

微波低温热解对垃圾衍生燃料脱氯及 改性性能试验研究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2017.06.002

刘珍¹ 王汉青²
周跃云¹ 刘建文¹

1. 湖南工业大学
城市与环境学院
湖南 株洲 412007
2. 南华大学
土木工程学院
湖南 衡阳 421001

摘要: 采用微波技术对垃圾衍生燃料(RDF)进行低温热解脱氯改性,探究微波改性条件(脱氯终温、加热速率、微波吸收剂)对RDF脱氯的效果及RDF燃烧性能的影响。研究表明:随着微波改性温度由220℃升高至300℃,脱氯率由16%上升到65%;温度在240℃以上,HCl产率在较小范围内波动,280℃时有效HCl产率最高,从能耗和有效HCl产率综合考虑,认为280℃是最佳微波低温脱氯温度。一定范围内,随着微波改性加热速率的加快,RDF的脱氯效果越好,当加热速率从4℃/min增加至13℃/min时,脱氯效率从57%上升至67%左右;但加热速率加快至15℃/min时,脱氯效果略差。相同温度条件下,添加SiC和石墨等作为微波吸收剂均能显著提高RDF的脱氯效果,SiC促进物料脱氯的效果更佳;温度较低(220℃)和较高(280℃和300℃)时,SiC提升物料脱氯效果更加显著。RDF经微波低温脱氯改性后,可燃性更好,燃烧稳定性能更佳,发热量显著提高至20 MJ/kg左右,与褐煤和烟煤接近。

关键词: 微波低温热解;垃圾衍生燃料;脱氯率;有效HCl产率;燃烧特性
中图分类号: X705 **文献标志码:** A

文章编号: 1674-7100(2017)06-0009-07

0 引言

近年来,中国人均生活垃圾日清运量为1.12 kg,在世界上处于较高水平^[1],我国垃圾处理的主要方法仍为填埋和焚烧,且焚烧的趋势越来越明显。按生活垃圾清运量统计分析,2013年垃圾填埋和焚烧率分别为60.7%和26.8%^[2]。然而,我国原生垃圾含水率较高(通常质量分数为40%~60%)、灰分含量高、

热值较低(一般为4 200~6 000 kJ/kg)。因此,垃圾直接焚烧存在热效率低、能耗高,燃烧不稳定及产生酸性气体、二噁英、飞灰二次污染等问题^[3-5]。

垃圾衍生燃料(refuse derived fuel, RDF)是通过可燃性垃圾进行破碎、分选、干燥、添加药剂、压缩成型等处理而制成的燃料。其具有稳定的燃烧特性、高能量密度、二次污染较少、便于运输等优点,已经引起了国内外研究者的关注^[6-10]。尽管RDF焚

收稿日期: 2017-09-11

基金项目: 湖南省研究生创新基金资助项目(CX2015B559),湖南工业大学博士生专项基金资助项目(2016ZBLB01),湖南工业大学博士科研基金资助项目(D2014001)

作者简介: 刘珍(1989-),女,湖南湘潭人,湖南工业大学博士生,主要研究方向为包装废弃物资源化利用技术及装备, E-mail: 272293677@qq.com

通信作者: 王汉青(1963-),男,湖南益阳人,南华大学教授,博士生导师,主要从事室内空气品质计算机仿真,建筑环境与设备节能技术方面的研究, E-mail: hqwang2011@126.com

烧过程中产生的二次污染较少，但垃圾中的氯元素污染主要来源于含氯废塑料，若未对其进行任何前处理，燃烧过程会产生 HCl 等酸性气体，腐蚀锅炉或与其他芳香族有机物发生反应形成二噁英等剧毒物质。目前，国内外通常的解决办法是在 RDF 成型过程中分选出含氯塑料，或加入消石灰、氧化钙等碱性物质对 HCl 进行固化，形成 CaCl_2 。但燃烧温度 800 $^{\circ}\text{C}$ 以上， CaCl_2 又将发生分解^[11]。因此，碱性物质固氯法并不能从根本上去除氯。

本研究采用微波低温热解脱氯对 RDF 进行脱氯处理，同时改变 RDF 的物化性质和燃烧性能。在 RDF 入炉燃烧前对其进行微波低温热解脱氯改性处理，能大幅度脱除 RDF 中的氯，燃烧时可减少 HCl 的排放及危害。RDF 经改性后，热值更高，能量密度更大，产生的二次污染更少，燃烧性能更佳，可广泛应用于供热工程、水泥制造和发电工程等领域。

1 试验部分

1.1 试验材料

原生垃圾选自长沙某生活小区，其组成成分的质量分数如下：厨余、果皮为 37.78%，废塑料包装为 28.89%，包装硬纸为 5.56%，纺织品为 6.67%，卫生纸为 10.00%，金属、玻璃瓶为 11.10%。选取其中废纸、废 PVC 塑料、纺织品等可燃物，按图 1 所示的工艺流程，制成直径为 1 cm、长约 3~5 cm 的燃料棒，即 RDF 成品，如图 2 所示，其干燥基元素分析和工业分析结果如表 1 所示。

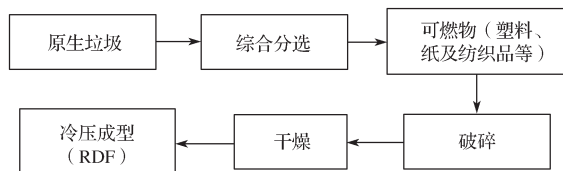


图 1 RDF 成品制备工艺
Fig. 1 Diagram of RDF preparation process

表 1 RDF 元素分析和工业分析结果
Table 1 Elemental analysis and proximate analysis of RDF

成分	C_{ad}	H_{ad}	S_{ad}	Cl_{ad}	O_{ad}^*	M_{ad}	V_{ad}	A_{ad}	FC_{ad}
质量分数 /%	39.82	3.42	0.43	9.04	47.29	2.29	58.86	27.40	11.45

注：1. C_{ad} , H_{ad} , S_{ad} , Cl_{ad} 分别为空气干燥基中碳、氢、硫、氯含量；
2. M_{ad} , V_{ad} , A_{ad} , FC_{ad} 分别为空气干燥基中水分、挥发分、灰分、固定碳含量；
3. O_{ad}^* 表示按差值计算得到的氧含量。



图 2 RDF 成品
Fig. 2 RDF samples

1.2 试验装置

微波低温热解脱氯试验装置如图 3 所示。该装置主要由微波发生器（NRX-1001，2.45 GHz，500 W，长沙隆泰微波热工有限公司），微波传输系统和控制系统组成。试验样品放入 1 000 mL 玻璃圆底烧瓶中，烧瓶置于保温桶中，热电偶从保温桶侧面底部开口处通入保温桶中用于测量样品温度。由于热电偶不是直接测量样品温度，因此试验温度稍有偏差。用手持式红外线温度测试仪对达到显示温度即停止加热的物料进行测试，实测温度比显示温度高 5 $^{\circ}\text{C}$ 左右，但不影响试验结果的比较分析。

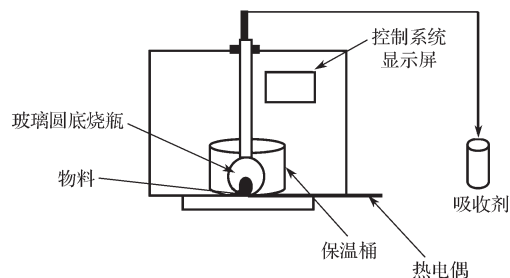


图 3 RDF 微波低温改性脱氯试验装置简图
Fig. 3 Diagram of microwave low temperature dechlorination experiment device to form modified RDF

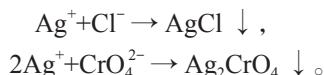
1.3 试验方法

通过试验测定 RDF 样品的有关参数值和相关性能指标，具体方法如下：

1) 试验条件。本研究主要考察不同脱氯终温（220, 240, 260, 280, 300 $^{\circ}\text{C}$ ）、不同加热速率（4, 9, 13, 15 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ ，对应微波功率分别为 500, 800, 1 200, 1 400 W）和微波吸收剂（SiC、石墨）对 RDF 脱氯率及改性效果的影响。每组试验物料取样 100 g，考察一个变量因子时，固定其他变量。需特别说明的是，考察不同加热速率和脱氯终温对物料升温特性及脱氯效果的影响时，试验过程均不添加微波吸收剂；

考察不同微波吸收剂的影响时, 其添加量为 50 g。且微波吸收剂均破碎至粒径 1 cm 左右, 与物料混合均匀。每组试验进行 3 次平行试验, 试验标准误差值控制在 4% 左右。

2) HCl 含量的测定。试验采用硝酸银滴定法测定 HCl 的产生量。先用 0.1 mol/L 的氢氧化钠溶液吸收 HCl, 将吸收液稀释至适当浓度, 并调节 pH 至中性或弱碱性环境, 以铬酸钾为指示剂, 用硝酸银滴定至出现砖红色沉淀即终止。其原理为:



3) 元素分析、工业分析和热值分析。按照 GB/T 28733—2012《固体生物质燃料全水分测定方法》, 采用长沙开元仪器股份有限公司生产的全自动工业分析仪 5E-MAG6700 进行工业分析。按照 DL/T 568—2013《燃料元素的快速分析方法》, 采用德国 Elementar 公司生产的 Vario Macro cube 分析仪对 C, H, N 含量进行分析; 采用长沙开元仪器股份有限公司生产的红外测硫仪 5E-IRS II 对全 S 含量进行分析; 按照 ISO 587—1997《固体矿物燃料用艾士卡 (Eschkal) 混合剂测定氯》的方法, 对 Cl 含量进行测定。按照 GB/T 30727—2014《固体生物质燃料发热量测定方法》, 采用湖南三德科技股份有限公司生产的量热仪 SDACM400 进行热值分析。

4) 着火点和燃尽温度的确定。对试样进行燃烧试验, 按照 GB/T 18511—2001《煤的着火温度测定方法》, 采用美国珀金埃尔默公司生产的热重分析仪 Perkin Elmer STA6000 得到试样的燃烧特性曲线, 通过燃烧特性曲线分析得到着火点、燃尽温度、最大燃烧速率等相关参数。

5) 脱氯率的计算。为了表征 RDF 在微波作用下的脱氯效果, 定义脱氯率为

$$\alpha = \frac{(m_0 \times c_0 - m_r \times c_r)}{m_0 \times c_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: m_0 为原始物料的质量, g;

m_r 为脱氯半焦的质量, g;

c_0 为原始物料氯元素的质量分数, %;

c_r 为脱氯半焦氯元素的质量分数, %。

6) HCl 产率的计算。为了表征微波能对 HCl 的选择性脱除作用, 定义有效 HCl 产率^[11]为

$$\beta = \frac{m(\text{HCl})}{m_0 - m_r} \times 100\%, \quad (2)$$

式中 $m(\text{HCl})$ 为产生 HCl 的质量, g。

7) RDF 燃烧性能综合评价。为综合评价 RDF 改性前后的燃烧性能, 引入可燃性指数 C_b 和稳燃性指数 G , 其定义分别为^[12]:

$$C_b = \frac{(dw/dt)_{\max}}{T_i^2}, \quad (3)$$

$$G = \frac{(dw/dt)_{\max}}{T_i \times T_{\max}}. \quad (4)$$

式(3)(4)中: $(dw/dt)_{\max}$ 为最大失重速率; T_i 为着火点温度; T_{\max} 为最大失重速率对应的温度。

$(dw/dt)_{\max}$ 越大, T_{\max} 越小, 说明 RDF 着火后的燃烧速率越快, 燃烧稳定性越强。所以, 可燃性指数 C_b 值主要反应 RDF 燃烧前期的反应能力, 该值越大, 可燃性越好; 稳燃性指数 G 主要反应 RDF 后续燃烧情况, G 值越大, 表明 RDF 的燃烧稳定性越好。

2 试验结果与分析

2.1 微波脱氯条件对 RDF 脱氯效果的影响

2.1.1 脱氯终温对 RDF 脱氯效果的影响

温度、加热速率和微波吸收剂是微波热处理技术的重要影响因子^[13]。脱氯终温对 RDF 脱氯效果的影响如图 4 所示。

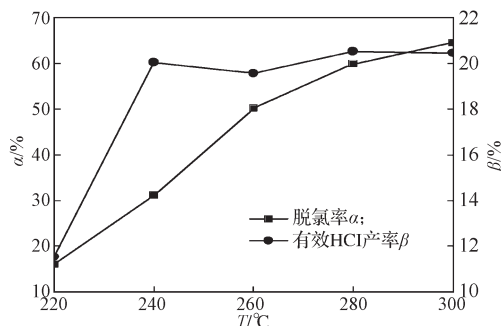


图 4 温度对 RDF 微波脱氯效果的影响
Fig. 4 Temperature effects on the RDF dechlorination ratio

从图 4 可以看出, 随脱氯终温的升高, 脱氯效率呈显著上升趋势。脱氯终温从 220 °C 升高至 300 °C, 脱氯率从 16% 显著上升至 65% 左右。

从介电特性进行分析, 微波加热物料时, 单位体积物料吸收的微波能密度公式为 $P = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2$ (其中 f 为微波频率, Hz; ϵ_0 为空气介电常数, $8.85 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$; ϵ'' 为介电损耗因子, $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$; E 为电场强度, $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$), 可知微波辐射下物料的加热程度取决于它的介电性能以及外部电场的作用^[14]。而

RDF 中 PVC 等材料与其他材料相比, 具有相对较高的损耗系数和损耗系数正切值, 因此其吸收微波的能力较强^[15-16], 可以迅速吸收微波能并转化成热能, 从而使物料升温并发生热解脱 HCl 反应。同时, 本研究采用的微波频率为 2.45 GHz, 在此高频率下, PVC 中 C—Cl 键的取向极化使总极化幅度减弱, 反应为介电常数的减小和损耗因子的增加, 即热解脱氯后物料的物理化学性质不断转变, 脱除 HCl 后的改性 RDF 吸收微波的能力优于 RDF 原样本, 吸收微波及将微波转化成热能的能力增强, 能量以热的方式在物料中进行消耗^[17]。这也是随着热解脱氯温度的升高 HCl 脱除效率显著升高的原因。

从热解反应进行分析, C—Cl 键的键能为 338 kJ·mol⁻¹, 而 C—C 键和 C—H 键的分别为 345 kJ·mol⁻¹ 和 413 kJ·mol⁻¹, 加热 PVC 热解时, C—Cl 键优先于 C—C 键和 C—H 键断裂^[11]。微波的选择性加热特性加强了 C—Cl 的断裂反应, 促进了氯自由基的形成。C—Cl 键断裂后, 一方面, C 原子表现为失电子或自由基状态, 与之相连的 H 原子变得易于脱除, 从而迅速与 Cl 原子生成 HCl。

温度在 240 °C 以上, 有效 HCl 产率在较小范围内波动, 280 °C 时 HCl 产率最高, 随后下降。即随着温度的升高, 不仅 HCl 的脱除量增加, 其他有机物的脱除量也增加。这是因为, 当物料所吸收能量达到 C—C 键和 C—H 键断裂所需能量时, PVC 等分子就会热解产生其他轻质碳氢化合物, 物料失重率增加, 有效 HCl 产率下降。失重越多, 物料热值损耗越大, 因此, 从能耗及有效 HCl 产率的角度综合考虑, 确定 280 °C 为最佳微波低温热解脱氯温度。

2.1.2 微波加热速率对 RDF 脱氯效果的影响

微波加热速率对 RDF 脱氯效果的影响见图 5。

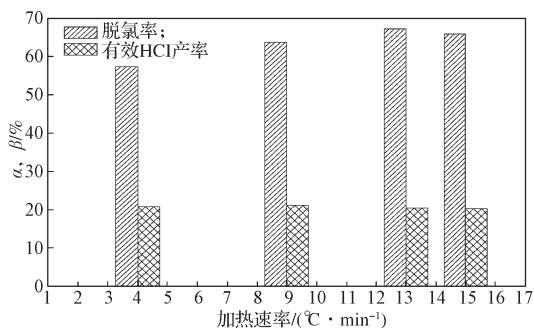


图 5 微波加热速率对 RDF 脱氯效果的影响
Fig. 5 Heating rate effects on the RDF dechlorination ratio

从图 5 可以看出, 当加热速率从 4 °C/min 增加

至 13 °C/min 时, 脱氯率从 57% 上升至 67%, 但加热速率加快至 15 °C/min 时, 脱氯效果降低。这是因为加热速率加快, 单位时间内输入的微波能量更多, 物料吸收的能量更多, 将微波能转换成的热能也更多, 更容易达到 HCl 脱除所需能量。但是, 由于微波本身有快速加热的特点, 若加热速率过快, 则单位温度热量停留的时间变短, 脱氯反应不能瞬时进行, 脱氯率反而降低。

2.1.3 微波吸收剂对 RDF 脱氯效果的影响

RDF 中的 PVC 等材料虽然较其他材料易吸收微波, 但吸收微波的能力仍然有限, 因此通过添加微波吸收剂促进其微波热效应。碳化硅 (SiC) 和石墨是良好的微波吸收剂且价格较低, 故本研究将其作为 RDF 微波低温脱氯改性吸收剂^[18-20]。图 6 和图 7 分别为 280 °C 下不同微波吸收剂对 RDF 改性脱氯效果的影响及不同温度下微波吸收剂 SiC 对 RDF 脱氯效果的影响。

由图 6 可知, 在 280 °C 温度条件下, 添加 SiC 和石墨以后, RDF 脱氯效果显著增加, 脱氯率从 55% 上升至 80% 左右, 且 SiC 促进物料脱氯的效果更好。这是因为, 添加微波吸收剂后, 微波吸收剂被微波直接加热, 其温度高于 RDF 的温度, 迅速加热的微波吸收剂将热量传递给 RDF。同时, 微波吸收剂材料的细小粒径 (比表面积大), 使得其与物料之间的热传递加快。另外, 微波吸收剂可以看作一个小的反应区, 缩小了化学反应环境, 缩短了传热距离; 而且, 微波加热时, 能量只是传递至物料而不会传递至微波反应器或反应器中的空气, 热量损失较少。因此, 物料在直接 (微波辐射) 和间接 (微波吸收剂颗粒的热传导) 加热下, 热解脱氯更好。

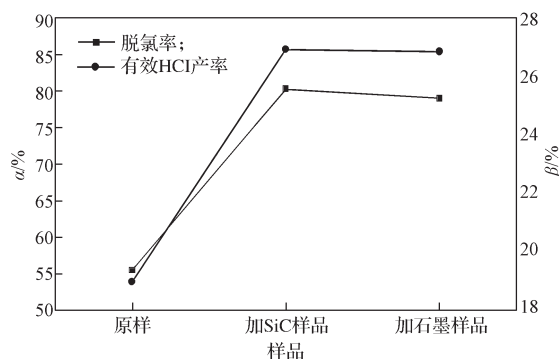


图 6 280 °C 下微波吸收剂对 RDF 脱氯效果的影响
Fig. 6 Microwave absorbents effects on the RDF dechlorination ratio at 280 °C

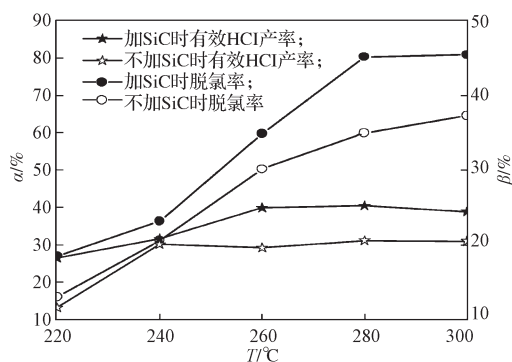


图7 不同温度下SiC对RDF脱氯效果的影响

Fig. 7 Effects of SiC on RDF dechlorination ratio at different temperatures

由图7可知, 220~300 °C温度条件下, 添加SiC后, 均能提高RDF的脱氯效果。温度较低(220 °C)和较高(280 °C和300 °C)时, 脱氯效果提升更显著。

2.2 微波改性RDF燃烧特性分析

RDF经微波低温热解改性后的元素分析和工业分析结果如表2所示, 燃烧特性如表3所示。

表2 RDF的元素分析及工业分析结果

Table 2 Elemental and proximate analysis of RDFs

样品	成分质量分数/%								
	C	H	S	Cl	O*	水分	挥发分	灰分	固定碳
原样	39.820	3.423	0.434	9.040	47.283	2.29	58.86	27.40	11.45
#1	37.560	3.524	0.462	8.670	49.784	0.23	46.88	38.56	14.33
#2	38.970	3.412	0.324	7.230	50.064	0.66	45.87	37.35	16.12
#3	41.150	3.850	0.155	5.890	48.955	0.13	45.74	35.31	18.82
#4	45.430	3.685	0.226	4.960	45.699	0.85	43.99	34.35	20.81
#5	47.760	3.543	0.187	4.480	44.03	0.26	41.65	37.66	20.43

注: 1. 原样表示未经微波低温脱氯样品, #1、#2、#3、#4、#5分别表示经微波220, 240, 260, 280, 300 °C温度下脱氯改性的样品; 2. O*表示按差值计算得到的氧含量。

从表2可知, 随微波低温热解脱氯温度的升高, Cl元素含量逐渐下降, 这是由于低温热解时, PVC等含氯塑料中的C—Cl键极易并首先断裂, 析出HCl; 而各温度条件下, 改性RDF的H元素含量基本高于RDF原样(#2除外, 可能由系统误差造成)。以240 °C为分界温度, 改性RDF中C元素含量呈现先低于RDF原样、再高于原样的趋势。这是因为, C元素含量与其自身脱除率及物料的整体失重率有关。温度较低时, 物料热解程度较低, Cl元素脱除率较低, 热解产生的有机挥发分较少, 但此时物料失重率也低, 因此C元素含量占比较小。温度较高时, 物料热解程度高, Cl元素脱除率增加, 产生有机挥发分相对较多, 失重率增加, 则C元素含量占比升高。

随脱氯终温的升高, 改性RDF的挥发分含量逐渐降低, 灰分含量上升, 固定碳含量显著升高。

表3 RDF燃烧特性参数

Table 3 Combustion characteristic parameters of RDFs

样品	失重质量分数/%	低位热值/(MJ·kg ⁻¹)	着火温度/°C	燃尽温度/°C	可燃指数/10 ⁻⁷	稳燃指数/10 ⁻⁷
原样	0	11.85	274	712	530.71	528.22
#1	12.40	12.18	298	709	557.45	543.70
#2	13.08	12.54	358	701	696.07	696.92
#3	23.50	15.08	359	706	800.76	800.76
#4	26.90	19.43	368	512	1 134.55	1 132.90
#5	28.40	20.27	375	501	1 197.29	1 198.91

从表3可知, 经微波低温热解脱氯改性后RDF的燃烧特性均发生了改变。

1) 改性RDF的着火点均高于原样, 且与微波脱氯温度具有较好的正相关性。这是因为经改性后, 燃料中挥发分含量降低, 达到初始燃烧所需温度升高。

2) 微波脱氯温度越高, 改性RDF发热量越高。RDF经260 °C以上温度微波脱氯改性后, 其热值接近褐煤和烟煤^[21]。300 °C改性后RDF热值较280 °C改性后增值不大, 但失重率更高, 热值损耗更多, 由此认为280 °C为最佳微波低温热解脱氯温度。

3) 微波脱氯温度越高, 改性RDF的可燃性越好, 燃烧稳定性越好, 燃烧性能更佳。这可能是因为, 对于小尺寸物料, 微波可以穿透物料直达物料中心, 热量首先集中在中心位置无法散出, 使中心位置温度高于周边温度。中心位置最早开始发生热解反应, 且温度越高, 物料热解反应更剧烈, HCl和有机挥发分等从物料中心穿出后形成气孔, 使物料内部的空隙增大, 从而增加氧与物料的接触面积, 有利于RDF的稳定燃烧^[22]。

3 结论

综上所述可得如下结论:

1) 随着微波脱氯热解温度由220 °C升高至300 °C时, 脱氯率由16%上升到65%。温度240 °C以上, HCl产率在较小范围内波动, 280 °C时有效HCl产率最高。从能耗和有效HCl产率综合考虑, 认为280 °C是最佳微波低温脱氯温度。

2) 随着微波加热速率的加快, RDF的脱氯效果越好, 当加热速率从4 °C/min增加至13 °C/min时, 脱氯率从57%上升至67%左右, 但加热速率加快至15 °C/min时, 脱氯效果略有降低。

3) 相同温度条件下, 添加SiC和石墨等作为微

波吸收剂均能显著提高 RDF 的脱氯效果, 且 SiC 促进物料热效应的能力更强。温度较低 (220 ℃) 和较高 (280 ℃和 300 ℃) 时, SiC 提升 RDF 脱氯效果更加显著。

4) RDF 经微波低温脱氯改性以后, 可燃性更好, 燃烧稳定性更佳, 热值显著提高至 20 MJ/kg 左右, 接近褐煤和烟煤的热值。

参考文献:

- [1] 宋国君, 杜倩倩, 马 本. 城市生活垃圾填埋处置社会成本核算方法与应用: 以北京市为例 [J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 57-63.
SONG Guojun, DU Qianqian, MA Ben. Social Cost Accounting for Solid Waste Landfill Disposal in Beijing[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(8): 57-63.
- [2] 中国环境保护产业协会城市生活垃圾处理专业委员会. 城市生活垃圾处理行业 2014 年发展综述 [J]. 中国环保产业, 2015(11): 15-23.
Speciality Committee of Urban Domestic Refuses Disposal of China Association of Environmental Protection Industry. Development Report on Disposal Industry of Urban Domestic Refuses in 2014[J]. China Environmental Protection Industry, 2015(11): 15-23.
- [3] 严 密, 熊祖鸿, 李晓东, 等. 中美城市生活垃圾焚烧处置现状和发展趋势 [J]. 环境工程, 2014, 32(3): 87-91.
YAN Mi, XIONG Zuhong, LI Xiaodong, et al. Development Tread and Present Status of Municipal Solid Waste Incineration in China and the US[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(3): 87-91.
- [4] 别如山, 王国庆. 采用循环流化床技术焚烧城市生活垃圾 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(11): 79-82.
BIE Rushan, WANG Guoqing. Application of CFB Combustion Technology to Incineration of Municipal Solid Waste[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2003, 4(11): 79-82.
- [5] CHEN C K, LIN C, LIN Y C, et al. Polychlorinated Dibenzo-p-Dioxins/Dibenzofuran Mass Distribution in Both Start-up and Normal Condition in the Whole Municipal Solid Waste Incinerator[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 160(1): 37-44.
- [6] EIKMANN T. Environmental Toxicological Assessment of Emissions from Waste Incinerators[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 1994, 3(4): 244-249.
- [7] 田忆凯, 陈 荣, 金晓龙, 等. 国外城市垃圾处理的新趋势 [J]. 化工生产与技术, 2000, 7(2): 26-29.
TIAN Yikai, CHEN Rong, JIN Xiaolong, et al. Garbage Disposal in Foreign Cities[J]. Chemical Production and Technology, 2000, 7(2): 26-29.
- [8] 邱大庆, 刘宁川, 迟文涛. 垃圾衍生燃料前景眺望 [J]. 环境保护, 2011(8): 35-36.
QIU Daqing, LIU Ningchuan, CHI Wentao. Prospect of Refuse Derived Fuel[J]. Environment Protection, 2011(8): 35-36.
- [9] 王小宏, 陈 灏, 赵玉柱. 关于垃圾衍生燃料标准的研究现状 [J]. 现代化工, 2016, 36(4): 1-3.
WANG Xiaohong, CHEN Hao, ZHAO Yuzhu. Current Situation of the Standards for Refuse Derived Fuel (RDF) [J]. Modern Chemical Industry, 2016, 36(4): 1-3.
- [10] 陈 江, 黄立维, 章旭明. 垃圾衍生燃料热重-红外联用法的热解特性 [J]. 环境科学与技术, 2008, 31(1): 29-32.
CHEN Jiang, HUANG Liwei, ZHANG Xuming. Pyrolysis Analysis of RDF by TG-FTIR Techniques[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(1): 29-32.
- [11] 任浩华, 王 帅, 王芳杰, 等. PVC 热解过程中 HCl 的生成及其影响因素 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(8): 2460-2469.
REN Haohua, WANG Shuai, WANG Fangjie, et al. HCl Generation Reaction and Its Influence Factors During PVC Pyrolysis[J]. Chian Environmental Science, 2015, 35(8): 2460-2469.
- [12] 范杜平. 基于 Kooij 定律新型燃烧指标在湛江电厂的应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
FAN Duping. The Application of New Combustion Indices Based on Kooij Law in Zhanjiang Power Plant[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2006.
- [13] ZHAO X, WANG W, LIU H, et al. Temperature Rise and Weight Loss Characteristics of Wheat Straw Under Microwave Heating[J]. Journal of Analytical & Applied Pyrolysis, 2014, 107(9): 59-66.
- [14] MISHRA R R, SHARMA A K. Microwave-Material Interaction Phenomena: Heating Mechanisms, Challenges and Opportunities in Material Processing[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2016, 81: 78-97.
- [15] RAO N S, O'BRIEN K T. Design Data for Plastics Engineers[M]. Cincinnati: Hanser Ublishers, 1998: 84.
- [16] YANG J, ZHANG P, CHENG G D, et al. Depth-

- Dependent Positron Annihilation in Different Polymers[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 280(8): 109–112.
- [17] MORIWAKI S, MACHIDA M, TATSUMOTO H, et al. A Study on Thermal Runaway of Poly(Vinyl Chloride) by Microwave Irradiation[J]. *Journal of Analytical & Applied Pyrolysis*, 2006, 76(1): 238–242.
- [18] 王 艳, 柯家骏. 微波场中碳化硅的加热特性研究 [J]. *稀有金属*, 1995, 19(4): 306–308.
WANG Yan, KE Jiajun. Study on the Heating Characteristics of SiC in Microwave Field[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 1995, 19(4): 306–308.
- [19] AÏSSA B, TABET N, NEDIL M, et al. Electromagnetic Energy Absorption Potential and Microwave Heating Capacity of SiC Thin Films in the 1–16 GHz Frequency Range[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(14): 5482–5485.
- [20] SALEMA A A, ANI F N. Microwave Induced Pyrolysis of Oil Palm Biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 3388–3395.
- [21] 崔文静, 周恭明, 陈德珍, 等. 矿化垃圾制备 RDF 的工艺研究及应用前景分析 [J]. *能源研究与信息*, 2006, 22(3): 131–136.
CUI Wenjing, ZHOU Gongming, CHEN Dezhen, et al. Discussion on the Process of Producing RDF from Aged Refuse and the Prospects of Application[J]. *Energy Research and Information*, 2006, 22(3): 131–136.
- [22] 赵凯峰, 孙 军, 赵 鹏, 等. 垃圾衍生燃料炭化物燃烧特性分析 [J]. *可再生能源*, 2009, 27(4): 81–83.
ZHAO Kaifeng, SUN Jun, ZHAO Peng, et al. Analysis on the Combustion Characteristics of Carbonized RDF[J]. *Renewable Energy Resources*, 2009, 27(4): 81–83.

Dechlorination and Modification Characteristics of Refuse Derived Fuel by Microwave Low Temperature Pyrolysis Technology

LIU Zhen¹, WANG Hanqing², ZHOU Yueyun¹, LIU Jianwen¹

(1. School of Urban and Environmental Sciences, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang Hunan 421001, China)

Abstract: Refuse derived fuel (RDF) was dechlorinated and modified by microwave low temperature pyrolysis technology. The effects of final dechlorination temperature, heating rate and microwave absorbent on the dechlorination ratio and the combustion performance of RDF were explored. The dechlorination ratio was increased with the increasing of the final dechlorination temperature. When the temperature rose from 220 °C to 300 °C, the dechlorination ratio increased from 16% to about 65%. With the temperature being above 240 °C, the effective HCl yield fluctuated in a small range and reached the maximum at 280 °C. As a result, according to the energy consumption and effective HCl yield, it was considered that 280 °C was the optimal temperature. Within a certain range, the faster of the microwave heating rate was, the higher of the dechlorination ratio. When the heating rate was increased from 4 °C •min⁻¹ to 13 °C •min⁻¹, the dechlorination ratio was raised from 57% to 67%, but the dechlorination ratio was slightly reduced when the heating rate reached up to 15 °C •min⁻¹. Moreover, adding SiC and graphite as microwave absorbents could significantly improve the dechlorination ratio, while SiC had better effect. At the low temperature(220 °C) and relatively high temperature(280 °C and 300 °C), the enhancing dechlorination effect of SiC was more significant. The RDF was with better combustible performance and stable combustion performance after being dechlorinated and modified by microwave low temperature pyrolysis technology. In addition, the calorific value of RDF was increased to about 20 MJ/kg which was close to that of lignite and bituminous coal.

Keywords: microwave low temperature pyrolysis technology; refuse derived fuel; dechlorination ratio; effective HCl yield; combustion performance