in 2004—2019[J]. Resources, Conservation and Recycling,

2021, 173: 105727.

- [2] 国家统计局. 中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报 [N]. 中国信息报, 2022-03-01(1).
National Bureau of Statistics. Statistical communiqué of the People's Republic of China on the 2021 national economic and social development[N]. China Information News, 2022-03-01(1).
- [3] 罗永浩, 陈伟, 杨明辉, 等. 生活垃圾典型组分热解及 NO_x 前驱物析出特性研究 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(B11): 143–148.
LUO Yonghao, CHEN Yi, YANG Minghui, et al. Research on pyrolysis of typical component of municipal solid waste and release characteristics of NO_x precursor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(B11): 143–148.
- [4] GLARBORG P, JENSEN A D, JOHNSON J E. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2003, 29(2): 89–113.
- [5] 郝江平, 高士秋, 孙广藩, 等. 燃煤工业锅炉的发展与解耦燃烧技术的开发 [J]. *工业锅炉*, 2014(4): 7–11.
HAO Jiangping, GAO Shiqiu, SUN Guangfan, et al. Status of coal-fired industrial boilers and development of decoupling combustion technique[J]. *Industrial Boiler*, 2014(4): 7–11.
- [6] 尚校, 高士秋, 汪印, 等. 不同煤燃烧方式降低 NO_x 排放比较及解耦燃烧应用 [J]. 燃料化学学报, 2012, 40(6): 672–679.
SHANG Xiao, GAO Shiqiu, WANG Yin, et al. Comparison of NO_x reduction among different coal combustion methods and the application of decoupling combustion[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(6) : 672–679.
- [7] DONG Jun, CHI Yong, TANG Yuanjun, et al. Partitioning of heavy metals in municipal solid wastepyrolysis, gasification, and incineration[J]. *Energy & fuels*, 2015, 29(11): 7516–7525.
- [8] 贺茂云, 肖波, 胡智泉, 等. 镍基催化剂的制备及其对垃圾气产氢的催化活性 [J]. *中国环境科学*, 2009, 29(4): 391–396.
HE Maoyun, XIAO Bo, HU Zhiquan, et al. Preparation of Ni-based catalysts and evaluation of their catalytic activity in gasification of municipal solid waste (MSW) to hydrogen[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(4): 391–396.
- [9] 杨超. 热解气化技术在农村生活垃圾处理中的优势 [J]. *节能环保*, 2019(7): 61–62.
YANG Chao. Advantages of pyrolysis and gasification technology in rural domestic waste treatment[J]. *Energy Conservation & Environmental Protection*, 2019(7): 61–62.
- [10] RADHAKRISHNAN K, SENTHIL KUMAR P, RANGASAMY G, et al. A critical review on pyrolysis method as sustainable conversion of waste plastics into fuels[J]. *Fuel*, 2023, 337: 126890.

- [11] DONG Li, GAO Shiqiu, XU Guangwen. NO reduction over biomass char in the combustion process[J]. *Energy & Fuels*, 2010, 24(1): 446–450.
- [12] LI Honglin, HAN Jian, ZHANG Nan, et al. Effects of high-temperature char layer and pyrolysis gas on NO_x reduction in a typical decoupling combustion coal-fired stove[J]. *Journal of Thermal Science*, 2019, 28(1): 40–50.
- [13] 刘新华, 韩振南, 韩健, 等. 基于热解与燃烧反应重构的低 NO_x 解耦燃烧原理与技术 [J]. *化工学报*, 2022, 73(8): 3355–3368.
LIU Xinhua, HAN Zhennan, HAN Jian, et al. Principle and technology of low-NO_x decoupling combustion based on restructuring reactions[J]. *CIESC Journal*, 2022, 73(8): 3355–3368.
- [14] CHEN Dezhen, YIN Lijie, WANG Huan, et al. Reprint of: Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review[J]. *Waste Management*, 2015, 37: 116–136.
- [15] BAI Jisong, YU Chunjiang, LI Lianming, et al. Experimental study on the NO and N₂O formation characteristics during biomass combustion[J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(1): 515–522.
- [16] QI Xin, MA Xiaoqian, YU Zhaosheng, et al. Numerical simulation of municipal waste and food digestate blending combustion and NO_x reduction under oxygen-enriched atmospheres[J]. *Fuel*, 2023, 345: 128115.
- [17] SARABHORN P, SITTHICHIRACHAT P, SIRIPAI-BOON C, et al. Community-scale co-incineration of pre-sorted MSW with wood pellet using a decoupling gasifier and integrated burner for syngas combustion[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 487: 144588.
- [18] YANG Wu, PUDASAINEE D, GUPTA R, et al. An overview of inorganic particulate matter emission from coal/biomass/MSW combustion: Sampling and measurement, formation, distribution, inorganic composition and influencing factors[J]. *Fuel Processing Technology*, 2021, 213: 106657.
- [19] YANG Wu, GUPTA R, SONG Zijian, et al. Mechanism of soot and particulate matter formation during high temperature pyrolysis and gasification of waste derived from MSW[J]. *Waste Management*, 2024, 182: 21–31.
- [20] WANG Xuebin, BAI Shengjie, JIN Qiming, et al. Soot formation during biomass pyrolysis: Effects of temperature, water-leaching, and gas-phase residence time[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2018, 134: 484–494.
- [21] LIU Tianyu, WEN Chang, WANG Dapeng, et al. Effects of fuel elemental composition and combustion temperature on PM₁₀ formation behaviors from combustion of municipal solid waste and refuse-derived fuel[J]. *Fuel*, 2025, 384: 134030.
- [22] YING Yuxuan, MA Yunfeng, WANG Xiaoxiao, et al. Emission, partition, and formation pathway of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans during co-disposal of industrial waste with municipal solid waste[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(1): 109242.
- [23] STANMORE B R. The formation of dioxins in combustion systems[J]. *Combustion and Flame*, 2004, 136(3): 398–427.
- [24] ALTARAWNEH M, DLUGOGORSKI B Z, KENNEDY E M, et al. Mechanisms for formation, chlorination, dechlorination and destruction of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, 35(3): 245–274.
- [25] HAN Zixi, LI Jian, GU Tianbao, et al. Effects of torrefaction on the formation and distribution of dioxins during wood and PVC pyrolysis: An experimental and mechanistic study[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2021, 157: 105240.
- [26] 李晓东, 尹雪峰, 陆胜勇, 等. 原生垃圾和煤混烧时多环芳烃和二(噁)英的生成关联 [J]. *工程热物理学报*, 2006, 27(4): 691–694.
LI Xiaodong, YIN Xuefeng, LU Shengyong, et al. The correlation between pahs and dioxins formation during coal and municipal solid waste co-incineration process[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2006, 27(4): 691–694.
- [27] MENG Jing, ZHANG Bei, LI Qianqian, et al. Effects of industrial solid waste on the generation of PCDD/Fs, dl-PCBs and PAHs tuned by waste pseudo-components during engineering co-combustion[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, 483: 136646.
- [28] 洪千惠. 生活垃圾灰渣流动性及重金属浸出毒性研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2023: 1–2.
HONG Qianhui. Study on flow characteristics and heavy metal leaching toxicity of municipal solid waste ash slag[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2023: 1–2.
- [29] NETZER C, LI Tian, LØVÅS T. Surrogate reaction mechanism for waste incineration and pollutant formation[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(9): 7030–7049.
- [30] VAN DYK J C. Understanding the influence of acidic components (Si, Al, and Ti) on ash flow temperature of South African coal sources[J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(3): 280–286.
- [31] GUO Minhui, WANG Kan, BING Xiaohui, et al. Pyrolysis of plastics-free refuse derived fuel derived from municipal solid waste and combustion of the char products in lab and pilot scales: A comparative study[J]. *Fuel*, 2024, 359: 130335.
- [32] ZHANG Pu, WU Hui, ZHANG Kai, et al. Decoupling effects of C₃H₃/C₄H₃/i-C₄H₃/CN radicals on the formation and growth of aromatics: A ReaxFF molecular dynamics study[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2023, 171: 106185.