

DOI:10.13205/j.hjgc.202210014

殷志童,吕洪炳,张东明,等. 废轮胎热解富芳烃油燃烧温度与烟气污染物排放特性[J]. 环境工程,2022,40(10):105-111.

废轮胎热解富芳烃油燃烧温度与烟气污染物排放特性

殷志童¹ 吕洪炳² 张东明² 许姣² 黄群星^{1*} 钟浥柳¹ 黄平安¹ 潘宇涵¹

(1. 浙江大学 热能工程研究所 能源清洁利用国家重点实验室,杭州 310013;

2. 浙江浙能兴源节能科技有限公司,杭州 311121)

摘要: 清洁燃烧是各类有机固废热解油高效能源化利用的主要途径。全钢废轮胎热解油产物中芳香烃含量约占30%,其热值及黏度与柴油相似,但闪点偏低,仅为20℃。在自建燃烧炉膛中进行燃烧实验,研究了废轮胎热解油的燃烧温度及烟气排放特性。实验发现,当过量空气系数为1.3时,热解油燃烧温度最高;当过量空气系数为1.4时,烟气中CO浓度降至0;NO_x浓度随着过量空气系数增大而升高;过量空气系数超过1.3后,SO₂浓度大幅降低。喷射油压提升可提高燃烧温度,使热解油燃烧更加充分,同时可降低烟气中CO浓度,促进热力型NO_x生成。当压力由1.5 MPa升至1.75 MPa时,燃烧温度、CO浓度与NO_x浓度变化幅度最大。喷嘴喷孔直径增大会使雾化锥角增大,燃油雾束更易展开与空气接触反应,CO浓度随之降低;同时雾化锥角的增大可减小喷雾贯穿距,缩短火焰长度,减少烟气在高温区的停留时间,降低NO_x浓度。

关键词: 热解富芳烃油;过量空气系数;油压;喷嘴;燃烧温度;烟气污染物

COMBUSTION TEMPERATURE AND EMISSION CHARACTERISTICS OF FLUE GAS POLLUTANTS OF WASTE TIRES PYROLYSIS OIL RICH IN AROMATICS

YIN Zhitong¹, LV Hongbing², ZHANG Dongming², XU Jiao², HUANG Qunxing^{1*}, ZHONG Yiliu¹,
HUANG Pingan¹, PAN Yuhan¹

(1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Institute for Thermal Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310013, China; 2. Zhejiang Zheneng Xingyuan Energy Saving Technology Co., Ltd, Hangzhou 311121, China)

Abstract: Clean combustion is the main way for the efficient energy utilization of pyrolysis oil of organic solid wastes. The content of aromatic hydrocarbons accounted for about 30% of pyrolysis oil from all-steel waste tires. The thermal value and viscosity of the pyrolysis oil were similar to that of diesel, but the flash point was much lower, only 20 °C. In this study, combustion experiments were carried out in a self-designed furnace, and the characteristics of the combustion temperature and flue gas emission of pyrolysis oil were studied. It was found that the combustion temperature reached the highest when the excess air ratio was 1.3. When the excess air ratio increased to 1.4, CO content in the flue gas dropped to 0. NO_x content increased with the increase of excess air ratio. When the excess air ratio exceeded 1.3, SO₂ content decreased substantially. The increase of injection oil pressure could increase the combustion temperature, making the combustion more adequate, reducing CO content in the flue gas, and promoting the generation of thermal NO_x. When the pressure rose from 1.5 MPa to 1.75 MPa, the combustion temperature, the CO content and the NO_x content varied the most. The increase of the nozzle orifice diameter could increase the atomization cone angle, expand the oil fog to contact with the air at a larger angle, and CO content dropped accordingly. Meanwhile, the increase of atomization cone angle could reduce the spray penetration distance,

收稿日期:2021-11-16

基金项目:浙江省重点研发计划项目(2020C03084)

第一作者:殷志童(1997-),男,硕士研究生在读,主要研究方向为废轮胎热解油雾化燃烧。21927012@zju.edu.cn

* 通信作者:黄群星(1977-),男,教授,主要研究方向为燃烧诊断、废弃物热解气化、废橡胶废弃物热解、废弃物制氢。hqx@zju.edu.cn

which shortened the flame length and the residence time of flue gas in high-temperature area, and reduced NO_x content.

Keywords: pyrolysis aromatic-enriched oil; excess air ratio; oil pressure; nozzle; combustion temperature; flue gas pollutant

0 引言

世界各地工业化快速增长,导致汽车产业迅速扩张,如今全球每年生产约 15 亿条轮胎^[1]。我国轮胎产量巨大,2018 年中国汽车轮胎产量达到 8.16 亿条,2019 年产量稍有降低,但也达到 6.5 亿条^[2]。巨大的轮胎产量使得废轮胎处理成为亟待解决的问题。热解是当前废轮胎资源化利用最有前景的发展方向^[3-5]。热解处理速度快,减容明显,资源化利用充分^[6,7]。目前废轮胎经过钢丝剥离后的热解产物中,40%~50%为热解油,35%~40%为热解炭黑,另外 10%~20%为热解气^[8,9]。其中热解气主要用于热解过程自热,热解炭经过改性后一般用于循环使用。但热解油由于组分较杂,目前还没有应用标准和技术规范,往往当作劣质燃料油少量掺混使用。因此迫切需要开展废轮胎热解油燃烧特性研究,为其规模化应用提供关键数据基础。

学者们对废轮胎热解油理化性质进行探究,充分证明热解油用作燃料油的可行性。Cunliffe 等^[10]发现废轮胎热解油闪点为 14~18 °C,热值达到 42.1 MJ/kg,与轻质燃油接近;Murugan 等^[11,12]对热解油的元素组成进行分析,同时将热解油理化性质与原油和柴油对比,讨论了热解油用作内燃机燃油的可行性。燃料燃烧产生的污染问题一直是国内外研究重点。Williams 等^[13]进行了废轮胎热解油的炉内燃烧试验,发现过量空气系数较低时,热解油燃烧过程有颗粒物生成,同时发现烟气中多环芳烃 PAHs 主要来自未燃尽的热解油,只有少量通过燃烧途径生成。裴宜星^[14]对热解油做了炉内燃烧实验,发现热解油燃烧产生的 NO_x 、 SO_2 污染物浓度均较柴油偏高。以上研究表明:废轮胎热解油燃烧相较于常规燃油会产生更多污染物。虽然已有的研究证明废轮胎热解油可用作炉内燃料油,但大部分是实验室小试热解装置所制得热解油的数据,缺乏对中试规模热解油的研究,因此对热解油工业化利用指导意义不足。同时,对于废轮胎热解油在不同燃烧工况下的燃烧特性,尤其是雾化燃烧研究较为缺乏。

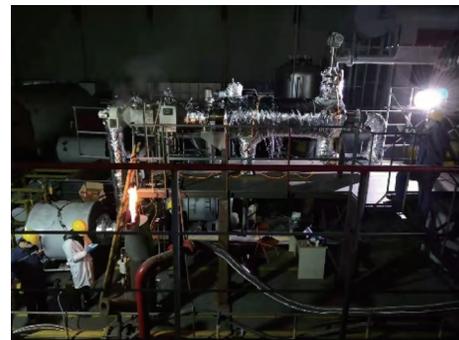
本文以中试规模废轮胎连续热解油为研究对象,分析了热解油的物质组成与理化性质,并采用工业雾化燃烧器在不同工况下进行实际燃烧实验,探究过量

空气系数、油压、喷嘴孔径直径对热解油燃烧温度及烟气污染物的影响,旨在对废轮胎热解油用作锅炉燃油燃烧供能提供参考,对热解油的工业化利用有重要意义。

1 实验部分

1.1 实验材料

实验所用热解油由自主研发的 50 kg/h 热自持连续梯级热解系统,通过热解温度和停留时间的主动调控,连续热解全钢胎胶粒所得,外观如图 1 所示。热解油基本组分见表 1,其中氧含量由差减法得出。从元素组成上看,热解油主要成分为 C、H,还有少量的 O、N、S。其中,C、H 总含量超过 95%且占比与柴油接近。通过氧弹法测得热解油热值为 43.6 MJ/kg。N、S 含量相对柴油偏高,理论上燃烧会产生更多烟气污染物。热解油平均分子式为 $\text{C}_{7.05}\text{H}_{12.17}\text{N}_{0.06}\text{S}_{0.03}\text{O}_{0.10}$,完全燃烧所需理论空气量为 10.74 m^3/kg 。其他分析结果见表 2。



a—中试装置



b—热解油

图 1 废轮胎热解中试装置与热解油照片

Figure 1 Photos of the waste tires pyrolysis pilot device and pyrolysis oil

1.2 热解油燃烧实验装置

燃烧实验平台见图 2、3。实验中使用的燃烧器

表 1 废轮胎热解油元素分析

Table 1 Ultimate analysis result of pyrolysis oil %

项目	C _{ad}	H _{ad}	O _{ad}	N _{ad}	S _{ad}
热解油	84.55	12.17	1.6	0.9	0.78
柴油	85~86	13~15	—	0.1	0.2~0.5

表 2 热解油基本特性

Table 2 Properties of waste tires pyrolysis oil

检测项目	检测结果	检测依据
运动黏度(40℃)/(mm ² /s)	3.840	GB/T 265—1988
运动黏度(100℃)/(mm ² /s)	1.318	GB/T 265—1988
闪点(闭口)/℃	20.0	GB/T 261—2008
硫含量(质量分数)/%	0.774	GB/T 17040—2019
蒸馏(250℃回收体积)/%	47	GB/T 6536—2010
灰分(质量分数)/%	0.001	GB/T 508—1985
酸值(以 KOH 计)/(mg/g)	2.14	GB/T 7304—2014
倾点/℃	-37	GB/T 3535—2006
密度(20℃)/(kg/m ³)	905.8	GB/T 1884—2000
水溶性酸或碱	无	GB/T 259—1988

为意高 MAX 4 型。燃烧器喷嘴为丹佛斯 OD 系列实心 60°喷嘴,其适用的燃油黏度(40℃时)为 1.8~12.0 mm²/s。炉膛内沿喷嘴径在 5,10,15 cm 处分别布置 3 个 K 型热电偶温度测点,温度数据采用 TP700 多路数据记录仪采集。

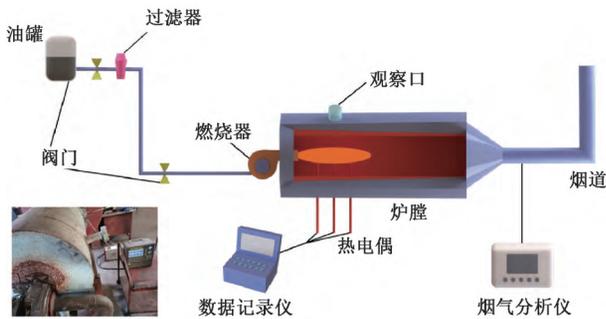


图 2 热解油燃烧实验平台

Figure 2 Combustion experimental platform for pyrolysis oil

实验过程中待燃烧稳定后采用烟气分析仪(德国 MRU GmbH 公司)连续测量烟气成分,每个工况保持 5 min。GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》规定,燃油锅炉烟气污染物排放浓度需折算为 3%基准氧含量排放浓度^[15]。因此,烟气实际浓度测量值均按式(1)折算。

$$\rho = \rho' \times \frac{21 - \varphi(O_2)}{21 - \varphi'(O_2)} \quad (1)$$

式中: ρ 为大气污染物基准氧含量排放浓度,mg/m³; ρ' 为实测大气污染物排放浓度,mg/m³; $\varphi'(O_2)$ 为实测氧含量,%; $\varphi(O_2)$ 为基准氧含量,%。

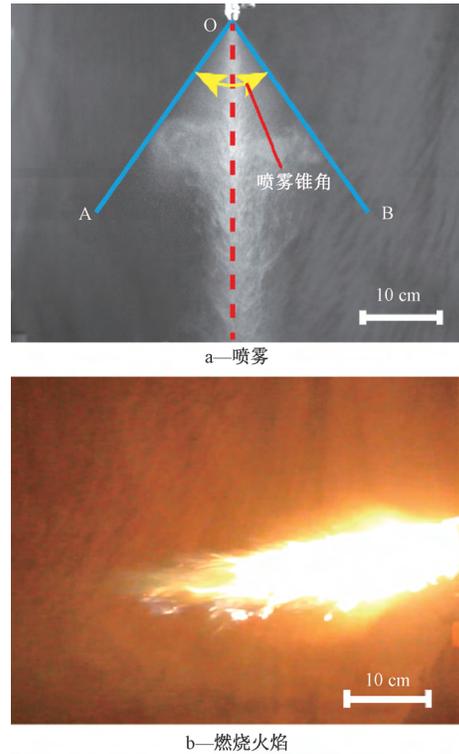


图 3 热解油喷雾与燃烧火焰照片

Figure 3 Spray and combustion flame photos of pyrolysis oil

1.3 分析测试方法

热解油的化学成分通过气相色谱质谱联用仪(GC/MSQP2010SE, Shimadzu, Japan)进行表征。色谱柱型号为 SH-Rxi-5SilMS(30 m×0.25 mm 内径,厚度 0.25 μm)。升温程序设置为:40℃保持 5 min,以 10℃/min 的速率升温至 300℃,保持 5 min^[16]。油相组分的相对占比采用色谱峰面积积分计算得到。

热解油黏温特性通过数显黏度计 NDJ-9S(上海平轩科学仪器有限公司)测量得出。测量时先将热解油水浴加热至对应温度,保持 5 min,待黏度计示数稳定后,开始读数。热解油闭口闪点由 A1191 闭口闪点测定仪(得利特科技有限公司)测量得出。

2 实验结果与讨论

2.1 废轮胎热解油分析

图 4a 为热解油的质谱分析结果。可看出废轮胎热解油物质组成十分复杂。其中含量相对较高,且具有利用价值的组分有:25.85%的柠檬烯、8.13%的 4-异丙基甲苯、4.76%的邻二甲苯和 3.01%的甲苯。对复杂组分进行归类,结果如图 4b 所示,热解油中主要物质种类为 51.58%的烯烃和 29.79%的芳香烃,以及少量的芳香烃衍生物。芳香烃及其衍生物是 1 类具有苯环的化合物,结构稳定。芳香烃的存在有助于

提高燃烧性能,但也会促进碳烟的形成^[17]。

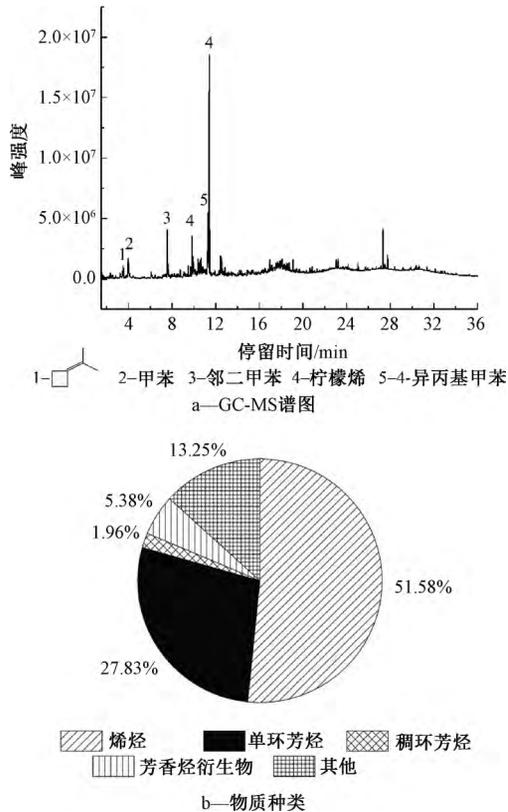


图4 热解油 GC-MS 谱图与物质种类分布

Figure 4 GC-MS spectrogram and matter species distribution of pyrolysis oil

闪点是决定可燃液体火灾危险性的 1 项重要指标。闪点越低越易于燃烧。对于完全互溶的混合物,其闪点取决于所含低闪点组分^[18]。本文使用热解油中低闪点单环芳烃占比达到 27.83%。通过宾斯基-马丁闭口杯法测出热解油闪点为 20 °C,属于易闪液体,储存运输需要严格规范。

燃油黏度直接影响雾化燃烧过程中的雾化质量。燃油黏度越小,雾化破碎时需要克服的阻力越小,相同雾化工况下雾化质量越高^[19]。图 5 为热解油黏温特性,热解油常温下黏度较低不超过 9 mm²/s,且随着温度升高不断降低,属于轻质燃油。40 °C 时,黏度为 3.84 mm²/s,符合实验使用燃烧器黏度要求。因此,热解油易于雾化,容易点燃,适合燃烧。

2.2 过量空气系数对热解油燃烧的影响

图 6 为燃烧器油压在 1.25 MPa 条件下,不同过量空气系数工况下燃烧温度变化与烟气污染物质量浓度变化。可知:随着过量空气系数增加,燃烧温度先升高后降低,在过量空气系数为 1.3 时达到峰值。燃料不充分燃烧会导致燃烧温度低,这时随着空气量

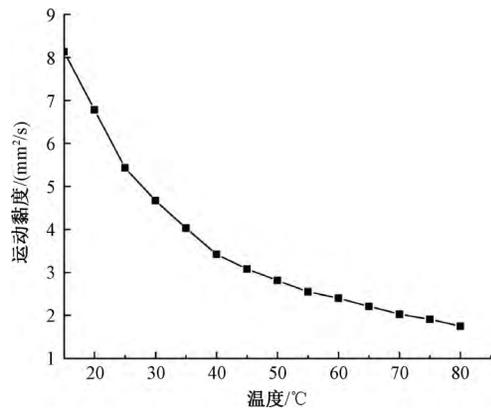


图5 热解油黏温特性曲线

Figure 5 The adhesive temperature characteristic curve of the pyrolysis oil

增加,温度上升;而当空气量过大时,过多的冷空气则会使燃烧温度降低。CO 的浓度随着过量空气系数增加迅速降低,在过量空气系数为 1.4 时,实现完全燃尽。相同过量空气系数下,燃料中芳香烃含量越高,燃烧产生 CO 越多^[20]。热解油中芳香烃占比达到 30%,因此需要更高的过量空气系数使燃料充分燃烧。

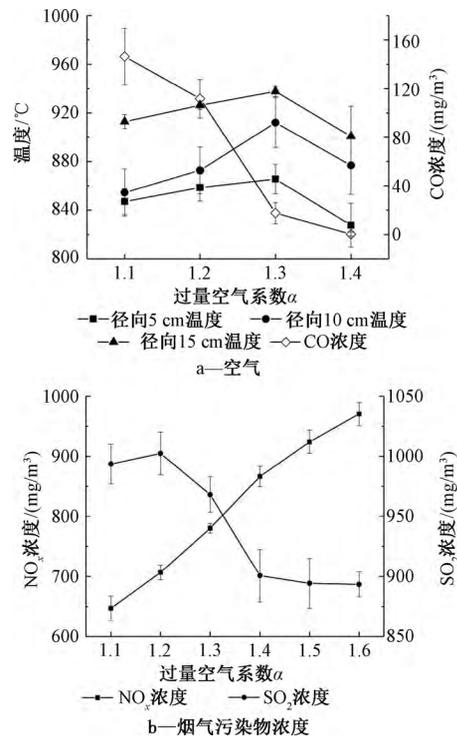


图6 不同过量空气系数下燃烧温度与烟气污染物浓度

Figure 6 Relationship between combustion temperature and pollutants concentration under different excess air ratios

过量空气系数从 1.1 提高到 1.6 时,NO_x 浓度从 647.1 mg/m³ 上升到 970.5 mg/m³。烟气中 NO_x 主

要包括热力型 NO_x 、燃料型 NO_x 和快速型 NO_x [21]。快速型 NO_x 是碳氢系燃料在过量空气系数 < 1 的情况下,在火焰面内急剧生成的。而本文中工况过量空气系数均 > 1 ,因此快速型 NO_x 生成量很少 [22]。燃料型 NO_x 的生成与反应气氛密切相关,氧化性气氛下易生成 NO_x [23],因此,过量空气系数提高会使燃料型 NO_x 浓度提升。同时,由于热解油组分复杂,包含轻质、中质和重质组分,燃烧时受热不均匀,这会使炉膛内的温度分布不均匀,产生局部高温区,这些区域则会生成较多的热力型 NO_x [14]。过量空气系数的增加会使氧浓度提升,促进热力型 NO_x 生成,但过量空气系数过高也会降低燃烧温度,抑制热力型 NO_x 生成 [24,25]。过量空气系数在 1.1~1.6 范围内变化时,氧浓度的增加起主要作用,所以 NO_x 浓度随着过量空气系数增加不断提高。

轮胎制作时为提高材料性能添加了硫化剂。废轮胎热解过程中部分硫会迁移到热解油中,通过元素分析测出热解油中硫含量为 0.78%,较柴油偏高。硫的存在不仅使热解油具有刺激性气味和腐蚀性,还会在燃烧过程中排放大量污染物。结果表明:热解油燃烧后烟气中 SO_2 浓度超过 850 mg/m^3 ,远高于新建燃油锅炉排放标准规定的 100 mg/m^3 [15]。为降低烟气中硫氧化物浓度,主要应从 3 个方面进行:1) 通过调节工艺参数抑制热解过程中硫向热解油的迁移 [26]; 2) 采用燃料油脱硫技术降低热解油硫含量,主要可分为加氢技术和非加氢技术 [27]; 3) 进行烟气脱硫。实验中,过量空气系数从 1.3 增加到 1.4 后, SO_2 浓度降低了 67.5 mg/m^3 。有研究表明:废轮胎热解油中所含的硫在燃烧过程中并未全部转换成 SO_2 ,部分硫随着多环芳烃未燃尽直接被排放 [26]。燃烧温度降低可能会使未燃尽硫增多,从而降低烟气中 SO_2 浓度。

2.3 喷射油压对热解油燃烧的影响

图 7 为过量空气系数为 1.2 条件下,不同油泵喷射压力工况下温度变化与烟气污染物质量浓度变化。可看出:提高油压时,径向 5 cm 处温度相对稳定,而径向 10, 15 cm 处火焰温度明显上升。油压从 1.5 MPa 提高到 1.75 MPa 时,温度增幅最大,径向 5 cm 处温度从 $934.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 上升到 $986.5 \text{ }^\circ\text{C}$,径向 10 cm 处温度从 $959.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 上升到 $1049.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。随着喷射压力增加,CO 浓度不断降低。已有研究表明:提升喷射压力会使油滴粒径下降 [28,29],比表面积增大。这使得

油滴更好地与空气接触反应,有助于充分燃烧,减少 CO 生成,提升燃烧温度。

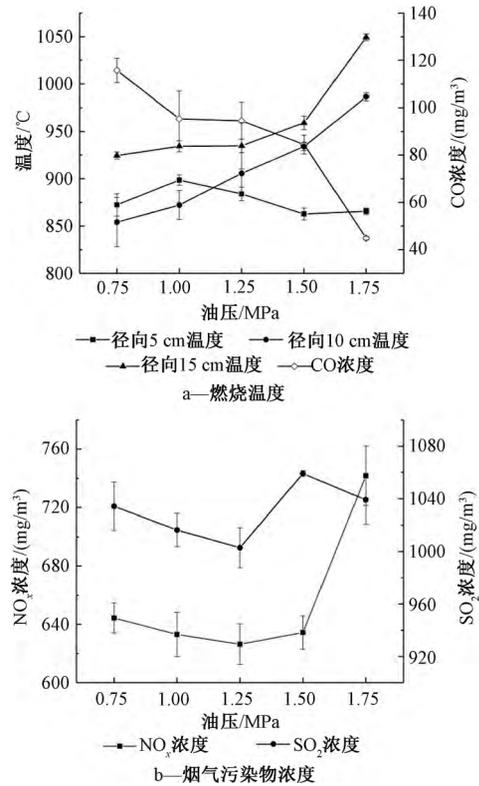


图 7 不同喷射油压下燃烧温度与烟气污染物浓度

Figure 7 Relationship between combustion temperature and pollutants concentration under different injection oil pressure

随着油压增加,烟气中 NO_x 浓度有明显增加,尤其是从 1.5 MPa 上升到 1.75 MPa, NO_x 浓度升高了 111.4 mg/m^3 。这是由于喷射压力提升使燃烧温度提高,从而促进了热力型 NO_x 生成。烟气中 SO_2 浓度维持在 1040 mg/m^3 左右说明,该系列工况下燃烧温度已足以使热解油中硫充分燃烧生成 SO_2 。

2.4 喷嘴喷孔直径对热解油燃烧的影响

图 8 为过量空气系数为 1.2,油压为 1.25 MPa 条件下,选用不同流量喷嘴产生的温度变化与烟气污染物质量浓度变化。同一型号喷嘴,流量越大,其喷孔直径越大。本文以不同流量的喷嘴来表示不同直径喷孔的喷嘴,可发现:在使用流量为 1.89, 2.84 L/h 时,燃烧温度均在径向 15 cm 处最高。而使用 3.79 L/h 流量喷嘴时,径向 10 cm 处温度超过径向 15 cm 处。喷射油压保持不变时,喷孔直径增大使油滴出喷嘴后径向速度降低,减小喷雾贯穿距。这会使火焰长度缩短,高温段更靠近喷嘴,径向 10 cm 处温度升高。喷嘴喷孔直径增大会使 CO 浓度降低。这是由于喷孔

直径增大后喷雾锥角扩大,使燃油雾束可以在炉膛里充分展开与空气接触反应,从而降低CO产生量^[30,31]。

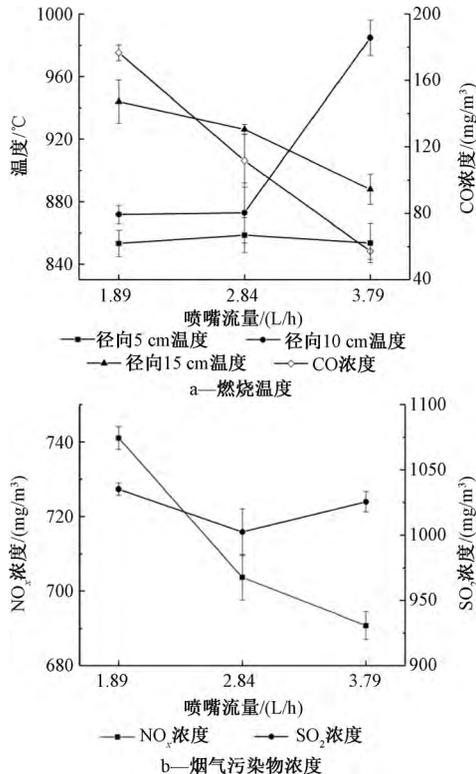


图8 不同流量喷嘴燃烧温度与烟气污染物浓度

Figure 8 Relationship between combustion temperature and pollutants' concentration of different nozzle flow

随着喷嘴流量从1.89 L/h上升到3.79 L/h,NO_x浓度从741 mg/m³降低至690 mg/m³。这是由于火焰长度缩短使烟气在高温区的停留时间减少,减少了NO_x生成^[25]。使用3种不同流量喷嘴燃烧产生的SO₂浓度保持在1000~1050 mg/m³。

3 结论

本文研究了中试规模废轮胎热解油的物质组成及理化性质,并通过实验讨论了过量空气系数、喷射油压、喷嘴孔径直径等因素对燃烧温度、主要污染物的影响,结论如下:

1)全钢胎热解油组分复杂,主要物质种类为烯烃与芳烃,其中占比27.83%的单环芳烃是导致热解油闪点偏低的主要原因。热解油黏度较低,属于轻质油。

2)过量空气系数为1.3时,燃烧温度最高。过量空气系数在1.4时,燃烧最为充分,此时烟气中CO浓度降为0。随着过量空气系数增加,NO_x浓度增加。过量空气系数超过1.3后,SO₂浓度明显降低。

3)喷射油压提升会提高燃烧温度,使燃烧更加充分,降低烟气中CO浓度,同时促进热力型NO_x的生成。在压力由1.5 MPa升至1.75 MPa时,燃烧温度、CO浓度与NO_x浓度变化增幅均为最大。

4)同一型号喷嘴孔径直径越大,喷雾贯穿距越小,雾化锥角越大。这会缩短火焰长度,减少烟气在高温区的停留时间,降低NO_x生成;同时油雾可以更大角度展开与空气接触反应,降低CO浓度。

以上结果对于废轮胎热解油的高效燃料化利用具有重要参考意义。

参考文献

- [1] EPI Z, MIHAJLOVI V, URI S, et al. Experimental analysis of temperature influence on waste tyre pyrolysis[J]. *Energies*, 2021, 14(17):5403.
- [2] 史一锋. 砥砺前行中的我国轮胎行业发展状况及展望[J]. *轮胎工业*, 2020, 40(12):707-713.
- [3] VESISLAVA, TOTEVA, KIRIL, et al. Waste tyres pyrolysis oil as a source of energy: methods for refining[J]. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 2019, 36(2):143-158.
- [4] 陆王琳, 金余其, 池涌, 等. 废轮胎热解制油技术及油品应用前景[J]. *化工进展*, 2007, 26(1):13-17.
- [5] 蒋智慧, 刘洋, 宋永猛, 等. 废旧轮胎热解及热解产物研究展望[J]. *化工进展*, 2021, 40(1):515-525.
- [6] UPADHYAY, MUKESH, PARTHASARATHY, et al. Influence of process conditions on product yield of waste tyre pyrolysis: a review[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2016, 33(8):2268-2286.
- [7] JANUSZEWICZ K, KAZIMIERSKI P, KOSAKOWSKI W, et al. Waste tyres pyrolysis for obtaining limonene[J]. *Materials*, 2020, 13(6):1359.
- [8] FARHAD M. A review on the thermochemical recycling of waste tyres to oil for automobile engine application[J]. *Energies*, 2021, 14(13):3837.
- [9] 刘海兵, 付兴民, 柳树成, 等. 初温和终温对废轮胎热解产物分布影响[J]. *环境工程*, 2012, 30(5):144-148.
- [10] CUNLIFFE A M, WILLIAMS P T. Composition of oils derived from the batch pyrolysis of tyres[J]. *Journal of Analytical & Applied Pyrolysis*, 1998, 44(2):131-152.
- [11] MURUGAN S, RAMASWAMY M C, NAGARAJAN G. Performance, emission and combustion studies of a DI diesel engine using distilled tyre pyrolysis oil-diesel blends[J]. *Fuel*, 2008, 87(10):2111-2121.
- [12] MURUGAN S, RAMASWAMY M C, NAGARAJAN G. The use of tyre pyrolysis oil in diesel engines[J]. *Waste Management*, 2008, 28(12):2743-2749.
- [13] WILLIAMS P T, BOTTRILL R P, CUNLIFFE A M. Combustion of tyre pyrolysis oil[J]. *Process Safety & Environmental*

- Protection, 1998, 76(4):291-301.
- [14] 裴宜星. 废轮胎回转窑热解油的应用研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- [15] 中国环境科学研究院. 火电厂大气污染物排放标准: GB 13223—2011[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2012.
- [16] PAN Y H, SIMA J Y, WANG X W, et al. BTEX recovery from waste rubbers by catalytic pyrolysis over Zn loaded tire derived char [J]. Waste Management, 2021, 131:214-225.
- [17] 郑璐恺,朱彦澄,周亚波. 芳香烃种类及含量对航空发动机燃烧的排放影响[J]. 航空动力学报, 2021, 36(6):1244-1252.
- [18] 胡园园,王志荣,黄天一. 多组分可燃液体闪点的实验研究[J]. 工业安全与环保, 2010, 36(5):57-59.
- [19] 刘庆磊. 高粘生物质焦油进料喷嘴的数值模拟及实验研究[D]. 济南:山东大学, 2013.
- [20] 郝斌. 不同燃料对柴油机排气颗粒物的影响研究[D]. 天津:天津大学, 2014.
- [21] 余鹏,姚宗路,胡乃涛,等. 生物质固体成型燃料 NO_x 排放规律研究现状[J]. 环境工程, 2015, 33(增刊 1):495-498.
- [22] VELMURUGAN K, SATHIYAGNANAM A P. Effect of biodiesel fuel properties and formation of NO_x emissions: a review [J]. International Journal of Ambient Energy, 2017, 38(5/6/7/8):644-651.
- [23] 金维平. 燃料型 NO_x 的生成机理及控制措施[J]. 中国科技信息, 2005(22A):17, 26.
- [24] 艾国红. 锅炉主要污染物形成机理分析[J]. 中国高新技术企业, 2010(9):85-87.
- [25] SUN J F, CATON J A, JACOBS T J. Oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fuelled diesel engines [J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2010, 36(6):677-695.
- [26] WILLIAMS P T, BOTTRILL R P. Sulphur-polycyclic aromatic hydrocarbons in tyre pyrolysis oil [J]. Fuel, 1995, 74(1):736-742.
- [27] 马锐,宋永一,张庆军,等. 船用残渣型燃料油脱硫技术进展[J]. 石油化工高等学校学报, 2021, 34(1):15-21.
- [28] 伏军,王振,袁文华,等. 喷射压力对生物柴油喷雾特性的影响[J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2020, 17(3):50-60.
- [29] GENG L M, WANG Y J, WANG Y Y, et al. Effect of the injection pressure and orifice diameter on the spray characteristics of biodiesel [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 7(3):331-339.
- [30] 王鹏里. 喷嘴喷孔结构参数对甲醇燃料雾化特性的影响研究[D]. 太原:太原理工大学, 2018.
- [31] 杨家俊,张冰洁,刘定平. 螺旋喷嘴雾化特性试验研究[J]. 环境工程, 2013, 31(5):71-74.

.....

(上接第 104 页)

- [11] ALTARAWNEH, SAEED, HARAHSHEH M, et al. Thermal decomposition of brominated flame retardants (BFRs): products and mechanisms [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 70:212-259.
- [12] WEBER R, KUCH B. Relevance of BFRs and thermal conditions on the formation pathways of brominated and brominated-chlorinated dibenzodioxins and dibenzofurans [J]. Environment International, 2004, 29(6):699-710.
- [13] LI Q Q, YANG F, SU G J, et al. Thermal degradation of polybrominated diphenyl ethers over as-prepared Fe₃O₄ micro/nano-material and hypothesized mechanism [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2016, 23:1540-1551.
- [14] JIN J, WANG Y, LIU W, et al. Polybrominated diphenyl ethers in atmosphere and soil of a production area in China: levels and partitioning [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(3):427-433.
- [15] 韦朝海,廖建波,刘浔,等. PBDEs 的来源特征、环境分布及污染控制[J]. 环境科学学报, 2015, 35(10):3025-3041.
- [16] 王丽. 亚铁—四聚磷酸活化分子氧高级氧化系统构建及其降解有机污染物性能研究[D]. 武汉:华中师范大学, 2015.
- [17] 赵玉坤,汪园园,籍宏伟,等. 多溴联苯醚的光催化还原脱溴[J]. 化学进展, 2017, 29(9):911-918.
- [18] 刘芑岩,高兰,张雅婧,等. 碱性及含硫化合物对十溴联苯醚热降解的影响[J]. 中国环境科学, 2020, 40(6):2658-2663.
- [19] LIANG G H, LU G N, WANG R, et al. The formation pathways of polybrominated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PBDD/Fs) from pyrolysis of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs): effects of bromination arrangement and level [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 399:123004.
- [20] 孙敬龙. 城市生活垃圾焚烧过程二噁英合成机理及拟制方法实验研究[D]. 天津:天津大学, 2012.
- [21] 林晓珊,吴惠勤,黄晓兰,等. 十溴二苯醚的降解机理研究[J]. 分析测试学报, 2013, 32(8):993-997.
- [22] GRABDA M, OLESZEK-KUDLAK S, SHIBATA E, et al. Gas phase thermodynamic properties of PBDEs, PBBs, PBPs, HBCD and TBBPA predicted using DFT method [J]. Journal of Molecular Structure THEOCHEM, 2007, 822(1/2/3):38-44.
- [23] NOSE K, HASHIMOT S, TAKAHASHI S, et al. Degradation pathways of decabromodiphenyl ether during hydrothermal treatment [J]. Chemosphere, 2007, 68(1):120-125.
- [24] FANG Z Q, QIU X H, CHEN J H, et al. Debromination of polybrominated diphenyl ethers by Ni/Fe bimetallic nanoparticles: influencing factors, kinetics, and mechanism [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 185(2/3):958-969.