

文章编号:0254-0096(2018)10-2876-08

稻壳快速热解超临界乙醇提质系统的烟-环境分析

吕子婷, 仲兆平, 石 坤, 于 点

(东南大学 能源转化与过程测控教育部重点实验室 能源与环境学院, 南京 210096)

摘 要: 基于烟分析、生命周期评价和烟-环境分析方法,对稻壳热解超临界乙醇提质制取生物油系统进行能源利用率和环境性能的综合分析。结果表明,设计工艺下系统的烟效率为55.50%;生物油在全生命周期内的温室气体排放量为49.33 g CO₂-eq/MJ,超临界乙醇提质阶段化石乙醇的使用是生物油生命周期内的主要污染源;烟-环境分析表明,热解气冷凝器、焦炭燃烧炉膛、热解载气加热器和烟气冷却器等单元在减少稻壳热解提质制油系统的环境影响方面具有较大的优化潜力。

关键词: 烟-环境分析; 烟分析; 生命周期评价; 超临界乙醇提质

中图分类号: TK6

文献标识码: A

0 引 言

生物质快速热解制油是一种传统的液体燃料制取技术,但热解原油需提质改性才能用作车用燃料,超临界乙醇提质生物油(PY-USE)以稳定而易燃的含氧有机物为目标^[1],与其他提质方式相比,具有氢气消耗量少、反应条件更温和等优势。

烟分析同时基于热力学第一定律和第二定律,可揭示生物质热解提质过程的能量利用率,生命周期评价(LCA)作为一种环境管理工具,可计算从生物质生产到生物油使用的整个生命周期过程的环境污染物排放和能源消耗,但这2种方法均不能从单元水平分析生物能转化的环境影响的产生原因和主要产生位置。为此,本文引入 Meyer 等^[2]提出的烟-环境分析方法(后文简称 Ex-E 方法),该方法包括烟分析、LCA 和烟-环境分析3个步骤,通过计算热解提质过程的单位烟值物流的环境影响值,为从单元水平减少生物质热解提质过程的环境影响提供理论基础。Álvaro 等^[3]使用 Ex-E 方法对煤和生物质的联合燃烧系统进行了环境能源的综合分析。Morosuk 等^[4]以蒸汽压缩制冷机为例探索了 Ex-E 方法的应用,但目前使用 Ex-E 方法评价生物能转化过程的相关研究在国内外均鲜有报道。

针对目前的研究现状,本文采用 Ex-E 方法对 PY-USE 路线的能量利用率和环境性能进行分析,研究结果可为 PY-USE 路线的优化和生物质能的可持续发展提供理论基础。

1 方 法

1.1 评价模型

本文的 LCA 研究范围如图 1 所示,对系统边界作如下假设:1)不考虑生命周期过程中土地的直接或间接使用带来的环境影响;2)不考虑设备制

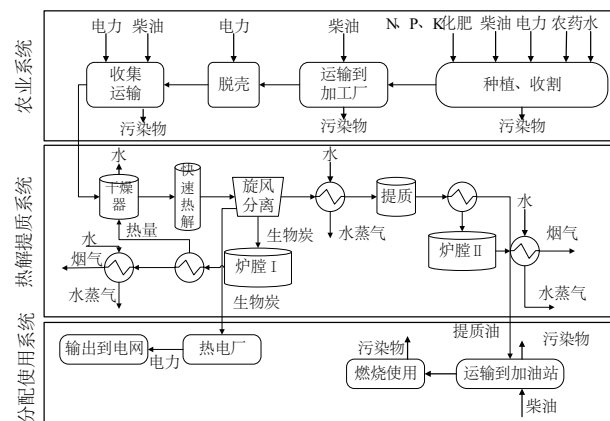


图1 生命周期评价范围

Fig. 1 Life cycle assessment scope definition

收稿日期: 2016-06-27

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)计划(2013CB228106); 国家自然科学基金(51276040)

通信作者: 仲兆平(1965—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事生物质能利用方面的研究。zzhong@seu.edu.cn

造和基础设施建设带来的环境影响;3)系统产生的电力可输送到电网,替代相同数量的电网电力的生产;4)生物质全生命周期的CO₂排放量为零。

生物质热解提质过程的 Aspen Plus 模拟流程图 2,图中数字代表物流编号,模拟过程中的主要控制参数见表 1,稻壳成分分析见表 2。

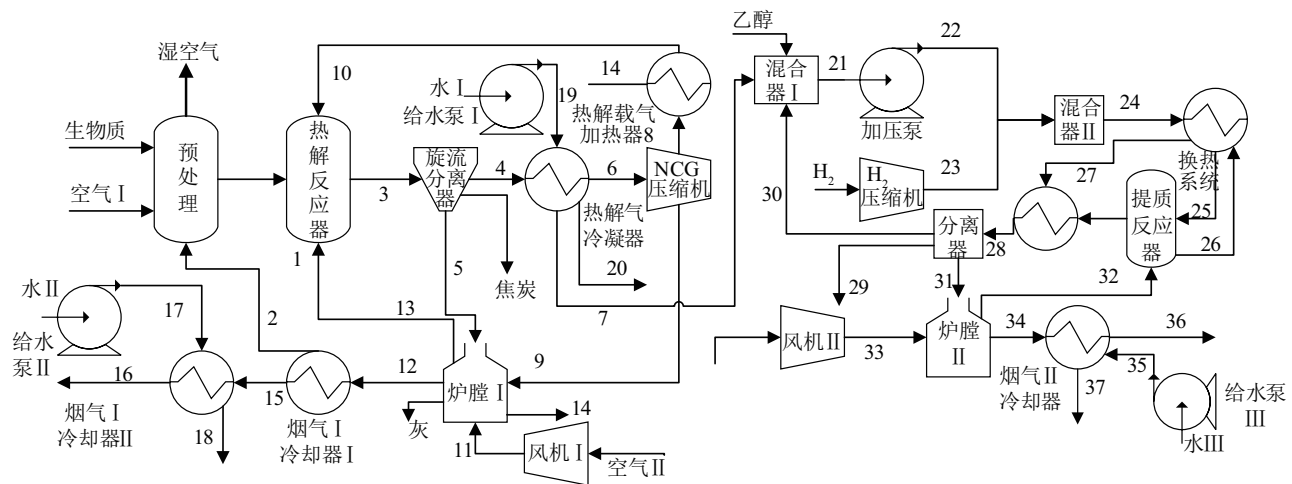


图2 Aspen Plus 仿真计算流程示意图
Fig. 2 Simplified diagram of Aspen Plus simulation process

表 1 仿真计算的主要物流输入和反应器控制参数

Table 1 Main material inputs and reactor control parameters of simulation calculation

项目	计算参数
生物质干燥	100 ℃,0.1 MPa,干燥后生物质含水量 7% ^[5]
热解	475 ℃,0.1 MPa ^[6] ,载气/生物质质量比 3:1 ^[5]
焦炭燃烧(炉膛 I)	609 ℃,燃烧热损失 1%生物质 LHV ^[5] ,过量空气系数 1.2,排烟温度 155 ℃ ^[7]
提质反应	300 ℃,2.0 MPa,乙醇/生物油质量比 2:1 ^[8]
提质气燃烧(炉膛 II)	燃烧热损失 1%生物质 LHV ^[5] ,过量空气系数 1.2,排烟温度 155 ℃ ^[7]

注: LHV —物质的低位发热量,kJ/kg。

表 2 稻壳的工业分析和元素分析^[9]

Table 2 Approximate and ultimate analysis of rice husk^[9]

工业分析/%				元素分析/%					热值/ MJ·kg ⁻¹
<i>M</i>	<i>FC</i>	<i>V</i>	<i>A</i>	[C]	[H]	[O]	[N]	[S]	
12.3	10.46	60.98	12.26	40	5.03	42.05	0.53	0.13	14.57

1.2 烟分析

根据烟分析理论,对于生物质热力学转化过程的烟分析,可忽略物质的势能烟和动能烟,只考虑物理烟和化学烟^[10],其中物理烟为:

$$\bar{e}_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \tag{1}$$

式中, *h*、*s*——物质的摩尔焓值和摩尔熵值,可通过查询 Aspen Plus 数据库或物性估计系统计算得到;下标 0——基准环境,本文的烟计算基于 Szargut

环境模型,基准环境温度 *T*₀ 为 298.15 K,压力 *p*₀ 为 101.325 kPa。

常规元素和物质的化学烟值可参考文献[11]计算,固体和非常规物质的化学烟需根据物质性质进行计算:

1)对于能通过 Aspen Plus 数据库查询到的吉布斯自由能的物质的化学烟为^[12]:

$$\bar{e}_{ch} = \sum_{React} n_i \times \bar{e}_{ch,i} + \Delta G \tag{2}$$

式中, n_i ——物质组成元素的摩尔分数, %;
 $\bar{e}_{ch,i}$ ——元素的化学焓值, kJ/mol; ΔG ——物质生成反应的吉布斯自由能, kJ/mol。

2) 生物质和生物油成分比较复杂, 其化学焓由式(3)~式(5)计算^[10]。

$$\beta_{biomass} = \left[1.0412 + 0.2160 \frac{[H]}{[C]} - 0.2499 \frac{[O]}{[C]} \cdot \left(1 + 0.7884 \frac{[H]}{[C]} \right) + 0.0450 \frac{[N]}{[C]} \cdot \left(1 - 0.3035 \frac{[O]}{[C]} \right)^{-1} \right]$$

(5)

式中, β ——关联因子; [C]、[H]、[O]、[N]、[S] ——C、H、O、N、S 元素的元素分析质量分数, %。

本文的焓分析指标包括单元焓损失 $E_{D,k}$ 、焓损失比例 $\varepsilon_{E_{D,k}}$ 和焓效率 η_k 。单元焓损失包括内部焓损失 $E_{D,k,i}$ 和外部焓损失 $E_{D,k,e}$ ($E_{D,k} = E_{D,k,i} + E_{D,k,e}$), 其中 $E_{D,k,i}$ 定义为流进单元的焓总量减去流出单元的焓总量, $E_{D,k,e}$ 定义为流出单元的总焓量中直接排放到环境中的焓量; 焓损失比例 $\varepsilon_{E_{D,k}}$ 定义为单元 k 的 $E_{D,k,i}$ 占总系统焓损失的比例 ($\varepsilon_{E_{D,k}} = E_{D,k,i} / E_{D,i}$); 焓效率 η_k 定义为单元收益焓 $E_{P,k}$ 和燃料焓 $E_{F,k}$ 的比值 ($\eta_k = E_{P,k} / E_{F,k}$)。

$$\bar{e}_{ch} = \beta \times LHV$$

(3)

$$\beta_{bio-oil} = 1.0401 + 0.1728 \frac{[H]}{[C]} + 0.0432 \frac{[O]}{[C]} +$$

(4)

$$0.2169 \frac{[S]}{[C]} \left(1 - 2.0628 \frac{[H]}{[C]} \right)$$

1.3 生命周期评价

图 1 显示了 LCA 的研究范围, LCA 的主要清单见表 3, 其中农业子系统的清单数据主要来自文献调查结果, 生物质转化过程的数据来自仿真结果, 生物油使用阶段的排放参考文献[13]的实验结果, 物资的生产过程清单参考 CLCD 数据库^[14]。水稻种植脱壳阶段的环境影响和资源消耗按照经济价值进行分配, 稻壳的分配系数为 1.3%。

本文采用 EDIP 2003 评价体系^[15]计算生物油生命周期的环境影响, 考虑的环境类型有全球变暖(GWP)、酸化(AP)、陆地富营养化(T-EP)、水体富营养化(A-EP-P 和 A-EP-N)、臭氧层耗竭(OD)、人体毒性气体(HTA)、水(HTW)和土壤(HTS)。

表 3 LCA 的主要数据清单
Table 3 Main data inventory of LCA

阶段	输入		输出	
	资源	数量	资源	数量
种植脱壳	化肥	42.26 kg ^[16]	稻壳	206.3 kg
	种植电力	100.48 kWh ^[16]		
	柴油	10.11 kg ^[16]		
	脱壳电力	128 kWh ^[16]		
生物质收集	稻壳	1 t	生物质	1 t
	电力	20.3 kWh ^[17]		
	8 t 柴油货车运输	46.67 t·km ^[17]		
热解提质	生物质	1.75 t	提质油	1 t
	乙醇	748 kg	水蒸气	2551.61 kWh
	氢气	194.41 m ³	焦炭	60.72 kg
	电力	213.50 kWh		
分配	提质油	1 t	提质油	1 t
	8 t 柴油货车运输	50 t·km		
使用	提质油	1 MJ	NO _x	0.034 g ^[13]
			CO	0.123 g ^[13]

1.4 烟-环境分析

根据 Meyer 等^[2]提出的 Ex-E 方法,本文引入物流的环境影响值 B_j 和物流单位烟环境影响值 b_j 的概念,可用式(6)计算:

$$B_j = E_j \times b_j \quad (6)$$

式中, B_j ——物流环境影响值, Pt/s; E_j ——物流烟值, kW; b_j ——物流单位烟环境影响值, Pt/kJ。

按照 Ex-E 方法,可将系统按工艺分为多个单元,流出每个单元的环境影响值等于流进该单元的环境影响值加上单元内生成的环境污染物造成的环境影响,此关系可用环境影响守恒方程式(7)表示,假设每个单元流出的物质的 b_j 相同。

$$\sum_{j=1}^n B_{j,k,\text{in}} + Y_k = \sum_{j=1}^m B_{j,k,\text{out}} \quad (7)$$

式中, n ——进入单元的物流数量; $B_{j,k,\text{in}}$ 、 $B_{j,k,\text{out}}$ ——流入、流出单元的物流的环境影响值; m ——流出单元的物流数量; Y_k ——单元内产生的环境影响值, Pt/s。

单元燃料 $b_{F,k}$ 和产品 $b_{P,k}$ 的单位烟环境影响值用式(8)和式(9)定义:

$$b_{P,k} = \frac{B_{P,k}}{E_{P,k}} \quad (8)$$

$$b_{F,k} = \frac{B_{F,k}}{E_{F,k}} \quad (9)$$

式中, $B_{P,k}$ 、 $E_{P,k}$ ——单元的产品环境影响值、产品烟值; $B_{F,k}$ 、 $E_{F,k}$ ——单元的燃料环境影响值、燃料烟值。

由式(7)~式(9)可知, $b_{P,k}$ 包含 $b_{F,k}$ 、烟损造成的环境影响值 ($b_{D,k,i}$ 及 $b_{D,k,e}$) 和单元内部生成的污染物带来的环境影响值 $b_{Y,k}$, 可用式(10)表示, 通过分解单元产品的单位烟环境影响值就能分析系统在单元水平的环境影响的主要产生原因和位置。

$$b_{P,k} = b_{F,k} + b_{D,k,i} + b_{D,k,e} + b_{Y,k} \quad (10)$$

式中, $b_{D,k,i} = \frac{E_{D,k,i}}{E_{P,k}}$, $b_{D,k,e} = \frac{E_{D,k,e}}{E_{P,k}}$ 。

另引入单位烟环境影响值相对标准差 r_k , 定义为 $r_k = \frac{b_{P,k} - b_{F,k}}{b_{F,k}}$, 其中 r_k 表示单元环境影响值减少的潜力, r_k 越大表示降低该单元的环境影响值越容易。

2 结果和讨论

2.1 烟分析结果

每生产 1 kW 的生物油, 系统各单元的烟分析计算结果见表 4。

表 4 烟分析结果(kW)

Table 4 Results of exergy analysis calculation (kW)

单元	$E_{P,k}$	$E_{F,k}$	$E_{D,k,i}$	$E_{D,k,e}$	$\varepsilon_{E_{P,k}}$	$\eta_i/\%$
预处理器	1.010	1.170	0.160	0.004	18.08	86.33
热解反应器	2.391	2.482	0.091	0	10.50	96.34
热解气冷凝器	0.047	0.209	0.162	0	18.78	22.55
热解载气加热器	0.073	0.126	0.053	0	6.14	57.87
炉膛 I	0.246	0.333	0.087	0.010	8.95	73.82
烟气 I 冷却器	0.015	0.035	0.020	0.017	0.44	42.41
NCG 压缩机	0.006	0.008	0.002	0	0.20	77.43
H ₂ 压缩机	0.006	0.007	0.001	0	0.13	84.37
提质反应器	2.094	2.199	0.105	0	12.13	95.24
换热器	0.034	0.040	0.006	0	0.73	84.28
炉膛 II	0.188	0.259	0.071	0.007	8.24	72.52
烟气 II 冷却器	0.093	0.177	0.084	0.011	8.47	52.74
总系统	1.136	2.048	0.911	0.048	100	55.50

由表 4 可知, 稻壳热解超临界乙醇提质系统的烟效率为 55.50%, 热解气冷凝器的内部烟损最大, 占总内部烟损的 18.78%, 烟效率仅为 22.55%, 这主要是由于为了减少热解气冷凝过程的二次分裂, 需采取骤冷的方式冷凝热解气, 热解气(475 ℃)与冷凝水(25 ℃)之间温差大, 能量利用率低; 生物质预处理的内部烟损仅次于热解气冷凝器, 占总系统烟损的 18.08%, 减少生物质预处理烟损失最直接的办法是充分利用其他单元排放的废热来为预处理单元提供热量; 提质反应器和热解反应器的内部烟损主要由化学能转化造成的能量降级引起, 因此该单元的烟损很难避免; 炉膛 I 的内部烟损主要由强烈的化学反应和燃烧热损失造成, 因此对燃烧空气进行预热是降低炉膛的烟损失、提高其烟效率的可行方法。

烟分析结果表明提高系统烟效率的关键在于对炉膛 I 的燃烧烟气余热的利用方式进行优化, 优化过程首先使用烟气加热载气至 200 ℃, 烟气温度降至 425 ℃后, 用于加热生物质干燥空气, 余热用于预

热炉膛燃烧空气,烟气温度降至 155 ℃后排放。优化烟气余热利用方式后,炉膛 I 的烟效率提高到 84.14%,预处理器烟效率为 86.58%,热解载气加热器烟效率为 64.27%,系统烟效率为 57.64%。

2.2 生命周期评价

本文计算得到的生物质和生物油的环境影响值分别为 8.33×10^{14} Pt/t 和 2.78×10^{11} Pt/MJ,生物油的 GHG 排放量 49.33 g CO₂-eq/MJ。图 3 为生物油环境影响的贡献源分析。结果表明,化石乙醇的使用是 OD、HTA、HTS 和 HTW 等环境影响的主要来源,因此有必要进一步降低提质过程的醇油比或使用环境性能更好的生物乙醇;氢气也是温室气体的主要来源,为降低生物油的环境影响,可考虑采用生物热解油重质组分提质、轻质组分重整制氢的工艺;稻壳是一种氮元素含量较高的生物质,导致稻壳焦炭的含氮量较其他生物炭高,焦炭燃烧生成的含氮化合物是富营养化和酸化的主要来源,而种植阶段的农药和化肥流失是水体含磷富营养化的主要原因。

2.3 烟-环境影响分析

基于式(6)和式(7),表 5 列出了稻壳转化过程

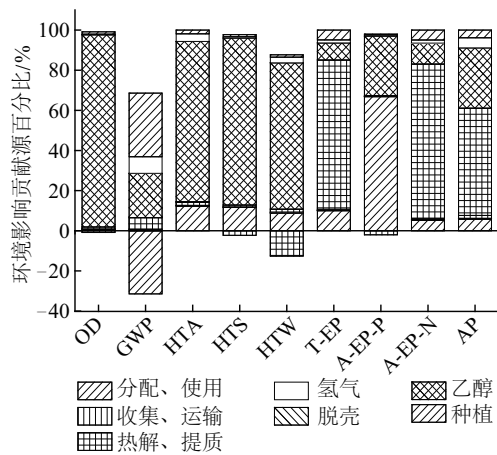


图3 生物油环境影响贡献源分析

Fig. 3 Contribution of the processes to the environmental impacts of the bio-oil

的环境影响值守恒线性方程组,编号对应的物流与图 2 中相同,计算系数为每生产 1 kW 生物油的物流的烟值,生物质、电力、乙醇等资源的 B_i 采用 LCA 结果,线性方程组计算结果见表 6。从表 6 可看出,沿着生产过程进行的方向,由于烟损失的存在和资源的投入,各物流的 b_i 逐渐增加,其中热解油(b_7)和提质油(b_{29})分别为 1.75×10^8 和 2.98×10^8 Pt/kJ。

表 5 烟-环境影响分析方程

Table 5 Exergoenvironmental balance equation for each subsystem

编号	单元	烟环境方程	编号	单元	烟环境方程
1	预处理	$B_{\text{biomass}} + B_2 + Y_{\text{预处理}} = B_1 + B_{\text{W-air}}$	13	混合器 I	$B_7 + B_{30} + B_{\text{ethanol}} = B_{21}$
2	热解反应器	$B_1 + B_{10} + B_{13} = B_3$	14	加压泵	$B_{21} + Y_{\text{加压泵}} = B_{22}$
3	旋流分离器	$B_3 = B_4 + B_5$	15	H ₂ 压缩机	$B_{\text{H}_2} + Y_{\text{H}_2\text{压缩机}} = B_{23}$
4	热解气冷凝器	$B_4 + B_{19} = B_6 + B_{20} + B_7$	16	混合器 II	$B_{22} + B_{23} = B_{24}$
5	给水泵 I	$Y_{\text{给水泵 I}} = B_{19}$	17	换热器	$B_{24} + B_{26} = B_{25} + B_{27}$
6	NCG压缩机	$Y_{\text{NCG压缩机}} + B_6 = B_8 + B_9$	18	提质反应器	$B_{25} + B_{33} = B_{26}$
7	热解载气加热器	$B_8 = B_{14} + B_{10}$	19	提质产物降温器	$B_{27} = B_{28}$
8	风机 I	$Y_{\text{风机 I}} = B_{11}$	20	分离器	$B_{28} = B_{29} + B_{30} + B_{31}$
9	炉膛 I	$B_5 + B_{11} + B_9 + Y_{\text{炉膛 I}} = B_{14} + B_{13} + B_{12} + B_{\text{ASH}}$	21	风机 II	$Y_{\text{风机 II}} = B_{33}$
10	烟气 I 冷却器 I	$B_{12} = B_{15} + B_2$	22	炉膛 II	$B_{31} + B_{33} + Y_{33} = B_{32} + B_{34}$
11	给水泵 II	$Y_{\text{给水泵 II}} = B_{17}$	23	给水泵 III	$Y_{\text{给水泵 III}} = B_{35}$
12	烟气 I 冷却器 II	$B_{17} + B_{15} = B_{16} + B_{18}$	24	烟气 II 冷却器	$B_{35} + B_{20} + B_{18} + B_{34} = B_{36} + B_{37}$

图 4 为主要单元的烟环境影响值分解结果,表 7 为单元的 η_k 与 r_k 的对比结果。随着生产过程的进

行,单元产品的 $b_{\text{F},k}$ 应逐渐增加,但热解气冷凝器单元的 $b_{\text{F},k}$ 较低,这是因为冷凝水作为投入资源环境

表6 物流烟-环境影响计算结果

Table 6 Calculation results of exergoenvironmental equation

10⁷ Pt/kJ

物流	数值	物流	数值	物流	数值	物流	数值
b_1	6.83	b_{11}	21.12	b_{21}	28.55	b_{31}	29.77
b_2	40.93	b_{12}	40.93	b_{22}	28.56	b_{32}	41.46
b_3	16.13	b_{13}	40.93	b_{23}	18.57	b_{33}	21.12
b_4	16.13	b_{14}	40.93	b_{24}	28.16	b_{34}	41.46
b_5	16.13	b_{15}	40.93	b_{25}	28.27	b_{35}	18.36
b_6	17.53	b_{16}	44.60	b_{26}	29.75	b_{36}	51.25
b_7	17.53	b_{17}	5.69	b_{27}	29.75	b_{37}	51.25
b_8	17.81	b_{18}	44.60	b_{28}	29.77		
b_9	17.81	b_{19}	5.25	b_{29}	29.77		
b_{10}	20.56	b_{20}	17.53	b_{30}	29.77		

影响值小,降低了单元的 $b_{F,k}$ 。由表7可知, $b_{D,k,i}$ 最大的单元是热解载气加热器,这与该单元的 η_k 低和 $b_{F,k}$ 值高均相关;烟气Ⅱ冷却器的 $b_{D,k,i}$ 仅次于热解载气加热器,主要是因为烟气Ⅱ作为末端产品,单元的 $b_{F,k}$ 值高,利用冷凝水冷却烟气的方式的烟效率也较低,为了降低烟气Ⅱ冷却器的环境影响,相比于提高该单元的烟效率,降低单元 $b_{F,k}$ 值更可行;而焦炭燃烧释放的污染物质是炉膛Ⅰ的单元 $b_{F,k}$ 值的主要来源。

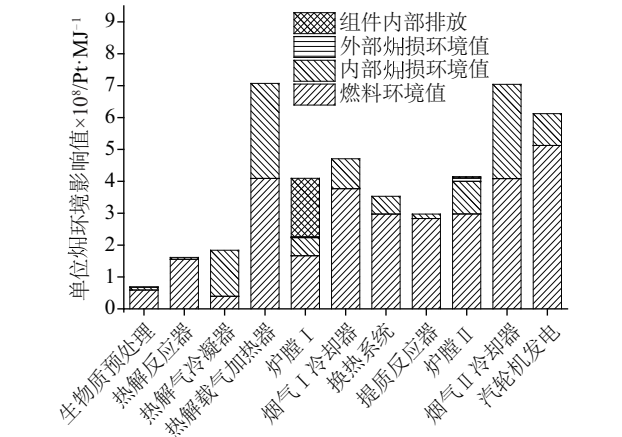


图4 单位烟环境影响值分解结果

Fig. 4 Per unit exergoenvironmental values decomposition results

表7中 r_k 的计算结果表明,热解气冷凝器、炉膛Ⅰ、载气加热器和烟气Ⅱ冷却器等单元的优化潜力较大,因此从烟-环境角度出发,提高上述单元的 η_k

或降低单元内部污染物质排放,能更大限度地降低系统的环境影响。由以上分析可知,热解气冷凝器和烟气Ⅱ冷却器的优化主要从提高冷凝的能量利用率、降低烟损失的角度出发;炉膛Ⅰ的优化主要从增加焦炭燃烧排放污染物的处理装置角度出发。

表7 烟效率和烟-环境指标对比			
Table 7 Comparison between exergy efficiency and exergoenvironmental index			
单元	$\eta_d/\%$	$b_{D,k,i}/\text{Pt}\cdot\text{s}^{-1}$	$r_d/\%$
生物质干燥器	86.33	9.12×10^6	0.158
热解反应器	96.34	5.90×10^6	0.038
载气加热器	57.87	2.98×10^8	0.728
热解气冷凝器	22.55	1.44×10^8	3.642
炉膛Ⅰ	73.82	5.68×10^7	1.457
烟气Ⅰ冷却器	42.41	9.37×10^7	0.248
换热系统	84.28	5.55×10^7	0.187
炉膛Ⅱ	72.52	1.02×10^8	0.393
烟气Ⅱ冷却器	52.74	2.96×10^8	0.724

3 结 论

- 1)设计工况下,系统的烟效率为55.50%,烟损主要发生在热解气冷凝器、生物质预处理、提质反应器、热解反应器、炉膛Ⅰ和炉膛Ⅱ等单元内。
- 2)生命周期评价采用EDIP 2003评价体系计算,结果表明生物油的环境影响值为 2.78×10^{11} Pt/MJ, GHG排放量为49.33 g CO₂-eq/MJ,生物油提质阶段化石乙醇和氢气的使用是评价系统环境影响的主要来源。
- 3)本文分析表明,烟-环境分析方法能确定生物质转化过程内部环境影响的产生原因和主要产生位置,同时热解气冷凝器、炉膛Ⅰ、载气加热器和烟气Ⅱ冷却器等单元在优化系统环境影响方面的潜力较大,优化主要从提高单元能量利用率,降低烟损失角度出发。

[参考文献]

[1] 张冀翔. 生物油在亚临界、超临界流体中的制备与提质改性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

[1] Zhang Jixiang. Production and upgrading of bio-oil in sub-and supercritical fluids[D]. Hangzhou: Zhejiang

- University, 2013.
- [2] Meyer L, Tsatsaronis G, Buchgeister J, et al. Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems[J]. *Biological Cybernetics*, 2009, 34(1): 75—89.
- [3] Álvaro Restrepo, Bazzo E. Co-firing: An exergoenvironmental analysis applied to power plants modified for burning coal and rice straw[J]. *Renewable Energy*, 2016, 91: 107—119.
- [4] Morosuk T, Tsatsaronis G, Koroneos C. Environmental impact reduction using exergy-based methods[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 118: 118—123.
- [5] Jones S, Meyer P, Snowdenswan L, et al. Process design and economics for the conversion of lignocellulosic biomass to hydrocarbon fuels: Fast pyrolysis and hydrotreating bio-oil pathway[R]. National Renewable Energy Laboratory (NREL) Golden, CO., 2013.
- [6] Lu Qiang, Zhu Xifeng. Analysis on chemical and physical properties of bio-oil pyrolyzed from rice husk[J]. *Journal of Analytical & Applied Pyrolysis*, 2008, 82(2): 191—198.
- [7] Ringer M, Putsche V, Scahill J. Large-scale pyrolysis oil production: A technology assessment and economic analysis[R]. National Renewable Energy Laboratory (NREL) Golden, CO., 2006.
- [8] Chen Wen, Luo Zhongyang, Yu Chen, et al. Upgrading of bio-oil in supercritical ethanol: Catalysts screening, solvent recovery and catalyst stability study[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2014, 95: 387—393.
- [9] 王 琦. 生物质快速热解制取生物油及其后续应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [9] Wang Qi. Study on bio-oil production from biomass fast pyrolysis and application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [10] Keedy J, Prymak E, Macken N, et al. Exergy based assessment of the production and conversion of switchgrass, equine waste, and forest residue to bio-oil using fast pyrolysis[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(1): 529—539.
- [11] Morris D R, Szargut J. Standard chemical exergy of some elements and compounds on the planet earth[J]. *Energy*, 1986, 11(11): 733—755.
- [12] 傅秦生. 能量系统的热力学分析方法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005, 102—150.
- [12] Fu Qinsheng. Thermodynamic analysis method of energy system[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2005, 102—150.
- [13] 吴何来. 生物质热解提质燃油内燃机燃烧及排放试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [13] Wu Helai. Experimental study upon combustion and emission properties of upgraded biomass pyrolysis oil on IC engine[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [14] Ike & Scu-iscp (2015). Chinese core Life Cycle Database version 0.8. Available at eBalance 4.7 software [EB/OL]. www.ike-global.com, 2016-06-05.
- [15] Frischknecht R, Jungbluth N, Althaus H J, et al. Implementation of life cycle impact assessment methods[R]. Ecoinvent Report, 2007.
- [16] 曹黎明, 李茂柏, 王新其, 等. 基于生命周期评价的上海市水稻生产的碳足迹[J]. *生态学报*, 2014, 34(2): 491—499.
- [16] Cao Liming, Li Maobo, Wang Xinqi, et al. Life cycle assessment of carbon footprint for rice production in Shanghai[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(2): 491—499.
- [17] 邢爱华, 刘 罡, 王 垚, 等. 生物质资源收集过程成本、能耗及环境影响分析[J]. *过程工程学报*, 2008, 8(2): 305—313.
- [17] Xing Aihua, Liu Guang, Wang Yao, et al. Economic, energy and environment analysis on biomass collection process[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2008, 8(2): 305—313.

EXERGOENVIRONMENTAL ANALYSIS OF RICE HUSK FAST PYROLYSIS AND BIO-OIL UPGRADING IN SUPERCRITICAL ETHANOL SYSTEM

Lyu Ziting, Zhong Zhaoping, Shi Kun, Yu Dian

*(Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, School of Energy and Environmental,
Southeast University, Nanjing 210096, China)*

Abstract: The comprehensive analysis of energy utilization rate and environmental performance of rice husk pyrolysis supercritical ethanol upgrading to produce bio-oil system was carried out based on exergy analysis, life cycle assessment (LCA) and exergo-environmental analysis. The results show that the exergy efficiency of the system is 55.5% under the design process, the greenhouse gas emissions of bio-oil throughout the life cycle are 49.33 g CO₂-eq/MJ, the use of fossil ethanol in supercritical ethanol upgrading stage is the main pollution source in the bio-oil life cycle. The exergo-environmental analysis results reveal that the pyrolysis gas condenser, coke combustor, pyrolysis carrier gas heater and the flue gas cooler etc. units have great optimization potential in reducing environmental impacts of rice husk pyrolysis and upgrading oil system

Keywords: exergoenvironmental analysis; exergy analysis; life cycle assessment; supercritical ethanol upgrading